

全新世温度研究回顾及对历史人地关系的启示

饶志国,秦倩倩,魏士凯,郭海春,李云霞

(湖南师范大学地理科学学院亚热带生态与环境变化重点实验室,长沙 410081)

摘要: 最新一些研究结果强调了全新世期间的长期增温趋势,综合全球平均海平面、大陆冰盖面积、大气温室气体和太阳辐射证据来看,这比传统观点所认为的全新世期间的长期降温趋势,更具有合理性。回顾历史,结合最新的一些研究进展,发现支持“中全新世大暖期”和“晚全新世降温趋势”的证据存在明显的不确定性,最核心的问题为晚全新世加强的人类活动对代用指标或者证据的强烈扰动,使得其不能准确地反映真实的气候变化过程。鉴于目前全新世温度历史争论的核心关键在于晚全新世,因此有必要加强晚全新世温度变化研究。在人类活动影响较小的地区,或者利用对人类活动不敏感的代用指标开展研究,有望可以获得更可靠的晚全新世温度历史重建结果,为准确认识中华数千年文明的长期温度变化背景,进而理解期间的“人地关系”演化历史,并最终客观认识现今面临的以全球变暖为主要特征的气候环境问题,提供一定的科学基础。

关键词: 全新世;变暖;变冷;晚全新世;历史人地关系;中国

DOI: 10.11821/dlxb202205009

1 引言

Osman等基于全球分布的539条海洋沉积记录(主要为 $\delta^{18}\text{O}$ 、长链不饱和烯酮不饱和度、 Mg/Ca 、 TEX_{86} 记录),采用古气候数据同化方法,得到了末次盛冰期以来的、200 a分辨率的全球平均表面温度(ΔGMST)集成记录。其结果显示,自早全新世约9 ka BP开始, ΔGMST 小幅度、但稳定地上升了约0.5 °C,亦即全新世期间存在长期整体增温趋势^[1]。Bova等基于全球南北纬40°之间的44条海洋沉积记录(主要为 Mg/Ca 比和长链不饱和烯酮不饱和度记录)得到的年均海表温度(MASST)记录,同样在全新世期间表现为总体增温趋势,基于该MASST记录与气候模型输出的全球平均海表温度(Global SST)记录之间的一致性,Bova等认为该MASST记录具有全球性代表意义^[2]。尽管Bova等利用数学方法来确定海洋沉积记录中可能存在的季节性,仍存一定的逻辑缺陷,但这两项研究也的确表明部分学者认为全新世期间存在整体增温趋势。

近年来,越来越多的研究结果认为全新世期间存在整体增温趋势。2014年Liu等利用数个古气候模型模拟的结果,显示了全新世期间全球年平均温度的总体增温趋势^[3]。2015年Meyer等报道的北极勒纳河三角洲冰楔物 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,其记录了过去约7.5 ka以来的整体增温趋势,被认为是冬季温度变化的指示器^[4]。2017年Baker等报道的南乌拉尔山洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,同样记录了全新世期间的整体增温趋势,也被认为是冬季温度变化的指示器^[5]。2018年Marsicek等报道的欧洲和北美642个孢粉记录重建的区域年均温集成记

收稿日期: 2021-11-27; 修订日期: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171156) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42171156]

作者简介: 饶志国(1978-), 男, 湖南长沙人, 教授, 主要从事地球化学与全球变化研究。E-mail: raozhg@hunnu.edu.cn

录, 同样显示了全新世期间的整体增温趋势, 但在约 4 ka 以来仍有微弱降温趋势^[6]。2019 年和 2020 年, Rao 等报道的南阿尔泰山高山泥炭岩芯植物残体全样 α -纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 分别被认为是夏季和冬季温度变化的指示器, 二者都记录了全新世期间的整体增温趋势^[7-8]。

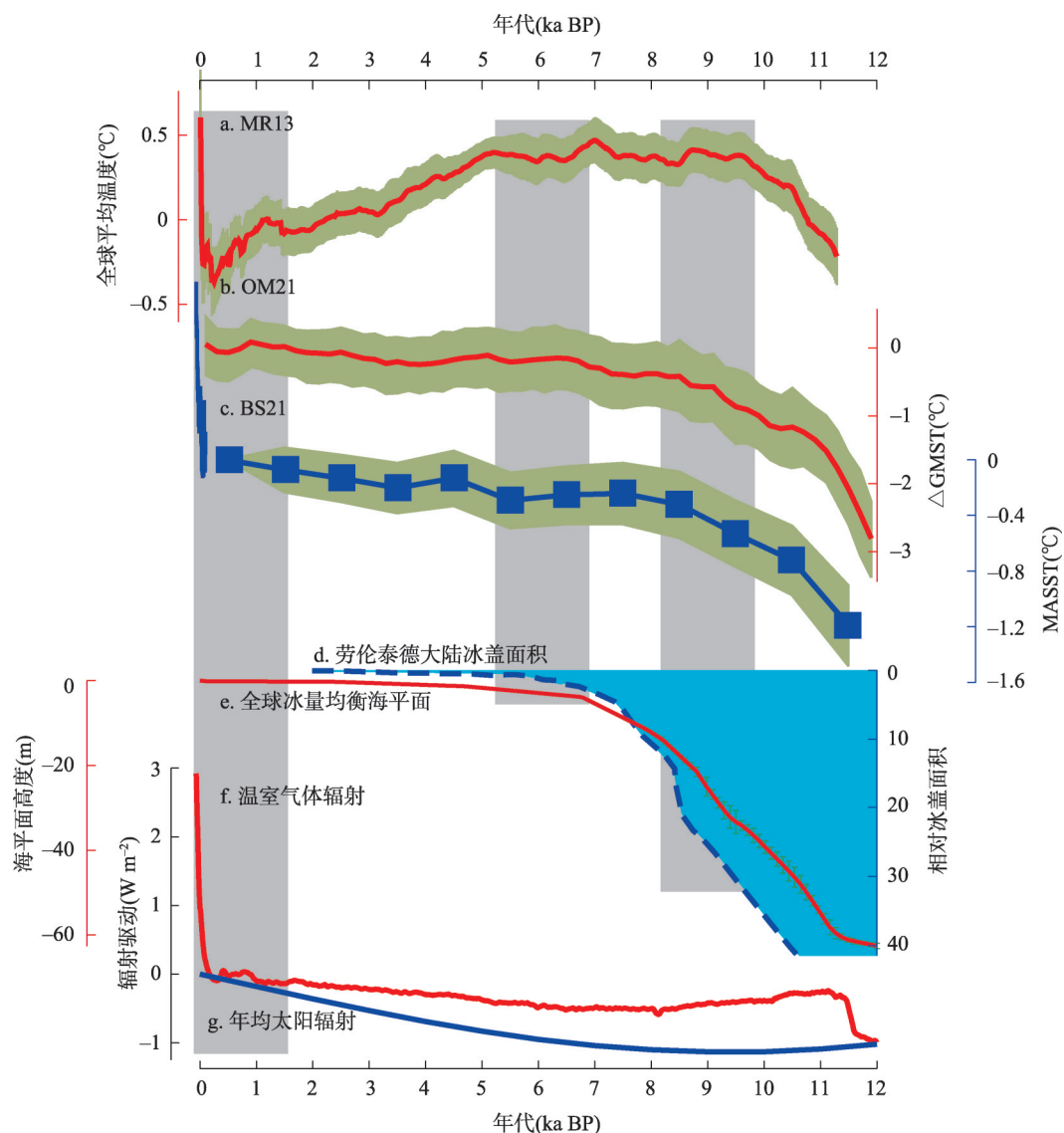
上述结果表明, 越来越多的研究者认为全新世期间存在整体增温趋势, 这对全新世期间存在整体降温趋势的传统观点^[9]造成了显著的冲击。因此, 结合更多的研究结果和证据, 评估全新世整体增温/降温趋势的合理性, 具有必要性; 在此基础上, 更进一步分析传统观点当中可能存在的问题及原因, 对于进一步推动相关研究, 具有一定科学价值和意义。更为重要的是, 鉴于目前全新世温度争议主要存在于晚全新世, 作为全球独一无二的延续数千年的中华文明, 其发展演化的长期温度背景, 是以“人地关系”研究为核心的地理学者所必须要关心并积极探索的重大问题。

