

中国小冰期气候研究综述

张娴¹ 邵晓华¹ 王涛¹

摘要

通过对小冰期研究文献进行综述,并对已发表的小冰期温度和降水数据进行综合对比分析,探讨小冰期时期中国气候特征的区域性。结果表明,小冰期在中国地区不同区域代用指标记录中均存在,但是小冰期的起讫及持续时间具有区域差异性,温湿配置也不尽相同。小冰期的起始时间主要呈现出由西向东推移的趋势,即青藏高原最早,华北地区次之而东部地区最晚。温湿配置的差异主要体现在东部季风区小冰期时期总体上是冷干的气候环境,而西部地区气候变化则呈现冷湿的气候特征。

关键词

小冰期;代用指标记录;温湿配置

中图分类号 P467;P461

文献标志码 A

收稿日期 2012-03-29

作者简介

张娴,女,硕士生,研究方向为全球变化与区域相应。zhangxian18@163.com

邵晓华(通信作者),女,博士,副教授,主要从事全球变化与区域响应的研究工作。

xiaohua.shao@163.com

¹ 南京信息工程大学 遥感学院,南京,210044

0 引言

“小冰期”一词最早由 Matthes^[1] 提出,用来描述“全新世最暖期之后冰川中等规模复活的寒冷时期”。经过半个多世纪的争论,小冰期的概念已为广大的地理学家、地质学家和气候学家所接受。现在我们所称的小冰期专指近数百年中出现的冷期^[2]。小冰期的存在已经在北美阿拉斯加树轮^[3]、捷克陆地岩心^[4]及新西兰石笋^[3]等众多地质记录中得到证实。

由于小冰期的大部分时间与我国历史上的明清两代相合,因此在我国也被称为明清小冰期^[5]。小冰期气候在中国的表现十分强烈,并且该时段发生的气候变化具有明显的时空差异。张德二^[6]基于历史文献与树轮资料发现:15世纪以来中国大部分地区气候出现了3次冷期和3次暖期的变化,其中最寒冷阶段是17世纪20—90年代和19世纪20—90年代,在这些寒冷时段,中国有些地区的极端最低气温可能比近代最低气温低5~7℃。杨保等^[7]重建的中国近2000a温度曲线也指出:自1400年之后全国温度迅速降低,进入现代小冰期,一直持续到1920年,并指出17世纪是中国近1000a来最寒冷的时期。王绍武等^[8]利用史料、冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 等数据重建的中国不同区域近400~1000a的10a平均气温序列表明:1560—1699年及1790—1899年可以作为中国小冰期的2次主要寒冷阶段,其30a平均气温可能比20世纪中期中国最暖的30a(1920—1949年)低0.6~0.11℃。郑景云等^[9]基于历史资料发现山东地区近500a来冷暖波动频繁且冷事件占有明显优势,与我国南部地区的冷暖变化相似,指出小冰期的起讫时间为1550—1919年。王绍武等^[10]建立的华北各季近500a的10a平均气温距平虽不能涵盖整个小冰期,但明确指出了前400a比近100a显著偏冷,各季百年平均气温均为负距平,变化在-0.1~-0.7℃之间,并且1550—1699年以及1800—1869年这2个冷期比竺可桢^[11]根据史料对我国南部定出的冷期分别提前70和40a,说明寒冷期在我国可能不是同时到来的。

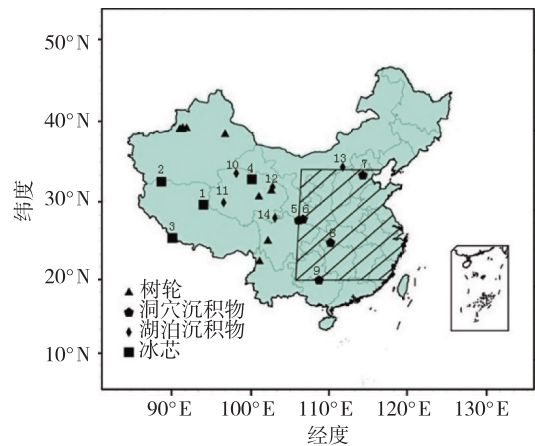
虽然小冰期的存在已经是毋庸置疑的事实,但关于小冰期的起讫与持续时间、在中国不同区域的表现等仍存在争议。总结中国小冰期气候研究进展,可以为明确小冰期气候在中国不同区域的起讫时间及特征的差异提供依据,且有助于理解在全球背景下中国区域年代至百年际尺度气候突变的响应机制及识别人类活动对气候的影响。

1 数据来源与研究方法

如图 1 所示,本文收集了近数百年至 1 000 a 中国区域冰芯、树轮、石笋等古气候代用指标数据及集成的温度序列资料,都兰树轮指数和青海湖红度数据是通过已发表文献中相关图件的数字化获得,其余数据均来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)数据库。

不同的气候代用指标特性不同,记录的环境信息也不完全相同.适用于年代到世纪尺度温度重建的代用资料以历史文献资料、树轮宽度和密度资料、冰芯资料等为主,湖泊沉积、花粉资料、冰川进退记录及只能表现气温低频变化的地热资料也是其有益补充^[12].其中,历史文献的覆盖面主要是我国东部 100°E 以东的地区^[7](图 1 阴影部分),主要方法是对历史记载的冷暖事件判定、分等、定级或确定指数,然后通过与现代资料的对比,进一步将其转换为相应的温度距平^[13].除此之外,从自然界中所采集的代用资料与历史文献记录相互独立,且大多分布在历史文献记载相对贫乏的地区,可与历史文献资料相互补充与验证.树轮资料由于定年准确、连续性好、分辨率高,在古温度重建中被广泛应用^[10].我国青藏高原地区有丰富的冰芯资料^[14],冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和冰川积累量是恢复过去 1 000 a 气候特征最主要的代用指标之一.虽然石笋资料对于重建近 1 000 a 温度变化的作用还需要进一步确认,但是由于石笋具有高精度独立时标,因此石笋资料仍然有很高的利用价值.湖泊沉积的碳酸盐以及红度序列均是很好的湿度代用资料,但是在高分辨率的重建方面仍有不足,而沉积柱状岩心总有机碳质量分数(TOC)序列则能反映区域气候温度变化。

