中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 8 期: 2561 ~ 2573
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

论 文

代用资料选取对过去2000年全球年平均温度重建的影响

杨保[1,2*], 李霞[2], 贺敏慧[2], 王丰[3,4], 赵业思[1], 张鹏[1], 王江林[2]

1. 南京大学关键地球物质循环前沿科学中心, 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023;
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000;
3. Centre Eau Terre Environnement, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC, G1K 9A9, Canada;
4. GEOTOP Research Centre in the Dynamics of the Earth System, Montréal, QC H2X 3Y7, Canada
* 通讯作者, E-mail: yangbao@nju.edu.cn

收稿日期: 2024-01-19; 收修改稿日期: 2024-05-09; 接受日期: 2024-05-24; 网络版发表日期: 2024-07-03
国家自然科学基金项目(42130511, 42488201)和南京大学关键地球物质循环前沿科学中心“GeoX”跨学科研究基金项目(2023300297, 2023300286)资助

摘要 2019年, PAGES 2k工作组重建了一条极具影响力的过去2000年全球年平均温度序列. 但重建过程中由于多源代用资料的纳入及代用资料的时空分布不均等因素, 使得重建结果仍具有不确定性. 为综合阐明代用资料的选取对重建结果的潜在影响, 本文从PAGES 2k代用资料网络中选取了长度达2000年的不同代用记录, 基于“综合-比例法”分别重建了半球和全球尺度的年平均温度变化, 系统分析了温度序列的长期趋势、频谱特征及其对火山喷发活动的响应. 结果显示, 在公元1~1850年期间, 全球年平均温度序列呈显著下降趋势, 但南半球降温趋势比北半球的更为明显. 但是, 这种长期温度变化趋势受到代用资料组合的影响. 此外, 不同类型的代用资料也具有不同的火山喷发响应和频谱特征. 基于树轮资料的温度重建序列揭示的对热带火山喷发的降温响应更为强烈. 而基于非树轮资料的重建结果, 由于其定年存在误差且时间分辨率较低, 难以揭示火山喷发导致降温这一现象. 频谱分析显示, 基于树轮资料的温度重建序列具有更加明显的高频(<200年)变化, 而非树轮资料重建序列能够捕捉到更长时间尺度的低频(>200年)变化信息. 未来需要通过进一步改善代用资料的时空分布范围, 特别是第一个千年时间段和南半球以及热带代用资料数量有限的地区, 提高代用资料的气候信号强度并降低代用资料的不确定性, 改进和发展综合的重建方法, 以进一步提高重建结果的可信度.

关键词 长期趋势, 全球变化, 代用资料, 火山喷发, 频谱特征, 过去2000年

1 引言

历史时期的温度变化特征不仅可为评价器测记录时段以来的全球变暖提供基本依据, 同时对检测和归因外部强迫在气候变化中的作用也至关重要. 许多学者已基于树木年轮(以下简称树轮)和其他多种代用资

中文引用格式: 杨保, 李霞, 贺敏慧, 王丰, 赵业思, 张鹏, 王江林. 2024. 代用资料选取对过去2000年全球年平均温度重建的影响. 中国科学: 地球科学, 54(8): 2561–2573, doi: 10.1360/N072024-0023
英文引用格式: Yang B, Li X, He M, Wang F, Zhao Y, Zhang P, Wang J. 2024. The influence of proxy selection on global annual mean temperature reconstructions during the Common Era. Science China Earth Sciences, 67(8): 2522–2534, https://doi.org/10.1007/s11430-024-1348-3

© 2024 《中国科学》杂志社

料重建了过去千年半球尺度和全球尺度的温度变化(Christiansen和Ljungqvist, 2017; Neukom等, 2019a, 2019b; Büntgen等, 2020, 2022). 其中, PAGES 2k (Neukom等, 2019a)重建的过去2000年全球平均温度是近年来具有较高影响力的一条温度重建序列(以下简称为PAGES 2k (2019)重建); 它整合了来自不同地点和不同类型的257个代用记录, 包括年分辨率的树轮资料和其他低时间分辨率的代用资料, 并采用了7种统计模型来进行重建, 以此来综合考虑由重建方法导致的潜在偏差. 这条温度重建序列不仅与气候模式模拟结果在多年代际尺度上高度一致(Neukom等, 2019a), 同时也与基于树轮的重建结果在多年代际尺度上相匹配(网络版附图S1, http://earthcn.scichina.com; Esper等, 2002; D'Arrigo等, 2006; Schneider等, 2015; Stoffel等, 2015; Wilson等, 2016; Büntgen等, 2020, 2021). 然而, 与其他半球尺度的重建结果相比, PAGES 2k (2019)重建在揭示对火山喷发的响应强度(Büntgen等, 2020)和百年到千年尺度的长期趋势(附图S1)方面仍然存在明显差异, 说明了其在过去两千年的温度估算中仍存在潜在的不确定性(Esper和Büntgen, 2021). 例如, 1850年之前的长期降温趋势是这条序列最显著的特征之一(Neukom等, 2019a), 而其他一些重建结果并不能明显地反映出这一长期趋势(附图S1; Moberg等, 2005; Büntgen等, 2021). 此外, 最近的一项研究结果表明, 与基于树轮资料的全球温度重建结果相比(Büntgen等, 2020), PAGES 2k (2019)重建揭示的温度对火山喷发响应的强度较弱.

政府间气候变化专门委员会(IPCC)在其第四和第五次评估报告(AR4和AR5)中使用了多个重建结果来综合评估过去2000年的温度变化特征, 但最新的IPCC第六次评估报告(AR6)和《政策摘要》仅单一地引用PAGES 2k(2019)重建(评估过去2000年的全球温度变化特征(IPCC, 2021). 鉴于IPCC报告的重要性, 对PAGES 2k(2019)重建结果的不确定性和空间代表范围进行清晰界定至关重要. Büntgen等(2022)指出PAGES 2k(2019)重建很可能主要代表了北半球温带的暖季温度变化, 而并非全球范围的年平均变化; 且随着代用资料质量和数量随时间前推有所下降, 该重建结果可信度也可能随之下降. Anchukaitis和Smerdon (2022)进一步将PAGES 2k(2019)重建与早期的重建进行比较后发现, 由于代用资料和所选重建方法的不同, 目前对半球和全球尺度温度重建的不确定性仍未得到充分认识.

综上, 本文从全球PAGES 2k代用数据集(PAGES 2k, 2017)中选择了序列长度达2000年的代用记录, 分别重建了北半球(NH)、南半球(SH)和全球(GL)尺度的年平均温度变化. 首先, 本文系统评估了基于8种不同代用资料组合重建结果的长期线性趋势(详见第2.2节和附表S1). 然后, 利用时序叠加分析(SEA)方法进一步评估了重建温度对火山喷发的潜在响应, 并进而分别解析了不同重建的频谱特征.

2 材料与方法

2.1 代用资料

本文所使用的代用资料来源于Neukom等(2019a, 2019b)所使用的全球PAGES 2k温度代用数据集2.0.0版本(PAGES 2k, 2017). 由于本文目的在于根据代用资料选择和不同的空间尺度来研究年际至千年尺度的温度变化特征, 因此在本研究中仅使用覆盖过去两千年的代用资料序列. 共22条代用记录(见附表S2), 其中16条来自北半球、6条来自南半球. 选取的代用资料包括树轮、冰芯、湖泊和海洋沉积物、钻孔和石笋; 其中, 树轮和冰芯的代用资料占据数据集序列数量的近64%. 此外, 22条序列中有16条具有年际或年内时间分辨率. 为系统重建具有年分辨率的温度序列, 本文将一条季节分辨率的冰芯记录整合为具有年分辨率的序列, 而具有较低时间分辨率的代用指标则线性插值为具有年分辨率的序列.

