



从空间模态看气候变化: 深时古气候与现代预测的对话

张一歌^{1*}, 刘小庆²

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 610240

2. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907, USA

* 联系人, E-mail: zhangyige@gig.ac.cn

2025-04-22 收稿, 2025-06-10 修回, 2025-08-06 接受, 2025-09-11 网络版发表

摘要 深时古气候研究与现代气候变化研究在时间尺度与变化幅度上存在巨大差异, 限制了古气候记录对理解和预测当前气候变化的贡献. 本研究借助一种创新的“用空间换时间”方法, 通过分析全球不同区域相对于西太平洋暖池的温度变化放大倍数, 将不同时间尺度的气候变化置于统一比较框架下. 研究发现, 在过去1000万年的尺度上, 全球各区域表现出独特的温度变化模态, 中高纬度地区的放大倍数普遍在1.5~3.0之间; 而在过去160年的现代观测中, 这些区域的放大倍数显著降低, 甚至低于1.0. 有趣的是, 气候模型长期平衡态模拟产生的全球放大倍数分布与古气候记录非常接近. 这一发现表明, 随着气候系统趋向平衡, 温度变化的空间分布将从当前观测到的瞬时模式向古气候记录所示的平衡态模式转变. 基于古气候约束的模型预测显示, 高纬度地区在平衡态气候变化中将经历最强的温度放大效应(放大倍数2.5~3.0), 远高于当前观测到的瞬时放大倍数. 本研究为连接深时古气候与现代气候变化研究提供了新桥梁, 展示了古气候记录对预测未来全球长期气候变化的独特价值, 同时为区域气候适应和减缓策略的制定提供了科学依据.

关键词 古气候约束, 温度放大倍数, 平衡态气候变化, 空间温度模态, 模态效应

气候变化已成为21世纪人类面临的最重大挑战之一. 为了更准确地预测未来气候变化趋势, 科学界需要深入理解地球气候系统的长期行为和响应机制. 在这一背景下, 深时古气候研究记录了地球气候在百万年、千万年、上亿年时间尺度上的变化, 提供了独特而宝贵的视角^[1]. 这些记录包含了气候系统在不同边界条件和强迫因素下的响应信息, 对于检验和改进当前气候模型具有重要价值^[2].

深时古气候研究已经在多个方面取得了显著进展, 包括全球平均温度重建^[3]、大气二氧化碳浓度估计^[4,5]等. 这些研究帮助我们理解了地球气候系统的基本运行机制, 特别是在极端气候条件下的表现. 然而, 深时

古气候研究与现代气候变化研究之间存在明显脱节. 这种脱节主要源于两个大方面的差异: 时间尺度和变化幅度^[1]. 深时古气候变化通常发生在数千年到数百万年的时间尺度上, 而当前观测到的气候变化仅涵盖了过去几十到几百年; 同时, 深时气候变化幅度往往达到数度甚至十数度^[3], 远大于工业革命以来不足2°C的全球变暖^[6]. 此外, 深时古气候提供的宝贵知识如何被量化吸收, 进入气候模型从而对未来气候拥有预测能力, 仍是巨大挑战. 这些因素使得深时古气候研究难以直接应用于解释和预测当前的气候变化, 限制了其在现代气候科学中的实用价值^[7,8].

这种脱节引发了一个关键问题: 如何让深时古气

引用格式: 张一歌, 刘小庆. 从空间模态看气候变化: 深时古气候与现代预测的对话. 科学通报, 2026, 71: 5066–5081

Zhang Y G, Liu X. Climate change through spatial patterns: a dialogue between deep-time paleoclimate and modern predictions (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 5066–5081, doi: [10.1360/CSB-2025-0575](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0575)

候变得更加“有用”?特别是,如何将百万年尺度的深时古气候记录与现代短期气候变化研究和未来预测建立更直接的联系?这不仅是古气候学的重要科学问题,也关系到古气候研究能否为应对当前气候变化挑战提供有效指导^[9]。

在之前研究的基础上,本文借助一种“用空间换时间”的创新方法来解决这一问题。笔者的核心思路是:虽然不同时间尺度上的气候变化在绝对温度变化上难以直接比较,但它们的空间变化模态(spatial patterns)可能存在共性^[10,11]。具体而言,我们分析不同区域相对于参考区域(如西太平洋暖池)的温度变化比例(称为“放大倍数”),从而建立一个可以跨时间尺度比较的标准化框架。这种方法移除了时间维度的差异,专注于空间温度变化模态,使得深时古气候记录、现代观测数据和气候模型预测可以在同一框架下进行有效比较。

基于这一方法,我们分析了过去1000万年的古气候记录、过去160年的现代观测数据以及气候模型模拟结果,探索它们在空间温度变化模态上的异同。需要说明的是,虽然“深时”概念通常涵盖更长的地质历史,本研究选择过去1000万年作为研究时间窗口,主要考虑到这一时期的古地理格局与现代相对接近,大陆-海洋分布等基本边界条件变化相对较小,从而保证了空间模态比较的有效性。本文将首先比较深时古气候与现代气候变化的关键差异,然后详细介绍“用空间换时间”的方法论,分析不同时间尺度下的空间温度变化模态,探讨古气候放大倍数作为气候模型评估的参考,最后讨论这些发现对未来气候预测的启示。通过这种方式,我们试图建立一座连接深时古气候与现代气候研究的桥梁,使百万年前的气候变化记录为理解和应对当前气候变化挑战提供更直接的指导。

本研究不仅具有科学价值,也蕴含教育意义。将深时古气候研究与现代气候变化建立直接联系,能够有效激发学生对地球系统科学的兴趣。特别是,通过展示古气候记录如何为理解和预测当前气候变化提供关键信息,可以增强学生对地球科学解决人类社会实际问题能力的认识和信心。“用空间换时间”这一创新方法也为地球系统科学教育提供了新视角,帮助学生理解不同时间尺度上气候变化的连续性和一致性,培养跨时间尺度思考问题的科学思维方式。

1 深时古气候与现代气候变化的差异

深时古气候研究与现代气候变化研究关注的是同

一地球气候系统,但两者在研究对象的时间尺度和变化幅度上存在显著差异。这些差异不仅体现在研究方法上,更决定了两个领域之间的认知鸿沟和整合挑战。本节将详细分析这些差异及其对跨时间尺度气候研究的影响。

1.1 时间尺度差异

深时古气候研究通常关注的是数百万年甚至更长时间尺度上的气候变化。例如,对始新世-渐新世边界(约3400万年前)的研究揭示了南极冰盖形成的过程和机制^[12,13];中新世气候研究(约2300~530万年前)为理解冰室期地球向冰室期地球的转变提供了关键信息^[14]。在这些时间尺度上,气候变化受到多种长期因素的影响,包括大陆漂移、山脉隆升、大气CO₂浓度长期变化等^[15]。

相比之下,现代气候变化研究主要关注过去几十年到几百年的时间尺度。系统性的器测记录始于19世纪中期,卫星观测数据则主要来自过去40年^[16]。即使考虑到树轮、冰芯、石笋等高分辨率代用指标,可靠的高精度气候记录也很少超过2000年^[17]。这一时间尺度上,气候变化主要受到短期因素的影响,如温室气体浓度的快速上升、太阳辐射的活动周期、火山活动、土地利用变化等自然和人类活动因素^[18]。

这种时间尺度的差异导致两个领域关注的时间分辨率也有天壤之别。深时古气候研究通常以数万年到数十万年为分辨率单位,很少能够获得千年尺度的连续记录;而现代气候变化研究则以年、月甚至日为单位,能够捕捉到海气系统的季节内变率和短期极端事件。这使得两个领域获取的气候变化信息在时间精度和变化特征上存在根本性差异。

1.2 气候变化幅度差异

除时间尺度外,深时古气候与现代气候变化在各种气候参数的变化幅度上也存在显著差异。温度作为最广泛研究的气候参数,最能直观地反映这种差异。地质记录表明,过去几千万年间,全球平均温度经历了多次大幅波动。例如,始新世最适宜期(约5000万年前)的全球平均温度比现代高约10~14°C^[1];末次间冰期(约12.5万年前)比现代高约1~2°C^[19];末次冰盛期(约2.1万年前)则比现代低约5~6°C^[20]。相比之下,工业革命以来,全球平均温度的升高幅度约为1.1°C^[6]。这种温度变化幅度上的差异,使得深时古气候研究和现代气候变化

研究在关注重点和研究方法上存在显著不同。

需要指出的是,温度只是气候系统的一个重要参数,其他气候参数如降水模式、大气环流、冰川大小、海平面高度等同样存在类似的时间尺度和变化幅度差异。例如,深时古气候记录显示,全球水循环在不同气候态下可能发生根本性重组,而这种变化在现代短期记录中难以捕捉。同样,大气环流模式如哈德利环流、沃克环流在深时尺度上可能经历了多次显著调整,这些变化对理解现代气候系统的响应极为重要。

以西太平洋暖池(WPWP)为例,通过重建过去1000万年的海表温度变化,研究发现这一区域在深时尺度上经历了约5°C的温度变化^[10,21]。而同一区域在过去160年的器测记录中,温度变化仅约0.6°C^[22]。这种绝对温度变化幅度上的巨大差异使得两个时间尺度的数据难以直接比较和整合(图1)。

