



丝绸之路过去2000年温度变化历史: 集成和展望

陈建徽^{1*}, 王海鹏², 刘言¹, 马帅¹, 黄伟¹

1. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000

* 通讯作者, E-mail: jhchen@lzu.edu.cn

收稿日期: 2022-09-22; 收修改稿日期: 2023-02-02; 接受日期: 2023-02-21; 网络版发表日期: 2023-06-14

国家自然科学基金项目(批准号: 41901106、41822102)和国家重点研发计划项目(编号: 2018YFA0606401)资助

摘要 重建丝绸之路近2000年温度变化历史, 对深入理解过去全球变化规律及其对丝路文明兴衰的影响有独特价值. 近年来, 丝绸之路东段(主体是中国新疆及周边地区)高质量单点古温度记录不断涌现, 提供了开展综合集成的数据基础. 为深入认识该区域过去2000年温度变化特征、现代暖期的历史地位及气候环境变化对丝路文明的影响等问题, 本文通过设置客观标准, 从迄今已发表的30条古温度记录中筛选出10条基于湖泊沉积、冰芯、树轮等地质载体的高质量记录, 开展综合集成研究. 结果发现: (1) 过去1000年温度变化记录的一致性较好, 研究区经历了中世纪暖期(AD1000~1250)、小冰期(AD1450~1850)和现代暖期(AD1850至今)等典型气候异常期; 与过往认识不同, 该区域现代暖期增温幅度并未超过中世纪暖期. (2) AD1~1000研究区温度变化记录较少且差异较大, 其所指示的汉代和隋唐时期的气候均同时存在温暖和寒冷两种矛盾结果. (3) 中世纪的增温为丝路天山北道快速发展提供了气候环境背景, 小冰期的降温对以嘉峪关封闭为标志的丝路衰落也产生过重要影响. 需要指出, 丝路东段AD1~1000温度记录的稀缺和差异已经对厘清当时水文气候变化过程及其对丝路文明发展的影响形成了阻碍, 未来亟须开发更多完整覆盖过去2000年的可靠记录, 并着重查明前一千年的温度变化是否存在局地信号. 另一方面, 丝路西段过去2000年温度变化研究仍相当薄弱, 亟待开展高质量单点和综合研究, 为推动丝绸之路全线气候环境演变-文明兴衰耦合关系的全面深入理解奠定坚实基础.

关键词 丝绸之路, 中世纪暖期, 小冰期, 现代暖期, 文明兴衰

1 引言

开通于西汉时期(202BC~AD8)的丝绸之路, 打通了东西方商品流通和科学技术传播的通道, 助推了多样性的文化交流; 揭示丝绸之路沿线过去2000年温度变化过程对理解气候变化-文明兴衰的耦合关系有独特而重要的科学价值. 不仅如此, 丝绸之路沿线是亚洲

中部干旱区的重要组成部分, 是对全球变化响应最敏感的区域之一: 该区域过去一个世纪的增温幅度显著高于全球平均水平(Huang等, 2017). 然而, 这种人类活动驱动下的显著增温是否已超出自然变率约束尚不清楚, 亟须从历史时期的温度变迁中寻找答案. 基于高质量单点古温度代用记录的综合集成是回答上述问题的有效途径.

中文引用格式: 陈建徽, 王海鹏, 刘言, 马帅, 黄伟. 2023. 丝绸之路过去2000年温度变化历史: 集成和展望. 中国科学: 地球科学, 53(7): 1479–1489, doi: 10.1360/SSTe-2022-0300

英文引用格式: Chen J, Wang H, Liu Y, Ma S, Huang W. 2023. Temperature variations along the Silk Road over the past 2000 years: Integration and perspectives. Science China Earth Sciences, 66(7): 1468–1477, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1079-5>

近年来, 丝绸之路沿线高质量单点古温度代用记录的日益积累(例如, Liu等, 2014; Zhang等, 2014; Büntgen等, 2016), 为综合集成研究提供了极好的数据基础. 这些记录大多来自丝路东段主体所在的中国新疆及周边地区(图1a、1b), 成为本研究关注的主要空间范围. 应该指出, 前人已经发表了若干涉及该区域的过去千年温度变化综合研究, 采用代用资料以树轮为主(图1b). 例如, Ge等(2013)重建的“中国西北干旱区”AD850~2000期间的温度变化是基于两条来自祁连山中部的树轮记录. Zhang H等(2018)和刘洋等(2021)基于同一套代用资料分别重建了“中国西北干旱区和蒙古西部”及“东亚西北部”过去1200年温度变化, 目标区域内长度超过1000年的记录中, 前者包括一条来自祁连山的冰芯氧同位素记录和一条来自蒙古西部的树轮记录, 后者则仅为同一条来自蒙古的树轮记录. 尽管研究区并非上述工作的关注重点, 但从其结果可见, 该区域在过去千年未经历明显的中世纪暖期和小冰期气

候异常, 凸现现代暖期增温幅度显著, 超过中世纪暖期的增温水平, 为推进对研究区过去千年温度变化历史的认识作出了重要贡献. 然而, 考虑到当时能供给的材料数量和代用指标特性, 早期的综合研究——仅就研究区而言——客观上在覆盖地域与时长、多指标对比整合, 以及低频信号提取方面受到一定的限制.

本文全面收集整理研究区基于不同地质载体的温度代用记录(其中近10年发表的记录占四分之三以上), 在质量控制的基础上开展综合对比和集成研究. 目的在于总结丝路东段过去2000年温度变化的总体特征, 评估现代暖期增温的历史地位, 讨论气候环境变化对丝路文明兴衰的可能影响, 并对丝绸之路历史时期温度变化的未来研究提出展望.

2 材料与方法

针对研究区长度不少于1000年的19个点位(图1b)

