

Mikrobiyologlardan İnsanlığa Uyarı: Mikroorganizmalar ve İklim Değişikliği

Ricardo Cavicchioli¹*, William J. Ripple², Kenneth N. Timmis³, Farooq Azam⁴, Lars R. Bakken⁵, Matthew Baylis⁶, Michael J. Behrenfeld⁷, Antje Boetius^{8,9}, Philip W. Boyd¹⁰, Aimée T. Classen¹¹, Thomas W. Crowther¹², Roberto Danovaro^{13,14}, Christine M. Foreman¹⁵, Jef Huisman¹⁶, David A. Hutchins¹⁷, Janet K. Jansson¹⁸, David M. Karl¹⁹, Britt Koskella²⁰, David B. Mark Welch²¹, Jennifer B. H. Martiny²², Mary Ann Moran²³, Victoria J. Orphan²⁴, David S. Reay²⁵, Justin V. Remais²⁶, Virginia I. Rich²⁷, Brajesh K. Singh²⁸, Lisa Y. Stein²⁹, Frank J. Stewart³⁰, Matthew B. Sullivan³¹, Madeleine J. H. van Oppen^{32,33}, Scott C. Weaver³⁴, Eric A. Webb¹⁷ and Nicole S. Webster^{33,35}

¹School of Biotechnology and Biomolecular Sciences, The University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia.

²Department of Forest Ecosystems and Society, Oregon State University, Corvallis, OR, USA.

³Institute of Microbiology, Technical University Braunschweig, Braunschweig, Germany.

⁴Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, La Jolla, CA, USA.

⁵Faculty of Chemistry, Biotechnology and Food Science, Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norway.

⁶Institute of Infection and Global Health, University of Liverpool, Liverpool, UK.

⁷Department of Botany and Plant Pathology, Oregon State University, Corvallis, OR, USA.

⁸Alfred Wegener Institute, Helmholtz Center for Marine and Polar Research, Bremerhaven, Germany.

⁹Max Planck Institute for Marine Microbiology, Bremen, Germany.

¹⁰Institute for Marine and Antarctic Studies, University of Tasmania, Hobart, TAS, Australia.

¹¹Rubenstein School of Environment and Natural Resources, and The Gund Institute for Environment, University of Vermont, Burlington, VT, USA.

¹²Institute of Integrative Biology, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.

¹³Department of Life and Environmental Sciences, Polytechnic University of Marche, Ancona, Italy.

¹⁴Stazione Zoologica Anton Dohrn, Naples, Italy.

¹⁵Center for Biofilm Engineering, and Chemical and Biological Engineering Department, Montana State University, Bozeman, MT, USA.

¹⁶Department of Freshwater and Marine Ecology, Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics, University of Amsterdam, Amsterdam, Netherlands.

¹⁷Department of Biological Sciences, Marine and Environmental Biology Section, University of Southern California, Los Angeles, CA, USA.

¹⁸Biological Sciences Division, Earth and Biological Sciences Directorate, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, USA.

¹⁹Daniel K. Inouye Center for Microbial Oceanography: Research and Education, School of Ocean and Earth Science & Technology, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI, USA.

²⁰Department of Integrative Biology, University of California, Berkeley, Berkeley, CA, USA.

²¹Marine Biological Laboratory, Woods Hole, MA, USA.

²²Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of California, Irvine, Irvine, CA, USA.

²³Department of Marine Sciences, University of Georgia, Athens, GA, USA.

²⁴Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.

²⁵School of Geosciences, University of Edinburgh, Edinburgh, UK.

²⁶Division of Environmental Health Sciences, School of Public Health, University of California, Berkeley, Berkeley, CA, USA.

²⁷Microbiology Department, and the Byrd Polar and Climate Research Center, The Ohio State University, Columbus, OH, USA.

²⁸Hawkesbury Institute for the Environment, and Global Centre for Land-Based Innovation, Western Sydney University, Penrith, NSW, Australia.

²⁹Department of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada.

³⁰School of Biological Sciences, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA.

³¹Department of Microbiology, and Department of Civil, Environmental and Geodetic Engineering, and the Byrd Polar and Climate Research Center, The Ohio State University, Columbus, OH, USA.

³²School of BioSciences, The University of Melbourne, Parkville, VIC, Australia.

³³Australian Institute of Marine Science, Townsville, QLD, Australia.

³⁴Department of Microbiology and Immunology, and Institute for Human Infections and Immunity, University of Texas Medical Branch, Galveston, TX, USA.

³⁵Australian Centre for Ecogenomics, University of Queensland, Brisbane, QLD, Australia.

Mikrobiyologlardan İnsanlığa Uyarı: Mikroorganizmalar ve İklim Değişikliği

Özet

Yaşamakta olduğumuz Antroposen* çağında iklim değişikliği dünya üzerindeki yaşam biçimlerinin büyük çoğunluğunu etkilemektedir. Mikroorganizmalar kendilerinden daha ileri tüm yaşam biçimlerinin mevcudiyetini desteklemektedir. İnsan kaynaklı iklim değişikliğine insanların ve (halen keşfedemediklerimiz dâhil) dünyadaki diğer yaşam biçimlerinin nasıl dayanabileceklerini anlayabilmek için mikrobiyal “görünmeyen çoğunluğa” ait bilgilerimizi ortaya koymak hayati önemde olacaktır. Sadece mikroorganizmaların iklim değişimlerini nasıl etkilediğini değil (sera gazlarının üretimi ve tüketimi gibi), aynı zamanda mikroorganizmaların da iklim değişimlerinden ve diğer insan faaliyetlerinden nasıl etkilendiklerini de öğrenmek zorundayız. Bu Uzlaşma Bildirisi, iklim değişimi biyolojisinde mikroorganizmaların merkezi ve küresel önemini ortaya koymaktadır. Bildirge aynı zamanda, iklim değişikliğinin etkilerinin büyük ölçüde mikroorganizmaların çevre açısından sürdürülebilir bir gelecek yaratmada vazgeçilmez olan tepkilerine bağlı olacağına insanların dikkatini çekmektedir.

İnsanoğlunun dünya üzerindeki tutum ve davranışları, iklim ve çevre üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmekte, bu da hayvan ve bitki türleri üzerinde benzeri görülmemiş yok oluşlara, dünya üzerindeki biyoçeşitliliğin azalmasına yol açmakta¹⁻⁴, dünya üzerindeki hayvan ve bitki yaşamını tehdit etmektedir.⁵ Hayvan ve bitkilere ait tür, topluluk ve yaşam ortamlarının kaybolması nispeten daha iyi araştırılmış, belgelendirilmiş ve halka mal olmuş konulardır.⁶ Oysa, mikroorganizmalar iklim değişikliği bağlamında, özellikle iklim değişikliğinin mikroorganizmalar üzerindeki etkileri bakımından bugüne dek pek tartışma konusu olmamışlardır. Çıplak gözle görülemeyip elle tutulamayacak kadar küçük⁷ oldukları halde, aşırı yoğun miktarda bulunmaları (*bakteri ve arkaelarin toplam nüfusunun yaklaşık 10^{30} olduğu tahmin edilmektedir*⁸) ve yüksek çeşitlilik göstermeleri nedeniyle sağlıklı küresel ekosistem için vazgeçilmezdirler; bir başka deyişle, mikroplar alemi biyosferin yaşam destek sistemini oluşturur. İnsanların mikroorganizmalar üzerindeki etkileri daha az belirgin ve kesinlikle daha az özellikli olduğu halde, mikrobiyal biyoçeşitlilik ve insan aktivitelerinde oluşacak değişikliklerin diğer organizmaların direnç düzeylerini olumsuz etkileyerek iklim değişikliğine verilecek yanıtı zarar vermesinden endişe duyulmaktadır.⁹

Mikroorganizmalar besin maddeleri ile karbonun doğadaki döngüsünde, insanın da içinde yer aldığı hayvanlar ile bitkilerin sağlığında, tarımda ve küresel yiyecek ağında anahtar role sahiptir. Mikroorganizmalar dünya üzerinde makroskopik organizmaların yaşadığı her yerde yaşadıkları gibi, derin ve diğer uç ortamlarda da yaşayabilen tek canlı formlarıdır. Mikroorganizmaların dünyadaki varlığının yaşamın başladığı düşünülen yaklaşık 3,8 milyar yıl öncesine kadar indiği düşünülmektedir; gelecekte

*insanoğlunun dünyaya olan etkisinin en üst düzeye çıktığı Sanayi Devrimi'nden bugüne olan sürece ve sonrasına verilen isim; İnsan Çağı.

yaşam yok olduğunda dahi varlıklarını sürdürmeleri beklenmektedir. İklim değişikliği üzerinde de önemli rol oynadıkları düşünülen mikroorganizmaların nadir olarak iklim değişikliği ile ilgili çalışmaların merkezinde buldukları, sağlık politikalarında atlanabildikleri görülmektedir. Devasa çeşitlilikleri ve çevresel değişimlere verdikleri farklı yanıtlar mikroorganizmaların ekosistemdeki rollerini belirlemeyi zorlaştırır. Bu Uzlaşma Bildirisi aracılığıyla, tüm insanları dünyamızdaki mikro ve makro organizmalar ile iklim değişikliği arasındaki somut bağ üzerinden artık mikroorganizmaları da görmeleri yönünde uyarmak istiyoruz. Mikroorganizmalarla ilgili süreçlerin önemini bilmezsek, dünyanın biyosferini anlama ve iklim değişikliğine yanıt verme yetimizi anlamsız bir biçimde kısıtlar, böylelikle de gelecekte sağlıklı bir çevre yaratma çabalarını tehlikeye atmış oluruz⁶ (Kutu 1).

Uzlaşma Bildirisi'nin Kapsamı

Bu Uzlaşma Bildirisi'nde mikroorganizmaların iklim değişikliği üzerindeki etkilerini, yine mikroorganizmaların iklimle ilişkili doğal süreçleri ile bunların ana güçlendirici unsurlarını kapsayacak şekilde ele aldık. İklim değişikliğinin mikroorganizmalar üzerindeki etkilerini ise, mikrobiyal toplulukların bileşimi, işlevleri, fizyolojik yanıt ve evrimsel uyum üzerinden değerlendirdik. Esas hedefimiz mikroorganizmalar ve iklim ile ilişkili konular olmakla birlikte, bunlara sinerjik etki gösterdiği söylenen bölgesel çevre kirliliği veya otrifikasyon gibi insan etkilerini de değerlendirmelere dâhil ettik.

Bu Uzlaşma Bildirisi kapsamında *mikroorganizma*; tek hücreli, çok hücreli (örneğin; farklılaşan türler), agregat (örneğin; biyofilmler) veya virüs şeklinde karşımıza çıkan, çıplak gözle görülemeyen her türlü mikroskopik organizma veya virus ($\leq 50 \mu\text{m}$) olarak tanımlandı. Dolayısıyla bildirinin kapsamında mikroskopik bakteri, arkea, ökaryot ve virüsler yanında belirli makroskopik tek hücreli ökaryotlar (örneğin; büyük deniz fitoplanktonları) ile ahşabı çürütebilen mantarlar da yer almaktadır. Amacımız, kapsam olarak tüm bileşenleri ya da insana ait etkileri geniş boyutta ele almak değil, iklim değişikliğinin mikroorganizmalara ait yaşam süreçleri üzerindeki etkilerini göz önüne getirmek ve sonuçların yorumlanmasına ışık tutacak (deniz veya kara kaynaklı) temel küresel biyomlardan örnekler vermektir. Ayrıca, tarım ve enfeksiyon hastalıkları üzerinden mikroorganizmaların iklim değişikliğini azaltmadaki rolünün altını çizmeye çalışıyoruz. Hazırladığımız bildiriyle, mikroorganizmaların insan kaynaklı iklim değişikliğinin etkilerini hızlandırma ya da yavaşlatmadaki rolleri konusunda mikrobiyolog ve diğer meslek sahiplerini düşünmeye sevk edecektir (Kutu 1).

Deniz biyomu

Deniz biyomları sahillerdeki haliç, mangrov ve mercan resiflerinden açık denizlere açılarak dünya yüzeyinin yaklaşık %70'ini kaplamaktadır (Şek. 1). Fototrofik mikroorganizmalar güneş enerjisini su kolonunun 200 metrelik üst kısmında kullanırken, daha derinlerdeki deniz yaşamı enerji için organik ve inorganik kimyasalları kullanır.¹⁰ Denizlerdeki toplulukların bileşimini, güneş ışığı yanında diğer enerji formlarının varlığı ile suyun sıcaklığı (*buzla kaplı denizlerde yaklaşık -2°C'den hidrotermal bacalarda 100°C'ye değişebilmektedir*) belirlemektedir¹¹. Küresel ısınmaya bağlı yükselen sıcaklıklar sadece biyolojik

süreçleri etkilemekle kalmaz, suyun yoğunluğunu da azaltarak tabakalanma ve dolaşımı azaltır; bu da organizmaların yayılmasını ve besin maddelerinin taşınmasını etkiler. Yağışlar, tuzlanma ve rüzgârlar da tabakalanma, karışma ve dolaşımı etkiler. Havadan, akarsulardan ya da haliç akıntılarında gelen besin maddesi girişleri de mikrobiyal toplulukların yapısını ve işlevini etkiler; iklim değişikliği ise tüm bu fiziksel faktörler üzerinde etki göstermektedir.

Mikroorganizmaların okyanus ekosistemleriyle ilişkisi su kolonu ve yüzey altındaki sayıları ve biyokütlesi ile değerlendirilebilir; toplam hücre sayısı 10^{29} 'dan büyüktür^{8,12-16} ve Deniz Canlıları Sayımı deniz biyokütlesinin %90'ının mikroskopik canlılardan oluştuğunu tahmin etmektedir. Devasa sayılarının yanısıra, deniz mikroorganizmaları temel ekosistem işlevlerini yerine getirirler. Denizlerde yaşayan mikroorganizmalar, karbon ve nitrojeni bağlayıp organik maddeleri yeniden mineralize ederek okyanus yiyecek ağlarının ve dolayısıyla küresel karbon ve besin maddesi döngülerinin temelini oluştururlar.¹³ Partiküllerine ayrılmış organik maddelerdeki sabit karbonun deniz çökeltilerine çökme, birikme ve gömülmesi atmosferden CO₂'nin ayrıştırılması için temel, uzun soluklu bir mekanizmadır. Bu nedenle remineralizasyon yoluyla CO₂ ve besin maddelerinin yeniden yapımı ile deniz yatağına gömülme arasındaki denge iklim değişikliği üzerindeki etkiyi belirler.

Okyanuslar, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonlarını yükselterek sera etkisini arttıran ısınmalarının yanısıra endüstri devrimi öncesi zamanlara kıyasla yaklaşık olarak 0.1 pH ünitesi asitleşmiştir, pH'da bu yüzyılın sonuna kadar 0.3-0.4 ünitelik daha da fazla azalmalar olacağı öngörülmektedir¹⁷⁻¹⁹. pH değişikliğinin benzeri görülmemiş hızı göz önüne alındığında deniz yaşamının buna nasıl yanıt vereceğini bir an önce öğrenmemiz gerekmektedir²². Yükselmiş sera gazı konsantrasyonlarının okyanus ısı, asitleşme, tabakalaşma, karışma, termohalin (okyanus ve denizlerdeki suyun ısınarak buharlaşmasıyla şekillenen küresel döngüsü) dolaşım, beslenme ögeleri temini, ışımaya ve ekstrem hava olayları üzerindeki etkisi üretimde, deniz besin ağları, karbon çıkışı ve deniz yatağına gömülmesinde büyük oynamalar yaratmak gibi önemli çevresel sonuçlara yol açacak biçimlerde deniz mikrobiyasını etkilemektedir^{19, 23-29}.

Mikroorganizmalar iklim değişikliğini etkiler.

Deniz fitoplanktonları küresel bitki biyokütlesinin sadece yaklaşık %1'ini oluşturdukları halde küresel fotosentez yoluyla CO₂ fiksasyonunun (yılda net ~50PgC küresel primer üretim) yarısını ve oksijen yapımının yarısını sağlamaktadırlar³⁰. Kara bitkilerine kıyasla, deniz fitoplanktonları daha geniş bir yüzey alanına yayılmışlardır, mevsimsel değişikliklere daha az maruz kalırlar ve ağaçlara kıyasla belirgin biçimde daha hızlı yenilenebilirler (onlarca yıla karşılık günler içerisinde)³⁰. Bu nedenle fitoplanktonlar iklim değişikliklerine küresel ölçekte hızla yanıt verirler. Bu özellikler fitoplanktonların karbon fiksasyonundaki katkısını değerlendirmede ve bu üretimin düzensizliğe yanıt olarak nasıl değişebileceğini tahmin etmede önemlidir. İklim değişikliğinin primer üretkenlik üzerindeki etkilerini tahmin etmek hem aşağıdan yukarı (örneğin esansiyel besin maddelerinin ve dik karıştırmanın olması) hem de yukarıdan aşağı kontrollerden (örneğin grazing ve virüsler) etkilenen fitoplankton çiçeklenme (patlama) döngüleri ile karmaşıklaşmaktadır^{27, 30-34}.

Güneşin radyasyonundaki, ısıdaki ve yüzey sularına katılan tatlı sulardaki artış okyanuslardaki tabakalaşmayı güçlendirerek derin sulardaki besin maddelerin yüzey sularına taşınmasına engel olur, bu da primer üretkenliği azaltır^{30,34,35}. Oysa, besleyici maddelerin miktarları ile sınırlanmadığı sürece yükselen CO₂ düzeyleri fitoplankton primer üretimini arttırabilir³⁶⁻³⁸.

Bazı çalışmalar³⁹ toplam küresel okyanus fitoplankton yoğunluğunun geçtiğimiz yüzyılda azaldığını göstermektedir ancak bu çıkarımlar uzun dönemli fitoplankton verilerinin sınırlı varlığı, veri oluşturmadaki yöntem farklılıkları ve fitoplankton yapımındaki yıllık ve on yıllık büyük değişkenlikler nedeniyle sorgulanmaktadır⁴⁰⁻⁴³. Üstelik diğer çalışmalar okyanuslardaki fitoplankton yapımında küresel bir artış⁴⁴ ve spesifik bölgelerde ve spesifik fitoplankton gruplarında değişiklikler^{45,46} olduğunu ileri sürmektedir. Küresel deniz buzunun (Deniz Buzu İndeksi) azalması daha fazla ışık geçirgenliğine ve daha fazla primer üretim olasılığına yol açmaktadır⁴⁷ ancak farklı karışım paternleri ve besin maddeleri sağlanmasındaki değişikliklerin etkileri ve kutup bölgelerindeki yapım eğilimleri³⁴ konusunda birbiriyle çelişen öngörüler vardır. Bu durum, fitoplankton yapımı ve mikrobiyal topluluklar hakkında uzun süreli veri toplama gereksinimini vurgular. Uzun süreli veriler mikrobiyal işlevlerin ve geribildirim mekanizmalarının iklim değişikliğine nasıl yanıt vereceğini güvenilir bir biçimde tahmin edebilmek için gereklidir ancak şu an elimizde mevcut bu tür veri setleri çok az sayıdadır (Hawaii Okyanus Zaman-serileri ve Bermuda Atlantik Zaman-serileri Çalışması gibi)⁴⁸⁻⁵⁰. Bu bağlamda Global Okyanus Örnekleme Ekspedisyonu⁵¹, Güney Okyanusu kesitleri^{52,53} ve Tara Okyanuslar Konsorsiyumu^{11,54-59} deniz mikroorganizmaları için değerli bir baz oluşturan metagenom verileri sağlamaktadır.

