

论古今气候环境变化研究的融合问题

王会军^{1*}, 郭正堂², 翦知湓³, 陈发虎⁴, 姜大膀⁵, 鹿化煜⁶, 刘健⁷, 朱宗敏⁸, 张仲石⁹, 燕青⁵, 尹志聪¹, 段明铨¹

1. 南京信息工程大学, 气候系统预测与变化应对全国重点实验室, 南京 210044

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

4. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

5. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

6. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

7. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046

8. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

9. 北京大学物理学院, 北京 100871

* 联系人, E-mail: wanghj@mail.iap.ac.cn

现代气候学研究主要依赖仪器观测数据(如地面气象站、探空系统、海洋浮标及卫星遥感等)来系统认识和理解气候与环境变化。人类气象观测的历史虽然悠久, 但至今数据积累的时间跨度普遍不足百年。这一局限导致极端气候长期演变规律难以刻画, 年代际-百年尺度样本不足, 进而制约地球系统模式评估与气候预测能力的提升。

古气候研究通过解译地球自然档案(如树轮、石笋、冰芯、海洋和黄土等)中的气候代用指标重建地史气候环境演化, 可以有效弥补仪器资料的不足。古气候研究的时间跨度从百万年延伸至年际尺度甚至日尺度, 融合地质、大气、生物及历史等多学科证据, 揭示气候系统自然变率与反馈机制, 约束气候敏感度, 为未来气候预测提供关键历史参照, 因而成为国际科学研究的重要方向。

虽然古气候与现代气候之间有时间尺度的鸿沟, 但随着科学技术进步与学科交叉深化, 古今融合已成为当前地球系统科学发展的必然趋势(图1)。地球系统科学旨在打通时间尺度、打通空间局限、打通圈层隔离、打通学科边界, 形成穿越固体-流体圈层的跨维过程研究体系。古今融合的一个经典案例是二氧化碳(CO₂)浓度观测曲线和基于冰芯重建的古CO₂浓度曲线的融合, 这揭示当代CO₂浓度水平在过去至少200万年里是前所未有的^[1]。另一个关键案例是全球温度观测曲线和多源指标重建的古温度曲线的融合, 这揭示近10年升温幅度可能在过去12.5万年里最高^[1], 当代升温速率可能在过去5亿年里前所未有。这些案例为人为活动导致当代全球



王会军 中国科学院院士, 南京信息工程大学教授、学术委员会主任, 气候系统预测与变化应对全国重点实验室主任。主要研究领域为气候变化与气候预测。

变暖的科学论断提供了关键证据。

古今气候环境变化融合研究在服务国家“双碳”目标和适应气候变化中发挥着重要作用。它有助于揭示气候系统的演化全貌与规律, 理解不同尺度极端事件的形成、发展和结束机制, 科学预警未来气候“临界点”与突变风险; 有助于厘清气候响应不同强迫的关键物理过程、约束气候敏感度, 服务地球系统模式优化和改进, 提升短期气候预测的准确性和长期预估的可信度; 有助于推动多学科交叉研究, 促进地球系统科学研究新范式的建立; 有助于理解生态系统与人类社会的适应性与脆弱性, 支撑和服务人类社会的高质量发展。

古气候模拟是开展古今气候环境变化融合研究的关键手段。古气候模拟是利用基于物理定律构建的地球系统数值

引用格式: 王会军, 郭正堂, 翦知湓, 等. 论古今气候环境变化研究的融合问题. 科学通报

Wang H, Guo Z, Jian Z, et al. Integration strategy of past and present climate and environmental change research (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/CSB-2026-0570