1.3 研究挑战与比较困难

除了直接器测与借助代用指标的差异外,时间尺度和气候变化幅度的差异导致深时古气候研究与现代气候变化研究面临几个关键挑战:深时古气候记录的时间分辨率通常较低,难以捕捉到短期气候变化过程和事件。这使得深时古气候研究难以直接用于解释和预测现代观测到的快速气候变化。另外,现代气候变化的一个显著特征是其前所未有的快速变化速率。据估计,当前全球变暖速率约为0.2°C/10年,远高于深时古气候自然变化的典型速率^[16]。这种速率差异使得深时古气候和现代气候变化在驱动机制和系统响应方面可能存在根本性差异。深时古气候记录通常反映的是气候系统对长期强迫的平衡态响应,而现代观测到的气候变化则主要是瞬时响应^[24]。这种差异导致两者在空间模式和反馈机制上可能存在显著不同,难以直接比较。

这些差异和挑战提醒我们,要使深时古气候研究对理解和预测现代气候变化更有价值,需要发展新的方法来桥接不同时间尺度的气候变化。传统方法通常是将现代气候变化外推到更长时间尺度,或者尝试从古气候记录中提取高分辨率信息^[25]。然而,这些方法都面临着根本性的局限,难以有效解决时间尺度和温度变化幅度的巨大差异。

因此,我们需要一种新的视角和方法来连接深时古气候与现代气候变化研究。下一节将介绍本研究提

出的“用空间换时间”方法,即通过分析空间温度变化模态来跨越时间尺度的鸿沟,从而使深时古气候研究对现代气候变化预测更具参考价值。

2 跨时间尺度比较的方法论

应用“用空间换时间”的方法,我们可以对不同时间尺度和数据来源下的放大倍数进行系统比较和分析。这种比较不仅可以揭示深时古气候与现代气候变化的联系与差异,还能为识别气候系统长期行为提供新线索。本节将重点分析古气候记录、现代观测和气候模型三种不同来源数据所得到的放大倍数,探讨它们之间的异同及其科学意义。

2.1 标准化方法的基本原理

研究气候变化时,我们通常关注两个核心方面:变化的时间特征(如速率、周期性)和空间特征(如区域分布、空间模式)。传统方法主要专注于时间维度的比较,这在不同时间尺度间存在固有的困难。然而,气候变化的空间特征可能在不同时间尺度上保持相对一致,特别是当考虑气候系统的基本物理过程时。

本研究提出的“用空间换时间”方法需要与传统地理学和生态学中的同名概念加以区分。传统的“空间换时间”(space-for-time substitution)是指利用空间上的差异来推断时间上的变化过程,例如通过不同海拔的植被分布来研究气候变化对生态系统的长期影响。而本研究中的“用空间换时间”具有完全不同的科学内涵,具体定义为:通过分析和比较不同时间尺度气候变化的空间模态相似性,建立跨时间尺度的统一比较框架,从而用空间维度的一致性来弥补时间维度的不可比性。这种方法的核心创新在于:(1) 维度转换:将基于时间连续性的传统比较转换为基于空间模态的标准化比较;(2) 尺度桥接:通过空间模态的相对稳定性连接百万年与千年尺度的气候变化;(3) 物理基础:基于气候系统基本物理过程(如能量分配、环流模式)在不同时间尺度上的相似性。具体而言,我们并非用空间变化来“替代”时间变化,而是用空间变化的“模态”来“桥接”不同时间尺度的气候变化研究。这种方法的本质是认识到:气候变化的空间分布模式可能比其时间演化过程更能反映气候系统的内在物理规律。

这种“用空间换时间”的方法可能代表一种研究范式的转变:从关注“何时发生什么”转向探究“如何发生变化”。这种方法的核心创新在于用空间模态的一致性

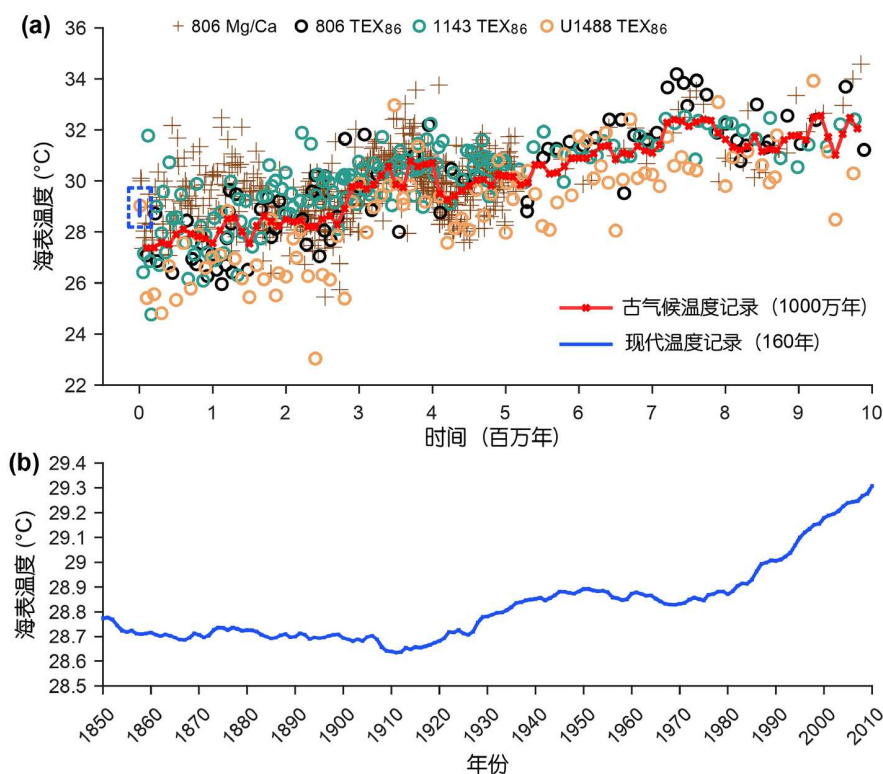


图1 西太平洋暖池区域在两个不同时间尺度上的温度变化对比。(a) 过去1000万年的温度变化, 总体范围在26~32°C之间, 变化幅度约5°C^[10,21]。(b) 过去160年的温度变化, 范围仅在28.7~29.3°C之间, 变化幅度约0.6°C^[23]

Figure 1 Temperature variation comparison of the Western Pacific Warm Pool region across two different time scales. (a) Temperature changes over the past 10 million years, with an overall range of 26~32°C and a variation amplitude of approximately 5°C^[10,21]. (b) Temperature changes in the same region over the past 160 years, with a range of only 28.7~29.3°C and an amplitude of approximately 0.6°C^[23]

来替代时间序列的连续性, 从而建立跨时间尺度的比较框架。笔者提出的标准化方法基于一个核心假设: 虽然不同时间尺度上的绝对温度变化幅度差异显著, 但不同区域之间的相对温度变化关系可能具有某种平衡态下的相对一致性。这种稳定性源于控制全球能量分配的基本物理过程, 如大气和海洋环流、辐射平衡、热力学特性等, 这些过程在不同时间尺度上可能表现出类似的模式。

标准化方法的核心是选择一个参考区域, 然后计算其他区域相对于该参考区域的温度变化比例(称为“放大倍数”):

$$\text{放大倍数} = \Delta T_{\text{目标区域}} / \Delta T_{\text{参考区域}}, \quad (1)$$

其中, ΔT 表示温度变化量。具体操作起来, 通过线性回归分析 $\Delta T_{\text{目标区域}} = \alpha \times \Delta T_{\text{参考区域}} + \beta$, 其中斜率 α 即为目标区域的温度变化放大倍数。这种方法通过标准化不同温度变化幅度下的空间响应关系, 使得不同

气候背景下的空间温度变化模态可以进行直接比较^[10]。

2.2 参考区域的选择

标准化方法的有效应用需要谨慎选择适当的参考区域。理想的参考区域应具备完整的长期温度记录、在全球气候系统中具有重要地位、研究期间内地地理位置相对稳定, 并尽量远离冰盖和其他高度不稳定区域以减少特定局地反馈机制的影响^[26]。

基于这些考虑, 本研究选择西太平洋暖池(WPWP)作为参考区域。WPWP是全球最大、最温暖的海水体, 对全球海洋热输送和大气环流具有决定性影响^[27]。此外, WPWP区域拥有高质量的深时海洋钻孔记录(如ODP Site 806、1143, IODP Site U1488等), 提供了过去1000万年的连续温度重建数据^[10,21]。同时, 该区域也有完整的现代器测记录, 使得跨时间尺度比较成为可能。研究表明, WPWP的温度变化对全球平均温度变化