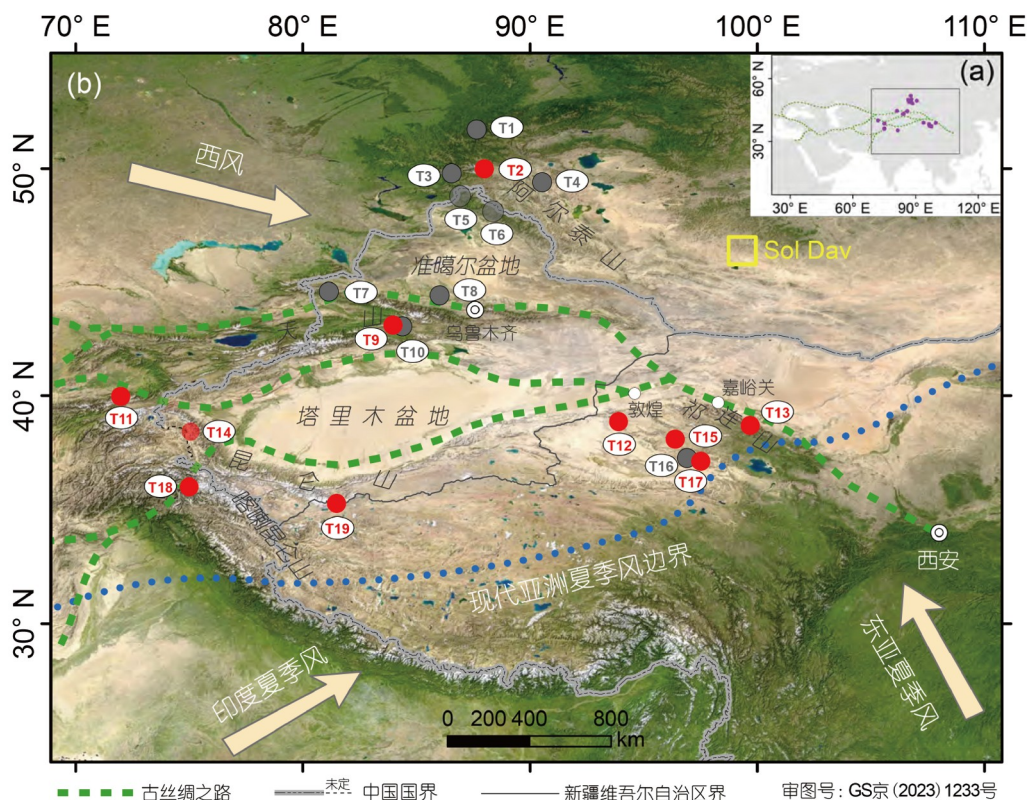


图1 丝绸之路长度1000年及以上的温度代用记录分布图

(a) 研究区的地理位置: 方框代表丝路东段范围. (b) 丝路东段古温度代用记录分布(T1~T19, 基本信息见表1): 红色圆点表示本研究用于集成的10条高质量记录; Ge等(2013)所利用的记录点为T13, Zhang H等(2018)所利用的记录点为T15和Sol Day, 刘洋等(2021)所利用的记录点Sol Day也标注于图中; 现代亚洲夏季风边界修改自Chen等(2010)

共30条古温度代用记录(基本信息见表1), 设定两个标准进行筛选: ①平均每500年至少有一个年代控制点(包括基于年纹层的记录); ②分辨率高于30年. 当同一个研究点有多条温度记录时, 选择新近发表的序列. 共获得符合标准的10条高质量古温度代用记录开展综合研究(图2a~2j). 这些记录基于多种地质载体的不同代用指标, 包括4条树轮宽度年表(Esper等, 2002, 2003; Zhang等, 2014; Büntgen等, 2016)、2条冰芯氧同位素记录(姚檀栋等, 1996; Thompson等, 2006), 以及4条湖泊沉积理化指标记录(He等, 2013; Liu等, 2014; Lan等, 2018). 需要说明的是, 这10条记录中有5条反映夏季温度变化(T2、T9、T11、T12、T17), 1条反映1~8月温度变化(T13), 1条反映年均温度变化(T18), 其他3条未明确说明重建温度的季节性(T14、T15、T19). 由于研究区夏季温度和年均温在器测时段显著相关($R=0.75$, $p<0.01$, 据CRU TS v4.05, Harris等, 2020; 图略), 且湖泊理化指标(T14)和冰芯氧同位素指标(T15、T19)通常包含全年温度信号, 综合考虑我们认为集成的温度记录可用于指示年均温变化.

为开展集成, 首先对所有记录进行归一化. 为便于对比观察, 寻找代用记录之间在数百年尺度上的共性, 将归一化数据进行了200年低通滤波(Forward-Backward Filter)处理. 随后选择温度变化一致性较好的时段, 对归一化数据通过算术平均进行集成. 最后, 将集成结果与研究区过去百年器测资料(CRU TS v4.05, Harris等, 2020)进行对比, 以检验其可靠性. 集成结果将用以评估研究区温度变化的总体特征和现代暖期的历史地位, 并作为探究气候环境对丝路文明影响的基础数据.

3 结果与讨论

(1) 受年代控制和分辨率所限, 无法将集成结果与观测资料进行逐年校准, 但其与研究区近百年的年均温变化显示出良好的一致性(图3a), 表明本研究的集成记录总体可靠. 过去1000年, 丝路东段大多数研究点都经历了显著的中世纪暖期(AD1000~1250)、小冰期(AD1450~1850)和现代暖期(AD1850至今)等典型温度异常期, 显示出不仅研究区内部温度变化具有较好的一致性(图2k), 且与基于历史文献重建的中国东部地区(图2l; Ge等, 2003), 基于多指标重建的全国(图

2m; Yang等, 2002)及北半球(图2n, Moberg等, 2005)过去1000年温度变化过程在百年尺度上相似. 值得注意的是, 我们的结果在总体变化框架上与已有的该区域温度集成结果并不一致(图3)——多项主要基于有限树轮记录的研究显示: AD1000~1850期间研究区温度变化无明显趋势, 中世纪和小冰期温度异常事件并不显著(Ge等, 2013, 图3b; Zhang H等, 2018, 图3c; 刘洋等, 2021, 图3d). 这实际意味着以往关于丝路东段干旱区过去千年温度变化具有特殊性的认识需要重新审视. 有趣的是, 在年代际尺度上这些记录却表现为同步变化, 例如13世纪末的由暖转冷, 以及19世纪中期的由冷转暖(图3), 体现出树轮资料对气候变化高频信号的准确反映.

此外, 尽管研究区近代升温趋势显著, 但尚不能得到其增温幅度超过自然暖期的结论. 集成结果显示, 中世纪时该区域在年代际尺度上甚至存在比现代更温暖的时段(图2k), 其百年尺度上的温度平均值至少与现代暖期相当(图3a). 这就与已有集成结果存在明显区别, 后者重建的现代暖期增温显著超过中世纪水平(图3b~3d). 现代气候学研究表明, 研究区过去百年(1920~2015年)的增温幅度($1.94^{\circ}\text{C}/96\text{yr}$)超出全球平均值($1.23^{\circ}\text{C}/96\text{yr}$)的50%; 在全球增温 2°C 的目标设定下, 其增温可能达到 $3.2\sim 4.0^{\circ}\text{C}$, 并认为该现象主要是由干旱半干旱区陆-气相互作用的能量平衡模式所造成的(Huang等, 2017). 我们的结果暗示, 丝路东段干旱区在自然要素驱动下可能也存在着类似的强化增温现象, 其具体机理尚待进一步研究.

