

中国全新世气温序列的集成重建

方修琦¹, 侯光良²

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 青海师范大学生命与地理科学学院, 青海 西宁 810008)

摘要: 从文献中搜集整理 1 397 条古气温记录, 建立全新世古气温记录数据集, 该数据集多数时间段每百年的记录在 10 个以上。利用经剔除奇异值后的 1 140 条有效记录, 采用单样本区域订正-多样本平均集成法, 定量重建中国全新世百年分辨率气温集成序列。集成重建序列表明: 全新世中国气温可以明显划分为三个阶段, 早全新世(11.5~8.9 ka B. P.) 为波动升温期; 中全新世(8.9~4.0 ka B. P.) 暖期的气温高出现代 1℃ 上下 8~6.4 ka B. P. 的暖期鼎盛期高出现代 1.5℃ 左右; 晚全新世(4.0 ka B. P. 以来) 为变冷期。

关 键 词: 全新世; 气候变化; 集成重建; 中国

中图分类号: P467 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2011)04-0385-09

过去全球变化(PAGES)作为认识地球系统和全球变化的一个独特视角,为增进人类对地球系统和目前全球变化的理解做出了重要的贡献^[1,2],并且成为新一轮 IGBP 研究中少数完整保留的核心项目之一^[3,4]。了解过去全球变化,能为评估全球变化的当今变化趋势、未来变化的可能性与人类活动的可能结果提供依据^[5]。其中,全新世气候变化,如千年尺度周期、暖期的温暖程度、冷暖气候事件等,均是全面理解目前日益突出的全球变暖、评估未来全球气候变化所必需的古气候背景^[6]。

自 PAGES 计划执行以来,全新世气候变化重建研究在两个方面取得了长足的进展。一是基于高分辨率代用资料的气候序列重建^[7~14]。这些高分辨率序列大大提高了对全新世气候变化过程的辨识能力,但它们所存在的突出问题是大多难以量化,只能反映气候的相对波动。二是区域气候变化集成序列的重建^[15~19],这些研究多采用年分辨率的树轮等资料,利用一定的数学统计方法,集成重建全球或半球近两千年的气温序列。但受代用资料的局限,将过去 2 000 a 集成重建的方法推广到全新世有相当的难度,迄今为止尚未有全球或北半球的温度变化集成曲线。在中国,迄今为止覆盖全国的全新世温度变化曲线是王绍武等采用类似于过去 2 000 a 集成气候重建方法所建立的中国全新世温度变化曲线^[20],他们将全国划分为 10 个

区,选取 10 个有代表性的孢粉序列,采用面积加权的办法得到中国全新世的气温序列。

全新世高分辨率气候序列定量集成重建所面临的突出困境是,高分辨率序列大多难于量化,而已有许多气温定量重建结果是不连续的或序列不能达到连续的高分辨率的要求。本文尝试从集成的思想出发,提出一种单样本区域订正-多样本平均集成重建气温序列的集成方法,旨在利用较低分辨率、甚至离散的单点定量重建结果建立具有较高分辨率、且又能保证连续性的全国定量气温序列。

1 资料与方法

1.1 基本思路

中国全新世环境演变研究在过去 20 多 a 中迅速发展,所使用的代用资料类型多种多样,在地域上覆盖了中国绝大部分地区,发表的研究论文数以千计。虽然它们难以同时满足高分辨率与定量的要求,但在具体时间点(段)内能够同时较准确地确定年代并有气温定量重建的结果却大量存在。本文在广泛查阅近 20 a 来主要学术刊物上公开发表的上千篇有关中国全新世环境变化文献的基础上,以前人正式发表的学术论文为数据源,以百年为时间单元,逐世纪采集全新世古气温重建记录,建立全新世古气温记录数据集;根据中国全新世气温数据集的特点,构建了单样本区域订正-多样本

收稿日期:2010-06-25; 修订日期:2010-08-11

基金项目:国家自然科学基金项目(40771211)资助。

作者简介:方修琦(1962-),男,吉林省前郭县人,教授,博士生导师,主要从事气候变化及其影响与适应研究。E-mail: xfang@bnu.edu.cn

平均集成的集成重建的方法,定量重建中国全新世百年分辨率的气温序列。旨在解决定量重建结果时间分辨率低或不连续的缺陷,同时克服高分辨率序列不能定量的不足。此方法基本思路和假设前提是:

1) 地理环境的空间协同性特点在中国首先表现为中国境内的气温变化过程有较强的一致性,竺可桢先生正是从这一前提出发,通过变更不同时期历史记录的空间位置实现气温变化序列的连续,从而重建了中国过去 5 000 a 气温变化^[21];在此大前提下,中国的气温变化过程受大气环流和大地形的共同作用而呈现进一步的区域分异^[22],使得不同区域与全国平均气温变化相关的显著程度及对全国平均气温的贡献率有所不同。从地理环境的空间协同性出发,每次气温变化在全国各地都会有不同程度的表现,理论上均应同时在全国各地留下相应的记录。反过来看,在任何一个地点获得的气温变化记录均可指示全国性的气温变化,在代用资料不能满足采用区域面积加权的办法得到中国全新世气温序列的情况下,可以根据区域内不同地点的气温变化对整个区域气温变化的贡献率,通过将不同地点的定量气温重建结果订正为全国的平均气温变化,从而得到全国的平均气温序列。