具有良好的响应关系,这使其成为研究全球气候变化的理想参考点。

2.3 温度变化放大倍数的计算方法

确定参考区域后,计算温度变化放大倍数的具体步骤涉及数据准备、时间分段与平均、回归分析和不确定性评估等环节。对于古气候记录,我们主要采用有机分子温度代用指标(如 TEX_{86} 、 $\text{U}_{37}^{\text{K}'}$)和无机地球化学指标(如有孔虫壳体 Mg/Ca);对于现代记录,则采用HadISST2.1等观测数据集^[22]。为减少噪声并提取主要变化信号,我们对长时间序列数据进行适当分段和平均,通常对深时古气候记录采用20万年的时间窗口,对现代记录则采用10年(10 a)窗口。随后,我们对每个时间尺度分别进行WPWP温度与目标区域温度的线性回归分析,获得回归斜率。这一斜率即为目标区域相对于WPWP的温度变化放大倍数(图2)。为考虑温度重建和观测数据的不确定性,我们采用加权回归方法(如York回归)并通过自举法(Bootstrap)估计放大倍数的统计误差范围^[28]。

图2展示了这一方法在三个不同时间尺度上的应用:深时古气候记录(过去1000万年)、现代观测记录(过去160年)和气候模型模拟结果。以位于中纬度北太平洋区域的ODP 1021站为例,左侧面板显示原始温度时间序列,右侧面板则展示了将时间序列取出后,每一个时间段的ODP 1021站的温度与WPWP的温度的散点图并进行回归分析的过程。通过这一方法,我们获得了各种情况下中纬度北太平洋区域相对于WPWP的温度变化放大倍数:过去1000万年,基于地球化学代用指标重建的古气候记录:放大倍数为 $2.42 \pm 0.23(2\sigma)$;过去160年现代观测:放大倍数为 $0.92 \pm 0.5(2\sigma)$;CESM气候模型长期模拟:放大倍数为 $1.99 \pm 0.07(2\sigma)$ 。

这些结果表明,尽管不同时间尺度上的绝对温度变化幅度差异显著(从 0.6°C 到 5°C 不等),但通过放大倍数这一相对指标,我们可以在统一框架下进行比较和分析。特别值得注意的是,深时古气候记录和气候模型长期模拟显示出相近的放大倍数,而现代短期观测则呈现出明显不同的模式。这一发现为理解不同时间尺度上气候变化的空间特征提供了新视角。

2.4 方法优势与局限性

与传统方法相比,“用空间换时间”的方法具有显

著优势。它能够实现跨时间尺度的有效比较,直接关联气候系统的物理机制,降低数据不确定性的影响,并便于与气候模型进行比较。这些特性使其成为连接深时古气候与现代气候变化研究的有力工具。然而,这一方法也存在一些局限性,值得在应用中注意。首先,它依赖于多个区域的高质量温度记录,而许多区域(特别是高纬度和南半球)的古气候记录仍然稀缺。其次,不同参考区域的选择可能导致结果存在差异,需要谨慎验证。此外,该方法基于温度变化之间存在线性关系的假设,而在某些极端情况下,这一假设可能不完全成立。最后,深时古气候记录的低时间分辨率可能掩盖某些短期变化特征,影响放大倍数的精确估计。

尽管存在这些局限,“用空间换时间”方法仍为研究不同时间尺度气候变化提供了有价值的新视角。通过这一方法,我们能够将百万年尺度的古气候记录与百年尺度的现代观测和气候模型预测置于同一分析框架中,揭示它们之间的联系与差异,从而增强深时古气候研究对理解现代和未来气候变化的实用价值。

下一节将详细分析基于这一方法得到的结果,探讨不同时间尺度和数据来源下的温度变化放大倍数及其科学意义。

3 放大倍数对比与分析

3.1 不同数据来源的放大倍数比较

通过计算西太平洋暖池与中纬度北太平洋区域(ODP1021站点所在位置)之间的温度变化关系,我们获得了三种不同情景下的放大倍数:(1)过去1000万年的古气候记录显示,中纬度北太平洋的温度变化是西太平洋暖池的 2.42 ± 0.23 倍。这一结果是基于海洋沉积物中有机地球化学指标 $\text{U}_{37}^{\text{K}'}$ 重建的长期温度序列。这种较高的放大倍数表明,在深时尺度上,中纬度区域相对于热带区域表现出明显的放大效应。(2)相比之下,过去160年的现代观测记录显示出截然不同的模式,中纬度北太平洋的温度变化仅为西太平洋暖池的 0.92 ± 0.5 倍。这一结果基于HadISST2.1等多个现代海表温度数据集分析得出。值得注意的是,这一值小于1,意味着在现代短期气候变化中,这一中纬度区域的变暖速度实际上低于热带西太平洋。(3)而CESM气候模型在长期平衡态模拟($4 \times \text{CO}_2$ 模拟5900年)中显示的放大倍数为 1.99 ± 0.07 ,与古气候记录较为接近。这表明气候模型在长时

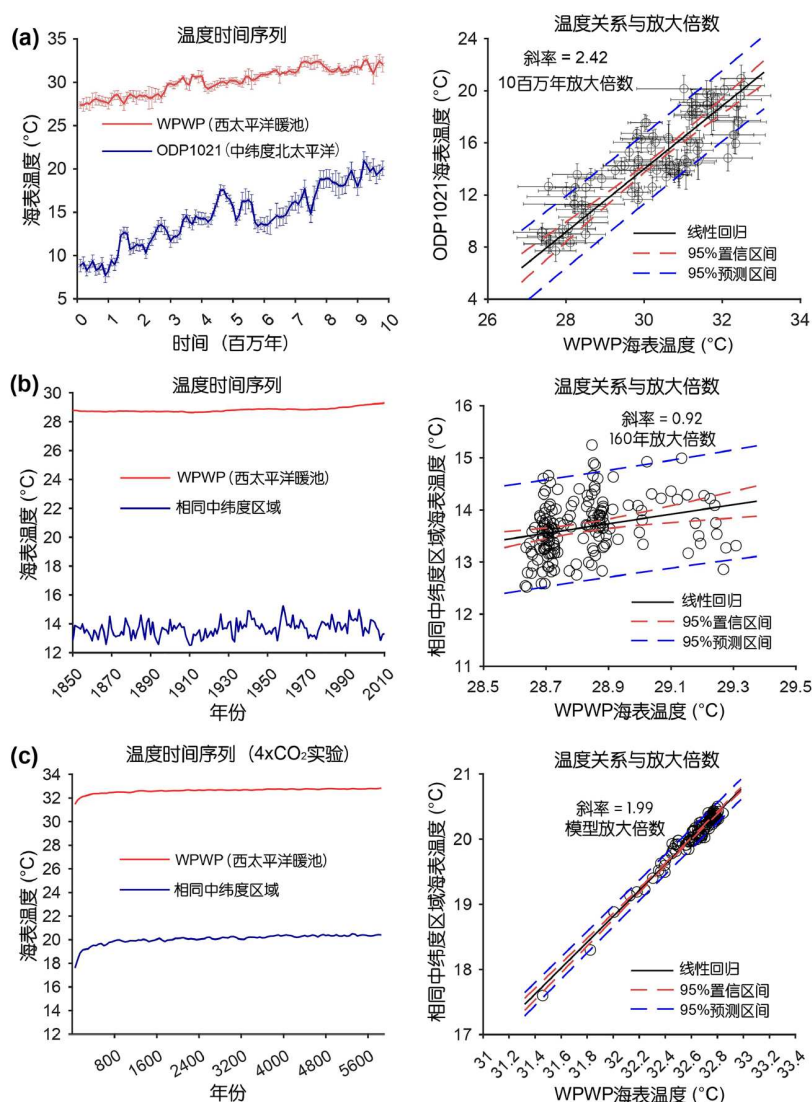


图 2 不同时间尺度下的区域温度关系与放大倍数比较. (a) 过去1000万年WPWP与ODP1021温度变化关系. 左图展示两个区域的温度时间序列, 右图为温度相关性散点图及线性回归分析, 斜率2.42表示在百万年尺度上ODP1021(中纬度北太平洋)的温度变化为WPWP(西太平洋暖池)的2.42倍. (b) 过去160年WPWP与相同中纬度区域温度变化关系. 左图为短时间尺度上的温度时间序列, 右图显示在近代观测时期, 中纬度区域的温度变化仅为WPWP的0.92倍. (c) CESM模型(LongRunMIP)同区域温度变化关系. 左图为 $4\times\text{CO}_2$ 固定强迫实验条件下的长期(5900年)平衡态模拟温度时间序列, 右图表明在平衡态气候模拟中, 中纬度区域的温度变化为WPWP的1.99倍, 与古气候记录较为接近

Figure 2 Comparison of regional temperature relationships and amplification factors across different time scales. (a) Temperature change relationship between WPWP and ODP1021 over the past 10 million years. The left panel shows temperature time series of both regions, while the right panel presents temperature correlation scatter plot and linear regression analysis, with a slope of 2.42 indicating that temperature changes in ODP1021 are 2.42 times those of WPWP on the million-year scale. (b) Temperature change relationship between WPWP and the same mid-latitude region over the past 160 years. The left panel shows temperature time series on short time scales, while the right panel demonstrates that during the modern observational period, temperature changes in the mid-latitude region are only 0.92 times those of WPWP. (c) CESM model (LongRunMIP) temperature change relationship for the same regions. The left panel shows long-term (5900 years) equilibrium simulation temperature time series under $4\times\text{CO}_2$ fixed forcing experimental conditions, while the right panel indicates that in equilibrium climate simulations, temperature changes in the mid-latitude region are 1.99 times those of WPWP, which is relatively close to paleoclimate records

间积分后能够捕捉到与古气候记录类似的空间温度变化模态.