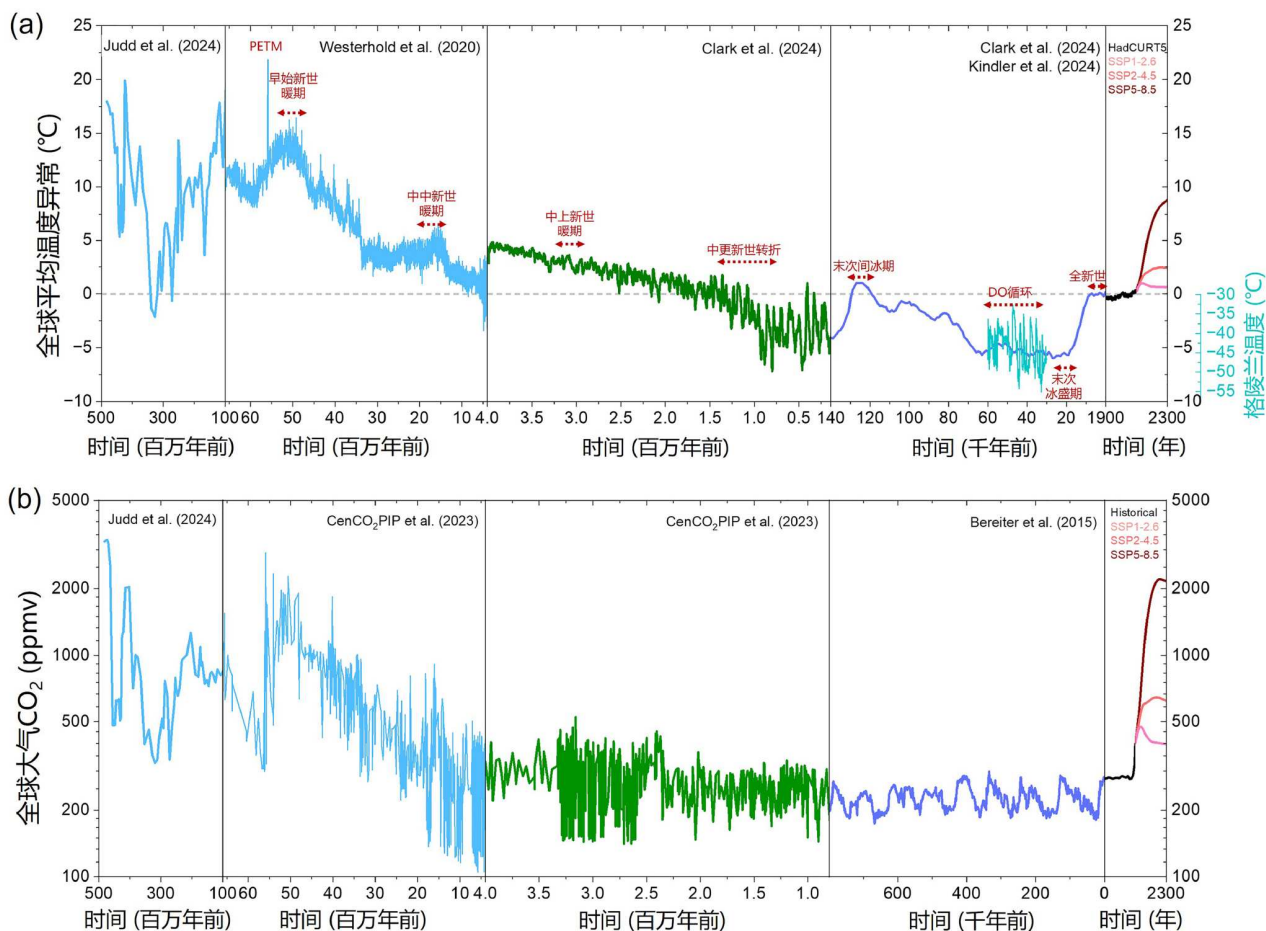


图1 过去5亿年以来不同时间尺度(a)全球平均温度变化(相对于现代)和(b)全球大气CO₂浓度. 温度数据基于Judd等人^[2], Westerhold等人^[3], Clark等人^[4], Kindler等人^[5], Morice等人^[6]和IPCC^[1]获取. CO₂数据基于Judd等人^[2], CenCO₂PIP^[7], Bereiter等人^[8]和IPCC^[1]获取

Figure 1 (a) Global surface temperature change relative to the present-day and (b) atmospheric CO₂ during past 0.5 billion years at various timescales. Surface temperature data is obtained from Judd et al.^[2], Westerhold et al.^[3], Clark et al.^[4], Kindler et al.^[5], Morice et al.^[6], and IPCC^[1]. Atmospheric CO₂ data is obtained from Judd et al.^[2], CenCO₂PIP^[7], Bereiter et al.^[8] and IPCC^[1]

模式, 定量模拟过去气候演化过程; 它和基于地质记录的“古气候重建”共同构成了理解过去气候演化过程与机制的双支柱. 尽管古今气候有诸多不同, 但气候变化响应外强迫的基本物理规律是相同的. 因此, 国际上专门设立了古气候模拟比较计划, 其科学目标定位于理解过去气候变化的物理机制, 进而“以古鉴今”, 为科学评估未来气候变化提供科学基础.

然而, 古今气候环境变化融合研究近些年刚刚起步. 例如, 利用过去不同增暖背景下南亚夏季风变化机制的一致性来提升未来预估的准确性^[9]; 利用古气候模拟方法来研究海平面上升的气候效应^[10,11]. 同时, 古今气候环境变化融合研究仍然存在融合点(共性科学问题)不清楚、聚焦时期(古今可类比气候时段)不明确、研究尺度(时间与空间)不统一等瓶颈, 是地球系统科学目前面临的难点之一^[12]. 本文旨在系统梳理过去气候环境变化研究的前沿和难点, 凝练古今融合

研究的关键科学问题, 在深入调研国内外相关研究条件的基础上, 提出我国古今气候环境变化融合研究的发展思路.

1 研究现状分析

1.1 哪些科学问题最受关注?

20世纪中叶以来, 现代气候学与古气候学同步发展. 20世纪50年代, 随着大气科学理论体系的不断完善, 大气环流模式逐步建立, 并在20世纪70年代进入快速发展阶段^[13,14]. 在此基础上, 气候模式由单一大气分量逐步迈向多圈层耦合, 形成了海气耦合气候模式, 并进一步发展为纳入碳循环等关键生物地球化学过程的地球系统模式. 历次的耦合模式对比计划都支撑了联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告. 随着古气候证据的积累与气候模式的发展, 古气候模

拟开始出现^[15,16]，“国际古气候模拟比较计划”应运而生。当然，古气候模拟的萌芽可以追溯至米兰科维奇通过计算北纬65度太阳辐射解释过去的冰期-间冰期旋回。20世纪70年代，海洋沉积物揭示的地球气候轨道周期与太阳辐射周期的理论计算完美一致，这极大地推动了古气候学的快速发展。基于海洋沉积、黄土、冰芯、洞穴石笋和湖泊沉积等的重建记录揭示出越来越多的古气候演化规律。随着学科发展，一些现代气候和古气候共同关心的科学问题开始出现，归纳起来包括以下四个方面：不同时间尺度(构造-轨道-亚轨道)过去全球增、降温的气候环境影响、气候环境变化的驱动机制、重大气候和极端环境事件的成因机制、地球系统模式模拟偏差。

1.2 过去全球增、降温的气候环境影响

随着全球变暖的加剧，地质历史的典型冷暖气期，尤其是地质证据相对丰富的新生代暖期，受到更多的关注。他们为预估未来气候变化提供历史类比，为校验与优化气候模型提供历史场景，为揭示地球系统的长期反馈机制提供历史证据。

始新世(距今约5600万~3390万年前)是典型的温室气候时期。“始新世适宜期”，大气CO₂浓度可能超过1000 ppm^[7]；随后，随着CO₂浓度下降和洋流重组，气候整体转冷，南极开始形成冰盖，奠定了后续冰室气候的基础^[3]。若未来温室气体排放不加控制(如共享社会经济路径SSP5-8.5)，大气CO₂浓度可能达到始新世水平^[1]。

上新世(距今约530万~260万年前)被认为是距今最近且CO₂浓度(约360~420 ppm)与当今相近的持续性暖期。当时全球平均温度比现在高2.5~4℃，海平面高10~20 m，北极无大规模陆地冰盖^[17]。上新世为理解未来中等排放情景(如SSP2-4.5~SSP3-7.0)下的气候响应提供关键类比^[18]。

中上新世至早更新世(距今约350万~100万年前)是地球从“暖室”向“冰室”气候转型的关键期。约270万年前，北半球冰盖急剧扩张，标志着第四纪冰期的开始，地球气候进入剧烈的冰期-间冰期旋回^[3]。此次暖-冷转折揭示了碳循环(尤其是海洋碳储库)在调节全球气候长期演变中的核心作用，为理解当前人为排放背景下碳循环的潜在演变及气候反馈提供长期视角。

末次间冰期(距今约12.9万~11.6万年前)是距离现在最近的自然暖期，其CO₂浓度与工业革命前相近，但全球平均温度高0.5~1.5℃；该时期格陵兰与南极冰盖显著消融，分别贡献了约3和4.4 m的海平面上升，北极海冰大面积消退^[19,20]。末次间冰期为评估未来海平面上升的气候影响提供一个关键基准^[10]。

末次冰盛期(距今约2.1万年前)及冰消期提供了极端寒冷与快速回暖的自然案例。末次冰盛期时，CO₂浓度约为180 ppm，全球平均温度比现代可能低6~8℃，海平面比现代低120~130 m^[21]；随后，地球快速“解冻”进入末次冰消期。气