2.2 温度数据与重建方法

用于校准代用记录的温度数据来自于网格化(空间分辨率为5°)数据集HadCRUT 4(Morice等, 2012), 起始时间为1850年1月. 在该数据集中, 缺失的数据通过使用正则期望最大化(RegEM)方法(Schneider, 2001)进行插值. 为与PAGES 2k(2019)重建保持一致且匹配冰芯中的稳定氧同位素(δ^{18}O)序列, 本文将年平均温度的计算窗口设定为上一年4月至当年3月. 由于大多数代用指标的结束时间为1995年, 将温度校准时段统一设定为1850~1995年.

为研究不同代用指标的选取对重建结果的潜在影响, 本文采用了8种不同的代用指标组合分别对北半

球、南半球和全球尺度的温度进行重建. 除基于全部数据集(22条序列)的重建之外, 其他基于不同代用指标的子集重建的信息可见附表S1.

由于所选指标在空间(图1)和时间范围上分布不均匀, 本文选择了Mann等(2008)广泛使用的方差匹配法(CPS)进行重建. 首先, 将数据结束时间早于1995年的代用序列根据RegEM算法(Schneider, 2001)进行插值, 使其延长至1995年. 随后, 将所有的代用记录在校准期(1850~1995年)内进行标准化处理, 即将所有代用记录统一减去其校准期的各自平均值后再除以校准期各自的标准偏差; 其后将所有的代用记录分配到5°×5°的空间格网中, 利用器测数据对其进行校准; 最后对网格化代用记录进行面积加权, 在半球尺度上进行平均后再方差匹配到全球尺度. 以上过程重复了8次以对比不同指标组合的选择对重建的潜在影响(附表S1).

2.3　长期趋势

本文采用线性回归模型量化基于不同代用指标的北半球、南半球和全球尺度温度重建序列在1~1850年间的长期变化趋势. 并使用双尾*t*检验来确定线性趋势的统计显著性.

2.4　火山喷发的响应

本文使用时序叠加分析法(SEA)研究过去2000年火山喷发对全球和半球尺度温度的影响. 由于全球温度是本文的主要重建目标, 故重点关注热带地区的火山喷发的影响, 因为该地区的火山喷发事件很可能影响全球气候. 相比之下, 温带地区的火山喷发空间影响范围有限(Robock, 2000), 并且其与热带地区火山喷发的冷却效应不同(Wang等, 2022, 2023). 因此, 本文SEA分析未包括北半球温带发生的一些大型火山喷发事件, 例如公元536年的喷发, 尽管其可能导致过去2000年北半球出现最冷的时期(Büntgen等, 2016).

根据最新基于冰芯记录重建的全球平均平流层气溶胶光学厚度($SAOD_{550}$), 即eVolv2k v3数据集(Toohey和Sigl, 2017), 来选定火山事件. 本文保留了所有发生在公元1年至1900年之间全球平均$SAOD_{550}$峰值≥0.1的23次热带火山喷发事件(见表1), 其$SAOD_{550}$峰值接近于1883年克拉卡托火山(Krakatao)的喷发值($SAOD_{550}$=0.112). 已有区域重建证明, 调整火山喷发与两极冰芯中硫沉积之间的时间差可更好地估算喷发日期和火山信号(Wang等, 2022). 但本文中发现此类调整后的SEA结果与使用原始日期的结果非常相似(结果未显示), 可能是因为本研究中所使用的大多数代用记录受到高自相关性(例如, 树轮宽度)或平滑效应的影响(低时间分辨率资料被插值为年分辨率)所致. 综上, 本文使用了Toohey和Sigl(2017)提出的原始喷发日期, 以与CMIP5/CMIP6模拟中的相关分析保持一致.

采用Rao等(2019)提出的双重bootstrap算法进行SEA分析. 在每次分析中, 从列表(表1)中随机选取10次火山喷发事件, 生成1000个独立的抽样结果来计算火山响应, 最后以这些结果的中位数作为响应值. 根据火山喷发前5年的温度均值对各个事件的响应结果进行归一化处理. 同时, 使用Rao等(2019)的随机bootstrap

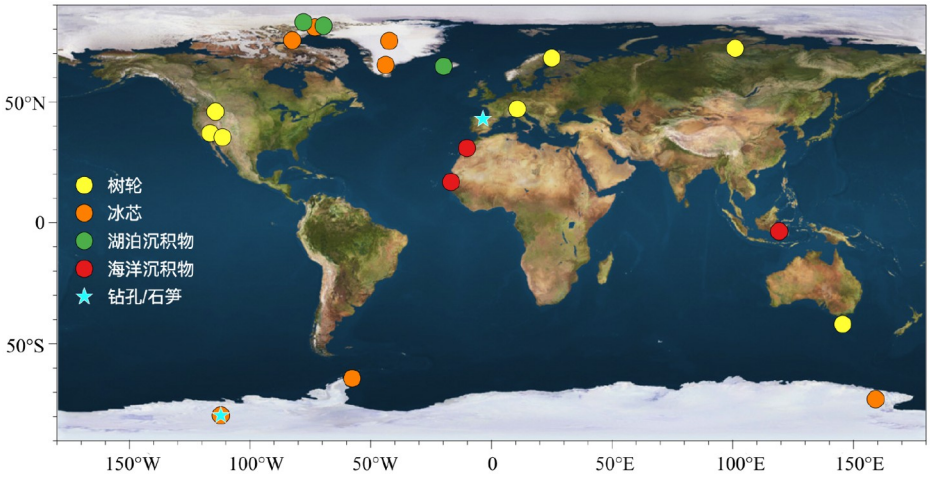


图 1　用于重建过去2000年温度变化的代用资料空间分布图

表 1　本文使用的热带火山喷发年份[a)]

火山名称	喷发年份(CE)	全球平均$SAOD_{550}$
Unidentified	169	0.157
Unidentified	266	0.219
Unidentified	433	0.149
Ilopango?	540	0.304
Rabaul?	574	0.245
Pago?	682	0.271
Unidentified	1108	0.196
Unidentified	1171	0.188
Unidentified	1230	0.238
Samalas	1257	0.459
Unidentified	1276	0.123
Quilotoa?	1286	0.160
Elchichon?	1345	0.160
Unidentified	1453	0.107
Kuwae?	1458	0.311
Huaynaputina	1600	0.179
Parker	1640	0.210
Unidentified	1695	0.174
Unidentified	1809	0.200
Tambora	1815	0.254
Babuyan Claro	1831	0.138
Cosigüina	1835	0.106
Krakatau	1883	0.112

a) 这些事件基于eVolv2k v3数据集(Toohey和Sigl, 2017)中计算的全球平均对流层气溶胶光学厚度($SAOD_{550}$)峰值进行选择. 火山信息来源于Sigl等(2015)和Toohey和Sigl(2017)

方法(10000次迭代)检测相关响应的统计显著性. 除本研究中研制的重建序列外, 本文还检测了8个CMIP5/CMIP6模式模拟结果中的火山信号. 所选模拟包括北半球夏季(6~8月)和北半球、 南半球及全球年平均(上一年4月至当年3月)温度序列. 模型和采用的外部辐射强迫信息详见附表S3.

2.5　频谱特征分析

本文采用Wu和Huang(2009)提出的集合经验模态分解(EEMD)方法来研究基于树轮数据和非树轮数据重建的过去2000年温度序列的频谱特征. EEMD依赖于有限数量但添加了白噪声的时间序列轨迹, 因此可以有效地获取真实信号的频谱特征. 首先, 根据重建序列在1~2000年间的平均值和标准差进行归一化处理; 然后对每个序列分别进行了100次的模态分解. 考虑到EEMD导致的每个分解频谱成分时间序列的高持续性及其统计结果的复杂性, 本文采用了一种特殊的算法来计算对应频谱成分之间的皮尔逊(Pearson)相关系数的显著性. 该算法结合了Monte Carlo迭代(迭代次数默认值为1000)和具有不同时间尺度的时间序列特征, 并考虑了它们之间的自相关效应(Ebisuzaki, 1997). 基于传输函数残差的时间结构, 该方法可有效地计算其置信区间(Macias-Fauria等, 2012).