图3直观地展示了这三种数据来源下的温度关系

和放大倍数对比. 尽管不同数据来源的绝对温度范围存在巨大差异(古气候记录: $26\sim 32^\circ\text{C}$ vs. $8\sim 24^\circ\text{C}$; 现代观测: $28.0\sim 28.9^\circ\text{C}$ vs. $15.2\sim 16.3^\circ\text{C}$), 但通过放大倍数这

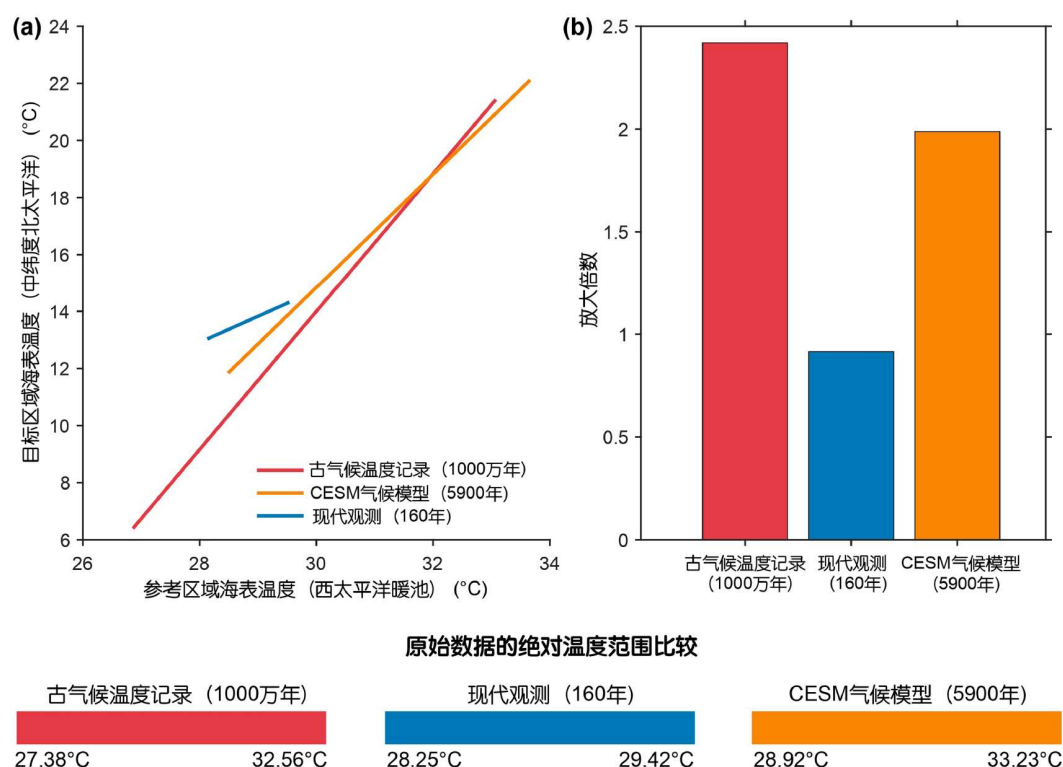


图 3 不同时间尺度和数据来源的温度关系与放大倍数比较。(a) 三种不同数据来源下中纬度区域(ODP1021站附近)与西太平洋暖池的温度关系。(b) 三种数据来源的放大倍数: 古气候记录显示最高的放大倍数(2.42), 现代观测显示最低的放大倍数(0.92), 而CESM气候模型的平衡态模拟结果(1.99)接近古气候记录。底部横条展示了三种数据来源的原始绝对温度范围: 古气候记录的温度范围为27.38~32.56°C, 现代观测的温度范围为28.25~29.42°C, CESM模拟的温度范围为28.92~33.23°C

Figure 3 Comparison of temperature relationships and amplification factors across different time scales and data sources. (a) The temperature relationships between mid-latitude regions (near ODP1021 site) and the Western Pacific Warm Pool under three different data sources. The red line represents paleoclimate temperature records (10-million-year scale), the blue line represents modern observations (160-year scale), and the orange line represents CESM climate model (5900-year simulation). (b) The amplification factors of the three data sources: paleoclimate records show the highest amplification factor (2.42), modern observations show the lowest amplification factor (0.92), while the equilibrium simulation results of the CESM climate model (1.99) are close to paleoclimate records. The bottom bars display the original absolute temperature ranges of the WPWP from three data sources: paleoclimate records have a temperature range of 27.38~32.56°C, modern observations range from 28.25~29.42°C, and CESM model simulations range from 28.92~33.23°C

一相对指标, 我们可以在统一框架下进行直接比较。

3.2 放大倍数差异的解释

为什么不同时间尺度和数据来源下的放大倍数存在如此显著差异? 特别是, 为什么深时古气候和平衡态气候模型显示出相似的高放大倍数, 而现代观测则呈现截然不同的模式? 以下几个因素可能提供关键解释。

平衡态与瞬态气候响应的根本差异可能是最主要的原因。深时古气候记录通常反映的是气候系统对长期强迫(如大气CO₂浓度变化)的平衡态响应, 系统有充分时间达到新的平衡状态。同样, 气候模型的长期积分模拟也允许系统接近平衡态。相比之下, 现代观测记录的是气候系统对快速变化强迫的瞬态响应, 系统尚未

达到平衡。海洋热惯性在这一过程中扮演着关键角色。高纬度海洋具有较强的垂直混合, 导致对外部强迫的响应较慢。在深时尺度和长期模型模拟中, 这些区域有足够时间充分响应并展现出强烈的放大效应; 而在现代短期观测中, 这些区域的温度变化被海洋热惯性显著抑制, 导致放大倍数较低。海洋环流变化是另一个重要因素。研究表明, 大西洋经向翻转环流(AMOC)和南大洋环流在瞬态和平衡态气候变化中可能有不同响应模式。在长期气候变化中, 这些环流的调整可能增强中高纬度的变暖; 而在短期变化中, 环流可能起到缓冲作用。此外, 反馈机制的时间依赖性也不容忽视。某些关键气候反馈, 如冰反照率反馈、云反馈和水汽反馈, 在不同时间尺度上表现出不同特性。例如, 云反馈在短期

和长期气候变化中可能有显著差异,这进一步影响了空间温度变化模态。

值得注意的是,自然气候变率(internal variability)可能对现代观测的放大倍数产生显著影响。过去160年的气候记录可能包含了太平洋年代际振荡(PDO)、厄尔尼诺-南方振荡(ENSO)等内部变率的影响,这些变率模态可能掩盖或扭曲外部强迫导致的空间温度变化模态。

3.3 放大倍数的稳定性与变化

虽然百万年尺度的放大倍数显示出与平衡态气候模型相似的值,但我们仍需进一步探讨这一放大倍数在不同时期和条件下的稳定性。通过分析不同温度范围和时间窗口的放大倍数,我们可以评估这一指标的稳健性。

研究发现,在过去1000万年不同时间段内,中纬度北太平洋的放大倍数虽有波动,但整体保持在2.0~2.8的范围内。这种平衡态下的相对一致性表明,尽管地球气候经历了从中中新世适宜期到更冷的上新世和第四纪的转变,基本的温度放大模式仍保持相对一致。气候模型实验也支持放大倍数的相对稳定性。在不同CO₂强迫水平下的平衡态模拟显示,中纬度放大倍数在不同全球平均温度下保持相对稳定,尤其是在5000年以上的长期模拟中。这进一步证实了空间温度变化模态可能具有某种内在相对一致性,即使在不同气候态下也能保持。

3.4 从放大倍数到空间温度变化模态

放大倍数分析不仅限于单一区域,扩展到全球尺度可以揭示更完整的空间温度变化模态。通过计算全球不同区域相对于西太平洋暖池的放大倍数,我们可以构建一个全球“放大倍数地图”,直观展示气候变化的空间分布特征。

古气候记录和平衡态气候模型均显示出一些共同的空间特征:高纬度区域表现出最强的放大效应,北半球放大倍数通常在2.0~3.0之间;热带外海区域的放大倍数略高于1;而热带上升流区域(如赤道东太平洋)则表现出低于西太平洋的放大倍数(0.8~0.9)。这种模式反映了气候系统中的关键物理过程,如极区放大效应和热带响应特性。相比之下,现代观测的全球放大倍数分布显示出显著不同的特征:北大西洋和南大洋等关键区域的放大倍数明显低于古气候记录和模型预测,反

映了这些区域可能仍处于对当前气候变化的瞬态响应阶段。

理解这些空间温度变化模态及其在不同时间尺度上的差异,对于准确预测未来气候变化的区域影响至关重要。特别是,古气候记录和平衡态模型所揭示的长期空间模式可能预示着,随着气候系统逐渐接近新的平衡态,全球温度变化的空间分布可能与当前观测到的模式有显著不同。这一发现引发了一个关键问题:我们如何利用古气候记录中观察到的放大倍数来评估和改进气候模型,进而提高未来气候预测的可靠性?这将是下一节的重点内容。