2) 本文所采用数据为前人已发表论文中的全新世气温变化定量重建结果,假设前人发表论文不存在方法上的错误,这些数据虽不满足连续的、高分辨率的条件,但其所代表的温度变化是客观的,每一个数据能够代表其所在时间点(段)的气温状况。相对于真实的全新世气温变化而言,从中以百年为时间单元所提取的每个重建结果可视为对实际气温变化的一个随机取样。

3) 由于证据和方法等局限,重建结果相对于实际变化之间可能存在一定的差异,甚至有个别重建结果存在计算的错误,这种相对于实际变化的误差是随机的,通过多样本统计的方法可以消除多样本重建的误差、以及剔除错误的重建结果。

1.2 全新世古气温记录的提取与古气温数据集的建立

1) 全新世古气温记录的来源。本文所采集的中国全新世古气温数据来自于国内外已经公开发表于期刊、专著和会议论文集等的各类文献,以 1980 年代初至 2008 年发表在各类期刊上的文献为主。所选择的古气温数据具备以下两个条件:

(1) 定量的气温重建数据:重建气温数据以年

均温值或年均温距平(年均温与 1951 ~ 1980 年均温之差)等形式表达,按照数据来源的性质分为序列气温数据和散点气温数据,序列气温数据是指从重建的古气温序列中数字化得来的气温数据,散点气温是指从文献中查阅并引用的全新世某个时间点(段)的气温数值。

(2) 可确定具体年代的数据:以¹⁴C 年或日历年时间体系定量表达,包括有测年数据控制、根据地层沉积速率推算的年代数据,在时间上可分辨到百年。

2) 序列中古气温记录数据的提取。从文献中筛选了 45 条气温序列^[23~62],范围基本覆盖全国,主要集中在东部区(图 1),序列长度多数为 10 000 a 之内,涵盖了整个全新世,个别序列长度超过了 10 000 a;也有个别序列长度不足 5 000 a,它们均为定量的气温重建结果。这些序列中有 35 条的时间体系为¹⁴C 年代,10 条为日历年,序列的定年均均有测年数据控制,序列中每个气温值对应的年代多是根据剖面年代-深度关系计算得到,其时间精度受剖面中的取样分辨率和测年数据的多少影响,一般而言,早期工作取样的间距较大,年代数据较少,一般为 3~4 个,时间误差可能相对大些;愈是接近现代,取样间距较密,年代数据增多,多者可以达到 10 个,时间精度更高。上述序列所使用的代用资料和定量重建方法各有不同,代用资料包括孢粉、植物硅酸体、冰缘现象和地球化学、氧同位素,及古土壤等环境感应体,定量重建的方法主要为转换函数,还包括气候响应面、现代类比法与集成方法等。根据过去 2 000 a 中国东部温度变化过程,百年时间尺度上的冷暖阶段一般持续 200 ~ 300 a 左右^[53],上述环境感应体所记录的环境气温的分辨率基本上都在 100 a 左右^[63],能够记录并分辨上述气候阶段,可满足建立百年分辨率的气温变化序列需要。

对序列气温数据的提取方法和步骤如下:

(1) 对气温序列进行数字化:读取序列的气温数值及其对应的年代。其中,早期文献的气温序列,一般分辨率较低,为保证数据的有效性,优先选用拐点处的数据;对个别气温序列中分辨率达不到 100 a 的时段,选取时段的中点,读取其对应的气温数值。

(2) 将¹⁴C 年代时间坐标系的年代利用 CAL-IB4.4 程序转换为日历年:如无特殊说明,本文所

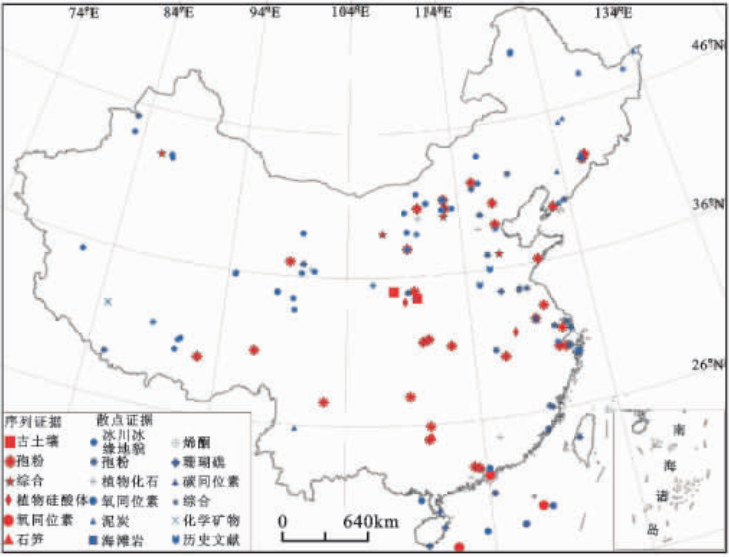


图1 中国全新世气温变化证据的类型及区域分布

Fig. 1 Types and location of proxy data indicating Holocene temperature change in China

有年代数据均为日历年。

经过上述步骤,从45条序列中共提取1271条全新世定量气温记录(表1)。其中孢粉记录占72.2%,综合证据占8.7%,氧同位素占8.2%,石笋占4.6%,植物硅酸体占3.6%,历史文献占到2.1%,古土壤占0.6%。