2 全新世长期增温趋势的合理性

基于全球 73 条记录 (绝大部分为海洋沉积记录) 得到的全球平均温度集成记录 (定义为 MR13 记录、图 1a)^[9], 作为全新世期间存在整体降温趋势观点的代表性记录; 其显示了约 11.3—10 ka BP 期间的增温阶段, 约 10—5 ka BP 的相对高温阶段及其后的长期降温趋势, 和工业革命后的反转性的、急剧的增温。将基于全球 539 条海洋沉积记录得到的 ΔGMST 记录 (定义为 OM21 记录、图 1b)^[1] 和基于全球南北纬 40° 之间的 44 条海洋沉积记录得到的 MASST 记录 (定义为 BS21 记录、图 1c)^[2], 作为全新世期间存在整体增温趋势观点的代表性记录。二者都显示了约 11—7 ka BP 期间的相对快速增温及其后的相对缓慢增温 (图 1b、1c) 以及工业革命后的大幅增温 (图 1c)。并结合北半球中高纬劳伦泰德大陆冰盖面积记录^[10] (图 1d)、全球冰量均衡海平面记录^[11] (图 1e)、全新世主要温室气体 ($\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}$) 综合辐射驱动记录^[12] (图 1f) 和全新世年均太阳辐射驱动记录^[13] (图 1g) 评估全新世整体增温/降温趋势的合理性。

全球冰量以及相应的海平面变化与全球平均温度具有密切的关系, 全球平均温度低, 全球冰量大、海平面低、反之亦然。MR13 记录显示 10—8 ka BP 和 7—5 ka BP 期间全球平均温度相当 (图 1a), 但是对应的全球冰量均衡海平面高度 (图 1e) 和北半球中高纬劳伦泰德大陆冰盖面积 (图 1d) 则处于两种完全不同的状态 (以图 1 中灰色竖条所显示)。同样的, MR13 记录显示 3 ka BP 以来的全球平均温度与约 11.3—10.5 ka BP 期间的全球平均温度相当, 甚至更低 (图 1a); 但是 3 ka BP 以来的全球平均海平面并未发生显著的降低 (图 1e), 而相应的大陆冰盖也并未发生显著的扩张 (图 1d), 这与约 11.3—10.5 ka BP 期间的高纬大陆冰盖和全球平均海平面处于截然不同的两种状态。对比来看, MR13 记录代表的早—中全新世相对高温而晚全新世发生明显降温存在不合理。

温室气体和太阳辐射被认为是最重要的地球气候系统的内、外驱动要素。全新世期间, 年均太阳辐射呈整体上升趋势 (图 1g); 温室气体辐射驱动则在约 11—7 ka BP 期间呈微弱下降趋势, 随后呈总体上升趋势, 并在工业革命后呈大幅上升趋势 (图 1f)。从温室气体和太阳辐射驱动记录来看, MR13 记录代表的全新世整体降温趋势同样不具有合理性。不容忽视的是, MR13 记录显示了约 5 ka BP 以来长期降温趋势上发生的逆转性的、大幅度的工业革命后变暖 (图 1a); 但是无论是温室气体辐射驱动, 还是太阳辐射驱动, 都未发生逆转性的变化。这表明, MR13 记录代表的逆转性的工业革命后大幅增温, 缺乏对应的逆转性驱动因素, 这同样使得其合理性存疑。



注: 数据来源为MR13记录^[9]、OM21记录^[1]、BS21记录^[2]、全球冰量均衡海平面记录^[11]、劳伦泰德大陆冰盖面积记录^[5,10]、温室气体辐射驱动记录^[2,12]、年均太阳辐射驱动记录^[12,13]