3　结果

所选的22条代用资料在全球范围内分布较为广泛(图1), 每条代用资料都具有独特的空间特征, 因此可较为全面地反映全球平均气候状况. 附表S1列出了8种代用资料组合重建结果在半球和全球尺度上的温度代表性. 其中, 基于与器测温度呈正相关的代用资料所重建的北半球、南半球和全球温度序列均显示了与目标年均温度的最高相关性, 高于基于所有代用指标的温度重建所显示的温度相关值. 与半球尺度重建相比, 全球平均温度序列的重建效果更好. 8种代用资料组合的全球重建与器测温度的相关性范围为0.41~0.68. 此外, 北半球重建温度与器测温度的相关性普遍高于南半球重建序列. 这可能是由于北半球重建使用了空间分布更密集的代用指标所致, 尤其是与使用了高分辨率的树轮数据有关. 南半球重建温度与器测温度较弱的相关性并不能直接说明这些重建的效果不佳. 其主要原因可能是由于所用的6个代用指标中所包含的3条时间分辨率较低的序列(附表S1)降低了重建的总体年际温度相关性.

3.1　代用资料的长期变化特征

本文温度重建所选用的不同代用记录在过去2000年长期趋势特征上存在一定差异. 其中, 所有树轮记录(7条)在1850 年之前均保持相对“平缓”的变化特征, 并无明显的线性趋势(附图S2; $p>0.05$). 而冰芯记录, 除Ant_022和Arc_031序列($p>0.05$)外, 在过去2000年中显示明显的下降趋势(附图S3). 3条湖泊沉积物序列均来源于北极, 其中一条记录具有明显的上升趋势. 这一趋势与在非树轮记录(附图S4~S7)中普遍观测到的长期

下降趋势相反，可见后者是重建结果中呈显著下降趋势的主要来源(图2；见3.2节). 此外，欧洲石笋记录中也发现了类似的千年上升趋势(附图S7). 总体而言，在所选择的全球范围的代用资料中，分别有50%、41%和9%的序列显示出显著的下降趋势、无趋势和显著上升趋势. 其中，南半球67%的代用数据序列随时间推移呈下降趋势(其他记录的长期趋势并不明显). 在北半球，具有显著下降趋势的代用记录比例最高，为44%；其次分别是33%和18%的无趋势和显著上升趋势.

3.2　重建温度的长期趋势

基于所有22条代用记录的重建显示，全球年平均温度在1~1850年期间存在显著的长期降温趋势，变化速率为−0.2℃/1000年(图2). 尽管本文以及PAGES 2k (2019)重建所使用的代用资料的数量差异较大(本文使用22条代用记录，而PAGES 2k(2019)使用257个代用记录)，但二者显示的千年降温速率较为一致. 这表明时间序列较长的代用记录在反映千年尺度年温度长期变化趋势中起到了关键作用. 然而，当仅使用树轮资料时，半球和全球尺度的温度重建序列的下降趋势在很大程度上均显著减弱(图3a). 与使用22条代用记录重建的全球平均温度相比，仅基于树轮的温度重建所显示的降温速率从−0.2℃/1000年降至−0.02℃/1000年(图2). 而由非树轮资料重建的半球温度序列均存在十分显著的下降趋势，尤其是基于5条低分辨率地质记录重建的南半球温度序列(图3b；−0.5℃/1000年). 这与本文对不同代用资料本身的分析一致(见第3.1节). 综合而言，使用15个非树轮记录重建的全球温度在1~1850年期间的降温速率为−0.3℃/1000年.

其他数据组合的重建结果也进一步强调了不同代用资料选择对千年温度下降趋势的关键影响. 例如，剔除与器测温度呈负相关的序列后，北半球的重建仅显示了微弱的降温趋势，而南半球的这种趋势更加明显(−0.3℃/1000年，p<0.0001，图3c). 当仅包括与校准时段温度呈正相关的序列，且进一步将树轮及海洋沉积物数据剔除时，北半球和南半球的重建结果非常一致(图3d~3f). 尽管受到不同代用指标选择的影响，这些不同组合的重建均表明，南半球年均温在过去2000年中的降温趋势比北半球更为明显，其降温范围在−0.3℃/1000年至−0.1℃/1000年之间(图3；附图S8). 上述结果表明，过去2000年的降温趋势在两个半球中很可能是不对称的，而全球平均温度的下降趋势主要是受南半球非树轮资料的影响.

本文进一步对上述结果的稳定性进行了敏感性分析(附图S9). 通过从PAGES 2k数据集中选择时间长度跨越1000~1995年的所有56条代用记录，应用类似的CPS方法(第2.2节)来分别重建北半球、南半球和全球的年平均温度. 对比其长期趋势，结果与过去2000年的趋势相比没有明显变化. 换言之，与南半球温度重建相比，北半球温度序列在1000~1850年期间的下降趋势较弱. 全球温度的下降趋势主要由南半球代用资料主导.

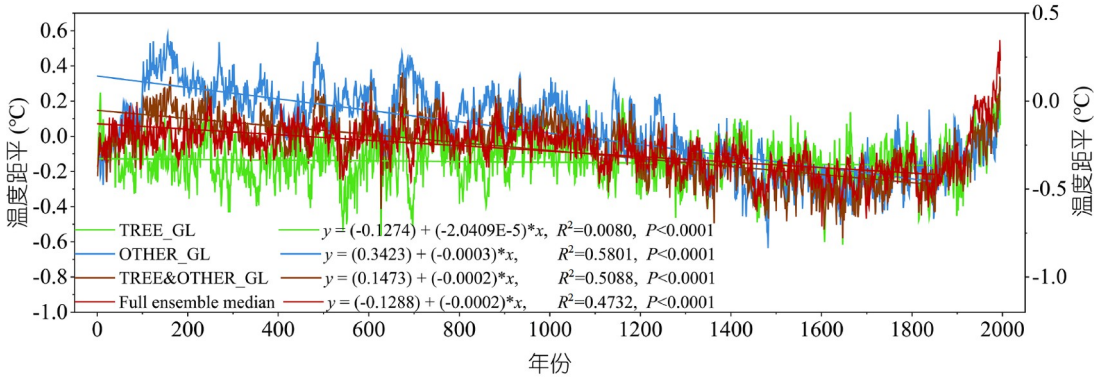


图 2　过去2000年全球年平均温度重建序列

TREE_GL, 基于7个树轮序列的全球年均温度重建; OTHER_GL, 基于其他15个非树轮记录的全球年均温度重建; TREE&OTHER_GL, 基于所有22个代用指标的全球年均温度重建; Full ensemble median, PAGES 2k(2019)基于257个代用记录重建的温度序列的中值序列. 图中，温度距平数据以1961~1990年的平均值为参考(右侧纵坐标与Full ensemble median对应). 与树轮记录相比，其他基于非树轮记录重建的温度序列在1~1850年期间显示出了更强的线性降温趋势