Diatomlar toplam fitoplankton biyokütlesinin maksimal olduğu⁶³ açık okyanus bölgelerindeki varlıklarıyla okyanuslardaki toplam primer üretimin %25-45'ini gerçekleştirirler⁵⁰⁻⁶². Diğer fitoplankton gruplarıyla kıyaslandığında diatomların batma hızları görece daha yüksektir ve derinlerdeki karbon partikülleri salınımının yaklaşık %40'ından sorumludurlar^{62,64}. Yüzeydeki besleyici maddelerdeki fiziksel koşullardan etkilenen mevsimsel zenginleşmeler diatom çiçeklenmelerinin lehinedir. Antropojenik iklim değişikliği çiçeklenmelerin zamanlamasını değiştirerek ve biyokütlelerini azaltarak bu mevsimsel döngüleri doğrudan etkileyecektir, bu da primer üretimi ve CO₂ tutulumunu azaltacaktır⁶⁵. Uzaktan kumanda edilen veriler 1998 ve 2012 arasında diatomlarda küresel bazda ama özellikle Kuzey Pasifik'te bir azalma olduğunu düşündürmektedir. Bu azalma yüzeydeki karışık tabakanın daralması ve daha düşük besin maddeleri konsantrasyonlarıyla ilişkilendirilmektedir.⁴⁶

Deniz fitoplanktonlarının CO₂ sekestrasyonuna katkısına ek olarak^{30,66-68} kemolitototrofik arkealar ve bakteriler derin okyanus sularındaki karanlıkta⁵⁹ ve kutup kışlarında yüzeyde CO₂'yi bağlamaktadır⁷⁰. Deniz bakterileri ve arkeaları yüzeyde okyanusun nefes almasına ve birçok elementin dolaşımına önemli düzeyde katkıda bulunmaktadır¹⁸. Deniz tabanı metanojenleri ve metanotrofları önemli CH₄ üretici ve tüketicileridir ancak bu sera gazının atmosfere salınması üzerindeki etkileri bilinmemektedir⁷¹. Deniz virüsleri, bakteriovor bakteriler ve ökaryotik otoburlar mikroskopik yiyecek ağlarının önemli bileşenleridir; örneğin deniz virüsleri

karbonun ne kadar etkin bir biçimde sekestre edileceğini ve okyanus derinliklerinde depolanacağını etkiler⁵⁷. İklim değişikliği virus-konak etkileşimi gibi avcı-av etkileşimlerini ve dolayısıyla küresel biyokimyasal çevrimleri etkiler⁷². Okyanuslardaki ısınmanın sonucu olarak son 50 yılda minimum oksijen bölgeleri (MOB'leri) genişlemektedir bu da oksijen çözünürlüğünü azaltmaktadır⁷³⁻⁷⁵. Minimum oksijen bölgeleri reaktif nitrojen için küresel depolardır ve mikroplar tarafından N₂ ve N₂O yapımı okyanuslardan atmosfere nitrojen kaçıışının yaklaşık %25-50'sinden sorumludur. Ayrıca, MOB'leri okyanuslardaki en büyük derin deniz metan rezervuarlarıdır ve açık okyanuslardaki metan döngüsüne önemli ölçüde katkıda bulunurlar. MOB'nin gözlenmekte olan ve gelecekte olacağı öngörülen genişlemesi okyanusların besin maddesi ve sera gazı bütçelerini ve oksijene-bağımlı organizmaların dağılımını büyük ölçüde etkileyebilir⁷³⁻⁷⁵.

Derin deniz dibi çökeltisinin en üstteki 50 cm'lik bölümü yaklaşık 1X10²⁹ mikroorganizma içerir^{8,16} ve bu çökelti içerisindeki arkea ve bakterilerin bolluğu enlemler boyunca artar (34°N'tan 79 °N'a kadar), bazı spesifik taksonlar (Grup 1 Deniz Taumarkeota'sı gibi) bu artışa orantısız katkıda bulunurlar⁷⁶. Derin deniz dibi mikroorganizmaları biyocoğrafik paternler gösterirler ve deniz tabanına batan partiküler maddenin nitelik ve niceliğindeki değişimlere yanıt verirler⁷⁷. Sonuç olarak, iklim değişikliğinin özellikle derin denizlerdeki deniz dibi arkealarının gerçekleştirdiği (amonyak oksidasyonu gibi) işlevsel süreçleri ve bunlarla bağlantılı biyojeokimyasal döngüleri etkilemesi beklenmektedir⁷⁶.

Aerosoller bulut oluşumunu etkileyerek güneş ışığının ışıması ve yağışları etkilemektedir ancak iklimi ne kadar ve nasıl etkiledikleri bilinmemektedir⁷⁸. Deniz aerosolleri deniz tuzu, deniz tuzu içermeyen sülfatlar ve organik moleküllerden oluşan karmaşık bir karışımdır ve bulut yoğunlaşması için çekirdek işlevi görerek ışıma dengesi ve dolayısıyla iklimi etkilerler^{79,80}. Örneğin, uzak deniz ortamlarındaki (örneğin Güney Okyanusu) biyojenik aerosoller bulut damlacıklarının sayısını ve büyüklüğünü arttırabilir ve böylelikle iklim üzerinde çok kirli bölgelerdeki aerosollere benzer etki gösterebilir⁸⁰⁻⁸³. Özellikle fitoplanktonların salgıladığı dimetilsülfid ve onun türevlerinden olan sülfat bulut yoğunlaşmasını arttırır^{79,84}. Deniz fitoplanktonlarının aerosollere hangi yollarla katkıda bulunduğunu anlamamız değişen okyanus koşullarının bulutları ve iklim geribildirimini nasıl etkileyeceğini daha iyi tahmin edebilmemizi sağlayacaktır⁸⁴. Ayrıca atmosferin kendisi de ~10²² mikrobik hücre içermektedir; atmosferik mikroorganizmaların büyüme ve agregatlar oluşturma kapasitesini belirlemek iklim üzerindeki etkilerini değerlendirmemizde yararlı bir araç olacaktır⁸.

Yeşillendirilmiş sahil habitatları etoburlardan otoburlara, bitkilere ve ilgili mikrobiyal topluluklardan oluşan trofik spektrumun tümü tarafından belirlenen karbon sekestrasyonu için önemlidir⁸⁵. Antropojenik iklim değişikliği gibi insan davranışları son 50 yılda bu habitatları %25-50 oranında azaltmıştır, deniz predatörlerinin sayıları da %90 oranında azalmıştır⁸⁵⁻⁸⁷. Bu yoğun bozulma göz önüne alınınca mikrobiyal topluluklar üzerindeki etkilerin değerlendirilmesi gerekmektedir çünkü mikrobiyal aktiviteler ne kadar karbonun remineralize edildiğini ve CO₂ ve CH₄ olarak salınacağını belirler.

İklim değişikliği mikroorganizmaları etkiler.

İklim değişikliği türler arasındaki etkileşimleri değiştirir ve türleri uyum sağlamaya, göç etmeye, yerlerini

başka türlerin almasına veya soylarının tükenmesine zorlar^{23,88}. Okyanusların ısınması, asitleşme, ötrofikasyon ve aşırı kullanım (örneğin balıkçılık ve turizm) hep birlikte mercan resiflerinin azalmasına yol açmaktadır ve ekosistemlerde makroalgae⁸⁹⁻⁹³ ve derin deniz dibi siyanobakteriyel matlara doğru kayma yapabilir^{94,95}. Mercanların iklim değişikliğine uyum sağlama kapasiteleri mikroalg türü simbiyotlar ve bakteriler gibi ilişkili mikroorganizmaların yanıtlarından kuvvetle etkilenmektedir⁹⁶⁻⁹⁸. Mercanlar üzerinde yaşamakta olan yüzlerce-binlerce mikrobiyal tür atık maddeleri geri dönüştürdükleri, yaşamsal besin maddelerini ve vitaminleri sağladıkları ve patojenlerle savaşmak için bağışıklık sistemlerine destek oldukları için konak sağlığı açısından vazgeçilmezdir⁹⁹. Ancak çevresel bozulma veya mercanların beyazlaması mercan mikrobiyomunu hızla değiştirebilir. Bu tür kaymalar şüphesiz ki mercan-mikroorganizma sisteminin ekolojik fonksiyonlarını ve stabilitesini etkiler, bu da mercanların iklim değişikliğine uyum sağlama kapasite ve hızını ve mercanlar ve resiflerdeki ekosistemin diğer bileşenlerini etkileyebilir^{99,100}.

Genel olarak, mikroorganizmalar makroskopik organizmalara kıyasla daha kolay yayılabilir. Ancak, birçok mikrobiyal tür için biyocoğrafyasal farklılıklar söz konusudur; yayılma, yaşam tarzı (örneğin konak ile ilişki) ve çevresel faktörler topluluğun kompozisyonu ve işlevini kuvvetli bir biçimde etkiler^{54,101-103}. Okyanus akıntıları ve termal ve enlemsel gradyenler deniz canlıları toplulukları için özel önem taşırlar^{104,105}. Daha iyi şartlara sahip çevrelere doğru hareket etmek mümkün olmadığında evrimsel değişim eldeki tek sağkalma mekanizması olabilir⁸⁸. Bakteriler, arkaealar ve mikroalgler gibi mikroorganizmalar geniş nüfus büyüklükleri ve kısa aseksüel üreme süreleri ile yüksek uyum potansiyeline sahiptir²². Görece olarak az sayıda çalışma okyanus asitleşmesi veya diğer iklim değişikliği ile ilgili çevresel değişkenlere evrim geçirerek uyum sağlamalarını incelemiştir^{22,28}. Benzer şekilde fizyolojik yanıtların ve bu fizyolojik yanıtların biyokimyasal döngüler üzerindeki etkilerinin moleküler mekanizmaları hakkındaki bilgimiz sınırlıdır¹⁸.

Ancak, birçok çalışmada yükselmiş CO₂ düzeylerinin farklı fitoplankton türleri üzerinde ekosistem düzeyindeki daha geniş süreçleri bozabilecek etkileri gösterilmektedir. Bir saha deneyi ile CO₂ düzeylerini artırmanın toksik bir mikroalg olan *Vicicitus globosus*'a seçici bir avantaj sağlayarak trofik düzeyler arasında organik madde taşınımının bozulmasına yol açtığı gösterilmiştir¹⁰⁶. Bir deniz siyanobakteri cinsi olan *Trichodesmium* uzun süreli (4.5 yıl) artmış CO₂ maruziyetine nitrojen fiksasyonu ve büyümeye yol açan geri dönüşümsüz genetik değişiklikler ile yanıt vermektedir¹⁰⁷. Fotosentez yapan yeşil alg *Ostreococcus tauri* için yükselmiş CO₂ düzeyleri büyüme, hücre büyüklüğü ve karbon-nitrojen oranlarında artışa yol açar¹⁰⁸. Daha yüksek CO₂ düzeyleri ekotiplerde değişikliklere yol açarak ve niş oküstasyon ile *O. tauri*'nin popülasyon yapısını da etkiler¹⁰⁸. Böylelikle daha geniş yiyecek ağları ve biyojeokimyasal döngüler üzerinde de etki gösterir¹⁰⁹. Kalsifikasyon yapan fitoplankton türü olan *Emiliania huxleyi* daha büyük hücreler yapmak yerine sıcaklık ve CO₂ düzey artışının birleşik etkilerine (ve onlara eşlik eden asitleşmeye) daha az karbon içeren daha küçük hücreler yaparak yanıt verir¹⁰⁹. Ancak, bu tür için daha yüksek CO₂ düzeylerine evrim geçirerek uyum sağlama sonucu toplam üretim oranları değişmez¹⁰⁹. CO₂ düzeylerine yanıt topluluklar arasında farklılıklar gösterir (örneğin Arktik ve Antartik fitoplanktonlar arasında¹¹⁰). Bir mezozozm çalışmasında

yükselmiş CO₂ düzeylerinde büyürken *E. huxleyi*'l enfekte eden virüslerin türlerinde farklı değişiklikler olduğunu saptandı ve yükselen CO₂ düzeylerinin virüsler, konaklar veya bunların arasındaki etkileşimi doğrudan etkileyip etkilemediğinin saptanmasına gereksinim olduğu belirtildi¹¹¹. Bu örnekler evrim ile ilgili süreçleri daha iyi anlamamız ve elde edeceğimiz bilgiyi iklim değişikliği tahminlerine katmamız gerektiğini göstermektedir.

Okyanusların asitleşmesi deniz mikroorganizmalarına yakın tarihlerdeki aralıkların çok dışında pH koşulları sunmakta, bu da hücre içi pH homeostazisini etkilemektedir^{18,112}. Hücre içi pH'yı düzenlemekte daha az uyum sağlayan türler daha fazla etkilenecektir. Organizmanın büyüklüğü, agregasyon durumu, metabolik aktivite ve büyüme hızı pH düzenleme kapasitesini etkiler¹¹².

Daha düşük pH bakterilerin ve arkeaların gen ekspresyonunu büyümekten ziyade hücrenin hayatta kalmasını destekleyecek biçimde değiştirir¹⁸. Düşük fitoplankton biyokütlesine sahip mezokozmlarda, bakteriler pH dengelenmesine besin maddelerinden zengin fitoplankton kütlesi yüksek mezokozmlara kıyasla daha fazla kaynak ayırır. Bunun sonucunda, okyanus asitleşmesinin hücresel büyüme etkinliği, karbon çevrimi ve enerji oynamaları yoluyla mikrobiyal gıda ağlarında değişikliklere yol açacağı ve en büyük etkilerin okyanusların çoğunu kapsayan oligotrofik bölgelerde oluşacağı öngörülmektedir¹⁸. Hem günümüzde var olan hem de gelecekte var olacağı varsayılan pH konsantrasyonlarında *Synechococcus* sp. büyümesinin deneysel olarak karşılaştırılması siyanobakteriler ile onları enfekte eden siyanofaj virüsleri üzerinde etkiler olacağını gösterdi¹¹³.

Çevre ısısı ve enlem belirli deniz taksonları için çeşitlilik, dağılım ve/veya optimum ısı (T_{Opt}) ile korelasyon gösterir; modellerde artan ısının soğuğa uyum sağlamış topluluklarda kutuplara doğru bir kaymaya yol açacağı öngörülmektedir^{52,114-118}. Ancak kutup ve ılıman sulardaki fitoplanktonların T_{Opt} değeri çevresel ısı derecelerinden oldukça yüksek bulundu ve bir eko-evrimsel modelde tropikal fitoplanktonlar için T_{Opt} değerinin deneysel ortamlarda gözlenen değerlerden çok daha yüksek olacağı öngörüldü¹¹⁶. Mikroorganizmaların çevre ısısına nasıl iyi uyum sağladıklarını anlamak ve sıcaklık artışına nasıl yanıt vereceklerini tahmin etmek soğuk ortamlardaki mikroorganizmaların fizyolojik ve ekolojik uyumunun zayıf bir göstergesi olan T_{opt} 'dan daha fazlasının incelenmesini gerektirir¹¹⁹.

Birçok çevresel ve fizyolojik faktör yanıtları ve kendi doğal ortamlarında mikroorganizmaların birbiriyle yarışmasını etkiler. Örneğin yükselen ısı ökaryotik fitoplanktonlarda protein sentezini artırırken hücresel ribozom konsantrasyonunu azaltır¹²⁰. Ökaryotik fitoplanktonların biyokütlesi ~1 Gt C¹³ olduğu ve ribozomlar fosfattan zengin olduğu için iklim değişikliğine bağlı olarak değişen nitrojen/fosfat oranı küresel okyanuslarda kaynakların dağılımını etkileyecektir¹²⁰. Okyanusların ısınmasının partikül salınımı gibi biyojeokimyasal akımları değiştirmesinin küçük plankton tiplerinin lehine olacağı düşünülmektedir¹²¹. Okyanus sıcaklıklarının artışı, asitleşme ve besin kaynaklarındaki azalmanın fitoplanktonlardan çözülmüş organik maddelerin hücre dışına salınımını artıracığı, mikrobiyal çevrimdeki değişikliklerin daha yüksek trofik düzeylerin kaybı pahasına mikrobiyal üretimde artışa yol açabileceği düşünülmektedir¹²². Isınma nitrojeni bağlayan siyanobakterilerin

aktivitelerinin demirle sınırlı olmasını da değiştirerek geleceğin ısınmakta olan okyanuslarındaki yiyecek ağlarına yeni nitrojenler sağlanması üzerinde derin etkiler yapabilir¹²³. Çevresel mikroorganizmaların ekosistem değişikliklerine ve iklim değişikliğine bağlı streslere verdikleri yanıtları yorumlamak ve ölçebilmek için dikkatli olunması gerekir^{124,125}. Topluluklardaki karbon remineralizasyonu yerine karbon sekestrasyonu ve besin çevrimleri gibi değişikliklerin işlevsel sonuçlarının neler olduğuna ilişkin temel sorularımız yanıtlandırılmayı beklemektedir.

Kara biyomu

Deniz biyokütlesinden yaklaşık 100 kat daha fazla kara biyokütlesi vardır, kara bitkileri Dünya'nın toplam biyokütlesinin büyük bir bölümünü oluştururlar¹⁵. Kara bitkileri net küresel primer üretimin kabaca yarısını gerçekleştirirler^{30,67}. Toprakta ~2,000 milyar ton organik karbon depolanır ki bu atmosfer ve bitkilerdeki karbonun toplamından daha fazladır¹²⁶. Karasal çevrelerdeki mikroorganizmaların toplam sayısı ~10²⁹ ile deniz ortamlarındakilerin toplam sayısı ile benzerdir⁸. Toprak mikroorganizmaları toprakta depolanan ve atmosfere tekrar salınan organik karbon miktarını regüle eder ve üretimi düzenleyen makrobesinleri (nitrojen ve fosfor) sağlayarak bitkilerde karbon depolanmasını dolaylı olarak etkiler^{126,127}. Bitkiler mikorizal mantar simbiyotlarına önemli miktarda karbon sağlarlar ve birçok ekosistemde mikorizal mantarlar bitkiler tarafından önemli ölçüde nitrojen ve fosfor edinilmesinden sorumludur¹²⁸.

Bitkiler fotosentez yoluyla atmosferdeki CO₂'yi ayrıştırır ve karasal ekosistemleri besleyen organik maddeleri yaparlar. Ancak, bitkilerin ototrofik solunumu (yılda 60 Pg C) ve mikroorganizmaların heterotrofik solunumu (yılda 60 Pg C) CO₂'yi tekrar atmosfere yollar^{126,129}. Isı birbirine zıt çalışan bu süreçler arasındaki dengeyi ve dolayısıyla karasal biyosferin antropojenik karbon emisyonlarını (halihazırda emisyonların yaklaşık olarak dörtte birini depolamaktadır) tutma ve depolama kapasitesini etkiler (Şekil 1). Isınmanın atmosfere karbon salımını hızlandırması beklenmektedir¹²⁹.

Ormanlar kara yüzeyinin yaklaşık olarak %30'unu kaplar, karasal karbonun yaklaşık %45'ini içerir, karasal primer üretimin yaklaşık %50'sini yapar ve antropojenik CO₂'nin %25 kadarını sekestre eder^{130,131}. Meralar(çayırlar) kara yüzeyinin yaklaşık olarak %29'unu kaplar¹³². Ağaçlandırılmamış, kurak ve yarı kurak bölgeler (%47) karbon bütçesi açısından önemlidir ve antropojenik iklim değişikliğine ağaçlandırılmış bölgelerden farklı yanıt verirler^{132,133}. Göller buzlarla kaplı olmayan kara alanının yaklaşık %4'ünü oluşturur ve sığ göller önemli miktarlarda CH₄ salarlar^{135,136}. Peat (çürümüş bitki çöpü) kara yüzeyinin yaklaşık %3'ünü kaplar ve çürümeden daha fazla olan bitki yapımı nedeniyle dokunulmamış peat alanları küresel karbon deposu olarak işlev görür ve global toprak karbonunun yaklaşık %30'unu içerir^{137,138}. Permafrostta organik maddeler içerisinde karbon birikimi (bitki, hayvan ve mikroorganizma kalıntıları) solunum yoluyla kaybedilenden çok daha fazla olduğu için en büyük karasal karbon deposunu oluşturur¹³⁹⁻¹⁴¹. 1.5–2°C'lik ısınmanın (1850-1900 arasındaki küresel ortalama yüzey ısısına kıyasla) permafrostu 1960-1990 arasındaki düzeylere kıyasla %28-53 oranında azaltacağı¹⁴² böylelikle büyük karbon rezervlerini mikrobiyal solunum ve sera gazı emisyonları için kullanılabilir hale getireceği öngörülmektedir.

Toprağın en üst 10 cm'inin incelenmesi ve 100 cm derinliğe uzanan tam toprak profilleri (bunlar daha eski karbon stoklarını içerir)¹⁴⁴ ısınmanın atmosfere karbon salımını arttırdığını göstermektedir. Farklı yerlerdeki toprak alanlarda karbon kaybı farklılıklarının açıklanması (toprağın organik madde içeriği, ısı, yağış, pH ve kil içeriğine ek olarak) daha fazla miktarda öngördürücü değişken gerektirecektir^{145,146}. Yine de ısınmaya verilen yanıtların genel değerlendirmesiyle elde edilen öngörüler ısınmayla karasal karbon kaybının özellikle küresel toprak karbonunun çoğunu depolayan¹⁴⁷ soğuk ve ılıman topraklarda pozitif bir geribildirim sağlayarak iklim değişikliğini hızlandıracağını¹⁴³ göstermektedir.

Mikroorganizmalar iklim değişikliğini etkiler.

Atmosferdeki daha yüksek CO₂ düzeyleri primer üretimi ve dolayısıyla ormanlardaki yaprak ve kök artıklarını artırır¹⁴⁸⁻¹⁵⁰, bu da mikrobiyal degradasyona bağlı olarak daha yüksek karbon emisyonlarına neden olur¹⁵¹. Daha yüksek ısı dereceleri karasal organik maddelerin çürüme hızını artırır¹⁵². Isının mikrobiyal reaksiyon hızları üzerindeki etkisi sadece kinetik bir etkiden ibaret değildir, mikrobiyal büyümeyi uyaran bitki inputlarından(girişlerinden) kaynaklanır¹⁵²⁻¹⁵⁴.

Mikrobiyal aktivitenin hızını (örneğin ahşap üzerinde mantarların koloni oluşturması) çeşitli yerel çevresel faktörlerin (mikrobiyal topluluk kompozisyonu, ölü ağaç yoğunluğu, nitrojen varlığı ve nem gibi) etkilemesi Dünya sistem modellemesi ile iklim değişikliği yoluyla ne kadar toprak karbonu kaybedileceğini tahmin ederek ekosistem süreçleri üzerinde yerel kontrolleri devreye sokmayı gerekli kılar¹⁵⁵. Bu açıdan, bitki besinlerinin varlığı ormanlardaki net karbon dengesini etkiler: besleyici maddeden fakir ormanlar besleyici-maddeden zengin ormanlara kıyasla daha fazla karbon salgılar¹⁵⁶. Mikrobiyal solunum besleyici maddeden zengin ormanlarda bitkiler rizofer mikroorganizmalarına daha az karbon sağladığı için (örneğin kök eksudaları şeklinde) daha düşük olabilir¹⁵⁷.