按照地貌及气候等特点,中国可以分为青藏高原区、东部季风区和西北干旱区 3 大自然区.在每个自然区内,古气候记录的数量和类型并不相同,东部季风区古气候记录最为丰富,主要有历史文献资料、石笋同位素数据和树轮资料.由于西北干旱区记录相对最少,因此本文将西北干旱区和青藏高原区统一归为西部地区,该大区的记录以冰芯和树轮记录为主.本文将东西 2 大区内小冰期时段不同气候指标进行综合研究,弥补单一代用指标受多种驱动因子影响的不足,通过指标之间的相互验证,反演 2 大区的小冰期气候特征并探讨中国小冰期气候的区域联系。



注:1—4 号标识的是冰芯记录位置,分别为普若岗日冰芯、古里雅冰芯、达索普冰芯和敦德冰芯;5—9 号标识的是石笋记录位置,分别为甘肃万象洞、陕西大禹洞、北京石花洞、湖北和高洞和贵州董哥洞;10—14 号则是湖泊沉积物记录位置,分别为甘肃苏打湖、荷鲁错湖、青海湖、内蒙古岱海和青藏高原西北部的红原湖;其余均为树轮记录位置,主要分布在北疆地区以及川滇地区。

图 1 选取的代用指标在中国的分布 (阴影部分指示历史文献记录在中国东部的覆盖范围)

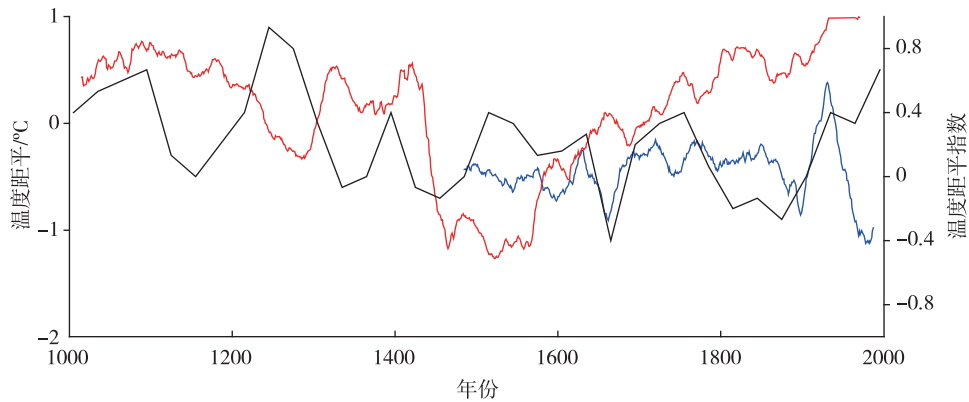
Fig. 1 Distribution of selected proxy indicators in China (with the shaded area indicating coverage of historical documents in eastern China)

2 小冰期时期中国区域气候特征

2.1 东部季风区小冰期时段温湿变化特征

历史文献是东部季风区最可靠、最重要的的温湿代用资料,除此之外,树轮、石笋等代用指标也为近 1 000 a 东部地区气候特征研究做了有力的补充.本文根据收集的代用资料序列,绘制出东部地区温度及降水代用序列对比图(图 2、3).图 2 中黑色曲线为根据历史文献冷暖记载重建的中国东部地区过去近 2 000 a 冬半年温度距平变化序列,分辨率为 30 a^[15];蓝色曲线为基于树轮数据重建的中国北部地区(108°~115°E, 33°~41°N) 530 a 来逐年夏季气温指数的 31 点滑动平均结果^[16];红色曲线为基于北京石花洞年层厚度重建的近 2 650 a 北京夏季逐年温度指数序列 31 点滑动平均结果^[17].对逐年序列进行 31 点滑动平均处理是为了让 3 条曲线在分辨率上比较一致,以便更好地进行对比。

从图 2 可以看出,2 条近 1 000 a 来的温度序列均包含 11—13 世纪的中世纪暖期、15—19 世纪的小冰期以及 20 世纪增温期,并且 2 条序列在 1420 年左右均显示温度下降,指示中国东部地区进入小冰期.东部冬半年温度序列指示小冰期时段包含了



注:1)中国东部地区分辨率为30 a的冬半年温度距平序列^[15](黑色曲线);2)1470年以来基于树轮数据重建的中国北部地区夏季逐年温度距平指数序列的31点滑动平均^[16](蓝色曲线);3)北京石花洞重建逐年温度距平序列的31点滑动平均^[17](红色曲线)

