

Çevresel değişimin hızı, iklim değişikliği ve iklim müdahale senaryolarında göreceli ekolojik riski çerçeveler

Alındı: 26 Ekim 2023

Kabul tarihi: 8 Nisan 2024

Published online: 18 April 2024

 Güncellemeleri kontrol edin

 Daniel M. Hueholt ¹✉, Elizabeth A. Barnes ¹, James W. Hurrell¹ & Ariel L. Morrison¹

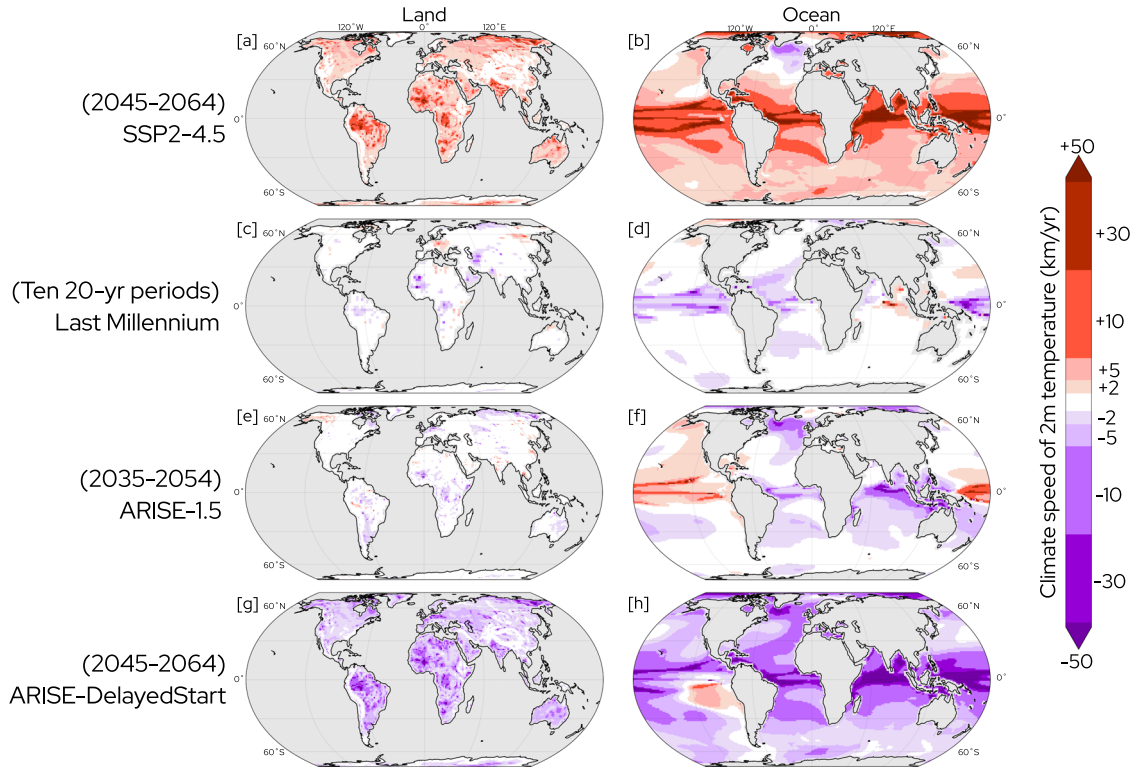
Stratosferik aerosol enjeksiyonu, karbon giderme çabaları devam ederken iklim riskini azaltmak için potansiyel bir iklim müdahalesi yöntemidir. Ancak, varsayımsal müdahale senaryolarının stratejik tasarımından kaynaklanan olası ekosistem etkileri yeterince anlaşılmamıştır. Son zamanlardaki iki Dünya sistemi modeli simülasyonu, benzer küresel sıcaklık hedeflerine sahip, ancak müdahale dağıtımında 10 yıllık bir gecikmeye sahip politika açısından önemli stratosferik aerosol enjeksiyonu senaryolarını tasvir etmektedir. Burada, bu gecikmenin, termal koşulların hareket oranını tanımlayan iklim hızları aracılığıyla belirgin ekolojik risk profillerine yol açtığını gösteriyoruz. Gezegenel ölçekte, müdahalenin sıcaklığı koruduğu simülasyondaki iklim hızları, endüstri öncesi koşullardan istatistiksel olarak ayırt edilemez. Buna karşılık, gecikmeli dağıtımın ardından gelen hızlı sıcaklık düşüşü, mevcut politika ile endüstri öncesi bir temel çizginin veya müdahalesiz iklim değişikliğinin ötesinde kara üzerinde iklim hızları üretir. Eşik iklim hızlarına maruz kalan alan, farklı senaryoları göreceli ekolojik risklerine göre bağlam içine yerleştirir. Sonuçlarımız, gelecekteki senaryo tasarımı ve karar alma sürecindeki takasların ve zaman ölçeklerinin tartışılmasını desteklemektedir.

İnsan kaynaklı iklim değişikliğinin izleri, tüm ekosistemlerde açıkça görülüyor ve gelecekteki tüm emisyon yollarında kötüleşen etkiler bekleniyor^{1–7}. Bu tür yüksek etkili riskler, karbon azaltma çabaları devam ederken iklim etkilerini azaltmak için potansiyel iklim müdahale yöntemlerinin incelenmesini teşvik ediyor.^{8,9} Stratosferik aerosol enjeksiyonu (SAI), stratosfere yansıtıcı parçacıklar ekleyerek gezegenin ısınmasını sınırlamak veya onu soğutmak için kullanılan varsayımsal bir yöntemdir⁸. Birçok farklı potansiyel SAI dağıtım senaryosu emisyon azaltımlarını tamamlayabilir. Örneğin, SAI küresel sıcaklıkları belirli bir kritik eşikte veya altında tutmak veya sıcaklıkları hızla azaltmak için kullanılabilir^{8–12}. Daha yavaş zaman ölçeklerinde işleyen karbondioksit giderme müdahalelerinin aksine¹³, SAI gibi güneş radyasyonu yönetim yöntemleri şu anda yakın gelecekteki teknolojiyle küresel ortalama sıcaklıkları hızla değiştirmek için bilinen tek yöntemi temsil ediyor^{8,9}.

Çevresel nişlere alışmış türler, değişen iklimde ortam koşullarının coğrafi olarak değişmesiyle birlikte menzillerini değiştirmeli, uyum sağlamalı veya yok olmalıdır.^{14,15} metrelik iklim hızı

Sıcaklık, termal koşulların hareketini ifade eder ve şu soruyu yanıtlamak için kullanılabilir: Bir organizmanın, başladığı sıcaklık koşullarında kalabilmesi için belirli bir süre boyunca ne kadar hızlı ve hangi yönde hareket etmesi gerekir?^{15,16} Türlerin iklim değişikliğine yanıt olarak menzillerini değiştirme yetenekleri değişkendir; ortalama olarak, deniz organizmaları karasal türlerden daha hızlı hareket edebilir ve ağaçlar tüm yaşam biçimleri arasında en yavaş tepki verenler arasındadır.^{17,18} İklimin ekoloji üzerindeki etkileri, yağıştaki değişiklikler de dahil olmak üzere sıcaklığın ötesinde birçok kaynaktan kaynaklanır¹⁴, biyojeokimya^{2,15} veya türler arasındaki etkileşimler^{19,20}. Çok kısa yaşam geçmişine sahip türler (örneğin, bakteriler) evrim yoluyla değişen iklime uyum sağlayabilirken, daha karmaşık organizmalar davranışsal ayarlamalar kullanılabilir^{1,14,21,22}. Yeterli oranda uyum sağlayamayan veya menzillerini değiştiremeyen popülasyonlar yok olma riskiyle karşı karşıya kalabilirler; bu genellikle iklim değişikliğine eşlik eden yavaş ve doğrusal bir süreç yerine, daha sonraki aşırı olayların ardından aniden gerçekleşir.^{1,23} İklim hızı, büyük ölçekli ekolojideki bozulmalar için genel bir ölçüt sağlar.

¹Atmosfer Bilimi Bölümü, Colorado Eyalet Üniversitesi, Fort Collins 80523 CO, ABD.✉ e-posta: daniel.hueholt@colostate.edu



Şekil 1 | Kara ve okyanusta 2 metrelik sıcaklığın 20 yıllık iklim hızları. Paylaşılan Sosyoekonomik Yol 2-4.5 (SSP2-4.5) için topluluk ortalamasında karada (sol sütun) ve okyanusta (sağ sütun) 2 metrelik (2m) sıcaklığın 20 yıllık iklim hızları ((a, b), Dünya sisteminde Güneş iklim müdahalesinin tepkilerini ve etkilerini değerlendirmede topluluk büyüklüğüne uyması için) on 20 yıllık dönemin ortalaması

(ARISE) simülasyonları, Son Binyıl'daki "Yöntemler" bölümüne bakın)(ç, d), ve ARISE-1.5 için topluluk ortalaması ((e, f), ve ARISE-GecikmeliBaşlangıç (g, h). İşaret, iklim hızıyla ilişkili sıcaklık değişiminin pozitif mi yoksa negatif mi olduğunu gösterir. Maskeli alan gri renkle gösterilir (okyanus için ((a, c, e, g), (için arazide, d, f, h)).

termal nişlerin hareketi, her türlü durumu tanımlayan bir araç olmaktan ziyade etkiler^{15,16,19}.

Mevcut politikayla tutarlı senaryolar altında iklim hızının skaler büyüklüğünün gelecekteki değerleri (iklim hızı olarak adlandırdığımız) bilinen karasal ortalama dağılım oranlarını aşmaktadır. (≤ 2 km/yıl^{7,16}) ve deniz türleri (≈ 7 km/yıl⁷) ve küresel olarak ekosistemleri yeniden dağıtmaları ve tehlikeye atmaları bekleniyor^{4,6,15}. SAI kullanımı, bir müdahalenin başlangıcında veya sonunda özellikle hızlı sıcaklık değişiminin ek bir boyutuna katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. Bir SAI müdahalesinin daha yüksek bir radyasyon dengesini maskeleyesi sonlandırılırsa ani ısınma ve kataklizmik iklim hızları ("sonlandırma şoku") olasıdır veya küresel sıcaklıkları hızla düşürmeyi amaçlayan bir müdahalenin başlangıcında potansiyel olarak tehlikeli bir soğuma meydana gelebilir^{18,24}. Fesih şoku oluşturmada yer alan belirli seçimler açık olsa da^{18,24,25} Tehlikeli soğuma oranlarına yol açabilecek stratejik tasarım kararları şu anda bilinmemektedir.

SAI dağıtımını izleyen 20 yıllık dönemde iklim hızlarını, Stratosferik aerosol enjeksiyonu ile Dünya sistemine Güneş iklim müdahalesinin tepkilerini ve etkilerini değerlendirme (ARISE) protokolü kapsamında Tüm Atmosfer Topluluk İklim Modeli (CESM2[WACCM6]) ile Topluluk Dünya Sistemi Modeli Sürüm 2'de gerçekleştirilen simülasyonlarda analiz ediyoruz.^{11,26,27} ARISE simülasyonları, sonuçların her senaryodaki belirli stratejik tasarım tercihlerine doğrudan bağlanmasına izin vermek için oluşturulmuştur. ARISE-1.5 senaryosu, ılımlı hafifletme iklim değişikliğine karşı sanayi öncesi 1,5 °C'nin üzerinde olan Paris Anlaşması küresel sıcaklık hedefini korumak için 2035'te SAI'nin konuşlandırılmasını tasvir etmektedir (Paylaşılan Sosyoekonomik Yol [SSP] 2-4.5)¹¹. ARISE-DelayedStart'ın benzer bir hedefi var $\approx 1,37$ °C ancak 2045'te SAI konuşlandırılması, aradaki on yıldaki ısınma nedeniyle hızlı bir sıcaklık düşüşüne yol açacak²⁸ 10 yıllık bir süre,

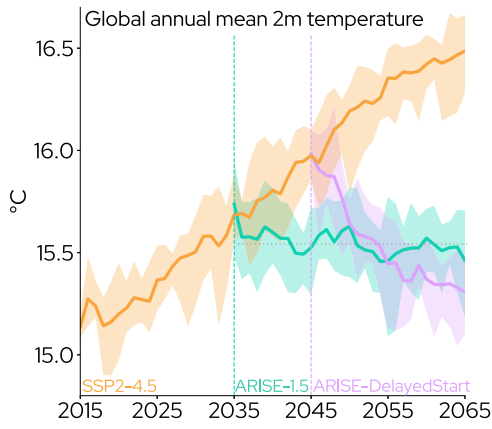
Küresel yönetim ve karar alma süreçlerinden kaynaklanabilecek makul gecikme^{12,29} Bu senaryoları, 1850'den önceki binyıldaki (Son Binyıl, 850–1849) sanayi öncesi iklim değişkenliğinin temel değerleri ve mevcut politikayla tutarlı SAI olmayan iklim değişikliğiyle (SSP2-4.5) karşılaştırıyoruz.^{26,30–33}.

