

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

Zusammenfassung des Herausgebers

Um die klimabestimmenden Prozesse in diesem Zeitraum zu verstehen, muss man wissen, wie sich die globale mittlere Oberflächentemperatur (GMST) in den letzten 500 Millionen Jahren verändert hat – einer Zeit, in der die Evolutionsmuster von Flora und Fauna einen so großen Einfluss auf die Entwicklung des Klimas hatten. Judd *et al.* präsentieren eine Aufzeichnung der GMST der letzten 485 Millionen Jahre, die sie durch die Kombination von Proxy-Daten mit Klimamodellen erstellt haben (siehe die Perspektive von Mills). Sie fanden heraus, dass die GMST in einem Bereich von 11° bis 36°C schwankte, mit einer „scheinbaren“ Klimasensitivität von ~8°C, also etwa dem Zwei- bis Dreifachen des heutigen Wertes. – Jesse Smith

Strukturierte Zusammenfassung

EINFÜHRUNG

Eine langfristige geologische Aufzeichnung der globalen mittleren Oberflächentemperatur (GMST) ist wichtig, um die Geschichte unseres Planeten zu verstehen und den gegenwärtigen Klimawandel in einen Kontext zu setzen. Eine solche Aufzeichnung ist notwendig, um die Beziehung zwischen Klima und anderen Aspekten des Erdsystems, einschließlich der Entwicklung und des Aussterbens des Lebens sowie der Chemie der Atmosphäre und der Ozeane, einzuschränken. Darüber hinaus kann die Quantifizierung der Beziehung zwischen GMST und atmosphärischen Kohlendioxidkonzentrationen (CO₂) unser Verständnis der Klimasensitivität der Erde verfeinern und zukünftige Vorhersagen unter anthropogener Erwärmung verbessern.

GRUNDLAGE

Obwohl es mehrere Temperaturrekonstruktionen aus dem Phanerozoikum (letzte 539 Millionen Jahre) gibt, sind diese während des intensiv untersuchten Känozoikums (letzte 66 Millionen Jahre) kälter und weniger variabel als einzelne Schätzungen aus wichtigen Zeiträumen, insbesondere während eisfreier (Treibhaus-)Zeiträume. Diese Diskrepanz deutet darauf hin, dass vorhandene Temperatúraufzeichnungen aus dem Phanerozoikum vergangene Temperaturänderungen unterschätzen könnten, und bedarf einer weiteren Untersuchung mit einem neuen Ansatz.

ERGEBNISSE

Hier präsentieren wir PhanDA, eine Rekonstruktion der GMST, die den größten Teil des Phanerozoikums abdeckt. PhanDA wurde mithilfe der Datenassimilation erstellt, einer Methode, die geologische Daten statistisch mit Klimamodellsimulationen integriert. PhanDA zeigt, dass die Temperatur der Erde in den letzten 485 Millionen Jahren zwischen 11° und 36°C geschwankt hat. Dieser Bereich ist größer als bei früheren Rekonstruktionen; PhanDA stimmt jedoch gut mit unabhängigen GMST-Schätzungen aus dem Känozoikum überein, was Vertrauen in seinen größeren dynamischen Bereich schafft.

PhanDA enthüllt wichtige Merkmale in der Beziehung zwischen GMST und dem Temperaturgradienten zwischen Pol und Äquator, darunter eine polare Verstärkung (d. h. größere Temperaturschwankungen in hohen Breiten) und eine Abflachung des Gradienten mit zunehmender GMST. Die tropischen Temperaturen liegen zwischen 22 °C und 42 °C, was die Vorstellung einer festen Obergrenze für tropische Wärme widerlegt und darauf hindeutet, dass sich das Leben in der Antike entwickelt haben muss, um extreme

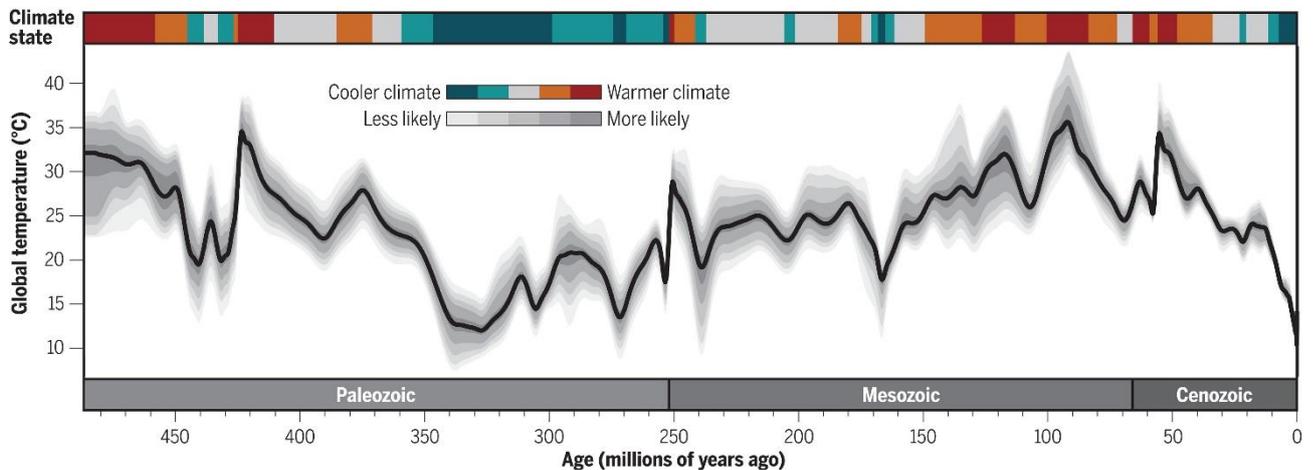
Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

Hitze zu ertragen. Wir zerlegen PhanDA in fünf Klimazustände und stellen fest, dass die Erde im Phanerozoikum insgesamt mehr Zeit in wärmeren als in kalten Klimazuständen verbracht hat.

Es besteht eine starke Beziehung zwischen PhanDA GMST und CO₂, was darauf hindeutet, dass CO₂ der dominierende Faktor für das phanerozoische Klima ist. Die Beständigkeit dieser Beziehung ist überraschend, da wir in diesem Zeitrahmen erwarten, dass die Sonnenleuchtkraft das Klima beeinflusst. Wir vermuten, dass Veränderungen des planetaren Albedos und anderer Treibhausgase (z. B. Methan) dabei geholfen haben, die zunehmende Sonnenleuchtkraft im Laufe der Zeit auszugleichen. Die GMST-CO₂-Beziehung weist auf eine bemerkenswert konstante „scheinbare“ Erdsystemempfindlichkeit (d. h. die Temperaturreaktion auf eine Verdoppelung von CO₂, einschließlich schneller und langsamer Rückkopplungen) von ~8°C hin, ohne erkennbare Abhängigkeit davon, ob das Klima warm oder kalt ist.

ABSCHLUSS

PhanDA liefert eine statistisch belastbare Schätzung der GMST während des gesamten Phanerozoikums. Wir stellen fest, dass die Temperatur der Erde dynamischer schwankte als bisher angenommen und dass das Treibhausklima sehr warm war. CO₂ ist der dominierende Treiber des Phanerozoikum-Klimas, was die Bedeutung dieses Treibhausgases für die Gestaltung der Erdgeschichte unterstreicht. Die Konsistenz der scheinbaren Erdsystemempfindlichkeit (~8°C) ist überraschend und bedarf weiterer Untersuchung. Allgemeiner gesagt liefert PhanDA einen kritischen Kontext für die Evolution des Lebens auf der Erde sowie für gegenwärtige und zukünftige Klimaveränderungen.



PhanDA: Globale mittlere Oberflächentemperatur der letzten 485 Millionen Jahre.

Die graue Schattierung entspricht verschiedenen Vertrauensniveaus, und die schwarze Linie zeigt die durchschnittliche Lösung. Die farbigen Bänder oben spiegeln den Klimazustand wider, wobei kühlere Farben Eishausklima (Kühlhaus und Kalthaus) anzeigen, wärmere Farben Treibhausklima (Warmhaus und Treibhaus) anzeigen und Grau einen Übergangszustand darstellt.

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

Abstrakt

Eine Langzeitaufzeichnung der globalen mittleren Oberflächentemperatur (GMST) liefert wichtige Erkenntnisse über die dynamischen Grenzen des Erdklimas und die komplexen Rückkopplungen zwischen Temperatur und dem weiteren Erdsystem. Hier präsentieren wir PhanDA, eine Rekonstruktion der GMST der letzten 485 Millionen Jahre, die durch statistische Integration von Proxydaten mit Klimamodellsimulationen erstellt wurde. PhanDA weist eine große Bandbreite der GMST auf, die von 11° bis 36°C reicht. Die Aufteilung der Rekonstruktion in Klimazustände zeigt, dass mehr Zeit in wärmeren als in kälteren Klimazonen verbracht wurde, und offenbart innerhalb jedes Zustands konsistente Breitengradienten der Temperatur. Es besteht eine starke Korrelation zwischen atmosphärischen Kohlendioxidkonzentrationen (CO₂) und GMST, was CO₂ als den dominierenden Faktor für die Schwankungen des phanerozoischen globalen Klimas identifiziert und auf eine scheinbare Erdsystemempfindlichkeit von ~8°C hindeutet.

Aufzeichnungen der globalen mittleren Oberflächentemperatur (GMST) während des gesamten Phanerozoikums sind unabdingbar, um eine ganzheitliche Geschichte unseres Planeten aufzubauen und genauere Vorhersagen künftiger Klimaänderungen zu treffen. Die Änderungen des globalen Klimas der letzten halben Milliarde Jahre sind eng mit den Evolutionsmustern von Flora und Fauna (1), der Tektonik (2 , 3) sowie der Chemie der Atmosphäre und der Ozeane (4 , 5) verknüpft. Das Verständnis der Entwicklung der Oberflächentemperatur der Erde in diesem Zeitraum ist daher von entscheidender Bedeutung, um die Mechanismen und Rückkopplungen einzuschränken, die den langfristigen globalen Wandel bewirken. Bereich und Verteilung der GMST im Phanerozoikum liefern auch einen Kontext für die anhaltende, vom Menschen verursachte Erwärmung. In ähnlicher Weise sind Schätzungen der Paläo-GMST erforderlich für die Berechnung der Gleichgewichtsklimasensitivität (ECS) (6 – 9) und der Erdsystemsensitivität (ESS) (10 – 13) - Messgrößen, die für die Vorhersage der klimatischen Folgen anthropogener Kohlendioxid- Emissionen (CO₂) wichtig sind (6 , 7).