图2 不同代用资料重建的中国东部地区温度序列

Fig. 2 Retrieved temperature series in eastern China using different proxy data

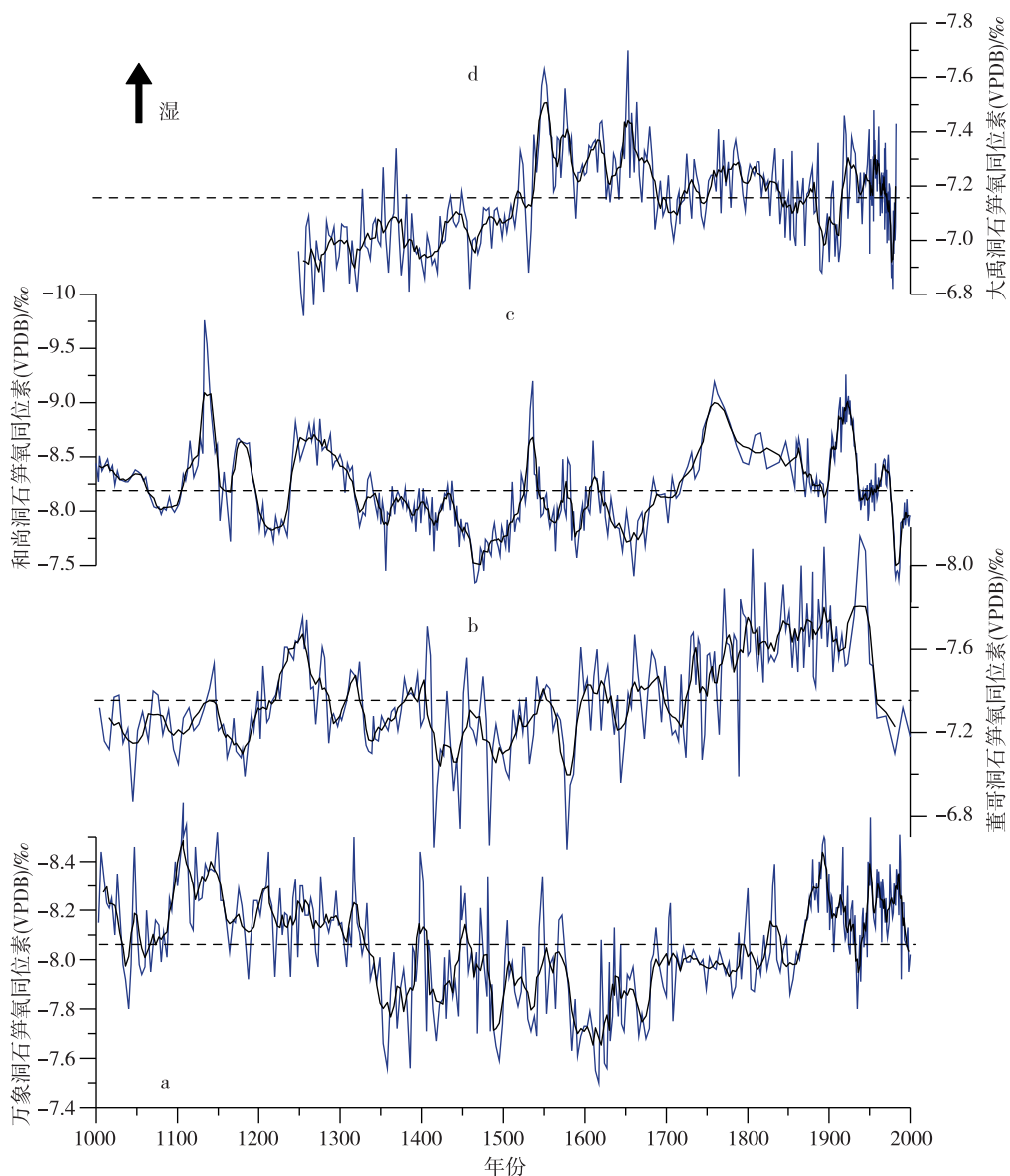
1410—1499年、1560—1709年及1770—1919年3个冷期以及1500—1559年和1710—1769年2个相对偏暖的时期,其中1650—1679为过去2000a中最冷的30a(较1950—1989年低1.1℃)。石花洞重建温度指示:小冰期的第1个冷期为1420—1589年,并且是近1000a来最寒冷的时期(温度下降约0.8℃),随后的几次冷期的降温幅度均没有第1次强烈。1580年后虽然温度存在数次冷暖波动,但是总体趋势是在不断上升的,小冰期的后2个冷期在此序列中并不明显。中国北部近530a温度序列因时间长度较短,无法涵盖整个小冰期,因此难以推断小冰期的起始时间,但是与东部冬半年温度指数在暖峰与冷谷的表现上有很好的对应性,它指示小冰期期间存在1630—1709年以及1840—1919年2个冷期,与东部冬半年指示第2和第3个小冰期冷期相吻合,这种相互印证进一步说明这些指标可以有效地指示东部季风区的气温变化。

虽然影响石笋氧同位素的机制有很多,使其指标意义很难确定,但是在受季风强烈影响的区域,雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化主要受控于降水的“量效应”,说明受地表水影响的洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要反映降水量的变化,偏负和偏正分别代表了降水量的多寡^[18-20]。因此本文利用万象洞^[18]、董哥洞^[19]、和尚洞^[19]和大禹洞^[20]4个洞穴的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列反演东部季风区小冰期的降水变化情况,均采用国际原子能机构(IAEA)所制定的VPDB(Vienna Pee Dee Belemnite)作为标准样品,表示实测结果转化得到的一个确定数值,与SMOW(Standard Mean Ocean Water)标准是

