

古丝绸之路沿线地区千年冷暖变化的若干特征

郝志新^{1,2}, 梁亚妮^{1,2}, 刘洋^{1,2}, 耿秀^{1,2}, 郑景云^{1,2*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:依据近期发表的古丝绸之路沿线若干地区(点)的温度重建序列,结合干湿变化等代用记录,分析了过去千年古丝绸之路沿线温度变化的基本特征,以及这些地区(点)在“中世纪气候异常期”(MCA,约950–1250年)和“小冰期”(LIA,约1450–1850年)的干湿特征异同。主要结论为:①过去2000年古丝绸之路的温度变化经历了1–3世纪温暖、4–7世纪前期寒冷、7世纪后期–11世纪初温暖、11世纪中期–12世纪初偏冷、12世纪中期–13世纪中期温暖、13世纪末–19世纪中期寒冷和20世纪快速增暖的百年际波动过程;但不同区域间的年代至百年尺度变化位相不完全同步,波动幅度也存在差异。②各地干湿特征在MCA和LIA也存在一定差异:中国的关中平原及河西走廊在MCA间的干湿变率较LIA大;中亚干旱区MCA期间气候偏干,LIA期间偏湿;欧洲中北部以及斯堪的纳维亚半岛南部等地在MCA间气候较LIA偏干,且中部地区LIA间的干湿变率较MCA大;芬兰和斯堪的纳维亚半岛北部以及俄罗斯等地MCA间的气候较LIA更湿润。

关键词:古丝绸之路;过去千年;冷暖变化;中世纪气候异常期(MCA);小冰期(LIA);干湿特征

1 引言

古丝绸之路主要指连接东西方文明的陆上贸易和文化交流通道,东起中国的洛阳、长安(今西安),经中国西北横贯欧亚大陆的中纬度地区,西至地中海沿岸和欧洲西部沿海地区(荣新江, 2015)。随着“一带一路”倡议的逐步推进,这些区域的地缘与资源环境问题也成为当前学术界关注的一个新“热点”(刘卫东, 2015; Li et al, 2017)。古丝绸之路沿线地理环境复杂,气候类型多样,人类活动历史悠久。有研究显示:古丝绸之路一些重要节点的兴衰(如楼兰古国、高昌国衰落等)可能与气候变化密切相关(葛全胜, 2011; Li et al, 2016);并发现:气候转暖转湿,聚落分布向小绿洲和河流中下游扩展,转冷则缩回至山麓盆地和河流上游(Jia et al, 2017);因而其千年气候环境变化历史研究也备受关注。

2017年9月,国际过去全球变化计划(Past Global Changes project, PAGES)和德国基尔大学(Kiel University)还就此联合举办了题为“丝路兴衰:古丝绸之路区域社会文化变化的环境因素”国际研讨会,并将“古气候记录和环境变化史”列为核心主题(<http://www.pastglobalchanges.org/calendar/2017/127-pages/1708-silk-road-wshop-17>);中国近期启动的一些科学计划也将这一问题列为重要研究内容(陈发虎等, 2017),并分析了沿线主要国家近期气候变化的基本特征(Chen et al, 2016; 徐新良等, 2016)。然而迄今为止,除欧洲中、西部有较多的千年气候变化序列外,其他大多数区域只有一些零星的气候变化高分辨率重建结果,尚缺乏对古丝绸之路历史时期气候变化的全面研究。为此,本文拟对古丝绸之路沿线区域(包括中国的西北地区、中亚、地中海东部、欧洲大陆)现有零星的历史气候变化

收稿日期:2018-02-03;修订日期:2018-03-20。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0603300);国家自然科学基金项目(41671036) [Foundation: National R&D Program of China, No. 2017YFA0603300; National Natural Science Foundation of China, No. 41671036]。

第一作者:郝志新(1975-),研究员,主要从事气候变化研究,E-mail: haozx@igsrr.ac.cn。

通讯作者:郑景云(1966-),研究员,主要从事气候变化研究,E-mail: zhengjy@igsrr.ac.cn。

引用格式:郝志新,梁亚妮,刘洋,等. 2018. 古丝绸之路沿线地区千年冷暖变化的若干特征[J]. 地理科学进展, 37(4): 485–494. [Hao Z X, Liang Y N, Liu Y, et al. 2018. Characteristics of temperature changes during the past millennium along the Ancient Silk Road[J]. Progress in Geography, 37(4): 485–494.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.04.004

研究成果进行总结和分析,旨在梳理这些研究已取得的主要科学认识,了解过去千年古丝绸之路温度变化的基本特征,讨论“中世纪气候异常期”(Medieval Climate Anomaly, MCA, 约 950-1250 年)和“小冰期”(Little Ice Age, LIA, 约 1450-1850 年)(IPCC, 2013)这 2 个百年尺度冷、暖阶段对应的干湿特征。这不仅可为了解相关区域当代资源环境问题的历史演化过程提供简要参考,而且对进一步深入开展上述问题研究也具有重要学术价值。

2 温度变化

至今为止,古丝绸之路沿线的千年温度变化高分辨率重建序列主要集中在中国西北和欧州中西部地区,欧亚之交的土耳其西南部也有利用树轮资料重建的覆盖近千年温度变化序列,其中中国西北东部(包括关中地区)还有利用历史物候记载重建的 7-14 世纪温度变化结果(图 1)。表 1 给出这些温度变化高分辨率记录的简要信息。此外,还有一些研