Traditionell stützen sich Rekonstruktionen der Temperatur im Phanerozoikum entweder auf Proxydaten (14 , 15) oder Erdsystemmodelle (ESMs) (4 , 16 , 17). Vorhandene Rekonstruktionen auf Proxybasis beschränken sich entweder auf Daten zur Meeresoberflächentemperatur (SST) (18 , 19) oder extrapolieren die GMST, indem sie die tropischen SST-Aufzeichnungen mit Paläo-Köppen-Klimagürteln kombinieren (14 , 15). Die heterogene räumlich-zeitliche Abdeckung der Proxydaten kann jedoch die GMST-Schätzungen verzerren (8 , 20 , 21) und die Genauigkeit sowohl der Daten als auch der Annahmen zum Proxysystem wird mit zunehmendem geologischen Alter zunehmend unsicherer. Umgekehrt ist die Berechnung der GMST aus den von ESMs bereitgestellten Ausgaben der flächendeckenden Lufttemperatur (SAT) unkompliziert (4 , 16 , 17), erfordert aber Annahmen über Randbedingungen (z. B. Treibhausgaskonzentrationen, Eisvolumen), die in tiefen Zeiträumen nur schwer einzuschränken sind. Direkte, modellbasierte Schätzungen der GMST hängen auch von der Klimasensitivität der ESM (16 , 17) ab und weichen manchmal von geologischen Belegen ab (4 , 16 , 17). Bemerkenswerterweise zeigen vorhandene Langzeitaufzeichnungen der phanerozoischen GMST sowohl von Proxys (14 , 15) als auch von Modellen (4 , 16 , 17) tendenziell eine geringere Temperaturvariabilität und insgesamt kältere Temperaturen als unabhängige Zeitscheibenschätzungen aus dem gut untersuchten Känozoikum (8 , 9 , 22–26), was nahelegt, dass der dynamische Bereich der phanerozoischen Temperatur unterschätzt werden könnte. Diese Diskrepanzen wecken Zweifel an unserem Verständnis der langfristigen Klimageschichte der Erde und unterstreichen die Notwendigkeit einer Neubewertung mithilfe eines neuen Ansatzes.

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

Hier präsentieren wir PhanDA, eine hochmoderne Rekonstruktion der GMST, die die letzten 485 Millionen Jahre der Erdgeschichte umfasst. PhanDA basiert auf der Assimilation von Paläoklimadaten (DA), die Proxydaten statistisch mit ESM-Simulationen kombiniert, um eine räumlich vollständige Rekonstruktion der SAT zu erstellen (27). Dieser Ansatz nutzt die Stärken sowohl von Proxydaten als auch von Modellen als Informationsquellen und bietet eine innovative Möglichkeit, die zeitlichen und räumlichen Muster des Erdklimas im gesamten Phanerozoikum zu untersuchen.

Die PhanDA-Rekonstruktion

Wir rekonstruieren die phanerozoische GMST mithilfe einer Offline-Ensemble-Kalman-Filtermethode, um Proxy- und Modellinformationen zu assimilieren (27 – 29). Die Methode wurde in jüngerer Zeit angewendet, um Zeitreihen des globalen Wandels zu erstellen (28 , 30) und um die Bedingungen während wichtiger Zeitabschnitte zu rekonstruieren, darunter das Letzte Glaziale Maximum (31) und das Paläozän-Eozäne Temperaturmaximum (PETM) (24). Das DA-Framework bietet mehrere Vorteile gegenüber herkömmlichen Rekonstruktionen, die nur auf Modellen oder Proxys basieren. Erstens aktualisiert der Ansatz gleichzeitig mehrere Klimafelder, unabhängig von der Art der verwendeten Proxydaten. Dadurch ist die Rekonstruktion der SAT unter Verwendung von SST-Proxydaten möglich und somit die Berechnung der GMST vereinfacht. Zweitens hängen die Ergebnisse weniger stark davon ab, dass das Modell mit genauen CO₂-Werten ausgeführt wird oder dass das ESM eine genaue Klimasensitivität aufweist, da DA ein Ensemble von ESM-Simulationen statt eines einzelnen Experiments verwendet. Drittens kann das posteriore Ensemble verwendet werden, um Unsicherheiten einzuschränken. Und schließlich ist die PhanDA-Rekonstruktion durch die Dokumentation aller Entscheidungsprozesse und die Bereitstellung der Skripte zur Ausführung der DA vollständig reproduzierbar und kann problemlos aktualisiert und verfeinert werden, wenn neue Proxydaten, ESMs und Vorwärtsproxysystemmodelle verfügbar werden.

In Anlehnung an die Vorgehensweise jüngster DA-Rekonstruktionen (30 , 31) haben wir geochemische Proxy-Werte für die SST assimiliert, die der PhanSST-Datenbank (21 , 29) entnommen wurden. Aus mehreren Gründen assimilieren wir keine Proxy-Informationen zur terrestrischen Temperatur. Erstens ist derzeit keine umfassende Zusammenstellung terrestrischer SAT-Daten aus dem gesamten Phanerozoikum verfügbar. Zweitens fehlen uns formale Proxy-Systemmodelle für viele der terrestrischen Proxy-Werte (z. B. Blattrandanalyse, palynoflorale Zusammensetzung), die wir im Paläo-DA-Rahmen verwenden können. Schließlich erfordern viele terrestrische Datensätze genaue Schätzungen der Paläo-Höhenlage, die - insbesondere für Gebirgsregionen - in langen Zeiträumen sehr unsicher sind und durch das grobe Raster vieler Modellsimulationen wahrscheinlich nicht korrekt dargestellt werden können. Obwohl die Einbeziehung terrestrischer Daten die DA-Schätzungen über Land verbessern würde, sollten SST-Daten angesichts der Tatsache, dass die Ozeane etwa 70 % der Erdoberfläche ausmachen, eine ausreichende Vorhersagekraft für die Schätzung der GMST haben.

Wir haben insgesamt 85 Zeitabschnitte von der Basis des Ordoviziums bis zum Holozän assimiliert. Jeder Zeitabschnitt stellt im Allgemeinen ein einzelnes geochronologisches Alter dar (d. h. ein chronostratigraphisches Stadium), obwohl wir Daten aus benachbarten Stadien während sechs datenarmen Intervallen kombinierten (29) und die PETM-Daten [vor 56 Millionen Jahren (Ma)] vom Rest des Ypernumms (56 bis 48,07 Ma) trennten, da während dieser gut untersuchten Hyperthermalphase große Datenmengen verfügbar waren. Proxydaten desselben Typs und vom selben Ort wurden innerhalb jedes Zielstadiums gemittelt, was zu einer relativ konsistenten Verteilung der assimilierten Datenpunkte über die Zeit bis zum Neogen führte, als die Datenmenge erheblich zunahm (Abb. 1A). Wir verwendeten für jede Phase ein 80-

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

köpfiges Modellensemble, das aus einer Sammlung von mehr als 850 Simulationen über mehr als 100 Zeitscheiben (29 , 32) generiert wurde, die mit dem vollständig gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Vegetation-Modell HadCM3L (33 , 34) des Hadley Centre durchgeführt wurden. Diese Simulationen erfassen eine Vielzahl von CO₂ - Konzentrationen, Paläogeografien und Modellstrukturunsicherheiten und decken ein breites Spektrum an klimatischen Bedingungen und GMST ab (Abb. 1B). Unsere Modellvorhersage ist auf die HadCM3L-Ausgabe beschränkt, da dies unseres Wissens der einzige Satz von Simulationen ist, der mehrere mögliche Klimalösungen für das Phanerozoikum bietet [z. B. verwenden die CESM-Modellsimulationen von (35) eine einzige CO₂ - Trajektorie]. Wir verwendeten etablierte Vorwärtsmodelle, um die Proxy-Werte mit Klimavariablen in Beziehung zu setzen (Tabelle S1), wobei wir die räumliche und zeitliche Variabilität der Meerwasser- $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$), pH- und Mg/Ca-Werte berücksichtigten (29).