表1 中国全新世各类代用资料古气温记录的数量

Table 1 Record numbers of proxy data during Holocene in China

序列		散点	
证据类型	古气温记录数	证据类型	古气温记录数
孢粉	916	孢粉	40
氧同位素	104	氧同位素	17
历史文献	27	考古	2
植物硅酸体	46	植物化石	10
古土壤	8	冰川冰缘地貌	40
石笋	59	珊瑚礁	4
综合(利用孢粉、冰缘现象、古土壤和地球化学等证据推断出的气温)	111	海滩岩	2
合计	1271	泥炭	5
		烯酮	2
		化学矿物	1
		合计	126

3) 散点气温记录数据的提取。除使用了序列气温外,还搜集了126个散点气温(记录表与参考文献略),这些散点气温都有确切的年代和定量的气温重建数值,绝大部分散点气温数据是从文献中直接引用的,少数为作者根据证据的古气候意义推断而得,所使用的环境感应体主要包括孢粉、植物

化石、冰川冰缘地貌、氧同位素、石笋、植物硅酸体、珊瑚礁、泥炭、烯酮、海滩岩、化学矿物、考古、历史文献和综合证据。126个散点记录中包括58个冷事件气温记录和68个其他气温记录,其中后者气温记录的感应体主要来自于孢粉、植物化石和氧同位素,主要分布在中国东部地区(图1);冷事件气温记录主要来自冰川和冰缘地貌证据,主要分布在对寒冷事件响应较敏感的中国北方和西部地区,包括东北、内蒙古高原、青藏高原和新疆。

4) 全新世古气温记录原始数据集的建立。经过上述步骤,并将重复记录的剔除后,从序列和散点记录中共提取1397条全新世定量气温记录,其中1271条来自序列,126条来自散点(表1)。以日历年为时间坐标系,以公元1950年(1900~1999 A.D.)为起点,按100 a间隔对记录进行归并,将1900~1999 A.D.年记为0 a B.P.,1800~1899 A.D.为标记为100 a B.P.,依次类推,建立全新世古气温数据集。

在该数据集中,全新世期间每个百年里都有古气温记录,但分布并不均匀,其中最多的有23个,最少的只有3个,一半以上的百年中古气温记录达10个以上,按照统计学原理,样本数量愈多,重建结果误差可能愈小,反之愈大,从每个百年的记录数看,可以满足百年分辨率重建的要求。从古气温的原始记录分布情况来看,绝大部分气温数值集中在-2~4℃,最大变化范围在-10~10℃,上下相

差达 20℃ 左右。

1.3 单样本区域订正——多样本平均集成的气温集成重建方法

单样本区域订正——多样本平均集成的气温序列集成重建的方法,分为以下步骤:

1) 单点样本的区域订正。对每个地点的各古气温记录,根据其附近现代站点气温与全国气温的转换函数,统一订正为全国气温数据。其过程如下:

首先,采用区域面积加权平均的方法计算 1951~2005 年全国逐年平均气温序列。以全国 160 个站点的逐年年平均温度变化为指标,采用聚类分析方法^[21],将全国分为 8 个气温分区,分别为:东北区、华北北部区、中东部区、东南区、陕甘宁区、川黔桂区、滇藏高原区和新疆区;计算各分区 1951~2005 年均气温序列,利用各分区逐年序列采用面积加权法来计算全国逐年和 30 a 滑动气温序列。然后,选取距离古气温记录地点最近的气象站点 1951~2005 年年均气温序列,分析单点样本(站点)与全国年均温序列及其单点样本 30 a 滑动序列与全国 30 a 滑动序列的相关关系,对达到显著性检验水平的站点建立其与全国平均序列的回归方程。

结果表明(表略):全国绝大部分站点年均温和全国年均温变化相关性较好,且 30 a 滑动平均序列普遍较逐年均温序列相关性更高。绝大部分站点其 30 a 滑动平均序列和全国 30 a 滑动平均序列相关系数高达 0.95 以上,30 a 滑动序列建立的回归方程的方差解释量(R^2)大多都超过了 0.90,其残差标准差较逐年序列要小一个数量级。考虑到全新世古温度记录为百年时间分辨率,在重建中国全新世气温序列时,使用根据 30 a 滑动平均序列建立的统计方程。根据各站点气温与全国气温的转换函数,将每个站点各时间点上的古气温值统一订正为相应时间点上的全国气温值。经过订正后,古气温数值转换为与现代全国年均气温的距平值,相互之间可以直接进行对比。

2) 奇异值剔除。对经单点订正生成的全国(区域)气温序列,采用统计方法剔除其中的奇异点,以提高重建序列的准确性。奇异值的剔除主要采用散点图为主的综合判断法,即对每个时间段已订正为全国年均温距平的古气温数据制作散点图,剔除大于序列 2 倍标准差的气温数值。经过奇异值删除后,从 1 397 条原始记录中共删除 257 条气

温奇异值,保留下来 1 140 条有效记录;其中,每百年中古气温记录多数在 10 个左右,最多者为 21 个,最少者为 2 个;气温记录的温度范围由订正前的 -10~10℃,缩小为 -6~6℃,单个时间点上不同气温记录分布的平均变幅为 3℃ 上下。