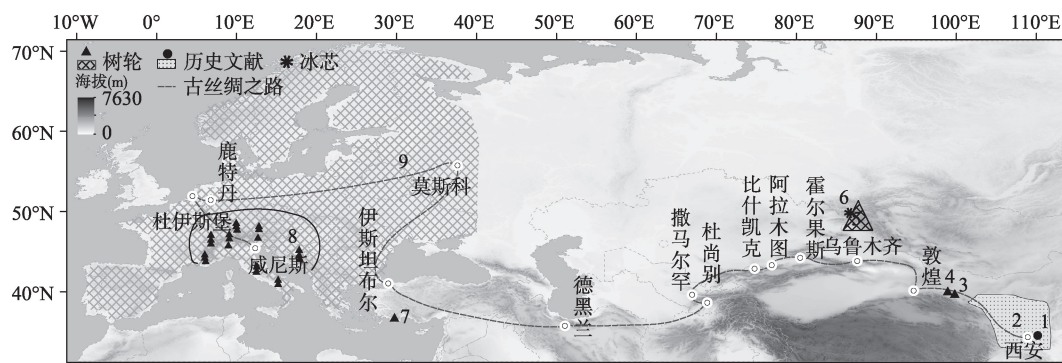


图1 利用代用资料重建的古丝绸之路沿线千年温度变化高分辨率序列空间分布^①

Fig.1 Locations of high-resolution proxy-based temperature reconstruction for the past millennium along the Ancient Silk Road

表 1 古丝绸之路沿线千年温度变化高分辨率重建序列简介

Tab.1 Summary information of high-resolution proxy-based temperature reconstruction for the past millennium along the Ancient Silk Road									
序号	地区/点	代用证据	区域范围或样点经纬度	样点海拔/m	重建指标	温度变化解释方差	重建时段	时间分辨率/a	来源
1	关中地区	历史文献	33.6°N~35.8°N, 106.3°E~110.6°E		10-4 月平均气温	35%(年际)	AD600-AD902	1~30	Liu et al, 2016
2	西北地区东部	历史文献	33.5°N~39.5°N, 102°E~112°E		年平均气温	85%(30年低通滤波)	AD960-AD1368	30	郝志新等, 2009
3	祁连山中段	树轮宽度	38.43°N, 99.93°E	3400-3550	12-4 月平均气温	22%(年际)	AD900-AD2000	1	Liu et al, 2005
4	祁连山	树轮宽度	38.69°N~38.72°N, 99.67°E~99.70°E	3300-3578	1-8 月平均最低气温	59%(年际)	AD670-AD2012	1	Zhang et al, 2014
5	阿尔泰山	树轮宽度, 多个样点综合	45°N~50°N, 85°E~90°E		6-8 月平均气温	24%(年际)	AD104-AD2011	1	Büntgen et al, 2016
6	别卢哈山	冰芯氧同位素 (δ ¹⁸ O)含量	49.8°N, 86.6°E	4062	3-11 月平均气温	68%(年代际)	AD1250-AD2001	10	Eichler et al, 2009
7	土耳其西南部	树轮碳同位素 (δ ¹³ C)变化	36.6°N, 30.0°E,	1850-2020	1-5 月平均气温	27%(年际)	AD1125-AD2006	1	Heinrich et al, 2013
8	欧洲中部	树轮宽度, 多个样点综合	40°N~50°N, 5°E~20°E		6-8 月平均气温	51%(年际); 84%(60年低通滤波)	500BC-AD2000	1	Büntgen et al, 2011
9	欧洲大部	树轮、文献等多种证据集成	35°N~70°N, 10°W~40°E		6-8 月平均气温	66%(年至 31 年带通滤波)	138BC-AD2003	1	Luterbacher et al, 2016

①图中数字1-9为表1列举的温度重建序列序号,区域范围或样点位置见表1。

究(Lamb, 1977; Finné et al, 2011)综合利用各种气候变化代用证据对欧洲过去2000年温度的百年尺度变化阶段进行过分析。综合分析这些结果,可得各个区域的温度变化基本特征如下。

2.1 中国西北地区

中国西北地区有自然及农时物候等文献记录,可用于数百年时段的区域温度变化重建和古今温度差异的对比分析,同时也有树轮可用于连续的千年温度变化序列重建。其中源于历史文献记载的温度重建结果显示,唐代关中地区的气候可能较20世纪后期更为温暖,公元600–800年间,关中地区冬半年(10–4月平均)温度较1961–1990年均值高0.4℃以上(Liu et al, 2016)。此后至10世纪中期,气候转冷;但至960年前后,中国西北东部的温度又大致回暖至1951–1980年水平,然后继续在波动中逐渐趋暖。其中960s–1040s,气候增暖;至1040s–1110s,该区域温度可能较1951–1980年均值约高0.5~1.0℃;1110s以后气候迅速转冷;但至12世纪末,再次转暖,不过转暖过程持续时段较短;至1260年之后,温度迅速下降,自13世纪末进入寒冷期(郝志新等, 2009)。来自祁连山森林上限树轮重建温度变化序列(Liu et al, 2005; Zhang et al, 2014)也显示,该地区9世纪末–10世纪、11世纪后期、14世纪后期–15世纪前期、16世纪及20世纪气候相对温暖,其中暖峰分别出现在890s、930s、1090s、1410s、1520s–1540s、1940s–1950s和1980s–1990s;其余时段,特别是16世纪末–19世纪气候寒冷,其中冷谷分别出现在1010s、1150s、1210s、1280s–1290s、1450s–1480s、1700s–1720s、1790s和1820s–1840s(图2a)。

上述证据表明,中国的关中至河西走廊地区存在与北半球多数区域MCA对应的温暖气候;但同中国(图2b; Ge et al, 2013)、亚洲(图2d; Shi et al, 2015)及其他大洲的温度变化序列(PAGES 2k Consortium, 2013)对比表明:这一地区在MCA并未持续温暖,其间曾数次出现数十年至百年的寒冷时段,且950–1250年间的时段平均温度及其间最暖百年的温度可能均较20世纪低。因为树轮重建的祁连山温度变化序列显示,在1100年以后,气温曾出现显著下降,这与根据历史文献记载的西北地区东部自1110s起气候迅速转冷的特征基本一致。文献记载显示:在1170s前后,西夏境内的“贺兰山尊,冬夏降雪”;海拔更高的“积雪大山”(即祁连山)更是“冬夏降雪,雪体不融”,仅“南边雪化”;且当时大