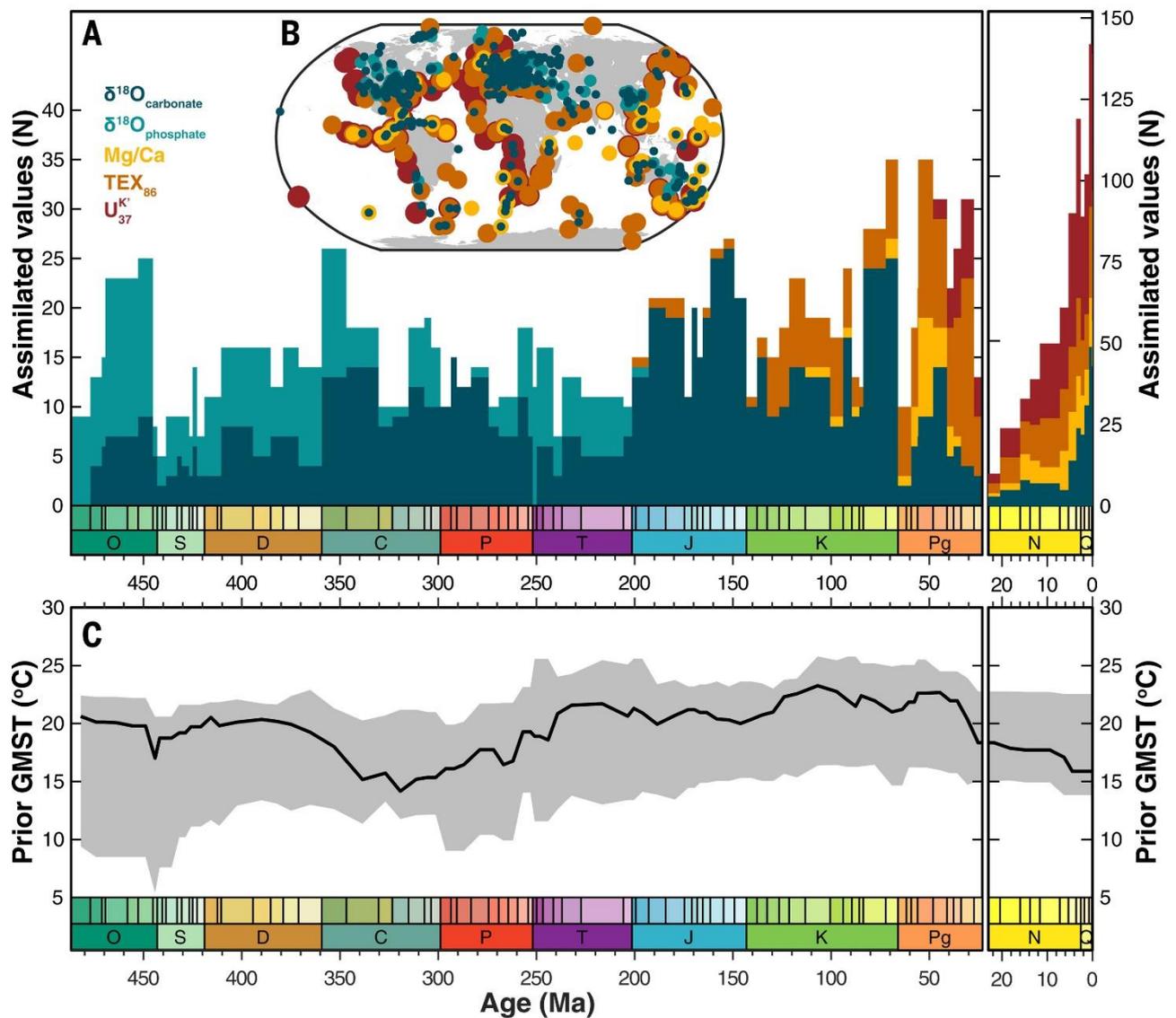


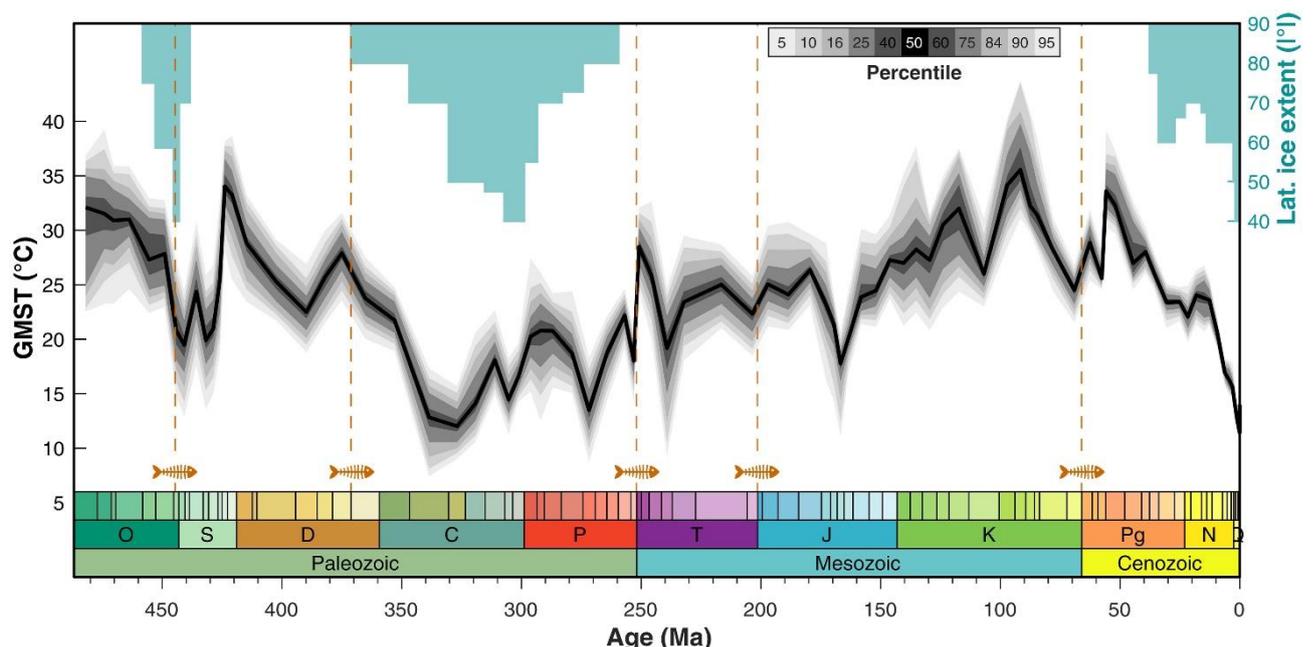
Abb. 1. Proxy- und Modelldaten, die für die PhanDA-Rekonstruktion verwendet wurden.

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

Zeitliche (A) und räumliche (B) Verteilung der bei der Assimilation verwendeten stufengemittelten Proxydaten. (C) Bereich (graues Band) und Median (schwarze Linie) der GMSTs innerhalb des vorherigen Modellensembles für jede assimilierte Stufe.

Fast alle Proxydaten aus der Kreidezeit stammen aus Sauerstoffisotopenanalysen von Fossilien (sowohl Karbonat- als auch Phosphat-), und $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ ist eine zentrale Annahme dieser Proxysysteme. Es ist unklar, ob es im gesamten Phanerozoikum eine langfristige säkulare Veränderung des globalen Durchschnittswerts $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ gegeben hat (19 , 36 , 37). Die hier gezeigten Endergebnisse basieren auf zwei Lösungen: (i) keine säkulare Veränderung und (ii) eine kleine nichtlineare Veränderung (d. h. ein Anstieg des „eisfreien“ Basiswerts von ~ 1 Promille (‰) seit dem Ordovizium), verursacht durch die „Schneeball-Erde“ (37). Wir haben auch die größere Änderung von $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ in Betracht gezogen, die in (36) vorgeschlagen wurde (d. h. eine Zunahme von ~ 5 ‰ seit dem Ordovizium), haben aber festgestellt, dass die Anwendung dieser Annahme zu GMST-Werten führte, die im Vergleich zu geologischen Belegen für den Großteil des Paläozoikums unangemessen kalt waren. Außerdem zeigten sie eine schlechte Korrelation mit unabhängigen Schätzungen der Temperatur gebündelter Isotope (29) (Abb. S1).

Die PhanDA-Rekonstruktion unterscheidet sich deutlich vom vorherigen Modell (vgl. Abb. 1C und 2), was die wichtigen Erkenntnisse verdeutlicht, die aus der Assimilation der Proxydaten gewonnen wurden. Die zeitgewichtete mittlere GMST über alle assimilierten Stadien ($24^\circ \pm 5^\circ\text{C}$, 1σ) ist sowohl wärmer als auch variabler als die des vorherigen Ensembles ($20^\circ \pm 2^\circ\text{C}$) sowie als vorherige Temperaturrekonstruktionen des Phanerozoikums (4 , 14–17) (Abb. S2). Im relativ datenreichen Känozoikum weist die PhanDA-GMST jedoch eine starke, nahezu 1:1-Korrelation mit unabhängigen GMST-Zeitscheibenschätzungen auf, die mit einer Vielzahl von Methoden abgeleitet wurden (8 , 22–26 , 30) (Abb. S3; Korrelationskoeffizient $r = 0,90$). Die Übereinstimmung zwischen PhanDA und früheren Untersuchungen im Känozoikum verleiht unserer rekonstruierten GMST während dieser datenreichen Zeiträume mehr Vertrauen, ebenso wie der größere dynamische Bereich von PhanDA im Vergleich zu früheren Temperaturrekonstruktionen im Phanerozoikum (4 , 14 – 17).



Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

Abb. 2. Temperaturverlauf im Phanerozoikum.

PhanDA rekonstruierte die GMST für die letzten 485 Millionen Jahre. Die schwarze Linie zeigt den Median, die Schattierung entspricht dem Ensemble-Perzentil. Blaue Rechtecke zeigen die maximale Eisausdehnung in Breitengraden (2), und orange gestrichelte Linien zeigen den Zeitpunkt der fünf großen Massenaussterben des Phanerozoikums (36).