3) 多样本加权平均。对每个时间点上多个订正后的古气温数据,按照一定的层次关系进行平均,得到初始气温变化序列。

原始的气温记录按重建方法的不同分为转换函数法和自然地理因子指示法两大类。转换函数法是利用统计关系将感应体指标转换为气温数值,感应体类型包括孢粉、植物硅酸体、氧同位素、烯酮、古土壤等。转换函数法包含有统计误差,在转换为气温值时可能有一定的方差损失;自然地理因子指示法是指根据自然地理因子对气温的指示意义直接推算,感应体类型包括冰川-冰缘地貌、海滩岩、植物化石、珊瑚礁、化学矿物、综合证据、泥炭、考古和历史文献等,自然地理因子指示法推算气温变化的方差损失较转换函数法要小。

利用转换函数法获得的气温数据占有有效记录的 84%,其中的 68% 为孢粉数据,为避免此类气温记录权重过大,在多样本平均时,采用分层次平均的方法进行计算。首先,在转换函数法和自然地理因子指示法两大类中,分别计算相同感应体所重建气温值的平均值,然后计算不同类型感应体所重建的气温平均值进行平均;最后再对两大类方法重建的气温平均值进行平均。这样可以兼顾不同感应体指示的环境意义和不同方法的重建结果,达到提高集成重建结果准确性的目的。

4) 初始序列平滑处理。鉴于定年数据存在一定的误差,为此对初始序列进行 3 点二项式加权(三点加权系数依次为 0.25,0.5,0.25)滑动平均,弱化时间误差对序列的影响,最终得到中国全新世气温序列(图 2)。图 2 同时采用包络线表达了重建结果的相对误差区间,同一时段内经过奇异值删除的有效值最大值与最小值分别作为包络线的最大值与最小值,故包络线范围大致上代表了误差的变化范围,波动范围愈大,则误差范围也愈大。

2 集成重建结果

2.1 重建结果

中国全新世气温序列集成重建结果表明(图 2),全新世期间中国气温距平(相对于 1951~

1980) 的波动幅度在 $-1.5 \sim 1.5^{\circ}\text{C}$ 之间, 从中可辨识出一系列百年际的冷暖事件。全新世期间气温变化阶段性特征十分明显, 全新世早期 (11.5 ~ 8.9 ka B. P.) 为气温波动升温期, 气温在波动中上升, 气温距平总体上低于现代, 其间分别在 11.0、10.5、9.8、9.2 和 8.9 ka B. P. 识别出寒冷事件。中期 (8.9 ~ 4.0 ka B. P.) 为全新世大暖期, 气温整

体高于现代, 其中鼎盛期出现在 8 ~ 6.4 a B. P., 气温最高的百年高出现代 1.5°C 左右; 全新世大暖期中也存在数次显著的百年尺度的寒冷事件, 主要发生在 8.2、6.2、4.9 和 4 ka B. P. 左右, 其中 4 ka B. P. 冷事件前后持续 400 a 左右, 最冷时低于现代约 1°C 。4 ka B. P. 以来为相对冷期, 气温距平接近 0°C , 略低于现代水平。