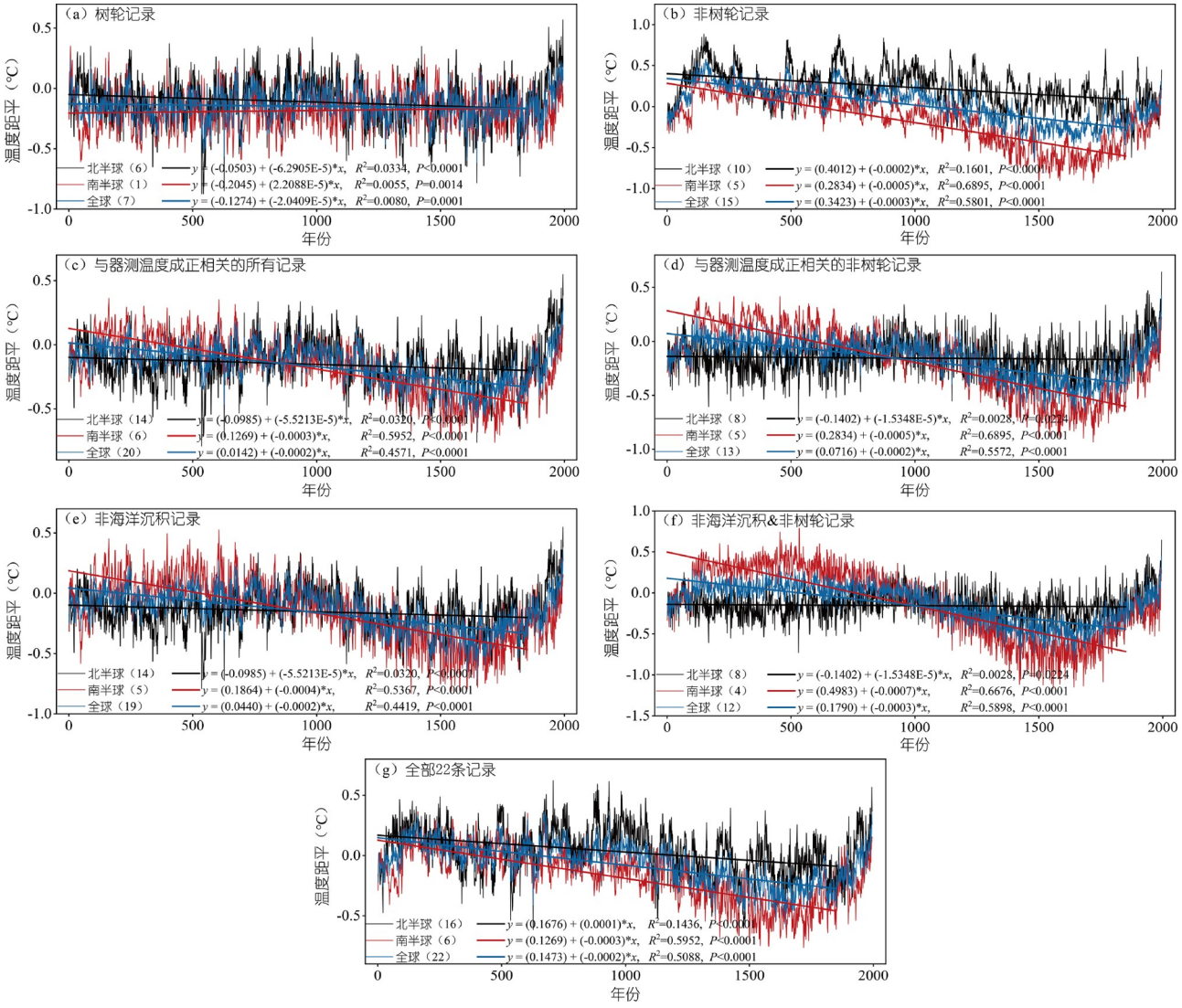


图 3　基于不同代用指标组合重建的北半球(NH)、南半球(SH)和全球(GL)年平均温度变化

图中纵坐标的温度距平数据以1961~1990年均值为参考. 基于树轮的温度重建序列显示了较弱的长期趋势, 而非树轮的重建序列则显示了显著的降温趋势. 与北半球相比, 南半球温度重建序列具有更强的降温趋势

3.3　重建温度对火山喷发的响应

时序叠加分析(SEA)结果显示, 基于树轮重建的过去2000年全球年平均温度对热带火山喷发具有显著的响应(p<0.05; 图4a). 平均而言, 在喷发后的第一年降温变得显著, 但在第七年达到高峰, 最大降温幅度为0.112℃. 降温效应在约10年后逐渐恢复到喷发前的水平. 相反, 基于非树轮指标的全球温度重建显示了完全相反的响应, 热带火山喷发后温度反而升高(图4b). 第六年的“升温”峰值也超过了95%的置信水平. 本文基于全部22条代用指标的重建与PAGES 2k(2019)重建具有类似的火山降温特征(图4c、4d), 但由于本文包含了较多的对热带火山喷发呈正响应的非树轮数据, 其降温幅度与PAGES 2k(2019)重建相比略有减弱.

当分别对北半球和南半球的温度重建进行时序叠加分析后发现(附图S10), 无论是在广泛认可的降温(仅在基于树轮的重建和基于所有代用指标的重建中出现)还是在与地质代用记录相关的升温趋势方面, 北半球温度对火山喷发的响应通常更为明显. 这种现象可能反映了过去两千年间发生的大型热带火山喷发在北

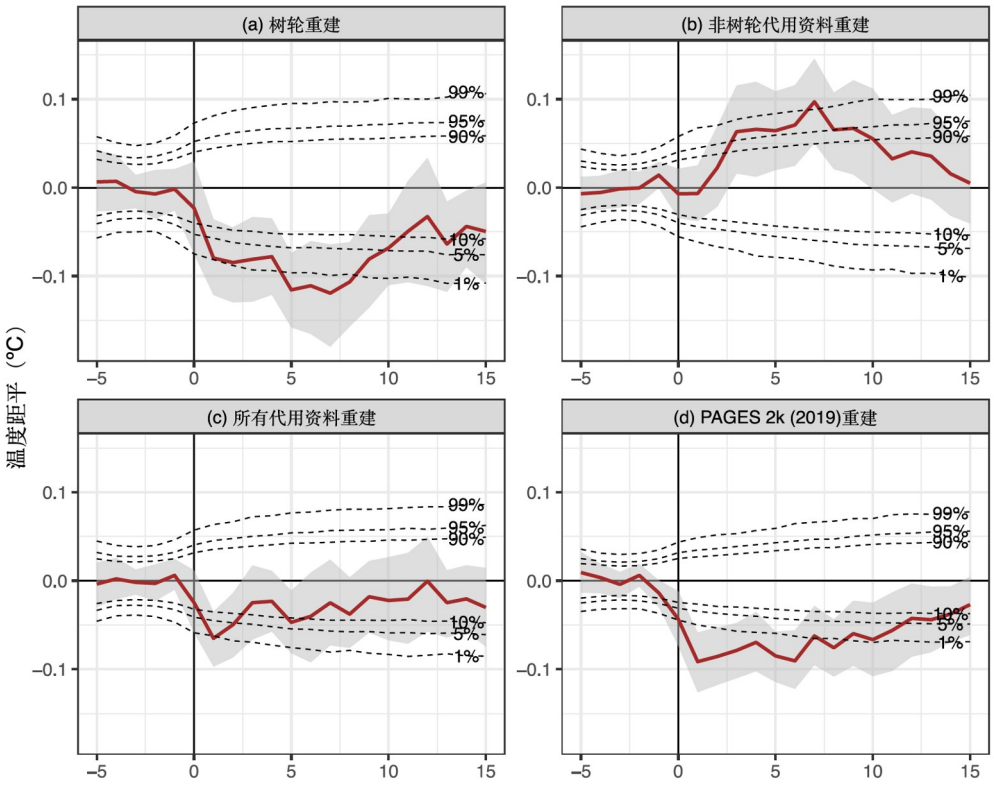


图 4　过去2000年全球年平均温度对热带火山喷发的响应

(a) 基于树轮重建的SEA分析; (b) 基于非树轮重建的SEA分析; (c) 基于所有代用指标重建(22个记录)的SEA分析; (d) PAGES 2k (2019)重建的SEA分析. 灰色阴影区是对火山响应的第5%和第95%的统计置信区间. 黑色虚线表示不同的统计显著性水平

半球产生的平流层硫的负荷比在南半球更大(Toohey和Sigl, 2017).

此外，SEA还显示，在基于树轮、多代用指标和PAGES 2k (2019)的重建中，无论是在1~1000年还是在1000~2000年期间, 火山喷发后的冷却效应基本都持续了近10年(图5). 尽管第一个千年的六次热带火山喷发显示出了更大的全球平均峰值$SAOD_{550}$(表1)，但在1~1000年间的冷却幅度并没有超过1000~2000年间的冷却幅度. 这说明1~1000年的重建温度可能比1000~2000年的重建温度具有更高的不确定性. 另一方面，1~1000年间的$SAOD_{550}$重建值也可能有更大的不确定性.