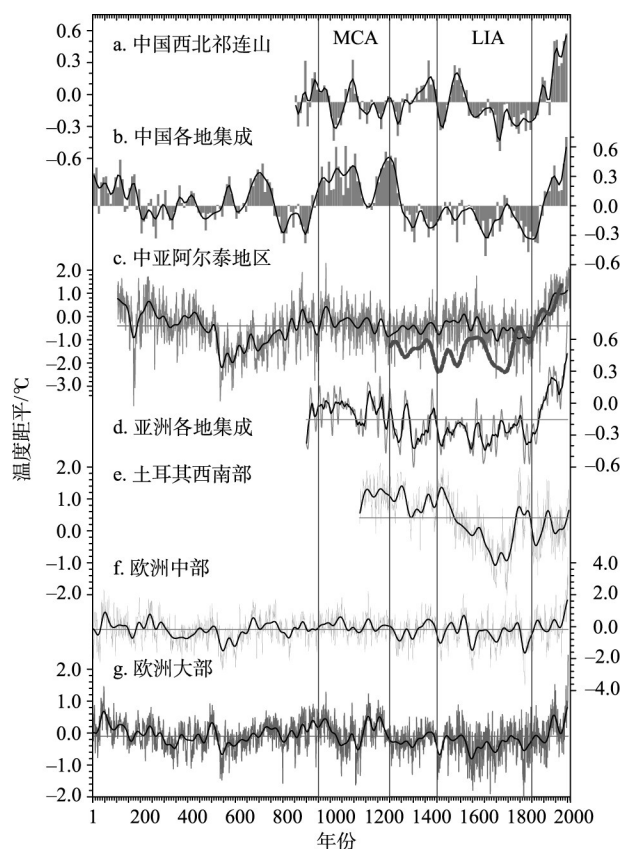


图2 古丝绸之路沿线地区的千年温度变化(a, c, e, f, g)及其与中国(b)和亚洲(d)温度变化的对比

(a. 中国西北的祁连山地区(表1序列3和4平均); b. 中国各地集成(Ge et al, 2013); c. 中亚阿尔泰地区(细灰线: 表1的序列5, 粗灰虚线: 表1的序列6); d. 亚洲各地集成(Shi et al, 2015); e. 土耳其西南部(表1的序列7); f. 欧洲中部(表1的序列8); g. 欧洲大部(表1的序列9); 所有序列温度距平的基准值: 1850–1950年均值; 细横线: 序列平均值; 粗黑线: 30年FFT平滑)

Fig.2 Temperature variations during the past millennium along the Ancient Silk Road (a, c, e, f, g), and over China (b) and Asia (d)

(a. Qilian mountain of Northwestern China (the mean of series 3 and 4 in Table 1); b. Synthesized reconstruction of China (Ge et al, 2013); c. Altai of Central Asia (slim-grey line: Series 5 in Table 1; thick-grey line: Series 6 in Table 1); d. Synthesized reconstruction of Asia (Shi et al, 2015); e. Southwestern Turkish (Series 7 in Table 1); f. Central Europe (Series 8 in Table 1); g. Most parts of Europe (Series 9 in Table 1); The temperature anomaly for all the series is relative to the mean of 1850–1950. Slim horizontal line: mean of the series; Bold line: 30-a fast Fourier (FFT) smoothing)

麦、燕麦至九月才成熟收获;据此估计该区域最冷年代的气温应较1951–1980年均值约低1.0℃(郝志新等, 2009)。上述树轮记录(图2a)也显示,自1100年气温快速下降以后,尽管在12世纪末和13世纪中期前后,气候曾出现短暂回暖,但整个12–13世纪

气候一直处于较寒冷水平。而16世纪末-19世纪气候寒冷则与北半球总体处于LIA的特点基本对应。

2.2 中亚至地中海东部地区

中亚至地中海东部地区有树轮、冰芯、湖泊沉积、洞穴石笋等自然证据。其中位于中亚的阿尔泰山已积累了多个地点的树轮资料,集成这些资料重建的夏季(6-8月)气温序列(图2c; Büntgen et al, 2016)显示,该地区公元2-4世纪尽管曾出现过多个极端低温年份,但气候总体温暖;5-6世纪前期,温度在波动中快速下降。536-660年,气候显著寒冷,被称为“晚古典时代小冰期”(Late Antique Little Ice Age; LALIA),与当时欧洲的大规模人口迁徙、疫病流行、社会动荡、政治混乱和文化衰落等特征相对应(Büntgen et al, 2011)。此后,气候在波动中回暖;9-12世纪,气候总体温暖,但其间曾在940年前后出现过短暂的剧烈降温。12世纪末起,气候相对转冷,并维持在相对寒冷的水平上波动至15世纪后期,其中冷谷分别出现在1200年、1250年、1320年、1380年和1450年前后。16世纪再度回暖至过去2000年平均水平,但在1540年和1590年前后曾出现显著降温。自17世纪初起,气候又再度转冷,并维持在较寒冷水平上波动直至19世纪中期。19世纪后期起,气候快速回暖,持续至20世纪。对比显示,尽管历史上曾多次出现与20世纪后期温暖年份相似的极端高温年,但20世纪后期是这一地区自公元2世纪以来的最温暖时段;且这一地区MCA和LIA间的温度相差仅约0.3℃,不如其他地区显著;当然这可能与该重建序列方差解释量仅24%(表1),因而无法揭示温度变化的大部分变幅有关。利用俄罗斯南部别卢哈山(Belukha)冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 重建的1250年以来温度年代际变化记录也显示:在1450年和1540年前后,温度曾显著下降,1650-1760年为显著冷期,而1850年之后气候又迅速增暖(Eichler et al, 2009);这与阿尔泰山树轮资料所显示的冷暖波动过程基本一致,只是其温度变幅更大,且自LIA冷谷至20世纪末的增暖趋势也更为显著,而这也可能与其所处位置的海拔更高有关。