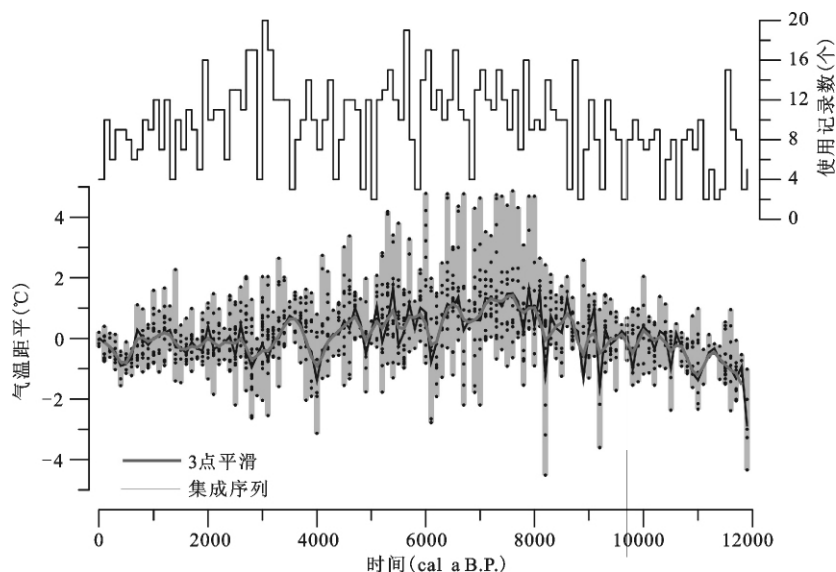


图2 中国全新世集成气温序列与重建使用记录数

Fig. 2 Synthetically reconstructed Holocene temperature change in China

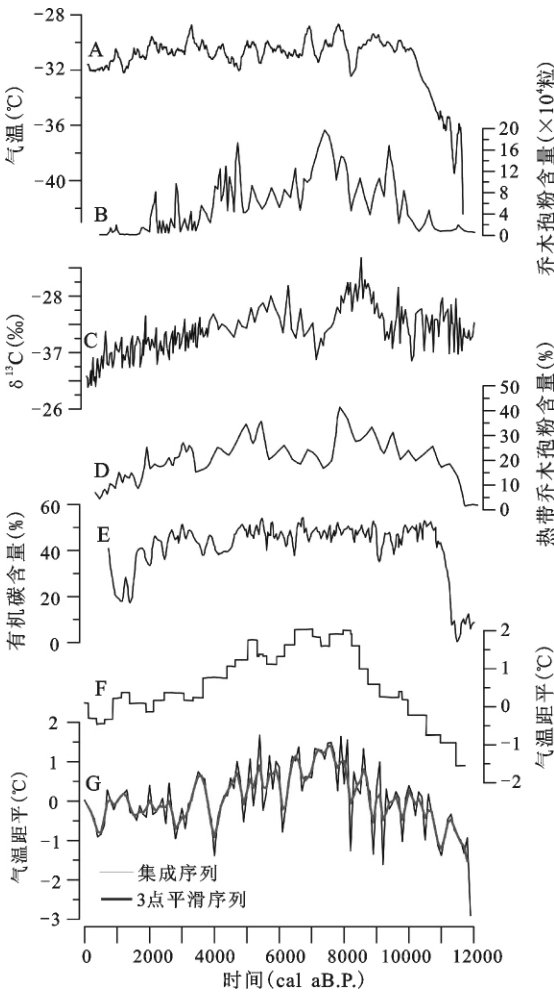
2.2 与其它重建结果的对比

本文集成重建气温序列与前人重建的中国冷暖序列有较好的可比性, 各序列均反映出全新世气候变化分为早中晚三个阶段, 早全新世逐渐升温, 气温总体较低; 中全新世较高, 进入晚全新世逐渐下降的趋势; 不仅总趋势基本一致, 许多冷暖事件也相互对应 (图3), 说明集成重建的中国全新世气温序列具有较好的重建效果。

本文的集成序列与王绍武先生根据 10 条孢粉序列得到的全国全新世气温序列的变化趋势大致相同^[20], 尤其是全新世大暖期、暖期鼎盛期发生的时间也大体一致 (图3)。相对于王先生时间分辨率为 500 a 孢粉集成的序列, 本文的时间分辨率更高, 因此百年尺度的气温波动也更明显。在变化幅度上, 王绍武先生的序列显示, 全新世期间的气温距平波动幅度在 $-1.5 \sim 2^{\circ}\text{C}$, 波动幅度较本文集成序列为大, 主要是暖期气温距平的较本序列高, 造成这种差异的主要原因可能在于两条序列使用代用资料和计算过程的不同, 王序列仅使用了孢粉序

列, 利用面积加权法; 本文集成序列采用多种类的代用资料, 利用单样本区域订正——多样本平均集成法计算得到, 计算过程中信息损失可能相对偏大。集成气温序列与前人重建的中国高分辨率环境序列也具有较好的可比性。各序列均反映出全新世气候变化分为早中晚三个阶段, 早全新世逐渐升温, 气温总体较低; 中全新世较高, 进入晚全新世逐渐下降的趋势。其中, 在集成气温序列与高分辨率环境序列大都可以识别出 9.2、8.2、6.2、4.0 和 0.4 ka B. P. (小冰期) 等降温事件, 同时集成气温序列指示的 8.0 ~ 6.4 ka B. P. 全新世暖期鼎盛期, 也正是高分辨率环境序列记录到的环境状况最佳期。

集成序列与格陵兰 GISP2 冰芯记录不仅在千年尺度上变化趋势基本一致, 在百年尺度上也表现出较好的一致性, 如 8.2、4.0 ka B. P. 冷事件和小冰期二者都相互对应; GISP2 暖期最盛期在 8 ~ 7 ka B. P. 之间, 集成温度序列在 8 ~ 6 ka B. P.; 二者都显示在 4 ~ 3 ka B. P. 发生了一次短暂的回暖; GISP2 与集成序列都显示, 小冰期是一次持续时间



A. GISP2 气温记录^[64]; B. 岱海孢粉^[65]; C. 神农架大九湖有机碳同位素^[66]; D. 广东湖光岩玛珥湖孢粉^[67]; E. 若尔盖高原泥炭^[11]; F. 王绍武气温序列^[20]; G. 本文序列

图 3 中国全新世集成气温序列与其它冷暖序列的对比

Fig. 3 Comparison between the synthetically reconstructed temperature series with former published series during Holocene in China

较长的一次冷事件,小冰期之前的 1 ka B. P. 前后有一次短暂的温暖期。两者之间良好的对应关系,进一步印证了中国的温度变化与北半球的气候变化表现出极为密切的关联,具有很好的半球尺度代表性^[68],同时也进一步说明集成重建的中国全新世气温序列具有较好的重建效果。

3 结 论

以国内外公开发表的各类文献为数据源,搜集整理有确切年代和气温数值的记录,整理收集了从 45 条气温序列数字化得到的 1 271 条定量气温记录和 126 条散点气温记录,利用 CALIB 程序将所

有气温记录统一为日历年时间坐标系;以公元 1950 年(1900 ~ 1999 A. D.) 为起点,以 100 a 间隔对记录进行归并,建立全新世古气温记录数据集。该数据集的古气温数据在每个百年时间段都有分布,多数时间段古气温记录在 10 个以上,能保证建立连续的中国全新世百年尺度气温序列的要求。

采用单样本区域订正——多样本平均集成法建立集成气温序列,即利用现代每个站点与全国年均温的统计关系,将单样本古气温记录订正到全国尺度;并对订正后的古气温记录进行奇异值剔除,对剔除了奇异值后的 1 140 条有效数据,按重建办法分为转换函数和因子指示法两类,采用分层次平均的方法计算平均气温值,得到中国全新世集成气温序列。