4 平衡态气候变化的未来预测

当前的气候变化预测主要关注21世纪内的短期变化,这些预测通常基于气候系统对温室气体增加的瞬时响应。然而,即使未来温室气体浓度稳定,气候系统还将继续变化数百年甚至数千年才能达到新的平衡态^[29]。理解这种长期平衡态气候变化对制定长远气候政策和适应策略具有重要意义。本节将基于前文分析的古气候约束,探讨平衡态气候变化的未来预测,特别是气候变化的空间模式。

4.1 瞬态与平衡态气候变化的区别

瞬态气候变化与平衡态气候变化(transient vs. equilibrium climate)在时间尺度和空间特征上存在显著差异。瞬态响应主要反映气候系统对快速变化强迫的短期调整,受海洋热吸收、大气水汽调整等快速过程控制;而平衡态响应则反映系统在充分时间后达到的最终状态,包括深海温度完全调整、冰盖完全响应等慢速过程^[30]。

前文的分析表明,现代观测(160年尺度)和古气候记录(1000万年尺度)显示出明显不同的温度变化空间模式。现代观测中中纬度北太平洋的温度变化仅为西太平洋暖池的0.92倍,而古气候记录和长期平衡态气候模型均显示中纬度区域的温度变化是西太平洋暖池的1.99~2.4倍。这种差异强烈暗示,随着气候系统逐渐向平衡态过渡,未来气候变化的空间模式可能发生显著转变,与当前观测到的模式有本质不同。

4.2 基于古气候约束的模型选择

为了预测平衡态气候变化的空间模式,我们需要选择能够准确模拟历史上气候变化空间特征的模型^[8]。

模型选择基于三项定量评估指标: (1) York回归斜率, 反映模型放大倍数与古气候记录之间的线性关系, 斜率越接近1表示一致性越好; (2) 放大倍数标准差的模型-数据差异, 即 $|\sigma_{\text{model}} - \sigma_{\text{paleo}}|$, 用于评估模型在重现古气候空间变率方面的能力, 数值越小表示模型与古气候记录的空间变率越一致; (3) 模型与古气候数据的相关系数, 反映两者空间模态的相似程度(图4). 综合这三项指标, 我们选择那些参与LongRunMIP计划^[31]中放大倍数与古气候记录较为一致的模型(A组: CESM104、CCSM3、HadGEM2、MPIESM11、MPIESM12)作为平衡态预测的基础. 这些模型在长期模拟($4\times\text{CO}_2$ 条件下运行5000年以上)中表现出与古气候记录相似的温度放大模式, 可能在某种程度上更好地捕捉了控制长期气候变化的基本物理过程. 相比之下, B组模型(CNRMCM61、FAMOUS、HadCM3L、IPSLCM5A)的放大倍数与古气候记录有较大偏离, 在模拟长期气候变化的空间特征方面可能存在一定局限性. 需要指出的是, 这种基于古气候约束的模型选择并非否定B组模型在其他方面的价值. 不同模型在不同气候特征的模拟上可能各有优劣, 综合考虑多种评估指标对全面理解模型性能仍然重要. 然而, 在预测平衡态气候变化的空间模式方面, 与古气候记录一致的模型可能为理

解长期气候变化提供有价值的信息.

4.3 未来平衡态全球变暖模式

基于A组模型的集合平均, 我们预测了未来平衡态气候变化的全球空间模式(图5). 结果显示, 相对于西太平洋暖池的 1°C 变暖, 全球不同区域将表现出显著不同的温度变化幅度: (1) 高纬度北大西洋和北太平洋区域表现出最强的温度放大效应, 放大倍数普遍在2.5~3.0之间. 这些区域的强烈变暖主要与冰雪反照率反馈、海冰减少和海洋环流调整有关. 特别是北大西洋区域, 由于大西洋经向翻转环流的长期调整, 可能经历显著高于全球平均的变暖^[32]. (2) 南大洋区域也表现出明显的放大效应, 放大倍数在1.8~2.4之间. 然而, 这一区域的变暖模式具有一定的纬向非对称性, 与南极环流和南极海冰动态密切相关. 南极周围海域的温度响应较为复杂, 反映了南极冰盖稳定性和南大洋上升流的长期变化^[33]. (3) 中纬度临近陆的地区普遍表现出高于位于大洋中间区域的放大效应, 放大倍数通常在1.5~2.2之间. (4) 热带区域的放大倍数整体较小, 多数区域在0.8~1.2之间. 但热带内部也存在显著的空间差异: 西太平洋暖池周边区域的放大倍数接近1(这是选择其作为参考的原因之一); 而赤道东太平洋上升流区

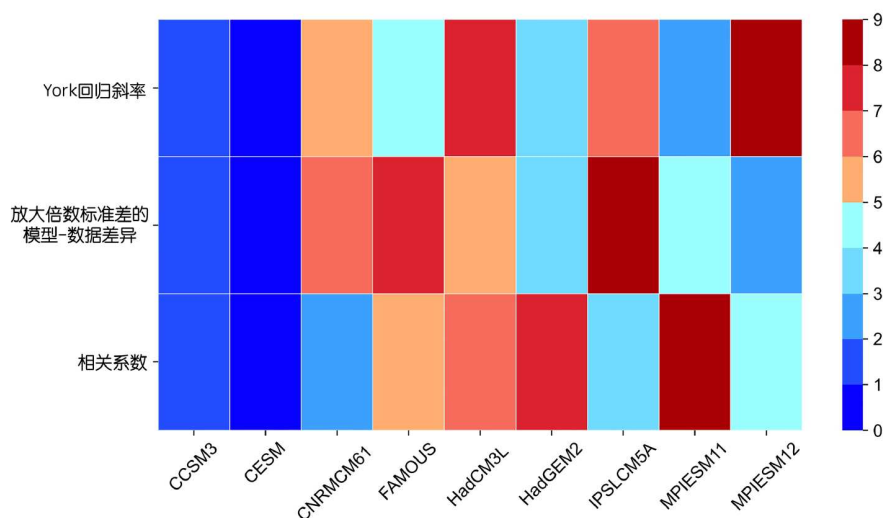


图4 基于古气候放大倍数评估的LongRunMIP气候模型性能排名热图. 评估使用大气 CO_2 浓度骤增四倍情景下的长期模拟结果, 根据三项指标对9个模型进行排名: York回归斜率(模型放大倍数与古气候记录之间的线性关系); 放大倍数标准差的模型-数据差异; 以及模型与古气候数据的相关系数. 颜色从蓝色到红色分别表示从优(1)到差(9)的排名, 数值越小(蓝色越深)表示模型性能越优.

Figure 4 Heatmap ranking of LongRunMIP climate model performance based on paleoclimate amplification factor assessment. The evaluation uses long-term simulation results under a quadrupled atmospheric CO_2 concentration scenario, ranking 9 models according to three metrics: York regression slope (linear relationship between model amplification factors and paleoclimate records); model-data difference in amplification factor standard deviation; and correlation coefficient between models and paleoclimate data. Colors from blue to red represent rankings from excellent (1) to poor (9), with smaller values (deeper blue) indicating better model performance.