Bitkiler bağlı karbonun yaklaşık %50'sini toprağa verir ki bu da mikrobiyal büyüme için kullanılır¹⁵⁸⁻¹⁶⁰. Mikroorganizmalar tarafından enerji kaynağı olarak kullanılmalarına ek olarak eksudalar mineral-organik madde bağlantılarını bozarak mikrobiyal solunum için kullanılan minerallerden organik bileşenleri serbestler ve böylelikle karbon salımını arttırlar¹⁵⁹. Bu bitki-mineral etkileşimlerinin önemi, iklim değişikliğinin etkilerini araştıranlara biyotik etkileşimlerin (bitki-mikroorganizma) yanısıra biotik-abiyoetik etkileşimlerin de önemli olduğunu göstermesidir¹⁵⁹. Mikroorganizmaların ve organik madde ve minerallerle salgılanan enzimlerin etkileşimlerini içeren termodinamik modeller artmakta olan ısıya yanıt olarak toprak karbonu-iklim geribildirimlerini öngörmek için kullanılmaktadır; bir çalışmada statik modellere kıyasla termodinamik bir modelle daha değişken ancak daha zayıf toprak karbonu-iklim geribildirimleri öngörülmüştür¹⁶⁰.

Mikrobiyal degradasyona karşılık uzun süreli depolama için toprakta organik madde bulunması toprağın mineral özellikleri, asidite ve yük-in durumu, suyun varlığı, iklim ve toprakta bulunan mikroorganizma türleri gibi pek çok çevresel faktöre bağlıdır¹⁶¹. Organik maddenin doğası özellikle substrat karmaşıklığı, mikrobiyal çürümeyi etkiler. Ayrıca, mikrobiyal organik maddeye erişim kapasitesi

toprak tipleri arasında farklılıklar gösterir (örneğin kil içeriği farklı ise)¹⁶². Eğer erişim hesaba katılırsa artan atmosferik CO₂ düzeylerinin daha fazla mikrobiyal dekompozisyona yol açacağı ve toprakta daha az organik karbonun kalacağı öngörülmektedir¹⁶².

Artan CO₂ konsantrasyonları bitkiler ve mikroorganizmalar arasındaki nitrojen için yarışı arttırırlar¹⁶³. Otoburlar (omurgasızlar ve memeliler) toprağa geri dönen organik madde miktarını ve dolayısıyla mikrobiyal biyokütle ve aktiviteyi etkiler¹⁶⁴. Örneğin çekirgeler bitki biyokütlesini ve bitkinin nitrojen talebini azaltır, böylelikle mikrobiyal aktiviteyi arttırırlar¹⁶³. İklim değişikliği otoburluğu azaltabilir, karasal karbon sekestrasyonunu azaltan küresel nitrojen ve karbon sikluslarında genel değişikliklerle sonuçlanabilir¹⁶³. Detritivorlar (örneğin toprak solucanları) bitkileri (örneğin toprağın verimliliğini arttırarak) ve topraktaki mikroorganizmaları dolaylı yoldan etkileyerek sera gazı emisyonları üzerinde etki gösterirler¹⁶⁵. Toprak solucanları toprağı beslenme, kazma ve atık maddeleri depolayarak değiştirirler. Toprak solucanlarının anaerobik barsak ortamı denitrifikasyon yapan ve N₂O üreten mikroorganizmaları barındırır. Toprak solucanları toprağın verimliliğini arttırır ve varlıkları net sera gazı emisyonuyla sonuçlanabilir¹⁶⁵ oysa artan ısı ve azalan yağmurların detritivor beslenmesi ve mikrobiyal solunum üzerindeki birleşik etkisi emisyonları azaltabilir¹⁶⁶.

Çöp toplama alanlarında, çürümeye dirençli çöpler (örneğin antimikrobiyal fenolikler ve *Sphagnum* yosunlarının polisakkaritleri) mikrobiyal dekompozisyonu inhibe ederken suyun doyması oksijen değişimini kısıtlar ve anaerobların gelişmesini ve CO₂ ve CH₄ salınımını arttırır^{137,167}. İklim değişikliğinin yol açtığı yüksek ısı ve azalmış toprak suyu içeriği damarlı bitkilerin (erikasöz çalılar) büyümesini arttırırken çöplük yosunlarının üretimini azaltır. Bitki çöpu kompozisyonundaki ve ilişkili mikrobiyal süreçlerdeki değişiklikler (örneğin nitrojen immobilizasyonunun azalması ve heterotrofik solunumun artması) çöplükleri karbon depolarından karbon kaynaklarına dönüştürmektedir¹³⁷.

Permafrostun erimesi ve degradasyonu daha önce donmuş olan karbonun mikrobiyal dekompozisyonuna izin vererek CO₂ ve CH₄ açığa çıkarır^{139-141,168,169}. Kuvyıldaki permafrost erozyonu okyanuslara büyük miktarlarda karbon mobilize olmasına yol açacaktır; artmış mikrobiyal remineralizasyonu yoluyla büyük çaplı CO₂ emisyonları¹⁷⁰ iklim değişikliğini hızlandıran pozitif bir geribildirim döngüsüne yol açacaktır^{139-141,168-171}. Permafrostun erimesi suya doymuş toprakların artmasına¹⁷² yol açarak metanojenler tarafından anaerobik CH₄ ve bir grup mikroorganizma tarafından CO₂ yapımını arttırır. Üretim geçirgen aerobik topraklardaki CH₄'ten ziyade CO₂ salgılayan metabolizmalara kıyasla yavaştır. Ancak 7 yıl süren bir CO₂ ve CH₄ yapımı çalışmasında metanojen toplulukların çözölen permafrostta bir kez aktif hale geçtiklerinde, anoksik koşullarda eşit miktarlarda CO₂ ve CH₄ oluştuğı saptandı ve yüzyılın sonunda anoksik çevrelerden kaynaklanan karbon emisyonlarının iklim değişikliğini oksik çevreler kaynaklı emisyonlardan daha fazla arttıracığı öngörüldü¹⁷².

Tatlı su göllerinin çevresel şartlarının simülasyonunun yapıldığı 15-yıllık bir mezokozm çalışmasında ötrofikasyon ve ısınmanın birleşik etkisinin birikmiş CH₄ gazından hava kabarcıklarının çıkışında büyük artışa yol

açabileceği saptandı¹³⁵. Küçük göller ötrofikasyona duyarlı olduğu ve genellikle iklim-duyarlı bölgelerde yer aldığı için göllerde yaşayan mikroorganizmaların küresel sera gazı emisyonlarına katkısının incelenmesi gerekir^{135,136}.

İklim değişikliği mikroorganizmaları etkiler.

İklimdeki kaymalar mikrobiyal toplulukların yapısını ve çeşitliliğini doğrudan (örneğin mevsimsellik ve ısı) veya dolaylı yoldan (örneğin bitki kompozisyonu, bitki çöpü ve kök eksudaları) etkiler. Toprağın mikrobiyal çeşitliliği bitki çeşitliliğini etkiler ve karbon çevirimi dahil ekosistem işlevleri için önemlidir^{173,174}.

Hem laboratuvar koşullarındaki kısa süreli ısınma hem de doğal uzun süreli (50 yıldan uzun) jeotermal ısınma başlangıçta topraktaki mikroorganizmaların büyümesini ve solunumunu arttırarak net CO₂ salınımına ve buna bağlı olarak substratların eksikliğine yol açtı, bu da biyoküttele ve mikrobiyal aktivitede azalmaya yol açtı¹⁷⁵. Bu durum, mikrobiyal toplulukların daha yüksek ısılarla kolaylıkla uyum sağlamadığını, bunun sonucunda da reaksiyon hızları ve substrat eksilmesinin toplam karbon kaybını azalttığını gösterir¹⁷⁵. 10-yıllık bir çalışmada ise topraktaki toplulukların ısı artışına substrat kullanımının kompozisyonunu ve biçimini değiştirerek uyum sağladığı böylelikle uyum sağlamasalar da oluşacak olandan daha az karbon kaybına yol açtığı saptandı¹⁷⁶. Yıllık ısı oynamaları 20°C'den fazla olan orman topraklarında¹⁷⁷ ve uzun çayırli otlak topraklarında yapılan 9-yıllık bir çalışmada ısınmaya yanıt olarak bakteri ve mantar topluluklarında belirgin değişiklikler saptandı¹⁷⁸.

İki çalışmada yükselen ısının mikrobiyal solunum oranlarına ve mekanizmalarına ve uyum sağlama çabalarının sonuçlarına etkileri değerlendirildi^{179,180}. Çalışmalar geniş bir aralıkta (-2 ila 28°C) çevresel ısıyı, kuru kara topraklarını (110 örnek) ve kuzeydeki, ılıman ve tropikal toprakları (22 örnek) inceledi ve toplulukların üç farklı ısıya (~10–30 °C) nasıl yanıt verdiğini araştırdı. Termal adaptasyon hücre membranları ve enzimlerin biyofiziksel özelliklerine (aktivite-stabilite değiş tokuşunu yansıtır¹⁸⁰) ve mikroorganizmaların genomik potansiyeline (daha sıcak çevrelerde daha çeşitli yaşam biçimleri olan mikrobiyal topluluklar mevcuttur¹⁷⁹) bağlıydı. Her bir biyokütle birimi başına solunum oranları yüksek ısıli çevrelerdeki topraklarda daha düşüktü, bu mikrobiyal toplulukların termal uyumunun pozitif iklim geribildirimlerini azaltabileceğine işaret eder. Ancak, solunum ısı gibi tek bir değişkene değil birbiriyle ilişkili çok sayıda faktöre bağlı olduğu için mikrobiyal fizyolojisine bu tür mekanistik içgörülerin olası pozitif iklim geribildirimlerinin biyojeokimyasal modellerinde temsil edilmesi gerekir.

İklim değişikliğine mikrobiyal büyüme yanıtları karmaşıktır ve farklılıklar gösterir¹⁸¹. Mikrobiyal büyüme etkinliği mikroorganizmaların organik maddeleri biyokütle haline ne kadar etkili biçimde dönüştürdüğüünün bir ölçüsüdür, düşük etkinlik atmosfere daha fazla karbon salındığı anlamına gelir^{182,183}.

Bir hafta süreli bir laboratuvar çalışmasında artan ısının mikrobiyal dönüşümde artışlara yol açtığı ancak mikrobiyal büyüme etkinliğinde hiçbir değişiklik olmadığı saptandı ve ısınmanın toprakta karbon birikimini arttıracağı öngörüsünde bulunuldu¹⁸³. Onsekiz yıla yayılmış bir saha çalışması toprak ısı daha yüksek olduğunda mikrobiyal etkinliğin azaldığını, sürenin sonunda rekalsitran, kompleks substratların

dekompozisyonunun arttığını, bunun da topraktaki karbonun net kaybıyla sonuçlandığını gösterdi¹⁸².

Benzer şekilde, 26 yıllık bir orman toprakları ısınması çalışmasında, organik madde dekompozisyonu ve CO₂ salınımında¹⁸⁴ temporal farklılıklar gözlemlendi, bu da mikrobiyal toplulukların yapısında ve karbon kullanımı etkinliğinde değişikliklere, mikrobiyal biyokütlede azalmaya yol açtı ve mikrobiyal olarak erişilebilir karbonu azalttı¹⁸⁴. Sonuç olarak bu çalışmada, antropojenik iklim değişikliğinin uzun süreli, artan ve devamlı karbon salınımına yol açacağı öngörüsünde bulunuldu¹⁸⁴. Benzer tahminler mikrobiyal fizyolojik yanıtları taklit eden¹⁸⁵ veya soğuk iklimlerdeki toprakların donma ve çözünmesinin etkilerinin dahil edildiği Dünya sistem modellerinden de geldi¹⁸⁶.

İklim değişikliği mikrobiyal toplulukları ve işlevlerini ısı, yağışlar, toprak özellikleri ve bitkilerin katkısı gibi birçok birbiriyle ilintili faktör aracılığıyla doğrudan veya dolaylı yoldan etkiler. Çöllerdeki toprak mikroorganizmaları karbon ile sınırlı olduğu için, bitkilerden gelen karbon katkısının artışı nitrojenöz bileşiklerin transformasyonunu, mikrobiyal biyokütleyi, çeşitliliği (örneğin mantarların), enzimatik aktiviteyi ve rekalsitrant organik maddenin kullanımını artırır¹³³. Bu değişiklikler solunumu ve topraktan net karbon kaybını artırabileceği halde, kurak ve yarı kurak bölgelerin kendilerine özgü özellikleri karbon depoları olarak fonksiyon yapabildikleri anlamına gelebilir¹³³. Ancak 19 ılıman otlak alanında yapılan bir çalışmada yağmurdaki mevsimsel farklılıkların biyokütle birikimini kısıtladığı saptandı¹³². CO₂ düzeylerine ve mevsimsel yağışlara zeminin üzerindeki bitki-biyokütle yanıtlarını daha iyi anlamak için mikrobiyal toplulukların yanıtlarını ve işlevleri hakkında daha fazla bilgiye sahip olmamız gerekmektedir.

Metagenom verileri, metagenom-oluşturulmuş genomlar dahil, organik maddeleri metabolize ederek CO₂ ve CH₄ salgılayan ana mikrobiyal gruplar hakkında bilgi sağlar ve bu gruplar ile çözülmekte olan permafrosttaki biyojeokimya arasında bağlantı kurar¹⁸⁷⁻¹⁹¹. Tundra mikrobiyal toplulukları ısınmadan sonra permafrostun toprak tabakasında değişmiştir¹⁹². Isınmanın son 1,5 yılında, mikrobiyal toplulukların işlevsel potansiyeli belirgin şekilde değişti, aerobik ve anaerobik karbon ayrıştırılmasında ve besin çevriminde rol alan genlerin sayısında büyük artış oldu. Mikrobiyal metabolizma bitkilerin primer üretkenliğini uyarsa da, bitki solunumu ve primer üretim arasındaki denge atmosfere net karbon salınımı ile sonuçlanır¹⁹². Ormanlar tundranın ısınan bölgelerine doğru genişledikçe bitkilerin büyümesi net karbon kaybına yol açabilir, bunun nedeni muhtemelen kök eksudalarının oradaki toprak karbonunun mikrobiyal dekompozisyonunu uyarmasıdır^{153,193}. Isınmaya bağlı olarak karbon biriktiğine dair raporlar olsa da¹⁸³, çalışmaların çoğunda karbon kaybıyla sonuçlanan mikrobiyal topluluk yanıtları tarif edilmektedir.

Antartika yarımadasının ve yakınındaki adaların hızlı ısınması diğer yerli türlerle (örneğin *Sanionia uncinata* yosunuyla) olan rekabette köklerinin peptidleri ve de böylece nitrojeni almadaki üstün kapasitesi nedeniyle Antarktik saç otunun (*Deschampsia Antarctica*) geniş alana yayılmasıyla sonuçlandı¹⁹⁴. Otun rekabetçi olabilmesi hücre dışı proteinlerin mikrobiyal olarak hazmı ve amino asitler, nitrat ve amonyum yapılmasına dayanmaktadır¹⁹⁴. Bu bölgedeki daha sıcak topraklar geniş bir fungal çeşitliliğe ev sahipliği yaptığı için, iklim değişikliğinin fungal topluluklarda değişikliklere yol açacağı, bunun da besin

döngüleri ve primer üretimi etkileyeceği öngörülmektedir¹⁹⁵. Hem Antarktika yarımadası hem de Arktik bölgelerde yüksek büyüme ısılarına 6 ay süreyle maruz kalma siyanobakterilerin çeşitliliğini ve derin deniz matlarında toksin yapımını arttırdı¹⁹⁶. Toksin üreten türlere doğru bir kayış ya da mevcut türlerin toksin yapımında artış olması siyanobakterilerin sıklıkla derin deniz dibinde baskın primer üretici olduğu kutuplardaki tatlı su göllerini etkileyebilir¹⁹⁶.

İklim değişikliğinin birçok ötrofik göl, rezervuar ve haliçte siyanobakterilerin patlama yapmasının sıklık, yoğunluk ve süresini artırması olasıdır^{197,198}. Patlama yapan siyanobakteriler değişik nörotoksinler, hepatotoksinler ve dermatotoksinler üretebilirler ki bunlar kuşlar ve memeliler için ölümcül olabilirler (su kuşları, sığırlar ve köpekler gibi) ve suların rekreasyon, içme suyu yapımı, tarımsal sulama ve balıkçılıkta kullanımını tehdit eder¹⁹⁸. Toksik siyanobakteriler Taihu gölü (Çin), Erie gölü (ABD), Okeechobee gölü (ABD), Viktorya gölü (Afrika) ve Baltık denizinde büyük su kalitesi sorunlarına yol açmaktadırlar¹⁹⁸⁻²⁰⁰.

İklim değişikliği siyanobakterilerin patlama yapmalarını hem doğrudan hem de dolaylı olarak etkiler¹⁹⁸. Patlama yapan siyanobakterilerin birçoğu görece daha yüksek ısılarda büyüebilir²⁰¹. Göl ve rezervuarların termal tabakalaşmasındaki artış yüzebilen siyanobakterilerin yukarıya doğru yüzüp yoğun yüzey patlamaları oluşturmasına izin vererek ışığa daha iyi erişmelerini sağlar. Bu, yüzmeyen fitoplankton organizmalara karşı seçici bir avantaj sağlar^{202,203}. Yazın uzun süren kuraklıklar rezervuarlar, nehirler ve haliçlerde suyun kalma sürelerini uzatır ve bu durgun ılık sular siyanobakterilerin bloom oluşturması için ideal şartları sağlayabilir²⁰⁴.

Zararlı bir siyanobakteri türü olan *Microcystis*'in yükselmiş CO₂ düzeylerine uyum sağlama kapasitesi hem laboratuvar hem de saha çalışmalarında gösterilmiştir²⁰⁵. *Microcystis* türleri CO₂ ve HCO₃'ü alır, karboksizomlarda inorganik karbonu biriktirir. Suş rekabetçiliğinin inorganik karbon konsantrasyonuna bağlı olduğu bulundu. Sonuç olarak, iklim değişikliğinin artmış CO₂ düzeylerinin siyanobakterilerin patlama yapmasındaki suş yapısını etkilemesi beklenmektedir²⁰⁵.

Tarım

Dünya Bankasına göre (Dünya Bankasının tarım alanlarına ilişkin verileri), karasal çevrenin yaklaşık olarak %40'ı tarıma ayrılmıştır. Bu oranın artarak topraktaki diğer besin maddelerinin yanısıra karbon, nitrojen ve fosfor çevrimlerinde önemli değişiklikler yapması beklenmektedir. Üstelik bu değişiklikler biyoçeşitlilikte mikroorganizmaları da kapsayan²⁰⁷ belirgin bir azalma²⁰⁶ ile ilişkilendirilmektedir. Tarımsal sürdürülebilirliği arttırmak ve iklim değişikliğinin yiyecek üretimi üzerindeki etkilerini hafifletmek için bitkilerle-ilişkili ve hayvanlarla-ilişkili mikroorganizmaları kullanma konusunda artan bir ilgi söz konusudur. Ancak bunu yapmak için iklim değişikliğinin mikroorganizmaları nasıl etkileyeceğini daha iyi anlamamız gerekmektedir.

Mikroorganizmalar iklim değişikliğini etkiler.

Metanojenler fosil yakıtlar ile ilişkili antropojenik metan yapımının yanısıra doğal ve yapay anaerobik çevrelerde (sedimentler, çeltik tarlaları gibi suya doymuş topraklar, hayvanların mide bağırsak yolları (özellikle ön mideli olanların), atık su tesisleri ve biyogaz tesisleri) metan üretirler²⁰⁸ (Şekil2). Ana

CH₄ depoları toprak, sedimentler ve sudaki mikrobiyal oksidasyon ve atmosferdeki oksidasyondur²⁰⁸. Atmosferdeki CH₄ düzeyleri son yıllarda (2014-2017) keskin bir artış göstermiştir ancak metanojenlerden ve/veya fosil yakıt endüstrilerinden artan emisyonları ve/veya atmosferdeki CH₄ oksidasyonunun azalmasının etkisi olduğu halde şu ana kadar bunun nedenleri açık değildir bu da ısınan iklimi kontrol etmede büyük bir tehdit oluşturmaktadır²⁰⁹.