CMIP5/CMIP6模式模拟的北半球年平均温度(上年4月到当年3月)和夏季(6~8月)温度通常在热带火山喷发后的第一年达到冷却高峰，与本文基于多代用指标重建的北半球温度所揭示的响应相一致(图5；附图S11). 相反，南半球模拟的年平均温度与温度重建(基于树轮、非树轮或多代用指标)对火山喷发的响应显著不同(附图S10d~S10f). 此外，对于年际和夏季平均温度，北半球的模拟结果对火山喷发的响应比南半球的响应也更为明显(图5；附图S11). 因此，全球平均温度很可能缓和了这种半球尺度的差异. 然而, 基于多个模型模拟的全球平均降温幅度(约0.3℃)似乎比图4中呈现的四个全球重建温度的降温幅度更为明显(树轮指标的重建显示最大降温幅度为0.112℃).

3.4　重建温度序列的频谱特征

EEMD分析结果表明，树轮资料能保留大量的高频信息变化，平均周期小于35年的组分约占总方差的73%. 相反, 非树轮代用指标可捕捉到更大比例的低频信息，其中约84%的方差位于低频(平均周期≥35年)变化中，很可能与这些记录大多数具有较低的时间分辨率有关. 尤其是从非树轮指标重建的全球温度中分解出的IMF(本征模态函数)组分具有长期的下降趋势, 约

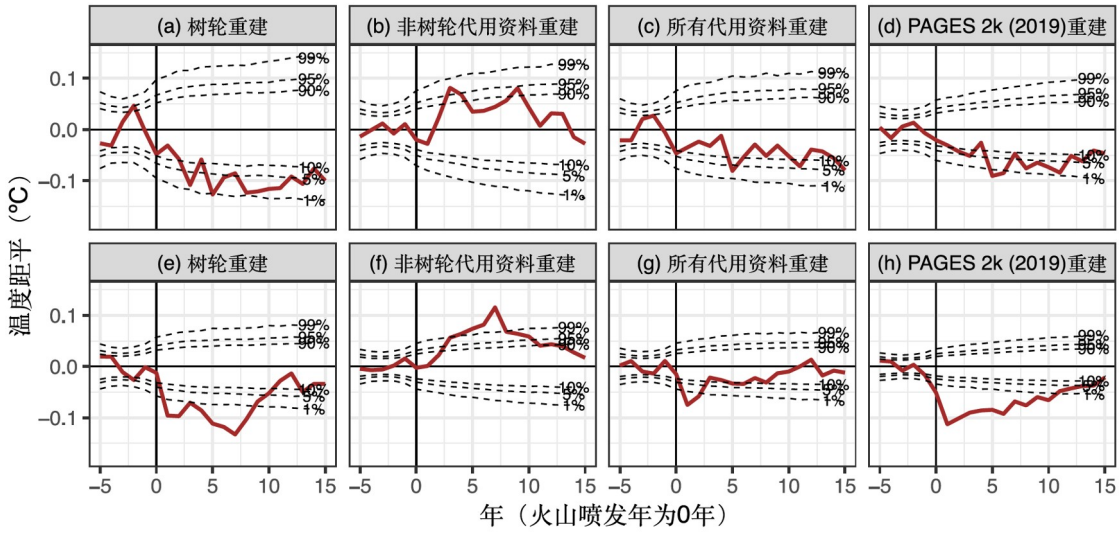


图 5　全球年平均温度在第一个千年(1~1000, (a)~(d))和第二个千年(1000~2000, (e)~(h))对火山喷发的响应

(a), (e)基于树轮重建的响应; (b), (f)基于非树轮重建的响应; (c), (g)基于所有代用指标重建的响应; (d), (h) PAGES 2k (2019)重建温度对火山喷发的响应. 由于第一个千年的热带火山喷发数量有限(见表1), 此分析未使用双重bootstrap方法(详见2.4节). 虚线表示不同的统计显著水平

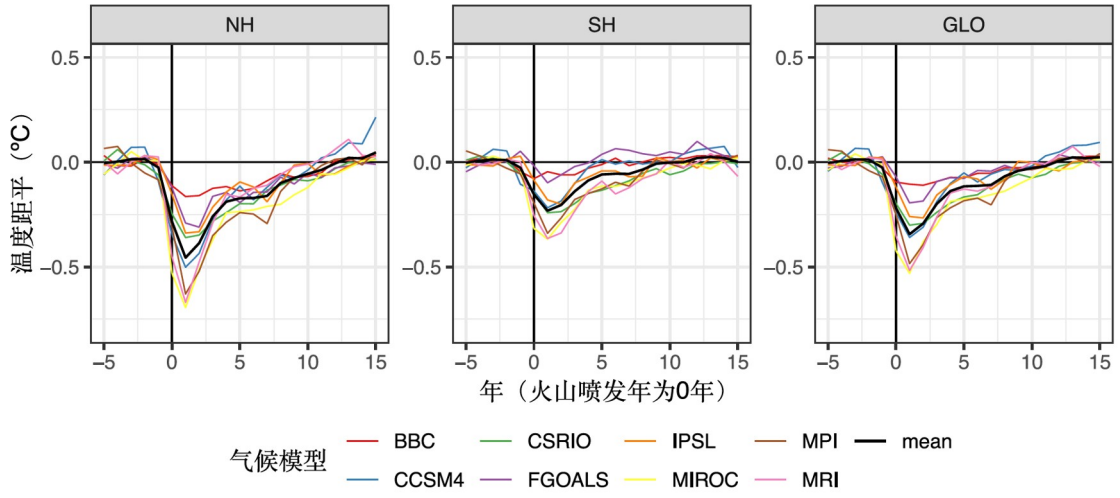


图 6　过去1000年热带火山喷发对模型模拟的北半球(NH)、南半球(SH)和全球(GLO)年平均温度(上年4月到当年3月)的影响

17次大型热带火山喷发的年份分别为: 1108、1171、1230、1257、1276、1286、1345、1453、1458、1600、1640、1695、1809、1815、1831、1835和1883年

占总方差的49%(图7e), 而由基于树轮重建的对应部分仅约占总方差的6.6%. 这说明树轮宽度记录在保留低频信息变化方面的能力较为有限. 树轮和非年轮代用指标的不同频谱特性还导致了这两种代用记录之间的一致性较差. 对于平均周期小于35年和大于40年的组分, 二者相关系数分别在–0.07~–0.02(p>0.05)和–0.042~0.25(p>0.05)之间(图7b~7e). 此外, 基于这两种代用指标重建的全球温度在过去2000年中的相关性也较弱(r=0.057, p=0.42).

4　讨论

通过分析长序列的温度变化特征可为深入了解气候系统自然变率提供重要依据. 利用不同的统计方法

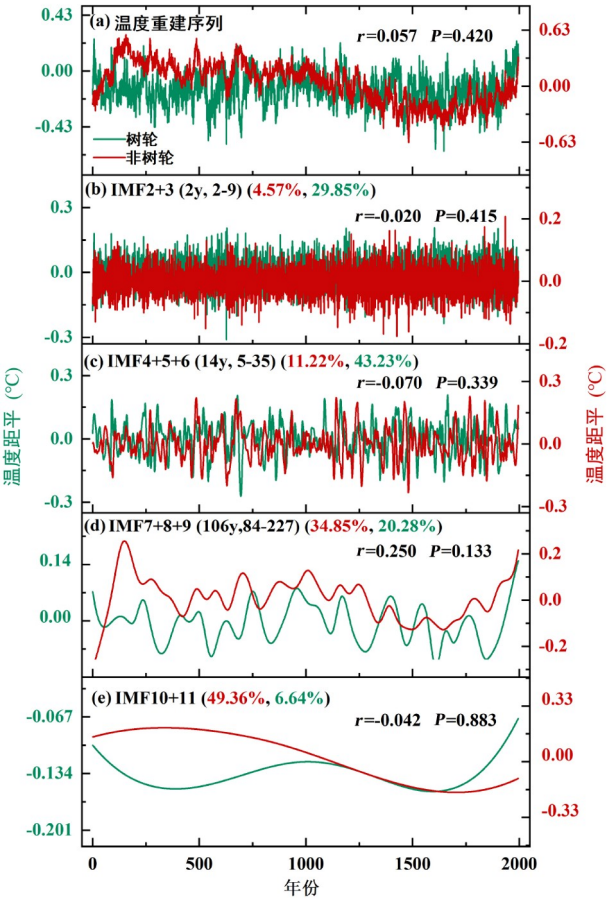


图 7　基于树轮(绿色)和非树轮(红色)资料重建的全球年平均温度序列的EEMD分解的各分量(IMF)比较

(a) 原重建序列的比较; (b)~(e) 使用EEMD分解后(见第2.5节)的序列比较, 包括其平均周期及其范围. 图中的百分比值是对应重建中不同分量的解释方差. *r*值表示Pearson相关系数, *p*值是考虑了时间序列自相关后的显著性水平