图1 全新世温度及其他研究记录对比

Fig. 1 Comparison of the Holocene temperature and other relevant records

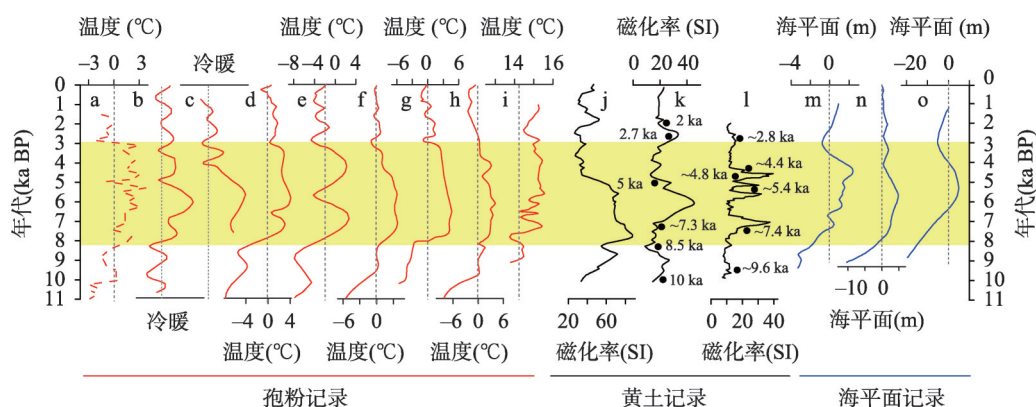
与MR13记录不同, OM21记录(图1b)和BS21记录(图1c)显示的约11—7 ka BP期间的相对快速增温, 与对应的海平面快速降低(图1e)和大陆冰盖面积快速退缩(图1d), 吻合较好。而OM21记录和BS21记录显示的约7 ka BP以来的相对缓慢的长期增温(图1b、1c), 以及在此背景下发生的工业革命后的大幅增温(图1c), 则在相对稳定的海平面和大陆冰盖面积背景下, 与相应的温室气体和太阳辐射驱动记录吻合较好。总之, 依据已有的全球平均海平面、大陆冰盖面积、温室气体和太阳辐射驱动记录, OM21记录和BS21记录所代表的全新世长期整体增温趋势, 显然比MR13记录所代表的全新世长期整体降温趋势, 更具合理性。

3 中全新世大暖期 不确定性问题

施雅风等基于对中国 70 年代以来获得的众多古气候研究结果的总结（这些结果主要来自孢粉、动物化石、黄土/古土壤序列、海平面波动、湖泊水位和山地冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录等），提出约 8.5—3 ka BP 是“中全新世大暖期”（Mid-Holocene Megathermal）阶段，其中约 7.2—6 ka BP 为大暖期的鼎盛阶段（Megathermal Maximum），并在随后具有整体的长期降温趋势。这一观点在中国学术界拥有广泛而深远的影响力，对推动全新世古气候研究起到了不可否认的巨大历史贡献。然而，一方面该观点的支撑证据存在不确定性^[14-15]；另一方面，全新世长期增温趋势可能更具合理性。这就要求在更多、更新研究结果的基础上，对“中全新世大暖期”观点的不确定性加以分析，以期进一步推动相关研究。

3.1 孢粉记录

四川螺髻山（图 2a）、青海湖（图 2b）、内蒙古（图 2c）、黄土高原（图 2d）、北京（图 2e）、河北东部（图 2f）、辽南（图 2g）、长白山西部（图 2h）、江苏庆丰（图 2i）的孢粉记录被认为是“中全新世大暖期”的主要支持证据之一，这些记录主要来自中国季风湿润地区。一方面，施雅风等认为新石器时代的人类活动已足以对若干地点的天然植被或孢粉谱造成相当影响^[14]；另一方面，无论是约 10—4 ka BP 的新石器时代，还是约 4 ka BP 之后的青铜时代^[16]，中国季风湿润地区都有数量极其庞大的考古遗址存在^[17]，这表明晚全新世期间的人类活动的确有可能对该区域植被造成显著的影响。例如，中国南海北部海洋钻孔岩芯的全新世和之前 4 个盛间冰期的高分辨率孢粉记录的对比分析表明，早在约 6 ka BP 人类通过土地利用等活动就已经完全、并且永久性的改变了中国南方地方的自然植被^[18]。定量化分析全新世期间的人为地表覆盖变化的结果表明，约 3 ka BP 以来人为种植地（Cropland）在中国季风湿润地区已经占据了相当显著的比例，对自然植被强烈改造^[19]。华北渤海海洋岩芯的孢粉分析结果指出早/晚全新世存在相对高温阶段和中全新世存在相对低温阶段（与“中全新世大暖期”观点完全不一致）；尤其是近 1000 a，山东半岛的植被受到了人类活动的强烈扰动，表现为栎属（*Quercus*）的急剧减少和次生针叶林的增加^[20]。Zheng 等近期报道的研究结果也显示，稻作农业的加剧和扩散不仅造成了中国南方地方广泛的森林破坏，而且导致了植被构成的显著改变和林木多样性的降低^[21]。



注：改绘自文献^[14]；a：四川螺髻山、b：青海湖、c：内蒙古、d：黄土高原、e：北京、f：河北东部、g：辽南、h：长白山西部、i：江苏庆丰、j：巴谢、k：九州台、l：榆林、m：江苏庆丰、n：中国东部海岸、o：日本。

图2 支持“中全新世大暖期”观点的部分记录

Fig. 2 Typical records that supported the viewpoint of a "Mid-Holocene Megathermal"

从更广阔的空间尺度来看, Jenny等基于对全球632个湖泊(约80%位于欧洲和北美)的沉积速率和孢粉记录的分析, 认为约4 ka BP以来的人类活动导致了相当部分湖泊流域(35%)的森林植被破坏, 进而导致地表侵蚀速率的加强, 最终表现为这些湖泊的沉积速率的显著上升^[22]。Li等认为虽然4 ka BP以来的森林植被破坏导致了木本孢粉比例的降低, 导致了据此重建的温度的微弱降温趋势, 但是该时期的森林破坏主要是人类活动造成的, 用该时段的孢粉重建温度变化并不适宜^[23]。Mottl等基于对全球1181个孢粉记录的分析, 发现在全球所有的大陆晚全新世期间的植被变化速率已经达到甚至超过了相应的末次冰消期期间的变化速率, 暗示人类活动对晚全新世期间的陆地生态系统的改造幅度已经超过了末次冰消期期间的气候变化对陆地生态系统的影响^[24]。综合上述中国乃至全球性最新结果来看, 中国季风湿润地区晚全新世植被变化更可能主要是人类活动, 而不是气候变化所导致。