(2) 相比过去1000年, 能覆盖前一千年的(AD1~1000)的高质量温度代用记录数量减少为4条(图2o), 且相互之间存在较大差异(图2k). 例如, 阿尔泰山的树轮记录显示, 研究区在东汉时期(AD25~220)气候较温暖(图2a), 但古里雅冰芯氧同位素记录却显示此时较为寒冷(图2j). 又如, 柴达木盆地西侧苏干湖的沉积记录显示, 研究区隋唐时期(AD581~907)气候较温暖(图2d), 但帕米尔高原卡拉库里湖的沉积记录却显示此时较为寒冷(图2f). 造成上述现象的原因究竟是来自于温度变化的局地表达(该时段的气候系统外强迫不足以在百年时间尺度上产生研究点间的同步温度变化), 抑或是代用记录本身的不确定性(如指标的季节性和敏感性差异)需要更多资料的检验. 有鉴于此, 本文并未对该时段记录开展集成.

表 1 丝绸之路东段长度超过1000年的古温度代用记录

编号 ^{a)}	名称	纬度	经度	海拔 (m asl)	时间跨度	测年物质	测年方法	年代 数量 ^{b)}	样品分辨率 (年) ^{c)}	代用指标	季节性 ^{d)}	参考文献
T1	Teletskoye 湖	51.72°N	87.65°E	1900	1000BC~AD2006	木材碎片和苔藓残体	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Cs、 ¹⁴ C	3/3	5	Br、Ti、XRD、Sr/Rb	年平均	Kalugin等, 2009
					2150BC~AD2006				5~25	元素和孢粉	NA	Babich等, 2015
					2150BC~AD2006				25~40	孢粉	最暖月	Rudaya等, 2016
T2	阿尔泰-萨彦岭山	45°~50°N	85°~90°E	2100~2500	AD104~2011				树轮宽度	6~8月	Büntgen等, 2016	
					359BC~AD2007	—	树轮计数	—	1	树轮宽度	6~7月	Myglan等, 2012a
					AD536~2006					树轮宽度	6~7月	Myglan等, 2012b
T3	Belukha 冰芯	49.8°N	86.55°E	4115	11,170BC~AD2003	颗粒态有机碳	稳态冰川流动模型和 ¹⁴ C	1/4	7	δ ¹⁸ O	年平均	Aizen等, 2016
T4	Achit Nuur	49.42°N	90.52°E	1444	22,600~0cal BP	全有机	¹⁴ C	3/10	250	孢粉	年平均	Sun等, 2013
T5	铁力沙汗泥炭	48.81°N	86.92°E	1770	9.7~0cal kyr BP	植物残体、泥炭和木材残体	¹⁴ C	1/5	120	孢粉	NA	Zhang Y等, 2018
	那仁夏泥炭	48.8°N	86.9°E	1760	11,500~0cal yr BP	泥炭和湖泊沉积物	¹⁴ C	2/11	60~70	孢粉	年平均, 暖季和冷季	Feng等, 2017
	那仁夏泥炭	48.8°N	86.92°E	1763	7.7~0kyr BP	植物残体和木质树干	¹⁴ C	4/13	60~70	brGDGTs	NA	Rao等, 2020a
T6	克拉沙子泥炭	48.12°N	88.37°E	2422	4100~0cal yr BP	植物残体	¹⁴ C	2/4	80	孢粉	NA	Zhang等, 2020
	哈拉沙子湿地	48.12°N	88.36°E	2450	11~0kyr BP	α-纤维素泥炭样品	¹⁴ C	3/22	45	α-纤维素 δ ¹³ C	夏季	Rao等, 2019
	哈拉沙子湿地	48.11°N	88.36°E	2446	11~0kyr BP	泥炭全有机	¹⁴ C	1/11	100	α-纤维素 δ ¹⁸ O	冬季	Rao等, 2020b
T6	哈拉沙子湿地	48.11°N	88.36°E	2446	11~0kyr BP	泥炭全有机	¹⁴ C	1/11	100	brGDGTs	年平均	Wu等, 2020
T7	赛里木湖	44.58°N	81.15°E	2071.9	9.6~0cal ka BP	全有机	¹⁴ C	1/12	50	孢粉	NA	蒋庆丰等, 2013
T8	草滩湖	44.42°N	86.02°E	380	4000~0cal a BP	全有机	¹⁴ C	2/5	30	孢粉	年平均	Zhang等, 2015
T9	哈儿努尔湖	43.11°N	83.97°E	2941	AD300~2000	全有机	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Cs、 ¹⁴ C	4/4	12	细粒组分	无冰季 (4~10月)	Lan等, 2018
T10	天鹅湖	43.05°N	84.38°E	2541	8.5~0ka BP	有机质	¹⁴ C	3/8	170	孢粉	NA	Huang等, 2015
T11	西天山阿莱山脉	39.83°~40.2°N	71.5°~72.62°E	2800~3400	AD1000~1995	—	树轮计数	—	1	树轮宽度	6~9月	Esper等, 2003
T12	苏干湖	38.87°N	93.9°E	2793	188BC~AD2006	全有机	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Cs、 ¹⁴ C	5/5	11~33	U ₃₇ ^{K'}	夏季	He等, 2013
					0~AD1950	种子和植物残体	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Cs、 ¹⁴ C	4/6	30~40	δ ¹³ C	冬半年	Qiang等, 2005
T13	祁连山中段北坡	38.69°~38.72°N	99.67°~99.7°E	3300~3578	AD670~2012	—	树轮计数	—	1	树轮宽度	1~8月最低温	Zhang等, 2014
	祁连山中部-寺大隆	38.4°N	99.9°E	3400~3550	AD1000~2000	—	树轮计数	—	1	树轮宽度	12~4月	刘晓宏等, 2004
T14	卡拉库里湖	38.44°N	75.06°E	3645	2223BC~AD1992	有机质	¹⁴ C	11/17	5	磁化率、粒度、元素	NA	Liu等, 2014

(续表1)