Sonuçlar

Stratejik tercihlere bağlı farklı yanıtlar

İklim hızlarının küresel haritaları (Şek.1) her dört senaryodaki ekosistem riski örüntüsünde, zaman içindeki bireysel sıcaklık eğilimlerini yansıtan oldukça farklı sonuçlar ortaya koymaktadır (Şekil).2).

SAI olmayan SSP2-4.5 altında, ısınmanın zorladığı önemli iklim hızları neredeyse küresel olarak meydana gelir (Şekil.1a, b). Kara alanının büyük çoğunluğu (%61) 2 km/yılın ötesinde potansiyel olarak tehlikeli iklim hızlarına maruz kalmaktadır (Ek Şekil 1a). Çok büyük iklim hızlarının, mekansal eğimlerin zayıf olduğu tropikal bölgelerde aşırı ekosistem stresine neden olması öngörülmektedir (Şekil.1a, b).^{6,34} Örneğin, Amazon bölgesi üzerinde ortalama alınan topluluk ortalama iklim hızları (IPCC Çalışma Grubu 1 Beşinci Değerlendirme Raporu tarafından tanımlandığı gibi)³⁵ 12 km/yıldır, bu da tropikal karasal türlerin bu 20 yıllık dönemde başlangıç koşullarında kalabilmek için kutuplara veya topografyanın 240 km yukarısına doğru hareket etmesi gerektiğini göstermektedir. Keskin topografik eğimler iklim hızlarını dengeler ve kalan popülasyonların mikro iklimlerde barınmalarına olanak tanır, ancak bu toplulukların genellikle düşük bağlantısı vardır^{5,36} ve sürekli ısınma bu nişleri erişilemez hale getirebilir^{5,16,36,37}. Kentleşme gibi insan arazisi kullanımından kaynaklanan parçalanma gibi nedenlerden dolayı başka yerlerde de zayıf bağlantı meydana gelebilir.^{38,39} veya Akdeniz gibi yarı kapalı deniz havzalarındaki doğal engeller⁴⁰ Bu parçalanma, birçok ekolojik topluluğun iklim değişikliklerine yanıt olarak değişme yeteneğini engelliyor ve nüfusun kırılabilirliğini artırabilir.^{36,38,41}.



Şekil 2 | Küresel yıllık ortalama 2 metre sıcaklığının zaman serisi. Paylaşılan Sosyoekonomik Yol 2-4.5 (SSP2-4.5) ve Dünya Sisteminde Güneş İklim Müdahalesinin Tepkilerini ve Etkilerini Değerlendirme (ARISE) 1.5 ve Gecikmeli Başlangıç simülasyonlarında küresel yıllık ortalama 2 metrelik (2m) sıcaklığın zaman serisi. Kalın çizgiler topluluk ortalamasını tasvir eder; gölgelendirme her yıl maksimumdan minimuma topluluk üyesini kapsayan değişkenliği gösterir. Dikey kesik çizgiler SAI'nin 2035'te (ARISE-1.5) ve 2045'te (ARISE-Gecikmeli Başlangıç) konuşlandırılmasını belirtirken, yatay noktalı çizgi sanayi öncesine göre yaklaşık 1,5 °C'lik bir sıcaklık eşliğini gösterir. Farklı simülasyonları ayırt etmek için kullanılan renkler.

Okyanusta, sıcaklıktaki derinlik gradyanları bazı türlerin iklim değişikliğinden kaçmasına izin verirken, termal olmayan kısıtlamalar birçoğunun dikey olarak yer değiştirmesini engelliyor^{15,34,42} Arktik'te iklim hızları yüksektir, burada Arktik amplifikasyonu nedeniyle ısınma oranı yüksektir⁴³ Kıtaların kenarı ve Kuzey Kutbu tarafından dayatılan ulaşım engelleri, karasal ve denizel türler üzerinde kutuplara doğru sınırları işaret ediyor⁴⁴ Kuzey Atlantik ısınma çukurunda negatif iklim hızları meydana gelir (Şekil.1b) Bu simülasyonlarda azalan sıcaklık eğiliminin zayıflayan Atlantik Meridyen Devir Dolaşımı tarafından yönlendirildiği yerler^{45,46}. Tarihsel ekosistemin, sürekli içsel olarak yönlendirilen sıcaklık anomalilerine verdiği tepkilere benzer^{1,47} Kuzey Atlantik'in, ısınma çukuruyla ilişkili negatif iklim hızları ile havzanın diğer yerlerindeki pozitif iklim hızları arasında rekabet eden ekosistem tepkileri deneyimlemesi mümkündür.

Son Milenyumdan itibaren on yirmi yıllık dönem boyunca ortalama alınan iklim hızları (Şekil.1c, d) küçüktür ve bu dönemdeki iklim zorlamalarının nispeten daha küçük büyüklüklerini ve daha yavaş evrimini yansıtır. Volkanlar Son Binyıl boyunca yüzey sıcaklıkları üzerinde en büyük dış zorlamayı uygular, ancak etkileri oldukça doğrusal değildir ve yalnızca birkaç yıl devam eder^{48,49} İklim hızı bu zaman ölçekleri hakkında anlamlı bir içgörü sağlamadığından¹⁵, büyük bir volkanik patlamanın (10 teragram stratosferik sülfat enjeksiyonu olarak tanımlanır) 5 yılı içindeki dönemleri atlıyoruz³¹). İçsel olarak yönlendirilen iklim değişkenliği^{50,51} Güneş döngüleri gibi doğal olaylar⁵², küçük volkanik patlamalar⁵³ veya antropojenik arazi kullanım değişiklikleri⁵⁴ hâlâ sıfır olmayan bölgesel ölçekli iklim hızlarına neden olabilir (örneğin, Şekil 1'deki Doğu Avrupa'da). 1c) İklim hızları okyanus üzerinde daha büyüktür (Şekil.1d) karadan (Şekil) daha 1c), deniz ortamlarındaki daha küçük mekansal sıcaklık gradyanlarını yansıtır³⁴ Sıcaklık gradyanlarının tropikal okyanuslar üzerinde en sığ olduğu yerlerde, sıcaklıktaki küçük bozulmalar bile sıfır olmayan iklim hızlarına yol açabilir³⁴. Bu iklim hızlarının küçük büyüklüğü, bu dönemdeki içsel değişkenliği ve doğal zorlamaların türler arasında dağılımsal kaymalara yol açabileceğini, ancak dağılım kapasitelerini aşmayacağını göstermektedir. Sınır koşulları 1850'de sabitlenmiş tamamen zorlanmamış bir simülasyon (Ek Şekil 2) niteliksel olarak benzer sonuçlar üretir.

ARISE-1.5'in 2035 yılında konuşlandırılmasının ardından 20 yıllık iklim hızları (Şekil.1e, f) küresel ortalama sıcaklığın sanayi öncesi döneme göre 1,5 °C üzerinde tutulması, SAI olmayan SSP2-4.5 ile karşılaştırıldığında nispeten küçüktür

(İncir.1a, b). Bu iklim hızları, sıcaklığı korumak için SAI kullanımının ima ettiği neredeyse düz sıcaklık eğilimlerini yansıtmaktadır (Şekil.2). Kara üzerinde, ARISE-1.5'teki iklim hızları (Şekil.1e) Son Milenyum simülasyonundakilere benzer büyüklüktedir (Şekil.1c). İklim okyanus üzerinde hızlanıyor (Şekil.1f) büyük ölçüde negatif işaretlidir. Müdahale 2035'te devreye girdiğinde küresel sıcaklıklar 1,5 °C hedefinin biraz üzerinde olduğundan, ARISE-1.5 sıcaklıkta küçük bir negatif eğilime neden olur (Şekil.2). Bölgesel ölçeklerde, iç iklim değişikliği SAI müdahalesine yönelik zorunlu tepkiyi alt üst edebilir (örneğin, Şekil 1). 1 (Doğu Pasifik'te f)^{55,56}. SAI'nin ARISE-1.5'teki müdahalesiyle Atlantik Meridyen Devir Dolaşımının zayıflaması kısmen telafi edildiğinden (ama durdurulmadığından) Kuzey Atlantik ısınma deliğinde SAI olmayan SSP2-4.5'e benzer şekilde negatif iklim hızları meydana gelir.^{11,46,57} ARISE-1.5'te çok daha fazla okyanus alanı, Son Milenyum'a kıyasla (sırasıyla %23 ve %8) 2 km/yıl (48%) ve 5 km/yıl (17%) iklim hızlarına maruz kalmaktadır. Bu değerler, deniz türlerinin gözlemlenen ortalama dağılım oranlarının içindedir. (≈7 km/yıl^{3,7}), ve ARISE-1.5'te bu değerleri aşan iklim hızlarına maruz kalan alan azdır (Ek Şekil 1b).

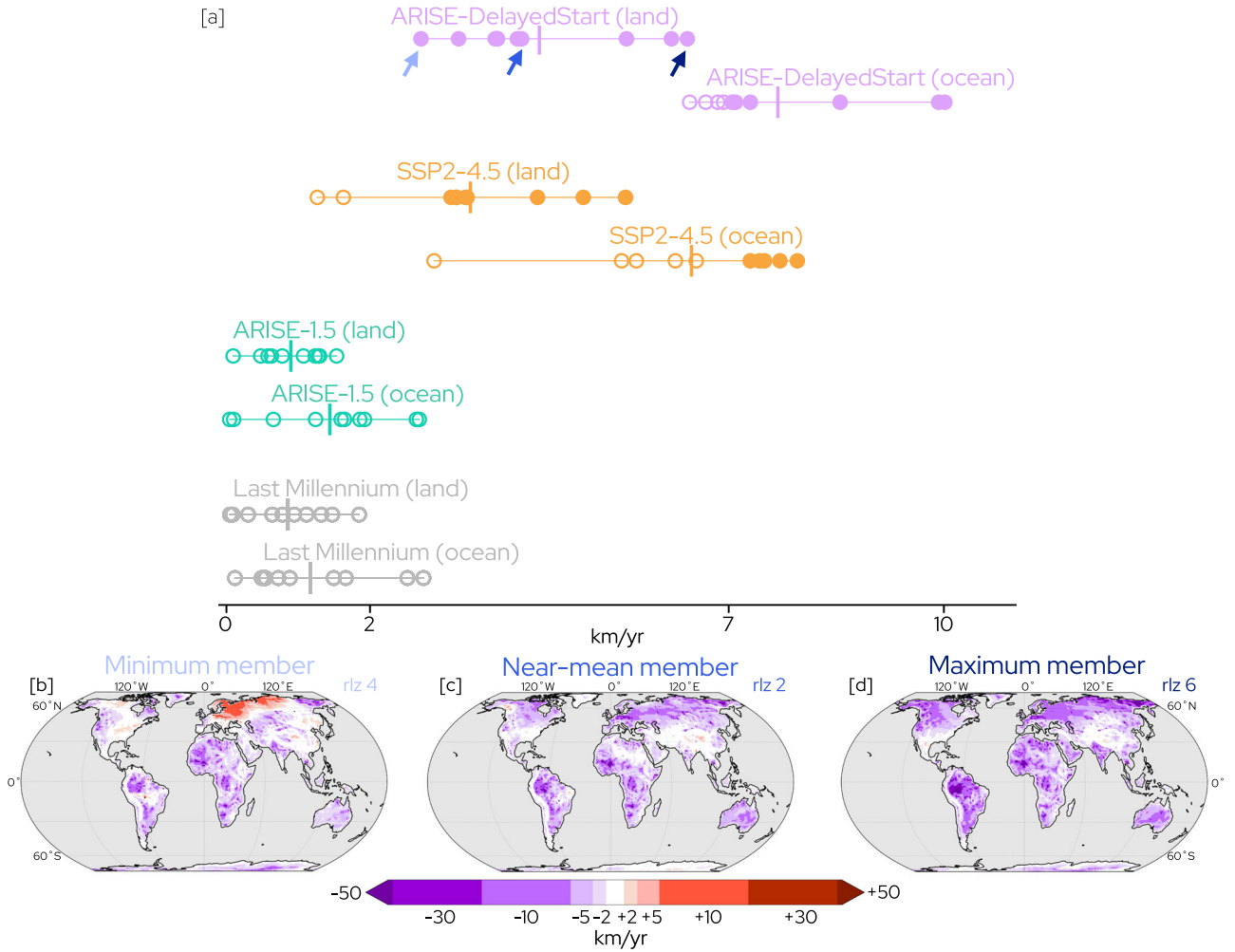
ARISE-DelayedStart'taki SAI stratejisi büyük 20 yıllık iklim hızları üretiyor (Şekil.1g, h) 2045 yılındaki konuşlandırmanın ardından sıcaklık hedefine hızla ulaşmak için gerekli olan negatif sıcaklık eğilimi nedeniyle (Şekil 1).2). ARISE-DelayedStart'ta (Şekil) daha fazla miktarda kara ve okyanus alanı tehlikeli iklim hızlarına maruz kalmaktadır. 1g, h) SAI olmayan SSP2-4.5'in aksine (Şekil).1a, b; Ek Şekil 1). Kara alanının üçte ikisi (%66) 2 km/yılın ötesindeki iklim hızlarına maruz kalmaktadır; toplam kara alanının %13'ü (Güney Amerika'nın büyüklüğüne benzer) ve dünya okyanusunun üçte birinden fazlası (%35) ARISE-DelayedStart'ta (Ek Şekil 1) 10 km/yılın üzerinde iklim hızlarına maruz kalmaktadır. Okyanusun yüzde beşi 50 km/yılın ötesindeki iklim hızlarına maruz kalmaktadır (Şekil1h, Ek Şekil 1b), birçok istilacı türde gözlemlenen aşırı aralık kaymaları için olan yeteneği bile aşar⁵⁸ Dağıtımı takip eden 20 yıllık dönemde, ARISE-DelayedStart, iklim hızlarından kaynaklanan küresel ve bölgesel ekosistemlere yönelik bir zorlamayı tasvir ediyor (Şekil 1).1g, h) SAI olmayan SSP2-4.5'teki karşılık gelen zaman periyodunu aşan (Şekil).1a, b) ve ARISE-1.5 altındaki küçük değerlerle çarpıcı bir tezat oluşturur (Ek Şekil 3). Hızlı küresel sıcaklık azalmasıyla zorlanan bu büyük iklim hızları olgusu, bir müdahalenin yüksek radyatif dengede sona ermesi durumunda daha önce tanımlanan sonlandırma şokuna benzer bir "yerleştirme şoku" olarak görülebilir^{18,24}.