欧亚之交的土耳其也有利用树轮重建的1125-2006年温度变化序列(图2e; Heinrich et al, 2013),结果显示:12-15世纪,这一地区尽管曾在1270年、1330年、1380年和1440年前后出现年代尺度的显著降温事件,但其间的气候却相对温暖,且持续时间也相对较长;直至16世纪起,才出现明显的百年

尺度降温过程,因此其进入小冰期的时间也较晚,其中冷谷分别在1690s和1740s。此后至1800年前后,气候回暖;然后呈现典型的多年代尺度波动直至21世纪初;但整个20世纪却未像全球其他大多数区域一样持续快速增暖,仅20世纪末期温度有显著上升。这可能是该区域树轮资料的空间代表性有限所致(Touchan et al, 2007)。尽管如此,该序列所揭示的12-15世纪末几次年代尺度显著降温事件以及小冰期的最寒冷时段,与上述阿尔泰山地区曾出现的转冷事件和寒冷期基本一致。

地中海东部及以东毗邻区虽然高分辨气候变化序列匮乏,但有近百个地点的湖泊、海湾、沼泽等沉积物和洞穴石笋资料。Finné等(2011)综合分析了这些记录后确认,这一地区气候存在较为显著的百年尺度冷暖波动,其中公元初前后气候温暖,这一暖期大致持续至4世纪;其后的5-6世纪显著偏冷;600-850年间,这一地区温暖气候证据较多,且没有明确的寒冷事件,这与当时中国的隋唐暖期基本一致。850-950年,气候再度寒冷,但程度相对较弱。MCA出现在950-1300年间,气候显著温暖。LIA出现在1400-1870年间,是过去2000年中持续时间最长的显著冷期。1870年以后,气候快速转暖。但由于这些记录时间分辨率常达数十年以上,且多数记录存在一定的测年误差,因此只能指示百年时段的冷暖阶段变化,而无法定量估计各冷暖期的温度变幅和其间的年代至多年代尺度温度波动。

2.3 欧洲

欧洲具有丰富的气候变化代用资料,如树轮、植被分布、农作物种植范围及收获期、冰川与冰缘活动、湖泊纹层沉积物等,且相关研究也较为深入。Lamb(1977)曾总结了欧洲地区20世纪80年代前所获取的代用证据,初步描绘了过去2000年的冷暖阶段变化。结果显示:自公元前1世纪起,欧洲(特别是西欧及其周边地区)气候温暖,并持续了数百年;约至公元4世纪中期转为寒冷,此后则数度波动(其中5-6世纪、7世纪后期-8世纪前期、9世纪中期-10世纪前期寒冷,其他时段则短暂回暖),直至10世纪以后又再度明显转暖,11-13世纪温暖,14世纪从温暖转为寒冷,15-19世纪寒冷,20世纪又再度回暖;温暖时段与寒冷时段之间的温度差异大致为1~2℃。Lamb(1977)还采用“中世纪暖期”(Medieval Warm Period/Epoch, Medieval Climatic Optimum, Little Climatic Optimum, 约10-13世纪)和“小

冰期”(约15-19世纪)等术语描述这种百年尺度的冷暖阶段,其中小冰期中最寒冷时段为1550–1700年。此后,又有学者将Lamb划分的公元前1世纪至公元4世纪中期的温暖及其后的寒冷期(约4世纪末-10世纪前期)分别称为“罗马暖期”(Roman Warm Period)和“黑暗时代冷期”(Dark Ages Cold Period)(Bianchi et al, 1999; Patterson et al, 2010);得出欧洲过去2000年温度变化呈2暖(罗马暖期、中世纪暖期)、2冷(黑暗时代冷期、小冰期)及其后20世纪再度显著增暖的基本特征。

最近20年,欧洲又获取了大量的高分辨率气候变化代用证据(Luterbacher et al, 2012; PAGES 2k Consortium, 2013, 2017),且多次集成重建了欧洲大部的过去2000年分辨率达年至年代的温度变化序列。最新的欧洲夏季温度变化重建结果(图2g; Luterbacher et al, 2016)显示,公元1–3世纪、8–10世纪和12世纪后期–13世纪前期、20世纪欧洲夏季气候温暖,且1世纪、10世纪和12世纪后期–13世纪前期的温暖程度与20世纪基本相当,其中1世纪甚至还较20世纪高约0.1℃;而4–7世纪和14–19世纪寒冷。这一结果也与早先重建的欧洲中部夏季温度变化(图2f; Büntgen et al, 2011)基本一致,仅在1020–1060年和1190–1230年2个时段二者有显著

差异。这不仅证明欧洲大多数地区的温度长期变化可能具有较好一致性;同时也再次证实了Lamb (1977)划分的百年尺度冷暖阶段变化特征。

表2进一步给出根据上述2个欧洲夏季温度变化序列的30年FFT平滑曲线(图2f, 2g)划分的持续百年以上冷暖期的重叠时段,以及其间各个暖期欧洲大部的最暖百年、冷期的最冷百年和显著的30年暖峰与冷谷。结果显示:第1个暖期为33–288年,大致与罗马暖期对应。其中最暖百年出现在暖期之初的33–132年,温度较1850–1950年高约0.3℃;且整个时段存在多年代尺度波动和弱转冷趋势;3个暖峰(33–62年、111–140年和228–257年)温度分别较1850–1950年高约0.6℃、0.3℃和0.2℃,冷谷(150–179年)则低约0.3℃。第1个冷期为308–660年,基本对应“晚古典时代小冰期”,也与中国的魏晋南北朝冷期(约250–550年)大部分重叠;含2个显著冷谷和1个短暂暖峰。其间最冷百年(536–635年)温度较1850–1950年低约0.4℃;2个冷谷(329–358年和536–565年)分别低约0.5℃和0.7℃;暖峰(481–510年)则高约0.3℃。