Pirinç küresel nüfusun yarısını beslemektedir²¹⁰ ve pirinç tarlaları ekilebilir alanların yaklaşık olarak %10'unu kapladıkları halde tarımsal CH₄ emisyonlarının yaklaşık %20'sine katkıda bulunurlar. Yüzyılın sonunda antropojenik iklim değişikliğinin pirinç üretiminden kaynaklanan CH₄ emisyonlarını iki katına çıkaracağı öngörülmektedir²¹⁰. Ön mideli hayvanlar tek başlarına antropojenik CH₄ emisyonlarının en büyük kaynağıdır, bitki bazlı yüksek protein içeren besinlere kıyasla geviş getiren hayvanların etinin üretimi için karbon ayak izi 19-48 kez daha büyüktür²¹¹. Ön midesiz hayvanlardan (domuz, tavuk ve balık gibi) et üretimi bile bitkisel yiyeceklerden 3-10 kez daha fazla CH₄ oluşturur²¹¹.

Fosil yakıtların yanması ve gübre kullanımı nitrojenin çevrede bulunurluğunu önemli ölçüde artırmakta bu da küresel biyojeokimyasal süreçleri bozarak ekosistemin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir^{212,213}. Mikrobiyal oksidasyon ve nitrojenin azalması ile salınan potent sera gazı N₂O'nun en büyük salımcısı tarımdır²¹⁴. Rizobakterilerde (kök yumrularındaki) ve diğer toprak mikroorganizmalarında bulunan N₂O redüktaz enzimi de N₂O'yu N'ye (sera gazı olmayan) dönüştürebilir. İklim değişikliği mikrobiyal nitrojen dönüşümlerinin meydana gelme oranlarını (dekompozisyon, mineralizasyon, nitritlendirme, denitrifikasyon ve sabitleme) bozar ve N₂O açığa çıkar²¹³. İklim değişikliği ve insanların diğer aktivitelerinin nitrojen bileşiklerinin mikrobiyal transformasyonu üzerindeki etkilerini acilen öğrenmemiz gerekmektedir.

İklim değişikliği mikroorganizmaları etkiler.

Tarım yapma az yoğun biçimde yönetilenden (az işgücü, gübre ve sermaye) yoğun biçimde yönetilene (büyük girdiler) farklılıklar gösterir. Isının artması ve kuraklık ürün elde etmeyi kuvvetle etkiler²¹⁵. Mantar bazlı toprak gıda ağları az yönetilen tarımda (otlaklar gibi) yaygındır ve kuraklığa yoğun yönetilen sistemlerde (örneğin buğday) yaygın olan bakteri bazlı yiyecek ağlarından daha iyi uyum sağlayabilir^{216,217}. Toprağın üst kısmının küresel olarak değerlendirilmesi topraktaki mantarların ve bakterilerin spesifik nişleri doldurduğunu ve yağışlar ve toprak PH'sına farklı yanıt verdiğini saptadı. Bu bize iklim değişikliğinin sayılarının çokluğu, çeşitlilikleri ve işlevleri üzerinde ayırt edici etkiler gösterebileceğine işaret etmektedir²¹⁸. İklim değişikliğine bağlı olarak artacağı öngörülen kuraklıklar küresel kuru topraklarda bakteri ve mantarların çeşitliliğini ve sayılarının çokluğunu azaltmaktadır²¹⁹. Topraktaki mikrobiyal çeşitliliğin azalması mikrobiyal toplulukların toplam işlev potansiyelini azaltarak bitkilerin büyümesini destekleme kapasitelerini sınırlandırır¹⁷³.

İklim değişikliği ve gübrelerin neden olduğu ötrofikasyonun birleşik etkisi mikrobiyal yarışma için çok önemli ve öngörülemeyen etkiler yapabilir. Örneğin besin maddelerinden zenginleştirme tipik olarak

zararlı alg bloomlarını arttırır ama görece olarak daha derin olan Zürich gölünde farklı bir sonuç gözlenmiştir²²⁰. Gübrelerden gelen fosfor girdilerinin azaltılması ökaryotik fitoplankton bloomlarını azalttı ama nitrojenin fosfora oranını arttırdı ve böylelikle nitrojen bağlamayan siyanobakteri *Planktothrix rubescens* baskın hale geldi²²⁰. Etkin bir avcının yokluğunda yıllık karışma siyanobakteri popülasyonlarını kontrol etmede önemli bir role sahiptir. Ancak, ısınma termal tabakalanmayı arttırmış ve karışmayı azaltmıştır böylelikle toksik siyanobakterilerin kalıcılığını kolaylaştırmıştır²²⁰.

Enfeksiyon hastalıkları

İklim değişikliği deniz ve kara biotalarında²²¹ farklı sosyoekonomik, çevresel ve konak-patojen spesifik faktörlere bağlı olarak hastalıkların oluşumu ve yayılmasını etkiler²²² (Şekil 3). Hastalıkların yayılmasını daha iyi anlamak ve etkili kontrol stratejileri geliştirebilmek için patojenlerin ekolojisi, vektörleri ve konakları ve de dağıtıcı ve çevresel faktörlerin etkisi hakkında bilgi sahibi olmamız gerekmektedir²²³ (Tablo1). Örneğin deniz yüzeyi ısısının artması ve mercan hastalıkları arasında kuvvetli bir ilişki vardır, tüm farklı sendromlar için hastalık mekanizmaları tam olarak net olmasa da mikrobiyal patojenlerle ilişkilendirmeler söz konusudur²²⁴⁻²²⁶. Hastalık görülme sıklığındaki tepe noktalar El Nino Güney Osilasyonu (ENSO) dönemselliği ile çakışmaktadır²²⁷. Özellikle bazı mercan türlerinde, okyanusun ısınması mercan mikrobiyomunu değişikliğe uğratarak ve konak-simbiont dengesini bozarak savunma mekanizmaları ve beslenme döngüsü yollarında kaymaya yol açarak beyazlaşma ve hastalığa yol açabilir⁹⁹. Okyanusların asitleşmesi balık gibi organizmalarda doğrudan doku hasarına neden olabilir, bunun da bakterilerin istilası için fırsat yaratan bağışıklık sistemi zayıflamasına katkıda bulunması olasıdır²²⁸.

Kuzey Amerikanın batı kıyısının yaklaşık 3000 km'lik bir bölümünde denizyıldızı türleri %80-100 oranında azaldı. En büyük azalmalar deniz yüzeyi ısısındaki anormal artışlar sırasında oluştu²²⁹. Denizyıldızları deniz kestanelerinin önemli predatörleri olduğu için, deniz kestanelerinin yenmemesi kelp ormanları ve ilişkili deniz çeşitliliğini etkileyen trofik bir basamaklı yol açabilir^{229,230}. Okyanusların ısınmasının patojenler üzerindeki etkileri ışığı altında mercanlar, süngerler, istiridyeler, istakozlar ve diğer kabuklular, deniz yıldızları, balıklar ve deniz otları gibi geniş bir aralıktaki deniz canlıları için ısı gözlemlene sistemleri geliştirilmektedir²³¹.

Kuraklığın neden olduğu orman ölümleri ve ısı stresi patojenler tarafından daha da arttırılabilir²³². Tarım ürünleri için patojenlere yanıt düşünüldüğünde birbiriyle etkileşen CO₂ düzeyleri, iklimsel değişiklikler, bitki sağlığı ve türe özgü bitki patojen etkileşimleri gibi pek çok faktör önemlidir²³³. Pek çok mikroorganizma türü (mantarlar, bakteriler, virüsler, viroidler ve oomycetler) bitkilerde hastalığa yol açabilir ve bu şekilde ürün rekoltesini etkileyebilir ve kıtlıklara yol açabilir (örneğin *Phytophthora infestans* oomycete İrlanda'daki patates kıtlığına neden olmuştur) ve yiyecek güvenliğini tehdit edebilir²³³. 600'den fazla tarım zararlısı (nematodlar ve böcekler) ve patojenin 1960'dan bu yana incelenmesi ile iklim değişikliğine bağlanabilecek şekilde kutuplara doğru bir yayılma

olduğunu saptanmıştır²³³. Patojenlerin yayılması ve hastalıkların ortaya çıkışı türlerin taşınması ve yeni yerlere gitmesi ile hızlanır ve hava durumunun dağılım, çevre koşullarının büyüme üzerindeki etkilerinden etkilenir²³³.

İklim değişikliği konak ve parazit aklimasyonunu değiştirerek hastalık riskini arttırabilir²³⁴. Ektotermelerde (örneğin amfibianlar) ısı, enfeksiyonlara duyarlılığı muhtemelen bağışıklık yanıtını bozarak arttırır^{234,235}. Aylık ve günlük tahmin edilemeyen çevre ısı oynamaları Küba ağaç kurbağalarının patojenik chytrid *Batrachochytrium dendrobatidis* mantarına duyarlılığını arttırır. Artan ısının enfeksiyon üzerindeki etkisi mantarların saf kültürlerdeki azalmış büyüme kapasitesi ile ters düşer, bu da bize iklim değişikliği ile ilgisini incelerken konak-patojen yanıtını değerlendirmenin (izole mikroorganizmaların büyüme hızı çalışmalarından bir sonuca varmaya çalışmak yerine) önemini gösterir²³⁴.

İklim değişikliğinin bazı insan patojenlerine antibiyotik direnci oranlarını arttıracığı öngörülmektedir²³⁶. 2013-2015 arasında elde edilen veriler günlük minimum ısıdaki 10°C'lik bir artışın (ABD'nin bazı bölgeleri için yüzyılın sonlarında gerçekleşmesi olasıdır) *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae* ve *Staphylococcus aureus* antibiyotik direnci oranlarında %2-4'lük bir artışa (bazı antibiyotikler için %10 kadar) yol açacağını düşündürmektedir²³⁶. Altta yatan olası mekanizmalar yükselen ısının direncin mobil genetik elemanlarında yatay gen transferini arttırması ve artmış patojen büyüme hızlarının çevrede bulunma, taşınma ve bulaşmayı kolaylaştırmasıdır²³⁶. İklim değişikliğini arttıran nüfus artışı da direnç gelişmesine katkıda bulunan önemli bir faktördür²³⁶.

Vektörler tarafından taşınan, yiyecekler ile taşınan, hava yoluyla taşınan, suda taşınan ve diğer çevresel patojenler iklim değişikliğinin etkilerine özellikle daha duyarlı olabilirler²³⁷⁻²⁴⁰ (Tablo1). Vektörler tarafından taşınan hastalıklarda, iklim değişikliği vektörlerin dağılımını, hastalıkların bulaşma aralığını ve de vektörlerin patojenleri taşıma etkinliğini etkileyecektir. Etkinlik vektörün enfekte olmuş bir konaktan beslenmesi ve vektörün kendisinin enfeksiyöz hale gelmesi arasında geçen süreye bağlıdır. Daha ılıman sıcaklıklarda, bu zaman önemli ölçüde azaltılabilir böylelikle vektörün yaşam süresi içerisinde daha fazla bulaştırma fırsatı sağlanır. Belirli bazı vektör tarafından taşınan hastalıklar örneğin büyükbaş hayvanların ekonomik önem taşıyan viral bir hastalığı olan mavi dil hastalığı, iklim değişikliğine yanıt olarak Avrupa'da başgöstermiştir ve gelecekte daha büyük ve sık salgınlara yol açacağı öngörülmektedir²⁴¹. Patojenik *Vibrio* türleri ile oluşan belirli bazı suyla taşınan enfeksiyonlarda kutuplara doğru yayılım küresel ısınma ve artan yağışlar nedeniyle sahillerdeki su ortamlarının (haliçler gibi) tuzluluğunun azalması ile korelasyon gösterir²⁴². Bu değişen koşullar *Vibrio* türlerinin çevrede gelişmesini arttırabilir²⁴². Artan deniz yüzeyi ısıları da Bengaldeş'teki *Vibrio cholera* enfeksiyonlarındaki artışla²⁴³, Baltık Denizi bölgesindeki çeşitli insan için patojenik *Vibrio* türlerinin neden olduğu enfeksiyonlar²⁴² ve Kuzey Atlantik ve Kuzey Denizi bölgesinde *Vibrio* türlerinin (insan için patojenleri dahil) bolluğu ile ilişkilidir²⁴⁴.

Sıtma ve Deng humması iklim koşullarına yüksek oranda duyarlı olduğu bilinen vektör tarafından

taşıyan iki hastalıktır bu nedenle uzamsal dağılımlarının iklim değişikliğine yanıt olarak kayması beklenmektedir^{4,141,245}. İklim değişikliği vektör tarafından taşıyan patojenlerin yayılmasını bulaşma mevsimini uzatarak, patojenlerin vektör içerisindeki replikasyon hızını ve sivrisineklerin sayısını ve coğrafik dağılımını arttırarak kolaylaştırabilir. Dengue, Zika, Chikungunya ve Sarı Humma virüslerinin başlıca vektörü olan ve soğuk kışlara dayanamadığı için tropikal ve subtropikal bölgelere sınırlı olan *Aedes aegypti* için durum budur. Sivrisinekler tarafından taşıyan diğer hastalıklar (Batı Nil Humması ve Japon ansefaliti gibi) ve kenelerle taşıyan hastalıklar (Lyme hastalığı gibi) ile birlikte milyonlarca insanın iklim değişikliği nedeniyle yeni riskler altına gireceği öngörülmektedir^{4,238,246-249}.

Birçok enfeksiyon hastalığı, çeşitli vektör-tarafından ve suyla-taşıyan hastalıklar dahil, normal yağmur düzenlerini bozan ve her birkaç yılda bir dünyanın yaklaşık olarak üçte ikisinde ısı değişikliklerine yol açan ENSO gibi büyük ölçekli iklim olaylarının neden olduğu iklim değişkenliklerinden kuvvetle etkilenir. Sıtma, Deng humması, Zika virus hastalığı, kolera, veba, Afrika at hastalığı ve diğer pek çok insan ve hayvan hastalığını ENSO ile ilişkilendiren bildiriler mevcuttur²⁵⁰⁻²⁵⁴.

Uyum mekanizmaları ve sonuçları doğal ve deneysel mikrobiyal popülasyonlarda incelenmekte olduğu halde türlerin kendi çevrelerine uyum sağlamaları hayvanlar (insanlar dahil) ve bitkilere kıyasla mikroorganizmalar için daha az araştırılmaktadır²⁵⁵. Bitkilerin ve hayvanların (tarım ürünleri, insanlar ve hayvan sürüleri gibi) viral, bakteriyel ve fungal patojenleri ısı, pestisidler, mikroorganizmalar arasındaki etkileşimler ve konak direnci gibi abiyotik ve biyotik faktörlere ekosistem işlevi, insan sağlığı ve yiyecek güvenliğini etkileyecek yollarla uyum sağlar²⁵⁵. Mikrobiyal yanıt ve insan aktivitesi arasındaki döngüsel geribildirim patojenik tarım mantarlarının uyum paternleri ile çok iyi gösterilmiştir²⁵⁶. Tarımsal ekosistemler küresel ortak özelliklere taşıdığı için (örneğin sulama, gübre kullanımı ve kültür bitkileri) ve insanların seyahat etmesi ve bitkileri taşıması halihazırda tarımsal ürün patojenlerini yaymaktadır, 'tarım-uyumlu' patojenlerin salgınlara yol açma potansiyeli daha yüksektir ve doğal yoldan gelişen suşlara kıyasla mahsül üretimi açısından daha büyük bir tehlike arz etmektedirler²⁵⁶. Fungal patojenlerin daha yüksek ısıları tolere edecek şekilde evrilerek alanlarını genişletme ve yeni habitatları istila etme yetenekleri fungal patojenlerin hem doğal hem de tarımsal ekosistemlere karşı oluşturduğu tehlikeyle birleşir²⁵⁷.

İklim değişikliğinin mikrobiyal olarak hafifletilmesi

Mikrobiyal etkileşimlerin daha iyi anlaşılması iklim değişikliği ve etkilerini hafifletmek ve kontrol etmek için alınacak önlemlerin tasarlanmasına yardımcı olacaktır (Ref.7'e bakınız). Örneğin, sivrisineklerin *Wolbachia* bakterisine (artropodların yaygın bir symbiontu) nasıl yanıt verdiğini anlamak *A. aegypti* sivrisinek popülasyonlarına *Wolbachia* verilir çevreye salınmalarıyla Zika, deng ve çikungunya virüslerinin bulaşmasında azalmayla sonuçlandı²⁵⁸. Tarımda, N₂O'yu zararsız N₂'ye indirgeyen mikroorganizmaların ekofizyolojisini anlamadaki ilerlemeler emisyonları azaltmada seçenekler sunar^{214,259}. Daha yüksek N₂O redüktaz aktivitesine sahip bakteri suşlarının kullanılması soya fasülyesinden N₂O emisyonlarını azaltmıştır; hem doğal hem de genetiği değiştirilmiş daha yüksek N₂O redüktaz aktivitesine sahip suşlar

N₂O emisyonlarını azaltmak için yollar sunar²¹⁴. Ön mide mikrobiotasını manipüle etmek²⁶⁰ ve mikrobiyal toplulukların yanıtlarını değiştiren konak genetik faktörlerini hedefleyen üretim programları²⁶¹ sığırlardan metan emisyonunu azaltma olasılığı sağlayabilir. Bu ikincisinde amaç, hayvanların sağlığını ve verimliliğini etkilemeden²⁶¹ daha az metan üreten mikrobiyal toplulukları sürdüren sığır toplulukları oluşturmak olacaktır. Fungal proteinler etin yerini alarak diyet kaynaklı karbon ayak izlerini küçültebilir²⁶².

Biyokömür iklim değişikliğinin mikrobiyal etkilerini geniş kapsamlı ve dolaylı olarak azaltacak tarımsal çözümlere bir örnektir. Biyokömür oksijen sınırlaması altında biyokütlenin termokimyasal olarak dönüştürülmesinden elde edilir ve demirden zengin topraklarda organik maddelerin stabilize olmasını ve birikmesini artırır²⁶³. Biyokömür mikrobiyal mineralizasyonu azaltarak organik madde retansiyonunu iyileştirir ve kök eksudalarının minerallerden organik madde salgılatıcı etkisini azaltarak otların büyümesini artırır ve karbon salınımını azaltır²⁶³.

Zararı azaltmak için olası bir geniş ölçekli yaklaşım kontrollü ıslak alanlarda atık su arıtmasından elde edilen atık nitrojeni kullanarak selülozik biyoyakıt üretmektir; Çin'deki tüm atıklar kullanılsa Çin'in benzin tüketiminin %7'sine denk gelecek biyoyakıt sağlayabilir²⁶⁴. Bu kontrollü ıslak alanların oluşturulması sera gazı emisyonlarını kontrol etmek ve çevreye sağlayacakları yararları optimize etmek için temel mikrobiyal konsorsiyumun özelliklerinin bilinmesini ve optimizasyonunu gerektirecektir²⁶⁵.

Mikrobiyal biyoteknoloji insanlar, hayvanlar ve bitkiler için ekosistem hizmetlerinin sağlanması (örneğin gıda) ve düzenlenmesi (örneğin hastalıkların veya sera gazlarının emisyonları ve tutulması) için sürdürülebilir gelişmeye dair çözümler sunabilir²⁶⁶. Mikrobiyal teknolojiler Birleşmiş Milletler'in fakirlik, açlık, sağlık, temiz su, temiz enerji, ekonomik büyüme, endüstriyel yenilikler, sürdürülebilir şehirler, sorumlu tüketim, iklim hareketi, suyun altında yaşam ve karada yaşamı konu alan 17 Sürdürülebilir Gelişme Hedefinden pek çoğunu gerçekleştirmek için Pratik çözümler (kimyasal, malzemesel, enerji ve ıslah) sunar⁶(Kutu 1). Toplumdaki mikrobiyoloji okuryazarlığının artırılmasıyla halkın küresel ısınmada mikroorganizmaların kilit rollerini daha iyi anlamalarını sağlayarak şüphesizki bu tür yaklaşımlara destek artırılabilir⁷.

Sonuç

Mikroorganizmalar özellikle de karadaki bitkiler kadar net CO₂ sabitleyen deniz fitoplanktonları karbon sekestrasyonuna önemli bir katkıda bulunurlar. Bu nedenle, denizlerdeki mikrobiyal fotosentezi ve buna bağlı olarak derin sularda sabitlenmiş karbon depolanmasını etkileyen çevresel değişiklikler küresel karbon çevrimi için çok büyük önem taşır. Mikroorganizmalar da heterotrofik solunum (CO₂), metanogenez (CH₄) ve denitrifikasyon (N₂O) yoluyla sera gazı emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunurlar.

Biyom, yerel çevre, yiyecek ağı etkileşimleri ve yanıtları ve de özellikle antropojenik iklim değişikliği ve diğer insan aktiviteleri gibi birçok faktör mikrobiyal sera gazı tutulumu ile emisyonu arasındaki dengeyi etkiler (Şekil 1-3).

İnsanların mikroorganizmaları doğrudan etkileyen aktiviteleri olan sera gazı emisyonları (özellikle CO₂, CH₄ ve N₂O), kirlilik (özellikle ötrofikasyon), tarım (özellikle tarla kullanımı) ve nüfus artışı iklim değişikliği, kirlilik, tarım uygulamaları ve hastalık yayılması konusunda pozitif geri besleme sağlar. Karbon salınımının tutulmasına oranını değiştiren insan aktiviteleri pozitif geribildirimleri artıracak ve iklim değişikliğini hızlandıracaktır. Bunun aksine, mikroorganizmalar tarımsal üretimin iyileştirilmesi, biyoyakıtların üretilmesi ve kirliliğin giderilmesi yoluyla insanların yol açtığı sorunların giderilmesinde önemli fırsatlar da sunmaktadır.