İç iklim değişikliği koşulları düzenler

Son Milenyum simülasyonunda kara ve okyanus ortalama iklim hızları (Şekil.3a) Sanayi öncesi iklimde 20 yıllık dönemlerde deneyimlenen değer aralığını gösterir. Bu iklim hızlarının küçük büyüklüğü, karasal ve denizel türler için dağılım oranları aralığındadır^{7,16} Son Binyıl boyunca 20 yıllık dönemlerin tam dağılımı dikkate alındığında, iklim hızları nadiren karasal türlerin ortalama dağılım oranlarını aşmaktadır (≈2 km/yıl) ve asla deniz türlerininkini aşmayacak şekilde olmalıdır (≈7 km/yıl) (Ek Şekil 9a). SAI'nin küresel ortalama sıcaklığı korumak için kullanıldığı ARISE-1.5 senaryosundan hem kara hem de okyanus üzerindeki ortalama iklim hızları Son Milenyum değişikliğinin dağılımı içinde yer almaktadır (Şekil.3a). ARISE-1.5'teki küresel kara ve okyanus ortalama iklim hızları, sağlamlık testi altında Son Milenyum simülasyonundan istatistiksel olarak ayırt edilemez⁵⁶. SAI olmayan SSP2-4.5 altındaki iklim hızları hem Son Binyıl'ı hem de ARISE-1.5'i kara ve okyanus üzerinde sağlam bir şekilde aşıyor. ARISE-DelayedStart'ta iklim hızları diğer tüm senaryoları aşıyor: dağılım ARISE-1.5 veya Son Binyıl'dan tamamen ayrı ve kara üzerinde SAI olmayan SSP2-4.5'ten büyüklük olarak sağlam bir şekilde daha büyüktür.

Burada incelenen 20 yıllık dönemler gibi on yıllık ila on yıllık zaman ölçeklerinde, SAI müdahalesi gibi harici bir iklim zorlaması olsa bile, iç değişkenlikten gelen katkılar büyüktür.^{50,55,56} Topluluk ortalamasını analiz ederken (Şekil1) izin verir

Magnitude of global median climate speed



Şekil 3 | Küresel medyan iklim hızının büyüklüğü ve içsel değişkenlik altında farklı gerçekleştirmeler. Kara ve okyanus üzerinde 2 metrelik sıcaklığın küresel ortalama iklim hızının büyüklüğü (A) Paylaşılan Sosyoekonomik Yol 2-4.5 (SSP2-4.5), Son Binyıl ve Dünya Sistemindeki Güneş İklim Müdahalesinin Tepkilerini ve Etkilerini Değerlendirme (ARISE) 1.5 ve Gecikmeli Başlangıç simülasyonlarında. Minimum (B), yakın topluluk ortalaması (C), ve maksimum (D) ARISE-DelayedStart'ta kara üzerindeki ortalama iklim hızı. [a]'da, açık daireler şunu gösterir:

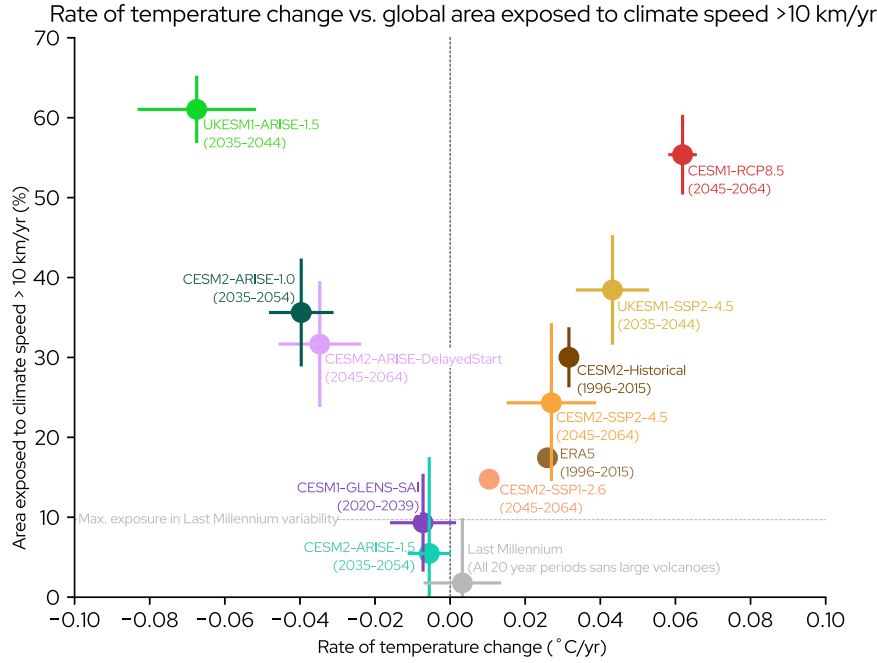
iklim hızları karasal veya okyanus türlerinin ortalama dağılımı hızı içindedir, kapalı daireler iklim hızlarının ortalama dağılımı hızlarını aştığını belirtir ve dikey çubuklar topluluk ortalamasını gösterir. (içindeki oklar) topluluk üyelerini belirtmek (b-d). İklim hızları 2035-2054 (ARISE-1.5), 2045-2064 (ARISE-DelayedStart ve SSP2-4.5) ve on 20 yıllık dönem (Son Binyıl) üzerinden hesaplanmıştır. (A) farklı simülasyonları ayırt edin. Tüm simülasyonlardaki bireysel üyeler için Ek Şekiller 4-7'ye bakın. Maskeli okyanus alanı gri renkte gösterilmiştir (b-d).

İklim zorlamalarına verilen tepkinin incelenmesi için, her bir topluluk üyesinin (Şekil 3b, c, d) tek bir içsel değişkenlik gerçekleşmesi altında deneyimlenebilecek koşulların makul bir temsili gösterir. Hızlı sıcaklık düşüşüne ilişkin bir SAI senaryosuna zorunlu bir yanıtın varlığında içsel değişkenliğin rolüne dair bir örnek sağlamak için ARISE-DelayedStart topluluğundaki üyelerin evrimini açıklıyoruz. İklim hızları ARISE-DelayedStart topluluğunda büyüktür ve denizdeki (≈ 7 km/yıl) ve karasal türler (Karada her topluluk üyesinde yılda 2 km ve okyanus üzerinde altı üyede (Şekil 3a). Yine de, bireysel üyelerdeki bölgesel ölçeklerde, El Niño-Güney Salınımı veya Pasifik On Yıllık Değişkenliği gibi kaynaklardan gelen iç değişkenlik, eğilimleri yumuşatabilir veya hatta işaretlerini değiştirebilir (Şekil 3b). Diğer üyeler, topluluk ortalamasına daha benzer bir mekansal desen sergiliyor (Şekil 3c). İçsel değişkenlikten kaynaklanan ortalama küresel eğilimler zorunlu tepkiyle aynı fazda olduğunda, bireysel gerçekleştirmeler dünyanın her yerinde daha büyük büyüklükte olumsuz iklim hızları yaşayabilir (Şekil 1.3d). ARISE-DelayedStart'ın bir gerçekleştirilmesinde, bu dahili değişkenlikten kaynaklanan amplifikasyon

küresel okyanus üzerinde yılda 10 km'yi aşan aşırı ortalama iklim hızları üretir.

Önceki analizler, iç değişkenliğin getirdiği gürültünün yüzey iklim tepkisinin tespitini engelleyebileceğini ve bir müdahalenin algılanan başarısızlığına yol açabileceğini göstermektedir.^{8,55,59} ARISE-DelayedStart'taki gezegensel ölçekteki soğuma, eğilimin işareti dikkate alındığında dağıtımını SAI olmayan SSP2-4.5'ten tamamen ayıracak kadar güçlüdür (Ek Şekil 9b); en küçük küresel medyan iklim hızına sahip üyede bile, birkaç bölgede zorunlu tepkiye zıt bir işaret görülmektedir (Şekil 9b). 3b). Bu sonuçlar, hızlı sıcaklık düşüşünün olduğu senaryolarda bölgesel veya gezegensel ölçekte algılanan başarısızlığın çok daha az olası olduğunu göstermektedir.

İklim hızlarından kaynaklanan göreceli ekolojik risk Yılda 10 km'lik iklim hızları, hem uyumlu ailelerin (memeliler gibi) hem de karasal ve denizel türlerin ortalama olarak dağılım oranlarını aşarak aşırı risk eşliğini sağlar^{7,16,18} Bu iklim hızlarına maruz kalan küresel alanı, çok çeşitli veri kümeleri için küresel sıcaklık değişiminin yıllık oranına göre verimli bir şekilde çiziyoruz.



Şekil 4 | Sıcaklık değişim oranı ve 10 km/yılın üzerindeki iklim hızına maruz kalan küresel alan tarafından verilen göreceli ekolojik risk. Çeşitli iklim değişikliği senaryoları, iklim müdahalesi ve tarihsel ürünler için 2 metrelik bir sıcaklık hızına maruz kalan alan yüzdesi ile yıllık sıcaklık değişim oranının 10 km/yıldan büyük büyüklüğe sahip olması. Noktalar topluluk ortalamasını belirtir ve çizgiler topluluk değişkenliğinin genişliğini gösterir. Her noktanın rengi veri kümelerini görsel olarak birbirinden ayırmaya yardımcı olur. Dikey kesikli çizgi 0 °C/yıllık 20 yıllık sıcaklık değişimini gösterir. Yatay kesikli çizgi Son Milenyumda eşik iklim hızına maruz kalan maksimum 20 yıllık alanı temsil eder

değişkenlik (%10). Tabloya bakın¹ Şekildeki her veri kümesinin ayrıntılı açıklamaları için, soldan sağa burada listelenmiştir: Birleşik Krallık Dünya Sistemi Modeli 1 (UKESM1)-Güneş iklim müdahalesinin Dünya sistemi üzerindeki tepkilerini ve etkilerini değerlendirme (ARISE)-1.5, Topluluk Dünya Sistemi Modeli 2 (CESM2)-ARISE-1.0, CESM2-ARISE-GecikmeliBaşlangıç, Topluluk Dünya Sistemi Modeli 1 (CESM1)-Jeomühendislik Büyük Topluluğu (GLENS)-Stratosferik Aerosol Enjeksiyonu (SAI), CESM2-ARISE-1.5, Son Binyıl, CESM2-Paylaşılan Sosyoekonomik Yol 1-2.6 (SSP1-2.6), Avrupa Yeniden Analizi 5 (ERA5), CESM2-SSP2-4.5, CESM2-Tarihsel, UKESM1-SSP2-4.5 ve CESM1-Temsili Konsantrasyon Yolu 8.5 (RCP8.5).