3.2 动物化石证据

野生动物化石与相应动物的现代分布区间的对比也被作为“中全新世大暖期”的支撑证据之一。比如, 约8—3 ka BP期间分布在河北省阳原县的亚洲象化石, 现代存在于云南省西南部; 约6—5.6 ka BP期间存在于西安半坡新石器考古遗址的犀牛化石, 现代存在于印度、缅甸境内; 约6—5.5 ka BP期间分布在山东大汶口、兖州王因遗址的扬子鳄化石, 现存在于长江流域。但施雅风等认为动物的大幅度南迁不仅由于晚全新世的气候变冷, 也由于人类的捕杀所致^[14]。对5种过去2000 a曾广泛分布在中国的大型哺乳动物(亚洲象、犀牛、虎、亚洲黑熊和棕熊)的研究表明, 文化演化和人类活动对这些大型哺乳动物的分布起主要影响作用, 其影响超过了气候变化的影响^[25]。这使得我们有理由相信, 中国北方发现的中全新世大型哺乳动物化石, 不一定能够指示期间的相对高温状态。

3.3 黄土/古土壤序列和磁化率记录

黄河中上游的半干旱、半湿润地区的数个黄土与风沙沉积剖面(巴谢、九州台、榆林)中发现的中全新世古土壤地层以及相应的全新世磁化率记录(图2j~2l), 同样被认为指示了中全新世期间的相对高温阶段。但施雅风等认为有些古土壤分布在较短距离出现重大差异, 这需要谨慎识别它是由局地环境变异所成还是区域气候变化的结果^[14]。一方面, 黄土/古土壤剖面的磁化率代用指标, 越来越被认为指示了成壤强度^[26], 主要受控于湿度的变化, 而不是温度的变化^[27], 因此中国黄土/古土壤序列的磁化率指标, 更多被认为是土壤水分平衡和降水变化的指示器, 最终指示了东亚夏季风强度的变化^[28-29]。另一方面, 黄土高原中全新世古土壤地层(通常标示为 S_0)及其上部薄层的类黄土地层(通常标示为 L_0)被广泛的发现和报道, 但丁仲礼认为黄土高原顶部的 L_0 地层, 不一定是气候恶化的结果, 也有可能是人类活动的结果。近期一些研究结果, 似乎越来越证明这一观点。基于中国众多孢粉定量重建的人为土地利用覆盖变化结果表明, 约3 ka BP以来黄土高原地区的种植地已经占到相当显著的比例^[19]; 基于沉积记录重建受人类活动影响的蜗牛种属数据发现, 人类活动可能(尤其是农业活动)在2000 a以前就已经永久性的改变了黄土高原地区的自然生态系统和土壤动物群落^[30]; 对黄土高原地区北洛河流域景观演化模型的分析结果表明, 早在5000 a前人为土地覆盖变化就已经显著改变了流域的土壤侵蚀和河流的沉积物通量^[31]。

3.4 海平面波动记录

来自中国和日本沿海地区的海平面波动记录, 也被认为是“中全新世大暖期”的支撑证据(3个典型记录如图2m~2o所示), 但施雅风等认为海面波动既受全球气候变化也

受地壳升降变形的影响,具体确定其高度也需考虑多种因素^[4]。值得注意的是,3条典型海平面记录曲线中,有2条记录曲线显示了约3 ka BP以来(晚全新世)的上升趋势(图2m、2o),这与最近报道的英国西南部锡利群岛重建的晚全新世海平面上升趋势^[32]一致。全球冰量均衡平均海平面集成记录^[11](图1e)和中国及马来西亚—泰国地区的冰量均衡海平面模拟记录^[33]都未显示晚全新世期间的明显下降趋势。综合来看,海平面证据似不足以支持“中全新世大暖期”和随后的晚全新世期间的降温趋势。

3.5 湖面波动记录和山地冰川 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

季风边缘区的湖泊(如岱海、青海湖、班公湖)水位记录、古冰川遗迹与冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(如敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录)也被用以支持全新世温度变化历史^[14-15]。然而,由于湖泊水位变化受控于水量平衡,在季风边缘区更多受控于降水量,季风边缘区的湖泊水位记录被越来越多的用于指示夏季风强度的变化^[34-35]。值得注意的是,青藏高原北部地区(敦德冰芯所在地)的冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 不一定主要受“温度效应”控制,还可能受到环流系统调整和水汽来源(季风vs西风系统)变化的潜在影响^[36-37]。此外,中国山地冰芯的年代仍存争议^[38-39]。或许由于这一重要因素的影响,敦德冰芯全新世 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[14-15, 40]、青藏高原西南部古里雅冰芯全新世 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[41]和崇测冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[42],具有完全不同的变化特征。因此,前述这些湖泊水位记录和冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录也不是确定可靠的全新世温度记录。

综上,由于代用指标易受到人类活动扰动(如孢粉、动物化石、表层土壤性状)、可能与湿度(或降水量)关系更密切(如黄土磁化率、湖泊水位波动)、并不完全支持“中全新世大暖期”(如海平面波动)、山地冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录存在年代学和气候指示意义的不确定性等,这些证据所支撑的“中全新世大暖期”和随后的晚全新世期间降温趋势,需要开展更多的分析和评估。

4 分析与讨论

尽管全新世期间的长期增温或降温趋势仍存争议(图1),且越来越多的证据也支持对“中全新世大暖期”和随后晚全新世降温趋势的合理怀疑,但对末次冰消期至中全新世期间的长期增温趋势无显著争议(图1、图2)。争议存在于晚全新世,如果晚全新世期间存在整体降温趋势,则全新世温度历史会表现出如图1a中MR13记录所示的长期降温趋势,或如图2所示的“中全新世大暖期”变化模式;反之,如果晚全新世期间存在整体增温趋势,则显然全新世温度历史会表现出如图1b中OM21记录和图1c中BS21记录所示的长期增温趋势。晚全新世又是人类活动及其对气候环境影响显著加强的时期,这一方面凸显了准确重建该时段温度变化历史对于理解“人地关系”有重要意义;另一方面也为重建记录的准确解译(气候或人为驱动)增加了难度。在人类活动影响较小的地区(如高纬度和高海拔地区),或者利用受人类活动影响较小的代用指标来开展晚全新世温度历史重建,或许是可行的解决办法。