编号 ^{a)}	名称	纬度	经度	海拔 (m asl)	时间跨度	测年物质	测年方法	年代 数量 ^{b)}	样品分辨 率(年) ^{c)}	代用指标	季节性 ^{d)}	参考文献
T15	敦德冰芯	38.1°N	96.4°E	5325	AD520~1987	—	年纹层计数 和冰流模式	—	10	$\delta^{18}\text{O}$	NA	Thompson等, 2006
T16	克鲁克湖	37.28°N	96.9°E	2817	9000~ 0cal yr BP	水生植物叶片	^{14}C	5/11	45	$\text{U}_{37}^{\text{K}'}$	夏季	Zhao等, 2013
T17	尕海	37.13°N	97.52°E	2848	624BC~ AD1962	全有机	$^{210}\text{Pb}/$ ^{137}Cs 、 ^{14}C	4/4	5	$\text{U}_{37}^{\text{K}'}$	夏季	He等, 2013
T18	喀喇昆仑山 西北	35°~37°N	74°~76°E	2700~3900	AD618~1993	—	树轮计数	—	1	树轮宽度	年平均	Esper等, 2002
T19	古里雅冰芯	35.28°N	81.48°E	6200	0~AD1989	—	年纹层计数 和冰流模式	—	10	$\delta^{18}\text{O}$	NA	姚檀栋等, 1996; Thomp- son等, 1997

a) 研究点编号按其纬度从高到低进行排列. b) 过去2000年测年点数量/序列中总测年点数量, $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ 算作一个. c) 代用指标序列平均分辨率, 如果同一研究中有多个温度记录, 则取其最高分辨率. d) “NA”表示引文中未说明代用记录的季节性. 用于集成的10条记录以粗体表示

(3) 近千年来, 温度波动可能对丝路东段文明兴衰产生过重要影响. 仅举两例以说明: 其一, 中世纪时期, 在“西州回鹘”控制和经营下, 丝绸之路天山北道获得快速发展(付马, 2019). 尽管较多研究显示此阶段总体上降水较少、湿度较低(Chen等, 2010及其参考文献), 但由于天山中部多数集水区融水对径流贡献超过降水(Zhang等, 2016; Yao等, 2022), 当时的高温(图4a)所导致的冰雪融水增多可为“西州回鹘”崛起提供适宜的环境背景——这也得到天山北坡大西沟径流变化重建的支持(图4b, Zhang等, 2009). 其二, 明朝封闭嘉峪关是丝绸之路走向衰落的标志性事件(周伟洲和丁景泰, 2006; 雍际春, 2015), 诸多学者讨论了战争、边防政策、区域战略地位变迁等人文因素在其中的重要作用(例如, 陈光文, 2011; 马玉凤, 2019). 从气候环境演变的角度, 研究区小冰期时的降温(图4a)有助于形成强风场(Chen等, 2013), 导致风沙活动显著增强(Huang等, 2011; He等, 2015; 周刚平等, 2019)(图4c), 增加了丝路的通行难度; 不仅如此, 温度降低造成冰雪融水减少, 进一步加速了丝路咽喉敦煌的沙漠化和弃置进程(Dong等, 2021)(图4d), 可能是促使明朝放弃经营关外的自然因素.

值得注意的是, 前一千年(AD1~1000)不同温度记录之间的显著差异, 无疑增加了探索研究区气候环境变化与丝路文明发展关系的难度, 对古温度记录不加辨别地运用可能造成不同研究结论之间的矛盾. 例如, 一项基于枝角类化石的研究显示, AD280~450期间博斯腾湖水位出现快速下降, 该现象及同时期塔里木盆

地绿洲古城废弃被归因于温度下降导致的融水补给减少(Li等, 2021). 无独有偶, 另一项基于遥感影像解译和地层测年资料的研究也发现, AD360~470博斯腾湖下游的罗布泊水位出现持续下降, 直至AD500左右消失. 然而, 与前一项研究截然相反, 这种现象及同期楼兰王国的消亡却被归因于高温下的蒸发和干旱的气候(Shao等, 2022). 可见, 作为塔里木盆地水文变化过程的重要组成部分, 博斯腾湖及其下游罗布泊的水位波动在公元3~5世纪具有相似的下降过程, 但却被归因为相反的温度变化. 这种明显的抵牾使我们认识到, 高质量温度变化记录的匮乏已经对研究区历史时期人地关系研究的深入造成了实质性阻碍.

4 结论与展望

通过收集整理丝绸之路东段30条长度超过1000年的温度代用资料, 基于对其中10条分辨率较高、年代控制较好的高质量记录的综合集成, 本研究获得如下结论.

(1) 过去1000年温度变化记录的内部一致性较好, 研究区共同经历了中世纪暖期、小冰期和现代暖期等典型气候异常期, 且现代暖期增温幅度并未超过中世纪暖期——这与早期依靠有限树轮资料所揭示的中世纪与小冰期温度波动平缓, 现代暖期增温幅度巨大的变化过程存在明显区别.