基本一致的。其中,万象洞位于东部季风区的边缘,因其石笋记录主要反映季风降水^[18],故笔者认为其记录可归于东部季风区降水序列。

从图3可以看出:4个石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列在年代际—百年尺度上的变化趋势具有很好的相似性。在长时间尺度上,万象洞和尚洞2条近1000a的 $\delta^{18}\text{O}$ 序列在11世纪初至13世纪初呈现负向漂移,指示降水量增加,与中世纪暖期对应。4条 $\delta^{18}\text{O}$ 序列均指示13世纪之后 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐步偏正至18世纪初偏正趋势开始减弱,表明1320—1729年为低降水期,对应于小冰期。随后, $\delta^{18}\text{O}$ 在振荡中逐渐偏负,说明研究区域内呈现湿润的气候特征。当然,4个序列之间也有差异性,主要体现在小冰期内的次级干湿波动上。大禹洞和万象洞虽然地理位置比较接近,但是 $\delta^{18}\text{O}$ 记录相差较大。万象洞指示小冰期的3次干燥期分别为1480—1549年、1560—1669年以及1770—1859年,而大禹洞 $\delta^{18}\text{O}$ 记录从16世纪开始呈现负向漂移,表明降水量多。虽然在1670年左右 $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐偏正,但是偏正的幅度并不大, $\delta^{18}\text{O}$ 值始终在均值以上。

结合图2和图3的结果可以发现:东部季风区小冰期时期整体呈现冷干的气候特征。东部季风区近1000a温度序列已经表明:小冰期内部存在的1410—1499年、1560—1709年及1770—1919年3个冷期以及1500—1559年和1710—1769年2个相对偏暖的时期。另外,从图3中石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据的变化特征似乎可以发现:在小冰期时段内,中国东部季风区的温湿配置为冷干/暖湿。



a. 中国中部的甘肃陇南万象洞 $\delta^{18}\text{O}$ 序列^[18]; b. 中国西南部贵州荔波董哥洞 $\delta^{18}\text{O}$ 序列^[19];
 c. 中国南部地区的湖北清江和尚洞 $\delta^{18}\text{O}$ 序列^[18]; d. 中国西北地区陕西宁强大禹洞 $\delta^{18}\text{O}$ 序列^[20].

图3 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 温度代用指标序列 (蓝色曲线) 与 5 点滑动平均曲线 (粗黑色曲线)

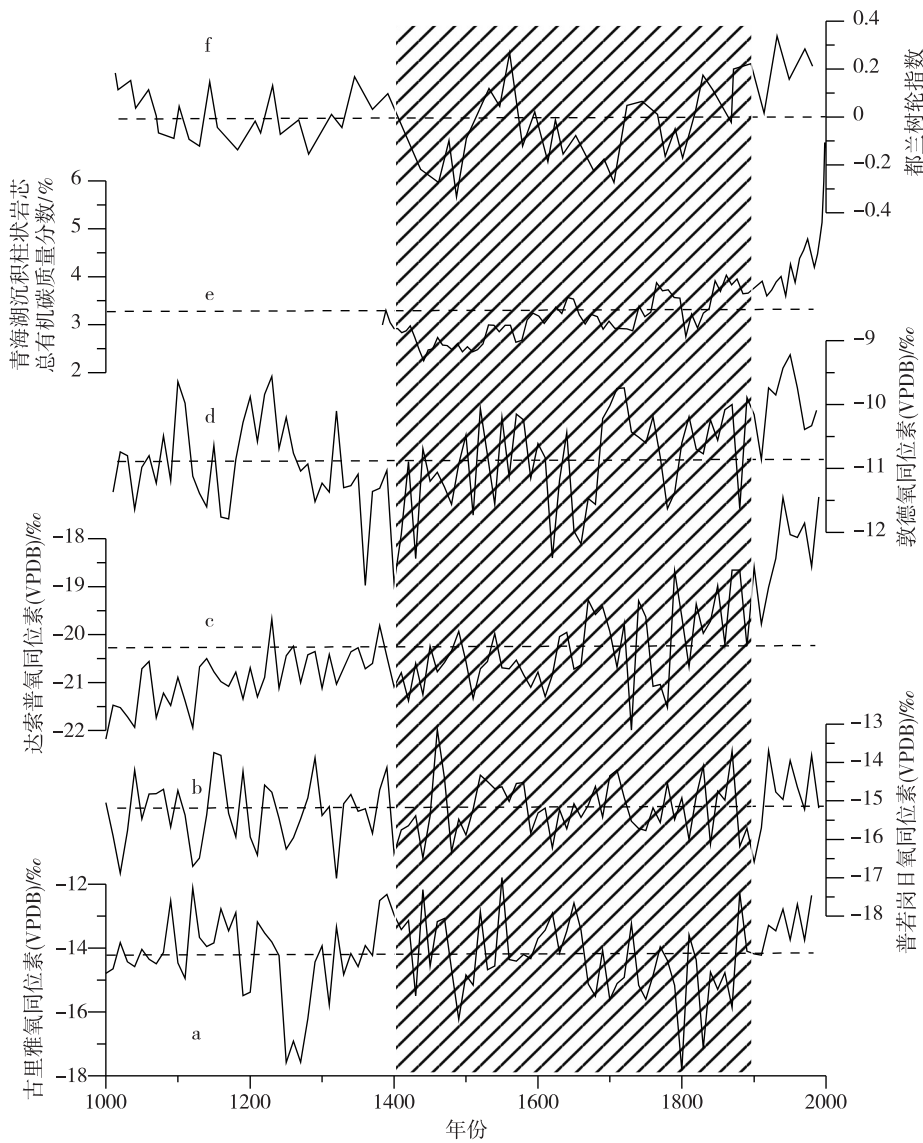
Fig. 3 Temperature proxies sequences of stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ and five-point moving average curve during Little Ice Age

2.2 中国西部地区小冰期时段温湿变化特征

本区的小冰期气候记录来自冰芯、树轮和湖泊沉积等古气候载体. 文献[21-22]研究表明:在水汽源地没有明显变换的背景下,青藏高原冰芯的稳定同位素记录是区域地表气温变化的良好代用指标. 在青藏高原北部,这种关系更为明显,因其主要反映降水时的同位素分馏温度;在青藏高原南部,这种关系主要反映海洋过程,即可以反映较长时间尺度温度的变化过程. 因此西部地区的温度代用指标主要取自青藏高原4个不同区域的冰芯记录. 此外,树轮

指数^[23]与湖泊沉积物^[24-26]也为中国西部地区小冰期气候特征研究提供了有效证据.