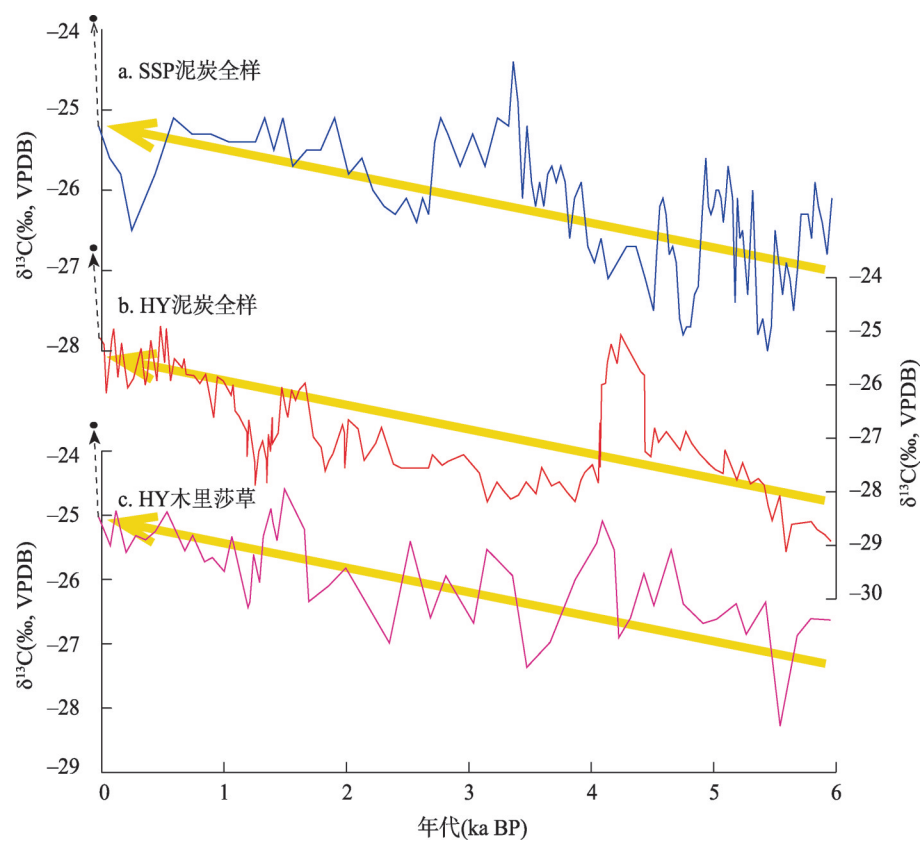
此外,北半球冬季太阳辐射在全新世期间呈整体上升趋势,使得全新世期间的整体冬季增温趋势易于被学术界接受。如北极勒纳河三角洲冰楔物和南乌拉尔山洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,都被认为是冬季温度变化的指示器,二者分别被认为记录了过去7.5 ka和11 ka以来的整体增温趋势^[4-5]。但由于北半球夏季太阳辐射在全新世期间呈整体下降趋势,这使得部分学者认为全新世期间的夏季温度存在整体降温趋势。如利用30 d时间窗口太阳辐射与相应沉积记录的最佳拟合所确定的南北纬40°之间的44条海洋沉积记录的季节性偏向中,绝大部分记录被认为是夏季(6—9月)海表温度变化指示器,而集成的季节

性海表温度记录也显示, 约11—7 ka BP期间存在相对快速增温趋势, 随后有明显降温趋势^[2]。在进一步利用数学方法去除这些记录的季节性偏向后, 得到的集成年均海表温度记录则显示, 约11—7 ka BP期间存在相对快速增温, 其后增温趋势相对缓慢(图1c)^[2]。一方面, 用数学方法确定指标记录的季节性存在逻辑缺陷, 不能反映真实的物理机制。另一方面, Bova等认为年均海表温度约11—7 ka BP期间的相对快速增温和其后的相对缓慢增温, 分别受到了冰盖退缩和温室气体浓度上升的驱动^[2]。约11—7 ka BP期间的冰盖退缩同时驱动了年均海表温度和夏季海表温度的快速上升; 但是约7 ka BP以来的温室气体浓度上升, 却只驱动了年均海表温度的上升, 不影响夏季海表温度的下降趋势。在逻辑上是难以自洽的, 因为冰盖和温室气体驱动应当都不具有季节性。

实际上, 晚全新世夏季也很可能存在长期整体增温趋势。2010年在中亚南阿尔泰山的哈拉沙子(Sahara Sand Wetland, SSP)高山泥炭地获取的两根平行泥炭岩芯(ATM10-C6和ATM10-C7)的研究结果发现, 该泥炭地泥炭沉积时段的原地植物一直以莎草占据绝对优势地位, 与该泥炭地现代植被情况一致。这使得可以对SSP的现生莎草开展观测, 从而为相应沉积记录的古气候解译提供参照^[7]。2014年和2017年的生长季(5—9月)的SSP的现生莎草逐月采样的 α -纤维素碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$)数据的分析表明, 现生莎草样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 数据都与采样前月的月均温度呈显著正相关关系(月际尺度), 但与当月的月降水量无显著相关性。1954—2011年的树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 数据同样与相应的夏季温度呈显著正相关关系(年际—年代际尺度)^[7], 这之前报道的阿尔泰山树轮 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 数据常被用于重建最暖月平均温度变化历史^[43-45]相一致。依据这些结果, 判定SSP的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 记录应当是夏季温度变化的指示器^[7]。由于SSP泥炭地冬季被冰雪封盖, 水分条件不是莎草生长的限制因素, 且SSP原位实测月均相对湿度变化在73%~80%之间, 并无显著波动^[46]。因此, 莎草 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 主要响应于夏季温度变化, 应当是可靠的。