(2) 研究区AD1~1000温度变化记录较少且差异较大, 对进一步探究丝路东段水文气候变化及其对文明

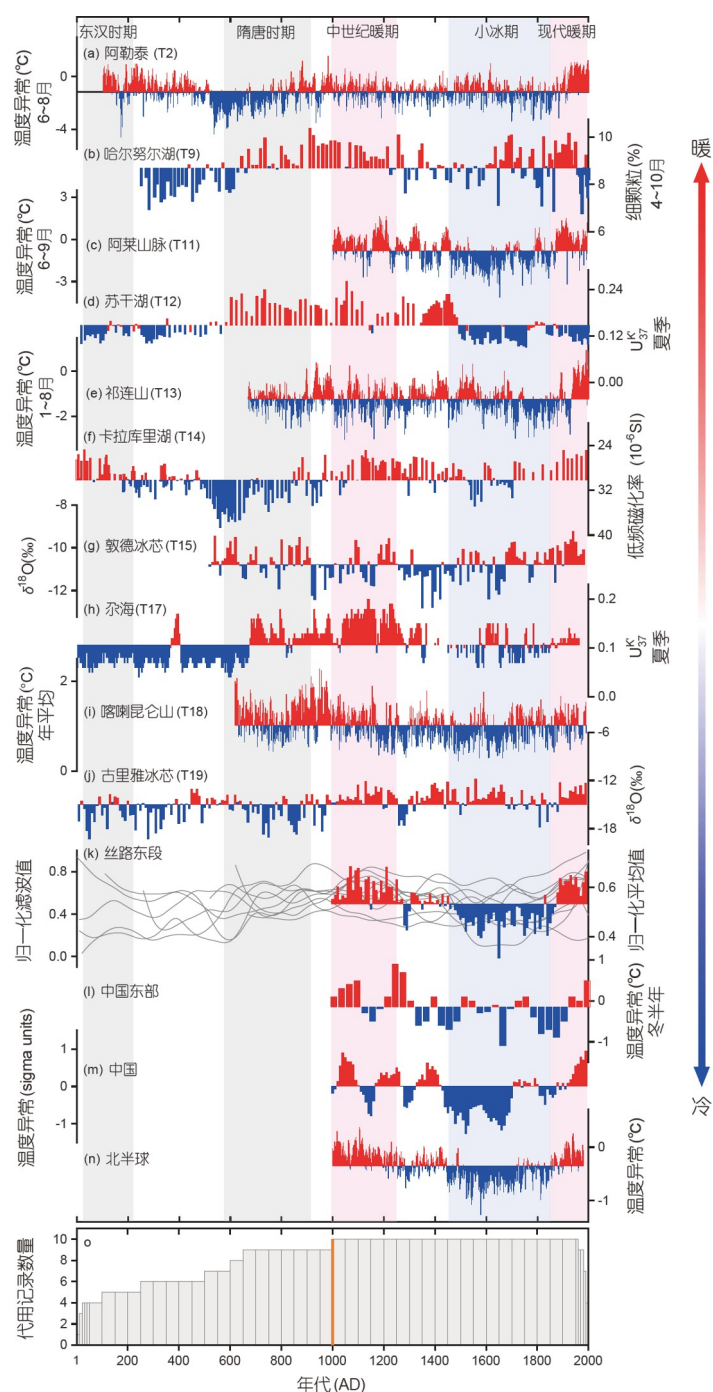


图2 丝路东段高质量温度代用记录和过去千年集成结果及其与其他记录的对比

(a) 阿勒泰树轮宽度(T2, Büntgen等, 2016); (b) 哈尔努尔湖沉积物粒度(T9, Lan等, 2018); (c) 西天山阿莱山脉树轮宽度(T11, Esper等, 2003); (d) 苏干湖沉积物烯酮(T12, He等, 2013); (e) 祁连山中部树轮宽度(T13, Zhang等, 2014); (f) 卡拉库里湖沉积物磁化率(T14, Liu等, 2014); (g) 敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ (T15, Thompson等, 2006); (h) 尕斯库勒湖沉积物烯酮(T17, He等, 2013); (i) 喀喇昆仑山西北部树轮宽度(T18, Esper等, 2002); (j) 古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ (T19, 姚檀栋等, 1996; Thompson等, 1997); (k) 10条序列归一化后的200年低通滤波值(灰线)及AD1000以来的归一化平均值(柱状图); (l) 基于历史文献重建的中国东部温度记录(Ge等, 2003); (m) 基于多指标重建的中国温度记录(Yang等, 2002); (n) 基于多指标重建的北半球(Moberg等, 2005)温度记录。以上每条记录都与其覆盖时段平均值进行比较, 大于平均值的用红色表示, 小于平均值的用蓝色表示。底部柱状图(o)为本研究单位时段包含的代用记录数量, 可见前一千年代用记录数量急剧减少

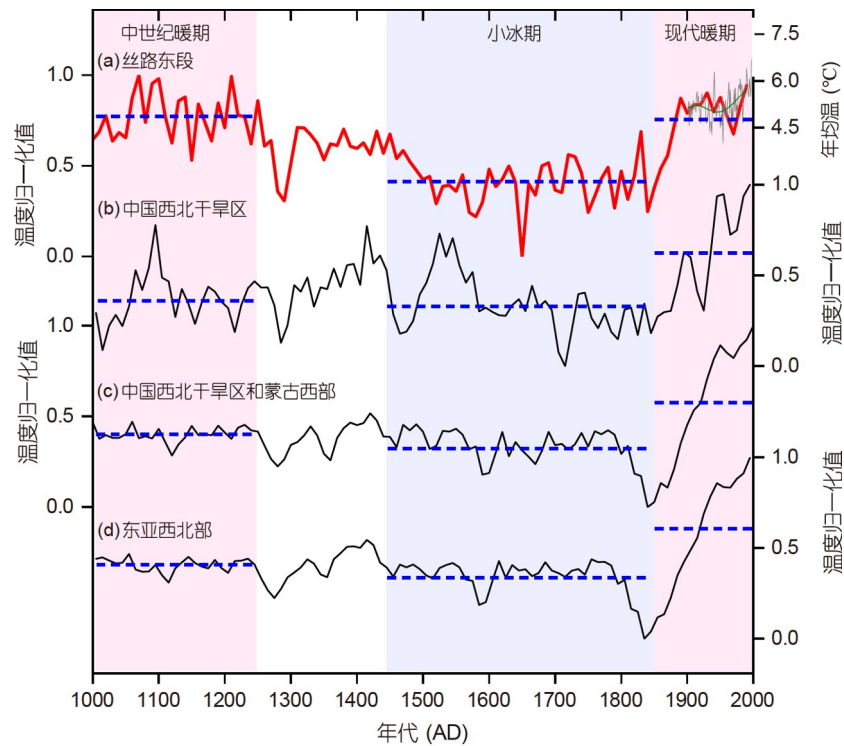


图3 丝路东段过去1000年温度变化集成结果与已有的区域综合记录对比

(a) 本研究集成的过去1000年温度变化(红线)及其与研究区1901年以来年均温观测资料(CRU TS v4.05, Harris等, 2020; 灰线为逐年数据, 绿线为15点FFT平滑曲线)的对比; (b) Ge等(2013)重建的“中国西北干旱区”过去1000年温度变化; (c) Zhang H等(2018)重建的“中国西北干旱区和蒙古西部”过去1000年温度变化; (d) 刘洋等(2021)重建的“东亚西北部”过去1000年温度变化. 为便于比较, 所有记录均进行归一化处理, 且将中世纪暖期、小冰期和现代暖期三个阶段的平均值用蓝色虚线表示

兴衰的影响和机制形成了阻碍。

(3) 中世纪增温造成的冰雪融水增加为丝路天山北道的快速发展提供了气候环境背景, 小冰期降温导致的风沙活动增强和冰雪融水减少对以嘉峪关封闭为标志的丝路衰落产生过重要影响。

应该指出, 不论是总结丝绸之路主体所在的亚洲中部干旱区过去2000年温度变化历史, 还是评估现代暖期的增温幅度, 抑或是讨论温度波动对干旱区水文状况和丝路文明兴衰的影响, 都离不开高质量单点古温度代用记录的支持. 本研究入选的10条记录全都来自山地(阿尔泰山、祁连山、天山、昆仑山、喀喇昆仑山等, 见图1), 主要原因可能是干旱盆地多数代用指标受降水/湿度的限制更大, 而山地因降水远高于盆地, 降水/湿度不再成为限制因子, 因此具有保留温度信号的能力. 可见, 在研究区的山地选择较少受降水/湿度限制的研究点、或在研究区的干旱盆地开发较少受降水/湿度限制的新兴代用指标(例如iGDGTs), 是获取高

质量古温度重建的前提. 未来研究中, 亟待获得对以下问题的回答:

(1) 丝绸之路东段前一千年(AD1~1000)温度变化过程是怎样的?

