

物候学方法在历史气候变化重建中的应用

刘亚辰^{1,2}, 王焕炯^{2,3}, 戴君虎², 李同昇¹,
王红丽^{2,3}, 陶泽兴^{2,3}

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用历史物候记录重建的气候变化结果, 显著地增进了人类对过去气候变化特征的认识。但现有研究在历史物候记录的提取与处理、重建方法的选择、重建结果的精度评估等方面需要进一步总结梳理。通过归纳历史物候记录的资料源以及在历史物候记录预处理过程中需要解决的物种鉴别和物候期确定问题, 对现有重建方法进行总结, 发现较早的研究采用了古今对比法, 而近年来的研究多采用更为复杂的回归和过程模型法。上述物候学方法的重建结果对认识中世纪暖期、小冰期和近百年等典型时段的历史气候变化特征提供了重要依据, 同时物候学方法重建结果与其他代用资料重建结果往往表现出较高的一致性。未来研究可在历史物候记录的整编与利用、重建方法的准确性评估与改进以及不同重建结果比对等方面, 进一步深入开展工作。

关键词: 物候; 历史气候变化; 气候重建

DOI: 10.11821/dlyj201404001

1 引言

历史气候变化研究是当前全球变化研究领域的热点之一。重建历史气候变化, 可为划分历史气候变化类型, 认识当前气候系统性质, 预测未来气候变化提供参考。物候学方法已成为重建历史气候变化的重要手段之一, 物候观测记录可敏感地指示气候变化, 被视为大自然的“语言”^[1]和全球环境变化的诊断“指纹”^[2]。

物候学方法是指以物候现象出现日期为指标研究历史气候变化的方法^[3]。相对于冰芯、树轮等其他代用资料, 历史物候记录以日为单位, 有较高的时间分辨率, 并且基本覆盖了当时人类活动的范围; 相比于历史文献中的冷暖感知记载, 历史物候记录属于更加客观的自然证据, 因而具有更高置信度 (very high confidence)^[4]。因此, 基于历史物候记录的物候学重建方法是研究历史气候变化的一种可靠手段。

物候学为认识历史气候变化做出了重要的贡献。早在20世纪20年代, 竺可桢就利用历史物候证据对中国南宋时期杭州地区的气候变化进行了研究^[5], 开创了利用中国古代文

收稿日期: 2013-12-02; 修订日期: 2014-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171043, 41030101); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05090301)

作者简介: 刘亚辰 (1988-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为物候与历史气候变化。

E-mail: yachenflyer@gmail.com

通讯作者: 戴君虎 (1968-), 男, 陕西蓝田人, 研究员, 研究方向为物候学、植物地理学和气候变化影响。

E-mail: daijh@igsnr.ac.cn

献中的物候资料进行气候变化研究的先河。之后,在研究中国过去5000年温度变化规律时^[6],他又大量采用历史文献中的物候资料。尤其在周朝至元朝(BC 1100年-AD 1400年)时期,研究气候变化的主要44条证据中,有18条属物候学范畴。因此作者称这一时段为物候时期。这项研究奠定了利用物候学方法研究中国历史气候变化的理论基础。近年来,随着现代物候观测资料的持续累积、历史物候信息的不断挖掘、对物候期发生机理的深入探讨,研究者以历史文献中初、终霜雪^[7]、常见观赏植物花期^[8]、蝉始鸣日期^[9]、春雷^[10]等物候记录,从冷暖程度和梅雨期的变迁等方面刻画了中国特定地区、特定历史时段的历史气候变化。与上述研究相类似,杨保等^[11]和葛全胜^[12,13]等先后通过区域集成方法,利用包括历史物候数据在内的多种资料,重建了中国过去2000年和过去5000年的温度变化序列。该结果较之上述竺可桢的研究,时空分辨率和重建结果可靠性都得到了很大提高。在国外,以物候学方法重建历史气候变化研究中常用的资料主要以农业物候期(如春耕日期^[14]、葡萄^[15]和谷物^[16]收获期)和观赏植物花期(如樱花^[17]开花期)为主。这些资料被广泛用以重建欧洲^[18]、美洲^[19]、东亚^[20]部分地区部分时段的历史气候变化。

中国历史文献中具有非常丰富的物候信息,尽管以往工作中已有很好应用,但数据资料整理的潜力还很大。已有研究在探讨历史时期气候变化的研究方法时,曾论述过物候学方法应用上的有关问题^[3]。但近年物候学快速发展,研究方法更加完善,使有关理论问题亟待更新。除此之外,尚无研究在历史物候记录与处理、重建方法的选择、重建结果的精度评估等方面对利用物候学方法重建历史气候变化的工作进行过系统总结。因此,本文对本领域的有关理论问题进行较为系统地梳理:首先介绍历史物候资料的来源及其在预处理过程中的几个关键问题;再以重建历史温度变化为例,分析、对比各个重建方法的异同;之后,揭示物候学方法重建结果对认识过去2000年气候变化特征的贡献。