候回暖与冰盖融化导致海平面急剧上升，其上升速率大致在每年4~50 mm^[22]，最大上升速率是现代海平面上升速率(约每年3~4 mm)的十几倍^[1,22]。未来如果冰盖开始大规模失稳，其影响(如海平面上升)剧烈并且极具灾难性^[23]。

1.3 不同尺度气候环境变化的驱动机制

过去地球气候与环境变化存在多时间尺度变化特征，大致可分为构造尺度(百万年)、轨道尺度(数十万年~万年)和亚轨道尺度(<千年)。三者驱动机制不同，但相互作用、紧密耦合：长尺度过程为短尺度变化奠定基础背景，短尺度过程亦可反向调制长尺度趋势，形成复杂的跨尺度反馈体系。当前研究已初步厘清各尺度的核心驱动力，但跨尺度气候效应等关键问题仍有待突破。

在地球百万年尺度上，新生代气候变化主要表现为长期的降温趋势，伴随高纬冰盖的收缩与扩张，其主要由构造演化(如高原隆升、海道开合)与温室气体浓度变化驱动。新生代长期变冷与大气CO₂阶段性下降同步^[7]；距今约3400万年前南极冰盖形成，与CO₂下降及海洋环流改变有关^[24]；晚上新世(距今约260万年前)格陵兰冰盖出现，与CO₂下降及热带海道变化(巴拿马、印尼海道)导致的环流调整相关^[25]。全球季风系统(尤其是非洲-亚洲-澳洲季风)的形成与海陆分布变化及青藏高原隆升密切相关^[9]。海陆分布与温室气体变化本质上是地球深部与表层耦合作用的结果。构造运动改变海陆分布与CO₂浓度，进而影响表层气候生态系统^[26]，并对碳循环与水循环产生反馈。因此，构造尺度古气候研究有助于认识现代气候起源的驱动力，理解深部-表层耦合过程对碳循环、水循环及气候稳定性的影响。

轨道尺度(数十万至万年)全球气候呈现规律性的冰期-间冰期旋回，这主要由地球轨道三要素(岁差、地轴倾角、偏心率)引发的太阳辐射纬向和季节变化所驱动。然而，气候响应与太阳辐射之间的不匹配是关键的科学难题。距今约260~120万年前，高纬夏季太阳辐射由2万年周期主导，而夏季累积太阳辐射呈4万年周期^[27,28]。中更新世转型期(Mid-Pleistocene Transition; 距今约120~70万年前)之后，气候变化主导周期由4万年转为10万年^[29,30]，但太阳辐射仍为2万和4万年周期。这种气候周期与太阳辐射周期的不一致被称为“10万年难题”，其背后的物理机制目前仍无定论，涉及复杂的气候反馈及非线性作用，包括碳循环反馈、冰盖反馈等^[31~36]。而在中国，古气候代用记录之间的周期信号差异，例如东亚黄土记录的~10万年主导周期^[37]与石笋记录的~2万年主导周期^[38]，可以用低纬夏季日照量和冰量影响两条路径来解释^[39]。这些难题反映了气候系统对辐射响应的非线性，以及气候-冰冻圈-碳循环的相互作用与自发振荡。因此，轨道尺度古气候研究有助于理解气候响应外强迫的关键过程及地球圈层间的复杂相互作用。

亚轨道尺度(千年尺度)气候振荡或突变，主要包括Dans-

gaard-Oeschger(D-O)旋回和Heinrich事件两大类^[40],与北大西洋经向翻转环流(AMOC)状态转换有关^[41].百年-年代际尺度上,过去千年气候波动体现为外强迫(太阳辐射、火山活动)与内部变率(太平洋年代际振荡、大西洋年代际振荡等)的共同作用.典型事件包括中世纪异常期(约950~1250 AD)和小冰期(约1450~1850 AD)^[42].中世纪异常期由太阳辐射偏强、火山活动减少及内部过程共同驱动;小冰期则源于太阳活动减弱、火山喷发增多与内部变率的协同作用.在区域尺度上,中国东部年代际干旱与弱季风事件直接相关,季风减弱主要由内部变率触发^[43].历史时期自然外强迫与人为活动亦可通过直接或间接途径调制东亚夏季风的年代际变率^[44].

1.4 过去重大气候和极端环境事件的成因机制

古气候突变事件反映了气候系统跨越临界阈值、发生状态跃迁的过程.研究其成因与演变规律,有助于揭示气候扰动的传导放大机制,深化对未来突变风险的认知.地球深部过程、内部反馈与外部强迫的跨尺度耦合,共同驱动了重大气候与极端环境事件,提升对其物理规律的理解,是提高地球系统模式模拟能力与未来预估可信度的关键.

地球深部过程是地质时期极端气候与环境事件的重要触发因素,其通过构造运动、火山活动、碳释放等过程,叠加气候系统内部反馈,深刻影响着地表气候与环境.古新世-始新世极热事件(PETM)是最典型的新生代大规模碳释放事件,成因包括:气候系统内部碳库失稳(如甲烷水合物分解释放、冻土碳库氧化^[45])与地球深部过程(如火山去气、岩浆侵入富有机质岩层^[46]).该事件可能在高轨道偏心率背景下被触发或放大^[47].

在轨道-亚轨道时间尺度上,典型气候事件包括D-O旋回、Heinrich事件(H事件)、新仙女木事件以及Bond事件.D-O旋回是指末次冰期及其他冰期背景下,冰阶与间冰阶交替出现的高频气候振荡,平均周期约1500年^[48].连续几个D-O旋回冰阶气温逐渐降低,冰阶中最冷的事件称为H事件,与冰盖大规模崩塌相关.D-O旋回与AMOC强弱振荡密切相关^[49].新仙女木事件是末次冰消期全球变暖趋势下的一次突发性降温事件,其形成机制与H事件有相似之处^[50],故又称为H0事件.Bond事件是全新世以来出现的8次冰筏事件,周期为约1500年,与AMOC千年尺度弱振荡相符^[51].这些气候事件主要由气候系统内部正反馈驱动,源于冰盖、海洋与大气相互作用,凸显了气候系统的非线性响应特征.

1.5 地球系统模式模拟偏差

古气候与现代气候研究依赖于地球系统模式,系统评估模拟偏差,既是检验模式可靠性的关键,也是提升未来预测能力的重要基础.古气候与现代气候模拟偏差往往具有共性来源,涉及模式中关键物理过程的简化和参数化(例如云-辐

射反馈、气溶胶-云相互作用、积雪-反照率反馈,以及小尺度海洋环流等).在古气候极端条件下被放大从而暴露出的模拟缺陷,很可能同样制约未来变暖情景下的预估可靠性.