本研究入选的10条记录中, 只有4条完整覆盖了前一千年, 客观上造成不同记录之间“个性”相对突出, 为总结其“共性”带来阻碍. 在不同研究点基于对温度响应敏感、季节指示意义明确的同种代用指标(例如摇蚊)开展工作, 能有效检验本阶段温度变化是否存在局地信号, 揭示丝路东段前一千年温度变化真实过程. 更重要的是, 该时段范围内存在着汉代和隋唐两个丝路发展的鼎盛时期(陈发虎等, 2019). 而如前所述, 现有温度记录的显著差异已经导致在探讨如公元3~5世纪塔里木盆地绿洲古城水资源变化时出现矛盾. 因此, 厘清干旱区前一千年温度变化过程有助于准确理解环境演变对丝绸之路发展的影响。

(2) 丝绸之路东段前一千年水热配置特征是什么?

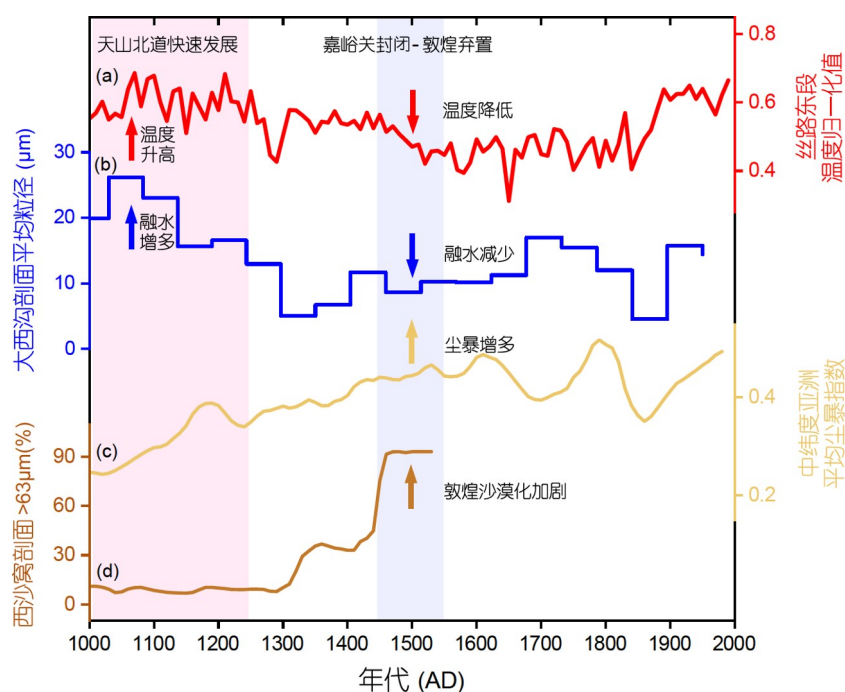


图4 温度及其相关环境要素变化对丝路东段文明兴衰的影响

(a) 丝路东段过去1000年温度变化集成(本研究); (b) 天山北坡大西沟剖面平均粒径记录(Zhang等, 2009); (c) 中纬度亚洲平均尘暴指数记录(50年平均)(He等, 2015); (d) 敦煌西沙漠剖面>63 μm 粒径组分含量记录(Dong等, 2021). 粉色和浅蓝色阴影分别对应中世纪暖期和小冰期初期

水热配置特征是干旱区水文气候变化研究的重要内容, 也是该区域人类社会可持续发展的重要环境驱动力(Feng等, 2019). 观测记录表明, 近代新疆地区气候呈现“暖湿化”特征(Yao等, 2022); 而代用资料显示, 近千年来该区域气候表现为典型的“暖干-冷湿”的水热配置组合(Chen等, 2015, 2019以及本研究). 研究区前一千年气候是否也表现出自然状态下的“暖干-冷湿”的水热配置特征? 或者其在年代际尺度上也存在“暖湿化”现象? 这些问题的回答有助于推进对不同驱动因子作用下主要气候要素配置方式在多时间尺度上的认识, 对干旱区环境变化动力学研究具有重要的理论价值.

(3) 丝绸之路西段过去2000年温度变化特征及其对丝路文明兴衰有何影响?

丝绸之路西段经中亚、西亚到达地中海周边地区(图1a), 近期的全球尺度的温度集成研究中尚没有来自该区域的陆相代用记录(如Neukom等, 2019; PAGES 2k Consortium, 2013). 已有的涉及丝路西段的研究主要基于地中海北岸东欧和中欧地区的零星资料, 且一般不超过1000年(如Glaser和Riemann, 2009; Hao等,

2020), 亟待扩展高质量温度重建序列的时空覆盖度, 厘清丝路西段主体所在的中亚和西亚过去2000年的温度变化历史. 不仅如此, 考虑到该区域降水主要集中在冬季(Hoell等, 2015; Rana等, 2019; Xie等, 2021), 且缺少能产生大量冰雪融水的高大山地(“水塔”), 导致其气候因子(温度、降水)与水资源的关系更加复杂. 可见, 探明该区域气候环境变化特征对文明兴衰的影响模式是描绘丝绸之路全线历史时期人地关系“全景图”的关键内容.

致谢 感谢于海鹏研究员、王江林博士、刘文火博士和段炎武博士在成文过程中提供的数据支持和宝贵建议. 感谢两位审稿专家提出的建设性意见.

参考文献

- 陈发虎, 董广辉, 陈建徽, 郜永祺, 黄伟, 王涛, 陈圣乾, 侯居峙. 2019. 亚洲中部干旱区气候变化与丝路文明变迁研究: 进展与问题. 地球科学进展, 34: 561–572
- 陈光文. 2011. 明朝弃置敦煌考略. 敦煌学辑刊, (1): 111–118
- 付马. 2019. 丝绸之路上的西州回鹘王朝: 9–13世纪中亚东部历史研