Phanerozoische Temperaturen

PhanDA zeigt, dass die Temperatur der Erde in den letzten 485 Millionen Jahren zwischen Minimalwerten von 11°C [Spätpleistozän; vor 129 bis 11,7 Tausend Jahren (ka)] und Maximalwerten von 36°C (Turon; 93,9 bis 89,39 Ma) geschwankt hat und wichtige Merkmale aufweist, die mit unserem heutigen Verständnis des phanerozoischen Klimas übereinstimmen (Abb. 2). Die Rekonstruktion beginnt mit heißen Bedingungen im frühen Ordovizium, die sich im Hirnantium (445,21 bis 443,07 Ma) allmählich abkühlten, was mit lithologischen Hinweisen auf Vereisung (2) übereinstimmt und mit dem Massenaussterben im späten Ordovizium (38) zusammenfällt. Obwohl die mittlere GMST des Hirnantiums (21 °C) wärmer ist als andere Intervalle mit bekannter Vereisung, verstärkte der ausgedehnte Superkontinent Gondwana die Kontinentalität, was zu Temperaturen unter dem Gefrierpunkt in den mittleren bis hohen Breiten führte und ausgedehnte Eisdecken ermöglichte (ergänzender Text und Abb. S4). Die warmen Bedingungen im späten Devon, die im Frasnium (378,9 bis 371,1 Ma) ihren Höhepunkt erreichen, fallen mit einer Periode erhöhten Vulkanismus zusammen, die mit der Entstehung der großen magmatischen Provinzen Jakutsk-Wiljui (39 , 40) und Kola-Dnjepr (39) sowie der biotischen Krise des Frasniums-Famenniums (38) zusammenhängt. Auf die Wärme des Frasniums folgt eine gleichbleibende, langfristige Abkühlung bis ins Karbon, wobei die Temperaturen im Perm kühl, aber variabel bleiben. Ein Erwärmungsimpuls während des Induums (251,9 bis 249,88 Ma), der ersten Phase der Trias, folgt unmittelbar auf den Vulkanismus des Sibirischen Trapps (40) und das Massenaussterben am Ende des Perms (38). Über die Trias, den Jura und den größten Teil der Kreidezeit hinweg zeigt unsere Rekonstruktion einen langfristigen Erwärmungstrend, der in Treibhausbedingungen während des Turoniums kulminiert, gefolgt von einer allmählichen Abkühlung am Ende des Mesozoikums. Über das gesamte Känozoikum hinweg folgt die GMST eng der Trajektorie des benthischen Foraminiferen- δ 18 O-Stapels (41) [Abb. S5; $r = -0,96$, $P < 0,01$ (42)]. Die Höchsttemperaturen werden während des PETM erreicht, einer kurzzeitigen Hyperthermie, die mit einer negativen Kohlenstoffisotopenexkursion (43) und der Entstehung der nordatlantischen magmatischen Provinz (40) einhergeht. Die Wärme hielt bis ins frühe Eozän (Ypern) an. Die GMST-Zeiten vom späten Paläogen bis zum Holozän stimmen gut mit den Schätzungen der Gletscherausdehnung überein (2), die auf einen kurzzeitigen Rückzug der Eisschilde während des frühen Neogens und eine schnelle Ausdehnung während des Quartärs schließen lassen.

Trotz der allgemeinen Übereinstimmung zwischen PhanDA und anderen Aufzeichnungen globaler Veränderungen gibt es bestimmte Zeiten, in denen PhanDA von etablierten Mustern abweicht. Obwohl beispielsweise die insgesamt kälteren Bedingungen während des Karbon und Perm im Großen und Ganzen mit dem Zeitpunkt der spätpaläozoischen Eiszeit (LPIA) übereinstimmen, liegt das GMST-Minimum früher (Serpuchowium; 330,34 bis 323,4 Mio. Jahre) als die Maxima in den Daten über das Vorkommen von Gletschern (44) und die Eisausdehnung in Breitengraden (2) (Kasimovium-Gzhelium; 307,02 bis 298,89

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

Mio. Jahre). Aufzeichnungen über das Vorkommen von Gletschern und die Eisausdehnung geben jedoch letztlich wenig Aufschluss über das Eisvolumen. Viele der traditionellen Gletscherindikatoren (z. B. Diamiktite) können nicht-glazialen Ursprungs sein (45), was die Interpretation des Gesteinsarchivs erschwert; das begrenzte Zutagetreten älteren Gesteins sowie eine mangelhafte Datierung können es erschweren, zwischen isolierten Alpengletschern und weit verbreiteten Eisdecken zu unterscheiden (45 , 46). Neuere Arbeiten legen beispielsweise nahe, dass Gondwanas räumlich diachrones Gletscherarchiv der LPIA die sich verändernden Standorte der Depozentren widerspiegelt, als der Kontinent ostwärts über den Südpol driftete (45 , 46). Außerdem ist ein Teil der wahrgenommenen zeitlichen Fehlansicht wahrscheinlich auf die zeitliche Mittelung von Temperatur- und Gletscherdaten über Phasen zurückzuführen, in denen es sowohl zu Eisausdehnung als auch -rückgang kam (46). Es ist auch möglich, dass die Gletscherindikatoren der LPIA aufgrund von Ablagerungs- und Erhaltungsfehlern zu jüngeren Stadien der Eiszeit verzerrt sind (47). Tatsächlich deuten mehrere Beweislinien auf einen früheren Höhepunkt der Vereisung hin. Am Ende des Serpuchow-Zeitalters kam es zu einer globalen Diskordanz, die mehrere Millionen Jahre dauerte und mit einer Zunahme der geschätzten Ausmaße der Gletscherschmelze (46 , 48) und einer schweren Biodiversitätskrise (49) einherging. Darüber hinaus findet eine aktuelle Studie Hinweise auf eine anhaltende Entgletscherung in einem breiten Streifen des südlichen Gondwana während des jüngsten Karbon (50), was darauf schließen lässt, dass der Höhepunkt der LPIA früher aufgetreten sein muss. Die hier vorgestellte GMST-Kurve stimmt gut mit diesen überarbeiteten Interpretationen der Entwicklung der LPIA überein.

Obwohl PhanDA eine gute Übereinstimmung mit den Zeitscheibenschätzungen aus dem Känozoikum (Abb. S3) zeigt, gibt es eine bemerkenswerte Abweichung von den Aufzeichnungen der Sauerstoffisotope benthischer Foraminiferen (41) während des mittleren Miozäns (Abb. S5C). Während des Serravalliums (13,82 bis 11,63 Ma) und Tortoniums (11,63 bis 7,25 Ma) zeigt PhanDA relativ hohe Temperaturen an, aber die benthischen Werte sind vergleichsweise mit $\delta^{18}\text{O}$ angereichert. Dies könnte darauf hindeuten, dass der Anstieg des benthischen $\delta^{18}\text{O}$ nach dem mittelmiozänen Klimaoptimum eher ein Wachstum der Eisdecke als eine globale Abkühlung darstellt. Obwohl die durch Skalierung der benthischen Daten (51) geschätzten GMSTs im späten Neogen und Quartär kaum von PhanDA zu unterscheiden sind, sind sie über den Rest des Känozoikums hinweg systematisch versetzt (Abb. S5C), was darauf schließen lässt, dass die von (51) verwendeten Skalierungsannahmen die Treibhaustemperaturen nicht vollständig erfassen. Ein großer Teil dieser Nichtübereinstimmung ist wahrscheinlich auf den „pH-Effekt“ auf das Foraminiferen- $\delta^{18}\text{O}$ zurückzuführen. Anwenden der theoretischen pH-Korrektur (52 , 53) auf das benthische $\delta^{18}\text{O}$ vor der Skalierung führt zu GMST-Schätzungen, die einem 1:1-Verhältnis zu PhanDA sehr nahe kommen (Abb. S5D).

Phanerozoische Klimazustände und Breitengradienten

Das Klima der Erde schwankt im Allgemeinen zwischen zwei vorherrschenden Regimen: Eishausintervalle mit unipolaren oder bipolaren kontinentalen Eisdecken und steilen Temperaturgradienten vom Pol zum Äquator sowie Treibhausintervalle, in denen es keine großflächigen kontinentalen Eisdecken gibt und die flache Temperaturgradienten in Breitengradienten aufweisen (54). PhanDA bietet eine in sich konsistente Rekonstruktion des gesamten Feldes und eröffnet damit eine wertvolle Gelegenheit, die zeitliche Variabilität von Klimazuständen (Abb. 3A) und die räumlichen Muster, die sie definieren (Abb. 3D), zu untersuchen. Wir ordnen die mittleren GMST jedes Stadiums so, dass sie fünf Quantile bilden, von denen jedes einen anderen Klimazustand darstellt (Abb. 3B ; „Kalthaus“, „Kühlhaus“, „Übergangszustand“, „Warmhaus“ und „Treibhaus“). Die Quantile werden allein auf Grundlage der GMST zugewiesen, was sie unabhängig von a priori Kenntnissen oder Annahmen über das Klimasystem macht (z. B. Eisvolumen und

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

atmosphärische CO₂-Konzentrationen). Darüber hinaus werden die Quantile nicht in Form eines festen Zeitschritts, sondern auf der Ebene der Phasen (mit variabler Dauer) zugewiesen. So kann mit ihrer Hilfe quantifiziert werden, wie viel Zeit in den einzelnen Zuständen verbracht wurde (Abb. 3C).