Mikroorganizmaları konu alan belirli konuların araştırılması için model mikroorganizmaların hedefe yönelik laboratuvar çalışmalarının yapılması gerekecektir (Kutu 2). Mikrobiyal yanıtların laboratuvar ortamında derinlemesine araştırılmasında çevreyle ilgili koşulları hedeflenmeli, çevresel stres faktörlerine mikrop odaklı bir bakış açısı kullanılmalı ve sonrasında saha çalışmaları yapılmalıdır. Mezokozm ve in situ saha deneyleri gerçek çevre koşullarında topluluk düzeyinde yanıtları anlamak açısından özellikle önemlidir. Etkili deney tasarımı bilgilendirilmiş karar verme, deniz (örneğin fiziksel oşinografi) ve kara (örneğin jeokimya) biyomları konularına özgü çoklu disiplinlerden sağlanacak bilgileri gerektirir.

Ufak çaplı etkileşimleri yöneten mikrobiyal çeşitlilik ve aktivitelerin nasıl büyük sistem dalgalanmalarına yol açtığını anlamak için bireylerden elde edilen bulguları topluluklara, topluluklardan gelen bulguları da ekosistemlerin bütününe yansıtmak önem taşımaktadır. Dünya sistemlerini modelleyenler biyotik (diğer mikroorganizmalar, bitkiler ve organik madde substratları gibi) ve abiyotik (mineral yüzeyler, okyanus fiziği ve kimya gibi) güçlere verilen fizyolojik ve uyum sağlayıcı (evrimsel) yanıtlara mikrobiyal katkıları da dahil etmelidirler.

Küresel deniz ve toprak mikrobiyomuna dair sayısal bilgilerimizi arttırmalıyız. Dünya üzerindeki herhangi bir lokasyonda biyojeokimyasal çevrimler ve iklim değişikliği geribildirimlerini anlamak için element çevrimini etkileyen organizmalar (insanlar, bitkiler ve mikroorganizmalar) ve bu organizmaların aktivitelerini düzenleyen çevre koşulları (iklim, toprağın fizyokimyasal karakteristikleri, topoğrafya, okyanus ısı, ışık ve karışma) hakkında niceliksel bilgiye gereksinimimiz vardır. Kantitatif modeller için çerçeve mevcuttur ancak bu modeller büyük oranda deniz ve karasal mikroorganizmaların mekanistik detaylarından yoksundur. Bu eksikliğin nedeni böyle bir modelin matematiksel olarak nasıl yapılacağından ziyade çevre değişikliklerine verilen mikrobiyal yanıtların güçlü bir biçimde öngörülebilmesini sağlayan fizyolojik ve evrimsel verilerin bulunmamasıdır. Bu mekanistik bilgiyi arttırmaya yönelik hedefe odaklı bir yatırım Dünya sistemleri modelleri ile yapılacak mevcut ve gelecekteki iklim tahminleri için mihenk taşı olma, ölçeklendirme ve parametreleri belirleme açısından mutlak gereklidir.

Günümüzdeki yaşam milyarlarca yıl boyunca geniş biyoçeşitlilik oluşturmak üzere evrimleşmiştir, makroskopik yaşama kıyasla mikrobiyal biyoçeşitlilik pratikte sınırsızdır. İnsan aktiviteleri nedeniyle makroskopik organizmaların biyoçeşitliliği hızla azalmaktadır, bu da bize hayvan ve bitki türlerindeki konağa-özü mikroorganizmaların biyoçeşitliliğinin de azalacağını düşündürmektedir. Ancak, makroskopik

organizmalara kıyasla, mikroorganizmalar ve antropojenik iklim değişikliği arasındaki bağlantılar konusunda çok daha az bilgiye sahibiz. Mikroorganizmaların iklim değişikliği üzerindeki ve iklim değişikliğinin mikroorganizmalar üzerindeki etkilerini fark edebiliyoruz, ancak öğrendiklerimiz eksik, karmaşık ve yorumlanması zor. Antropojenik iklim değişikliğinin nedenlerini tanımlamanın ve biyolojik sistemler üzerindeki etkilerini anlamının zor olması şaşırtıcı değildir. Yine de, insan aktivitelerinin iklim değişikliğine yol açtığına ve bunun da küresel olarak ekosistemin normal işlevlerini bozduğuna hiç şüphe yoktur (Kutu 1). Deniz ve kara biyomlarında, mikrobik canlıların neden olduğu sera gazı emisyonları artmakta ve iklim değişikliği üzerinde pozitif geri besleme oluşturmaktadır. İnce detaylardan bağımsız olarak, mikrobiyal pusula harekete geçme gerekliliğini göstermektedir (Kutu 2). Mikrobiyal toplulukların iklim değişikliğindeki rolü, etkileri ve geri besleme yanıtının gözardı edilmesi kendi yokoluşumuza yol açabilir. Mikroorganizmaları araştırma, teknoloji geliştirme, politika ve yönetim kararları almaya özellikle dahil etmek için acil, kalıcı ve organize çaba sarfedilmesi gerekmektedir. Mikroorganizmalar sadece iklim değişikliğinin hızına katkıda bulunmakla kalmaz aynı zamanda sorunun etkin biçimde çözümlenmesi ve uyum yollarımıza da büyük katkıda bulunabilir.

Kutu1 | Biliminsanlarının uyarısı

Dünya bilim insanları ve 'biliminsanları uyarısı' hareketi insanlığı küresel iklim ve çevre üzerinde insan aktivitelerinin etkisine karşı uyarmak amacıyla kuruldu. 1992'de 1,700 bilim insanı ilk uyarıyı imzalayarak insan etkisinin yaşayan dünyanın geleceğini ciddi riske attığı konusunda farkındalık yarattılar²⁶⁷. İkinci uyarı 25 yıl sonra, 2017'de 15,000'den fazla bilim insanı tarafından imzalanarak yayınlandı⁵, hareket güçlenmeye devam etti ve 21,000'den fazla bilim insanı da uyarının altına imzasını ekledi. Uyarının merkezinde hükümetlere ve kurumlara politikalarını ekonomik büyümeden çevre yıkımına dur diyecek ve sürdürülebilir bir gelecek için insan aktivitelerine olanak sağlayan bir koruma ekonomisine kaydırmaları çağrısı yer almaktadır²⁶⁸.

İkinci uyarının ekinde özgün konulara odaklanan bir seri makale yer almaktadır, bunlardan ilki sulak alanları korumanın önemini anlatmaktadır²⁶⁹. 'İkinci Uyarı' adlı film de biliminsanlarının insanlığa 'işleri her zamanki gibi sürdürmek' yerine süregelen çevresel ve iklim değişiklikleri krizini ortadan kaldırarak tüm türlerin sağkalmasını sağlamak için harekete geçmeleri gerektiğini anlattıklarını belgelemektedir.

Dünya bilim insanlarının hedeflerini tamamlayacak biçimde Birleşmiş Milletler'in de bugün ve gelecekte insanlar ve gezegenimiz için huzur, barış ve refah sağlamak için formüle edilmiş Sürdürülebilir Gelişme Hedefleri vardır⁶. Hedefler çevresel, ekonomik ve sosyal gereksinimler etrafında şekillendirilmiştir ve yoksulluğun giderilmesi, güvenli şehirler ve eğitilmiş nüfus oluşturma, yenilenebilirlerin (enerji sağlama ve tüketme) uygulanması ve sağlıklı, daha az

kirlenmiş bir biyosfer oluşturmak için susal ve karasal sistemlerin eşit biçimde kullanımını içeren iklim değişikliğine yönelik acil harekete geçerek sürdürülebilirliği konu alır. Hedefler sınırlı doğal kaynakların sorumlu yönetiminin sürdürülebilir, dayanıklı toplumların gelişimi için gerekli olduğunu kabul etmektedir.

Bizim Uzlaşa Bildirimiz insanlığa mikrobiyoloji bakış açısıyla yapılan bir uyarıdır. 'Mikrobiyologların uyarısı' olarak mikrobiyal dünyanın bilinirliğinin artırılması ve Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Gelişme Hedeflerine ulaşmak için iklim değişikliğini konu alan çerçevelere mikrobiyal araştırmaları daha fazla entegre etmek, mikrobiyologların daha fazla katılımını sağlamak için harekete geçilmesi çağrısında bulunur (Kutu 2). İklim değişikliğinde mikroorganizmaların rolüne dikkat çekmeye çalışan daha önceki bilim ve politika çabaları ve toplumu büyük ölçüde ilgilendirmeleri üzerine inşa edilmiştir^{7,126,270-272}. Mikrobiyologlar 'mikrobiyologlar uyarısı'na imzalarıyla katkıda bulunabilirler.

Kutu 2 | Harekete geçme çağrısı

Mikrobiyologların uyarısı aşağıdaki maddelerde özetlenen konularda harekete geçme çağrısıdır:

- Tüm çok hücreli organizmaların, insanlar dahil, sağlık ve işlevleri için mikroorganizmalara gereksinimi olduğu kabul edilmelidir; mikrobiyal hayat biyosferin destek sistemidir.
- Mikroorganizmalar ana akım iklim değişikliği araştırmalarına, özellikle karbon ve nitrojen oynamalarını araştıranlara, dahil edilmelidir
- Mikrobiyal ekosistem ve iklim değişikliğine yanıtlarla ilgili çevresel değişkenleri ve stres faktörlerini (biyotik ve abiyotik) içeren deneysel tasarımlar yapılmalıdır
- İklim değişikliğine fizyolojik, toplumsal ve evrimsel mikrobiyolojik yanıtlar ve geribildirimlerin araştırılması gereklidir
- Deniz ve kara biyomlarında ve tarımsal, endüstriyel atık ve sağlık sektörlerinde sera gazı oynamalarının gözlemlenmesinde mikrobiyal geribildirim mekanizmalarına odaklanılmalı ve uzun süreli gözlemlere yatırım yapılmalıdır
- İklim değişikliği senaryolarındaki öngörülerini iyileştirmek için mikrobiyal süreçleri ekosistem ve dünya sistem modellerinin parçası haline getirmek gerekir
- İklim değişikliği etkilerini minimize etmek ve ortadan kaldırmak, kirliliği azaltmak ve fosil yakıtlara dayalı olmayı ortadan kaldırmak için inovatif mikrobiyal teknolojiler geliştirilmelidir
- Okul müfredatlarına mikrobiyolojinin kişisel, toplumsal, çevresel ve sürdürülebilirlik ile ilgili hususları dahil edilmeli ve bunu takiben üçüncü düzeyde mikrobiyoloji eğitimi geliştirilmeli, daha iyi eğitilmiş halk ve uygun biçimde eğitilmiş bilim insanları ve işgücü oluşturulmalıdır
- Politika ve yönetim kararları alınırken mikroorganizmalar mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır
- Tüm temel biyosfer süreçlerinin mikroorganizmalara dayalı olduğunun ve insan davranışlarından büyük ölçüde etkilendiğinin kabulü Birleşmiş Milletler'in Gelişme Hedeflerinin yönetimi ve geliştirilmesine mikrobiyolojinin entegrasyonunu gerekli kılmaktadır

Şekil 1 | Mikroorganizmalar ve deniz ve kara biyomlarında iklim değişikliği.

Deniz çevrelerinde, mikrobiyal primer yapım CO₂ sekestrasyonuna önemli ölçüde katkıda bulunur.

Deniz mikroorganizmaları ayrıca besin maddelerini deniz yiyecek ağında kullanılmak üzere geri dönüştürür ve bu süreçte atmosfere CO₂ salarlar. Karasal çevrelerin pek çoğunda mikroorganizmalar organik maddelerin temel çürütücüsüdür ve toprakta bitkilerin büyümesi için gerekli besin malzemelerinin yanısıra atmosfere CO₂ ve CH₄ salarlar. Mikrobiyal biyokütle ve diğer organik maddeler (bitki ve hayvan artıkları) milyonlarca yıl içerisinde fosil yakıtlara dönüştürülürler. Bunun tersine, fosil yakıtların yakılması bu sürenin çok küçük bir parçasında sera gazlarını açığa çıkarır. Bunun sonucunda karbon çevrimi dengesini aşırı derecede kaybedecek ve fosil yakıtlar kullanılmaya devam ettiği sürece atmosferdeki CO₂ düzeyleri artmaya devam edecektir. İnsanların tarım, endüstri, ulaşım, nüfus artışı ve tüketim gibi aktivitelerinin pek çok etkisi toprağın türü ve ışık gibi yerel çevresel faktörlerle bir araya gelince diğer mikroorganizmalar, bitkiler ve hayvanlarla kompleks etkileşim ağını büyük ölçüde etkiler. Bu etkileşimler mikroorganizmaların nasıl yanıt verdiğini ve iklim değişikliğini nasıl etkilediğini (örneğin sera gazı emisyonları yoluyla) ve iklim değişikliğinin (örneğin daha yüksek CO₂ düzeyleri, ısınma ve yağış değişiklikleri) buna karşılık mikrobiyal yanıtları nasıl etkilediğini belirler. OMZ, minimum oksijen bölgesi (MOB)

Şekil 2 | **Mikroorganizmaları etkileyen tarım ve diğer insan aktiviteleri.** Tarım uygulamaları mikrobiyal toplulukları belirli şekillerde etkiler. Tarlaların kullanımı (örneğin ekilen bitki türü) ve kirlilik kaynakları (örneğin gübreler) mikrobiyal topluluk kompozisyonunu ve işlevini bozarak karbon, nitrojen ve fosfor dönüşümlerinin doğal çevrimlerini bozar. Metanojenler önemli ölçüde metanı doğrudan geviş getiren hayvanlardan (sığır, koyun ve keçi gibi) ve çeltik tarlaları ve kontrollü ıslak alanlar gibi doymuş topraklardaki anaerobik koşullarda üretirler. Mikrobiyal çeşitlilikte azalmaya neden olan insan aktiviteleri de mikroorganizmaların bitkilerin büyümesini destekleme kapasitelerini azaltır.

Şekil 3 | **İklim değişikliği patojenlerin etkisini arttırmaktadır.** Antropojenik iklim değişikliği doğal hayatı strese sokarak patojenlerin hastalıklara yol açmasına giderek daha fazla neden olmaktadır. Suda kültür canlıları üretimi, yiyecek sağlayan hayvanlar ve tarım ürünleri üzerindeki etkiler küresel yiyecek teminini tehdit etmektedir. Nüfus artışları ve seyahat gibi insan aktiviteleri iklim değişikliği ile birlikte patojenlerin antibiyotiklere direncini, suyla ve vektörle taşınan patojenlerin yayılmasını arttırmakta böylelikle de insanlar, diğer hayvanlar ve bitkilerdeki hastalıkları arttırmaktadır.

Habitatlar

Organizmanın normalde yaşadığı çevreler; örneğin göl, orman, sediment ve kutup çevreleri farklı habitat türlerini temsil eder

Ekosistem

Belirli bir çevrede var olan mineraller, besin maddeleri, su, hava durumu ve topoğrafik özellikler gibi cansız bileşenler ile etkileşen organizma toplulukları

Yiyecek Ağı

Bir ekosistemde trofik (beslenme) etkileşimlerini tanımlayan birbiriyle bağlantılı bileşenler, sıklıkla çoklu yiyecek zincirlerinden oluşurlar; örneğin deniz mikrobiyal primer üreticileri ve heterotrofik yeniden mineralizasyon yapıcılar en gelişmiş trofik predatörlere veya primer üretici olarak ağaçlar, otoburlar ve mikrobiyal nitrojen bağlayıcılar ve remineralizasyon yapıcılara bağlanır

Yüzey altı

Aşağıya doğru kilometrelerce uzanan, karasal derin su sistemleri, hidrokarbon ve maden sistemleri, deniz çökeltileri ve okyanus tabanını içeren yüzey altı ekosistemlerinin bulunduğu dünyanın yüzeyinin altında kalan alan

Ötrofikasyon

Akuatik bir sisteme mineral ve besin maddeleri girişinde artış olması; gübre, kanalizasyon ve deterjanlardan nitrojen ve fosfor girişi tipik örneklerdir.

Fitoplankton

Fotosentez yaparak gelişen ve okyanus ya da göllerdeki akıntılarla görece pasif olarak sürüklenen tek hücreli, klorofil içeren mikroorganizmalar (ökaryotlar ve bakteriler)

Biyomlar

Ortak fiziksel özellikleri (iklim ve jeoloji gibi) olan birçok ekosistemi içeren sistemler; burada 'biyom' sözcüğü tüm karasal çevreleri (kıtalar) ve tüm deniz çevrelerini (denizler ve okyanuslar) anlatmak için kullanılmıştır.

Fototrofik

Büyüme için gerekli enerjiyi güneş ışığından sağlayan.

Su kolonu

Göl veya okyanustaki su tabakası

Tabakalanma

Yüzey suları ve daha derin suların yoğunluğundaki farklılığa bağlı olarak oluşan su katmanları; ısınan yüzey suları, yağış ve buzların erimesi kaynaklı tatlı su girişine bağlı olarak tabakalanma artmaktadır.

Remineralize etme

Organik maddeleri tekrar yapı taşları olan inorganik bileşenlere dönüştürmek; denizlerdeki ve karadaki heterotroflar tarafından remineralizasyon atmosfere CO₂'nin salındığı solunumu da içerir.

Sedimentler

Su kolonundan bir gölün veya okyanusun dibine çöken maddeler

Primer yapım

Fitoplanktonlar veya bitkiler gibi fototrofik organizmalar tarafından biyokütle yapımı

Bloom

Fitoplanktonlar gibi belirli tipte mikroorganizmaların yüksek konsantrasyonlara çıkması; tipik olarak ani yükseliş ve düşüş döngüsü şeklindedir, fitoplanktonun hızlı hücre bölünmesini büyüme takip eder örneğin bir virus hücreleri eritir ve bloomun çökmesine neden olur

Diatomlar

Tek hücreli alglerin silika-içeren iskeleti olan bir sınıfı (Bacillariophyceae)

Solunum

Mikroorganizmaların heterotrofik ve bitkilerin ototrofik solunumu ile CO₂ oluşur, bitkiler, mikroalgler ve siyanobakterilerin fotosentez yaparkenki solunumu CO₂'yi sabitler ve O₂ oluşturur.

Metanojenler

Metanogenezis yoluyla metan üreten Archaea ailesinin üyeleri. Büyüme için enerji sağlarken karbon dioksiti, asetik asit veya metilaminler veya metanol gibi çeşitli tek karbonlu bileşikler azaltırlar.

Büyüme etkinliği

Mikroorganizmaların organik maddeleri biyokütleyle ne kadar etkin biçimde dönüştürdüğüne bir ölçütü, düşük etkinlik atmosfere daha fazla karbon salınması anlamına gelir

Oligotrofik

Besin maddelerinin veya besin akımlarının özellikle karbon, nitrojen veya fosforun az olduğu ve dolayısıyla sistemin desteklediği hücrelerin konsantrasyonunun sınırlandığı koşullar; sahiller ve alt suyun yüzeye doğru yükseldiği yerler dışında okyanusların büyük bölümü oligotroftir.

Siyanobakteri

Güneş ışığını enerji kaynağı olarak kullanan oksijen yapıcı fotosentetik bakteri

Mikrobiyal çevrim

Bir yiyecek ağının mikrobiyal bileşeni; örneğin deniz mikroorganizmalarındaki organik maddeler hücre ölümüne bağlı olarak ya da grazers ve virüsler tarafından yenilerek açığa çıkarlar ve daha sonra daha yüksek trofik seviyelerdeki organizmaları besleyecek hücrelerin büyümesi için kullanılırlar.

Fotosentez

Güneş ışığının ATP oluşturmak için kullanılan enerjiye dönüştürülmesi ve ardından CO₂'nin organik maddeye bağlanması (konversiyon); bu süreç fototroftir.

Ototrofik

Karbonun tek kaynağı olarak karbon dioksiti kullanarak büyüeyebilen

Heterotrofik

Büyüme için gerekli enerjiyi sağlamak için organik bileşikler besin olarak kullanan

Dünya sistemleri modeli

Dünyanın, biyosferin atmosfer, okyanuslar, karalar ve buzlar ile etkileşimlerini entegre eden fiziksel (iklim dahil), kimyasal ve biyolojik süreçlerinin simülasyonu

Rizosfer

Toprağın bitkilerin köklerini çevreleyen ve onlardan etkilenen bölgesi

Detritivorlar

Detritus (hayvan ve bitki organik maddesi)'u ayrıştırarak büyüyen organizmalar

Denitrifikasyon

Nitrojenin nitrat (NO_3) veya nitrit (NO_2) gibi oksitlenmiş formlarının nitroz oksit (N_2O) ve nitrojen gazı (N_2) gibi daha indirgenmiş formlara dönüştürülmesi süreci

Forcings (sera etkisi?)

İklimsel (veya radyatif) sera etkisi (örneğin antropojenik sera gazları, yüzeyin yansıtma özelliği (albedo), aerosoller) iklim değişikliğine neden olan iklim sisteminin dışındaki (örneğin okyanuslar, kara yüzeyi, kriyosfer, biyosfer ve atmosfer) faktörlerdir. Dünya tarafından güneş ışığından uzaya geri yansıtılandan daha fazla enerji emildiğinde pozitif sera etkisi oluşur.