整合多种代用资料，相关研究揭示了晚全新世以来全球平均温度的长期变化趋势(Neukom等, 2019b; Bader等, 2020; Kaufman等, 2020; Wanner, 2021). 尽管不同代用指标的特性及其时空分布不均(例如, 在南半球和亚洲, 尤其是中国的内陆地区, 仍然缺乏时间序列较长的代用指标), 使得重建结果仍存在较大的不确定, 但本文结果表明全球年均温在1~1850年期间呈长期的下降趋势(−0.20℃/1000年). 本文的长期降温趋势与基于多代用指标的温度重建基本一致(PAGES 2k Consortium, 2013; Marcott等, 2013; Neukom等, 2019a; Kaufman等, 2020). 特别是当剔除树轮资料后, 重建的全球温度序列的下降趋势从−0.2℃/1000年进一步增加至−0.3℃/1000年(图2). 对PAGES 2k数据集的一项研究同样表明(Klippel等, 2020), 在树轮记录中一般并不存在其他地质代用指标(如冰芯、海洋和湖泊沉积物)所显示的1~1850年间长期下降趋势. 且这一现象与树轮采样点所处的纬度、树轮的气候敏感性以及树轮去趋势方法没有直接关联.

本文对PAGES 2k数据集中近2000年长代用记录的分析进一步揭示, 多指标重建的温度显示的长期趋势对代用指标的选取高度敏感(图3). 一方面, 不同地点的代用记录可能代表了区域温度特有的变化特征(Neukom等, 2019b); 另一方面, 这一现象还可能由不同类型代用记录具有不同的特性和偏差造成. 例如, EEMD分析表明, 地质代用记录包含较强的低频变化信息(图7), 从而对本文重建中的长期降温趋势有显著的贡献. 然而, 这些记录(即冰芯、石笋以及海洋和湖泊沉积物)通常包含了混合的气候信号(例如温度和降水), 且易受到低时间分辨率(导致高频变化信息缺失)和潜在定年不确定性的影响(Christiansen和Ljungqvist, 2017). 相反, 树轮一般能记录年至多年代际尺度的气候信息. PAGES 2k (2019)重建中所使用的树轮记录多来自于老树, 且在建立以上序列时通常未考虑保留更多的百年尺度. 因此, 其长期趋势的保留存在不足. 这主要是因为, 与地质代用记录不同, 树轮资料在重建之前需要去除与年龄相关的生长趋势. 在各种去除生长趋势方法中, 基于单个树轮序列的去趋势方法会使其树轮资料长期变化趋于平缓(Cook等, 1995). 与树轮稳定同位素(Yang等, 2021)和最大晚材密度(Esper等, 2012)相比, 即使使用保留树轮数据长期趋势优势较明显的区域曲线标准化方法(Briffa等, 1992), 仍然难以提取树轮宽度资料中的低频变化信息. 此外, 因为树轮数据主要包含了生长季节的气候信号(Anchukaitis和Smerdon, 2022), 树轮还可能会对年平均的气候重建产生偏差. 因此, 采用多指标重建全球温度变化时要充分考虑以上因素带来的不确定性.

本研究还表明, 过去2000年平均温度的长期降温趋势很可能是一个全球性的现象, 但北半球千年降温速率不及南半球.北半球的年均温度下降趋势主要与海洋沉积物和冰芯代用指标有关(附图S8). 部分树轮(主要是树轮宽度)、石笋和湖泊沉积物显示出的上升趋势(附图S2、S4、S7)可能抵消了一部分这种全球范围的温度下降幅度.

目前，已有一些学者对全球范围长期降温趋势的原因进行了详细讨论. 基于斯堪的纳维亚地区的树轮最大晚材密度(Esper等, 2012)和亚北极地区代用资料(Kaufman等, 2009)，研究表明轨道强迫可能是过去2000年夏季降温的主要驱动因素. 然而，基于不同外部强迫的气候模式模拟结果则揭示了大型火山喷发是驱动全球海表温度长期下降的关键因素，而并非是轨道参数变化(McGregor等, 2015). 事实上, 加拿大东部的树轮资料也证实了火山喷发可以导致气候模态的转变(Gennaretti等, 2014). 由此可见, 多次火山喷发很可能增加海冰覆盖并通过海冰/海洋反馈维持长期的冷却效应(Miller等, 2012; Sigl等, 2015). 另外, 全新世尺度的模式模拟结果进一步指出，过去2000年的全球长期降温趋势与太阳活动和火山喷发均高度相关, 但其中火山喷发活动的影响更为突出(Bader等, 2020). 使用能量平衡模型的模拟结果同样说明了不同强迫因素对长期降温趋势的综合影响，其中包括轨道参数、太阳辐照和高频率的火山喷发活动(Neukom等, 2019a). 综上所述, 不同外部强迫, 包括轨道参数、太阳辐照和大量的火山喷发活动很可能导致了过去2000年全球和半球尺度温度重建中所显示的长期降温趋势(Bader等, 2020; McGregor等, 2015; Neukom等, 2019b).

除了对全球长期(百至千年尺度)降温的潜在影响外，大型热带火山喷发活动还是年际和多年代温度变化的主要驱动因素, 尤其是在夏季(Wang等, 2022). 在火山喷发期间及之后，大量的灰尘和包含硫元素的气体被释放到大气中(Robock, 2000). 大量灰尘可以快速沉降, 但包含硫元素的气体可以进入平流层, 并转化为硫酸盐气溶胶，进一步减少到达地球表面的太阳辐射量, 从而导致普遍的冷却效应(Burke等, 2023; Robock, 2000; 孙炜毅等, 2024).

本文基于树轮重建的全球平均温度显示，在热带火山喷发后出现了多年的降温趋势(图4a)，该结果与千年尺度的其他温度重建相一致(Büntgen等, 2020; Neukom等, 2019a; Wilson等, 2016). 然而, 重建温度所示的冷却幅度(约为−0.1℃)远低于CMIP5/CMIP6模拟的平均值(约为−0.3℃; 图6). 仿代用试验表明, 代用指标所包含的非气候噪声可以降低重建温度序列中的火山降温信号强度. 如果重建温度与观测值的皮尔逊相关系数为0.5，真实的火山冷却信号可能减弱近50% (Wang等, 2023). 尽管本文基于树轮重建的全球温度在校准时段1850~1995与器测温度的相关性相对较高(r=0.6), 但在高频(10年高通滤波)序列中的温度相关性仅为0.12. 这表明重建温度在高频变化方面存在大量的非气候噪声，进而低估了其在火山喷发后的降温效应. 基于树轮重建的南半球温度序列对火山喷发的微弱及不稳定响应(附图S10)很可能是因为其有比北半球更高程度的噪声的结果. 此外, 重建温度所揭示的峰值年(第7年，图4a)也与模拟所发现的不同(图6). 其主要原因可能是由于树轮宽度具有的生物记忆(一阶自相关系数在过去2000年为0.68)进一步削弱并延迟了重建温度的火山冷却峰值(Wilson等, 2016; Hartl-Meier等, 2017; Lücke等, 2019). 相比而言, 树轮最大晚材密度可能更适合于研究火山喷发后的降温效应(Esper等, 2015).