始新世模拟对比计划(DeepMIP-Eocene)表明高大气CO₂浓度是始新世暖期(距今约5600~4900万年前)的主控因素,而纬向温度梯度减弱(除CO₂作用外)还与地表反照率和辐射特性等边界条件密切相关.模拟与地质记录在温度、降水及环流方面总体一致,能再现东亚干旱带分布^[52]及南大洋深层水主导的环流格局^[53].然而,模拟普遍低估中高纬及西南太平洋海温,高估低纬降水,低估高纬降水,这可能与对流、季风、植被及极地云参数化不足有关^[54,55].

上新世模拟对比计划(PlioMIP)表明模式可再现上新世全球均温较工业革命前升高2.5~4.0℃,但中高纬存在显著冷偏差,其中北大西洋与东西伯利亚可达10℃以上^[56].这些偏差与模式气候敏感度^[56]、气溶胶-云相互作用参数化^[57]及海洋混合偏弱等密切相关.

末次冰盛期气候模拟可以合理再现该时期全球降温(约3.3~7.2℃)、季风减弱及赤道辐合带南移等大尺度特征^[58],但普遍低估了副热带和中国地区的降温幅度,尤其在冬季^[58],同时模拟的赤道辐合带南移幅度偏弱^[59].这些偏差源于冰盖重建的不确定性、模式过程简化及代用指标的重建误差.

全新世暖期气候模拟可以再现北半球增暖和季风增强的响应,但普遍高估夏季温度、低估季风降水^[60].同时,区域尺度模拟-记录差异显著,且不同模式模拟的东亚季风区降水变化甚至相反^[61].这些偏差与地表状况、西太平洋海温模拟不确定性及背景季风强度刻画不准有关^[61].

过去千年气候模拟能够再现中世纪异常期与小冰期的基本特征^[62]以及中国区域降水空间模态^[63],但普遍低估了两个时期的温度变幅.这可能与气候模式内部变率偏弱、气候外部强迫强度不足^[64]或未考虑气候记忆过程^[65]有关.

现代气候模拟可以较好地再现1979年以来的全球温度和大范围降水变化特征,准确反映全球及区域的变暖趋势^[1].但不同模式在气候敏感度、云反馈、冰雪反照率反馈等方面差异明显^[66],进而影响变暖幅度与极地放大效应的预测一致性.同时,各模式对流、云微物理、气溶胶-云相互作用及陆气耦合等过程的描述差异^[67]影响降水模拟的可靠性.此外,模式还存在一些共性问题,包括沿岸风场和上升流强度模拟偏弱,冰雪反照率反馈模拟存在偏差以及对地形效应刻画不足等^[68].

1.6 我国的研究现状如何?

在国家层面的持续布局与支持下,我国古气候环境重建与模拟研究近年来实现了快速发展,整体研究水平和国际影响力显著提升.自《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》将“人类活动对地球系统的影响机制、全球变化与区域响应”确立为十大基础科学重大问题之一以来,古

气候环境研究逐步成为我国地球系统科学的重要组成部分。在“十二五”时期实施的全球变化研究国家重大科学研究计划,以及“十三五”(2016~2020年)期间国家重点研发计划“全球变化与应对”重点专项的持续支持下,我国围绕冰芯、湖泊、海洋沉积物、黄土和石笋等多类气候代用资料,系统推进了古气候重建研究,在年代学约束、区域气候演变及关键气候事件解析等方面取得了一系列具有国际影响力的成果。“十四五”时期(2021~2025年),面向地球系统科学整体发展需求,国家进一步通过“地球系统与全球变化”等重点专项,持续深化对古气候环境演变规律的综合研究。在政策引导和科研投入的共同推动下,我国古气候环境研究呈现出快速而蓬勃的发展态势,培养了一大批古气候领域的科技人才。

相对而言,我国古气候模拟研究持续发展,但起步较晚、体量较小,与现代气候研究的结合有待加强。2000年左右,我国古气候模拟的相关SCI论文年发表数量仅有20余篇(图2)。随着学科的发展,2019年“古气候学(D0503)”成为一个新的分支出现在国家自然科学基金大气科学学科代码中;随后于2020年进一步调整为“古气候模拟与动力学(D0503)”。2020年以来,我国古气候模拟年发文量超过100篇,占古气候领域的17%~23%(图2)。在国家自然科学基金委员会大气科学领域(D05)面上项目和青年项目申请中,古气候模拟(D0503)申请量最少,占比不足2%;2023、2024和2025年分别占1.3%、1.6%和1.8%^[69-71]。这些都说明古气候模拟领域研究队伍规模、持续产出能力及国际影响力仍有极大的提升空间。此外,现有国家级相关科研平台多以古气候重建或现代气候研究为核心,仍然缺乏以重建与模拟相结合、古今气候相结合的综合性研究平台。

综上所述,我国的古今融合研究具有坚实基础和显著潜力,但也面临挑战。我国古气候研究长期以来在重大研究计划和战略性专项支持下形成了以重建研究为主的优势格局,拥有丰富且高质量的古气候代用资料。同时,现代气候研究为揭示气候过程的物理机制、发展理论框架以及检验和改进地球系统模式提供了关键依据。我国在季风变化、极端气候以及气候预测等方向已建立起较为完善的观测体系,拥有扎实的数值模拟研究基础,发展了多样的诊断分析方法,积累了丰富的模式评估经验。然而,古今融合研究需要更深入的跨学科合作,因此也面临挑战,包括:复合型人才需求高,但研究队伍整体规模偏小,跨学科高层次人才相对短缺;古今融合关键科学问题不清晰,所需的基础数据体系与关键技术仍显薄弱;国际学术影响力和话语权仍需持续积累。

2 古今融合研究的重要领域及关键科学问题

古今融合的核心价值在于揭示地质历史中的冷暖期、多尺度气候环境演化过程和突发事件背后的地球圈层耦合过程与机制,为未来气候环境变化提供可检验的物理约束。其核心一是在于揭示古今气候环境演化的共同特征与机制,

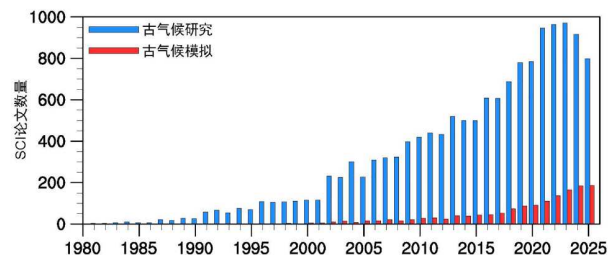


图2 我国古气候和古气候模拟研究的SCI论文年发文量(Web of Science, 2026-01-20)