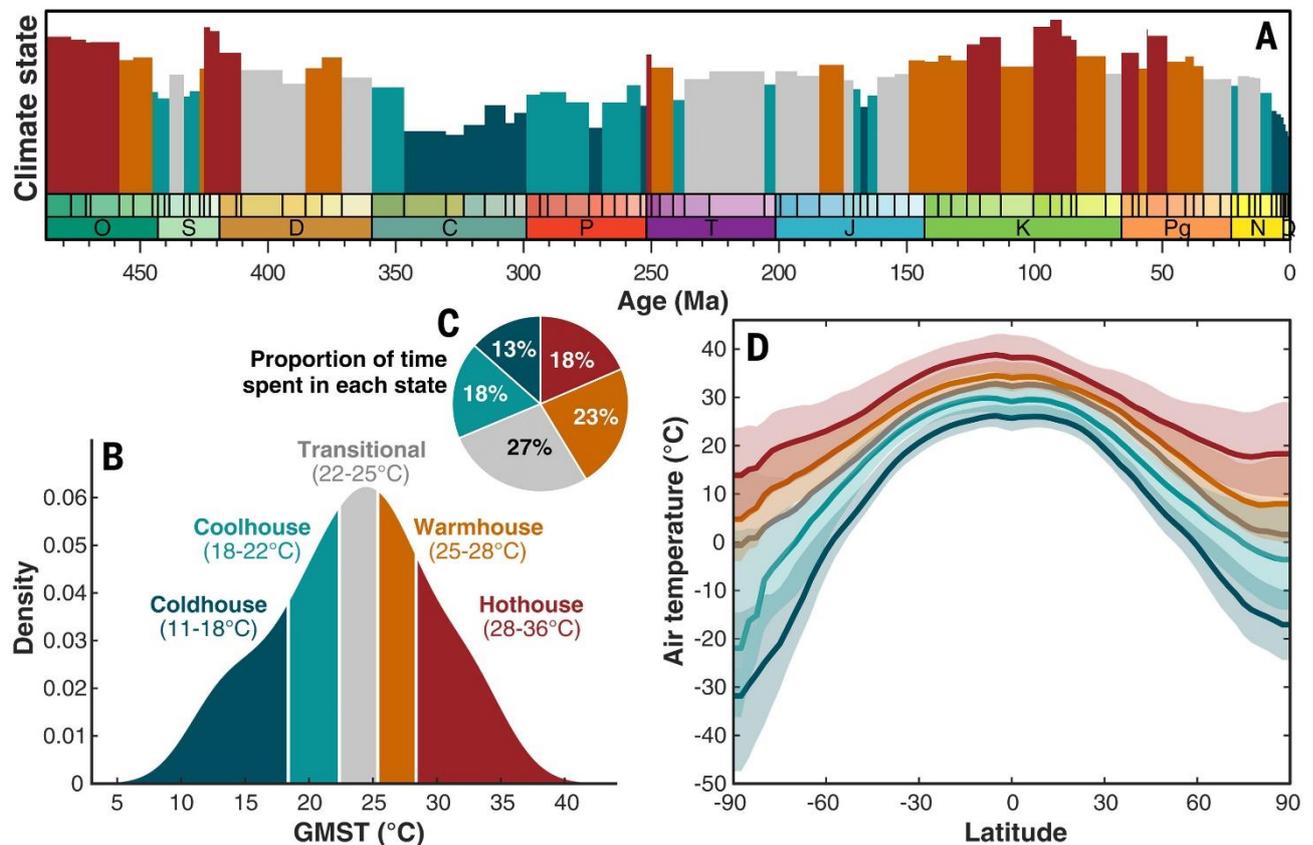


Abb. 3. Klimazustände im Phanerozoikum.

(A) Zeitreihe des Klimazustands der Erde, wobei jedem Stadium ein Zustand entsprechend der in Feld (B) definierten Quantile zugewiesen wird und die Höhe jedes Rechtecks mit der mittleren GMST dieses Stadiums skaliert wird. (B) Kerneldichtediagramm der Verteilung der mittleren GMST-Werte, wobei jeweils die fünf Quantile definiert sind (deren Bereich in den Klammern unter der Bezeichnung jedes Zustands angegeben ist). (C) Kreisdiagramm, das den Anteil der Zeit zeigt, die im gesamten Phanerozoikum in jedem Klimazustand verbracht wurde. (D) Der mit jedem der Klimazustände verbundene Breitengradient der Oberflächenlufttemperatur (farbige Bänder zeigen das 16. bis 84. Perzentil, farbige Linien zeigen den Medianwert).

Die Zeitreihe der Klimazustände als Ganzes zeigt zwei deutliche Schwankungen erster Ordnung zwischen Wärmeperioden (im frühen Paläozoikum und späten Mesozoikum bis zum frühen Känozoikum) und Kälteperioden (im späten Paläozoikum und späten Känozoikum), die durch Übergangsintervalle getrennt

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

sind (Abb. 3A). Diese Schwankungen spiegeln die langfristige Zyklizität in anderen Aufzeichnungen globaler Veränderungen wider, wie etwa dem eustatischen Meeresspiegel, und werden höchstwahrscheinlich durch den Superkontinentzyklus verursacht (3 , 15 , 55). Die zeitlichen Trends folgen im Allgemeinen lithologischen Belegen für Vereisungen (2 , 44 , 46). Sowohl während der LPIA- als auch der spätkänozoischen Vereisung fallen die Übergänge von Warmhaus- zu Übergangszuständen mit dem frühen Vorkommen von Gletscherablagerungen zusammen (Famennium, 371,1 bis 359,3 Ma, und Rupelium, 33,9 bis 27,29 Ma) (2). Ebenso ereignet sich der Übergang zu anhaltenden Kalthausbedingungen im späten Känozoikum während der letzten Phase des Miozäns (Messinium; 7,25 bis 5,33 Ma), zeitgleich mit frühen Belegen für von Eisschollen der nördlichen Hemisphäre mitgerissene Trümmer (56) und Belegen für einen Rückgang des CO₂ - Gehalts, der sich dem vorgeschlagenen Schwellenwert für bipolare Vereisung nähert (57 , 58). Nimmt man an, dass die Zustände Kühlhaus und Kalthaus zusammengenommen Eishausregime darstellen, während die Zustände Warmhaus und Treibhaus Treibhausregime darstellen, dann war Treibhausklima in den letzten 485 Millionen Jahren das vorherrschende Klima und machte 41 % der Zeit des Phanerozoikums aus, während Eishausbedingungen 31 % der Zeit vorherrschten (Abb. 3C). Kalthauszustände, wie unser heutiges Klima, sind im Phanerozoikum relativ selten (13 %).

Wir erkennen ein zeitunabhängiges Muster in den zonal gemittelten Lufttemperaturen unter verschiedenen Klimazuständen (Abb. 3D), was bedeutet, dass die GMST innerhalb jedes der fünf Klimazustände durch unterschiedliche meridionale Verteilungen von SAT erreicht wird. In Übereinstimmung mit der polaren Verstärkung ist die Temperaturänderung zwischen den Zuständen in den hohen Breiten am größten, begleitet von nicht zu vernachlässigenden Unterschieden bei der tropischen Temperatur (Abb. 3D). Dieses Muster führt zu einer starken negativen Korrelation zwischen GMST und dem tropisch-polaren Breitengradienten [LTG; $r = -0,90$, $P < 0,01$ (42); Abb. S6A] (29). Obwohl diese Korrelation auch in den Modellpriors besteht, ist die Spanne des LTG in PhanDA viel größer, was den Einfluss der Proxydaten widerspiegelt (Abb. S6, B und C). Über das gesamte Phanerozoikum hinweg reicht der Temperaturunterschied zwischen den Tropen und den Polen (ΔT_{lat}) von Werten von $\Delta T_{lat} = 30^\circ$ bis 48°C in Kalthausklimaten bis zu $\Delta T_{lat} = 14^\circ$ bis 25°C in Treibhausklimaten (Abb. S6A und S7 sowie Tabelle S2). Dieser Treibhaus- ΔT_{lat} -Wert stimmt gut mit dem Bereich der SST-Gradientenwerte überein, die aus dem untereozyänen Klimaoptimum (59–61) gemeldet wurden. Außerdem stellen wir fest, dass die LTGs in Eishäusern (Kalthaus und Kühlhaus; $\Delta T_{lat} = 23^\circ$ bis 48°C) sowohl größer als auch variabler sind als die LTGs in Treibhäusern (Warmhaus und Treibhaus; $\Delta T_{lat} = 14^\circ$ bis 27°C), wie es aufgrund der dynamisch variierenden Mengen an polarem Land- und Meereis zu erwarten ist. Kleine Unterschiede in der LTG von Stadien mit ähnlicher GMST während Eishausintervallen können auf Unterschiede in ihrer kontinentalen Konfiguration zurückgeführt werden, was die Rolle unterstreicht, die die Paläogeographie (und Kontinentalität) bei der Bestimmung der Breitenausdehnung von Eisdecken spielt (ergänzender Text und Abb. S4). Für die letzten 90 Ma zeigt PhanDA einen Bereich von $\Delta T_{lat} = 17^\circ$ bis 48°C an. Dieser Bereich ist viel größer als die aktuelle Rekonstruktion von Gaskell et al. (62) ($\Delta T_{lat} = 15^\circ$ bis 28°C). Diese Studie berichtet jedoch von Breitengradienten in SST, nicht in SAT, und so ist der reduzierte Bereich zu erwarten, weil die SST LTG während Eishausklimas unterdrückt wird, wenn die Meerestemperaturen sich dem Gefrierpunkt von Meerwasser nähern. Wenn wir die SST LTG aus PhanDA berechnen, stellen wir gute Übereinstimmung mit Gaskell et al. fest. Studie ($\Delta T_{lat} = 18^\circ$ bis 27°C für die letzten 90 Ma; $\Delta T_{lat} = 16^\circ$ bis 30°C für das Phanerozoikum; Tabelle S2).

Die Möglichkeit einer Obergrenze der tropischen Wärme während Treibhausintervallen (d. h. eines tropischen Thermostats) ist schon lange Gegenstand einer Diskussion (63–65). Die durchschnittlichen tropischen SAT aus der PhanDA-Rekonstruktion sind sehr variabel (Abb. S7) und reichen von 22 bis 31°C (Median = 27°C) während Eishausintervallen bis zu 32 bis 42°C (Median = 36°C) während

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

Treibhausintervallen. Die durchschnittlichen tropischen SSTs während der maximalen Wärme im Mesozoikum (Turon; 40 °C) und Känozoikum (PETM; 38 °C) stehen in guter Übereinstimmung mit früheren Studien, die extrem hohe tropische SSTs während dieser Zeitintervalle dokumentierten (63 , 66 , 67). Zusammengefasst widerlegen diese Erkenntnisse die Vorstellung, dass es einen festen tropischen Thermostat gibt, was mit im letzten Jahrzehnt generierten Proxy-Beweisen (59 , 65) sowie Beobachtungen und Modellstudien (64 , 68) übereinstimmt.

Da die GMST ein flächengewichteter Mittelwert ist und sich etwa 40 % der Erdoberfläche in den Tropen befinden, üben Temperaturen in niedrigen Breiten einen starken Einfluss auf die GMST aus. Daher sind die wärmsten tropischen Temperaturen (~ 40 °C) mit hohen GMSTs (> 30 °C) verbunden. Obwohl die Möglichkeit, dass die Diagenese die Proxy-Aufzeichnungen in Richtung höherer Temperaturen verzerrt hat, nicht ignoriert werden kann, liefert die Konsistenz zwischen den maximalen GMST-Werten während des Paläozoikums, Mesozoikums und Känozoikums (34 °C, 36 °C bzw. 34 °C) – Epochen, die durch unterschiedliche dominante Proxy-Systeme, Ablagerungsumgebungen und Taxa gekennzeichnet sind – Unterstützung dafür, dass die hohen GMSTs ein echtes und beständiges Merkmal des Phanerozoikums sind. Darüber hinaus stimmen unsere GMSTs aus dem Känozoikum (während des Eozäns und PETM) gut mit früheren Arbeiten überein (8 , 24) (Abb. S3).