集成序列表明,全新世期间中国气温距平(相对于 1951 ~ 1980) 的波动幅度在 -1.5 ~ 1.5℃ 之间。全新世期间气温变化阶段性特征十分明显,全新世早期(11.5 ~ 8.9 ka B. P.) 为气温波动升温期,气温与现代接近。中期(8.9 ~ 4.0 ka B. P.) 为全新世大暖期,气温整体高于现代,鼎盛期出现在 8 ~ 6.4 a B. P., 气温最高的百年高出现代 1.5℃ 左右;暖期中存在一系列百年尺度的冷事件,主要有 8.2、6.2、4.9 和 4.0 ka B. P. 冷事件。4.0 ka B. P. 以来为相对较冷的晚全新世,气温略低于现代。集成序列与前人定量的气温序列、定性的高分辨率环境记录和 GISP2 气温序列气候变化的总趋势基本一致,许多冷暖事件也相互对应,具有较高的可比性。显示集成重建的中国全新世百年分辨率气温集成序列,是一条兼顾了较高的分辨率和定量化的连续序列。

参考文献:

[1] Bradley R S K Alverson ,T F Pedersen. Challenges of a changing earth: past perspectives ,future concerns [M]//Alerson K ,R S Bradley ,T F Pedersen (eds) . Paleoclimate ,Global change and the future. Berlin: Springer Verlag 2003: 163 - 167.

[2] Steffen W ,Sanderson A ,Tyson P D et al. Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure [M]. Berlin ,Heidelberg , New york: springer - Verlag 2004.

[3] PAGES. Research Structure about PAGES [R/OL]. [http://www. pages. unibe. ch/about/research/structure. html](http://www.pages.unibe.ch/about/research/structure.html).

[4] Brasseur G ,Moore III B. The new and evolving IGBP[J]. Global Change News letter 2002 50(4) : 1 - 3.

[5] PAGES. PAGES(2009) Science Plan and Implementation Strategy [R]. IGBP Report No. 57. IGBP Secretariat , 2009 ,Stock-