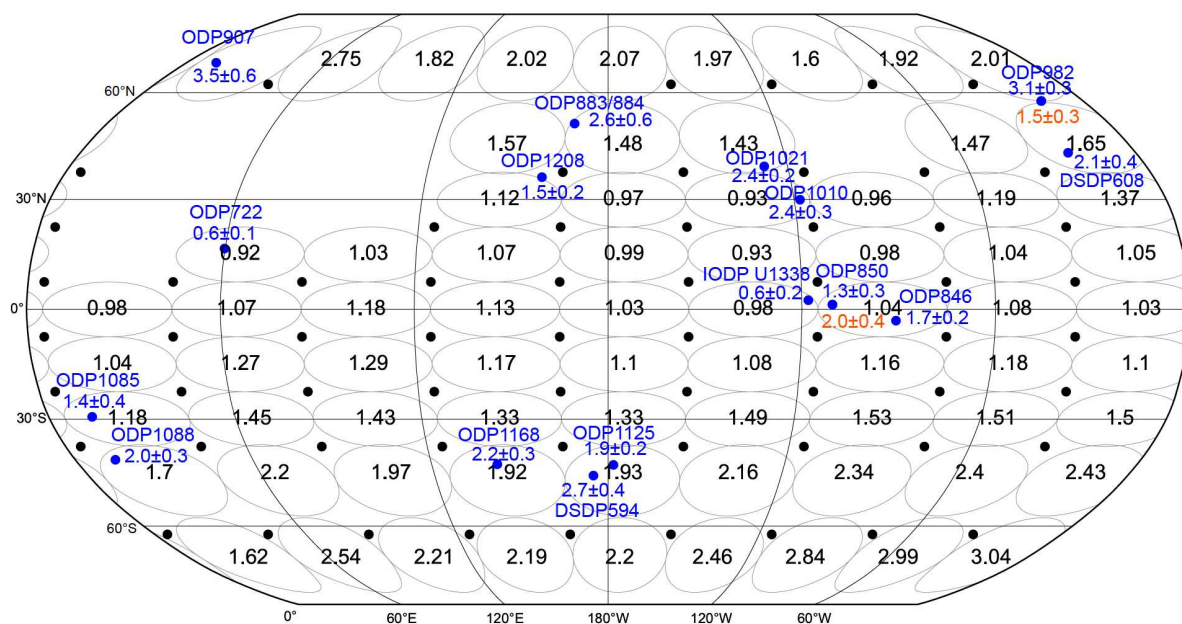


图 5 未来平衡态气候下全球各区域相对于西太平洋暖池的温度变化放大倍数分布。灰色椭圆表示海洋区域网格的覆盖范围，网格定义遵循 Dong 等人^[36]的标准：每个海表温度网格覆盖范围被约束于矩形区域内，热带地区(|纬度|≤30°)纬度宽度为15°，极地地区(50°≤|纬度|≤70°)为25°，中纬度地区采用渐变设置以确保网格一致性。为优化视觉效果，网格呈交错排列并偏移半个宽度。椭圆内黑色数字表示基于A组五个模型(CCSM3、CESM、HadGEM2、MPIESM11、MPIESM12)计算的平均放大倍数。黑点代表其余网格的中心位置，这些位置的放大倍数椭圆未在图中显示以避免视觉混乱

Figure 5 Global distribution of temperature change amplification factors relative to the Western Pacific Warm Pool under future equilibrium climate conditions. Gray ellipses represent the coverage area of ocean grid cells, with grid definition following the standards of Dong et al.^[36]: each sea surface temperature grid coverage is constrained within rectangular regions, with tropical regions (|latitude|≤30°) having a latitude width of 15°, polar regions (50°≤|latitude|≤70°) having 25°, and mid-latitude regions using gradient settings to ensure grid consistency. To optimize visual effects, grids are arranged in a staggered pattern and offset by half a width. Black numbers within ellipses represent average amplification factors calculated based on five Group A models (CCSM3, CESM, HadGEM2, MPIESM11, MPIESM12). Black dots represent the center positions of other grids, whose amplification factor ellipses are not shown in the figure

域的放大倍数则低于1，反映了这一区域独特的海洋动力学过程和云反馈机制^[34]。

这种全球变暖模式与当前观测到的瞬态变暖模式有显著不同。现代观测中，北大西洋和南大洋的变暖相对较弱，而热带某些区域如西太平洋暖池的变暖则相对较强。这种差异强调了将瞬态观测外推至长期预测的潜在风险，同时也凸显了古气候记录在预测长期气候变化方面的独特价值。

4.4 区域气候变化的影响与适应启示

平衡态气候变化的空间模式对区域气候影响评估和长期适应策略具有重要启示。基于我们的预测，未来几个世纪内，一些关键区域可能面临远超全球平均的变暖：北极地区的强烈变暖将导致海冰进一步减少，显著改变北极海洋生态系统和北半球大气环流模式。同时，北极周边永久冻土的加速融化可能释放大量甲烷

和二氧化碳，形成正反馈并进一步加剧全球变暖。中纬度陆地区域的显著变暖将增加热浪和干旱风险，对农业生产和生态系统构成严峻挑战。特别是当前已经较为干旱的中纬度内陆地区，如地中海沿岸、中亚和北美西部，可能面临更加严重的水资源压力。海平面上升是平衡态气候变化的另一个重要后果。随着格陵兰和南极冰盖对变暖的长期响应，海平面可能在未来几千年内上升数米甚至数十米，远超当前预测的21世纪海平面上升幅度。这将对全球沿海地区产生深远影响，需要从超长期视角制定适应战略。大洋环流系统的调整也是平衡态气候变化的关键特征。大西洋经向翻转环流、黑潮、南极环流等关键环流系统可能在长期气候变化中经历显著调整，影响全球热量和水分分布，改变区域降水模式和极端天气事件频率。

值得注意的是，虽然这些长期气候变化可能需要数百年甚至数千年才能充分显现，但了解这些长期变

化趋势对当前决策仍然具有重要价值。特别是对于寿命长、适应性弱的基础设施规划和生态系统保护而言,考虑长期平衡态气候变化可以帮助避免锁定不可持续的发展路径。

4.5 模型与古气候记录的一致性与差异

尽管经过古气候约束的A组模型展现出相似的全球变暖模式,但不同模型之间仍存在显著差异,特别是在一些关键区域如北大西洋和南大洋。这些差异部分反映了当前气候模型在表示某些复杂过程(如云反馈、海冰动态和海洋环流)方面的不确定性。同时,即使是最好的气候模型也难以完全重现古气候记录中的所有特征。例如,许多古气候记录表明,过去温暖时期的热带-极地温度梯度可能比当前模型模拟的更小(所谓的Equable Climate)。这种不一致可能提示我们,某些重要的气候反馈机制或过程在当前模型中可能表示不足。未来研究应进一步整合古气候记录和模型模拟,特别是扩展到更多区域的温度放大倍数比较,以及纳入降水、海平面等其他气候变量的分析。这将有助于更全面地评估模型性能,改进长期气候预测的可靠性。

总之,基于古气候约束的平衡态气候变化预测为长期气候变化的空间模式提供了新视角,强调了深时古气候研究对理解未来气候变化的重要价值。这种预测不仅补充了传统的短期气候预测,也为超长期气候风险评估和适应规划提供了科学基础。

5 古气候记录对未来气候预测的启示

通过分析不同时间尺度的温度变化空间模式,笔者发现古气候记录对理解和预测未来气候变化具有独特价值。本节将总结这些研究发现对气候科学和气候政策的主要启示,并讨论古气候研究如何更有效地为应对当前气候变化挑战提供科学指导。

5.1 平衡态与瞬态气候变化的关系

本研究最重要的发现之一是平衡态与瞬态气候变化在空间模式上的显著差异。古气候记录和平衡态气候模型一致显示,中高纬度地区的长期温度变化幅度是热带地区的2~3倍;而现代观测数据则显示,某些中纬度地区的短期温度变化幅度不到热带地区的1倍。这种差异表明,随着气候系统逐渐趋向平衡,温度变化的空间分布将发生根本性转变。这一发现对气候变化预测具有深远启示。当前大多数气候预测主要关注未来

几十年到一个世纪的变化,这些预测主要反映气候系统的瞬时响应。然而,即使未来温室气体浓度稳定,气候系统还将继续调整数百年甚至数千年,最终达到与古气候记录模式更为接近的平衡态。这意味着,仅基于短期观测外推的未来预测可能系统性地低估某些区域(如中高纬度)的长期变暖幅度,同时可能高估其他区域的变暖幅度。

“模态效应”(pattern effect)是理解这种差异的关键概念。不同的温度变化空间模式会引发不同的气候反馈,进而影响全球平均温度变化^[35,36]。例如,当温度变化主要集中在热带地区时,可能产生较强的负反馈(如云反馈);而当温度变化主要集中在高纬度地区时,则可能产生较强的正反馈(如冰-反照率反馈)。因此,从瞬时模式向平衡态模式的转变可能导致全球气候系统对温室气体强迫的敏感性发生变化。

5.2 区域气候变化的长期轨迹

古气候记录提示的平衡态温度变化模态对理解不同区域气候变化的长期轨迹具有重要价值。基于本研究分析,我们可以预见几个关键区域在未来几个世纪可能经历的变化趋势:北半球高纬度地区可能面临远超全球平均的变暖,随着海冰减少和反照率降低,这种变暖趋势将进一步加强。古气候记录显示,这些区域的放大倍数在平衡态下可高达2.5~3.0,远高于当前观测到的瞬态放大倍数。这意味着,即使全球平均温度稳定在较低水平,北极地区仍可能面临显著的长期变暖。中纬度洋面区域(如北太平洋ODP1021站点所在位置)在短期内温度变化相对较小,但长期来看可能成为变暖显著的区域之一。这主要是由于这些区域的深海混合过程使其对外部强迫的响应有明显延迟,但随着深海温度逐渐调整,表层温度将持续升高直至达到新的平衡。南大洋区域表现出类似的特征,当前是全球变暖“减缓区”(warming hole)之一,但古气候记录暗示这一区域在长期平衡态下可能经历显著变暖。南大洋的升温滞后主要由南极环流和深层对流过程导致,随着这些过程的长期调整,南大洋区域的变暖可能加速^[37]。热带区域尽管是当前变暖的“前沿”,但长期来看其相对变暖幅度可能低于全球其他区域。特别是热带太平洋东部上升流区域,由于特殊的海洋动力学过程,可能在平衡态下表现出相对较弱的变暖。