Tablo1 | Patojenlerin taşınmasının iklimsel ve çevresel faktörlere yanıtları

Örnek patojen hastalıkları	İklimsel çevresel faktörler	Bulaşma parametreleri
<i>Vektör tarafından taşınan</i>		
Batı Nil virüsü	Yağış, bağıl nem, ısı, El Niño	Vektör sayısının fazlalığı, uzun yaşam süresi ve ısırma oranı, vektörde patojenin replikasyon hızı ²⁷³⁻²⁷⁶
Sıtma	Güney Osilasyonu	
Dengue humması		
Lyme hastalığı		
<i>Suyla taşınan</i>		
Kolera	Sıcaklık, yağış değişkenliği, tuzluluk, El Niño	Patojen sağkalımı, doğada patojen replikasyonu, taşınması ^{244,277-279}
Kolera dışı <i>Vibrio türleri</i>	Güney Osilasyonu	
<i>Cryptosporidium türleri</i>		
Rotavirus		
<i>Havayla taşınan</i>		
Influenza	Bağıl nem, sıcaklık, rüzgar	Patojen sağkalımı, patojen ve/veya konak dağılımı ²⁸⁰⁻²⁸⁴
Hantavirüs		
Koksidioidomikozis		
<i>Yiyecek ile taşınan</i>		
<i>Salmonella türleri</i>	Sıcaklık, yağış	Patojen replikasyonu, insan davranışları ^{239,240}
<i>Campylobacter türleri</i>		

KAYNAKLAR

1. Barnosky, A. D. et al. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* **471**, 51–57 (2011).
2. Crist, E., Mora, C. & Engelman, R. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science* **356**, 260–264 (2017).
3. Johnson, C. N. et al. Biodiversity losses and conservation responses in the Anthropocene. *Science* **356**, 270–275 (2017).
4. Pecl, G. T. et al. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* **355**, eaai9214 (2017).
5. Ripple, W. J. et al. World scientists' warning to humanity: a second notice. *BioScience* **67**, 1026–1028 (2017).
6. United Nations Department of Economic and Social Affairs. *The Sustainable Development Goals Report 2018* (United Nations, 2018).
7. Timmis, K. et al. The urgent need for microbiology literacy in society. *Environ. Microbiol.* **21**, 1513–1528 (2019).
8. Flemming, H. C. & Wuertz, S. Bacteria and archaea on Earth and their abundance in biofilms. *Nat. Rev. Microbiol.* **17**, 247–260 (2019).
9. Maloy, S., Moran, M. A., Mulholland, M. R., Sosik, H. M. & Spear, J. R. *Microbes and Climate Change: Report on an American Academy of Microbiology and American Geophysical Union Colloquium held in Washington, DC, in March 2016* (American Society for Microbiology, 2017).
10. Jørgensen, B. B. & Boetius, A. Feast and famine — microbial life in the deep-sea bed. *Nat. Microbiol. Rev.* **5**, 770–781 (2007).
11. Sunagawa, S. et al. Structure and function of the global ocean microbiome. *Science* **348**, 1261359 (2015).
12. Karner, M. B., DeLong, E. F. & Karl, D. M. Archaeal dominance in the mesopelagic zone of the Pacific Ocean. *Nature* **409**, 507–510 (2001).
13. Azam, F. & Malfatti, F. Microbial structuring of marine ecosystems. *Nat. Rev. Microbiol.* **5**, 782–791 (2007).
14. Kallmeyer, J., Pockalny, R., Adhikari, R. R., Smith, D. C. & D'Hondt, S. Global distribution of microbial abundance and biomass in subseafloor sediment. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **109**, 16213–16216 (2012).
15. Bar-On, Y. M., Phillips, R. & Milo, R. The biomass distribution on Earth. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **115**, 6506–6511 (2018).
16. Danovaro, R., Corinaldesi, C., Rastelli, E. & Dell'Anno, A. Towards a better quantitative assessment of the relevance of deep-sea viruses, Bacteria and Archaea in the functioning of the ocean seafloor. *Aquat. Microb. Ecol.* **75**, 81–90 (2015).
17. Caldeira, K. & Wickett, M. E. Oceanography: anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* **425**, 365 (2003).
18. Bunse, C. et al. Response of marine bacterioplankton pH homeostasis gene expression to elevated CO₂. *Nat. Clim. Change* **5**, 483–491 (2016).
19. Hurd, C. L., Lenton, A., Tilbrook, B. & Boyd, P. W. Current understanding and challenges for oceans in a higher-CO₂ world. *Nat. Clim. Change* **8**, 686–694 (2018).
20. Hönisch, B. et al. The geological record of ocean acidification. *Science* **335**, 1058–1063 (2012).
21. Sosdian, S. M. et al. Constraining the evolution of Neogene ocean carbonate chemistry using the boron isotope pH proxy. *Earth Planet. Sci. Lett.* **248**, 362–376 (2018).
22. Riebesell, U. & Gattuso, J.-P. Lessons learned from ocean acidification research. *Nat. Clim. Change* **5**, 12–14 (2015).
23. Gao, K. et al. Rising CO₂ and increased light exposure synergistically reduce marine primary productivity. *Nat. Clim. Change* **2**, 519–523 (2012).

24. Boyd, P. W. Framing biological responses to a changing ocean. *Nat. Clim. Change* **3**, 530–533 (2013).
25. Pörtner, H.-O. et al. in *Climate Change 2014 — Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report* (eds Field, C. B. et al.) 411–484 (Cambridge University Press, 2014).
26. Brennan, G. & Collins, S. Growth responses of a green alga to multiple environmental drivers. *Nat. Clim. Change* **5**, 892–897 (2015).
27. Hutchins, D. A. & Boyd, P. W. Marine phytoplankton and the changing ocean iron cycle. *Nat. Clim. Change* **6**, 1072–1079 (2016).
28. Hutchins, D. A. & Fu, F. X. Microorganisms and ocean global change. *Nat. Microbiol.* **2**, 17508 (2017).
29. Rintoul, S. R. et al. Choosing the future of Antarctica. *Nature* **558**, 233–241 (2018).
30. Behrenfeld, M. J. Climate-mediated dance of the plankton. *Nat. Clim. Change* **4**, 880–887 (2014).
31. De Baar, H. J. W. et al. Importance of iron for plankton blooms and carbon dioxide drawdown in the Southern Ocean. *Nature* **373**, 412–415 (1995).
32. Boyd, P. W. et al. Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: synthesis and future directions. *Science* **315**, 612–617 (2007).
33. Behrenfeld, M. J. et al. Revaluating ocean warming impacts on global phytoplankton. *Nat. Clim. Change* **6**, 323–330 (2016).
34. Behrenfeld, M. J. et al. Annual boom-bust cycles of polar phytoplankton biomass revealed by space-based lidar. *Nat. Geosci.* **10**, 118–122 (2017).
35. Behrenfeld, M. J. et al. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* **444**, 752–755 (2006).
36. Levitan, O. et al. Elevated CO₂ enhances nitrogen fixation and growth in the marine cyanobacterium *Trichodesmium*. *Glob. Change Biol.* **13**, 531–538 (2007).
37. Verspagen, J. M., Van de Waal, D. B., Finke, J. F., Visser, P. M. & Huisman, J. Contrasting effects of rising CO₂ on primary production and ecological stoichiometry at different nutrient levels. *Ecol. Lett.* **17**, 951–960 (2014).
38. Holding, J. M. et al. Temperature dependence of CO₂-enhanced primary production in the European Arctic Ocean. *Nat. Clim. Change* **5**, 1079–1082 (2015).
39. Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* **466**, 591–596 (2010).
40. Mackas, D. L. Does blending of chlorophyll data bias temporal trend? *Nature* **472**, E4–E5 (2011).
41. Rykaczewski, R. R. & Dunne, J. P. A measured look at ocean chlorophyll trends. *Nature* **472**, E5–E6 (2011).
42. McQuatters-Gollop, A. et al. Is there a decline in marine phytoplankton? *Nature* **472**, E6–E7 (2011).
43. Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Boyce et al. reply. *Nature* **472**, E8–E9 (2011).
44. Antoine, D., Morel, A., Gordon, H. R., Banzon, V. F. & Evans, R. H. Bridging ocean color observations of the 1980s and 2000s in search of long-term trends. *J. Geophys. Res. Oceans* **110**, C06009 (2005).
45. Wernand, M. R., van der Woerd, H. J. & Gieskes, W. W. Trends in ocean colour and chlorophyll concentration from 1889 to 2000, worldwide. *PLOS ONE* **8**, e63766 (2013).
46. Rousseaux, C. S. & Gregg, W. W. Recent decadal trends in global phytoplankton composition. *Global Biogeochem. Cycles* **29**, 1674–1688 (2015).
47. Kirchman, D. L., Morán, X. A. & Ducklow, H. Microbial growth in the polar oceans — role of temperature and potential impact of climate change. *Nat. Rev. Microbiol.* **7**, 451–459 (2009).
48. Dore, J. E., Lukas, R., Sadler, D. W., Church, M. J. & Karl, D. M. Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **106**, 12235–12240 (2009).

49. Saba, V. S. et al. Challenges of modeling depth-integrated marine primary productivity over multiple decades: a case study at BATS and HOT. *Global Biogeochem. Cycles* **24**, GB3020 (2010).
50. Buttigieg, P. L., Fadeev, E., Bienhold, C., Hehemann, L., Offre, P. & Boetius, A. Marine microbes in 4D—using time series observation to assess the dynamics of the ocean microbiome and its links to ocean health. *Curr. Opin. Microbiol.* **43**, 169–185 (2018).
51. Rusch, D. B. et al. The Sorcerer II Global Ocean Sampling expedition: northwest Atlantic through eastern tropical Pacific. *PLOS Biol.* **5**, e77 (2007).
52. Brown, M. V. et al. Global biogeography of SAR11 marine bacteria. *Mol. Syst. Biol.* **8**, 595 (2012).
53. Wilkins, D. et al. Biogeographic partitioning of Southern Ocean microorganisms revealed by metagenomics. *Environ. Microbiol.* **15**, 1318–1333 (2013).
54. Brum, J. R. et al. Patterns and ecological drivers of ocean viral communities. *Science* **348**, 1261498 (2015).
55. de Vargas, C. et al. Eukaryotic plankton diversity in the sunlit ocean. *Science* **348**, 1261605 (2015).
56. Lima-Mendez, G. et al. Determinants of community structure in the global plankton interactome. *Science* **348**, 1262073 (2015).
57. Guidi, L. et al. Plankton networks driving carbon export in the oligotrophic ocean. *Nature* **532**, 465–470 (2016).
58. Roux, S. et al. Ecogenomics and potential biogeochemical impacts of globally abundant ocean viruses. *Nature* **537**, 689–693 (2016).
59. Gregory, A. et al. Marine DNA viral macro- and microdiversity from pole to pole. *Cell* **177**, 1109–1123.e14 (2019).
60. Nelson, D. M., Tréguer, P., Brzezinski, M. A., Leynaert, A. & Quéguiner, B. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation. *Global Biogeochem. Cycle* **9**, 359–372 (1995).
61. Malviya, S. et al. Insights into global diatom distribution and diversity in the world's ocean. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **113**, E1516–E1525 (2016).
62. Tréguer, P. et al. Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump. *Nat. Geosci.* **11**, 27–37 (2018).
63. Mahadevan, A., D'Asaro, E., Lee, C. & Perry, M. J. Eddy-driven stratification initiates North Atlantic spring phytoplankton blooms. *Science* **337**, 54–58 (2012).
64. Boyd, P. W., Claustre, H., Levy, M., Siegel, D. A. & Weber, T. Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. *Nature* **568**, 327–335 (2019).
65. Behrenfeld, M. J., Doney, S. C., Lima, I., Boss, E. S. & Siegel, D. A. Annual cycles of ecological disturbance and recovery underlying the subarctic Atlantic spring plankton bloom. *Global Biogeochem. Cycles* **27**, 526–540 (2013).
66. Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T. & Falkowski, P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science* **281**, 237–240 (1998).
67. Behrenfeld, M. J. et al. Biospheric primary production during an ENSO transition. *Science* **291**, 2594–2597 (2001).
68. Boetius, A. et al. Massive export of algal biomass from the melting Arctic sea ice. *Science* **339**, 1430 (2013).
69. Pachiadaki, M. G. et al. Major role of nitrite-oxidizing bacteria in dark ocean carbon fixation. *Science* **358**, 1046–1051 (2017).
70. Grzymalski, J. J. et al. A metagenomic assessment of winter and summer bacterioplankton from Antarctic Peninsula coastal surface waters. *ISME J.* **6**, 1901–1915 (2012).
71. Boetius, A. & Wenzhöfer, F. Seafloor oxygen consumption fuelled by methane from cold seeps. *Nat. Geosci.* **6**, 725–734 (2013).
72. Danovaro, R. et al. Marine viruses and global climate change. *FEMS Microbiol. Rev.* **35**, 993–1034 (2011).

73. Schmidtko, S., Stramma, L. & Visbeck, M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature* **542**, 335–339 (2017).
74. Breitburg, D. et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science* **359**, eaam7240 (2018).
75. Bertagnolli, A. D. & Stewart, F. J. Microbial niches in marine oxygen minimum zones. *Nat. Rev. Microbiol.* **16**, 723–729 (2018).
76. Danovaro, R., Molari, M., Corinaldesi, C. & Dell’Anno, A. Macroecological drivers of archaea and bacteria in benthic deep-sea ecosystems. *Sci. Adv.* **2**, e1500961 (2016).
77. Bienhold, C., Zinger, L., Boetius, A. & Ramette, A. Diversity and biogeography of bathyal and abyssal seafloor bacteria. *PLOS ONE* **11**, e0148016 (2016).
78. Rosenfeld, D. et al. Aerosol-driven droplet concentrations dominate coverage and water of oceanic low-level clouds. *Science* **363**, eaav0566 (2019).
79. Charlson, R. J., Lovelock, J. E., Andreae, M. O. & Warren, S. G. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature* **326**, 655–661 (1987).
80. Gantt, B. & Meskhidze, N. The physical and chemical characteristics of marine primary organic aerosol: a review. *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 3979–3996 (2013).
81. Meskhidze, N. & Nenes, A. Phytoplankton and cloudiness in the Southern. *Ocean. Science* **314**, 1419–1423 (2006).
82. Andreae, M. O. & Rosenfeld, D. Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth Sci. Rev.* **89**, 13–41 (2008).
83. Moore, R. H. et al. Droplet number uncertainties associated with CCN: an assessment using observations and a global model adjoint. *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 4235–4251 (2013).
84. Sanchez, K. J. et al. Substantial seasonal contribution of observed biogenic sulfate particles to cloud condensation nuclei. *Sci. Rep.* **8**, 3235 (2018).
85. Atwood, T. B. et al. Predators help protect carbon stocks in blue carbon ecosystems. *Nat. Clim. Change* **5**, 1038–1045 (2015).
86. Myers, R. A. & Worm, B. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature* **423**, 280–283 (2003).
87. Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I. & Marbà, N. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nat. Clim. Change* **3**, 961–968 (2013).
88. Hoffmann, A. A. & Sgrò, C. M. Climate change and evolutionary adaptation. *Nature* **470**, 479–485 (2011).
89. Hughes, T. P. Catastrophes, phase shifts, and largescale degradation of a Caribbean coral reef. *Science* **265**, 1547–1551 (1994).
90. Bellwood, D. R., Hoey, A. S., Ackerman, J. L. & Depczynski, M. Coral bleaching, reef fish community phase shifts and the resilience of coral reefs. *Glob. Change Biol.* **12**, 1587–1594 (2006).
91. Hoegh-Guldberg, O. et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* **318**, 1737–1742 (2007).
92. Mumby, P. J., Hastings, A. & Edwards, H. J. Thresholds and the resilience of Caribbean coral reefs. *Nature* **450**, 98–101 (2007).
93. Enochs, I. C. et al. Shift from coral to macroalgae dominance on a volcanically acidified reef. *Nat. Clim. Change* **5**, 1083–1088 (2015).
94. De Bakker, D. M. et al. 40 years of benthic community change on the Caribbean reefs of Curaçao and Bonaire: the rise of slimy cyanobacterial mats. *Coral Reefs* **36**, 355–367 (2017).
95. Ford, A. K. et al. Reefs under siege: the rise, putative drivers, and consequences of benthic cyanobacterial mats. *Front. Mar. Sci.* **5**, 18 (2018).

96. Ziegler, M., Seneca, F. O., Yum, L. K., Palumbi, S. R. & Voolstra, C. R. Bacterial community dynamics are linked to patterns of coral heat tolerance. *Nat. Commun.* **8**, 14213 (2017).
97. Torda, G. et al. Rapid adaptive responses to climate change in corals. *Nat. Clim. Change* **7**, 627–636 (2017).
98. Quigley, K. M., Baker, A. C., Coffroth, M. A., Willis, B. L. & van Oppen, M. J. H. in *Coral Bleaching: Patterns, Processes, Causes and Consequences* Ch. 6 (eds van Oppen, M. J. H. & Lough, J. M.) (Springer, 2018).
99. Bourne, D. G., Morrow, K. M. & Webster, N. S. Insights into the coral microbiome: Underpinning the health and resilience of reef ecosystems. *Annu. Rev. Microbiol.* **70**, 317–340 (2016).
100. Webster, N. S. & Reusch, T. B. H. Microbial contributions to the persistence of coral reefs. *ISMEJ.* **11**, 2167–2174 (2017).
101. Hanson, C. A., Fuhrman, J. A., Horner-Devine, M. C. & Martiny, J. B. H. Beyond biogeographic patterns: processes shaping the microbial landscape. *Nat. Rev. Microbiol.* **10**, 497–506 (2012).
102. Zinger, L., Boetius, A. & Ramette, A. Bacterial taxa-area and distance-decay relationships in marine environments. *Mol. Ecol.* **23**, 954–964 (2014).
103. Archer, S. D. J. et al. Airborne microbial transport limitation to isolated Antarctic soil habitats. *Nat. Microbiol.* **4**, 925–932 (2019).
104. Wilkins, D., van Sebille, E., Rintoul, S. R., Lauro, F. M. & Cavicchioli, R. Advection shapes Southern Ocean microbial assemblages independent of distance and environment effects. *Nat. Commun.* **4**, 2457 (2013).
105. Cavicchioli, R. Microbial ecology of Antarctica aquatic systems. *Nat. Rev. Microbiol.* **13**, 691–706 (2015).
106. Riebesell, U. et al. Toxic algal bloom induced by ocean acidification disrupts the pelagic food web. *Nat. Clim. Change* **8**, 1082 (2018).
107. Hutchins, D. A. et al. Irreversibly increased nitrogen fixation in *Trichodesmium* experimentally adapted to elevated carbon dioxide. *Nat. Commun.* **6**, 8155 (2015).
108. Schaum, E., Rost, B., Millar, A. J. & Sinéad, C. Variation in plastic responses to ocean acidification in a globally distributed picoplankton species. *Nat. Clim. Change* **3**, 298–302 (2012).
109. Schlüter, L. et al. Adaptation of a globally important coccolithophore to ocean warming and acidification. *Nat. Clim. Change* **4**, 1024–1030 (2014).
110. Hoppe, C. J. M., Wolf, K., Schuback, N., Tortell, P. D. & Rost, B. Compensation of ocean acidification effects in Arctic phytoplankton assemblages. *Nat. Clim. Change* **8**, 529–533 (2018).
111. Highfield, A., Joint, I., Gilbert, J. A., Crawford, K. J. & Schroeder, D. C. Change in *Emiliania huxleyi* virus assemblage diversity but not in host genetic composition during an ocean acidification mesocosm experiment. *Viruses* **9**, E41 (2017).
112. Flynn, K. J. et al. Changes in pH at the exterior surface of plankton with ocean acidification. *Nat. Clim. Change* **2**, 510–513 (2012).
113. Traving, S. J., Clokie, M. R. & Middelboe, M. Increased acidification has a profound effect on the interactions between the cyanobacterium *Synechococcus* sp. WH7803 and its viruses. *FEMS Microbiol. Ecol.* **87**, 133–141 (2014).
114. Follows, M. J., Dutkiewicz, S., Grant, S. & Chisholm, S. W. Emergent biogeography of microbial communities in a model ocean. *Science* **315**, 1843–1846 (2007).
115. Barton, A. D., Dutkiewicz, S., Flierl, G., Bragg, J. & Follows, M. J. Patterns of diversity in marine phytoplankton. *Science* **327**, 1509–1511 (2010).