与树轮重建温度相比，非树轮资料重建的温度序列在热带火山喷发后显示出一种相反的升温效应(图4). 这种升温幅度与树轮重建显示的冷却幅度相当(图4; 附图S10)，这一现象反映了非树轮资料重建存在的不确定性，因为时间分辨率较低的地质资料存在一定的定年误差(Christiansen和Ljungqvist, 2017). 此外，与其所揭示的相对较小的高频组分相一致(图7)，低时间分辨率的代用指标本身可能对短期的气候变化并不敏感. 因此需要获取更多高精度的代用资料, 以更好地揭示地质资料如何对火山喷发作出响应.

综上，本文基于多指标资料的全球温度重建及PAGES 2k (2019)重建中所检测到的火山喷发的全球尺度降温信号很可能具有一定的偏差. 考虑到具有高自相关的树轮宽度数据和低时间分辨率的非树轮资料所存在的问题，相关研究都很可能严重低估了热带火山喷发所引起的全球降温效应的强度. 重建温度和模型模拟温度的分析进一步表明，与多指标重建相比，仅基于树轮资料重建的洲际尺度的夏季温度在过去1000年中存在较高的一致性，而此较高的协方差变化主要是受到大型火山喷发的影响(Hartl-Meier等, 2017). 可见，代用指标的选取在揭示年际温度变化方面也起着关键作用.

EEMD分析显示，树轮和非树轮指标具有不同的频谱特征，其在整个频谱范围内的相关系数在统计上均不显著. 前者主要反映年至多年代尺度的气候变化，而后者在反映长期(>200年)时间尺度变化方面更具优

势. 因此, 使用非树轮资料在揭示年到多年代尺度上的温度变化信息方面的可信度较低.

5 结论

本文揭示全球年平均温度在1~1850年期间存在显著的长期降温趋势. 虽然基于树轮的温度重建不能揭示两个半球尺度上的这种长期温度变化, 但排除了海洋沉积物数据或仅基于冰芯记录的重建仍能显示显著的温度下降趋势. 本文还发现, 南半球温度重建序列普遍存在更明显的长期降温趋势. 全球年平均温度重建显示的长期降温趋势主要是由来自南半球的非树轮资料所贡献, 且该趋势对代用记录的选择比较敏感.

与非树轮重建相比, 基于树轮的温度重建序列能够捕捉到火山喷发后更强的降温效应. 然而, 与树轮宽度数据相关的潜在非气候噪声很可能会削弱真实的火山喷发导致的降温幅度, 同时还可能会延迟该降温信号的峰值. 未来需要开发更多受树木生长影响较小的高精度树轮代用指标, 例如树轮最大晚材密度数据(Esper等, 2015; Yang等, 2023), 以进一步减少基于树轮重建所出现的火山降温响应偏差. 另一方面, 低时间分辨率的地质代用资料可能在指示高频变化方面存在较多问题, 因此本文不建议使用基于低分辨率地质代用资料的重建研究过去火山喷发对气候系统的影响.

尽管过去数十年间进行了许多过去2000年的气候重建工作, 但全球尺度的温度序列仍然存在较多不确定性, 尤其是在其低频变化或长期趋势方面. 过去1000年的重建明显比第一个千年的结果更为可靠, 特别是在北半球的中高纬地区. 未来需要进一步研发新的气候代用指标, 并不断改善目前代用记录的时空覆盖范围, 特别是在南半球和热带地区. 考虑到不同代用指标特定的频谱特性, 需要发展新的方法融合不同类型的代用数据, 优化大空间尺度的气候重建, 以捕获多尺度的气候变化信息.

参考文献

孙炜毅, 陈德亮, 闾国年, 宁亮, 高超超, 张人禾, 王斌, 刘健. 2024. 过去2000年重大火山喷发对全球和中国气候的影响. 中国科学: 地球科学, 54: 64–82

Anchukaitis K J, Smerdon J E. 2022. Progress and uncertainties in global and hemispheric temperature reconstructions of the Common Era. Quat Sci Rev, 286: 107537

Bader J, Jungclaus J, Krivova N, Lorenz S, Maycock A, Raddatz T, Schmidt H, Toohey M, Wu C J, Claussen M. 2020. Global temperature modes shed light on the Holocene temperature conundrum. Nat Commun, 11: 4726

Briffa K R, Jones P D, Bartholin T S, Eckstein D, Schweingruber F H, Karlén W, Zetterberg P, Eronen M. 1992. Fennoscandian summers from AD 500: Temperature changes on short and long timescales. Clim Dyn, 7: 111–119

Büntgen U, Myglan V S, Ljungqvist F C, McCormick M, Di Cosmo N, Sigl M, Jungclaus J, Wagner S, Krusic P J, Esper J, Kaplan J O, de Vaan M A C, Luterbacher J, Wacker L, Tegel W, Kirdyanov A V. 2016. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. Nat Geosci, 9: 231–236

Büntgen U, Arseneault D, Boucher É, Churakova (Sidorova) O V, Gennaretti F, Crivellaro A, Hughes M K, Kirdyanov A V, Klippel L, Krusic P J, Linderholm H W, Ljungqvist F C, Ludescher J, McCormick M, Myglan V S, Nicolussi K, Piermattei A, Oppenheimer C, Reinig F, Sigl M, Vaganov E A, Esper J. 2020. Prominent role of volcanism in Common Era climate variability and human history. Dendrochronologia, 64: 125757

Büntgen U, Allen K, Anchukaitis K J, Arseneault D, Boucher É, Bräuning A, Chatterjee S, Cherubini P, Churakova O V, Corona C, Gennaretti F, Grießinger J, Guillet S, Guiot J, Gunnarson B, Helama S, Hochreuther P, Hughes M K, Huybers P, Kirdyanov A V, Krusic P J, Ludescher J, Meier W J H, Myglan V S, Nicolussi K, Oppenheimer C, Reinig F, Salzer M W, Seftigen K, Stine A R, Stoffel M, St. George S, Tejedor E, Trevino A, Trouet V, Wang J, Wilson R, Yang B, Xu G, Esper J. 2021. The influence of decision-making in tree ring-based climate reconstructions. Nat Commun, 12: 3411

Büntgen U, Arseneault D, Boucher É, Churakova (Sidorova) O V, Gennaretti F, Crivellaro A, Hughes M K, Kirdyanov A V, Klippel L, Krusic P J, Linderholm H W, Ljungqvist F C, Ludescher J, McCormick M, Myglan V S, Nicolussi K, Piermattei A, Oppenheimer C, Reinig F, Sigl M, Vaganov E A, Esper J. 2022. Recognising bias in Common Era temperature reconstructions. Dendrochronologia, 74: 125982

Burke A, Innes H M, Crick L, Anchukaitis K J, Byrne M P, Hutchison W, McConnell J R, Moore K A, Rae J W B, Sigl M, Wilson R. 2023. High sensitivity of summer temperatures to stratospheric sulfur loading from volcanoes in the Northern Hemisphere. Proc Natl Acad Sci USA, 120: e2221810120

Christiansen B, Ljungqvist F C. 2017. Challenges and perspectives for large-scale temperature reconstructions of the past two millennia. Rev Geophys, 55: 40–96

Cook E R, Briffa K R, Meko D M, Graybill D A, Funkhouser G. 1995. The 'segment length curse' in long tree-ring chronology development for palaeoclimatic studies. Holocene, 5: 229–237

D'Arrigo R, Wilson R, Jacoby G. 2006. On the long-term context for late twentieth century warming. J Geophys Res, 111: D03103

Ebisuzaki W. 1997. A method to estimate the statistical significance of a correlation when the data are serially correlated. J Clim, 10: 2147–2153