如图4阴影部分所示,在年代际—百年尺度上1400—1909年的低温期在各个代用指标记录中均存在. 古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 在1100—1229年以及1320—1459年期间主要呈现正向漂移,指示气候温暖,可以对应中世纪暖期,1230—1319年是一个强降温期,体现暖期中的冷波动. 在1450年以后, $\delta^{18}\text{O}$ 开始偏负,温度下降,进入小冰期. 小冰期的起讫时间分别为1450年和1880年,小冰期期间仍包含数次冷暖



a. 古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ [21]; b. 普若岗日 $\delta^{18}\text{O}$ [27]; c. 达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ [22]; d. 敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ [28];
e. 青海湖沉积柱状岩芯总有机碳质量分数 [27]; f. 都兰树轮指数 [25]

图4 中国西部地区温度代用指标序列

Fig. 4 Temperature proxies sequences in western China

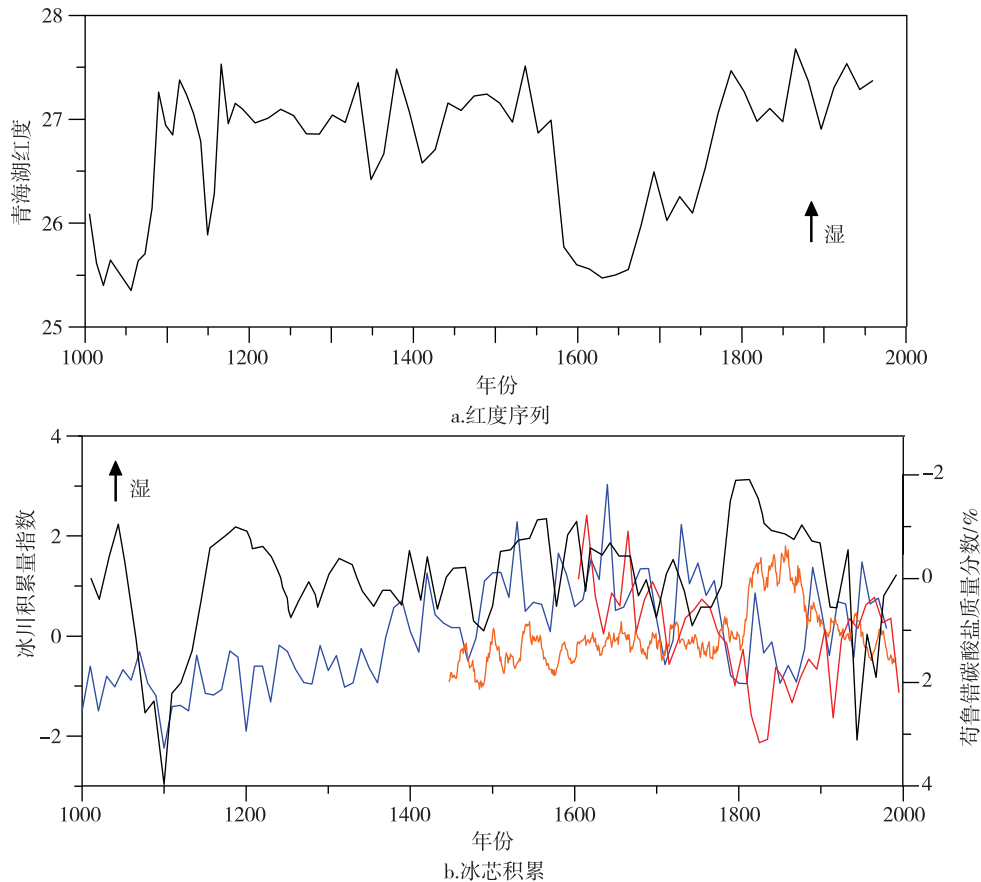
波动,其中3个明显的冷期分别在1450—1539年、1670—1749年以及1790—1889年。普若岗日冰芯指示近1000 a时段虽然冷暖波动相当频繁,但是升温 and 降温的幅度相近,类似中世纪暖期和小冰期的长时间尺度冷暖事件并不明显。11世纪初,达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负,气候寒冷,随后 $\delta^{18}\text{O}$ 在波动中逐渐偏正,指示温度不断上升。1420年以后出现3次明显的降温期,分别在15世纪、17世纪初以及18—19世纪,对应于小冰期的3个冷期。敦德冰芯序列表明,虽然12世纪初发生了一次强降温事件,但是1000—1279年期间 $\delta^{18}\text{O}$ 总体偏正,指示气候温暖,可以与

中世纪暖期对应。13世纪末期 $\delta^{18}\text{O}$ 在波动中不断偏负,指示温度下降。1330年左右进入小冰期的第1个冷期,随后的2个低温期分别在17世纪中期和18世纪末期。青海湖沉积柱状岩芯总有机碳质量分数的高值对应暖期,低值对应冷期。在近600 a中共发生3次明显的低值期,分别在1430—1539年、1660—1769年以及1790—1859年。都兰树轮指数在1420年明显偏负,指示进入小冰期,1420—1529年、1650—1709年以及1790—1839年3个指数偏负时期分别与小冰期的3个寒冷期相对应。这2个记录均与古里雅冰芯记录有较好的相似性。