Die während der Treibhausperioden gemeldeten GMST-Werte werfen jedoch die Frage auf, ob einige regionale Temperaturen an Land möglicherweise die thermische Grenze für mehrzelliges Leben überschritten haben. Experimente legen nahe, dass die meisten modernen Organismen eine obere Temperaturtoleranz von etwa 35 bis 40 °C haben (69). An heiße Wüsten angepasste Pflanzen können bei oder leicht über 40 °C aktiv wachsen, zeigen jedoch über 45 °C einen steilen Abfall der Photosyntheserate (70), und Blätter erleiden über etwa 50 °C irreversible Schäden (71). Diese Grenzwerte basieren auf modernen Organismen, die seit Millionen von Jahren keine Selektion auf Überleben bei höheren als den heutigen Temperaturen erfahren haben. Es ist also möglich, dass Organismen während längerer Wärmeperioden Anpassungen entwickelten, um extremen Hitzestress zu überleben. Obwohl es derzeit keine phylogenetischen oder fossilen Beweise gibt, die diese Hypothese stützen (71), wären physiologische und biochemische Anpassungen an hohe Temperaturen in Fossilienfunden nur schwer zu erkennen. Geht man jedoch davon aus, dass diese Grenzen im Laufe der Zeit unverändert bleiben, wären kontinentale Temperaturen von 45 bis 50 °C während der höchsten Treibhausklimas eine Herausforderung für terrestrische Ökosysteme gewesen.

Letztlich hängt die Fähigkeit terrestrischer Organismen, extremer Hitze standzuhalten, nicht nur von der GMST oder der durchschnittlichen Jahrestemperatur ab, sondern auch von den saisonalen (und täglichen) Temperaturen sowie der Luftfeuchtigkeit, die bei Hitzestress eine Rolle spielt (72 , 73). PhanDA rekonstruiert diese Werte nicht, weil dies zu zuverlässigen Ergebnissen hochpräzise terrestrische Proxydaten aus dem gesamten Phanerozoikum erfordern würde, und PhanDA assimiliert nur SST-Proxydaten. Eine gründliche Untersuchung der Bewohnbarkeit während des alten Treibhausklimas geht daher über den Rahmen dieser Studie hinaus. Um jedoch ein allgemeines Gefühl für das Ausmaß der Regionen mit extremen Temperaturen während des Treibhausklimas zu bekommen, können wir auf das PETM-DA-Produkt zurückgreifen (24). PETM-DA erzeugt eine GMST ähnlich wie PhanDA (Abb. S3; 34°C), verwendet aber ein anderes Modell (Simulationen durchgeführt mit iCESM1.2), assimiliert einige terrestrische Temperatur-Proxy-Beweise und wird auch anhand unabhängiger terrestrischer Temperaturdaten validiert (24). PETM-DA stellt große kontinentale Regionen dar, in denen die warme Monatsdurchschnittstemperatur (WMMTs) 45°C überstieg (Abb. S8A). Viele heute noch lebende Pflanzen

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

und Tiere können extreme Hitze allerdings vorübergehend vertragen (70 , 74), deshalb ist es auch wichtig, die Temperaturen während der kälteren Jahreszeiten zu berücksichtigen. Die PETM-DA-Durchschnittstemperaturen für kalte Monate (CMMT) identifizieren nur wenige isolierte Gebiete, in denen das ganze Jahr über extreme Hitze herrscht und die daher wahrscheinlich nicht bewohnbar waren (Abb. S8B). Darüber hinaus führt die fragmentierte Paläogeographie des PETM zu zahlreichen regionalen Refugien in höheren Breiten und Höhenlagen sowie in Küstengebieten, sogar in den Tropen (ergänzender Text und Abb. S8 und S9). Markante Beispiele für Refugien sind der Nordwesten Südamerikas und Indiens, wo PETM-DA gemäßigte Temperaturen ergibt (weil die rekonstruierten Niederschlagsraten hoch sind) (24) und wo eine große Vielfalt an Flora und Fauna auftrat (75 , 76). Daher ist es wahrscheinlich, dass selbst bei GMST-Werten von $\sim 35^{\circ}\text{C}$ große Gebiete übrig blieben, in denen Ökosysteme gedeihen konnten.

Phanerozoische GMST und atmosphärisches CO_2

Atmosphärisches CO_2 übt sowohl heute als auch in der geologischen Vergangenheit einen dominierenden Einfluss auf die GMST aus (5 , 77 , 78). Im Einklang mit dieser Erwartung folgt PhanDA GMST eng dem rekonstruierten CO_2 (29) über das gesamte Phanerozoikum (Abb. 4A), und es gibt eine signifikante positive Korrelation zwischen (logarithmisch transformiertem) CO_2 und GMST (Abb. 4B ; $r = 0,72$, $P < 0,01$ (42)). Diese Korrelation ist besonders stark im Känozoikum ($r = 0,97$, $P < 0,01$), wo sowohl die GMST- als auch die Paläo- CO_2 - Datendichte am höchsten sind, sie ist aber auch während des vergleichsweise datenarmen Paläozoikums hoch ($r = 0,73$, $P < 0,01$). Im Gegensatz dazu gibt es während des Mesozoikums keine erkennbare Beziehung zwischen CO_2 und GMST ($r = -0,37$, $P = 0,18$). Die mesozoische CO_2 - Rekonstruktion verwendet Daten von vier Arten von CO_2 - Proxys, und es gibt keine klare Dominanz eines bestimmten Proxy-Systems (Abb. S10A). Allerdings unterscheidet sich das Mesozoikum vom Paläozoikum und Känozoikum, da es (keine wesentlichen) Kühlhaus- oder Kalthauszustände enthält und die Bandbreite der in dieser Ära dargestellten Klimazustände daher kleiner ist als in den anderen beiden. Obwohl sich die Streuung der Daten größtenteils mit dem Gesamttrend überschneidet, erschwert die komprimierte CO_2 -Bandbreite (und die großen Unsicherheiten) die Erkennung einer CO_2 - GMST - Beziehung (Abb. 4, A und B). Die schlechte Beziehung rührt auch daher, dass der rekonstruierte CO_2 - Gehalt im gesamten Treibhaus der Mittelkreide nicht zunimmt, eine Diskrepanz, die in früheren Arbeiten festgestellt wurde (79). Obwohl dies eine echte Entkopplung von CO_2 und GMST darstellen könnte , könnte es auch auf unvollständige Kenntnisse darüber zurückzuführen sein, wie verschiedene Proxys vergangene CO_2 -Informationen kodieren (11). Um dieses „Mesozoikum-Rätsel“ zu lösen, sind weitere Arbeiten zur Erforschung sowohl der CO_2 - als auch der Temperatur-Proxys erforderlich.