Ekolojik riski özetleyin (Şekil.4; Tabloya bakınız¹(ayrıntılı veri açıklamaları için) ve sonrasında bu şekil bağlamında her bir ürün için çıkarımları açıklayın.

Tüm örtüşmeyen 20 yıllık Son Binyıl zaman periyotlarının ortalaması, ekosistemlerin Sanayi Devrimi başlamadan önceki binyıl boyunca deneyimlediği koşulları yansıtan kökende yer alır. Son Binyıl değişkenliği boyunca eşik iklim hızına maruz kalan maksimum alan (%10 küresel alan) yatay noktalı çizgiyle gösterilir (Şekil).4). Noktalı çizginin ötesinde orijinden daha fazla uzaklık, ekolojik riskin nispeten daha yüksek bir profilini ifade eder.

Avrupa Yeniden Analizi Sürüm 5 (ERA5)⁶⁰yakın geçmişteki (1996-2015) iklim hızlarının gözlemsel olarak kısıtlanmış küresel bir tahminini sağlar^{60,61}Aynı dönemde, tarihsel bir simülasyon (CESM2-Tarihsel²⁷) ERA5'tekinden daha yüksek bir sıcaklık değişim oranı ve eşik iklim hızına maruz kalan daha büyük bir alanı gösterir. Bu dönemde CESM2-Historical'deki aşırı hızlı ısınma oranının altında yatan fiziksel nedenler devam eden bir araştırma alanıdır ve muhtemelen reçeteli biyokütle yakma emisyonlarındaki hataları içerir⁶². Daha genel olarak, ERA5 ile tarihsel simülasyonlar arasındaki tutarsızlıklar kısmen gerçek dünya iklim değişkenliğinin tek bir gerçekleşmesi ile topluluk ortalamaya zorunlu tepkisi arasındaki yapısal farklılıklardan kaynaklanıyor olabilir⁶³ Genel olarak, hem ERA5 hem de CESM2-Tarihsel, Son Binyıl koşullarının ötesinde ve orta yüzyıl SSP2-4.5 aralığında iklim hızları sergiliyor; bu, ısınmadan kaynaklanan bilinen tarihsel ve beklenen gelecekteki ekosistem stresine tutarlıdır.^{1,3,6,7,37,42}.

SAI olmayan gelecek senaryoları, küresel alanda önemli bir alanı ısınmadan kaynaklanan büyük iklim hızlarına maruz bırakıyor ve Şekil 2'nin sağ yarısında kümeleniyor.⁴. Daha yüksek azaltma (SSP1-2.6), orta düzeyde azaltma (SSP2-4.5) ve azaltma olmayan (RCP8.5) senaryoların hepsi Son Milenyum baz çizgisini aşıyor ve artan emisyonlar daha büyük ekolojik riske neden oluyor.

Birleşik Krallık Dünya Sistemi Modeli sürüm 1'deki (UKESM1-SSP2-4.5) SSP2-4.5 simülasyonunda tasvir edilen nispeten daha yüksek risk (tam açıklama için "Yöntemler" bölümüne bakın) CESM2-SSP2-4.5'e kıyasla, esas olarak UKESM1'deki daha yüksek iklim duyarlılığı nedeniyle daha hızlı ısınma oranlarından kaynaklanmaktadır⁶⁴Yukarıdaki sonuçlar, gelecekteki tüm emisyon yolları altında yaygın ekosistem stresine ilişkin önceki bulgularla tutarlıdır.^{1-7,37,42}, hiçbir azaltmanın olmadığı senaryolarda iklim değişikliğinden kaynaklanan en uç risklerle^{34,65}.

SAI'nın hızlı sıcaklık azaltma için kullanıldığı senaryolar, Son Binyıl baz çizgisinin üzerindeki şeklin sol tarafında kümelenir ve büyük miktarda küresel alanı hızlı soğumadan kaynaklanan yüksek iklim hızlarına maruz bırakır. Bireysel senaryolar (Tabloya bakın)¹ayrıntılar için) her biri, bir dağıtım şoku üretebilecek benzersiz bir potansiyel tasarım seçimini tasvir eder. Bir yol, bir sıcaklık hedefi aşıldıktan sonra dağıtım gecikmeli bir başlangıç yoluyla, ya dağıtımı kasıtlı olarak erteleme seçeneğiyle (ARISE-DelayedStart) ya da yüksek iklim hassasiyeti nedeniyle sıcaklık eşiği erken ihlal edilirse (UKESM1-ARISE-1.5⁵⁷). Alternatif olarak, müdahale, başlangıç küresel ortalama değerinin (CESM2-ARISE-1.0) altında düşük bir sıcaklık hedefi elde etme açık hedefi ile konuşturılabilir.^{11,12}veya ref. simülasyonları.⁶⁶[gösterilmemiştir]]. Altta yatan stratejik mantığa bakılmaksızın, dikkat çekici nokta, hızlı sıcaklık düşüşüne sahip her SAI senaryosunun, karşılık gelen SAI olmayan iklim değişikliği referans senaryosundan daha fazla küresel alanı eşik iklim hızına maruz bırakmasıdır: CESM2-ARISE-1.0 ve CESM2-ARISE-DelayedStart, CESM2-SSP2-4.5 ile ve UKESM1-ARISE-1.5, UKESM1-SSP2-4.5 ile karşılaştırılmıştır.

Müdahalenin küresel ortalama sıcaklığı (CESM2-ARISE-1.5, CESM1-GLENS-SAI) korumak için kullanıldığı SAI senaryoları, topluluk ortalamalarının Son Milenyum koşullarının sınırları içinde kalmasıyla kökene yakın kalır. Bu SAI senaryoları esasen en uç noktaları ortadan kaldırır

Tablo 1 | İklim hızlarını hesaplamak için kullanılan tüm veri kümelerinin tablosu

İsim	Kısa açıklama	Kullanılan zaman	Çözünürlük (boyam × enlem)
Son Binyıl ^{26,30,31}	CESM2(WACCM6ma) 1850 öncesi bin yılın simülasyonu	On adet 20 yıllık dönem ve çakışmayan tüm 20 yıllık dönemler	2,5° × 1,89°
SSP2-4.5 ^{11,32}	CESM2(WACCM6) Orta düzeyde azaltma ve negatif emisyon teknolojilerinin yavaş dağıtımıyla gelecekteki iklim değişikliğinin simülasyonu	2045–2064 (10 topluluk Üyeler)	1,25° × 0,9°
ORTAYA ÇIK-1.5 ¹¹	2035 yılında SAI ile CESM2(WACCM6) simülasyonu, SSP2-4.5 zorlamasına karşı 2020–2039 ortalamasında küresel ortalama sıcaklığı, kutuptan kutba sıcaklık gradyanını ve kutuptan ekvatora sıcaklık gradyanını korumak için devreye alındı	2035–2054 (10 topluluk Üyeler)	1,25° × 0,9°
ARISE-GecikmeliBaşlangıç ²⁸	2045'te SAI ile CESM2(WACCM6) simülasyonu, küresel ortalama sıcaklığı, kutuptan kutba sıcaklık gradyanını ve kutuptan ekvatora sıcaklık gradyanını 2020–2039 CESM1(WACCM5) ortalamasına döndürmek için SSP2-4.5 zorlaması ile devreye alındı	2045–2064 (10 topluluk Üyeler)	1,25° × 0,9°
CESM1-GLENS ⁹⁵	2020 yılında SAI ile CESM1(WACCM5) simülasyonu, RCP8.5 zorlamasına karşı 2010–2030 ortalamasında küresel ortalama sıcaklığı, kutuptan kutba sıcaklık gradyanını ve kutuptan ekvatora sıcaklık gradyanını korumak için devreye alındı	2020–2039 (21 topluluk Üyeler)	1,25° × 0,9°
ORTAYA ÇIK-1.0 ²⁸	2035 yılında SAI ile CESM2(WACCM6) simülasyonu, SSP2-4.5 zorlaması karşısında küresel ortalama sıcaklığı, kutuptan kutba sıcaklık gradyanını ve kutuptan ekvatora sıcaklık gradyanını 2000–2019 ortalamasına döndürmek için devreye alındı	2035–2054 (10 topluluk Üyeler)	1,25° × 0,9°
UKESM1-YÜKSELİŞ-1.5 ⁵⁷	2035 yılında SAI ile UKESM1 simülasyonu, SSP2-4.5 zorlaması karşısında küresel ortalama sıcaklığı, kutuptan kutba sıcaklık gradyanını ve kutuptan ekvatora sıcaklık gradyanını 2015–2034 ortalamasına döndürmek için devreye alındı	2035–2044 (5 topluluk Üyeler)	1,875° × 1,25°
RCP8.5 ^{95,102}	CESM1(WACCM5) herhangi bir azaltma olmaksızın gelecekteki iklim değişikliğinin simülasyonu	2045–2064 (3 topluluk Üyeler)	1,25° × 0,9°
UKESM1-SSP2-4.5 ^{32,57}	UKESM1, orta düzeyde azaltma ve negatif emisyon teknolojilerinin yavaş dağıtımıyla gelecekteki iklim değişikliğinin simülasyonu	2035–2044 (5 topluluk Üyeler)	1,875° × 1,25°
SSP1-2.6 ³²	CESM2(WACCM6) Yüksek azaltım ve negatif emisyon teknolojilerinin hızlı dağıtımı ile gelecekteki iklim değişikliğinin simülasyonu	2045–2064 (1 topluluk Üye)	1,25° × 0,9°
CESM2-Tarihsel ²⁷	CESM2(WACCM6) Tarihsel dönem boyunca iklim durumunun simülasyonu	1996–2015 (3 topluluk Üyeler)	1,25° × 0,9°
ERA5 ⁶⁰	Tarihsel Dünya sisteminin gözlemsel olarak kısıtlanmış tahmini	1996–2015 (1 yeniden analiz)	0,25° × 0,25°, CESM simülasyonlarına uyması için 1,25° × 0,9° olarak yeniden eşlendi
Zorlamadan ^{26,51}	CESM2(WACCM6) dış zorlamalar olmadan endüstri öncesi koşulların simülasyonu	10 rastgele seçilmiş 20 yıllık dönem	1,25° × 0,9°

SAI olmayan iklim değişikliği senaryolarında meydana gelen iklim hızlarından ekosistemlere yönelik riskler. Ancak, ARISE-1.5 ile ARISE-DelayedStart arasındaki baskın fark, dağıtımda 10 yıllık bir gecikmedir. Bu kısa gecikme, aşırı ekolojik riskin oldukça belirgin bir profilini üretmek için yeterlidir.

Tartışma

Bu çalışma, SAI'nin küresel sıcaklığı korumak için kullanıldığı senaryolar ile SAI'nin hızlı sıcaklık düşüşüne neden olduğu senaryolar arasındaki temel farkı göstermektedir. Küresel sıcaklığı koruyan senaryolar, küresel ölçekli parametrelerin istatistiksel olarak Son Milenyum koşullarından ayırt edilememesiyle iklim hızlarından kaynaklanan riskleri büyük ölçüde azaltır. Buna karşılık, hızlı sıcaklık düşüşü senaryoları, karşılık gelen SAI olmayan senaryolara kıyasla ekolojik riski ("dağıtım şoku") artırır. ARISE senaryolarının tasarımı, bu sonuçların belirli potansiyel kararlara bağlanmasına olanak tanır: dağıtımda politika açısından önemli bir gecikme, sıcaklığı koruyarak iklim hızlarından kaynaklanan ekolojik riski büyük ölçüde azaltacak bir senaryoyu (ARISE-1.5), SAI olmayan iklim değişikliğine kıyasla bu riski daha da kötüleştiren bir dağıtım şoku olan bir senaryoya dönüştürebilir (ARISE-DelayedStart).

Sonuçlarımız makulülük için tasarlanmış politika açısından önemli senaryolarda ortaya çıkmaktadır.^{11,12} SAI risklerini göstermek için oluşturulan sonlandırma senaryolarının aksine²⁴. Dağıtım şoku, sıcaklığı hızla değiştirme yeteneğine içsel olarak eşlik eden bir riski gösterir. Bu, aşıldıktan sonra bir sıcaklık hedefine güvenli bir şekilde geri dönme yeteneğini kısıtlayabilir. Teorik olarak, ekosistemlerin SAI'yi yeterince yavaş bir şekilde artırarak

zorlamaya yanıt verin. Ancak, küresel sıcaklığın azaltıldığı SAI senaryoları genellikle iklim değişikliğinin bazı ciddi etkilerini hafifletmek için agresif bir yanıt seçeneği olarak çerçevelenir^{9,67}, devrilme noktalarını önlemek⁶⁸ veya büyük bir sinyal-gürültü oranı sağlayarak hızlı tespiti kolaylaştırmak için^{12,59}. Düşük sıcaklık hedefini yavaş yavaş uygulamaya koyma yönündeki stratejik tercih, aynı hedeflerle çelişiyor olabilir.