本文选用湖泊沉积物红度序列和冰芯积累量来反演中国西部小冰期降水情况. 青海湖湖泊沉积物红度(redness)可以指示湖区降水状况. 湖积物红度主要由沉积物中的氧化铁质量分数所决定. 氧化铁源于湖区红色地层或黄土沉积, 由于流水冲刷进入湖中, 因此, 降雨量与湖积物红度正相关^[24]. 而冰芯积累量已经被证实是过去当地降水最直接、最可靠的指标. 由图 5a 可知, 12 世纪中期至 15 世纪初期, 青海湖区域红度保持在低值期, 表现为干旱的气候环境, 16 世纪晚期至 20 世纪中期, 湖区处于相对湿润的阶段. 期间包含 4 个次级干旱期, 分别在 1410—1519 年、1610—1669 年、1790—1829 年以及 1880 年以后, 与青海湖碳酸盐指示的最近 3 次次级干旱期为 1570—1629 年、1680—1779 年和 1870—2009 年有所差异. 青藏高原苟鲁错湖泊沉积(碳酸盐质量分数)记录与古里雅冰川积累量在小冰期前的变化具有相似性, 都记录了 1200 年左右的干旱期, 从 18 世

纪初两者的变化呈负相关, 直到 20 世纪. 图 5b 中蓝色曲线为古里雅冰川积累量, 可以分析该区域降水特征如下: 1000—1509 年从整体上看处于一段干旱时期, 其中 1200 年积累量低至 15.13 cm, 1500 年以来, 积累量持续较高, 在 1530 年、1640 年以及 1730 年左右达到峰值, 分别为 41.94、46.7 以及 41.59 cm. 1810 年开始积累量处于较低水平, 1850 年左右仅为 21.28 cm. 红色曲线的近 400 a 普若岗日冰川积累量, 与古里雅冰川积累量变化趋势相一致, 指示 1790—1929 年是一段降水减少的干旱期. 达索普冰川积累量在 1400—1789 年期间与古里雅积累量呈正相关关系, 19 世纪发生由低积累量期到高积累量期的突变, 1780 年后积累量保持在高值, 指示湿润的气候环境特征, 直到 1890 年.

将西部地区温湿变化对比后发现, 在古里雅冰芯记录中, 小冰期主要呈现冷湿的气候特征. 小冰期时期的几个干燥时段为 1430—1499 年、1540—1619



注: 1) 古里雅冰川积累量^[21](蓝色曲线); 2) 达索普冰川逐年积累量的 11 点滑动平均序列^[22](橘色曲线); 3) 普若岗日冰川积累量^[27](红色曲线); 4) 苟鲁错湖碳酸盐^[26](黑色曲线).

图 5 中国西部降水代用指标序列

Fig. 5 Precipitation proxies sequences in western China

年、1690—1729年以及1780—1889年,虽然在相位上有所差距,但是总体上与古里雅冰芯记录的小冰期冷期时段相对应,气候变化的模式呈冷干/暖湿组合。近400 a 达索普冰芯指示气候呈低温高降水、高温低降水的特征,表明温湿配置为冷湿/暖干。青海湖湖泊沉积物记录也指示小冰期气候组合类型为冷湿和暖干交替,总体变化趋势朝着暖干化发展,青藏高原苟鲁错湖泊沉积(碳酸盐质量分数)记录指示,小冰期期间气候变化的模式呈冷湿/暖干组合,这种气候模式与青海湖记录相一致,但与古里雅冰芯记录相异。

3 近1 000 a 中国东西部地区气候特征差异分析

根据以上研究可以发现,小冰期时期中国区域气候特征差异主要表现在小冰期的起讫时间、持续时间以及温湿配置上。表1根据已发表的文献资料总结出小冰期的3个寒冷阶段基于历史文献重建的气候序列以及选取的代用指标序列中的起讫时间。

根据表1可以看出:就整个中国地区而言,如果以第1个冷期作为小冰期开始的话,小冰期的起始时间主要呈现由西向东推移的趋势。青藏高原地区发生得较早,华北地区次之而东南部地区发生得最晚。究其原因,可能与不同区域对气候变化的响应快慢有关。青藏高原是世界平均海拔最高的高原,是气候变化的敏感区,拥有对气候变化反映敏感的冰冻

圈环境,使得其在不同时段的气候变化同其他区域相比具有幅度大、频率高和变化提前的特点;也有可能因为西部地区处于大陆内部,其下垫面热属性不同,温度变率较大,从而使西部地区的变冷比东部近海地区偏早。根据不同区域代用指标记录,小冰期的结束时间也是在青藏高原地区最早发生的,东部地区相对较晚。就某个特定区域而言,小冰期的起讫时间也不尽相同,同位于青藏高原的冰芯与树轮记录,树轮与湖泊沉积物记录甚至冰芯与冰芯记录之间指示的小冰期的起讫时间也有一定的差异,这可能与不同代用指标对同一驱动机制的响应不同,对气候敏感度不同以及代用指标分辨率和分析精度的差异有关。综合资料研究得到的差异可能是由资料的选取以及距平标准的选择所引起的。一般而言,1400—1920年可以涵盖中国小冰期,在海拔和纬度较高的地区,小冰期开始和结束的时间比较早,在海拔和纬度低的地区则相对较晚。

小冰期时期温湿配置在不同区域的差别也很大,将小冰期作为一个整体,降水或者相对湿度跟小冰期之前比较,西部地区是显著增加的,而东部地区是明显的干旱阶段。这说明了西部地区小冰期是以冷湿为环境特征,而东部地区的气候特征是冷干。分辨率较高的代用资料研究表明,小冰期内部存在着次级的干湿波动。西部地区湖泊沉积记录和达索普冰芯记录均表示小冰期内的干湿配置是冷湿/暖干交替,而古里雅冰芯指示的是冷干/暖湿模式。