Figure 2 Annual number of SCI papers on paleoclimate and paleoclimate modeling in China (Web of Science, 2026-01-20)

二是揭示不同气候背景下气候系统对同一强迫的非线性响应与多圈层耦合差异。因此,古今气候环境变化融合研究需要回答的核心科学问题是:从地史到未来不同时间尺度上气候环境系统响应外强迫的物理机制有何异同?这种响应如何通过多圈层耦合产生非线性放大、临界转折和长期反馈?回答这一核心科学问题可以从以下五个方面—典型时段、多时间尺度变率、重大事件、关键驱动力、模式模拟偏差—逐步深入(图3)。

2.1 古今气候环境典型时段对比

古今气候环境典型时段对比的本质,是在统一的物理与动力学框架下,将地质历史时期的自然气候演化与现代人为主导的气候环境变化进行系统比较与机制分析。其科学价值不在于简单的温度或降水差异对照,而在于识别气候环境系统在不同背景态下的状态依赖性、反馈过程等,从而为未来气候环境预估提供跨时间尺度的物理约束与边界条件。因此,该研究是推动古今融合研究的关键抓手,是构建跨地质—现代时间尺度的一体化地球系统动力学框架的基础环节。古今气候环境典型时段对比,一方面,可以将过去典型时段与现代及未来直接进行比较(如,增温幅度、气候敏感性等);另一方面,可以采用数据同化等技术融合数值模拟和地质证据,进而与现代及未来暖期开展气候机理对比。

其核心科学问题是:在统一的能量平衡与地球系统框架下,气候环境响应是否具有状态依赖性?围绕这一核心,可聚焦以下两个关键科学问题:(1)不同气候背景态下,气候变率结构与遥相关模态是否发生系统性改变?包括极地放大、热带—高纬相互作用、季风—海洋耦合等机制是否存在状态依赖特征。(2)不同气候背景态下,极端气候环境与灾害事件的空间分布与振幅结构有何差异?即气候环境系统在冷态、暖态及过渡态下,其极端响应的区域性、非对称性与强度是否存在规律性变化。

2.2 多时间尺度变率

多时间尺度气候变率研究是实现古今气候真正融合的



图3 古今气候环境融合研究的重点领域

Figure 3 Key research fields of integrating past and present climate and environmental change

关键理论突破之一。古气候记录主要反映低频变化(百年至百万年尺度), 而现代观测系统捕捉高频过程(分钟至年代际尺度)。如果缺乏跨尺度统一理论, 古今气候研究将停留在时间断裂的比较层面。多时间尺度气候变率研究的科学价值在于: 通过分解内部变率与外部强迫的贡献, 揭示气候环境系统在不同时间尺度上的能量级联结构、记忆效应与动力耦合机制, 从而建立一个贯通“分钟-小时-年代际-千年-地质时间”的统一时间尺度理论框架^[72], 为理解现代气候环境不稳定性与长期风险提供理论基础。多时间尺度气候变率研究, 一方面, 可以利用气候模拟, 结合或同化高分辨率古气候记录, 揭示多时间尺度气候变率及跨时间尺度作用; 另一方面, 可以利用基于现代气候的人工智能技术在某种程度上约束模拟的气候变率的不确定性。

其关键科学问题是: 气候系统在不同时间尺度上的变率是否存在耦合与调制关系? 可从以下两个重点问题开展研究: (1) 全球季风系统的起源、演化与多尺度耦合机制是什么? 包括海陆分布、轨道强迫与内部振荡之间的相互作用。(2) 气候系统的跨时间尺度效应有哪些基本特征, 其驱动力与能量传递路径是什么? 即不同尺度变率是否独立, 还是存在低频调制高频或高频触发低频的非线性耦合过程。

2.3 重大事件

古今气候环境重大事件研究, 关注的是气候环境系统在不同时间尺度上的突变, 本质上是对气候环境系统非线性响应机制、阈值行为与多稳态结构的系统探索。其科学价值在于: 通过研究地质历史与现代观测中的重大气候环境事件,

识别气候环境系统的临界结构与反馈机制,为未来气候环境风险评估提供低频演化约束与物理参照。同时,重大事件为检验气候系统模式在极端背景态下的稳定性与响应能力提供了关键样本。古今气候环境重大事件研究,一方面,可以聚焦类似辐射强迫导致的气候反馈、状态跃迁与级联过程;另一方面,可以识别物理规律类似的外强迫(如大规模火山喷发或大火成岩省导致的大规模碳释放)引发的空间差异与机制。

其关键科学问题是:气候环境系统在重大事件中的非线性响应机制与阈值结构是什么,是否存在多稳态与不可逆性?可聚焦以下两个关键问题:(1)大气-海洋环流的历史演化过程及现代格局形成的动力机制是什么?包括经向翻转环流、季风系统及极地-热带耦合的形成与重组。(2)古气候突变与临界点的物理特征与触发机制是什么,是否可与未来类比?包括临界减速、反馈级联及路径依赖等动力学特征。

2.4 古今气候环境变化的关键驱动力

古今气候环境变化关键驱动力研究,其本质是识别不同时间尺度气候环境变化的主控因子,建立跨时间尺度的统一动力学框架。其目标是厘清外强迫、圈层反馈与内部变率之间的层级关系与因果链条。其科学价值在于:通过建立统一动力框架,发展气候学理论,推动多学科融合,助力建立流体-固体耦合的复杂地球系统模式,实现地球系统理论的重要突破。古今气候环境变化的关键驱动力研究,需要利用数值模拟、数据同化与人工智能等技术,一方面,对比地球系统外强迫或深部作用(如太阳辐射或板块运动)与气候系统内部变率(如厄尔尼诺-南方涛动)调控气候系统的相对重要性;另一方面,量化人类活动与自然气候环境系统的相互作用。

其关键科学问题是:古今气候环境变化中是否存在一个跨尺度的统一驱动力?可以从以下两个关键科学问题入手解决:(1)古今气候环境变化中碳、水循环及其耦合过程有什么异同?包括自然背景调节与人为扰动之间的差异。(2)人类如何影响自然气候环境系统,又如何适应它?包括人类演化与人类文明发展阶段对气候系统的影响与适应。