与SSP相距约2000 km的青藏高原东北部的红原(Hongyuan, HY)泥炭地, 也曾报道过泥炭全样和木里莎草(*Carex Mulieensis*)残体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 记录^[47]。该项工作中, 仅对12种现生泥炭地植物进行了一次性的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 测量, 并未开展时间序列上的观测。考虑到泥炭地植物大多为水生或半水生植物, 水分条件应当不是泥炭植物光合作用的限制条件。参考上述SSP开展的逐月现生莎草 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 观测结果, 我们合理的推测, HY泥炭岩芯 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 也很有可能是夏季温度变化的指示器。过去6 ka间, 无论是SSP泥炭岩芯全样、还是HY泥炭岩芯全样和木里莎草 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 记录(图3), 均显示了长期偏正变化趋势, 暗示了期间的长期夏季变暖趋势。此外, HY泥炭岩芯全样和木里莎草 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 记录的长期一致性, 表明该泥炭地的植被一直以莎草占据绝对优势地位, 与SSP一致。考虑到工业革命以来, 来自化石燃料燃烧的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负的 CO_2 的大量排放, 全球大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 约偏负了1.5‰, 使得全球植物 $\delta^{13}\text{C}$ 同样会偏负约1.5‰^[48]。如果考虑这一效应, SSP和HY泥炭岩芯 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 记录的现代温度不但是过去6 ka以来最高的, 而且表现出近期急剧增温趋势(图3)。无论如何, 考虑到SSP和HY的特定位置(偏远地区的高海拔山地泥炭), 其晚全新世莎草 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 受到人类活动强烈扰动的可能性较小; 而相距约2000公里的两地记录的相互验证, 表明过去约6 ka以来的长期夏季增温趋势可信。

从更宏观的角度来看, 刘东生认为在某种意义上人类世(Anthropocene)和全新世(Holocene)在时间上为相同^[49], 即整个全新世都可视为“人类世”, 这意味着从进入全新世开始, 人类就开始了大规模改变环境的征程。Ruddiman等提出: ① 地球轨道参数决定的过去约35万年的周期性大气 CO_2 和 CH_4 浓度变化预示了它们在全新世期间的下降, 但是实际上, 大气 CO_2 浓度自约8 ka BP、大气 CH_4 浓度自约5 ka BP, 开始了异常的



注：SSP泥炭岩芯全样 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 记录数据来源文献[7]、HY泥炭岩芯全样 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 记录数据来源文献[47]、HY泥炭岩芯木里莎草 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 记录数据来源文献[47]；每条记录顶部的黑色虚线箭头和圆点，代表对工业革命以来大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ ($\sim 1.5\text{‰}$)^[48]进行校准后，最顶部样品应达到的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{cell}}$ 值。

图3 过去6 ka相关记录对比

Fig. 3 Comparison of the relevant records for the past 6 ka

上升；②大气 CO_2 和 CH_4 浓度在中、晚全新世期间的上升，不能用自然因素合理解释；③ 基于广泛的考古、文化、历史和地质证据，人为因素尤其是欧亚大陆早期农业发展，如约8 ka BP开始的森林破坏和约5 ka BP开始的水稻种植灌溉，被认为更可能是导致前述异常温室气体浓度变化的主要原因^[50]。这些观点被Ruddiman等统称为“早期人为假说”（Early Anthropogenic Hypothesis, EAH）^[50]。虽然后期考虑了海洋和泥炭等的影响，对此假说进行了一定的修正，但Ruddiman等仍认为人类活动对地球气候环境的改变早在数千年前就已开始^[51]。此外，Ruddiman等还讨论了晚全新世气候变化的驱动因素，认为晚全新世气候变化更多受到了人类活动的驱动^[52]。参考并借鉴这些重要的学术思想，本文对全新世温度研究做简要总结，得到如下一些初步的认识和推论：① 越来越多证据和学者支持全新世期间的总体增温趋势；② 在末次冰消期至中全新世的快速增温之后，在大陆冰盖和海平面达到类现代状态的背景下，全球温度很可能表现为农业时代的缓慢增温，工业时代的快速增温和后工业时代的急剧增温；③ 若如此，则全新世期间的总体增温趋势与已知人类文明的整体进步发展之间（短时间尺度的变化是另一回事，本文暂不考虑），呈现出历史经验上的相互耦合、相互促进关系。

这些认识和推论，对中国古气候、古地理研究具有特殊重要的意义。一方面，延续

数千年的中华文明是全球独一无二的; 另一方面, 晚全新世温度变化历史是目前全新世温度历史争论的焦点。中国广阔的地域空间、多种多样的气候环境、丰富多样的沉积载体, 既为进一步深入开展晚全新世温度变化历史研究提供了机遇, 也为认识和理解晚全新世“人地关系”贡献中国智慧提供了机会。为此, 我们呼吁开展更多晚全新世温度变化历史研究。尤其是应当在受人类活动直接影响较小的地区, 或者利用受人类活动直接影响较小的代用指标, 开展更多晚全新世温度变化历史研究。

5 结语

全新世期间的长期增温/降温趋势是目前全新世古气候研究领域的争论热点。综合海平面、大陆冰盖、太阳辐射、温室气体辐射驱动证据来看, 全新世长期增温趋势更具有合理性。对相关研究结果的综合分析表明, 由于未能予以充分考虑和排除人类活动对指标记录、尤其是对晚全新世指标记录的影响, 传统观点所认为的“中全新世大暖期”和随后的晚全新世降温趋势, 存在多方面的不确定性。

晚全新世期间的长期温度变化趋势, 在相当程度上决定了全新世期间的长期增温/降温趋势; 而晚全新世又是人类活动及其对气候环境影响显著加强的时段; 这既凸显了开展晚全新世温度变化历史研究的重要性, 也为晚全新世温度变化历史的可靠重建增加了难度。就目前而言, 在受人类活动直接影响较小的地区, 或利用受人类活动直接影响较小的代用指标开展晚全新世温度变化历史重建, 或许是可行的研究策略。加强该方面的研究, 可以为理解中国数千年中华文明发展的气候背景及相应的“人地关系”演化, 乃至认识现今面临的气候环境问题, 提供可靠的科学基础。

参考文献(References)