116. Thomas, M. K., Kremer, C. T., Klausmeier, C. A. & Litchman, E. A. Global pattern of thermal adaptation in marine phytoplankton. *Science* **338**, 1085–1088 (2012).
117. Swan, B. K. et al. Prevalent genome streamlining and latitudinal divergence of surface ocean bacterioplankton. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **110**, 11463–11468 (2013).
118. Barton, A. D., Irwin, A. J., Finkel, Z. V. & Stock, C. A. Anthropogenic climate change drives shift and shuffle in North Atlantic phytoplankton communities. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **113**, 2964–2969 (2016).
119. Cavicchioli, R. On the concept of a psychrophile. *ISME J.* **10**, 793–795 (2016).
120. Toseland, A. et al. The impact of temperature on marine phytoplankton resource allocation and metabolism. *Nat. Clim. Change* **3**, 979–984 (2013).
121. Moran, X. A. G., Lopez-Urrutia, A., Calvo-Diaz, A. & Li, W. K. L. Increasing importance of small phytoplankton in a warmer ocean. *Glob. Change Biol.* **16**, 1137–1144 (2010).
122. Thornton, D. C. O. Dissolved organic matter (DOM) release by phytoplankton in the contemporary and future ocean. *Eur. J. Phycol.* **49**, 20–46 (2014).
123. Jiang, H.-B. et al. Ocean warming alleviates iron limitation of marine nitrogen fixation. *Nat. Clim. Change* **8**, 709–712 (2018).
124. Webster, N. S., Wagner, M. & Negri, A. P. Microbial conservation in the Anthropocene. *Environ. Microbiol.* **20**, 1925–1928 (2018).
125. Cavicchioli, R. A vision for a ‘microbcentric’ future. *Microb. Biotechnol.* **12**, 26–29 (2019).
126. Singh, B. K., Bardgett, R. D., Smith, P. & Reay, D. S. Microorganisms and climate change: terrestrial feedbacks and mitigation options. *Nat. Rev. Microbiol.* **8**, 779–790 (2010).
127. Bardgett, R. D. & van der Putten, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* **515**, 505–511 (2014).
128. Fellbaum, C. R., Mensah, J. A., Pfeffer, P. E., Kiers, E. T. & Bücking, H. The role of carbon in fungal nutrient uptake and transport. Implications for resource exchange in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Plant Signal. Behav.* **7**, 1509–1512 (2012).
129. Ballantyne, A. et al. Accelerating net terrestrial carbon uptake during the warming hiatus due to reduced respiration. *Nat. Clim. Change* **7**, 148–152 (2017).
130. Bonan, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* **320**, 1444–1449 (2008).
131. Pan, Y. et al. A large and persistent carbon sink in the world’s forests. *Science* **333**, 988–993 (2011).
132. Hovenden, M. J. et al. Globally consistent influences of seasonal precipitation limit grassland biomass response to elevated CO₂. *Nat. Plants* **5**, 167–173 (2019).
133. Evans, R. D. et al. Greater ecosystem carbon in the Mojave Desert after ten years exposure to elevated CO₂. *Nat. Clim. Change* **4**, 394–397 (2014).
134. Verpoorter, C., Kutser, T., Seekell, D. A. & Tranvik, L. J. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophys. Res. Lett.* **41**, 6396–6402 (2014).
135. Davidson, T. A. et al. Synergy between nutrients and warming enhances methane ebullition from experimental lakes. *Nat. Clim. Change* **8**, 156–160 (2018).
136. van Bergen, T. J. H. M. et al. Seasonal and diel variation in greenhouse gas emissions from an urban pond and its major drivers. *Limnol. Oceanogr.* <https://doi.org/10.1002/lno.11173> (2019).

137. Bragazza, L., Parisod, J., Buttler, A. & Bardgett, R. D. Biogeochemical plant-soil microbe feedback in response to climate warming in peatlands. *Nat. Clim. Change* **3**, 273–277 (2013).
138. Gallego-Sala, A. V. & Prentice, I. C. Blanket peat biome endangered by climate change. *Nat. Clim. Change* **3**, 152–155 (2013).
139. Lupascu, M. et al. High Arctic wetting reduces permafrost carbon feedbacks to climate warming. *Nat. Clim. Change* **4**, 51–55 (2014).
140. Hultman, J. et al. Multi-omics of permafrost, active layer and thermokarst bog soil microbiomes. *Nature* **521**, 208–212 (2015).
141. Schuur, E. A. G. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* **520**, 171–179 (2015).
142. Hoegh-Guldberg, O. et al. in *Special Report: Global Warming of 1.5°C* (eds Masson-Delmotte, V. et al.) Ch. 3 (IPCC, 2018).
143. Crowther, T. W. et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature* **540**, 104–108 (2016).
144. Hicks Pries, C. E., Castanha, C., Porras, R. C. & Torn, M. S. The whole-soil carbon flux in response to warming. *Science* **355**, 1420–1423 (2017).
145. van Gestel, N. et al. Predicting soil carbon loss with warming. *Nature* **554**, E4–E5 (2018).
146. Crowther, T. W. et al. Crowther et al. reply. *Nature* **554**, E7–E8 (2018).
147. Karhu, K. et al. Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. *Nature* **513**, 81–84 (2014).
148. Norby, R. J., Ledford, J., Reilly, C. D., Miller, N. E. & O’Neill, E. G. Fine-root production dominates response of a deciduous forest to atmospheric CO₂ enrichment. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **101**, 9689–9693 (2004).
149. Lewis, S. L. et al. Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature* **457**, 1003–1006 (2009).
150. Schlesinger, W. H. & Lichter, J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature* **411**, 466–469 (2001).
151. Sayer, E. J., Heard, M. S., Grant, H. K., Marthews, T. R. & Tanner, E. V. J. Soil carbon release enhanced by increased tropical forest litterfall. *Nat. Clim. Change* **1**, 304–307 (2011).
152. Bradford, M. A. et al. Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change. *Nat. Clim. Change* **6**, 751–758 (2016).
153. Hartley, I. P. et al. A potential loss of carbon associated with greater plant growth in the European Arctic. *Nat. Clim. Change* **2**, 875–879 (2012).
154. Giardina, C. P., Litton, C. M., Crow, S. E. & Asner, G. P. Warming-related increases in soil CO₂ efflux are explained by increased below-ground carbon flux. *Nat. Clim. Change* **4**, 822–827 (2014).
155. Bradford, M. A. et al. Climate fails to predict wood decomposition at regional scales. *Nat. Clim. Change* **4**, 625–630 (2014).
156. Fernández-Martínez, M. Nutrient availability as the key regulator of global forest carbon balance. *Nat. Clim. Change* **4**, 471–476 (2014).
157. Höglberg, P. et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature* **411**, 789–792 (2001).
158. Clemmensen, K. E. et al. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. *Science* **339**, 1615–1618 (2013).
159. Keiluweit, M. et al. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. *Nat. Clim. Change* **5**, 588–595 (2015).
160. Tang, J. & Riley, W. J. Weaker soil carbon–climate feedbacks resulting from microbial and abiotic interactions. *Nat. Clim. Change* **5**, 56–60 (2015).
161. Schmidt, M. W. et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* **478**, 49–56 (2011).

162. Sulman, B. N., Phillips, R. P., Oishi, A. C., Shevliakova, E. & Pacala, S. W. Microbe-driven turnover offsets mineral-mediated storage of soil carbon under elevated CO₂. *Nat. Clim. Change* **4**, 1099–1102 (2014).
163. Stevnbak, K. et al. Interactions between above and belowground organisms modified in climate change experiments. *Nat. Clim. Change* **2**, 805–808 (2012).
164. Bardgett, R. D. & Wardle, D. A. Herbivore-mediated linkages between aboveground and belowground communities. *Ecology* **84**, 2258–2268 (2003).
165. Lubbers, I. M. et al. Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms. *Nat. Clim. Change* **3**, 187–194 (2013).
166. Thakur, M. P. et al. Reduced feeding activity of soil detritivores under warmer and drier conditions. *Nat. Clim. Change* **8**, 75–78 (2018).
167. Hodgkins, S. B. et al. Tropical peatland carbon storage linked to global latitudinal trends in peat recalcitrance. *Nat. Commun.* **9**, 3640 (2018).
168. Jansson, J. K. & Tas, N. The microbial ecology of permafrost. *Nat. Rev. Microbiol.* **12**, 414–425 (2014).
169. McCalley, C. K. et al. Methane dynamics regulated by microbial community response to permafrost thaw. *Nature* **514**, 478–481 (2014).
170. Grosse, G., Goetz, S., McGuire, A. D., Romanovsky, V. E. & Schuur, E. A. G. Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system. *Environ. Res. Lett.* **11**, 040201 (2016).
171. Hicks Pries, C. E., Schuur, E. A. G., Natali, S. M. & Crummer, K. G. Old soil carbon losses increase with ecosystem respiration in experimentally thawed tundra. *Nat. Clim. Change* **6**, 214–218 (2016).
172. Knoblauch, C., Beer, C., Liebner, S., Grigoriev, M. N. & Pfeiffer, E.-M. Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost. *Nat. Clim. Change* **8**, 309–312 (2018).
173. Jing, X. et al. The links between ecosystem multifunctionality and above and belowground biodiversity are mediated by climate. *Nat. Commun.* **6**, 8159 (2015).
174. Delgado-Baquerizo, M. et al. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. *Nat. Commun.* **7**, 10541 (2016).
175. Walker, T. W. N. et al. Microbial temperature sensitivity and biomass change explain soil carbon loss with warming. *Nat. Clim. Change* **8**, 885–889 (2018).
176. Zhou, J. Z. et al. Microbial mediation of carbon-cycle feedbacks to climate warming. *Nat. Clim. Change* **2**, 106–110 (2012).
177. Zhou, J. et al. Temperature mediates continental-scale diversity of microbes in forest soils. *Nat. Commun.* **7**, 12083 (2016).
178. Guo, X. et al. Climate warming leads to divergent succession of grassland microbial communities. *Nat. Clim. Change* **8**, 813–818 (2018).
179. Bradford, M. A. et al. Cross-biome patterns in soil microbial respiration predictable from evolutionary theory on thermal adaptation. *Nat. Ecol. Evol.* **3**, 223–231 (2019).
180. Dacal, M., Bradford, M. A., Plaza, C., Maestre, F. T. & García-Palacios, P. Soil microbial respiration adapts to ambient temperature in global drylands. *Nat. Ecol. Evol.* **3**, 232–238 (2019).
181. Lipson, D. A. The complex relationship between microbial growth rate and yield and its implications for ecosystem processes. *Front. Microbiol.* **6**, 615 (2015).

182. Frey, S. D., Lee, J., Melillo, J. M. & Six, J. The temperature response of soil microbial efficiency and its feedback to climate. *Nat. Clim. Change* **3**, 395–398 (2013).
183. Hagerty, S. B. et al. Accelerated microbial turnover but constant growth efficiency with warming in soil. *Nat. Clim. Change* **4**, 903–906 (2014).
184. Melillo, J. et al. Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science* **358**, 101–105 (2017).
185. Wieder, W. R., Bonan, G. B. & Allison, S. D. Global soil carbon projections are improved by modelling microbial processes. *Nat. Clim. Change* **3**, 909–912 (2013).
186. Koven, C. D., Hugelius, G., Lawrence, D. M. & Wieder, W. R. Higher climatological temperature sensitivity of soil carbon in cold than warm climates. *Nat. Clim. Change* **7**, 817–822 (2017).
187. Mackelprang, R., Saleska, S. R., Jacobsen, C. S., Jansson, J. K. & Tas, N. Permafrost meta-omics and climate change. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **44**, 439–462 (2016).
188. Tas, N. et al. Landscape topography structures the soil microbiome in arctic polygonal tundra. *Nat. Commun.* **9**, 777 (2018).
189. Woodcroft, B. J. Genome-centric view of carbon processing in thawing permafrost. *Nature* **560**, 49–54 (2018).
190. Emerson, J. B. et al. Host-linked soil viral ecology along a permafrost thaw gradient. *Nat. Microbiol.* **3**, 870–880 (2018).
191. Singleton, C. M. et al. Methanotrophy across a natural permafrost thaw environment. *ISME J.* **12**, 2544–2558 (2018).
192. Xue, K. et al. Tundra soil carbon is vulnerable to rapid microbial decomposition under climate warming. *Nat. Clim. Change* **6**, 595–600 (2016).
193. Kane, E. S. Squeezing the arctic carbon balloon. *Nat. Clim. Change* **2**, 841–842 (2012).
194. Hill, P. W. et al. Vascular plant success in a warming Antarctic may be due to efficient nitrogen acquisition. *Nat. Clim. Change* **1**, 50–53 (2011).
195. Newsham, K. K. et al. Relationship between soil fungal diversity and temperature in the maritime Antarctic. *Nat. Clim. Change* **6**, 182–186 (2016).
196. Kleinteich, J. et al. Temperature-related changes in polar cyanobacterial mat diversity and toxin production. *Nat. Clim. Change* **2**, 356–360 (2012).
197. Paerl, H. W. & Huisman, J. Blooms like it hot. *Science* **320**, 57–58 (2008).
198. Huisman, J. et al. Cyanobacterial blooms. *Nat. Rev. Microbiol.* **16**, 471–483 (2018).
199. Sitoki, L., Kurmayer, R. & Rott, E. Spatial variation of phytoplankton composition, biovolume, and resulting microcystin concentrations in the Nyanza Gulf (Lake Victoria, Kenya). *Hydrobiologia* **691**, 109–122 (2012).
200. Metcalf, J. S. et al. Public health responses to toxic cyanobacterial blooms: perspectives from the 2016 Florida event. *Water Policy* **20**, 919–932 (2018).
201. Visser, P. M. et al. How rising CO₂ and global warming may stimulate harmful cyanobacterial blooms. *Harmful Algae* **54**, 145–159 (2016).
202. Walsby, A. E., Hayes, P. K., Boje, R. & Stal, L. J. The selective advantage of buoyancy provided by gas vesicles for planktonic cyanobacteria in the Baltic Sea. *New Phytol.* **136**, 407–417 (1997).
203. Jöhnk, K. D. et al. Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Glob. Chang. Biol.* **14**, 495–512 (2008).
204. Lehman, P. W. et al. Impacts of the 2014 severe drought on the *Microcystis* bloom in San Francisco Estuary. *Harmful Algae* **63**, 94–108 (2017).
205. Sandrini, G. et al. Rapid adaptation of harmful cyanobacteria to rising CO₂. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **113**, 9315–9320 (2016).

206. Lanz, B., Dietz, S. & Swanson, T. The expansion of modern agriculture and global biodiversity decline: an integrated assessment. *Ecol. Econ.* **144**, 260–277 (2018).
207. Dai, Z. et al. Long-term nitrogen fertilization decreases bacterial diversity and favors the growth of Actinobacteria and Proteobacteria in agro-ecosystems across the globe. *Glob. Change Biol.* **24**, 3452–3461 (2018).
208. Gålfalk, M., Olofsson, G., Crill, P. & Bastviken, D. Making methane visible. *Nat. Clim. Change* **6**, 426–430 (2016).
209. Nisbet, E. G. et al. Very strong atmospheric methane growth in the four years 2014–2017: implications for the Paris Agreement. *Global Biogeochem. Cycles* **33**, 318–342 (2019).
210. van Groenigen, K. S., van Kessel, C., Hungate, B. & A. Increased greenhouse-gas intensity of rice production under future atmospheric conditions. *Nat. Clim. Change* **3**, 288–291 (2013).
211. Ripple, W. J. et al. Ruminants, climate change and climate policy. *Nat. Clim. Change* **4**, 2–5 (2014).
212. Steffen, W. et al. Sustainability. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science* **347**, 1259855 (2015).
213. Greaver, T. L. et al. Key ecological responses to nitrogen are altered by climate change. *Nat. Clim. Change* **6**, 836–843 (2016).
214. Itakura, M. et al. Mitigation of nitrous oxide emissions from soils by Bradyrhizobium japonicum inoculation. *Nat. Clim. Change* **3**, 208–212 (2013).
215. Godfray, H. C. et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science* **327**, 812–818 (2010).
216. de Vries, F. T. et al. Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought. *Nat. Clim. Change* **2**, 276–280 (2012).
217. de Vries, F. T. et al. Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks. *Nat. Commun.* **9**, 3033 (2018).
218. Bahram, M. et al. Structure and function of the global topsoil microbiome. *Nature* **560**, 233–237 (2018).
219. Maestre, F. T. et al. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **112**, 15684–15689 (2015).
220. Posch, T., Köster, O., Salcher, M. M. & Pernthaler, J. Harmful filamentous cyanobacteria favoured by reduced water turnover with lakewarming. *Nat. Clim. Change* **2**, 809–813 (2012).
221. Harvell, C. D. et al. Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science* **296**, 2158–2162 (2002).
222. Altizer, S., Ostfeld, R. S., Johnson, P. T., Kutz, S. & Harvell, C. D. Climate change and infectious diseases: from evidence to a predictive framework. *Science* **341**, 514–519 (2013).
223. Johnson, P. T. J., de Roode, J. C. & Fenton, A. Why infectious disease research needs community ecology. *Science* **349**, 1259504 (2015).
224. Bruno, J. F. et al. Thermal stress and coral cover as drivers of coral disease outbreaks. *PLOS Biol.* **5**, e124 (2007).
225. Randall, J. & van Woesik, R. Contemporary whiteband disease in Caribbean corals driven by climate change. *Nat. Clim. Change* **5**, 375–379 (2015).
226. Maynard, J. et al. Projections of climate conditions that increase coral disease susceptibility and pathogen abundance and virulence. *Nat. Clim. Change* **5**, 688–694 (2015).
227. Randall, C. J. & van Woesik, R. Some coral diseases track climate oscillations in the Caribbean. *Sci. Rep.* **7**, 5719 (2017).
228. Frommel, A. Y. et al. Severe tissue damage in Atlantic cod larvae under increasing ocean acidification. *Nat. Clim. Change* **2**, 42–46 (2012).
229. Harvell, C. D. et al. Disease epidemic and a marine heat wave are associated with the continental-scale collapse of a pivotal predator (*Pycnopodia helianthoides*). *Sci. Adv.* **5**, eaau7042 (2019).

230. Ling, S. D. et al. Global regime shift dynamics of catastrophic sea urchin overgrazing. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20130269 (2015).
231. Maynard, J. et al. Improving marine disease surveillance through sea temperature monitoring, outlooks and projections. *Phil. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **371**, 20150208 (2016).
232. Anderegg, W. R. L., Kane, J. M. & Anderegg, L. D. L. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nat. Clim. Change* **3**, 30–36 (2013).
233. Bebber, D. P., Ramotowski, M. A. T. & Gurr, S. J. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nat. Clim. Change* **3**, 985–988 (2013).
234. Raffel, T. R. et al. Disease and thermal acclimation in a more variable and unpredictable climate. *Nat. Clim. Change* **3**, 146–151 (2013).
235. Pounds, J. A. et al. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature* **439**, 161–167 (2006).
236. MacFadden, D. R., McGough, S. F., Fisman, D., Santillana, M. & Brownstein, J. S. Antibiotic resistance increases with local temperature. *Nat. Clim. Change* **8**, 510–514 (2018).
237. Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T. & Foley, J. A. Impact of regional climate change on human health. *Nature* **438**, 310–317 (2005).
238. Semenza, J. C. & Domanovic, D. Blood supply under threat. *Nat. Clim. Change* **3**, 432–435 (2013).
239. Semenza, J. C. et al. Climate change impact assessment of food and waterborne diseases. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **42**, 857–890 (2012).
240. McIntyre, K. M. et al. Systematic assessment of the climate sensitivity of important human and domestic animal pathogens in Europe. *Sci. Rep.* **7**, 7134 (2017).
241. Jones, A. E. et al. Bluetongue risk under future climates. *Nat. Clim. Change* **9**, 153–157 (2019).
242. Baker-Austin, C. et al. Emerging *Vibrio* risk at high latitudes in response to ocean warming. *Nat. Clim. Change* **3**, 73–77 (2013).
243. Pascual, M., Rodó, X., Ellner, S. P., Colwell, R. & Bouma, M. J. Cholera dynamics and El Niño–Southern Oscillation. *Science* **289**, 1766–1769 (2000).
244. Vezzulli, L. et al. Climate influence on *Vibrio* and associated human diseases during the past half century in the coastal North Atlantic. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **113**, E5062–E5071 (2016).
245. Bhatt, S. et al. The global distribution and burden of dengue. *Nature* **496**, 504–507 (2013).
246. Powell, J. R. Mosquitoes on the move. *Science* **354**, 971–972 (2016).
247. Lessler, J. et al. Assessing the global threat from Zika virus. *Science* **353**, aaf8160 (2016).
248. Scheffers, B. R. et al. The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science* **354**, aaf7671 (2016).
249. Weaver, S. C. Prediction and prevention of urban arbovirus epidemics: a challenge for the global virology community. *Antiviral Res.* **156**, 80–8 (2018).
250. Bouma, M. J. & Dye, C. Cycles of malaria associated with El Niño in Venezuela. *JAMA* **278**, 1772–1774 (1997).
251. Baylis, M., Mellor, P. S. & Meiswinkel, R. Horse sickness and ENSO in South Africa. *Nature* **397**, 574 (1999).
252. Rohani, P. The link between dengue incidence and El Niño Southern Oscillation. *PLOS Med.* **6**, e1000185 (2009).
253. Kreppel, K. S. et al. A non-stationary relationship between global climate phenomena and human plague incidence in Madagascar. *PLOS Neglect. Trop. Dis.* **8**, e3155 (2014).