2.5 模式模拟偏差

模式模拟偏差研究是古今融合中的基础方法学问题。古今融合最终依赖气候模式作为统一物理平台。如果模式存在系统性结构偏差,则古今对比、敏感度估计与阈值判断都可能产生系统误判。其科学价值在于:识别模式误差的物理来源与状态依赖性,检验模式在不同背景态下的结构一致性与动力稳定性,从而提升跨气候态预测能力。模式模拟偏差研究,需要利用多模式-多参数-多边界集合模拟试验,识别模

式的“结构性偏差”。一方面,可聚焦同一时期,在统一边界条件下,开展多模式对比研究,辨析不同模式间的共性偏差;另一方面,开展多时期纵向对比,辨析不同时期模式的共性偏差。

其关键科学问题是:模式误差的物理来源是否具有气候状态依赖性,其结构误差是否影响气候敏感度与极端响应估计?可以从以下两个关键科学问题入手解决:(1)古今模拟中模式模拟偏差的共性特征是什么,是否具有气候背景依赖性?(2)同化与人工智能方法能否有效识别并降低结构性偏差,是否能够建立模式-数据融合的约束体系?

3 发展思路与政策建议

古今气候环境变化研究的融合是一个需要大气、海洋、地理、地质、生态和计算机等多个学科协同攻关的系统工程。为更好地支撑国家应对气候变化与可持续发展,它亟需在流体-固体跨尺度相互作用及耦合模拟、超高分辨率模拟、大数据与人工智能驱动的气候重建、气候数据同化等新方法的研发中加大投入,建立更准确的跨时间尺度的天气气候研究与预测手段。推动该领域发展,应加强顶层设计,统筹国内外合作,从政策引导、人才培养、经费支持与平台建设等方面协同推进。具体建议如下:

(1)凝练重大科学问题。围绕气候敏感度与临界点、多尺度气候变率与极端事件、地球系统多圈层耦合与反馈以及自然变率与人类活动互馈等关键方向,聚焦制约预测能力的核心瓶颈,在国家战略引导与跨学科平台支撑下推进系统性攻关。

(2)优化人才培养体系。培养具备大气、海洋与地质等交叉背景的复合型人才,加强青年人才支持与梯队建设,推动古今融合方向的高水平团队发展,并深化国际协同培养,提升国际影响力。

(3)推动标准化数据库建设和共享。制定与国际数据库可兼容的标准化数据共享框架,建设古气候代用资料和数值模拟的标准化数据库,为古今融合研究提供关键的数据基础。

(4)强化经费支持与重大计划布局。将古今气候环境研究融合作为国家中长期科技发展的重要方向,形成稳定支持的机制;依托高水平专家团队形成学科发展研究和咨询重要力量,优化科研资源配置;通过国际合作基金与政府间协定,拓展与全球优秀科研机构的合作。

(5)完善平台与支撑体系。建设国家级古今气候融合研究中心或跨学科实验室,强化协同创新能力;推进国产气候模式与数据、软件体系建设,促进数据与代码共享并加强知识产权保护;完善涵盖激励、资源配置、风险容错与成果转化的全链条管理体系。

致谢 感谢国家自然科学基金委员会-中国科学院前沿交叉研判联合项目(L2424212, 5-XKC2025013)资助。南京大

学张瀚之、王涛,上海交通大学李大玮,南京师范大学宁亮,中国科学院大气物理研究所郭东林、张冉、江南莹等对本文亦有贡献,在此一并致谢!

推荐阅读文献

- 1 IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. In: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- 2 Judd E J, Tierney J E, Lunt D J, et al. A 485-million-year history of Earth's surface temperature. *Science*, 2024, 385: 1316
- 3 Westerhold T, Marwan N, Drury A J, et al. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, 2020, 369: 1383–1387
- 4 Clark P U, Shakun J D, Rosenthal Y, et al. Global and regional temperature change over the past 4.5 million years. *Science*, 2024, 383: 884–890
- 5 Kindler P, Guillemin M, Baumgartner M, et al. Temperature reconstruction from 10 to 120 kyr b2k from the NGRIP ice core. *Clim Past*, 2014, 10: 887–902
- 6 Morice C P, Kennedy J J, Rayner N A, et al. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126: e2019JD032361
- 7 Hönisch B, Royer D L, Breecker D O, et al. Toward a Cenozoic history of atmospheric CO₂. *Science*, 2023, 382: eadi5177
- 8 Bereiter B, Eggleston S, Schmitt J, et al. Revision of the EPICA Dome C CO₂ record from 800 to 600 kyr before present. *Geophys Res Lett*, 2014, 42: 524–549
- 9 He L, Zhou T, Guo Z. Past warm intervals inform the future South Asian summer monsoon. *Nature*, 2025, 641: 653–659
- 10 Zhang Z, Jansen E, Sobolowski S P, et al. Atmospheric and oceanic circulation altered by global mean sea-level rise. *Nat Geosci*, 2023, 16: 321–327
- 11 Dong C, Zhang Z, Keenlyside N, et al. Intensification of extreme cold events in East Asia in response to global mean sea-level rise. *Nat Commun*, 2025, 16: 8700
- 12 Wang H J. 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]
- 13 Charney J G, Eliassen A. A numerical method for predicting the perturbations of the middle latitude westerlies. *Tellus*, 1949, 1: 38–54
- 14 Bryan K, Manabe S, Pacanowski R C. A global ocean-atmosphere climate model. Part II. The oceanic circulation. *J Phys Oceanogr*, 1975, 5: 30–46
- 15 Budyko M I. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*, 1969, 21: 611–619
- 16 Kutzbach J E. Monsoon climate of the early Holocene: climate experiment with the Earth's orbital parameters for 9000 years ago. *Science*, 1981, 214: 59–61
- 17 Burton L E, Oldeman A M, Haywood A M, et al. An assessment of the Pliocene as an analogue for our warmer future. *Glob Planet Change*, 2025, 252: 104860
- 18 Tierney J E, Zhu J, King J, et al. Glacial cooling and climate sensitivity revisited. *Nature*, 2020, 584: 569–573
- 19 Sime L C, Wolff E W, Oliver K I C, et al. Evidence for warmer interglacials in East Antarctic ice cores. *Nature*, 2009, 462: 342–345
- 20 Otto-Bliesner B L, Brady E C, Zhao A, et al. Large-scale features of Last Interglacial climate: results from evaluating the *lig127k* simulations for the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6)–Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP4). *Clim Past*, 2021, 17: 63–94
- 21 Dalton A S, Stokes C R, Batchelor C L. Evolution of the Laurentide and Innuitian ice sheets prior to the Last Glacial Maximum (115 ka to 25 ka). *Earth-Sci Rev*, 2022, 224: 103875
- 22 Carlson A E, Clark P U. Ice sheet sources of sea level rise and freshwater discharge during the last deglaciation. *Rev Geophys*, 2012, 50: RG4007
- 23 Overpeck J T, Otto-Bliesner B L, Miller G H, et al. Paleoclimatic evidence for future ice-sheet instability and rapid sea-level rise. *Science*, 2006, 311: 1747–1750
- 24 DeConto R M, Pollard D. Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂. *Nature*, 2003, 421: 245–249
- 25 Lunt D J, Foster G L, Haywood A M, et al. Late Pliocene Greenland glaciation controlled by a decline in atmospheric CO₂ levels. *Nature*, 2008, 454: 1102–1105
- 26 Zondervan J R, Hilton R G, Dellinger M, et al. Rock organic carbon oxidation CO₂ release offsets silicate weathering sink. *Nature*, 2023, 623: 329–333
- 27 Huybers P. Early Pleistocene glacial cycles and the integrated summer insolation forcing. *Science*, 2006, 313: 508–511
- 28 Berger A, Yin Q, Wu Z. Length of astronomical seasons, total and average insolation over seasons. *Quat Sci Rev*, 2024, 334: 108620
- 29 Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 2005, 20: 2004PA001071