Esper J, Büntgen U. 2021. The future of paleoclimate. Clim Res, 83: 57–59

Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. 2002. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. Science, 295: 2250–2253

Esper J, Frank D C, Timonen M, Zorita E, Wilson R J S, Luterbacher J, Holzkämper S, Fischer N, Wagner S, Nievergelt D, Verstege A, Büntgen U. 2012. Orbital forcing of tree-ring data. Nat Clim Change, 2: 862–866

Esper J, Schneider L, Smerdon J E, Schöne B R, Büntgen U. 2015. Signals and memory in tree-ring width and density data. Dendrochronologia, 35: 62–70

Gennaretti F, Arseneault D, Nicault A, Perreault L, Bégin Y. 2014. Volcano-induced regime shifts in millennial tree-ring chronologies from northeastern North America. Proc Natl Acad Sci USA, 111: 10077–10082

Hartl-Meier C T M, Büntgen U, Smerdon J E, Zorita E, Krusic P J, Ljungqvist F C, Schneider L, Esper J. 2017. Temperature covariance in tree-ring reconstructions and model simulations over the past millennium. Geophys Res Lett, 44: 9458–9469

IPCC. 2021. Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors S L, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis M I, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews J B R, Maycock T K, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B. eds. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 3−32

Kaufman D S, Schneider D P, McKay N P, Ammann C M, Bradley R S, Briffa K R, Miller G H, Otto-Bliesner B L, Overpeck J T, Vinther B M, Abbott M, Axford Y, Bird B, Birks H J B, Bjune A E, Briner J, Cook T, Chipman M, Francus P, Gajewski K, Geirsdóttir Á, Hu F S, Kutchko B, Lamoureux S, Loso M, MacDonald G, Peros M, Porinchu D, Schiff C, Seppä H, Thomas E. 2009. Recent warming reverses long-term arctic cooling. Science, 325: 1236–1239

Kaufman D, McKay N, Routson C, Erb M, Dätwyler C, Sommer P S, Heiri O, Davis B. 2020. Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach. Sci Data, 7: 201

Klippel L, St. George S, Büntgen U, Krusic P J, Esper J. 2020. Differing pre-industrial cooling trends between tree rings and lower-resolution temperature proxies. Clim Past, 16: 729–742

Lücke L J, Hegerl G C, Schurer A P, Wilson R. 2019. Effects of memory biases on variability of temperature reconstructions. J Clim, 32: 8713–8731

Macias-Fauria M, Grinsted A, Helama S, Holopainen J. 2012. Persistence matters: Estimation of the statistical significance of paleoclimatic reconstruction statistics from autocorrelated time series. Dendrochronologia, 30: 179–187

Mann M E, Zhang Z, Hughes M K, Bradley R S, Miller S K, Rutherford S, Ni F. 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. Proc Natl Acad Sci USA, 105: 13252–13257

Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, Mix A C. 2013. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. Science, 339: 1198–1201

McGregor H V, Evans M N, Goosse H, Leduc G, Martrat B, Addison J A, Mortyn P G, Oppo D W, Seidenkrantz M S, Sicre M A, Phipps S J, Selvaraj K, Thirumalai K, Filipsson H L, Ersek V. 2015. Robust global ocean cooling trend for the pre-industrial Common Era. Nat Geosci, 8: 671–677

Miller G H, Geirsdóttir Á, Zhong Y, Larsen D J, Otto-Bliesner B L, Holland M M, Bailey D A, Refsnider K A, Lehman S J, Southon J R, Anderson C, Björnsson H, Thordarson T. 2012. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks. Geophys Res Lett, 39: L02708

Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K, Datsenko N M, Karlén W, Lauritzen S E. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. Nature, 439: 1014

Morice C P, Kennedy J J, Rayner N A, Jones P D. 2012. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. J Geophys Res, 117: D08101

Neukom R, Barboza L A, Erb M P, Shi F, Emile-Geay J, Evans M N, Franke J, Kaufman D S, Lücke L, Rehfeld K, Schurer A, Zhu F, Brönnimann S, Hakim G J, Henley B J, Ljungqvist F C, McKay N, Valler V, von Gunten L. 2019a. Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. Nat Geosci, 12: 643–649

Neukom R, Steiger N, Gómez-Navarro J J, Wang J, Werner J P. 2019b. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. Nature, 571: 550–554

PAGES 2k Consortium. 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. Nat Geosci, 6: 339–346

PAGES 2k Consortium. 2017. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era. Sci Data, 4: 170088

Rao M P, Cook E R, Cook B I, Anchukaitis K J, D'Arrigo R D, Krusic P J, LeGrande A N. 2019. A double bootstrap approach to Superposed Epoch Analysis to evaluate response uncertainty. Dendrochronologia, 55: 119–124

Robock A. 2000. Volcanic eruptions and climate. Rev Geophys, 38: 191–219

Schneider T. 2001. Analysis of incomplete climate data: Estimation of mean values and covariance matrices and imputation of missing values. J Clim, 14: 853–871

Schneider L, Smerdon J E, Büntgen U, Wilson R J S, Myglan V S, Kirdyanov A V, Esper J. 2015. Revising midlatitude summer temperatures back to A.D. 600 based on a wood density network. Geophys Res Lett, 42: 4556–4562

Sigl M, Winstrup M, McConnell J R, Welten K C, Plunkett G, Ludlow F, Büntgen U, Caffee M, Chellman N, Dahl-Jensen D, Fischer H, Kipfstuhl S, Kostick C, Maselli O J, Mekhaldi F, Mulvaney R, Muscheler R, Pasteris D R, Pilcher J R, Salzer M, Schüpbach S, Steffensen J P, Vinther B M, Woodruff T E. 2015. Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. Nature, 523: 543–549

Stoffel M, Khodri M, Corona C, Guillet S, Poulain V, Bekki S, Guiot J, Luckman B H, Oppenheimer C, Lebas N, Beniston M, Masson-Delmotte V. 2015. Estimates of volcanic-induced cooling in the Northern Hemisphere over the past 1,500 years. Nat Geosci, 8: 784–788

Toohey M, Sigl M. 2017. Volcanic stratospheric sulfur injections and aerosol optical depth from 500 BCE to 1900 CE. Earth Syst Sci Data, 9: 809–831

Wang F, Arseneault D, Boucher É, Gennaretti F, Yu S, Zhang T. 2022. Tropical volcanoes synchronize eastern Canada with Northern Hemisphere millennial temperature variability. Nat Commun, 13: 5042

Wang F, Arseneault D, Boucher É, Gennaretti F, Lapointe F, Yu S, Francus P. 2023. Volcanic imprints in last-millennium land summer temperatures in the circum–North Atlantic area. J Clim, 36: 5923–5939

Wanner H. 2021. Late-Holocene: Cooler or warmer? Holocene, 31: 1501–1506

Wilson R, Anchukaitis K, Briffa K R, Büntgen U, Cook E, D'Arrigo R, Davi N, Esper J, Frank D, Gunnarson B, Hegerl G, Helama S, Klesse S, Krusic P J, Linderholm H W, Myglan V, Osborn T J, Rydval M, Schneider L, Schurer A, Wiles G, Zhang P, Zorita E. 2016. Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long term context. Quat Sci Rev, 134: 1–18

Wu Z, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. Adv Adapt Data Anal, 01: 1–41

Yang B, Qin C, Bräuning A, Osborn T J, Trouet V, Ljungqvist F C, Esper J, Schneider L, Grießinger J, Büntgen U, Rossi S, Dong G, Yan M, Ning L, Wang J, Wang X, Wang S, Luterbacher J, Cook E R, Stenseth N C. 2021. Long-term decrease in Asian monsoon rainfall and abrupt climate change events over the past 6,700 years. Proc Natl Acad Sci USA, 118: 2102007118

Yang B, He M H, Yang L, Wang F, Ljungqvist F C. 2023. Pine maximum latewood density in semi-arid Northern China records hydroclimate rather than temperature. Geophys Res Lett, 50: e2023GL104362

(责任编委: 许晨曦)