这些区域性长期变化轨迹的认识对制定适应策略具有重要意义。例如,对于北极周边地区,即使短期温

室气体减排目标实现,也需要准备应对长期持续变暖的可能性;而对于当前变暖相对缓慢的中纬度海洋区域,则不应低估其长期变暖潜力。

5.3 长期碳循环与气候互馈

除了物理气候系统本身的调整外,长期气候变化还涉及碳循环与气候系统的复杂互馈。古气候记录显示,地球系统对长期气候变化的响应包括植被分布、土壤碳库、海洋碳循环等多方面的调整。随着气候系统趋向平衡态,一些关键碳库可能从碳汇转变为碳源,加剧气候变化。例如,持续变暖可能导致永久冻土加速融化,释放甲烷和二氧化碳;海洋变暖和环流变化可能减弱海洋碳吸收能力,甚至导致深海碳释放;陆地生态系统的碳汇功能也可能随着气候变化而减弱^[38]。古气候记录提供了理解这些长期碳-气候互馈的宝贵信息。例如,过去温暖时期的地质记录表明,持续温暖状态下永久冻土区域显著减少,相应碳库可能大量释放^[39]。同样,新近纪的海洋碳埋藏记录也提示,长期温暖气候下海洋微生物降解有机碳的效率提升,可能降低深海碳封存效率^[40]。

将这些碳-气候互馈纳入长期气候预测,可能进一步强化我们对平衡态气候变化的认识:即气候系统长期响应的幅度可能超过短期预测,特别是当考虑到上述潜在正反馈的时候。这再次强调了深时古气候研究对理解地球系统长期行为的独特价值。

5.4 古气候研究的未来方向

类似“用空间换时间”的方法可能代表了未来深时古气候研究范式的转变。传统古气候研究主要扮演着“地球历史档案管理员”的角色,专注于重建和描述过去的气候状态。通过打破对时间轴的绝对依赖,转而基于空间模态建立跨时间尺度的联系,是为古气候研究开始从传统的描述性学科向具有预测能力的现代地球系统科学转变所作的一种尝试。这种转变使得深时古气候记录不再仅仅是过去气候的“展品”,而成为了理解气候系统长期行为规律、约束气候模型、预测未来气候变化的“活资源”。数亿年的地球实验室经验得以转化为可操作的科学知识,为应对当前气候变化挑战提供独特的长期视角。通过整个学界为这种方向所作的深入研究,古气候科学有望从传统的描述性学科进一步发展为预测性学科,为理解和应对气候变化这一重大全球挑战提供更加有力的科学支持。

为进一步增强古气候研究对未来气候预测的贡献,建议以下几个重要的研究方向。

(1) 扩展空间覆盖。当前古气候温度重建在空间覆盖上仍有显著局限,特别是南半球和高纬度地区的记录稀缺。未来研究应致力于增加这些关键区域的古气候记录,构建更完整的全球温度变化空间模式。

(2) 多变量整合。除温度外,降水、海平面、海冰范围等其他气候变量的古气候重建同样重要。未来研究应加强多变量古气候记录的整合分析,提供对气候系统更全面的约束。

(3) 时间尺度桥接。虽然本研究提出了“用空间换时间”的方法,但仍需发展更多技术来桥接不同时间尺度的气候记录。特别是,理解短期瞬态响应如何演变为长期平衡态响应的过程,对预测未来气候变化轨迹至关重要。

(4) 模型-数据融合。加强古气候数据与气候模型的融合,特别是利用数据同化等先进技术将古气候记录与模型模拟更紧密结合,有助于改进对过去气候状态的重建和对气候系统基本物理过程的理解。

(5) 极端事件分析。除了平均状态外,古气候记录中的极端事件信息(如突然变暖事件、干旱事件等)也具有重要价值。这些极端事件可能提供对气候系统非线性行为和临界点的重要启示。

通过这些方向的深入研究,古气候科学有望从传统的描述性学科进一步发展为预测性学科,为理解和应对当前气候变化挑战提供更加有力的科学支持。

6 结论

在之前研究的基础上^[10,11],本研究强调了一种创新的“用空间换时间”方法,旨在增强深时古气候研究对理解和预测现代气候变化的实用价值。通过系统分析和比较不同时间尺度下的温度变化空间模式,我们发现古气候记录包含对未来长期气候变化预测极为重要的信息,特别是在评估气候系统趋向平衡态的长期行为方面。

深时古气候与现代气候变化研究之间的鸿沟主要源于时间尺度和变化幅度的巨大差异。深时古气候研究关注数百万年尺度上的气候变化,而现代气候研究主要关注过去几十年到几百年的变化,温度或其他气候参数的变化可达数倍甚至数十倍之多。这些差异导致两个领域难以直接对话和整合,限制了古气候研究对当前气候变化预测的直接贡献。

本研究利用“用空间换时间”方法通过分析不同区域相对于参考区域(如西太平洋暖池)的温度变化放大倍数,成功地将不同时间尺度的气候变化置于统一的比较框架中。这种方法移除了时间维度的差异,专注于空间温度变化模态,使得深时古气候记录、现代观测数据和气候模型模拟结果可以直接比较。通过应用这一方法,我们发现在百万年尺度上,以中纬度北太平洋为例,这里的温度变化是西太平洋暖池的2.42倍;而在过去160年的现代观测中,这一比例仅为0.92倍。这种显著差异反映了瞬态与平衡态气候响应在空间特征上的根本不同,暗示未来随着气候系统趋向平衡,温度变化的空间分布可能发生重大转变。对气候模型的分析表明,长期平衡态模拟显示的温度放大倍数(约1.99倍)与古气候记录较为接近,支持了古气候研究对理解长期气候变化重要性。

基于与古气候记录一致的模型,我们预测了未来平衡态气候变化的全球空间模式。结果显示,高纬度地区将经历最强的变暖放大效应,放大倍数可高于2.0;中纬度陆地区域的放大倍数通常在1.3~2.0之间;而热带区域的放大倍数则相对较小,多在0.8~1.2之间。这种模式与当前观测到的瞬态变暖模式有显著不同,对长期气候适应规划具有重要启示。

“模态效应”是理解平衡态与瞬态气候变化差异的关键概念。随着温度变化空间模式从初期的热带集中型向高纬度放大型转变,相关的气候反馈机制也会发生变化,可见将空间温度模式演变纳入长期气候预测是非常重要的。本研究展示了古气候记录如何作为评估气候模型的一种约束,以期提高未来气候预测的可靠性。通过比较模型产生的放大倍数与古气候记录,我们可以识别那些更可能准确模拟长期气候变化的模型,从而降低气候预测的不确定性。这种约束方法补充了

传统的基于现代观测的模型评估,为理解气候系统的长期行为提供了新视角。

古气候记录还提示我们注意长期碳循环与气候系统的互馈,这些过程可能在未来几个世纪内进一步放大大气候变化。例如,永久冻土融化、海洋碳循环变化等过程可能从碳汇转变为碳源,加剧气候变暖。理解这些长期互馈需要综合古气候证据和先进的地球系统模型。未来古气候研究应着力扩展空间覆盖、实现多变量整合、桥接不同时间尺度、加强模型-数据融合,以及深入分析极端事件。通过这些方向的深入研究,古气候科学可以更为有效地为应对当前气候变化挑战提供科学指导。

从教育角度看,本研究展示的“用空间换时间”方法为地球系统科学教育提供了工具。通过这种方法,教育者可以更为有效地向学生展示百万年尺度的深时古气候研究如何与现代气候变化紧密相连,从而有助于打破传统认为古气候研究“遥远”且“不实用”的刻板印象。这种连接不仅有助于培养学生的系统思维能力,也能够增强他们对地球科学在应对当前气候变化挑战中的实用价值的认识。将深时古气候置于解决人类面临的实际问题的科学框架中,可以激励更多青年学子投身地球系统科学研究,为可持续发展贡献力量。此外,本研究所用的跨时间尺度比较方法也为地球系统科学教学提供了生动案例,帮助学生理解气候系统的复杂性和长期演变规律,培养他们面对复杂系统的科学思维和分析能力。

总之,类似“用空间换时间”的方法为连接深时古气候与现代气候变化研究提供了新桥梁,展示了古气候记录对预测未来长期气候变化的独特价值。这种方式是为深时古气候研究从传统的描述性科学转变为预测性科学所做的一种尝试,目标是为理解和应对气候变化这一重大全球挑战提供支持。

致谢 感谢“地球系统科学与教育”科学与技术前沿论坛的邀请。感谢两位审稿人细致的审阅及极富建设性的意见。本研究受到了中国科学院、中国科学院广州地球化学研究所以及国家自然科学基金委员会提供的基金支持,在此一并致谢。

参考文献

- 1 Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 2001, 292: 686–693
- 2 Tierney J E, Poulsen C J, Montañez I P, et al. Past climates inform our future. *Science*, 2020, 370: eaay3701
- 3 Judd E J, Tierney J E, Lunt D J, et al. A 485-million-year history of Earth's surface temperature. *Science*, 2024, 385: eadk3705
- 4 Rae J W B, Zhang Y G, Liu X, et al. Atmospheric CO₂ over the past 66 million years from marine archives. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2021, 49: 609–641