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

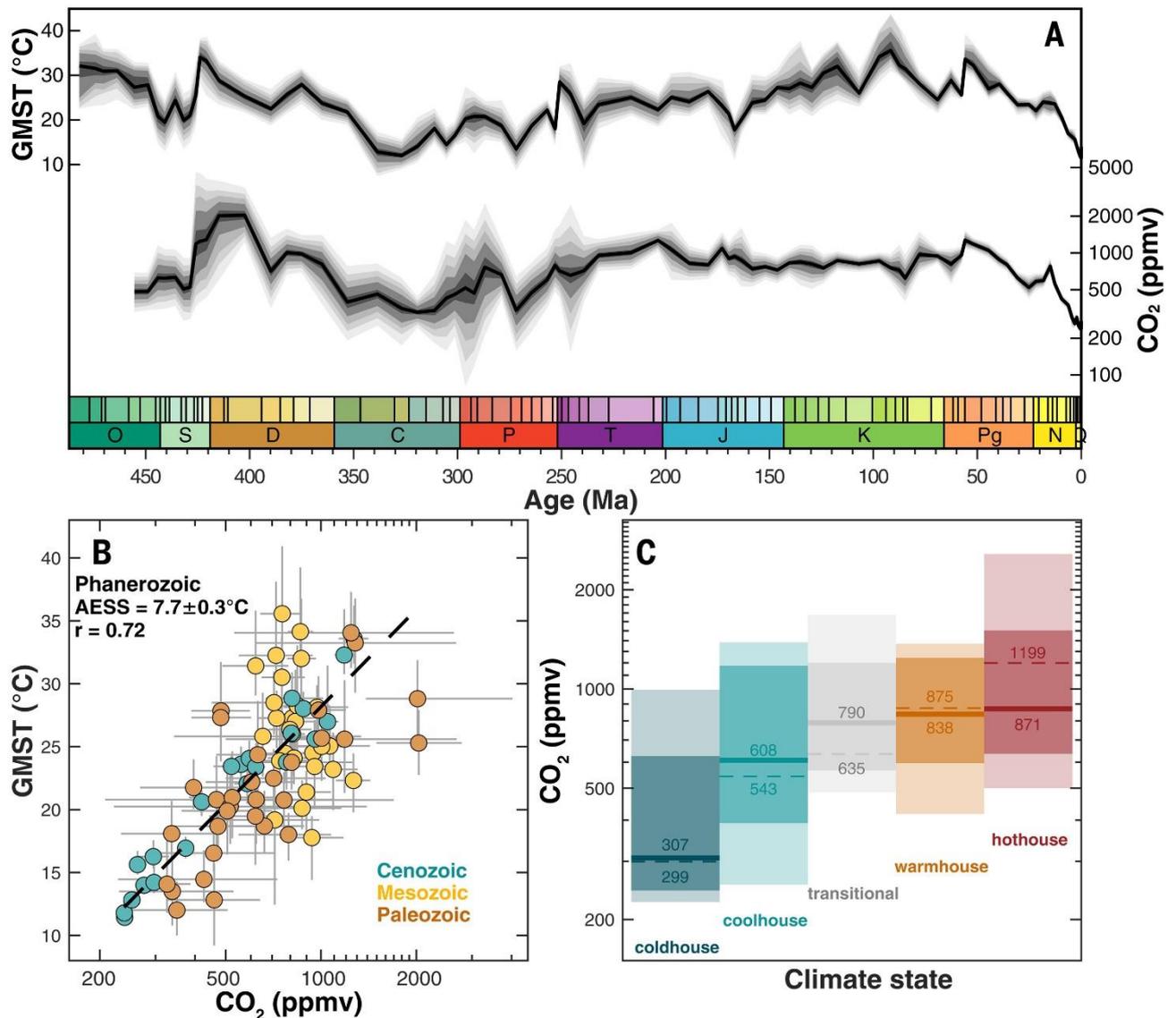


Abb. 4. Die Beziehung zwischen der Temperatur im Phanerozoikum und dem atmosphärischen CO₂. (A) PhanDA GMST (oben) und rekonstruiertes atmosphärisches CO₂ (unten), aufgelöst auf Stufenebene. Die CO₂-Rekonstruktion (29) basiert größtenteils auf den Daten von Foster et al. (2017) (78) im Paläozoikum und Mesozoikum und den Daten von Rae et al. (2021) (80) im Känozoikum. Die Schattierung spiegelt Perzentile wider, wie in Abb. 1. (B) PhanDA GMST gegenüber CO₂, farbcodiert nach geologischer Ära. Die York-Regression (86), die die Unsicherheit sowohl der Prädiktor- als auch der Antwortvariablen berücksichtigt, wird durch die gestrichelte schwarze Linie dargestellt. (C) CO₂-Bereiche für jeden der in Abb. 3 definierten Klimazustände. Helle und dunkle Bänder zeigen das 5. bis 95. bzw. 16.

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

bis 84. Perzentil. Die dicke durchgezogene Linie zeigt den Medianwert und die gestrichelte Linie den

Median, wobei Daten aus dem Mesozoikum ausgeschlossen sind, bei dem die CO₂-Konzentration ist.

Die CO₂ (Abb. 4C) definierten Klimazuständen , wenn auch mit großen Bereichen aufgrund der Unsicherheiten bei der CO₂ - Rekonstruktion und der tatsächlichen Variabilität von CO₂ und GMST zwischen den Stadien. Insbesondere liegt der mittlere CO₂ - Wert während der Kaltphasenintervalle [307 Teile pro Million nach Volumen (ppmv)] nahe am vom Modell abgeleiteten Schwellenwert für bipolare Vereisung im Känozoikum (280 ppmv) (58), und der mittlere CO₂ - Wert für Übergangsintervalle (790 ppmv) stimmt gut mit dem vorgeschlagenen Schwellenwert für unipolare Vereisung (750 ppmv) überein (58). Obwohl der Bereich groß ist, sind die mittleren CO₂-Werte in Treibhausintervallen (871 ppmv) relativ niedrig im Vergleich zu Schätzungen aus gut untersuchten Treibhausintervallen wie dem frühen Eozän (~ 1500 ppmv) (9 , 80). Diese Diskrepanz ist auf die verblüffend niedrigen Schätzungen des CO₂-Gehalts in Treibhäusern während der Kreidezeit (~ 775 ppmv) zurückzuführen, obwohl es zahlreiche Hinweise auf extreme Wärme gibt (79) . Lässt man die mesozoischen Phasen außer Acht, steigt der mittlere CO₂- Gehalt in Treibhäusern auf 1199 ppmv, was besser mit den Daten aus dem Känozoikum übereinstimmt (Abb. 4C).

Die konsistente Beziehung zwischen CO₂ und GMST über die gesamten Aufzeichnungen hinweg ist etwas überraschend, da wir in Zeitskalen des Phanerozoikums erwarten, dass nicht auf CO₂ beruhende Einflüsse, darunter Änderungen der Sonnenleuchtkraft und anderer Treibhausgase, eine Rolle bei der Klimaveränderung spielen. Die Zunahme der Sonneneinstrahlung um etwa 4,2 % seit Beginn des Ordoviziums (78 , 81 , 82) führt zu einer Zunahme des solaren Strahlungsantriebs (ΔF_{Solar}) von etwa 9,8 W m⁻², wenn man davon ausgeht, dass das planetare Albedo (α) konstant ist (29). Frühere Arbeiten haben gezeigt, dass ein höherer CO₂ -Gehalt die geringere Sonnenleuchtkraft des frühen Paläozoikums kompensiert (78); wäre dies jedoch der Fall, müssten die Paläozoikum-Daten in unserem Kreuzdiagramm von CO₂ gegenüber GMST weit rechts von den Känozoikum-Daten liegen . Stattdessen überschneiden sich die paläozoischen CO₂-Schätzungen für die Treibhaus- und Eisphasenperioden größtenteils mit denen des Känozoikums (Abb. 4B). Berücksichtigt man die Zunahme der Sonneneinstrahlung (29), verschlechtert sich die Beziehung zwischen der Änderung der gesamten Strahlungsantriebskraft (ΔF , relativ zum vorindustriellen Zeitalter) und der GMST ($r = 0,53$) und es entstehen ΔF - Werte, die über 84 % des Paläozoikums hinweg niedriger sind als der vorindustrielle Durchschnitt (d. h. negativ), obwohl es erhebliche Hinweise darauf gibt, dass die globalen Temperaturen während eines Großteils dieses Zeitraums höher waren als der vorindustrielle Wert. Dies führt zu einem Rätsel, da die paläozoischen CO₂- Werte scheinbar zu niedrig sind, um die verringerte Solarkonstante zu kompensieren. Diese auffällige Diskrepanz wurde bereits zuvor in Modellstudien zum Phanerozoikum festgestellt (4 , 16) und ist unabhängig von der Wahl der CO₂ - Rekonstruktion (z. B. Abb. 2b von Foster et al ., 2017) (78). Der lineare Anstieg von ΔF_{Solar} im gesamten Phanerozoikum basiert jedoch auf der vereinfachenden Annahme einer konstanten planetaren Albedo. Kleine Änderungen von α können große Unterschiede in der Nettomenge der auf den Planeten einfallenden Sonnenstrahlung bewirken. Beispielsweise kompensiert ein linearer Anstieg von α in den letzten 485 Millionen Jahren von nur 0,03 die Änderung der Sonnenleuchtkraft vollständig (Abb. S11C). Die planetare Albedo wird sowohl von der atmosphärischen (z. B. Wolken und Aerosole) als auch von der Oberflächenalbedo (z. B. das Verhältnis von Land zu Ozean, Eisausdehnung und Vegetationsbedeckung) beeinflusst (83). Die meisten Faktoren, die α beeinflussen, lassen sich in tiefen Zeiträumen nur schwer eingrenzen. Eine Komponente lässt sich jedoch durch Rekonstruktionen der Plattentektonik relativ gut eingrenzen, nämlich die Veränderung des Verhältnisses von Landfläche zu Ozeanfläche im Vergleich zu heute (29 , 84) . Der Einfluss dieser paläogeographischen Veränderungen auf

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

die Energiebilanz des Planeten kann als Antrieb (ΔF_{geog}) behandelt werden (29, 81). Im Ordovizium machten die subaerisch exponierten Kontinente nur etwa 15 % der gesamten Oberfläche des Planeten aus (im Vergleich zu etwa 30 % heute), wobei dieser Wert im Paläozoikum quasi linear anstieg (Abb. S12). Daraus ergibt sich für das Paläozoikum ein insgesamt niedrigeres Oberflächenalbedo und daher ein positiver Antrieb. Die Berücksichtigung von ΔF_{geog} verbessert die Korrelation mit GMST ($r = 0,69$), indem die geringere Sonneneinstrahlung teilweise kompensiert wird. Die Korrelation ist jedoch immer noch niedriger als wenn nur der CO₂-Antrieb berücksichtigt wird. Dies legt nahe, dass entweder andere Faktoren α beeinflusst haben oder dass zusätzliche Antriebe geholfen haben, die geringere Sonnenleuchtkraft zu kompensieren. Veränderungen in den Konzentrationen von Spurentreibhausgasen (z. B. Methan, Distickstoffmonoxid und Ozon) haben im Laufe des Phanerozoikums mit ziemlicher Sicherheit zum Energiehaushalt der Erde beigetragen. Modellstudien legen zum Beispiel nahe, dass die reichlich vorhandenen Sümpfe im Karbon und Perm möglicherweise mehr Methan produziert haben (85), was helfen könnte, den geringeren CO₂- und Sonnenantrieb während der LPIA auszugleichen. Zukünftige Arbeiten zur Modellierung der Auswirkungen von Spurentreibhausgaskonzentrationen und zur Einschränkung der Entwicklung des Albedos im Phanerozoikum werden helfen, die Rolle nicht auf CO₂ basierender Antriebsfaktoren zu erhellen und warum diese sich scheinbar aufheben, sodass CO₂ so stark mit der GMST korreliert.