İklim hızları genellikle ısınan bir iklimde ekosistem tepkilerini ve risklerini ölçmek için kullanılır^{15,16,34}, bunların soğuyan bir iklim için anlamlı olup olmadığı sorusunu gündeme getiriyor. Gözlemlenen aralık değişimleri, işaretleri ne olursa olsun, iç iklim değişkenliğinden kaynaklanan sıcaklık eğilimlerini takip ediyor ve hem soğumanın hem de ısınmanın ekolojik olarak alakalı olduğunu güçlü bir şekilde gösteriyor^{1,47}. Isınma sonucu kalıcılık veya mikro iklimlerde barınma yoluyla geçici olarak hayatta kalan kalıntılar^{36,37} hızlı soğumadan muhtemelen faydalanacaktır, ısınma altında yeni bir duruma geçiş yapan çok sayıda ekosistem aniden tehlikeye girebilir. Paleoklimatik veriler, uzun vadeli bir iklim değişikliğinin ardından hızlı (yıllık ila on yıllık) büyük ölçekli soğuma dönemlerini gösterir ısınma eğilimi gezegen ölçeğindeki değişikliklerle örtüşüyor ekosistemler^{69,70}. Bu bulgular, önceki bir ısınma eğiliminin içinde yer alan ani küresel soğumanın ekosistemlerde büyük bir bozulmaya yol açabileceği olasılığını desteklemektedir.

İklim hızlarından elde edilen içgörü, gelecekteki senaryo tasarımı ve karar vermeyi bilgilendirmeye yardımcı olabilir. Dağıtım şokundan kaçınmak için senaryolar tasarlamak, hem küresel sıcaklık hedefini hem de dağıtım yılını kısıtlar ve bu da senaryo tasarımında bir kombinasyonel patlamının önlenmesine yardımcı olur¹². Bu kısıtlamalar dahilinde henüz simüle edilmemiş iki senaryoya dikkat çekiyoruz: dağıtım tarihleri geçmişken gecikmeli başlangıç bakımı

Hızlı sıcaklık düşüşünü önlemek için 2035 ve daha yüksek sıcaklık hedefleri ve müdahalenin iklim hızlarını ılımlı hale getirmek için yeterli zaman içinde uygulandığı yavaş başlangıçlar. Küresel çevre politikasıyla ilgili kararlar, birçok süreç ve olgudan kaynaklanan risklerin karmaşık dengelerini içerir.⁶⁷ Araştırma, SAI senaryolarında bu tür uzlaşmaların kaynaklarını somut olarak belirledikçe, analiz ve etkili karar almaya yardımcı olmak için belirli bir senaryonun tasarımı sırasında risklerin göreceli önceliklendirilmesi şeffaf bir şekilde belgelenmelidir.

Yöntemler

Birincil simülasyonlar

Çalışmamız, Tüm Atmosfer Topluluk İklim Modeli sürüm 6 (CESM2(WACCM6)) ile Topluluk Dünya Sistemi Modeli Sürüm 2'yi kullanan üç simülasyondan (SSP2-4.5, ARISE-1.5 ve ARISE-DelayedStart) elde edilen verilere dayanmaktadır.^{26,27} CESM2(WACCM6), SAI için en alakalı olduğu düşünülen stratosferik süreçler de dahil olmak üzere iklimin yüksek doğrulukta tasvirini sunan tamamen etkileşimli bir Dünya sistemi modelidir.^{26,27,71} Buradaki tüm simülasyonlar için CESM2(WACCM6) 70 dikey seviyeyle çalıştırıldı (model üstü≈ 140 km) ve 1,25° boylam × 0,9° enlem yatay çözünürlük.¹¹ Bu mekansal ölçek (Tablo 1) daha geniş ekoloji literatüründe küresel ekosistem riskini analiz etmek için yeterli kabul edilir.^{4,15,18}

CESM2(WACCM6ma) Son Milenyum veri seti, iklim modelleme topluluğunda geleneksel olarak 1850'de başladığı tanımlanan Sanayi Devrimi'nden hemen önceki 850'den 1849'a kadar olan 1000 yıllık aralığın bir simülasyonudur.^{26,30} Nispeten bol miktarda bulunan paleoklimat verileri, doğal değişkenlik, volkanlar ve güneş döngüleri gibi gerçekçi doğal zorlamalar ve antropojenik arazi kullanım değişiklikleri de dahil olmak üzere bu dönemin iyi sınırlanmış uzun kayıt tasvirine olanak tanır.³¹ Sera gazı emisyonları ve sanayileşme yoluyla antropojenik iklim değişikliği büyük hale gelmeden önce iklim değişikliği ve değişiminin ekolojik olarak alakalı bir temel çizgisini sağlamak için Son Bin Yılı kullanıyoruz. CESM2(WACCM6ma), CESM2(WACCM6)'nın bir orta atmosfer konfigürasyonudur ve hesaplama karmaşıklığını azaltmak için basitleştirilmiş bir kimya şeması içerir. CESM2(WACCM6ma)'nın iklimi, troposferik kimya dışında CESM2(WACCM6)'ya çok benzerdir.⁷²

SSP2-4.5 simülasyonları, iklim değişikliğinin orta düzeyde azaltılması ve negatif emisyon teknolojilerinin yavaş bir şekilde devreye alınmasıyla SAI'siz bir geleceği tasvir ediyor.³² Eşleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi Aşama 6 için beş topluluk üyesi oluşturuldu.⁵ ARISE projesi için örneklem büyüklüğünü artırmak amacıyla beş ek topluluk üyesi oluşturuldu.¹¹ 10 gerçekleşmenin tamamı 2015–2069 yılları arasında mevcuttur. SSP2-4.5, küresel toplumun güncel politika taahhütleriyle tutarlıdır, ancak yine de CESM2 ve diğer iklim modellerinde Paris Anlaşması hedeflerinin ötesinde ısınmayla sonuçlanır.^{33,73}

İki politika açısından önemli SAI senaryosunu keşfetmek için ARISE-1.5 ve ARISE-DelayedStart veri kümelerini kullanıyoruz.^{11,28} Bu simülasyonlar genellikle ARISE-SAI-1.5 ve ARISE-SAI-1.37-DelayedStart olarak adlandırılır. Kısalık için ARISE-1.5 ve ARISE-DelayedStart adlarını veya diğer modellerde çalıştırılan senaryolardan ayırt etmek için gerektiğinde CESM2- ARISE-1.5 ve CESM2-ARISE-DelayedStart adlarını kullanırız. ARISE-1.5'teki SAI, küresel ortalama sıcaklığı CESM2'de (WACCM6) 2020–2039 ortalamasında tutmak için 2035'te devreye alınır (≈1.5-IPCC AR6 sanayi öncesi değerinin C üzerinde).^{11,74} ARISE-DelayedStart'ta SAI, CESM1(WACCM5)'ten 2020–2039 ortalamasına benzer bir küresel ortalama sıcaklık hedefi ile 10 yıl sonra 2045'te devreye alınır (≈Dağıtımda politika açısından önemli bir gecikmenin etkilerini tasvir etmek için IPCC AR6 sanayi öncesi değerinin 1,37 °C üzerinde).¹² ARISE-DelayedStart, hem gecikmeli başlatma hem de biraz daha düşük sıcaklık hedefi nedeniyle ARISE-1.5'ten daha büyük bir stratosferik sülfat yükü gerektirir.^{12,28}

Diğer tasarım seçimleri ARISE-1.5 ve ARISE-DelayedStart arasında sabittir: kükürt dioksit aynı yükseklikte enjekte edilir (≈21 km), her ikisinde de SSP2-4.5 sera zorlaması kullanılır ve her toplulukta on üye bulunur. Enjeksiyonlar dört yerden (30° ve 15° N/S, hepsi 180° E'de) orantılı-integral geri besleme kontrolü ile

Küresel sıcaklık hedefinin yanı sıra kutuptan kutba ve kutuptan ekvatora sıcaklık gradyanlarını korumak için algoritma^{11,75} Bu hedeflerin ekvator dışı enjeksiyonlarla kontrol edilmesi, sera gazı ısınmasının gezegen ölçeğindeki mekansal modellerini telafi ederek yan etkileri azaltmayı amaçlamaktadır: küresel ortalama sıcaklıktaki artış, yarım küre asimetrisi ve kutup amplifikasyonu.⁷⁶

ARISE-1.5 ve ARISE-DelayedStart, SAI müdahalesi hariç her bakımdan SSP2-4.5 ile aynıdır. Bu nedenle, simülasyonlar arasındaki tutarlı farklar muhtemelen SAI stratejilerinden kaynaklanmaktadır. ARISE-1.5 ve ARISE-DelayedStart'taki SAI müdahalelerinin SSP2-4.5'e göre etki büyüklükleri, küresel ölçekli sonuçların açıkça SAI müdahalesinden kaynaklandığı kadar büyüktür (yani, topluluk ortalama küresel sıcaklık eğilimi dünya çapında işaret değiştiriyor). Yararlı olduğu durumlarda, SAI müdahalesine zorunlu tepkinin nerede büyük olduğunu belirlemek için sağlamlık testini parametrik olmayan bir yöntem olarak kullanırız.⁵⁶ Bu testi geçtiklerinde sonuçlara sağlam olarak atıfta bulunuyoruz (karşılık gelens <(binom testinde 0,1)).

CESM2(WACCM6) Endüstri Öncesi Kontrol (Zorlamasız), Dünya sisteminin sürekli 1850 sera gazı zorlamasıyla tek bir 500 yıllık entegrasyonunu sağlar.²⁶ Bu simülasyon, dış zorlamalar olmaksızın uzun bir zaman dilimi boyunca iç iklim değişikliğinin aralığını göstermektedir.⁵ Zorlamasız simülasyondaki küçük iklim hızları (Ek Şekil 2), modelin analizimiz için yeterli olduğuna dair güveni artırır: İç iklim değişikliği, bireysel bölgelerde belirgin ekosistem etkileri üretebilirken, yalnızca zorlamasız değişiklik altında ekosistemler için gezegen ölçeğinde risk oluşması mantıksız olurdu.^{1,47} 1850'den önce ve sonrasında arazi kullanımındaki değişiklikler, bunun gerçek denge koşullarını mükemmel bir şekilde temsil etmediğini ima etse de, yalnızca iç değişiklik altında mükemmel bir şekilde zorlanmamış koşullara referans olarak Zorlanmamış'ı kullanırız.⁵⁴

İklim hızı

Bir jeofizik niceliğin iklim hızı, değişen bir iklimde o değişkenin izopletlerinin hareketini tanımlar.¹⁶ Resmen, iklim hızı, bir iklimin zamansal eğiminin oranı olarak tanımlanır. değişkenA (t), birim zaman-1) aynı değişkenin mekansal eğimine ! (∇A, birim uzay-1)¹⁶ Sonuç değişkeni (CA) zaman başına uzay birimleri vardır, yani bir hız (Denklem (1))¹⁶.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla A \cdot \mathbf{v} \quad D15$$

İklim hızı herhangi bir değişken için hesaplanabilir ancak en sık sıcaklık için uygulanır.¹⁵ Sıcaklık hem iklim değişikliğine hem de SAI'ye karşı net bir büyük ölçekli tepki gösterir ve hem gözlemlerde hem de model çıktısında nispeten iyi anlaşılmış mekansal-zamansal davranışa sahiptir.¹⁵ Yazım sırasında ARISE-DelayedStart'taki veri kullanılabilirliği kısıtlamaları nedeniyle okyanus üzerindeki deniz yüzeyi sıcaklığı yerine 2 m sıcaklığını kullanıyoruz. İklimsel uzaysal-zamansal ölçeklerde, 2 m sıcaklığı deniz yüzeyi sıcaklığına benzerdir ve genellikle su ekosistemi analizi için kullanılır.^{77,78}

İklim hızı, hem bir büyüklük hem de bir yöne sahip bir vektör niceliğidir. Sadece skaler büyüklük (iklim hızı), ekosistemlere yönelik yüksek düzeydeki bozulma derecesini ölçmek için vektör niceliğinden ayrı olarak kullanılabilir.^{18,34,79,80} Bu rahatsızlık derecesi araştırma sorularımız için ilgi çekici niceliktir ve analizimizde yalnızca iklim hızını kullanırız. Ek bağlam için iklim hızı vektör haritaları sağlıyoruz (Ek Şekil 11), ancak okuyucuları bu vektörlerin yerel analizinin mekansal verileri daha iyi yakalamak için çok daha iyi çözünürlüklü bir veri kümesi gerektireceği konusunda uyarıyoruz.