- [1] Osman M B, Tierney J E, Zhu J, et al. Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum. *Nature*, 2021, 599: 239-244.
- [2] Bova S, Rosenthal Y, Liu Z Y, et al. Seasonal origin of the thermal maxima at the Holocene and the last interglacial. *Nature*, 2021, 589(7843): 548-553.
- [3] Liu Z Y, Zhu J, Rosenthal Y, et al. The Holocene temperature conundrum. *PNAS*, 2014, 111: E3501-E3505.
- [4] Meyer H, Opel T, Laepple T, et al. Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid- to late Holocene. *Nature Geoscience*, 2015, 8(2): 122-125.
- [5] Baker J L, Lachniet M S, Chervyatsova O, et al. Holocene warming in western continental Eurasia driven by glacial retreat and greenhouse forcing. *Nature Geoscience*, 2017, 10(6): 430-435.
- [6] Marsicek J, Shuman B N, Bartlein P J, et al. Reconciling divergent trends and millennial variations in Holocene temperatures. *Nature*, 2018, 554(7690): 92-96.
- [7] Rao Z G, Huang C, Xie L H, et al. Long-term summer warming trend during the Holocene in central Asia indicated by alpine peat α -cellulose $\delta^{13}\text{C}$ record. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 203: 56-67.
- [8] Rao Z G, Shi F X, Li Y X, et al. Long-term winter/summer warming trends during the Holocene revealed by α -cellulose $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ records from an alpine peat core from central Asia. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 232: 106217. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106217.
- [9] Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 2013, 339(6124): 1198-1201.
- [10] Dyke, A S. An outline of North American deglaciation with emphasis on central and northern Canada. *Developments in Quaternary Sciences*, 2004, 2: 373-424.
- [11] Lambeck K, Rouby H, Purcell A, et al. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *PNAS*, 2014, 111(43): 15296-15303.
- [12] Köhler P, Nehrbass-Ahles C, Schmitt J, et al. A 156 kyr smoothed history of the atmospheric greenhouse gases CO_2 ,

- CH₄, and N₂O and their radiative forcing. *Earth System Science Data*, 2017, 9(1): 363-387.
- [13] Berger A. Long-term variations of daily insolation and quaternary climatic changes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, 35(12): 2362-2367.
- [14] Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Wang Sumin, et al. The climatic fluctuation and important events of Holocene Megathermal in China. *Science in China: Series B*, 1992, 22(12):1300-1308. [施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. *中国科学: B辑*, 1992, 22(12): 1300-1308.]
- [15] Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Wang Sumin, et al. The climate and environment of Holocene Megathermal Maximum in China. *Science in China: Series B*, 1993, 23(8): 865-873. [施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期鼎盛阶段的气候与环境. *中国科学: B辑*, 1993, 23(8): 865-873.]
- [16] Sun Q L, Liu Y, Wünnemann B, et al. Climate as a factor for Neolithic cultural collapses approximately 4000 years BP in China. *Earth-Science Reviews*, 2019, 197: 102915. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102915.
- [17] Dong G H, Li R, Lu M X, et al. Evolution of human: Environmental interactions in China from the Late Paleolithic to the Bronze Age. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2020, 44(2): 233-250.
- [18] Cheng Z J, Weng C Y, Steinke S, et al. Anthropogenic modification of vegetated landscapes in southern China from 6000 years ago. *Nature Geoscience*, 2018, 11(12): 939-943.
- [19] Li F R, Gaillard M J, Cao X Y, et al. Towards quantification of Holocene anthropogenic land-cover change in temperate China: A review in the light of pollen-based REVEALS reconstructions of regional plant cover. *Earth-Science Reviews*, 2020, 203: 103119. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103119.
- [20] Chen J X, Shi X F, Liu Y G, et al. Holocene vegetation dynamics in response to climate change and hydrological processes in the Bohai region. *Climate of the Past*, 2020, 16(6): 2509-2531.
- [21] Zheng Z, Ma T, Roberts P, et al. Anthropogenic impacts on Late Holocene land-cover change and floristic biodiversity loss in tropical southeastern Asia. *PNAS*, 2021, 118(40): e2022210118. DOI: 10.1073/pnas.2022210118.
- [22] Jenny J P, Koirala S, Gregory-Eaves I, et al. Human and climate global-scale imprint on sediment transfer during the Holocene. *PNAS*, 2019, 116(46): 22972-22976.
- [23] Li Y X, Tian Y P, Guo H C, et al. Complex "human-vegetation-climate" interactions in the Late Holocene and their significance for paleotemperature reconstructions. *PNAS*, 2020, 117(11): 5568-5570.
- [24] Mottl O, Flantua S G A, Bhatta K P, et al. Global acceleration in rates of vegetation change over the past 18000 years. *Science*, 2021, 372(6544): 860-864.
- [25] Teng S N, Xu C, Teng L C, et al. Long-term effects of cultural filtering on megafauna species distributions across China. *PNAS*, 2020, 117(1): 486-493.
- [26] Liu Q S, Deng C L, Torrent J, et al. Review of recent developments in mineral magnetism of the Chinese loess. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(3/4): 368-385.
- [27] Song Y, Hao Q Z, Ge J Y, et al. Quantitative relationships between magnetic enhancement of modern soils and climatic variables over the Chinese Loess Plateau. *Quaternary International*, 2014, 334: 119-131.
- [28] Hu P X, Liu Q S, Heslop D, et al. Soil moisture balance and magnetic enhancement in loess-paleosol sequences from the Tibetan Plateau and Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 409: 120-132.
- [29] Ahmed I A M, Maher B A. Identification and paleoclimatic significance of magnetite nanoparticles in soils. *PNAS*, 2018, 115(8): 1736-1741.
- [30] Dong Y J, Wu N Q, Li F J, et al. Anthropogenic modification of soil communities in northern China for at least two millennia: Evidence from a quantitative mollusk approach. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 248: 106579. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106579.
- [31] Chen H, Wang X Y, Lu H Y, et al. Anthropogenic impacts on Holocene fluvial dynamics in the Chinese Loess Plateau, an evaluation based on landscape evolution modeling. *Geomorphology*, 2021, 392: 107935. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2021.107935.
- [32] Barnett R L, Charman D J, Johns C, et al. Nonlinear landscape and cultural response to sea-level rise. *Science Advances*, 2020, 6(45): eabb6376. DOI: 10.1126/sciadv.abb6376.
- [33] Bradley S L, Milne G A, Horton B P, et al. Modelling sea level data from China and Malay-Thailand to estimate Holocene ice-volume equivalent sea level change. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 137: 54-68.
- [34] Goldsmith Y, Broecker W S, Xu H, et al. Northward extent of East Asian monsoon covaries with intensity on orbital and millennial timescales. *PNAS*, 2017, 144(8): 1817-1821.
- [35] Lan J H, Xu H, Lang Y C, et al. Dramatic weakening of the East Asian summer monsoon in northern China during the