- 究. 北京: 社会科学文献出版社
- 蒋庆丰, 季峻峰, 沈吉, Matsumoto R, 童国榜, 钱鹏, 任雪梅, 闫德智. 2013. 赛里木湖孢粉记录的亚洲内陆西风区全新世植被与气候变化. *中国科学: 地球科学*, 43: 243–255
- 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 陈拓, 任贾文. 2004. 祁连山中部过去千年温度变化的树轮记录. *中国科学D辑: 地球科学*, 34: 89–95
- 刘洋, 郑景云, 郝志新, 张学珍. 2021. 欧亚大陆中世纪暖期与小冰期温度变化的区域差异分析. *第四纪研究*, 41: 462–473
- 马玉凤. 2019. 嘉峪关: 明代绿洲丝绸之路上的必经门户——嘉峪关与明代丝绸之路高层论坛综述. *中国边疆史地研究*, 29: 197–201
- 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 焦克勤, 杨志红, 谢超. 1996. 青藏高原2ka来温度与降水变化——古里雅冰芯记录. *中国科学D辑: 地球科学*, 26: 348–353
- 雍际春. 2015. *丝绸之路历史沿革*. 西安: 三秦出版社. 303
- 周刚平, 黄小忠, 王宗礼, 张军, 谢海超. 2019. 基于粒度数据重建的近2000a新疆博斯腾湖区域风沙活动. *中国沙漠*, 39: 86–95
- 周伟洲, 丁景泰. 2006. *丝绸之路大辞典*. 西安: 陕西人民出版社
- Aizen E M, Aizen V B, Takeuchi N, Mayewski P A, Grigholm B, Joswiak D R, Nikitin S A, Fujita K, Nakawo M, Zapf A, Schwikowski M. 2016. Abrupt and moderate climate changes in the mid-latitudes of Asia during the Holocene. *J Glaciol*, 62: 411–439
- Babich V V, Rudaya N A, Kalugin I A, Darin A V. 2015. Complex use of the geochemical features of bottom deposits and pollen records for paleoclimate reconstructions (with Lake Teletskoe, Altai Republic, as an example). *Contemp Probl Ecol*, 8: 405–413
- Büntgen U, Myglan V S, Ljungqvist F C, McCormick M, Di Cosmo N, Sigl M, Jungclauss 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
- Chen F H, Chen J H, Holmes J, Boomer I, Austin P, Gates J B, Wang N L, Brooks S J, Zhang J W. 2010. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region. *Quat Sci Rev*, 29: 1055–1068
- Chen F H, Chen J H, Huang W, Chen S Q, Huang X Z, Jin L Y, Jia J, Zhang X J, An C B, Zhang J W, Zhao Y, Yu Z C, Zhang R H, Liu J B, Zhou A F, Feng S. 2019a. Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales. *Earth-Sci Rev*, 192: 337–354
- Chen F H, Qiang M R, Zhou A F, Xiao S, Chen J H, Sun D H. 2013. A 2000-year dust storm record from Lake Sugan in the dust source area of arid China. *J Geophys Res-Atmos*, 118: 2149–2160
- Chen J H, Chen F H, Feng S, Huang W, Liu J B, Zhou A F. 2015. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age: Spatial patterns and possible mechanisms. *Quat Sci Rev*, 107: 98–111
- Dong G H, Wang L B, Zhang D D, Liu F W, Cui Y F, Li G Q, Shi Z L, Chen F H. 2021. Climate-driven desertification and its implications for the ancient Silk Road trade. *Clim Past*, 17: 1395–1407
- Esper J, Schweingruber F H, Winiger M. 2002. 1300 years of climatic history for Western Central Asia inferred from tree-rings. *Holocene*, 12: 267–277
- Esper J, Shiyatov S G, Mazepa V S, Wilson R J S, Graybill D A, Funkhouser G. 2003. Temperature-sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends. *Clim Dyn*, 21: 699–706
- Feng Q, Yang L S, Deo R C, AghaKouchak A, Adamowski J F, Stone R, Yin Z L, Liu W, Si J H, Wen X H, Zhu M, Cao S X. 2019. Domino effect of climate change over two millennia in ancient China's Hexi Corridor. *Nat Sustain*, 2: 957–961
- Feng Z D, Sun A Z, Abdusalih N, Ran M, Kurban A, Lan B, Zhang D L, Yang Y P. 2017. Vegetation changes and associated climatic changes in the southern Altai Mountains within China during the Holocene. *Holocene*, 27: 683–693
- Ge Q S, Zheng J Y, Fang X Q, Man Z M, Zhang X Q, Zhang P Y, Wang W C. 2003. Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years. *Holocene*, 13: 933–940
- Ge Q, Hao Z, Zheng J, Shao X. 2013. Temperature changes over the past 2000 yr in China and comparison with the Northern Hemisphere. *Clim Past*, 9: 1153–1160
- Glaser R, Riemann D. 2009. A thousand-year record of temperature variations for Germany and Central Europe based on documentary data. *J Quat Sci*, 24: 437–449
- Hao Z X, Zheng J Y, Yu Y Z, Xiong D Y, Liu Y, Ge Q S. 2020. Climatic changes during the past two millennia along the Ancient Silk Road. *Prog Phys Geography-Earth Environ*, 44: 605–623
- Harris I, Osborn T J, Jones P, Lister D. 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data*, 7: 109
- He Y X, Zhao C, Song M, Liu W G, Chen F H, Zhang D, Liu Z H. 2015. Onset of frequent dust storms in northern China at ~AD 1100. *Sci Rep*, 5: 17111
- He Y X, Zhao C, Wang Z, Wang H Y, Song M, Liu W G, Liu Z H. 2013. Late Holocene coupled moisture and temperature changes on the northern Tibetan Plateau. *Quat Sci Rev*, 80: 47–57
- Hoell A, Shukla S, Barlow M, Cannon F, Kelley C, Funk C. 2015. The forcing of monthly precipitation variability over Southwest Asia during the boreal cold season. *J Clim*, 28: 7038–7056
- Huang J P, Yu H P, Dai A G, Wei Y, Kang L T. 2017. Drylands face