- 30 Wang P X, Tian J, Cheng X R. Transition of Quaternary glacial cyclicality in deep-sea records at Nansha, the South China Sea (in Chinese). *Sci Sin Terrae*, 2001, 31: 793–799 [汪品先, 田军, 成鑫荣. 第四纪冰期旋回转型在南沙深海的记录. *中国科学: 地球科学*, 2001, 31: 793–799]
- 31 Tziperman E, Gildor H. On the mid-Pleistocene transition to 100-kyr glacial cycles and the asymmetry between glaciation and deglaciation times. *Paleoceanography*, 2003, 18: 1001
- 32 Paillard D, Parrenin F. The Antarctic ice sheet and the triggering of deglaciations. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 227: 263–271
- 33 Chalk T B, Hain M P, Foster G L, et al. Causes of ice age intensification across the Mid-Pleistocene Transition. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 13114–13119
- 34 Willeit M, Ganopolski A, Calov R, et al. Mid-Pleistocene transition in glacial cycles explained by declining CO₂ and regolith removal. *Sci Adv*, 2019, 5: eaav733
- 35 Berends C J, Köhler P, Lourens L J, et al. On the cause of the Mid-Pleistocene transition. *Rev Geophys*, 2021, 59: e2020RG000727
- 36 An Z, Zhou W, Zhang Z, et al. Mid-Pleistocene climate transition triggered by Antarctic Ice Sheet growth. *Science*, 2024, 385: 560–565
- 37 Hao Q, Wang L, Oldfield F, et al. Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400,000-year minima in insolation variability. *Nature*, 2012, 490: 393–396
- 38 Cheng H, Edwards R L, Sinha A, et al. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations. *Nature*, 2016, 534: 640–646
- 39 Guo Z, Shi F, Tan N. Orbital-scale Asian monsoon variability and its forcing mechanisms: a new conceptual model. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2026, 694: 113814
- 40 Bond G, Heinrich H, Broecker W, et al. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic Ocean during the last glacial period. *Nature*, 1992, 360: 245–249
- 41 Voelker A H L. Global distribution of centennial-scale records for Marine Isotope Stage (MIS) 3: a database. *Quat Sci Rev*, 2002, 21: 1185–1212
- 42 Ning L, Liu Z, Mann M E, et al. Decadal climate variability during the pre-industrial Common Era: characteristics and mechanisms. *Sci Bull*, 2025, 70: 2190–2203
- 43 Chen K, Ning L, Liu Z, et al. One drought and one volcanic eruption influenced the history of China: the late Ming Dynasty mega-drought. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2020GL088124
- 44 Ning L, Chen K, Liu J, et al. How do volcanic eruptions influence decadal megadroughts over eastern China? *J Clim*, 2020, 33: 8195–8207
- 45 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
- 46 Kender S, Bogus K, Pedersen G K, et al. Paleocene/Eocene carbon feedbacks triggered by volcanic activity. *Nat Commun*, 2021, 12: 5186
- 47 Chu R, Wu H, Fang Q, et al. Eccentricity pacing of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum: multi-section astrochronology and statistical insights in China. *Glob Planet Change*, 2025, 249: 104800
- 48 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 1993, 364: 218–220
- 49 Ganopolski A, Rahmstorf S. Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model. *Nature*, 2001, 409: 153–158
- 50 Alley R B. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. *Quat Sci Rev*, 2000, 19: 213–226
- 51 Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on north Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, 294: 2130–2136
- 52 Li X, Zhang R, Zhang Z, et al. Do climate simulations support the existence of East Asian monsoon climate in the Late Eocene? *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2018, 509: 47–57
- 53 Zhang Y, de Boer A M, Lunt D J, et al. Early Eocene ocean meridional overturning circulation: the roles of atmospheric forcing and strait geometry. *Paleoceanog Paleoclimatol*, 2022, 37: e2021PA004329
- 54 Lunt D J, Bragg F, Chan W L, et al. DeepMIP: model intercomparison of early Eocene climatic optimum (EECO) large-scale climate features and comparison with proxy data. *Clim Past*, 2021, 17: 203–227
- 55 Dutta D, Jucker M, Sherwood S C, et al. Early Eocene low orography and high methane enhance Arctic warming via polar stratospheric clouds. *Nat Geosci*, 2023, 16: 1027–1032
- 56 Haywood A M, Tindall J C, Dowsett H J, et al. The Pliocene Model Intercomparison Project Phase 2: large-scale climate features and climate sensitivity. *Clim Past*, 2020, 16: 2095–2123
- 57 Feng R, Otto-Bliesner B L, Xu Y, et al. Contributions of aerosol-cloud interactions to mid-Piacenzian seasonally sea ice-free Arctic Ocean. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 9920–9929
- 58 Kageyama M, Harrison S P, Kapsch M L, et al. The PMIP4 Last Glacial Maximum experiments: preliminary results and comparison with the PMIP3 simulations. *Clim Past*, 2021, 17: 1065–1089
- 59 Wang T, Wang N, Jiang D. Last glacial maximum ITCZ changes from PMIP3/4 simulations. *J Geophys Res Atmos*, 2023, 128: e2022JD038103
- 60 Brierley C M, Zhao A, Harrison S P, et al. Large-scale features and evaluation of the PMIP4-CMIP6 mid-Holocene simulations. *Clim Past*, 2020, 16: 1847–1872