欧洲大部分地区的第2个暖期出现在670–1028年,包含2个温暖时段和其间的偏冷时段。其中第1温暖时段约在670–780年间,时段温度平均

表2 欧洲过去2000年夏季温度变化序列揭示的冷暖期及其暖峰与冷谷

Table 2 Cold and warm periods revealed by the summer temperature reconstruction series during the past 2000 years in Europe							
持续百年以上的冷暖期	暖期1	冷期1	暖期2	冷期2	暖期3	冷期3	20世纪暖期
起讫时间/AD	33–288	308–660	670–1028	1029–1136	1137–1251	1275–1860	1901–2000
温度距平/℃	0.1	–0.2	0.1	–0.3	0.3	–0.3	0.2
最暖百年/AD	33–132	427–526	911–1010	1037–1136	1137–1236	1353–1452	
温度距平/℃	0.3	0.0	0.3	–0.3	0.3	–0.1	
最暖30年/AD	33–62	481–510	726–755	1077–1106	1141–1170	1400–1429	1924–1953
温度距平/℃	0.6	0.3	0.2	0.0	0.5	0.0	0.5
	111–140		964–993		1198–1217	1532–1561	1985–2003
	0.3		0.5		0.5	0.0	0.8
	228–257					1752–1782	
	0.2					–0.1	
最冷百年/AD	138–237	536–635	773–872	1032–1131	1151–1250	1579–1678	
温度距平/℃	–0.1	–0.4	–0.1	–0.3	0.3	–0.5	
最冷30年/AD	150–179	329–358	796–825	1029–1058		1329–1358	1955–1984
温度距平/℃	–0.3	–0.5	–0.3	–0.4		–0.4	0.0
		536–565		1107–1136		1453–1482	
		–0.7		–0.5		–0.6	
						1579–1608	
						–0.8	
						1672–1701	
						–0.6	
						1812–1841	
						–0.6	

较1850–1950年高约0.1℃,其间暖峰(726–755年)则高0.2℃以上;此后至870年前后则气候转冷,其间冷谷(796–825年)温度较1850–1950年低约0.3℃;这与中国唐代盛期的温暖气候及其后的转冷基本一致。第2温暖时段在10世纪前后,与MCA前期基本对应,其中最暖百年为911–1010年,温度较1850–1950年高约0.3℃,其中暖峰(964–993年)则高0.5℃。1029–1136年,欧洲大部分地区气候相对偏冷,温度较1850–1950年低约0.3℃;其间2个冷谷出现在1029–1058年和1107–1136年间,温度则分别低0.4℃和0.5℃,而其中的第1个冷谷还与奥尔特太阳黑子极小期(Oort Minimum; 1010–1050年)大致对应。值得注意的是,这一时期欧洲中部(图2f)的温度大致与过去2000年平均水平相当,并未明显寒冷,这可能是温度波动的区域差异所致。因为Luterbacher等(2016)的研究还显示:在11世纪,欧洲北部温暖程度更显著,但中部和西南部,夏季气温相对偏低;在13世纪中期和15世纪中期,欧洲东北部降温显著,其他区域却不甚明显;而在17世纪末和19世纪上半叶,显著降温区则主要分布在欧洲南部。

欧洲大部分地区的第3个暖期出现在1137–1251年间,位于MCA后期,与中世纪太阳黑子极大期(Medieval Maximum, 约1100–1250年)基本对应;尽管其持续时间相对较短,却可能是欧洲地区温暖程度最显著的暖期。因为其间温度平均较1850–1950年高约0.3℃,大致与罗马暖期的最暖百年相当,较20世纪平均还高约0.1℃;其中2个暖峰(1141–1170年和1198–1217年)均较1850–1950年高约0.5℃,与20世纪的最暖30年温度也基本一致。此后气候转冷,于1275年前后进入过去2000年间持续最长的寒冷期,至1860年前后才结束,其间涵盖了整个LIA。这一冷期持续时间长,温度存在较显著的多年代至百年尺度波动:冷谷出现在1329–1358年、1453–1482年、1579–1608年、1672–1701年和1812–1841年间,分别较1850–1950年低0.4℃、0.6℃、0.8℃、0.6℃和0.6℃;最冷百年为1579–1678年,较1850–1950年低约0.5℃。即使是其中的相对暖峰,其温度也仅与1850–1950年均值相当。1860年以后,欧洲气候在波动中快速转暖,其中20世纪温度较1850–1950年高0.2℃;其间暖峰1924–1953年高约0.5℃,相对寒冷的1955–1984年与1850–1950年均值相当;此后温度又快速上升,至21

世纪初超出了过去2000年的最暖水平。

3 中世纪气候异常期和小冰期的干湿特征差异

古丝绸之路沿线干湿气候型有半湿润、半干旱、干旱、夏干冬湿和终年常湿润等,特别是其中横跨中、西亚干旱区,降水变化的区域与季节差异极大。且因代用证据常受局地降水影响,样点(区)的降水、干湿或旱涝气候重建结果的空间、季节代表性有限,且空间覆盖度不一,因而本文重点关注代用资料相对丰富的区域,包括:中国关中平原与河西走廊、中亚和欧洲等。