表1 冰芯、树轮及历史记载等古气候载体中的代用指标记录的小冰期3次寒冷阶段起讫时间

Table 1 Start and end time of the three cold stages of the Little Ice Age from ice cores, tree rings, stalagmites and other climate proxies

代用指标	寒冷阶段1	寒冷阶段2	寒冷阶段3	起讫时间	持续时间/a
达索普冰芯($\delta^{18}\text{O}$)	1390—1450年	1560—1620年	1760—1890年	1390—1890年	600
古里雅冰芯($\delta^{18}\text{O}$)	1450—1530年	1670—1740年	1790—1880年	1450—1880年	430
敦德冰芯($\delta^{18}\text{O}$)	1340—1430年	1600—1690年	1770—1810年	1340—1810年	570
普若岗日冰芯($\delta^{18}\text{O}$)	1400—1510年	1580—1670年	1740—1840年	1400—1840年	440
青海湖(TOC等)	1430—1530年	1650—1750年	1790—1830年	1430—1830年	400
都兰树轮指数	1420—1520年	1590—1720年	1770—1870年	1420—1870年	450
东部地区冬半年温度	1420—1490年	1650—1700年	1790—1910年	1420—1910年	490
历史记载(寒冬年数) ^[29]	1470—1520年	1620—1720年	1840—1890年	1470—1890年	420
历史记载(寒冬年数) ^[30]	1500—1550年	1610—1720年	1830—1900年	1500—1900年	400
历史记载(长江中下游地区寒冬记录) ^[31]	1470—1520年	1620—1700年	1820—1890年	1470—1890年	420
历史记载(山东地区冷暖事件记录) ^[9]	1550—1579年	1620—1679年	1810—1919年	1550—1919年	369
历史记载(华东地区冷暖事件记录) ^[32]	1450—1470年	1560—1600年	1790—1810年	1450—1810年	360

4 结论

综合分析近 1 000 a 中国东、西部历史文献、石笋以及冰芯等代用指标指示的温度、降水序列后发现:小冰期在中国东、西部普遍存在,起讫时间呈现先从青藏高原地区开始或结束,然后是中国北部地区,最后是中国东部地区这种由西向东推移的趋势.纵观整个小冰期时期,西部地区主要呈现湿润的气候环境,而东部地区却是以干燥为主要特征.从高分辨率的记录中也可以看出,小冰期还存在次级的冷暖干湿波动,青藏高原北部地区的冰川记录指示小冰期期间呈现冷湿/暖干的配置,而青藏高原西部古里雅冰芯指示气候特征是冷干/暖湿配置,这些差异可能与区域对气候机制的响应程度不同以及代用指标研究方法差异引起的.此外,虽然目前有不少可以指示小冰期气候变化的代用资料研究成果,但分布到中国这片广袤的土地上仍显稀疏,因此更多高分辨率、高可靠性的代用资料亟待被发现,而且,随着逐年分辨率的长气候序列不断建立,对新建立的记录进行集成分析和讨论,也是加深对过去气候变化认识,正确了解区域气候特征差异的有效办法.

参考文献

References

- [1] Matthes F E. Report of committee on glaciers[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1939, 20 (4) : 518-523
- [2] 王绍武. 小冰期气候的研究[J]. 第四纪研究, 1995, 15 (3) : 202-212
WANG Shaowu. Studies on climate of the Little Ice Age [J]. Quaternary Sciences, 1995, 15(3) : 202-212
- [3] Calkin P E, Wiles G C, Barclay D J. Holocene coaxial glaciations of Alaska [J]. Quaternary Science Reviews, 2001, 20(1/2/3) : 449-461
- [4] Bodri L, Čermák V. Climate change of the last millennium inferred from borehole temperatures: Regional patterns of climatic in the Czech Republic. Part III [J]. Glob and Planet Change, 1999, 21(4) : 225-235
- [5] 陈家其. 小冰期气候国际会议[J]. 地球科学进展, 1992, 7(3) : 103-104
CHEN Jiaqi. The international conference about Little Ice Age [J]. Advances in Earth Sciences, 1992, 7 (3) : 103-104
- [6] 张德二. 中国的小冰期气候及其与全球变化的关系 [J]. 第四纪研究, 1991, 11(2) : 104-112
ZHANG Deer. The Little Ice Age in China and it's correlations with global change [J]. Quaternary Sciences, 1991, 11(2) : 104-112
- [7] Yang B, Braeuning A, Johnson K R. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29 (9) : 381-384
- [8] 王绍武,叶瑾琳,龚道溢. 中国小冰期的气候[J]. 第四纪研究, 1998, 18(1) : 54-64
WANG Shaowu, YE Jinlin, GONG Daoyi. Climate in China during the Little Ice Age [J]. Quaternary Sciences, 1998, 18(1) : 54-64
- [9] 郑景云,郑斯中. 山东历史时期冷暖旱涝状况分析 [J]. 地理学报, 1993, 48(4) : 348-357
ZHENG Jingyun, ZHENG Sizhong. An analysis on cold/warm and dry/wet in Shandong province during historical times [J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 48 (4) : 348-357
- [10] 王绍武,王日昇. 1470 年以来我国华东四季与年平均气温变化的研究[J]. 气象学报, 1990, 48(1) : 26-35
WANG Shaowu, WANG Risheng. Variations of seasonal and annual temperatures during 1470—1979AD in eastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1990, 48(1) : 26-35
- [11] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 考古学报, 1972(1) : 15-38
ZHU Kezhen. A preliminary study of climate change over the last 5 000 years in China [J]. The Chinese Journal of Archaeology, 1972(1) : 15-38
- [12] 初子莹,任国玉,邵雪梅,等. 我国过去千年地表温度序列的初步重建[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4) : 826-836
CHU Ziyang, REN Guoyu, SHAO Xuemei, et al. A preliminary reconstruction of mean surface air temperature over the last 1 000 years in China [J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(4) : 826-836
- [13] 葛全胜,方修琦,郑景云. 中国过去 3 千年冷暖千年周期变化的自然证据及其集成分析[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1) : 96-103
GE Quansheng, FANG Xiuqi, ZHENG Jingyun. Warm-cold change in millenarian cycle derived from natural proxy data in China during the past 3 000 years [J]. Advances in Earth Sciences, 2002, 17(1) : 96-103
- [14] 姚檀栋,秦大河,徐柏青,等. 冰芯记录的过去 1 000 年青藏高原温度变化[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2 (3) : 99-103
YAO Tandong, QIN Dahe, XU Baiqing, et al. Temperature change over the past millennium recorded in ice cores from the Tibetan plateau [J]. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(3) : 99-103
- [15] 葛全胜,郑景云,方修琦,等. 过去 2 000 年中国东部冬半年温度变化[J]. 第四纪研究, 2002, 22 (2) : 166-173
GE Quansheng, ZHENG Jingyun, FANG Xiuqi, et al. Temperature changes of winter-half-year in Eastern China during the past 2 000 years [J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(2) : 166-173
- [16] Li J B, Chen F H, Cook E R, et al. Drought reconstruction for North Central China from tree rings: The value of the Palmer drought severity index [J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(7) : 903-909
- [17] Tan M, Liu T S, Hou J Z, et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2 650-year stalagmite re-