Bei einer Darstellung von CO₂ im Log 2- Raum zeigt die Steigung der linearen Regression zwischen CO₂ und GMST eine Änderung der GMST von $7,7^\circ \pm 0,3^\circ\text{C}$ pro Verdoppelung von CO₂ an (1σ ; basierend auf der York-Regression (86), die Fehler sowohl bei CO₂ als auch bei GMST berücksichtigt). Dieser Wert ist konsistent im gesamten Känozoikum ($8,2^\circ \pm 0,4^\circ\text{C}$; Abb. S13A), im Paläozoikum ($7,8^\circ \pm 1,5^\circ\text{C}$; Abb. S12B) und im gesamten Känozoikum und Paläozoikum ($8,0^\circ \pm 0,4^\circ\text{C}$; Abb. S12C). Wir nennen diese Metrik, die die langfristige Reaktion der GMST auf CO₂ quantifiziert, die „scheinbare“ Erdsystem-Sensitivität (AESS). Wie traditionelle ESS (10) berücksichtigt AESS sowohl schnelle (z. B. Wolken und Meereis) als auch langsame (z. B. Wachstum und Zerfall von Eisflächen) Klimarückkopplungen. Es geht jedoch auch implizit davon aus, dass die Auswirkungen von Änderungen der Sonnenleuchtkraft, der Paläogeografie, der anderen Treibhausgase als CO₂ oder anderer Antriebe sich irgendwie gegenseitig kompensieren (wie oben untersucht). Aus diesen Gründen ist AESS nicht mit herkömmlichen ECS vergleichbar, für die der IPCC AR6 für das moderne Klima eine Erderwärmung von 2 bis 5 °C angibt (7). Der PhanDA-AESS-Wert stimmt jedoch gut mit reinen CO₂-ESS-Schätzungen überein (und ist direkter vergleichbar mit diesen), die die letzten 10 Millionen Jahre (ebenfalls 8 °C) (11) und die letzten 800.000 Jahre (7 bis 13 °C) (12, 13) umfassen. Im Gegensatz zu einigen Modellstudien, die gezeigt haben, dass die Klimasensitivität bei höheren GMST-Temperaturen zunimmt (61, 81, 87), beobachten wir weder im Känozoikum noch im Paläozoikum eine statistisch belastbare Zustandsabhängigkeit der AESS, zumindest auf der Stufenebene. Weitere Arbeiten sind erforderlich, um zu verstehen, warum der AESS-Wert im gesamten Phanerozoikum so konsistent ist und was seine Größenordnung von $\sim 8^\circ\text{C}$ bestimmt.

Schlussfolgerungen

Die Datenassimilation nutzt Proxy-Informationen zur Paläotemperatur und Modellsimulationen und greift dabei sowohl auf einen großen Katalog geologischer Daten als auch auf unser bestes physikalisches

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

Verständnis des Klimas im Phanerozoikum zurück (Abb. 1). Das daraus resultierende Produkt, PhanDA, ist eine statistisch robuste und in sich konsistente Rekonstruktion der GMST der vergangenen 485 Millionen Jahre und zeigt, dass die Temperatur der Erde dynamischer geschwankt ist als bisher angenommen (Abb. 2). Wir unterteilen die Aufzeichnungen in fünf Quantile oder Klimazustände (Abb. 3) und verwenden diese Unterscheidungen, um zu zeigen, dass die GMSTs innerhalb jedes Klimazustands zeitunabhängig und über das gesamte Phanerozoikum hinweg mit ähnlichen LTGs verbunden sind. Zusätzlich zur erwarteten polaren Verstärkung zeigt PhanDA eine große Bandbreite tropischer Temperaturen zwischen den fünf Klimazuständen (22 bis 42 °C).

PhanDA GMST weist eine starke Beziehung zu atmosphärischen CO₂ - Konzentrationen auf (Abb. 4), was zeigt, dass CO₂ der dominierende Faktor war, der die globalen Klimaschwankungen im gesamten Phanerozoikum kontrolliert hat. Da sich jedoch auch die Sonnenleuchtkraft im Laufe der Zeit verändert hat, ist diese Beziehung ziemlich rätselhaft; langfristige Änderungen des planetaren Albedos oder Änderungen der Konzentrationen von Spurentreibhausgasen können helfen, die Diskrepanz aufzuklären. Die CO₂ - GMST-Beziehung weist auch auf eine relativ konsistente AESS von ~ 8°C im gesamten Phanerozoikum hin. Dies deutet darauf hin, dass die Phanerozoikum-GMST auf Zeitskalen von mehreren Millionen Jahren gut vorhersagbar ist, wenn die CO₂ - Konzentrationen bekannt sind, dass unser Verständnis davon, wie sich Antriebskräfte und Rückkopplungen auf langen Zeitskalen gegenseitig ausgleichen oder verstärken, jedoch unvollständig ist.

Methodenübersicht

Die PhanDA-Datenassimilation verwendet eine Offline-Ensemble-Quadratwurzel-Kalman-Filtermethode, die in MATLAB mit dem Codepaket DASH v4.2.1 (27) implementiert wurde. Kurz gesagt wird ein Ensemble von posterioren Zuständen (X_{post}) berechnet aus (i) einem Ensemble von prioren Zuständen aus ESM-Simulationen (X_{prior}); (ii) Proxy-Daten (Y_{obs}); (iii) geschätzten Proxy-Werten (Y_{est}), die vorwärts aus dem Ensemble von prioren Zuständen modelliert werden; und (iv) dem Kalman-Filter (K). Diese Variablen werden mithilfe der verallgemeinerten Gleichung verknüpft:

$$X_{\text{post}} = X_{\text{prior}} + K(Y_{\text{obs}} - Y_{\text{est}})$$

Einzelheiten zu jeder dieser Variablen und wie sie zusammengestellt wurden, finden Sie in den ergänzenden Materialien (29). Zusammenfassend stammen die in X_{prior} verwendeten ESM-Simulationen aus dem vollständig gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Vegetation-Modell des Hadley Centre, HadCM3L (33, 34), und die in Y_{obs} verwendeten Proxydaten wurden der PhanSST-Datenbank (21) entnommen, die über 150.000 Proxyschätzungen von fünf geochemischen Proxysystemen für SST enthält. Wir berechneten Y_{est} oder die vorhergesagten Proxywerte aus unseren Modellpriors unter Verwendung etablierter Vorwärtsmodelle (Tabelle S1) und berücksichtigten dabei die räumliche und zeitliche Variabilität der Meerwasser- $\delta^{18}\text{O}$ -, pH- und Mg/Ca-Werte. Der Kalman-Gewinn K :

$$K = \text{cov}(X_{\text{prior}}, Y_{\text{est}}) \times [\text{cov}(Y_{\text{est}}, Y_{\text{est}}) + R]^{-1}$$

gewichtet und verteilt die neuen Informationen, die durch das Hinzufügen der Proxydaten gewonnen werden, unter Verwendung der Kovarianz (cov) zwischen dem vorherigen Zustand und der Klimavarianz am Standort des Proxys, der Kovarianz der Proxy-Schätzungen und der Unsicherheit der Proxy-Werte selbst (R). Wir verwendeten Datenassimilation, um die globalen Bedingungen in 85 Zeitscheiben über das

Eine 485 Millionen Jahre alte Geschichte der Oberflächentemperatur der Erde

Phanerozoikum hinweg zu rekonstruieren, die weitgehend den geochronologischen Altern (d. h. den chronostratigraphischen Stadien) entsprechen. Um die Unsicherheiten bezüglich der Wahl des vorherigen Ensembles (X prior), der Annahmen zur Meerwasserchemie, die zur Berechnung von Y est erforderlich sind , und der Proxy-Unsicherheit (R) besser abzubilden, wurde jedes Stadium 420-mal assimiliert, wobei alle Permutationen der verschiedenen Szenarien durchlaufen wurden. Einige Untergruppen der Modellpriors führen zu unrealistischen Ergebnissen (z. B. unrealistisch steile Temperaturgradienten in hohen Breitengradienten); wir haben ein automatisiertes Screening-Protokoll erstellt, um diese Assimilationen zu kennzeichnen und zu entfernen. Der Median und die Unsicherheit der GMST jedes Zeitabschnitts wurden dann unter Verwendung des flächengewichteten mittleren SAT aus den nicht markierten X- Post -Ensembles berechnet.

Eine vollständige Beschreibung der Methoden, die für die Datenassimilierung, die Ermittlung der Temperaturgradienten und Klimazustände in Abhängigkeit von der Breite, die Erstellung des atmosphärischen CO₂ -Aufzeichnungsbogens und die Schätzung der Klimaeinflüsse im gesamten Phanerozoikum verwendet wurden, finden Sie in den ergänzenden Materialien (29).

Danksagung

Die Klimamodellsimulationen wurden mithilfe der Rechenkapazitäten des Advanced Computing Research Centre der Universität Bristol (<https://www.bristol.ac.uk/acrc>) durchgeführt.

Finanzierung: EJJ wurde durch das PhanTASTIC Postdoctoral Fellowship unterstützt, das von Roland und Debra Sauermann über die Smithsonian Institution finanziert wurde. Zusätzliche Unterstützung wurde durch JET aus dem Stipendium 2016-015 der Heising-Simons Foundation und dem Thomas R. Brown Distinguished Chair in Integrative Science bereitgestellt. DJL und PJV danken für die Unterstützung durch das NERC-Projekt NE/X000222/1; PaleoGradPhan: Paläoklimatische meridionale und zonale Gradienten im Phanerozoikum.

Autorenbeiträge: Alle anderen haben zur Konzeptualisierung der vorgestellten Arbeit beigetragen. BTH und SLW haben die Erstfinanzierung sichergestellt. DJL und PJV haben die Klimamodellsimulationen durchgeführt und EJJ und JET haben die Proxy-Datenbank erstellt. EJJ hat die Assimilationen durchgeführt und die Ergebnisse und Abbildungen erstellt. EJJ und JET haben das ursprüngliche Manuskript verfasst und alle Autoren haben es überprüft und bearbeitet.

Interessenkonflikte: Die Autoren haben keine Interessenkonflikte offenzulegen.

Verfügbarkeit von Daten und Materialien: Sowohl die Modellprioritäten (32) als auch die Proxydaten (21), die zur Reproduktion der Ergebnisse erforderlich sind, sind auf Zenodo (32) öffentlich verfügbar. Der Code zum Ausführen der Assimilation und Generieren der Manuskriptabbildungen sowie Dateien mit den in diesem Papier vorgestellten GMST-, CO₂- und LTG-Werten sind auf GitHub (<https://github.com/EJJudd/PhanDA>) verfügbar.

Lizenzinformationen: Copyright © 2024 die Autoren, einige Rechte vorbehalten; exklusiver Lizenznehmer American Association for the Advancement of Science. Kein Anspruch auf Originalwerke der US-Regierung. <https://www.sciencemag.org/about/science-licenses-journal-article-reuse>