3.1 中国关中平原和河西走廊

重建的960–2010年关中平原干湿指数序列(郝志新等, 2017)显示,关中平原的干湿变化以年际至百年的多尺度波动为主要特征,存在3~7a、准10a、准30a、准70a及准100a周期;因而MCA(950–1250年)和LIA(1450–1850)之间,关中平原的干湿指数并无显著差异。然而,进一步统计却显示:在MCA间,关中平原早年(干湿指数<2.5)的发生频率为26.8%,涝年(干湿指数>3.5)为24.4%,极端早年(干湿指数<2.0)的发生频率仅0.7%,极端涝年(干湿指数>4.0)为4.8%;而LIA间,旱、涝年的发生频率均为20.9%,极端旱、涝年分别达7.2%和6.5%;说明MCA间,关中平原的干湿变率较LIA大,出现旱、涝频率更高;但LIA却更易出现极端旱涝事件。

河西走廊是丝绸之路的主要廊道。根据祁连山中部树轮资料重建的该地775–2006年降水序列(Zhang et al, 2011)显示,降水变化同样存在显著的2~3年、34~58年和73~147年等年际至百年尺度的周期波动,因此MCA和LIA之间的降水均值也基本一致;但进一步统计也表明:在MCA间,河西走廊旱(低于序列均值的0.65倍方差)、涝(高于序列均值的0.65倍方差)年的发生频率分别为24.6%和27.6%,极端旱、涝(分别低于、高于序列的均值1.645倍方差)的发生频率分别为6.6%和4.7%;而LIA的旱、涝年的发生频率分别仅为18.5%和17.5%,极端旱、涝年发生频率分别为6.2%和0.7%。同样说明: MCA间,河西走廊的干湿变率较LIA大,出现旱、涝频率更高;但LIA出现极涝事件频率却较低。

3.2 中亚

中亚是受西风带环流控制的干旱区,对17个地

点、覆盖范围为 $50^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ 且长度达千年以上的干湿变化代用资料分析表明,整个中亚干旱区年代际至百年尺度的干湿变化具有较好同步性。据此选用其中分辨率达10年的5个代表性地点干湿代用指标进行集成重建的亚洲中部干旱区过去1000年湿润指数序列显示,在MCA大部分时段(1000–1250年),这一地区气候显著偏干;而在LIA起始阶段(1450–1550年),气候显著转湿,此后一直维持相对偏湿状态直至1850年前后LIA结束(Chen et al, 2010)。可见,中亚地区在MCA和LIA期间的干湿存在差异。MCA期间中亚气候偏干,这与北美中纬度地区、非洲北部等许多地区在MCA期间气候偏干的特征一致(Diaz et al, 2011);而LIA期间中亚气候则偏湿。

3.3 欧洲

欧洲超过2000年的降水与干湿重建主要集中在欧洲中部树轮资料样点密集区域,Büntgen等(2011)重建的过去2500年欧洲中部(约 $6^{\circ}\text{E}\sim 12^{\circ}\text{E}$, $48^{\circ}\text{N}\sim 52^{\circ}\text{N}$)4–6月降水量序列显示:相对于20世纪平均值,公元250年之前,欧洲中部降水较多,但总体呈减少趋势;公元250–550年,降水曾出现一次明显的先增后减波动,年代际波动幅度达100 mm左右;6世纪中叶–10世纪初,降水在波动中呈增加趋势,此后至10世纪后期则快速减少;但自10世纪末起,欧洲中部降水又呈显著的年代至世纪尺度波动,且波动幅度也显著缩小,其中在12–14世纪与18世纪降水相对偏多,11世纪、15–17世纪和19–20世纪相对偏少。对比这一序列在MCA和LIA间的降水均值发现,LIA的降水均值较MCA多7.9%,均

方差大19.3%;说明欧洲中部地区LIA的气候可能较MCA更为湿润,但变率更大。

近1000年欧洲的树轮资料更为丰富,据此Cook等(2015)据此重建了全欧及地中海沿岸的亚洲、非洲区域格点帕尔默干旱指数(PDSI)图集,揭示了1315、1540、1616、1714、1893和1921年等欧洲几次重大旱涝灾害的空间分布。结果显示:除1315年大涝几乎波及整个欧洲外,其余5次干旱事件的发生区域存在差异,欧洲东北部在中西欧大旱时仍然相对湿润。对比1000–1200年、1550–1750年和1850–2012年3个时段的PDSI多年平均结果(图3)发现:在所有3个典型时段内,东欧的罗马尼亚和乌克兰等地均偏干;1000–1200年欧洲大陆中北部以及斯堪的纳维亚半岛南部比1550–1750年和1850–2012年更干,芬兰和斯堪的纳维亚半岛北部以及俄罗斯等则略湿;这也同样说明:欧洲大陆中北部以及斯堪的纳维亚半岛南部的广大区域MCA期间气候较LIA偏干。

4 结论

通过上述分析,可知过去2000年古丝绸之路经历了多次数十年至百年尺度的冷暖变化,其中1–3世纪、7世纪后期–11世纪初、12世纪中期–13世纪中期气候温暖;11世纪中期–12世纪初气候偏冷;4–7世纪前期气候寒冷、13世纪末–19世纪中期气候寒冷;20世纪气候快速增暖。古丝绸之路沿线各地均存在与北半球多数区域MCA与LIA大致对应的暖期和冷期,但不同区域间的年代至百年尺度变