- 61 Wu Y, Liu Y, Zhou W, et al. The mid-Holocene East Asian summer monsoon simulated by PMIP4-CMIP6 and PMIP3-CMIP5: model uncertainty and its possible sources. *Glob Planet Change*, 2022, 219: 103986
- 62 Wang Z, Wang J, Jia J, et al. Detection and attribution of summer temperature changes in China during the last millennium. *Intl J Climatol*, 2022, 42: 6384–6402
- 63 Shi J, Yan Q, Jiang D, et al. Precipitation variation over eastern China and arid central Asia during the past millennium and its possible mechanism: perspectives from PMIP3 experiments. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121: 11989–12004
- 64 Zhou X, Jiang D, Lang X. A multi-model analysis of ‘Little Ice Age’ climate over China. *Holocene*, 2019, 29: 592–605
- 65 Wang J, Yang B, Zheng J, et al. Evaluation of multidecadal and longer-term temperature changes since 850 CE based on Northern Hemisphere proxy-based reconstructions and model simulations. *Sci China Earth Sci*, 2020, 63: 1126–1143
- 66 Zelinka M D, Myers T A, McCoy D T, et al. Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL085782
- 67 Li Z, Liu T, Huang Y, et al. Evaluation of the CMIP6 precipitation simulations over global land. *Earth’s Future*, 2022, 10: e2021EF002500
- 68 Eyring V, Cox P M, Flato G M, et al. Taking climate model evaluation to the next level. *Nat Clim Change*, 2019, 9: 102–110
- 69 He J J, Zhao W X, Liu Z, et al. General analysis of project review and funding results in Atmospheric Science, Department of Earth Science, National Natural Science Foundation of China in 2023 (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2023, 38: 1083–1096 [何建军, 赵卫雄, 刘哲, 等. 2023年度大气科学领域项目评审与资助成果简析. *地球科学进展*, 2023, 38: 1083–1096]
- 70 Li W, Ge F, Yang Y L, et al. General analysis of project review and funding results in the discipline of Atmospheric Sciences, Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China in 2024 (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2024, 39: 1086–1095 [李薇, 葛非, 杨亚力, 等. 2024年度大气科学学科项目评审与资助成果简析. *地球科学进展*, 2024, 39: 1086–1095]
- 71 Ge F, He J J, Li W, et al. General analysis of project review and funding results in Atmospheric Sciences Discipline, National Natural Science Foundation of China in 2025 (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2025, 40: 1078–1090 [葛非, 何建军, 李薇, 等. 2025年度大气科学学科国家自然科学基金项目评审与资助成果简析. *地球科学进展*, 2025, 40: 1078–1090]
- 72 Liu Z, Ding A, Zhang R. Adjusting application codes and optimizing funding layout for the discipline of atmospheric sciences in the National Natural Science Foundation of China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 1068–1075 [刘哲, 丁爱军, 张人禾. 调整国家自然科学基金申请代码, 优化大气学科资助布局. *科学通报*, 2020, 65: 1068–1075]

Summary for “论古今气候环境变化研究的融合问题”

Integration strategy of past and present climate and environmental change research

Huijun Wang^{1*}, Zhengtang Guo², Zhimin Jian³, Fahu Chen⁴, Dabang Jiang⁵, Huayu Lu⁶, Jian Liu⁷, Zongmin Zhu⁸, Zhongshi Zhang⁹, Qing Yan⁵, Zhicong Yin¹ & Mingkeng Duan¹

¹ State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

² Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

³ School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

⁴ Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

⁵ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

⁶ School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

⁷ School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

⁸ School of Earth and Planetary Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

⁹ School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: wanghj@mail.iap.ac.cn

Modern climate research relies primarily on instrumental observations. However, the relatively short duration of meteorological records limits our ability to identify the mechanisms underlying extreme climate events and to investigate climate variability on decadal to centennial timescales, thereby constraining improvements in Earth system models and climate prediction skills. Paleoclimate research, which reconstructs past climatic and environmental changes using natural geological archives such as ice cores, tree rings, stalagmites, loess, and marine sediments, provides an opportunity to extend climate records far beyond the instrumental period. Spanning timescales from millions of years to annual or even daily resolution, paleoclimate studies integrate multiple disciplines to elucidate the roles of external forcings and internal climate feedbacks in shaping Earth's climate evolution. With continuing technological advances and increasing interdisciplinary integration, bridging past and future climate and environmental change has become an essential direction in Earth system science.

This paper systematically reviews recent advances in four key areas. First, it examines the climatic and environmental impacts of past global warming and cooling, with particular emphasis on representative warm intervals in Earth history that may serve as analogs for future warming scenarios. Second, it synthesizes the mechanisms driving climate and environmental change across multiple timescales, including tectonic, orbital, and sub-orbital variability and their interactions. Third, it evaluates the causes of major extreme climatic and environmental events in the geological past, which provide insights into potential thresholds of the Earth system and its complex nonlinear responses to external perturbations. Fourth, it assesses biases in Earth system model simulations across different paleoclimatic backgrounds, including discrepancies in temperature, precipitation, and atmospheric and oceanic circulation, as well as their underlying causes. These advances provide a solid basis for a deeper understanding of the intrinsic dynamics of the Earth system.

Building on this synthesis, we identify several key scientific questions for integrated past–present climate and environment research. To what extent are the mechanisms governing climatic and environmental responses to external forcing similar or different across timescales from the geological past to the future? How are these responses modulated by interactions among the atmosphere, hydrosphere, cryosphere, biosphere, and lithosphere, giving rise to nonlinear amplification, critical transitions, and long-term feedbacks? Addressing these questions requires establishing a unified research framework encompassing five major dimensions: comparisons between past and present climate states, climate variability across multiple timescales, major climatic and environmental events, the key drivers of past climate change, and the systematic evaluation of model biases.

China has established a strong foundation and possesses considerable potential in this emerging direction. Extensive high-quality paleoclimate proxy records have been accumulated, and comprehensive systems for modern climate observation and numerical modelling have been developed. Nevertheless, important challenges remain, including a shortage of interdisciplinary expertise and the lack of integrated research platforms. Advancing the integration of past and present climate and environmental change research will require coordinated efforts to identify priority scientific questions, optimize interdisciplinary training systems, promote the development and sharing of standardized databases, strengthen funding mechanisms and strategic program deployment, and enhance research infrastructure and platform construction. Such efforts will not only provide robust scientific evidence for distinguishing anthropogenic influences on contemporary global warming but also offer important theoretical and practical support for achieving China's “carbon peaking and carbon neutrality” goals.

past and present climate–environmental changes, abrupt event, integration research, strategic research

doi: [10.1360/CSB-2026-0570](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0570)