254. Caminade, C. et al. Global risk model for vector-borne transmission of Zika virus reveals the role of El Niño 2015. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **114**, 119–124 (2017).
255. Giraud, T., Koskella, B. & Laine, A.-L. Introduction: microbial local adaptation: insights from natural populations, genomics and experimental evolution. *Mol. Ecol.* **26**, 1703–1710 (2017).
256. Croll, D. & McDonald, B. A. The genetic basis of local adaptation for pathogenic fungi in agricultural ecosystems. *Mol. Ecol.* **26**, 2027–2040 (2017).
257. Robin, C., Andanson, A., Saint-Jean, G., Fabreguettes, O. & Dutech, C. What was old is new again: thermal adaptation within clonal lineages during range expansion in a fungal pathogen. *Mol. Ecol.* **26**, 1952–1963 (2017).
258. King, J. G., Souto-Maior, C., Sartori, L. M., Maciel-deFreitas, R. & Gomes, M. G. M. Variation in Wolbachia effects on Aedes mosquitoes as a determinant of invasiveness and vectorial capacity. *Nat. Commun.* **9**, 1483 (2018).
259. Bakken, L. R. & Frostegård, Å. Sources and sinks for N₂O, can microbiologist help to mitigate N₂O emissions? *Environ. Microbiol.* **19**, 4801–4805 (2017).
260. Henderson, G. et al. Rumen microbial community composition varies with diet and host, but a core microbiome is found across a wide geographical range. *Sci. Rep.* **5**, 14567 (2015).
261. Roehe, R. et al. Bovine host genetic variation influences rumen microbial methane production with best selection criterion for low methane emitting and efficiently feed converting hosts based on metagenomic gene abundance. *PLOS Genet.* **12**, e1005846 (2016).
262. Ritchie, H., Reay, D. S. & Higgins, P. Potential of meat substitutes for climate change mitigation and improved human health in high-income markets. *Front. Sustain. Food Syst.* **2**, 16 (2018).
263. Weng, Z. H. et al. Biochar built soil carbon over a decade by stabilizing rhizodeposits. *Nat. Clim. Change* **7**, 371–376 (2017).
264. Liu, D. et al. Constructed wetlands as biofuel production systems. *Nat. Clim. Change* **2**, 190–194 (2012).
265. Sánchez, O. Constructed wetlands revisited: microbial diversity in the –omics era. *Microb. Ecol.* **73**, 722–733 (2017).
266. Timmis, K. et al. The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Microb. Biotechnol.* **10**, 984–987 (2017).
267. Union of Concerned Scientists. World scientists’ warning to humanity. UCSUSA <http://www.ucsusa.org/sites/default/files/attach/2017/11/World%20Scientists%27%20Warning%20to%20Humanity%201992.pdf> (1992).
268. Ripple, W. J. et al. The role of Scientists’ Warning in shifting policy from growth to conservation economy. *BioScience* **68**, 239–240 (2018).
269. Finlayson, C. M. et al. The Second Warning to Humanity — providing a context for wetland management and policy. *Wetlands* **39**, 1 (2019).
270. Colwell, R. R. & Patz, J. A. *Climate, Infectious Disease and Health: An Interdisciplinary Perspective* (American Academy of Microbiology, 1998).
271. Reid, A. *Incorporating Microbial Processes Into Climate Models* (American Academy of Microbiology, 2012).
272. Reid, A. & Greene, S. *How Microbes Can Help Feed The World* (American Academy of Microbiology, 2013).
273. Paull, S. H. et al. Drought and immunity determine the intensity of West Nile virus epidemics and climate change impacts. *Proc. R. Soc. B* **284**, 20162078 (2017).
274. Paaijmans, K. P. et al. Influence of climate on malaria transmission depends on daily temperature variation. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **107**, 15135–15139 (2010).

275. Colón-González, F. J. et al. Limiting global-mean temperature increase to 1.5–2°C could reduce the incidence and spatial spread of dengue fever in Latin America. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **115**, 6243–6248 (2018).
276. Ostfeld, R. S. & Brunner, J. L. Climate change and *Ixodes* tick-borne diseases of humans. *Philos. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140051 (2015).
277. Moore, S. M. et al. El Niño and the shifting geography of cholera in Africa. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **114**, 4436–4441 (2017).
278. Peng, X., Murphy, T. & Holden, N. M. Evaluation of the effect of temperature on the die-off rate for *Cryptosporidium parvum* oocysts in water, soils, and feces. *Appl. Environ. Microbiol.* **74**, 7101–7107 (2008).
279. Atchison, C. J. et al. Temperature-dependent transmission of rotavirus in Great Britain and The Netherlands. *Proc. R. Soc. Biol. B* **277**, 933–942 (2010).
280. Shaman, J. & Lipsitch, M. The El Niño–Southern Oscillation (ENSO)–pandemic Influenza connection: coincident or causal? *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **110**, 3689–3691 (2013).
281. Shaman, J. & Karspeck, A. Forecasting seasonal outbreaks of influenza. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **109**, 20425–20430 (2012).
282. Nguyen, C. et al. Recent advances in our understanding of the environmental, epidemiological, immunological, and clinical dimensions of coccidioidomycosis. *Clin. Microbiol. Rev.* **26**, 505–525 (2013).
283. Tian, H. et al. Interannual cycles of Hantaan virus outbreaks at the human–animal interface in Central China are controlled by temperature and rainfall. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **114**, 8041–8046 (2017).
284. Glass, G. E. et al. Satellite imagery characterizes local animal reservoir populations of Sin Nombre virus in the southwestern United States. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **99**, 16817–16822 (2002).

KONUyla İLİŞKİLİ WEB SİTELERİ

Census of Marine Life: <https://ocean.si.edu/census-marine-life>

Microbiologists' Warning: <https://www.babs.unsw.edu.au/research/microbiologists-warning-humanity>

Nature Research Microbiology Community: <https://naturemicrobiologycommunity.nature.com/users/62229-ricardo-cavicholi/posts/49210-the-microbiologists-warning>

Scientists' Warning: <http://www.scientistswarning.org/>

Sea Ice Index: https://nsidc.org/data/seaice_index

The Second Warning: <https://create.osufoundation.org/project/11158>

United Nations Sustainable Development Goals:

<https://sustainabledevelopment.un.org/>

World Bank data on agricultural land: <https://data.worldbank.org/indicator/ag.lnd.agri.zs?end=2016&start=2008>

Acknowledgements

R.C. is indebted to T. Kolesnikow, K. Cavicholi and X. Kolesnikow for assistance with figures and insightful comments on manuscript drafts. R.C.'s contribution was supported by the Australian Research Council. M.J.B.'s contribution was supported by the NASA North Atlantic Aerosol and Marine Ecosystem Study. Research by J.K.J was supported by the US Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Soil Microbiome Scientific Focus Area 'Phenotypic Response of the Soil Microbiome to Environmental Perturbations' at the Pacific

Northwest National Laboratory, under contract DE-AC05-76RLO 1830. M.B.S.'s contribution was supported by funds from the Gordon and Betty Moore Foundation (#3790) and National Science Foundation (OCE#1829831). V.I.R.'s contribution was supported by funds from the Department of Energy Genomic Sciences Program (#DE-SC0016440) and the National Aeronautics and Space Administration's Interdisciplinary Research in Earth Science programme (#NNX17AK10G).

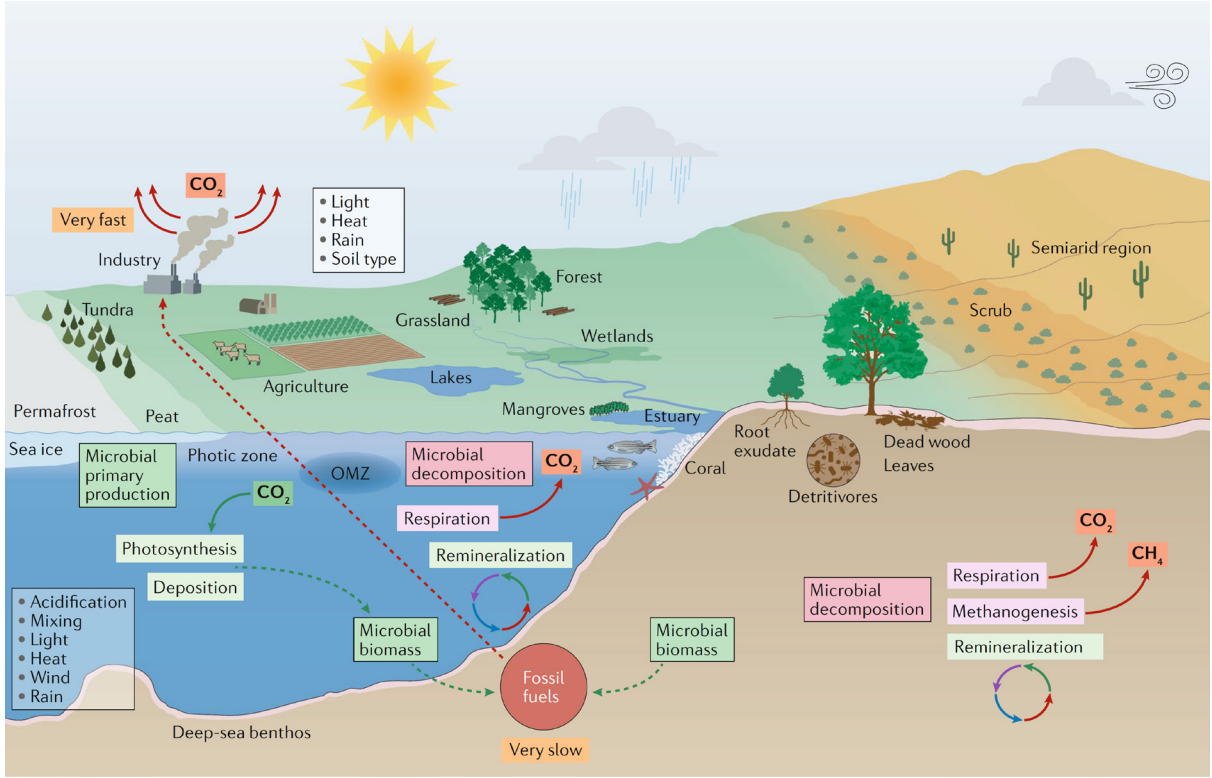
Author contributions

R.C., W.J.R. and K.N.T. conceived the article, R.C. wrote the article and all authors contributed to discussion of the content and reviewed or edited the manuscript before submission.

Competing interests

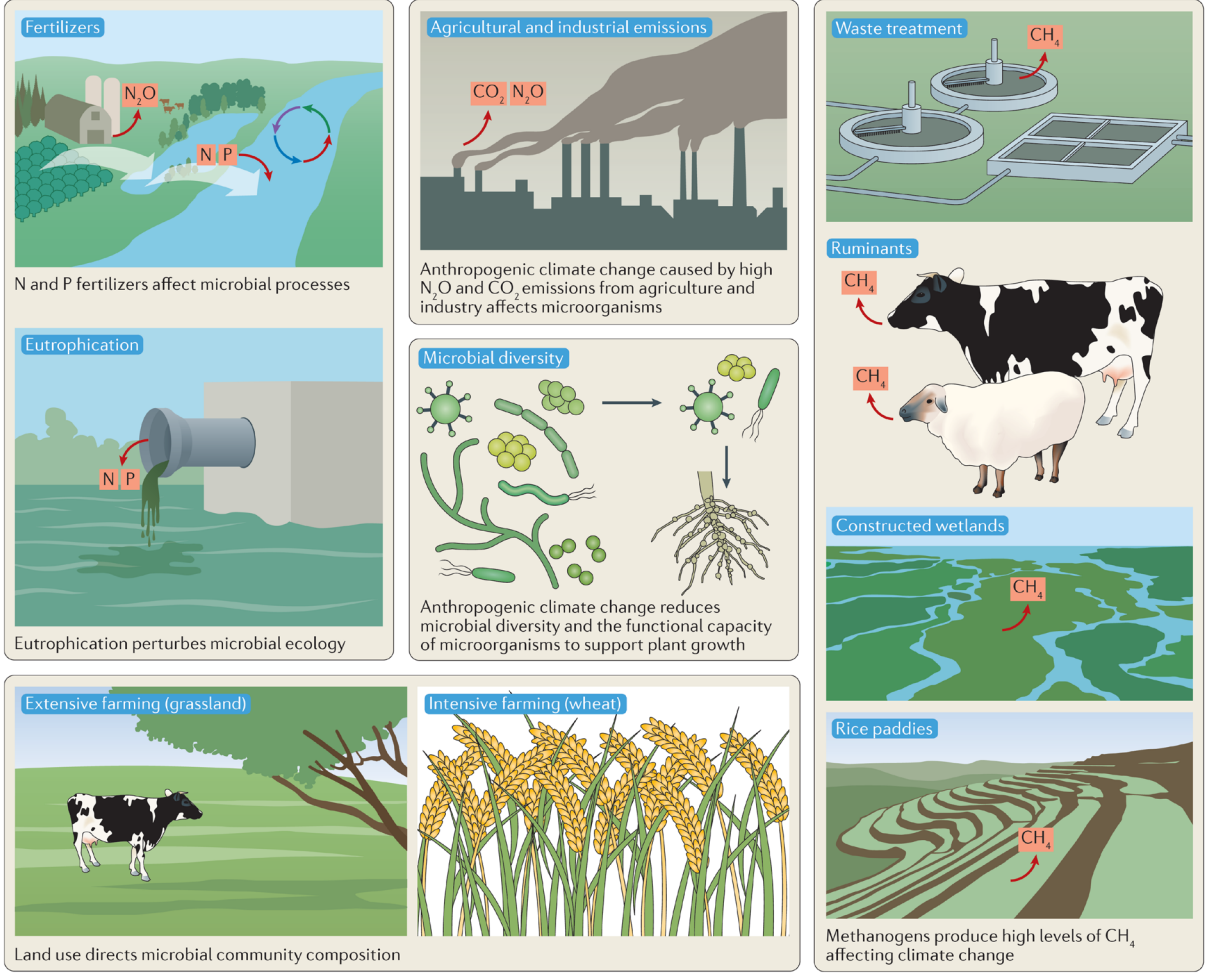
The authors declare no competing interests.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

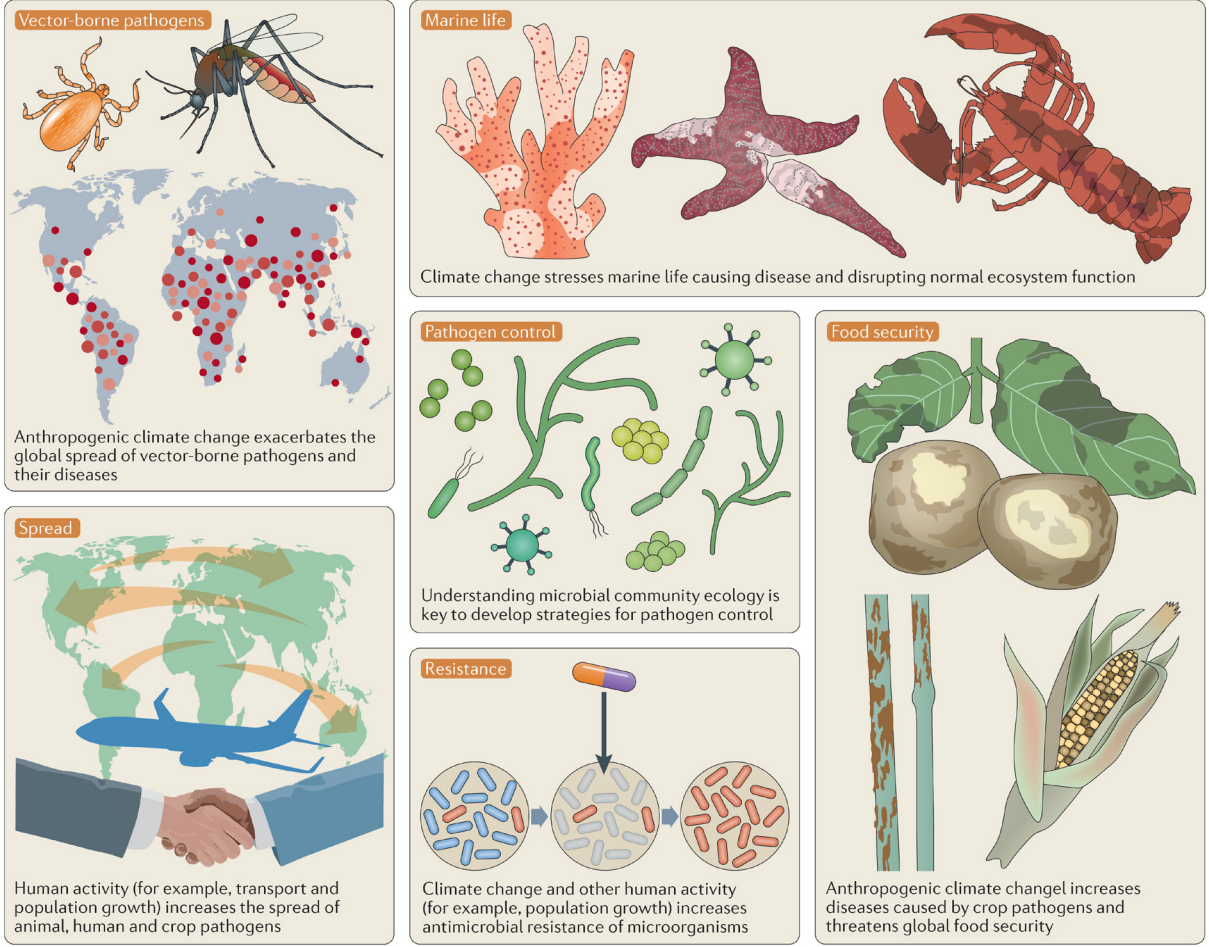


Şekil 1 | Mikroorganizmalar ve deniz ve kara biyomlarında iklim değişikliği.

Deniz çevrelerinde, mikrobiyal primer yapım CO_2 sekestrasyonuna önemli ölçüde katkıda bulunur. Deniz mikroorganizmaları ayrıca besin maddelerini deniz yiyecek ağında kullanılmak üzere geri dönüştürür ve bu süreçte atmosfere CO_2 salarlar. Karasal çevrelerin pek çoğunda mikroorganizmalar organik maddelerin temel çürütücüsüdür ve toprakta bitkilerin büyümesi için gerekli besin malzemelerinin yanısıra atmosfere CO_2 ve CH_4 salarlar. Mikrobiyal biyokütle ve diğer organik maddeler (bitki ve hayvan artıkları) milyonlarca yıl içerisinde fosil yakıtlara dönüştürülürler. Bunun tersine, fosil yakıtların yakılması bu sürenin çok küçük bir parçasında sera gazlarını açığa çıkarır. Bunun sonucunda karbon çevrimi dengesini aşırı derecede kaybedecek ve fosil yakıtlar kullanılmaya devam ettiği sürece atmosferdeki CO_2 düzeyleri artmaya devam edecektir. İnsanların tarım, endüstri, ulaşım, nüfus artışı ve tüketim gibi aktivitelerinin pek çok etkisi toprağın türü ve ışık gibi yerel çevresel faktörlerle bir araya gelince diğer mikroorganizmalar, bitkiler ve hayvanlarla kompleks etkileşim ağını büyük ölçüde etkiler. Bu etkileşimler mikroorganizmaların nasıl yanıt verdiğini ve iklim değişikliğini nasıl etkilediğini (örneğin sera gazı emisyonları yoluyla) ve iklim değişikliğinin (örneğin daha yüksek CO_2 düzeyleri, ısınma ve yağış değişiklikleri) buna karşılık mikrobiyal yanıtları nasıl etkilediğini belirler. OMZ, minimum oksijen bölgesi (MOB)



Şekil 2 | Mikroorganizmaları etkileyen tarım ve diğer insan aktiviteleri. Tarım uygulamaları mikrobiyal toplulukları belirli şekillerde etkiler. Tarlaların kullanımı (örneğin ekilen bitki türü) ve kirlilik kaynakları (örneğin gübreler) mikrobiyal topluluk kompozisyonunu ve işlevini bozarak karbon, nitrojen ve fosfor dönüşümlerinin doğal çevrimlerini bozar. Metanojenler önemli ölçüde metanı doğrudan geviş getiren hayvanlardan (sığır, koyun ve keçi gibi) ve çeltik tarlaları ve kontrollü ıslak alanlar gibi doymuş topraklardaki anaerobik koşullarda üretirler. Mikrobiyal çeşitlilikte azalmaya neden olan insan aktiviteleri de mikroorganizmaların bitkilerin büyümesini destekleme kapasitelerini azaltır.



Şekil 3 | İklim değişikliği patojenlerin etkisini arttırmaktadır. Antropojenik iklim değişikliği doğal hayatı strese sokarak patojenlerin hastalıklara yol açmasına giderek daha fazla neden olmaktadır. Suda kültür canlıları üretimi, yiyecek sağlayan hayvanlar ve tarım ürünleri üzerindeki etkiler küresel yiyecek teminini tehdit etmektedir. Nüfus artışları ve seyahat gibi insan aktiviteleri iklim değişikliği ile birlikte patojenlerin antibiyotiklere direncini, suyla ve vektörle taşınan patojenlerin yayılmasını arttırmakta böylelikle de insanlar, diğer hayvanlar ve bitkilerdeki hastalıkları arttırmaktadır.