Standart yöntemleri izleyerek, doğrusal regresyon kullanarak sıcaklığın zamansal gradyanını ve 3 × 3 mahalle eğimi algoritmasını kullanarak sıcaklığın mekansal gradyanını hesaplıyoruz.^{15,16,18,34} Eşlik eden Python kodunda (eğlenceli_hesaplama_var.py), biz uyguluyoruz

Sobel operatörü (matematiksel olarak 3×3 mahalle eğimi algoritmasına eşdeğerdir) sıcaklığın mekansal eğimini elde etmek için kullanılır. Hem zamansal eğimimizi hem de mekansal eğimimizi doğrudan her veri kümesinden hesaplarız. Her topluluk üyesi için her noktada, yerel 20 yıllık zamansal eğimi (sadece UKESM1 için 10 yıllık, aşağıya bakın) mekansal eğime böleriz ve iklim hızını elde etmek için vektör büyüklüğünü alırız. İklim hızına, ısınma veya soğuma eğilimiyle ilişkili olup olmadığını belirtmek için bir işaret koyarız. Tüm rakamlar için, iklim hızının hesaplanmasından sonra topluluk ortalamasını alırız. Kaba mekansal çözünürlüğe sahip veri kümelerinde, karmaşık topografya etrafında iklim hızları aşırı tahmin edilebilir¹⁵. Sonuçlarımız, bu çalışmada kullanılan tüm veri kümelerinin ölçeğinde mekansal çözünürlük seçimine karşı dayanıklıdır (Ek Şekil 10'da ERA5 için gösterilmiştir).

Anlaşmaya göre, iklim hızları ve iklim süratleri 10 yıllık veya daha uzun zaman dilimleri boyunca değerlendirilir^{15,16,18}. Her senaryo için alakaı olacak şekilde seçilen zaman dilimlerindeki iklim hızını hesaplarız. CESM2'deki SAI'li senaryolar için bu, dağıtımın hemen ardından gelen 20 yıllık dönemdir: ARISE-1.5'te 2035–2054 ve ARISE-DelayedStart'ta 2045–2064. 20 yıllık zaman dilimleri, ARISE-DelayedStart'ta küresel ortalama sıcaklığın azaldığı tüm dönemi kapsar. SAI olmayan SSP2-4.5 için, ARISE-DelayedStart'tan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmak için 2045–2064 dönemini kullanırız. 2035–2054 zaman aralığı (ARISE-1.5'e karşılık gelir) SSP2-4.5'in CESM2 simülasyonlarında oldukça benzerdir, çünkü küresel ortalama sıcaklıktaki değişim oranı 2035 ile 2064 arasında önemli ölçüde değişmez. SAI senaryosunda küresel ortalama sıcaklığın azaldığı aralığı kapsayan zaman aralığı modele bağlıdır ve belirli bir veri setini üreten modele karşılık gelecek şekilde ayarlanması gerekir. UKESM1'de, 10 yıllık bir süre, yüksek aerosol duyarlılığı nedeniyle dağıtımdan sonraki soğumayı tamamen kapsar^{57,81}. Bu nedenle, Şekil 1'deki diğer tüm ürünler için 20 yıllık dönemlerin aksine, UKESM1'den elde edilen çıktı için 10 yıllık dönemler boyunca iklim hızlarını hesaplıyoruz⁴. UKESM1 için 20 yıllık dönemler kullanmak, küresel ortalama sıcaklığın sabitlendiği zaman ufkundan sonra soğumayı yayararak, konuşlandırma şoku sırasında iklim hızlarını yapay olarak azaltacaktır. Buna karşılık, CESM2 için daha kısa 10 yıllık dönemler kullanmak, bu ufkun ötesinde devam eden önemli soğumayı göz ardı edecektir (Şekil.2).

ARISE-1.5, ARISE-DelayedStart ve SSP2-4.5'in 10 üyeli topluluk boyutu, her 20 yıllık dönemde analiz için kullanılabilir yıl sayısını 200 yıllık etkin bir boyuta çıkarır⁵⁰. Son Milenyumun yalnızca bir topluluk üyesi ve 1000 yıllık bir simülasyon dönemi olduğundan, büyük volkanik patlamalardan (10 teragram stratosferik sülfat enjeksiyonu) kaçınmak için on adet 20 yıllık zaman dilimi seçtik³¹: 851–870, 871–890, 891–910, 911–930, 945–964, 971–990, 991–1010, 1011–1030, 1031–1050, 1051–1070 yılları. Bu tür patlamalardan kaçınmak, iklim hızı tanımının altında yatan doğrusal eğilim varsayımlarını ihlal eden küresel iklim üzerindeki büyük ancak kısa etkileri nedeniyle gereklidir¹⁵. Ayrıca, Şekil 1'de kullanılmak üzere Son Milenyum'daki örtüşmeyen 20 yıllık iklim hızlarının tam dağılımını (yine büyük volkanik patlamaları hariç tutarak) hesaplıyoruz⁴. Benzer şekilde, ilgili durumlarda karşılaştırılabilir 200 yıllık bir örneklem büyüklüğü elde etmek için, Zorlanmamış simülasyondan on adet 20 yıllık zaman periyodu (5-24, 43-62, 95-114, 124-143, 164-183, 259-278, 280-299, 336-355, 379-398, 465-484 yılları) seçiyoruz.

Hangi iklim hızı değerlerinin ve zaman periyotlarının kara ve okyanustaki ekosistem etkilerine karşılık sorusuyla ilgili çok sayıda ekolojik literatür bulunmaktadır. Atf sayısı kısıtlamaları içinde kalmak için makalenin ana gövdesinde yalnızca en kritik literatüre atıfta bulunuyoruz ve karasal ekosistemler için bu çalışma gövdesinin daha kapsamlı bir seçimi için burada referanslar sağlıyoruz^{7,16,34,82–85}, deniz ekosistemleri^{3,7,34,82,84} ve yıllık ıla on yıllık aralık değişimleri^{1,47,86–91}.

Ek veriler

Şekil'de geniş bir veri yelpazesi kullanıyoruz⁴. İklim değişikliği ve iklim müdahalesinin çeşitli gelecekteki senaryoları ile tarihi dönemin çeşitli tasvirleri arasındaki göreceli riski tartışmak. Tablo1 kullanılan tüm veri kümelerini her biri için kısa bir açıklamayla birlikte sıralar.

Veri kullanılabilirliği

Bu çalışmada kullanılan Dünya sistem modelleri ve yeniden analizlerden elde edilen 2 metrelik sıcaklık verileri (Tabloya bakınız)¹(derleme için) Açık Bilim Çerçevesi veritabanına 10.17605/OSF.IO/Z37ES erişim kodu altında yüklenmiştir⁹². Bu arşiv, şekillerimizde ve analizimizde kullanılan tüm verileri içerir. Ek olarak, tam ham veri kümeleri aşağıdaki havuzlardan ve atıflardan elde edilebilir. ARISE-1.5, 10.5065/9kcn-9y79 erişim kodu altında Ulusal Atmosfer Araştırmaları Merkezi (NCAR) İklim Veri Geçidinde mevcuttur⁹³. CESM2-SSP2-4.5, NCAR İklim Veri Ağ Geçidinde 10.26024/0cs0-ev98 erişim kodu altında mevcuttur⁹⁴. CESM2 Son Binyıl, NCAR İklim Veri Ağ Geçidinde 10.26024/5dgt-qf16 erişim kodu altında mevcuttur: doi.org/10.26024/5dgt-qf16³⁰. CESM1-GLENS-SAI ve CESM1-RCP8.5, NCAR İklim Verilerinde birlikte mevcuttur

10.5065/D6JH3JXX erişim kodu altındaki ağ geçidi⁹⁵. KALKMAK-DelayedStart ve ARISE-1.0, son işlem yapılrken NCAR Küresel Erişilebilir Veri Ortamı dosya alanında yer alır. Genel kalıcı arşiv, ARISE iletişiminde sağlanacaktır.

nity sayfa: cesm.ucar.edu/topluluk-projeleri/arise-sai. KALKMAK-

Çalışmamızda kullanılan DelayedStart ve ARISE-1.0 verileri Açık Bilim Çerçevesi deposunda yer almaktadır⁹². UKESM1-ARISE-1.5, Çevresel Veri Analizi Merkezi'nde 26b89d8d76bd40bfbaf9fedfa383e9cf erişim kodu altında mevcuttur: catalogue.ceda.ac.uk/uuid/26b89d8d76bd40bfbaf9fedfa383e9cf⁹⁶. UKESM1-SSP2-4.5, Dünya İklim Veri Merkezi'nde 10.26050/WDCC/AR6.C6SPMOU0 erişim kodu altında mevcuttur⁹⁷. CESM2-SSP1-2.6, Dünya İklim Veri Merkezi'nde 10.22033/ESGF/CMIP6.10100 erişim kodu altında mevcuttur⁹⁸. CESM2-Historical, Dünya İklim Veri Merkezi'nde 10.22033/ESGF/CMIP6.10071 erişim kodu altında mevcuttur⁹⁹. CESM2 Zorlamasız (endüstri öncesi kontrol) Dünya Veri Merkezi'nde mevcuttur. İklim Merkezi, 10.22033/ESGF/ erişim kodu altında CMIP6.10094¹⁰⁰ ERA5, Copernicus ClimateData Store'da 10.22033/ESGF/CMIP6.10094 erişim kodu altında mevcuttur¹⁰¹.

Kod kullanılabilirliği

Verilerin işlenmesi ve tüm rakamların oluşturulması için kullanılan kod, erişim kodu altında Açık Bilim Çerçevesine yüklenmiştir⁹². Bu kod Açık Yazılım Lisansı 3.0 kapsamında lisanslanmıştır.

Referanslar

1. Parmesan, C. Son iklim değişikliğine ekolojik ve evrimsel tepkiler. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Sist.* 37,637–669 (2006).
2. Frieler, K. ve ark. Küresel ısınmayı 2 ile sınırlamak-C'nin çoğu mercan resiflerini kurtarması pek mümkün görünmüyor. *Nat. Clim. Chang.* 3,165–170 (2013).
3. Poloczanska, ES ve diğerleri. İklim değişikliğinin deniz yaşamı üzerindeki küresel etkisi. *Nat. Clim. Chang.* 3,919–925 (2013).
4. Burrows, MT ve diğerleri. Türlerin menzil değişimlerine ilişkin coğrafi sınırlar iklim hızıyla öneriliyor. *Doğa* 507,492–495 (2014).
5. Allen, JL ve Lendemer, JC İklim değişikliğinin biyolojik çeşitlilik açısından zengin bir bölgedeki endemik, yüksek rakımlı likenler üzerindeki etkileri. *Biyoçeşitlilikler. Koruma.* 25,555–568 (2016).
6. García Molinos, J. ve diğerleri. İklim hızı ve deniz biyolojik çeşitliliğinin gelecekteki küresel yeniden dağılımı. *Nat. Clim. Chang.* 6,83–88 (2016).
7. Lenoir, J. ve diğerleri. Türler karada olduğundan daha iyi bir şekilde okyanuslarda iklim ısınmasını takip ediyor. *Nat. Ecol. Evol.* 4,1044–1059 (2020).
8. NASEM. Güneş Işığının Yansıtılması: Güneş Jeomühendisliği Araştırmaları ve Araştırma Yönetimi İçin Öneriler. Rapor No. 978-0-309-67608-3). Tech. Rep. (Ulusal Bilim, Mühendislik ve Tıp Akademileri, 2021).
9. BM Çevre Programı. Tek Atmosfer: Güneş Radyasyonu Modifikasyonu Araştırması ve Dağıtımı Üzerine Bağımsız Bir Uzman İncelemesi. (Rapor No. EO/ 2503/ NA). Teknik. Temsilci (UNEP, 2023).
10. Long, JCS & Shepherd, JG Jeomühendislik araştırmalarının stratejik değeri. *Küresel Çevresel Değişim, El Kitabı*