- holm. 1 – 67.
- [6] Jansen E ,Overpeck J ,Briffa K R ,et al. Palaeoclimate[M]//Solomon S ,Qin D ,Chen Z ,et al. (eds). Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press 2007: 461 – 464.
- [7] Grootes P M ,Stuiver M ,White J W C ,et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland icecores [J]. Nature ,1993 ,**366**: 552 – 554.
- [8] Fleitmann D ,Burns S J ,Mudelsee M ,et al. Holocene Forcing of the Indian Monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman. [J]. Science 2003 ,**300**: 1737 – 1739.
- [9] 姚檀栋 ,L G Thompson. 敦德冰芯记录与过去 5 ka 气温变化 [J]. 中国科学(B 辑) ,1992 ,**22**(10) : 1089 ~ 1093.
- [10] 洪业汤 ,姜洪波 ,洪 冰 等. 近 5 000 a 的气候波动与太阳变化 [J]. 中国科学(D 辑) ,1998 ,**28**(6) : 491 ~ 497.
- [11] 周卫建 ,卢雪峰 ,武振坤 等. 若尔盖高原全新世气候变化的泥炭记录与加速器放射性碳测年 [J]. 科学通报 ,2001 ,**46**(12) : 1040 ~ 1044.
- [12] 刘嘉麒 ,吕厚远 ,J Negendank 等. 湖光岩玛珥湖全新世气候波动的周期性 [J]. 科学通报 2000 ,**45**(11) : 1190 ~ 1195.
- [13] 于学峰 ,周卫建 ,Lars G. Franzen 等. 青藏高原东部全新世冬夏季风变化的高分辨率泥炭记录 [J]. 中国科学(D 辑) ,2006 ,**36**(2) : 182 ~ 187.
- [14] 邵晓华 ,汪永进 ,程 海 等. 全新世季风气候演化与干旱事件的湖北神农架石笋记录 [J]. 科学通报 ,2006 ,**51**(1) : 80 ~ 86.
- [15] 葛全胜 ,陈泮勤 ,张雪芹. 全球变化的集成研究 [J]. 地球科学进展 2000 ,**15**(4) : 461 ~ 466.
- [16] Jones P D ,Briffa K R ,Barnett T P ,et al. high – resolution paleoclimatic records for the last millennium; interpretation ,integration and comparison with general circulation model control-run temperatures [J]. The Holocene ,1998 ,**8**(4) : 455 – 471.
- [17] Overpeck J ,Hughen K ,Hardy D ,et al. arctic environmental change of the last four centuries [J]. Science ,1997 ,**278**: 1251 – 1256.
- [18] Anders Moberg ,Dmitry M Sonechkin ,Karin Holmgren ,et al. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low – and high – resolution proxy data [J]. Nature ,2005 ,**433**(10) : 613 – 617.
- [19] Michael E Mann ,Zhihua Zhang ,Malcolm K Hughes ,et al. Proxy – based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia [J]. PNAS 2008 ,**105**(36) : 13252 – 13257.
- [20] 王绍武 ,龚道溢. 全新世几个特征时期的中国气温 [J]. 自然科学进展 2000 ,**10**(4) : 325 ~ 332.
- [21] 竺可桢. 中国近 5000 年来气候变迁的初步研究 [J]. 中国科学 ,1973 ,**2**(2) : 168 ~ 189.
- [22] 方修琦 ,张学珍 ,戴玉娟 等. 1951 ~ 2005 年中国大陆冬季气温变化的区域差异 [J]. 地理科学 2010 ,**30**(4) : 571 ~ 576.
- [23] 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 [J]. 中国科学(B 辑) ,1992 ,**12**(12) : 1300 ~ 1308.
- [24] 蔡永立 ,陈中原 ,章 薇 等. 孢粉 – 气候对应分析重建上海西部地区 8.5 ka B. P. 以来的气候 [J]. 湖泊科学 2001 ,**13**(2) : 118 ~ 126.
- [25] 许青海 ,阳小兰 ,杨振京 等. 孢粉分析定量重建燕山地区 5 000 年来的气候变化 [J]. 地理科学 2004 ,**24**(3) : 339 ~ 345.
- [26] 李文漪. 中国第四纪植被与环境 [M]. 北京: 科学出版社 ,1998.
- [27] 李文漪. 试论河北东部更新世孢粉组合及其古地理意义 [C]//中国地理学会冰川冻土分会 ,中国科学院兰州冻土研究所. 中国第四纪冰川冰缘学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社 ,1985: 194 ~ 197.
- [28] 董国榜 ,张俊牌 ,严富华 等. 华北平原东部地区晚更新世以来的孢粉序列与气候分期 [J]. 地震地质 ,1991 ,**13**(3) : 259 ~ 268.
- [29] 唐领余 ,沈才明 ,赵希涛 等. 江苏建湖庆丰剖面 1 万年来的植被与气候 [J]. 中国科学(B 辑) ,1993 ,**23**(6) : 637 ~ 643.
- [30] 朱 诚 ,陈 星 ,马春梅 等. 神农架大九湖孢粉气候因子转换函数与古气候重建 [J]. 科学通报 ,2008 ,**58**(增 1) : 38 ~ 44.
- [31] 姚祖勋 ,李文漪. 广西猫儿山及桂林冰期后植被与环境变化 [C]// 李文漪. 中国北、中亚热带晚第四纪植被与环境研究. 北京: 海洋出版社 ,1993: 133 ~ 138.
- [32] Wang jian ,Liu houyuan ,Shen caiming. Factor interpretation method and quantitative analysis of climatic changes over the last 12 000 years in china [M]. Beijing: Global changes and environment evolution in china(edited by Lu chuang et al) ,1989: 63 – 68.
- [33] 沈才明 ,唐领余. 长白山、小兴安岭地区全新世气候 [C]//施雅风. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社 ,1992: 33 ~ 39.
- [34] 唐领余 ,沈才明 ,于 革 等. 长江中下游及其以南地区 10 000 年来气候变化序列探讨 [C]//施雅风. 中国历史气候变化. 济南: 山东科学技术出版社 ,1996: 108 ~ 158.
- [35] 宋长青 ,吕厚远 ,孙湘君. 中国北方花粉 – 气候因子转换函数建立及应用 [J]. 科学通报 ,1997 ,**42**(20) : 2182 ~ 2185.
- [36] 顾明光 ,陈忠大 ,卢成忠. 浙江湘湖地区全新世孢粉记录及其古气候意义 [J]. 中国地质 2006 ,**33**(5) : 1144 ~ 1148.
- [37] 吴乃琴 ,吕厚远 ,孙湘君 等. 植物硅酸体 – 气候因子转换函数及其在渭南晚冰期以来古环境研究中的应用 [J]. 第四纪研究 ,1994 ,**3**(3) : 270 ~ 279.
- [38] 张子斌 ,王 丁 ,丁嘉贤. 北京地区一万三千年来自然环境的演变 [J]. 地质科学 ,1981 ,**3**(3) : 259 ~ 268.
- [39] 中国科学院贵阳地球化学研究所第四纪孢粉组、¹⁴C 组. 辽宁省南部一万年来自然环境的演变 [J]. 中国科学 ,1977 ,**6**(6) : 604 ~ 614.
- [40] 乔玉楼 ,陈佩英 ,沈才明 等. 定量重建贵州梵净山一万一年来的植被与气候 [J]. 地球化学 ,1996 ,**26**(5) : 445 ~ 457.
- [41] 孙建中 ,柯曼红 ,孙秀蓉 等. 黄土高原全新世的古气候环境 [C]//孙建中 ,赵景波. 黄土高原第四纪. 北京: 科学出版社 ,