- cord of warm season temperature [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12): 1617-1620
- [18] Hu C Y, Henderson G M, Huang J H, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266(3/4): 221-232
- [19] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and north Atlantic [J]. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857
- [20] Tan L C, Cai Y J, Cheng H, et al. Summer monsoon precipitation variations in central China over the past 750 years derived from a high-resolution absolute-dated stalagmite [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 280(3/4): 432-439
- [21] Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core [J]. *Science*, 1997, 276(5320): 1821-1825
- [22] Thompson L G, Yao T, Mosley-Thompson E, et al. A high-resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan ice cores [J]. *Science*, 2000, 289(5486): 1916-1919
- [23] 姚檀栋, 杨梅学, 康兴成. 从古里雅冰芯与祁连山树轮记录看过去 2 000 年气候变化 [J]. *第四纪研究*, 2001, 21(6): 514-519
YAO Tandong, YANG Meixue, KANG Xingcheng. Comparative study of the climate changes in the past 2 000 years by using ice core and tree ring records [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(6): 514-519
- [24] Ji J F, Shen J, Balsam W, et al. Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai lake sediments [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1/2): 61-70
- [25] 沈吉, 张恩楼, 夏威岚. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录 [J]. *第四纪研究*, 2001, 21(6): 508-513
SHEN Ji, ZHANG Enlou, XIA Weilan. Records from lake sediments of the Qinghai lake to mirror climatic and environmental changes of the past about 1 000 years [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(6): 508-513
- [26] 李世杰, 王小天, 夏威岚, 等. 青藏高原苟鲁错湖泊沉积记录的小冰期气候变化 [J]. *第四纪研究*, 2004, 24(5): 579-584
LI Shijie, WANG Xiaotian, XIA Weilan, et al. The little ice age climate fluctuations derived from lake sediments of Goulucuo, Qinghai-Xizang plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 579-584
- [27] Thompson L G, Yao T D, Davis M E, et al. Holocene climate variability archived in the Puruogangri ice cap on the central Tibetan plateau [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 61-69
- [28] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. Holocene-Late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Science*, 1989, 246(4929): 474-477
- [29] 张家诚. 气候变迁及其原因 [M]. 北京: 科学出版社, 1976
ZHANG Jiacheng. *Climate change and its causes* [M]. Beijing: Science Press, 1976
- [30] 张丕远, 龚高法. 十六世纪以来中国气候变化的若干特征 [J]. *地理学报*, 1979, 34(3): 239-247
ZHANG Piyan, GONG Gaofa. Some characteristics of climatic fluctuations in China since 16th century [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1979, 34(3): 239-247
- [31] 张德二, 朱淑兰. 近五百年来我国南部冬季温度状况的初步分析 [C]//全国气候变化学术讨论论文集 (1978). 北京: 科学出版社, 1981
ZHANG Deer, ZHU Shulan. A preliminary analysis of winter temperature conditions over the past 500 years in southern China [C]. *Proceedings of the National Conference on Climate Change (1978)*. Beijing: Science Press, 1981
- [32] 张丕远. 中国历史气候变化 [M]. 青岛: 山东科学技术出版社, 1996
ZHANG Piyan. *Chinese historical climate change* [M]. Qingdao: Shandong Science & Technology Press, 1996

Regional climate characteristics in China during the Little Ice Age

ZHANG Xian¹ SHAO Xiaohua¹ WANG Tao¹

¹ School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract A review on the previous literature of Little Ice Age is made, and the temperature and precipitation data from National Oceanic and Atmospheric Administration are compared and analyzed to discuss the regional climate characteristics in China during the Little Ice Age. Results show that Little Ice Age were found in all parts of China in the proxy record, with regional difference in start/end time, duration period, and temperature/humidity condition. The Little Ice Age in China is characterized by a moving trend from west to east in start time, or alternatively, from Qinghai-Xizang plateau to North China and then to east China. As for the climatic condition, the eastern monsoon region is generally cold and dry, while the western monsoon region is cold and humid during the Little Ice Age.

Key words Little Ice Age; proxy record; temperature and humidity configuration