- Küresel Çevre Kirliliği ((ed. Freedman, B.) 757–770 (Springer Hollanda, Dordrecht, 2014).
11. Richter, JH ve diğerleri. Stratosferik aerosol enjeksiyonu ile Güneş iklim müdahalesinin Dünya sistemine verdiği tepkilerin ve etkilerin değerlendirilmesi (ARISE-SAI): protokol ve ilk simülasyonlardan elde edilen ilk sonuçlar. *Geosci. Model Geliştirme* 15, 8221–8243 (2022).
 12. MacMartin, DG ve diğerleri. Güneş radyasyonu modifikasyonunun modellenmesine yönelik senaryolar. *Proc. Natl Acad. Sci. ABD* 119, e2202230119 (2022).
 13. Buck, HJ Negatif emisyon teknolojilerinin hızlı yaygınlaşması: sosyal engeller ve sosyal etkiler. *Tırmanış. Değişim*. 139, 155–167 (2016).
 14. Aitken, SN, Yeaman, S., Holliday, JA, Wang, T. ve Curtis-McLane, S. Uyum, göç veya yok olma: iklim değişikliğinin ağaç popülasyonları üzerindeki sonuçları. *Evrım Uygulaması* 1, 95–111 (2008).
 15. Brito-Morales, I. ve diğerleri. İklim hızı, ısınan bir dünyada korumayı bilgilendirebilir. *Trendler Ekol. Evol.* 33, 441–457 (2018).
 16. Loarie, SR ve diğerleri. İklim değişikliğinin hızı. *Doğa* 462, 1052–1055 (2009).
 17. Pielou, ECBuzul Çağı'ndan Sonra: Buzullarla Kaplı Kuzey Amerika'ya Yaşamın Dönüşü (Üniv. Chicago Yayınları, 2008).
 18. Trisos, CH ve diğerleri. Güneş jeomühendisliğinin uygulanması ve sonlandırılmasının biyolojik çeşitlilik açısından potansiyel olarak tehlikeli sonuçları. *Nat. Ekol. Evol.* 2, 475–482 (2018).
 19. Ettinger, AK ve HilleRisLambers, J. İklim her şey değildir: rekabetçi etkileşimler ve yaşam evrelerine göre çeşitlilik de ısınan bir dünyadaki menzil değişimlerini etkileyecektir. *Am. J. Bot.* 100, 1344–1355 (2013).
 20. Zarnetske, PL, Skelly, DK ve Urban, MC İklim değişikliğinin biyotik çarpanları. *Bilim* 336, 1516–1518 (2012).
 21. Beever, EA ve diğerleri. İklim değişikliğiyle başa çıkma mekanizması olarak davranışsal esneklik. *Ön. Ekol. Çevre*. 15, 299–308 (2017).
 22. Youngsteadt, E., Prado, SG, Keleher, KJ & Kirchner, M. Davranış ve fizyoloji ektotermiler üzerindeki ısınmanın etkilerini azaltabilir mi? Kentsel karıncalarda bir test. *J. Animasyon Ekolü* <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13860> (2023).
 23. Johnstone, JF ve diğerleri. Değişen bozulma rejimleri, ekolojik hafıza ve orman dayanıklılığı. *Ön. Ekol. Çevre*. 14, 369–378 (2016).
 24. McCusker, KE, Armour, KC, Bitz, CM ve Battisti, DS Güneş radyasyonu yönetiminin sona ermesinin ardından hızlı ve kapsamlı ısınma. *Çevre. Res. Lett.* 9, 024005 (2014).
 25. Parker, A. ve Irvine, PJ Güneş jeomühendisliğinden kaynaklanan sonlanma şoku riski. *Dünya'nın Geleceği* 6, 456–467 (2018).
 26. Gettelman, A. ve diğerleri. Tüm Atmosfer Topluluk İklim Modeli Sürüm 6 (WACCM6). *J. Geophys. Res. Atmos.* 124, 12380–12403 (2019).
 27. Danabasoglu, G. ve diğerleri. Topluluk Dünya Sistemi Modeli Sürüm 2 (CESM2). *J. Adv. Model. Dünya Sistemleri*. 12, e2019MS001916 (2020).
 28. Brody, E. ve diğerleri. Sorunu ertelemek: Stratosferik aerosol enjeksiyonunun konuşlandırılmasının geciktirilmesinin etkilerini anlamak. *Ön baskı* <http://arxiv.org/abs/2402.11992> (2024).
 29. Laurens, N. Kurumsal adaptasyonun yavaş çekimi: Çölleşme yönetimine odaklanmak. *Küresel. Çevre. Politika* 23, 31–53 (2023).
 30. Otto-Bliesner, B. ve diğerleri. CESM2-WACCM6ma Son Binyıl [Veri Seti] <https://doi.org/10.26024/5dgt-qf16> (2023).
 31. Jungclaus, JH ve diğerleri. PMIP4'ün CMIP6'ya katkısı - bölüm 3: PMIP4 geçmiş 1000 simülasyonları için son bin yıl, bilimsel amaç ve deneysel tasarım. *Geosci. Model Geliştirme* 10, 4005–4033 (2017).
 32. Riahi, K. ve diğerleri. Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar ve bunların enerji, arazi kullanımı ve sera gazı emisyonları üzerindeki etkileri: genel bir bakış. *Küresel. Çevre. Değişim*. 42, 153–168 (2017).
 33. Matthews, HD ve Wynes, S. Mevcut küresel çabalar ısınmayı 1,5 ile sınırlamak için yetersizdir. *C. Bilim* 376, 1404–1409 (2022).
 34. Burrows, MT ve diğerleri. Deniz ve karasal ekosistemlerde iklimin değişme hızı. *Bilim* 334, 652–655 (2011).
 35. van Oldenborgh, GJ ve diğerleri. Ek I: Küresel ve Bölgesel İklim Projeksiyonları Atlası 1311–1393 (Cambridge Univ. Press, Cambridge, İngiltere, 2013).
 36. Thomas, AM, Johns, ME ve Jetton, RM Kuzey Carolina Piedmont'ta 65 yıllık orman değişiminden sonra Doğu Hemlock (*Tsuga canadensis*) ve çevresindeki bitki topluluklarının ayrı bir popülasyonunun karakterizasyonu. *Güneydoğu. Nat.* 20, 377–398 (2021).
 37. Reyes-Chávez, J., Quail, M., Tarvin, S., Kessler, M. ve Batke, SP Kaçacak yer yok - Honduras'ın en yüksek dağında eğrelti otları ve licophyte'lerin çeşitliliği ve topluluk kompozisyonu. *J. Trop. Ekol.* 37, 72–81 (2021).
 38. McGuire, JL, Lawler, JJ, McRae, BH, Nuñez, TA & Theobald, DM Parçalanmış bir manzarada iklim bağlantısını sağlamak. *Proc. Natl Acad. Sci. ABD* 113, 7195–7200 (2016).
 39. Ward, M. ve diğerleri. Küresel karasal korunan alan ağının yalnızca yüzde onu, bozulmamış topraklar aracılığıyla yapısal olarak birbirine bağlıdır. *Ulusal Topluluk*. 11, 4563 (2020).
 40. Arafteh-Dalmau, N. ve diğerleri. Deniz koruma alanlarının iklim açısından akıllı ağlarının tasarımına iklim hızının dahil edilmesi. *Yöntemler Ekol. Evol.* 12, 1969–1983 (2021).
 41. Bertrand, R. ve diğerleri. Ekolojik kısıtlamalar ormanlardaki iklim borcunu artırıyor. *Ulusal Topluluk*. 7, 12643 (2016).
 42. Jorda, G. ve diğerleri. Okyanus ısınması deniz yaşamının üç boyutlu yaşam alanını sıkıştırıyor. *Nat. Ekol. Evol.* 4, 109–114 (2020).
 43. Serreze, MC & Barry, RG Arktik amplifikasyonunun süreçleri ve etkileri: bir araştırma sentezi. *Küre. Gezegen. Değişim*. 77, 85–96 (2011).
 44. Fossheim, M. ve diğerleri. Son zamanlardaki ısınma, Arktika'daki balık topluluklarının hızla borealizasyonuna yol açıyor. *Nat. Clim. Chang.* 5, 673–677 (2015).
 45. Fasullo, JT ve Richter, JH Stratejik güneş iklimi müdahalesinin arka plan senaryosuna ve model fizikine bağımlılığı. *Atmosfer. Kimya. Fiz.* 23, 163–182 (2023).
 46. Li, H., Richter, JH, Hu, A., Meehl, GA ve MacMartin, D. Artan stratosferik aerosollerle iki iklim modeli duyarlılığı deneyinde subpolar Kuzey Atlantik'teki tepkiler. *J. Tırmanış*. 1, 1–31 (2023).
 47. Stenseth, NC ve diğerleri. İklim dalgalanmalarının ekolojik etkileri. *Bilim* 297, 1292–1296 (2002).
 48. Soden, BJ, Wetherald, RT, Stenchikov, GL ve Robock, A. Pinatubo Dağı'nın patlamasından sonra küresel soğuma: Su buharı ile iklim geri bildiriminin testi. *Bilim* 296, 727–730 (2002).
 49. Black, BA, Lamarque, J.-F., Marsh, DR, Schmidt, A. ve Bardeen, C. G. Toba süper patlamasından sonra küresel iklim bozulması ve bölgesel iklim sığınakları. *Proc. Natl Acad. Sci. ABD* 118, e2013046118 (2021).
 50. Deser, C., Phillips, A., Bourdette, V. ve Teng, H. İklim değişikliği projeksiyonlarındaki belirsizlik: İçsel değişkenliğin rolü. *İklim. Dinamiği*. 38, 527–546 (2012).
 51. Eyring, V. ve diğerleri. Eşleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi Aşama 6 (CMIP6) deneysel tasarımı ve organizasyonuna genel bakış. *Geosci. Model Geliştirme* 9, 1937–1958 (2016).
 52. Gray, LJ ve diğerleri. Güneşin iklim üzerindeki etkileri. *Sayın Geofiz.* <https://doi.org/10.1029/2009RG000282> (2010).
 53. Solomon, S. ve diğerleri. Sürekli değişen “arka plan” stratosferik aerosol tabakası ve küresel iklim değişikliği. *Bilim* 333, 866–870 (2011).
 54. Pongratz, J. ve Caldeira, K. Atmosferik CO2 ve sıcaklık artışlarının bölgelere atfedilmesi: Sanayi öncesi arazi kullanımındaki değişimin önemi. *Çevre. Res. Lett.* 7, 034001 (2012).
 55. Anahtarlar, PW, Barnes, EA, Diffenbaugh, NS, Hurrell, JW ve Bell, C. M. Stratosferik aerosol enjeksiyonu uygulamasının algılanan başarısızlık potansiyeli. *Proc. Natl Acad. Sci. ABD* 119, e2210036119 (2022).
 56. Hueholt, DM, Barnes, EA, Hurrell, JW, Richter, JH ve Sun, L. Dağıtımdan kısa bir süre sonra stratosferik aerosol enjeksiyon senaryolarında sonuçların değerlendirilmesi. *Dünya'nın Geleceği* 11, e2023EF003488 (2023).