- 1991: 186 ~ 205.
- [42] 张兰生, 方修琦, 任国玉. 我国北方农牧交错区的环境演变[J]. 地质前缘, 1997, **4**(1~2): 127 ~ 134.
- [43] 杨志荣. 中国北方农牧交错带全新世环境演变综合研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1998: 88 ~ 108.
- [44] 王永吉, 李善为. 青岛胶州湾地区 20000 年以来的古植被与古气候[J]. 植物学报, 1983, **25**(4): 385 ~ 392.
- [45] 王绍武, 蔡静宁, 朱锦红, 等. 中国气候变化的研究[J]. 气候与环境研究, 2002, **7**(2): 137 ~ 145.
- [46] 徐国昌. 中国干旱半干旱区气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 1 ~ 101.
- [47] Wenying Jiang, Zhengtang Guo, Xiangjun Sun, et al. Reconstruction of climate and vegetation changes of Lake Bayanchagan (Inner Mongolia): Holocene variability of the East Asian monsoon[J]. Quaternary Research, 2006, **65**(6): 411 ~ 420.
- [48] 唐领余, 沈才明, 廖淦标, 等. 末次盛冰期以来西藏东南部的气候变化——西藏东南部的花粉记录[J]. 中国科学(D 辑), 2004, **34**(5): 436 ~ 442.
- [49] 许清海, 肖举乐, 中村俊夫, 等. 孢粉资料定量重建全新世以来岱海盆地的古气候[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, **23**(4): 99 ~ 108.
- [50] 庞奖励, 黄春长, 贾耀峰. 关中部地区全新世土壤发育及记录的水文事件[J]. 土壤学报, 2005, **42**(2): 187 ~ 193.
- [51] 毛龙江, 黄春长, 庞奖励. 泾河中游地区全新世成壤环境演变研究[J]. 地理科学, 2005, **25**(4): 478 ~ 483.
- [52] 范 斌, 许世远, 俞立中, 等. 巢湖沉积植硅体组合及中全新世以来的环境演变[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 273 ~ 279.
- [53] Ge Q, J Zheng, X Fang, et al. Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years[J]. The Holocene, 2003, **13**(6): 933 ~ 940.
- [54] 郑洪汉, 黄宝林. 南极冰退与深圳湾北海岸平面变化的地质记录[J]. 热带海洋, 1996, **15**(4): 1 ~ 8.
- [55] 覃嘉铭. 古气候变化的石笋同位素记录研究——以桂林盘龙洞为例[J]. 地球学报, 1997, **18**(3): 255 ~ 260.
- [56] 余克服, 陈特固. 西沙海区全新世海面气温变化幅度推算[J]. 海洋通报, 2001, **20**(2): 12 ~ 15.
- [57] 李平日, 方国祥, 黄光庆. 珠江三角洲全新世环境演变[J]. 第四纪研究, 1991, **1**(2): 131 ~ 139.
- [58] Pflaumann U, Jian Z. Modern distribution patterns of planktonic foraminifera in the South China Sea and western Pacific: a new transfer technique to estimate regional sea-surface temperatures[J]. Marine Geology, 1999, **156**: 41 ~ 83.
- [59] 童国榜, 石 英, 吴瑞金, 等. 龙感湖地区近 3 000 年来的植被及其气候定量重建[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, **17**(2): 53 ~ 61.
- [60] 张兰生, 史培军, 方修琦. 鄂尔多斯地区全新世环境演变及未来百年预测[C]//张兰生. 环境演变研究. 北京: 科学出版社, 1992: 123 ~ 138.
- [61] 周廷儒, 张兰生, 李华章. 华北更新世最后冰期以来的气候变迁[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1982, **1**: 77 ~ 88.
- [62] 史 威, 王富葆, 韩辉友, 等. 句容宝华山麓距今 5 700 年前后的地层与古气候[J]. 地层学杂志, 2008, **32**(2): 169 ~ 176.
- [63] 龚高法, 张丕远, 吴祥定, 等. 历史时期气候变化研究方法[M]. 科学出版社, 1983: 6 ~ 7.
- [64] Alley R B. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland[J]. Quaternary Science Reviews, 2000, **19**: 213 ~ 226.
- [65] Li Xiaoqiang, Zhou Jie, Shen Ji, et al. Vegetation history and climatic variations during the last 14 ka B P inferred from a pollen record at Daihai Lake, north-central China[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2004, **132**: 195 ~ 205.
- [66] 马春梅, 朱 诚, 郑朝贵, 等. 晚冰期以来神农架大九湖泥炭高分辨率气候变化的地球化学记录研究[J]. 科学通报, 2008, **53**(增1): 26 ~ 37.
- [67] 王淑云, 吕厚远, 刘嘉麒, 等. 湖光岩玛珉湖高分辨率孢粉记录揭示的早全新世适宜期环境特征[J]. 科学通报, 2007, **52**(11): 1285 ~ 1291.
- [68] Bradley R S, N E Law. Climate Change and Society[M]. Stanley Thornes: Cheltenham, 2001: 104.

Synthetically Reconstructed Holocene Temperature Change in China

FANG Xiu-qi¹ , HOU Guang-liang²

(1. School of Geography , Beijing Normal University , Beijing , 100875 , China; 2. School of Life and Geographic Science , Qinghai Normal University , Xining , Guangxi 810008 , China)

Abstract: About 1397 temperature records during the Holocene are collected to establish a temperature data set of the Holocene in China. 1140 of the 1397 records are available after eliminated the abnormal values statistically. There are more than 10 available records in most centuries during the Holocene in China. A synthesis reconstruction method , named the converted single sample from local to regional and averaged by the multiple samples , are designed to quantitatively reconstruct temperature change during the Holocene in China. The synthetically reconstructed Holocene temperature series in China ensures both the quantification and the higher temporal resolution continuously. According to the reconstructed temperature series , the Holocene temperature change in China could be obviously divided into three stages. The early Holocene (11.5 – 8.9 ka B. P.) was warming period when the temperature rose to near the present with fluctuation. The mid Holocene (8.9 – 4.0 ka B. P.) was a warmer period named the Holocene Megathermal , when the temperature was 1 °C higher than the present in average , with 1.5°C higher than the present in maximum during 8.0 – 6.4 ka BP. The late Holocene (after 4.0 ka BP) was a cooling period.

Key words: Holocene; temperature change; synthesis reconstruction; China