- 5 Hönisch B, Royer D L, Breecker D O, et al. Toward a Cenozoic history of atmospheric CO₂. *Science*, 2023, 382: 1136
- 6 Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2021. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021
- 7 Ren G, Jiang D, Yan Q. Characteristics, drivers and feedbacks of paleo-climatic variations and the implications for modern climate change research (in Chinese). *Quat Sci*, 2021, 41: 824–841 [任国玉, 姜大膀, 燕青. 古气候演化特征、驱动与反馈及对现代气候变化研究的启示意义. 第四纪研究, 2021, 41: 824–841]
- 8 Wang H. How to bridge the paleoclimate to present climate studies (in Chinese)? *Earth Sci*, 2022, 47: 3811–3812 [王会军. 古今气候环境研究怎样融合? 地球科学, 2022, 47: 3811–3812]
- 9 Masson-Delmotte V, Schulz M, Abe-Ouchi A, et al. Information from Paleoclimate archives In: Stocker T, ed. Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013
- 10 Liu X, Huber M, Foster G L, et al. Persistent high latitude amplification of the Pacific Ocean over the past 10 million years. *Nat Commun*, 2022, 13: 7310
- 11 Liu X, Zhang Y G, Huber M, et al. Connecting warming patterns of the paleo-ocean to our future. *AGU Adv*, 2025, 6: 2025AV001719
- 12 Liu Z, Pagani M, Zinniker D, et al. Global cooling during the eocene-oligocene climate transition. *Science*, 2009, 323: 1187–1190
- 13 DeConto R M, Pollard D. Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂. *Nature*, 2003, 421: 245–249
- 14 Herbert T D, Lawrence K T, Tzanova A, et al. Late Miocene global cooling and the rise of modern ecosystems. *Nat Geosci*, 2016, 9: 843–847
- 15 Scotese C R, Song H, Mills B J W, et al. Phanerozoic paleotemperatures: the Earth's changing climate during the last 540 million years. *Earth-Sci Rev*, 2021, 215: 103503
- 16 Stocker T. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- 17 Neukom R, Barboza L A, Erb M P, et al. Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. *Nat Geosci*, 2019, 12: 643–649
- 18 Myhre G, Shindell D, Bréon F M et al. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 659–740
- 19 Hoffman J S, Clark P U, Parnell A C, et al. Regional and global sea-surface temperatures during the last interglaciation. *Science*, 2017, 355: 276–279
- 20 Tierney J E, Zhu J, King J, et al. Glacial cooling and climate sensitivity revisited. *Nature*, 2020, 584: 569–573
- 21 Zhang Y G, Pagani M, Liu Z. A 12-million-year temperature history of the tropical Pacific ocean. *Science*, 2014, 344: 84–87
- 22 Kennedy J J, Rayner N A, Atkinson C P, et al. An ensemble data set of sea surface temperature change from 1850: the met office hadley centre HadSST4.0.0.0 data set. *JGR Atmos*, 2019, 124: 7719–7763
- 23 Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4407
- 24 Gregory J M, Andrews T. Variation in climate sensitivity and feedback parameters during the historical period. *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 3911–3920
- 25 Burke K D, Williams J W, Chandler M A, et al. Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 13288–13293
- 26 Lea D W, Pak D K, Spero H J. Climate impact of late quaternary equatorial Pacific Sea surface temperature variations. *Science*, 2000, 289: 1719–1724
- 27 Jian Z, Wang Y, Dang H, et al. Warm pool ocean heat content regulates ocean–continent moisture transport. *Nature*, 2022, 612: 92–99
- 28 York D, Evensen N M, Martínez M L, et al. Unified equations for the slope, intercept, and standard errors of the best straight line. *Am J Phys*, 2004, 72: 367–375
- 29 Zhou C, Zelinka M D, Dessler A E, et al. Greater committed warming after accounting for the pattern effect. *Nat Clim Chang*, 2021, 11: 132–136
- 30 Rugenstein M, Bloch-Johnson J, Gregory J, et al. Equilibrium climate sensitivity estimated by equilibrating climate models. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL083898
- 31 Rugenstein M, Bloch-Johnson J, Abe-Ouchi A, et al. LongRunMIP: motivation and design for a large collection of millennial-length AOGCM simulations. *Bull Am Meteorol Soc*, 2019, 100: 2551–2570
- 32 Super J R, Thomas E, Pagani M, et al. Miocene evolution of North Atlantic Sea surface temperature. *Paleoceanog Paleoclimatol*, 2020, 35: e2019PA003748
- 33 Armour K C, Marshall J, Scott J R, et al. Southern Ocean warming delayed by circumpolar upwelling and equatorward transport. *Nat Geosci*,

- 2016, 9: 549–554
- 34 DiNezio P N, Clement A C, Vecchi G A, et al. Climate response of the equatorial Pacific to global warming. *J Clim*, 2009, 22: 4873–4892
- 35 Andrews T, Gregory J M, Webb M J. The dependence of radiative forcing and feedback on evolving patterns of surface temperature change in climate models. *J Clim*, 2015, 28: 1630–1648
- 36 Dong Y, Proistosescu C, Armour K C, et al. Attributing historical and future evolution of radiative feedbacks to regional warming patterns using a Green’s function approach: the preeminence of the western Pacific. *J Clim*, 2019, 32: 5471–5491
- 37 Wu S, Liu Z, Du J, et al. Change of global Ocean temperature and decadal variability under 1.5°C warming in FOAM. *JMSE*, 2022, 10: 1231
- 38 Friedlingstein P, O’sullivan M, Jones M W, et al. Global Carbon Budget 2020. *Earth Syst Sci Data*, 2020, 12: 3269–3340
- 39 DeConto R M, Galeotti S, Pagani M, et al. Past extreme warming events linked to massive carbon release from thawing permafrost. *Nature*, 2012, 484: 87–91
- 40 Li Z, Zhang Y G, Torres M, et al. Neogene burial of organic carbon in the global ocean. *Nature*, 2023, 613: 90–95

Summary for “从空间模态看气候变化: 深时古气候与现代预测的对话”

Climate change through spatial patterns: a dialogue between deep-time paleoclimate and modern predictions

Yi Ge Zhang^{1*} & Xiaoqing Liu²

¹ State Key Laboratory of Deep Earth Processes and Resources (DEEPER), Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 610240, China

² Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907, USA

* Corresponding author, E-mail: zhangyige@gig.ac.cn

Deep-time paleoclimate research and modern climate change studies exhibit substantial differences in time scales and magnitudes, limiting the application of paleoclimate records to understanding and predicting current climate change. Bridging the gap between million-year paleoclimate records and century-scale modern observations is crucial for improving long-term climate predictions and developing effective adaptation strategies. This study utilizes a “space-for-time” approach by analyzing the amplification factors of temperature changes across global regions relative to the Western Pacific Warm Pool (WPWP), placing climate changes across different time scales into a unified comparative framework. This methodology removes temporal dimension differences and focuses on spatial temperature change patterns, enabling direct comparison between paleoclimate records, modern observations, and climate model simulations.

Our findings reveal that over the past 10 million years, distinct temperature change patterns emerged globally, with mid-to-high latitude regions showing amplification factors generally between 1.5 and 3.0; while in modern observations over the past 160 years, these regions exhibit much lower amplification factors, often below 1.0. Specifically, using the mid-latitude North Pacific (ODP Site 1021) as an example, paleoclimate records show an amplification factor of 2.42 ± 0.23 , while modern observations show only 0.92 ± 0.5 . Interestingly, the global distribution of amplification factors from long-term equilibrium climate model simulations resembles paleoclimate records, with an amplification factor of 1.99 ± 0.07 for the same region.

This fundamental difference between transient and equilibrium climate responses reflects the distinct physical processes operating at different time scales. Modern observations primarily capture the climate system’s immediate response to rapidly changing forcing, dominated by processes such as ocean heat uptake and atmospheric adjustments. In contrast, paleoclimate records and long-term model simulations represent the system’s equilibrium response after sufficient time for full adjustment, including deep ocean temperature changes, ice sheet responses, and ecosystem feedbacks.

This observation suggests that as the climate system approaches equilibrium, the spatial distribution of temperature changes will transition from the transient pattern currently observed to the equilibrium pattern indicated by paleoclimate records. The “pattern effect” concept is crucial for understanding this transition, as different spatial patterns of temperature change trigger different climate feedbacks, potentially altering the system’s sensitivity to greenhouse gas forcing.

Model predictions constrained by paleoclimate records indicate that high-latitude regions will experience the strongest temperature amplification effect (amplification factors of 2.5–3.0) in equilibrium climate change, much higher than the transient amplification factors currently observed. Mid-latitude oceanic regions, currently showing relatively weak warming, might experience long-term warming as deep ocean mixing processes allow full response to external forcing. Tropical regions, while currently at the forefront of warming, might show relatively weaker warming in the long-term equilibrium state.

The implications of these findings extend beyond academic understanding to practical climate policy and adaptation planning. Current climate projections, primarily based on short-term observations and model simulations, might systematically underestimate long-term warming in some regions while overestimating it in others. This study provides a new bridge connecting deep-time paleoclimate with modern climate change research, demonstrates the unique value of paleoclimate records in predicting future global long-term climate change, and offers scientific basis for developing regional climate adaptation and mitigation strategies.

paleoclimate constraints, temperature amplification factor, equilibrium climate change, spatial temperature pattern, pattern effect

doi: [10.1360/CSB-2025-0575](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0575)