- potential threat under 2°C global warming target. *Nat Clim Change*, 7: 417–422
- Huang X Z, Chen C Z, Jia W N, An C B, Zhou A F, Zhang J W, Jin M, Xia D S, Chen F H, Grimm E C. 2015. Vegetation and climate history reconstructed from an alpine lake in central Tianshan Mountains since 8.5 ka BP. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 432: 36–48
- Huang X Z, Oberhänsli H, von Suchodoletz H, Sorrel P. 2011. Dust deposition in the Aral Sea: Implications for changes in atmospheric circulation in central Asia during the past 2000 years. *Quat Sci Rev*, 30: 3661–3674
- Kalugin I A, Daryin A V, Babich V V. 2009. Reconstruction of annual air temperatures for three thousand years in Altai region by lithological and geochemical indicators in Teletskoe Lake sediments. *Dokl Earth Sci*, 426: 681–684
- Lan J H, Xu H, Sheng E G, Yu K K, Wu H X, Zhou K G, Yan D D, Ye Y D, Wang T L. 2018. Climate changes reconstructed from a glacial lake in High Central Asia over the past two millennia. *Quat Int*, 487: 43–53
- Li Y, Hu L, Zhao Y T, Wang H P, Huang X Z, Chen G J, Leppänen J J, Fontana L, Ren L L, Shi Z L, Liu B, Zhao H. 2021. Meltwater-driven water-level fluctuations of Bosten Lake in arid China over the past 2,000 years. *Geophys Res Lett*, 48: e90988
- Liu X Q, Herzschuh U, Wang Y B, Kuhn G, Yu Z T. 2014. Glacier fluctuations of Muztagh Ata and temperature changes during the late Holocene in westernmost Tibetan Plateau, based on glaciolacustrine sediment records. *Geophys Res Lett*, 41: 6265–6273
- Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K, Datsenko N M, Karlén W. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433: 613–617
- Myglan V S, Oidupaa O C, Vaganov E A. 2012a. A 2367-year tree-ring chronology for the Altai-Sayan region (Mongun-Taiga mountain massif). *Archaeol Ethnol Anthropol Eurasia*, 40: 76–83
- Myglan V S, Zharnikova O A, Malysheva N V, Gerasimova O V, Vaganov E A, Sidorov O V. 2012b. Constructing the tree-ring chronology and reconstructing summertime air temperatures in southern Altai for the last 1500 years. *Geogr Nat Resour*, 33: 200–207
- Neukom R, Steiger N, Gómez-Navarro J J, Wang J, Werner J P. 2019. 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
- Qiang M R, Chen F H, Zhang J W, Gao S Y, Zhou A F. 2005. Climatic changes documented by stable isotopes of sedimentary carbonate in Lake Sugan, northeastern Tibetan Plateau of China, since 2 ka BP. *Chin Sci Bull*, 50: 1930–1939
- Rana S, McGregor J, Renwick J. 2019. Dominant modes of winter precipitation variability over Central Southwest Asia and inter-decadal change in the ENSO teleconnection. *Clim Dyn*, 53: 5689–5707
- Rao Z G, Guo H C, Cao J T, Shi F X, Jia G D, Li Y X, Chen F H. 2020a. Consistent long-term Holocene warming trend at different elevations in the Altai Mountains in arid central Asia. *J Quat Sci*, 35: 1036–1045
- Rao Z G, Huang C, Xie L H, Shi F X, Zhao Y, Cao J T, Gou X H, Chen J H, Chen F H. 2019. Long-term summer warming trend during the Holocene in central Asia indicated by alpine peat α -cellulose $\delta^{13}\text{C}$ record. *Quat Sci Rev*, 203: 56–67
- Rao Z G, Shi F X, Li Y X, Huang C, Zhang X Z, Yang W, Liu L D, Zhang X P, Wu Y. 2020b. 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. *Quat Sci Rev*, 232: 106217
- Rudaya N, Nazarova L, Novenko E, Andreev A, Kalugin I, Daryin A, Babich V, Li H C, Shilov P. 2016. Quantitative reconstructions of mid- to late Holocene climate and vegetation in the north-eastern Altai Mountains recorded in Lake Teletskoye. *Glob Planet Change*, 141: 12–24
- Shao Y, Gong H Z, Elachi C, Brisco B, Liu J Q, Xia X C, Guo H D, Geng Y Y, Kang S G, Liu C A, Yang Z, Zhang T. 2022. The lake-level changes of Lop Nur over the past 2000 years and its linkage to the decline of the ancient Loulan Kingdom. *J Hydrol-Regional Studies*, 40: 101002
- Sun A Z, Feng Z D, Ran M, Zhang C J. 2013. Pollen-recorded bioclimatic variations of the last ~22,600 years retrieved from Achit Nuur core in the western Mongolian Plateau. *Quat Int*, 311: 36–43
- Thompson L G, Yao T, Davis M E, Henderson K A, Mosley-Thompson E, Lin P N, Beer J, Synal H A, Cole-Dai J, Bolzan J F. 1997. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science*, 276: 1821–1825
- Thompson L G, Mosley-Thompson E, Brecher H, Davis M, León B, Les D, Lin P N, Mashiotta T, Mountain K. 2006. Abrupt tropical climate change: Past and present. *Proc Natl Acad Sci USA*, 103: 10536–10543
- Wu D D, Cao J T, Jia G D, Guo H C, Shi F X, Zhang X P, Rao Z G. 2020. Peat brGDGTs-based Holocene temperature history of the Altai Mountains in arid Central Asia. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 538: 109464
- Xie T T, Huang W, Chang S Q, Zheng F, Chen J H, Chen J, Chen F H. 2021. Moisture sources of extreme precipitation events in arid

- Central Asia and their relationship with atmospheric circulation. *Int J Climatol*, 41: E271–E282
- Yang B, Braeuning A, Johnson K R, Shi Y F. 2002. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophys Res Lett*, 29: 38-1–38-4
- Yao J Q, Chen Y N, Guan X F, Zhao Y, Chen J, Mao W Y. 2022. Recent climate and hydrological changes in a mountain-basin system in Xinjiang, China. *Earth-Sci Rev*, 226: 103957
- Zhang D L, Chen X, Li Y M, Zhang S R. 2020. Holocene vegetation dynamics and associated climate changes in the Altai Mountains of the Arid Central Asia. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 550: 109744
- Zhang H, Werner J P, García-Bustamante E, González-Rouco F, Wagner S, Zorita E, Fraedrich K, Jungclauss J H, Ljungqvist F C, Zhu X H, Xoplaki E, Chen F H, Duan J P, Ge Q S, Hao Z X, Ivanov M, Schneider L, Talento S, Wang J L, Yang B, Luterbacher J. 2018. East Asian warm season temperature variations over the past two millennia. *Sci Rep*, 8: 7702
- Zhang H, Zhang Y, Kong Z C, Yang Z J, Li Y M, Tarasov P E. 2015. Late Holocene climate change and anthropogenic activities in north Xinjiang: Evidence from a peatland archive, the Caotianhu wetland. *Holocene*, 25: 323–332
- Zhang Y Q, Luo Y, Sun L, Liu S Y, Chen X, Wang X L. 2016. Using glacier area ratio to quantify effects of melt water on runoff. *J Hydrol*, 538: 269–277
- Zhang Y, Shao X M, Yin Z Y, Wang Y. 2014. Millennial minimum temperature variations in the Qilian Mountains, China: Evidence from tree rings. *Clim Past*, 10: 1763–1778
- Zhang Y, Yang P, Tong C, Liu X T, Zhang Z Q, Wang G P, Meyers P A. 2018. Palynological record of Holocene vegetation and climate changes in a high-resolution peat profile from the Xinjiang Altai Mountains, northwestern China. *Quat Sci Rev*, 201: 111–123
- Zhang Y, Kong Z C, Yan S, Yang Z J, Ni J. 2009. “Medieval warm period” on the northern slope of central Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China. *Geophys Res Lett*, 36: L11702
- Zhao C, Liu Z H, Rohling E J, Yu Z C, Liu W G, He Y X, Zhao Y, Chen F H. 2013. Holocene temperature fluctuations in the northern Tibetan Plateau. *Quat Res*, 80: 55–65

(责任编辑: 杨保)