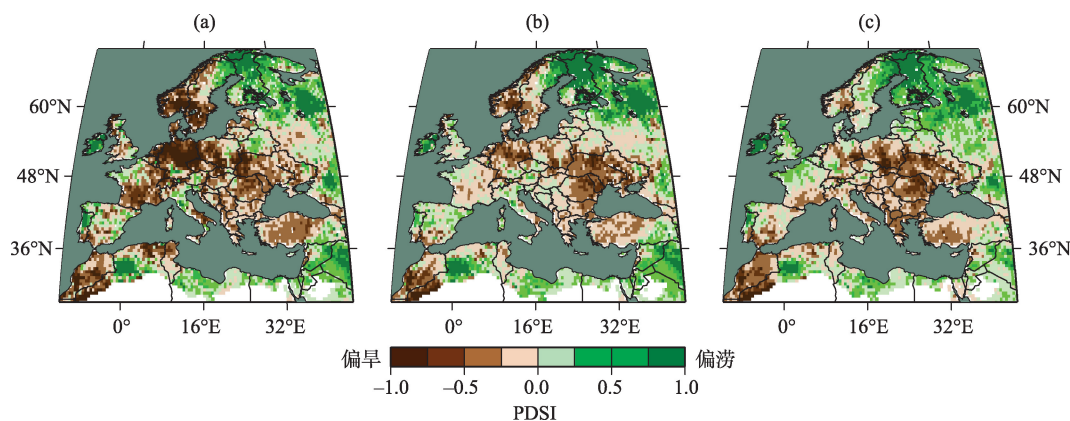


图3 欧洲1000-1200年(a)、1550-1750年(b)和1850-2012年(c)的PDSI多年平均值(数据引自Cook et al, 2015)

Fig.3 The mean of Palmer drought severity index (PDSI) for 1000-1200 (a), 1550-1750 (b), and 1850-2012 (c) for Europe (Data from Cook et al, 2015)

化位相不完全同步,波动幅度也存在差异。其中:中国的关中至河西走廊地区公元600–800年气候温暖,MCA的起止时间均较其他地区略早。中亚地区600–800年气候相对寒冷,MCA与LIA期间的温度差异相对较小。欧洲则是7世纪后期–11世纪初、12世纪中期–13世纪中期气候温暖,13世纪末至19世纪中期气候显著寒冷。同时,各地干湿特征在MCA和LIA也存在差异,其中中国的关中平原及河西走廊在MCA间的干湿变率较LIA大;中亚干旱区MCA期间气候偏干,LIA期间偏湿;欧洲中北部以及斯堪的纳维亚半岛南部等地在MCA间气候较LIA偏干,且中部地区LIA间的干湿变率较MCA大;芬兰和斯堪的纳维亚半岛北部以及俄罗斯等地MCA间的气候较LIA更湿润。这些认识可为了解古丝绸之路沿线区域资源环境与人类活动相互作用问题的历史演化过程提供简要参考,同时对进一步深入开展上述问题研究也具有重要意义。

然而,需要指出的是:至目前为止,除欧洲中、西部有较多的千年气候变化重建序列外,其他大多数区域只有一些零星的气候变化高分辨率重建结果,同时在广大的西亚和东欧地区,高分辨率气候变化重建结果极为匮乏;因而,本文只是对这一问题的初步分析,其结果仍存在不确定性和时空局限性,需要在未来相关研究中予以加强。

参考文献(References)

陈发虎, 安成邦, 董广辉, 等. 2017. 丝绸之路与泛第三极地区人类活动、环境变化和丝路文明兴衰[J]. 中国科学院院刊, 32(9): 967-975. [Chen F H, An C B, Dong G H, et al. 2017. Human activities, environmental changes, and rise and decline of Silk Road Civilization in Pan-Third Pole Region[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 32(9): 967-975.]

葛全胜. 2011. 中国历朝气候变化[M]. 北京: 科学出版社. [Ge Q S. 2011. Climate change in Chinese dynasties[M]. Beijing, China: Science Press.]

郝志新, 葛全胜, 郑景云. 2009. 宋元时期中国西北东部的冷暖变化[J]. 第四纪研究, 29(5): 871-879. [Hao Z X, Ge Q S, Zheng J Y. 2009. Temperature variations during the Song and Yuan Dynasties (960-1368 A. D.) in the eastern part of North West China[J]. Quaternary Sciences, 29(5): 871-879.]

郝志新, 耿秀, 刘可邦, 等. 2017. 关中平原过去1000年干湿变化特征[J]. 科学通报, 62(21): 2399-2406. [Hao Z X,

Geng X, Liu K B, et al. 2017. Dryness and wetness variations for the past 1000 years in Guanzhong Plain[J]. Chinese Science Bulletin, 62(21): 2399-2406.]

刘卫东. 2015. “一带一路”战略的科学内涵与科学问题[J]. 地理科学进展, 34(5): 538-544. [Liu W D. 2015. Scientific understanding of the Belt and Road Initiative of China and related research themes[J]. Progress in Geography, 34(5): 538-544.]

荣新江. 2015. 丝绸之路与东西文化交流[M]. 北京: 北京大学出版社. [Rong X J. 2015. Silk Road and cultural interaction between East and West[M]. Beijing, China: Peking University Press.]

徐新良, 王靓, 蔡红艳. 2016. “丝绸之路经济带”沿线主要国家气候变化特征[J]. 资源科学, 38(9): 1742-1753. [Xu X L, Wang L, Cai H Y. 2016. Spatio-temporal characteristics of climate change in the Silk Road Economic Belt[J]. Resources Science, 38(9): 1742-1753.]

Bianchi G G, McCave I N. 1999. Holocene periodicity in North Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland[J]. Nature, 397: 515-517.

Büntgen U, Myglan V S, Ljungqvist F C, et al. 2016. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD[J]. Nature Geoscience, 9(3): 231-236.

Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, et al. 2011. 2500 years of European climate variability and human susceptibility[J]. Science, 331: 578-582.

Chen F H, Chen J H, Holmes J, et al. 2010. Moisture changes over the last millennium in arid Central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region[J]. Quaternary Science Reviews, 29(7-8): 1055-1068.

Chen Y N, Li Z, Li W H, et al. 2016. Water and ecological security: Dealing with hydroclimatic challenges at the heart of China's Silk Road[J]. Environmental Earth Sciences, 75(10): 881.

Cook E R, Seager R, Kushnir Y, et al. 2015. Old World megadroughts and pluvials during the Common Era[J]. Science Advances, 1(10): 1-9.