- transition from the Medieval Warm Period to the Little Ice Age. *Geology*, 2020, 48(4): 307-312.
- [36] Yao T D, Masson-Delmotte V, Gao J, et al. A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(4): 525-548.
- [37] Shi F X, Rao Z G, Li Y X, et al. Precipitation $\delta^{18}\text{O}$ recorded by the α -cellulose $\delta^{18}\text{O}$ of plant residues in surface soils: Evidence from a broad environmental gradient in inland China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019, 33(11): 1440-1468.
- [38] Cheng H, Zhang P Z, Spötl C, et al. The climatic cyclicity in semiarid-arid central Asia over the past 500,000 years. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L01705. DOI: 10.1029/2011GL050202.
- [39] Hou S G, Zhang W B, Pang, H X, et al. Apparent discrepancy of Tibetan ice core $\delta^{18}\text{O}$ records may be attributed to misinterpretation of chronology. *The Cryosphere*, 2019, 13(6): 1743-1752.
- [40] Thompson L G, Davis M E, Mosley-Thompson E, et al. Tropical ice core records: Evidence for asynchronous glaciation on Milankovitch timescales. *Journal of Quaternary Science*, 2005, 20(7/8): 723-733.
- [41] Thompson L G, Yao T D, Davis M E, et al. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science*, 1997, 276(5320): 1821-1825.
- [42] Pang H X, Hou S G, Zhang W B, et al. Temperature trends in the northwestern Tibetan Plateau constrained by ice core water isotopes over the past 7000 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(19): e2020JD032560. DOI: 10.1029/2020JD032560.
- [43] Zhang Ruibo, Yuan Yujiang, Wei Wenshou, et al. Response of stable carbon isotope of *Larix sibirica* ledeb tree-rings to climate change. *Arid Zone Research*, 2012, 29(2): 328-334. [张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 西伯利亚落叶松树轮稳定碳同位素对气候的响应. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 328-334.]
- [44] Zhang Ruibo, Shang Huaming, Wei Wenshou, et al. Summer temperature history in Altay during the last 160 years recorded by $\delta^{13}\text{C}$ in tree rings. *Desert and Oasis Meteorology*, 2014, 8(2): 34-40. [张瑞波, 尚华明, 魏文寿, 等. 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的阿勒泰地区近160a夏季气温变化. *沙漠与绿洲气象*, 2014, 8(2): 34-40.]
- [45] Sidorova O V, Saurer M, Myglan V S, et al. A multi-proxy approach for revealing recent climatic changes in the Russian Altai. *Climate Dynamics*, 2012, 38(1/2): 175-188.
- [46] Shi F X, Rao Z G, Cao J T, et al. Meltwater is the dominant water source controlling α -cellulose $\delta^{18}\text{O}$ in a vascular-plant-dominated alpine peatland in the Altai Mountains, Central Asia. *Journal of Hydrology*, 2019, 572: 192-205.
- [47] Hong Y T, Hong B, Lin Q H, et al. Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 211: 371-380.
- [48] McCarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7/8): 771-801.
- [49] Liu Tungsheng. Demand of Anthropocene study in the new stage of geoscience: In honor of late geologist Huang Jiqing for his innovative spirit. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(4): 369-378. [刘东生. 开展“人类世”环境研究, 做新时代地学的开拓者: 纪念黄汲清先生的地学创新精神. *第四纪研究*, 2004, 24(4): 369-378.]
- [50] Ruddiman W F. The Anthropogenic Greenhouse Era began thousands of years ago. *Climate Change*, 2003, 61(3): 261-293.
- [51] Ruddiman W F, He F, Vavrus S J, et al. The early anthropogenic hypothesis: A review. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 240: 106386. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106386.
- [52] Ruddiman W F, Fuller D Q, Kutzbach J E, et al. Late Holocene climate: Natural or anthropogenic? *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(1): 93-118.

Holocene temperature history and its significance to studies on historical human-land relationship in China

RAO Zhiguo, QIN Qianqian, WEI Shikai, GUO Haichun, LI Yunxia

(Key Laboratory of Ecological and Environmental Change in Subtropical Zone, College of Geographic Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: During the past few years, an increasing number of studies in both China and abroad have highlighted a long-term warming trend during the Holocene. However, this trend challenges the traditional view of a long-term Holocene cooling trend and a "mid-Holocene Megathermal". Comparison of long-term records indicating a rising global sea level, a decreasing area of terrestrial ice-sheets, and increasing radiative forcings of insolation and GHGs (greenhouse gases) leads us to conclude that a long-term Holocene warming trend is more reasonable than the cooling trend. In the original literature documenting a "mid-Holocene Megathermal" and the subsequent late Holocene cooling trend in China, the uncertainties in the supporting evidence are clearly indicated. These uncertainties have been further demonstrated by recent results that the most significant uncertainty arises from the impacts of human activities on sedimentary proxies, especially in the late Holocene when these impacts were greatly intensified. Thus, reconstructions of late Holocene temperature history based on sedimentary proxies are potentially biased by human impacts. Given that the current debate regarding temperature history of the Holocene focuses on the late Holocene, we propose that future emphasis should be placed on the temperature history of the late Holocene. We suggest that more reliable late Holocene temperature records should come from areas and/or sedimentary proxies that are weakly influenced by human activities, which is especially important to studies on the development of Chinese civilization that lasted for over several millennia. Overall, reliable late Holocene temperature records can potentially provide a reliable foundation for improving our understanding of the following themes: (1) the development of Chinese civilization under the background of long-term temperature change; (2) the evolutionary history of "human-land relationship" during the late Holocene; and (3) the climatic and environmental issues associated with global warming.

Keywords: Holocene; warming; cooling; late Holocene; historical human-land relationship; China