57. Henry, M. ve diğerleri. Aynı çoklu hedefli stratosferik aerosol enjeksiyon stratejisini kullanarak UKESM1 ve CESM2 simülasyonlarının karşılaştırılması. *Atmosfer. Kimya. Fiz.*, 23, 13369–13385, 2023.
58. Lyons, DA ve Scheibling, RE İstilaç deniz yosunlarının neden olduğu menzil genişlemesi: Bölgesel ölçekte yayılma oranları ve kalıpları. *Çeşitliler. Dağıt.* 15, 762–775 (2009).
59. Barnes, EA, Hurrell, JW ve Sun, L. GLENS-SAI iklim müdahale stratejisi kapsamında küresel aşırı sıcaklıklardaki değişikliklerin tespiti. *Jeofizik. Res. Lett.* 49, e2022GL100198 (2022).
60. Hersbach, H. ve diğerleri. ERA5 küresel yeniden analizi. *QJR Meteoroloji Sos.* 146, 1999–2049 (2020).
61. Parker, WS Yeniden analizler ve gözlemler: fark nedir? *Boğa. Am. Meteorol. Soc.* 97, 1565–1572 (2016).
62. Fasullo, JT ve diğerleri. CESM2'de reçeteli büyük ölçekli yakma emisyonlarının neden olduğu sahte geç tarihsel dönem ısınması. *Jeofizik. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1029/2021GL097420> (2022).
63. Jain, S. ve diğerleri. İklim modeli değerlendirmesi için iç değişkenliğin önemi. *npj İklim. Atmosfer. Bilim.* 6, 1–7 (2023).
64. Dong, Y. ve diğerleri. Desen etkisindeki model içi yayılma ve CMIP5 ve CMIP6 modellerinde iklim duyarlılığına katkısı. *J. Tırmanış.* 33, 7755–7775 (2020).
65. Song, H. ve diğerleri. Küresel yok oluşlar için sıcaklık değişiminin eşikleri. *Ulusal Topluluk.* 12, 4694 (2021).
66. Visioni, D., Bednarz, EM, MacMartin, DG, Kravitz, B. & Goddard, PB Başlangıç döneminin seçimi stratosferik aerosol enjeksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesini etkiler. *Dünya'nın Geleceği* 11, e2023EF003851 (2023).
67. Buck, HJ ve diğerleri. Çevresel geçici önlemlerin etkinliğinin ve eşitliğinin değerlendirilmesi. *Nat. Sürdür.* 3, 499–504 (2020).
68. Morrison, AL, Barnes, EA ve Hurrell, JW ARISE-SAI-1.5 Senaryosu Altında Kuzey Yarımküre Karasal Permafrostunu Sabitlemek İçin Stratosferik Aerosol Enjeksiyonu. *Dünya'nın Geleceği* 12, e2023EF004151 (2024).
69. Tinner, W. & Lotter, AF Orta Avrupa bitki örtüsünün 8,2 bin yıl önce ani iklim değişikliğine verdiği tepki. *Jeoloji* 29, 551–554 (2001).
70. Williams, JW, Blois, JL ve Shuman, BN Ani ekolojik değişimin içsel ve dışsal zorlamaları: Geç Kuaterner'den vaka çalışmaları. *J. Ekol.* 99, 664–677 (2011).
71. Fasullo, JT İklim Modeli Değerlendirme Aracı'nı (CMATv1) kullanarak uydu ve yeniden analiz veri kümelerini kullanarak CMIP arşivlerinden simüle edilmiş iklim modellerinin değerlendirilmesi. *Geosci. Model Geliştirme* 13, 3627–3642 (2020).
72. Davis, NA ve diğerleri. Topluluk Dünya Sistemi Modeli Sürüm 2, Tüm Atmosfer Topluluk İklim Modeli Sürüm 6'nın (CESM2(WACCM6)) "orta atmosfer" kimya yapılandırılmalarının iklimi, değişkenliği ve iklim duyarlılığı. *J. Adv. Model. Dünya Sistemleri.* 15, e2022MS003579 (2023).
73. Diffenbaugh, NS ve Barnes, EA Kritik küresel ısınma eşiklerine ulaşılan kadar kalan süreye ilişkin veri odaklı tahminler. *Proc. Natl Acad. Sci. ABD* 120, e2207183120 (2023).
74. IPCC. İklim değişikliği 2021: fiziksel bilim temeli. *Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli Altıncı Değerlendirme Raporuna Çalışma Grubu I'nin Katkısı; Teknik Özet. Tech. Rep. (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli, 2021).*
75. MacMartin, DG, Kravitz, B., Keith, DW ve Jarvis, A. Güneş jeomühendisliğinin kapalı devre kontrolünden kaynaklanan bağlı insan-iklim sisteminin dinamikleri. *İklim. Dinamiği.* 43, 243–258 (2014).
76. Kravitz, B. ve diğerleri. Birden fazla eş zamanlı iklim hedefini karşılamak için stratosferik sülfat aerosol jeomühendisliğinin tasarlanmasının ilk simülasyonları. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, 12616–12634 (2017).
77. Cayan, DR Deniz yüzey sıcaklığı ile yüzey hava sıcaklığı arasındaki büyük ölçekli ilişkiler. *Pzt. Hava Durumu Rev.* 108, 1293–1301 (1980).
78. Alò, D., Lacy, SN, Castillo, A., Samaniego, HA ve Marquet, PA Balık göçünün makroekolojisi. *Küresel. Ekol. Biyocoğrafya.* 30, 99–116 (2021).
79. Sunday, JM ve diğerleri. Tür özellikleri ve iklim hızı, okyanus ısınmasının yoğun olduğu bir bölgedeki coğrafi aralık değişimlerini açıklıyor. *Ecol. Lett.* 18, 944–953 (2015).
80. Sachan, D., Kumar, P. ve Saharwardi, MS Hindistan'ın yüzeye yakın sıcaklıklarındaki güncel iklim değişikliği hızı. *Tırmanış. Değişim.* 173, 24 (2022).
81. Pauling, AG, Bitz, CM ve Armour, KC Pinatubo Dağı'nın patlamasına verilen iklim tepkisi iklim duyarlılığını sınırlamıyor. *Jeofizik. Res. Lett.* 50, e2023GL102946 (2023).
82. Parmesan, C. ve Yohe, G. Doğal sistemler genelinde iklim değişikliğinin etkilerinin küresel olarak tutarlı bir parmak izi. *Doğa* 421, 37–42 (2003).
83. Moritz, C. ve diğerleri. ABD'deki Yosemite Milli Parkı'ndaki küçük memeli toplulukları üzerinde bir asırlık iklim değişikliğinin etkisi. *Bilim* 322, 261–264 (2008).
84. Chen, I.-C., Hill, JK, Ohlemüller, R., Roy, DB ve Thomas, CD Türlerin hızlı menzil değişimleri yüksek düzeydeki iklim ısınmasıyla ilişkilidir. *Bilim* 333, 1024–1026 (2011).
85. Nomoto, HA ve Alexander, JM. Yetersiz ısınma ikliminde alpin bitkilerde yerel yok olma riskinin etkenleri. *Ecol. Lett.* 24, 1157–1166 (2021).
86. Tegner, M., Dayton, P., Edwards, P. ve Riser, K. Yosun ormanı ardıllığı üzerinde büyük ölçekli, düşük frekanslı oşinografik etkiler: iki kohortun hikayesi. *Mart Ecol. Prog. Ser.* 146, 117–134 (1997).
87. Ottersen, G. ve diğerleri. Kuzey Atlantik Salınımının Ekolojik Etkileri. *Ekoloji* 128, 1–14 (2001).
88. Southward, AJ ve diğerleri. Batı İngiliz Kanalı'nda uzun vadeli oşinografik ve ekolojik araştırma. *Adv. Mar. Biol.* 47, 1–105 (2005).
89. Anders, AD ve Post, E. Azalan göçmen kara kuşlarının popülasyon yoğunlukları üzerinde iklimin dağılımındaki etkileri. *J. Animasyon Ekol.* 75, 221–227 (2006).
90. Loeb, VJ, Hofmann, EE, Klinck, JM, Holm-Hansen, O. & White, WB ENSO ve Antarktika Yarımadası pelajik deniz ekosisteminin değişkenliği. *Antarktika. Bilim.* 21, 135–148 (2009).
91. Gonzalez, P., Tucker, CJ & Sy, H. İklimle bağlı olarak Afrika Sahel'i'nde ağaç yoğunluğu ve tür azalması. *J. Kurak Çevre.* 78, 55–64 (2012).
92. Hueholt, D. "Çevresel değişimin hızı iklim değişikliği ve iklim müdahale senaryolarında göreceli ekolojik riski çerçevesinde" başlıklı arşiv <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/Z37ES> (2024).
93. Richter, JH Stratosferik aerosol enjeksiyon simülasyonları ile Güneş iklim müdahalesinin Dünya sistemine olan etkilerini ve etkilerini değerlendirme (ARISE-SAI-1.5) [Veri seti] <https://doi.org/10.5065/9KCN-9Y79> (2022).
94. Mills, M., Visioni, D. ve Richter, J. CESM2-WACCM-SSP245 simülasyonları [Veri Seti] <https://doi.org/10.26024/0CS0-EV98> (2022).
95. Tilmes, S. ve diğerleri. CESM1(WACCM) Stratosferik Aerosol Jeomühendisliği Büyük Topluluk Projesi. *Boğa. Am. Meteorol. Soc.* 99, 2361–2371 (2018).
96. Haywood, J., Jones, A. ve Dalvi, M. Veri Seti Kaydı: UKESM1 ARISE-SAI iklim simülasyonları <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/26b89d8d76bd40bfbaf9fedfa383e9cf> (2022).
97. Good, P. ve diğerleri. IPCC DDC: MOHC UKESM1.0-LL model çıktısı CMIP6 SenaryosuMIP için hazırlandı *Türkçe: https://doi.org/10.26050/WDCC/AR6.C6SPMOU0* (2019).
98. Danabasoglu, G. NCAR CESM2-WACCM model çıktısı CMIP6 Senaryosu için hazırlandı MIP ssp126 <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10100> (2019).
99. Danabasoglu, G. NCAR CESM2-WACCM model çıktısı CMIP6 CMIP tarihsel için hazırlanmıştır <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10071> (2019).

100. Danabasoglu, G. NCAR CMIP6 CMIP piControl için hazırlanan CESM2-WACCM model çıktısı <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10094> (2019).
101. Hersbach, H. ve diğerleri. ERA5 1979'dan günümüze tek düzeylerde aylık ortalama verileri <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7> (2023).
102. Riahi, K. ve diğerleri. RCP 8.5-Karşılaştırmalı olarak yüksek sera gazı emisyonları senaryosu. *Tırmanış. Değişim*. 109,33 (2011).

Teşekkürler

Yazarlar, verilere erken erişimin kolaylaştırılmasında yardımcı olan Brian Dobbins, Alicia Karspeck, Jim Haywood, Matthew Henry ve Bette Otto-Bliesner'a teşekkürlerini sunarlar. Charlotte Connolly, Emily Gordon ve Alice Wells, bu çalışma geliştirilirken değerli yorumlarda bulundular; Ezra Brody, Douglas MacMartin ve Daniele Visioni, ARISE-DelayedStart'ın kullanımı konusunda fikir verdi. Bu çalışma, Ulusal Bilim Vakfı (NSF) Lisansüstü Araştırma Bursu (Hibe 006784) (DMH) ve Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA, Hibe HR00112290071) (JWH, EAB, ALM) tarafından desteklenmiştir. İfade edilen görüşler, fikirler ve/veya bulgular yazarlara aittir ve Savunma Bakanlığı'nın veya ABD hükümetinin resmi görüşlerini veya politikalarını temsil ettiği şeklinde yorumlanmamalıdır. DMH, JWH ve ALM ayrıca LAD iklim grubu tarafından da desteklenmiştir. ARISE-1.5, ARISE-DelayedStart ve ARISE-1.0, NCAR tarafından üretildi ve bakımı yapıldı ve UKESM1-ARISE-1.5 ve UKESM1-SSP2-4.5, Birleşik Krallık Meteoroloji Ofisi ve Exeter Üniversitesi tarafından yapıldı. ARISE projesi, Güvenli İklim Araştırma Girişimi aracılığıyla SilverLining tarafından desteklendi. CESM2(WACCM6) Tarihsel, Son Binyıl, Zorlanmamış ve SSP1-2.6, NCAR tarafından üretildi. GLENS ve RCP8.5, DARPA fonuyla desteklendi. CESM projesi öncelikli olarak NSF tarafından destekleniyor.

Yazar katkıları

Çalışma, DMH tarafından, ALM, EAB ve JWH'den gelen girdilerle tasarlandı. Tüm veri işleme ve kodlar DMH tarafından geliştirildi. Bilimsel analiz, EAB, JWH ve ALM'den gelen içgörü ve kavramsal geri bildirimlerle DMH tarafından gerçekleştirildi. El yazması, şekiller ve tamamlayıcı bilgiler, EAB, JWH ve A.LMDMH tarafından yazıldı ve düzenlendi. EAB, JWH ve ALM'den gelen girdilerle, hakem geri bildirimlerine yanıt olarak el yazması gözden geçirildi.

Çıkar çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Ek Bilgiler

Ek bilgiÇevrimiçi versiyon, şu adreste bulunan ek materyalleri içerir: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47656-z>.

Yazışmalarve materyal talepleri Daniel M. Hueholt'a yapılmalıdır.

Akran değerlendirme bilgileriDoğa İletişimleriBu çalışmanın akran değerlendirmesine katkılarından dolayı Jessica Gurevitch ve Daniele Visioni'ye teşekkürler. Bir akran değerlendirmesi dosyası mevcuttur

Yeniden basım ve izin bilgilerişu adreste mevcuttur: <http://www.nature.com/reprints>

Yayıncının notuSpringer Nature, yayınlanan haritalardaki yargı yetkisi iddiaları ve kurumsal bağlantılar konusunda tarafsızlığını korumaktadır.

Açık ErişimBu makale, uygun şekilde orijinal yazar(lar)a ve kaynağa atıfta bulunduğunuz, Creative Commons lisansına bir bağlantı sağladığınız ve değişiklik yapıp yapılmadığını belirttiğiniz sürece herhangi bir ortamda veya biçimde kullanım, paylaşım, uyarlama, dağıtım ve çoğaltmaya izin veren Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası Lisansı kapsamında lisanslanmıştır. Bu makaledeki görseller veya diğer üçüncü taraf materyalleri, materyale ait bir kredi satırında aksi belirtilmediği sürece makalenin Creative Commons lisansına dahildir. Materyal makalenin Creative Commons lisansına dahil değilse ve amaçladığınız kullanım yasal düzenleme tarafından izin verilmiyorsa veya izin verilen kullanımı aşıyorsa, doğrudan telif hakkı sahibinden izin almanız gerekecektir. Bu lisansın bir kopyasını görüntülemek için şu adresi ziyaret edin:<http://creativecommons.org/lisanslar/tafindan/4.0/>.

© Yazar(lar) 2024