Diaz H F, Trigo R, Hughes M K, et al. 2011. Spatial and temporal characteristics of climate in Medieval Times Revisited[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 92(11): 1487-1500.

Eichler A, Olivier S, Henderson K, et al. 2009. Temperature response in the Altai region lags solar forcing[J]. Geophysi-

- cal Research Letters, 36(1): L01808, doi: 10.1029/2008GL035930.
- Finné M, Holmgren K, Sundqvist H S, et al. 2011. Climate in the eastern Mediterranean, and adjacent regions, during the past 6000 years: A review[J]. *Journal of Archaeological Science*, 38(12): 3153-3173.
- Ge Q, Hao Z, Zheng J, et al. 2013. Temperature changes over the past 2000 yr in China and comparison with the Northern Hemisphere[J]. *Climate of the Past*, 9(3): 1153-1160.
- Heinrich I, Touchan R, Liñán I D, et al. 2013. Winter-to-spring temperature dynamics in Turkey derived from tree rings since AD 1125[J]. *Climate Dynamics*, 41(7-8): 1685-1701.
- IPCC. 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Jia D, Fang X Q, Zhang C P. 2017. Coincidence of abandoned settlements and climate change in the Xinjiang oases zone during the last 2000 years[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 27(9): 1100-1110.
- Lamb H H. 1977. Climate: Present, past and future, volume 2: Climatic history and the future[M]. London, UK: Methuen.
- Li P Y, Qian H, Zhou W F. 2017. Finding harmony between the environment and humanity: An introduction to the thematic issue of the Silk Road[J]. *Environmental Earth Sciences*, 76(3): 105.
- Li Z, Chen Y N, Wang Y, et al. 2016. Drought promoted the disappearance of civilizations along the ancient Silk Road [J]. *Environmental Earth Sciences*, 75(14): 1116.
- Liu X H, Qin D H, Shao X M, et al. 2005. Temperature variations recovered from tree-rings in the middle Qilian Mountain over the last millennium[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 48(4): 521-529.
- Liu Y C, Dai J H, Wang H J, et al. 2016. Phenological records in Guanzhong area in central China between 600 and 902 AD as proxy for winter half-year temperature reconstruction[J]. *Science China: Earth Sciences*, 59(9): 1847-1853.
- Luterbacher J, García-Herrera R, Akcer-On S, et al. 2012. A review of 2000 years of Paleoclimatic evidence in the Mediterranean[M]//Lionello P. The climate of the mediterranean region: From the past to the future. Amsterdam, Netherlands: Elsevier: 87-185, doi: 10.1016/B978-0-12-416042-2.00002-1.
- Luterbacher J, Werner J P, Smerdon J E, et al. 2016. European summer temperatures since Roman times[J]. *Environmental Research Letters*, 11(2): 024001, doi: 10.1088/1748-9326/11/2/024001.
- PAGES 2k Consortium. 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia[J]. *Nature Geoscience*, 6(5): 339-346.
- PAGES 2k Consortium, 2017. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era[J]. *Scientific Data*, 4: 170088, doi: 10.1038/sdata.2017.88.
- Patterson W P, Dietrich KA, Holmden C, et al. 2010. Two millennia of North Atlantic seasonality and implications for Norse colonies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(12): 5306-5310.
- Shi F, Ge Q S, Bao Y, et al. 2015. A multi-proxy reconstruction of spatial and temporal variations in Asian summer temperatures over the last millennium[J]. *Climatic Change*, 131(4): 663-676.
- Touchan R, Akkemik Ü, Hughes M K, et al. 2007. May-June precipitation reconstruction of southwestern Anatolia, Turkey during the last 900 years from tree rings[J]. *Quaternary Research*, 68(2): 196-202.
- Zhang Y, Shao X M, Yin Z Y, et al. 2014. Millennial minimum temperature variations in the Qilian Mountains, China: Evidence from tree rings[J]. *Climate of the Past*, 10(5): 1763-1778.
- Zhang Y, Tian Q H, Gou X H, et al. 2011. Annual precipitation reconstruction since AD 775 based on tree rings from the Qilian Mountains, northwestern China[J]. *International Journal of Climatology*, 31(3): 371-381.

Characteristics of temperature changes during the past millennium along the Ancient Silk Road

HAO Zhixin^{1,2}, LIANG Yani^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, GENG Xiu^{1,2}, ZHENG Jingyun^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the recently published multi-proxies temperature reconstruction series (longer than 1000 years) along the Ancient Silk Road, combined with the dry and wet condition variation reconstructions, the general characteristics of temperature changes were analyzed and the regional differences of dry and wet condition variations were compared for the Medieval Climate Anomaly (MCA, AD950-AD1250) and Little Ice Age (LIA, AD1450-AD1850). The main conclusions are: the centennial temperature variations during the past 2000 years experienced warm epochs in the 1st-3rd century, the latter part of the 7th century to the early of the 11th century, the mid-12th century to mid-13th century, and since the 20th century; and cold epochs during the 4th century to the early 7th century, the middle of the 11th century to the early 12th century, and the end of the 13th century to the mid-19th century. The phases of warm and cold condition and fluctuations at decadal-centennial temporal scales differed among the various regions. The wet and dry condition variations during the MCA and LIA also exhibited regional differences, which was larger during the MCA than the LIA on the Guanzhong Plain and in the Hexi Corridor of China, and the climate was dry during the MCA and wet during the LIA in the arid region of Central Asia. The climate was drier during the MCA than the LIA in the south of Scandinavia and the middle and northern parts of Europe, and in the central part of this region the variation was large during the LIA. In contrast, Finland, northern Scandinavia, and Russia had wetter climate during the MCA.

Key words: Ancient Silk Road; past millennium; temperature change; Medieval Climate Anomaly (MCA); Little Ice Age (LIA); difference of dry-wet condition between MCA and LIA