2 历史物候记录的资料源及预处理

历史气候重建研究中的物候资料分为现代物候观测资料和历史物候记录。其中现代观测资料来源于传统的地面观测,即定点记录或观测到的物候现象。由于现代物候观测资料是由富有经验的专人按照一定的规范定点观测而来,其可信度和准确性较高,可直接用于重建研究。因此,本文重点讨论历史物候记录的来源、分布与预处理。

2.1 历史物候记录的来源与空间分布

历史物候记录的来源主要有正史、地方志、诗文集、日记、历书、农书、医书、档案等。其中正史、地方志、诗文集中较多地记载了旱、涝、霜、雪、雹等异常气象记录,从中可提取出初、终霜雪等自然物候信息;诗文集、日记、历书、医书等通常含有丰富的天气现象和自然、生物、农业物候记载,可提取出各种动植物物候信息;地方志和档案中记载有农业收成、粮价等资料,可作为农业物候信息的直接或替代资料。

历史物候记录的空间分布与人类活动的范围有密切关系。以中国为例,汇总过去2000年气候变化重建研究,归纳其中所使用代用资料的类型及空间分布,发现历史物候记录有明显的分布集中区,大多位于古今人口相对稠密、经济相对发达的中东部地区。值得注意的是,在这一区域,冰芯、树木年轮、湖泊沉积、石笋、孢粉等其他代用资料的分布极为有限(图1)。因此,历史文献中丰富的物候记录为这一区域的气候变化重建研究提供了不可替代的资料源。但目前利用这些历史物候资料进行的重建研究多为特定时段小

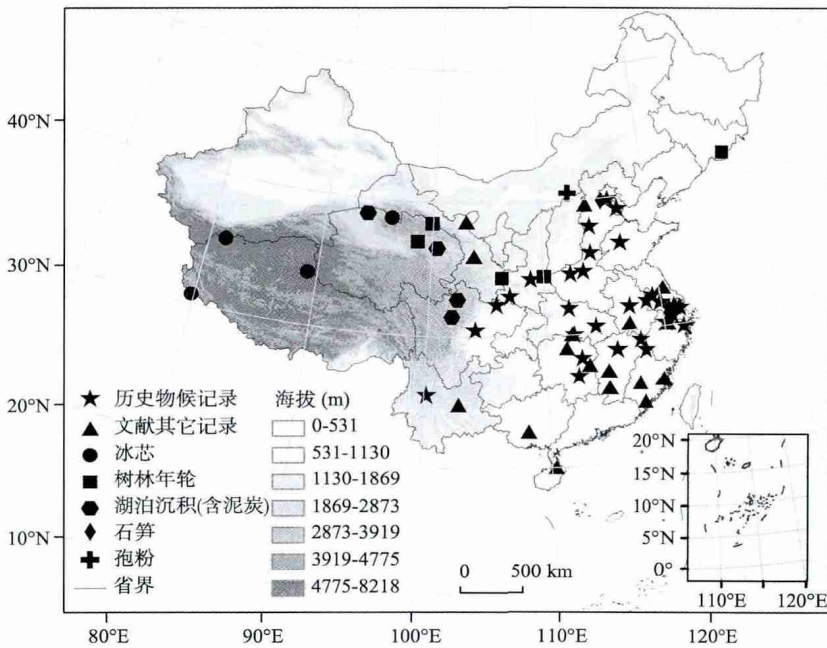


图1 中国主要历史气候重建研究代用资料类型和空间分布

Fig.1 The spatial distribution of proxy types in major studies on historical climate reconstruction in China

区域尺度的研究，历史文献中的物候记录还有很大的提取与应用潜力。

2.2 历史物候资料预处理中的若干问题

历史文献中提取的物候记录通常缺乏统一的观测标准和记录格式，并带有一定的主观因素，因此需要经过考订、校勘等预处理后才可用于重建研究。物种的鉴别、物候期的确定是在预处理中尤其需注意的两个问题。

首先，对于植物物种的鉴定问题，鉴定的方法主要有如下几类：① 依据植物的地理分布。例如，同为桃属的山桃 (*Amygdalus davidiana*) 和桃 (*Amygdalus persica*)，前者的野生种主要分布于黄河中下游地区，后者野生种则主要分布于江淮流域^[3]。如果能确定历史记载发生地点，则可推断桃的品种。② 依据物候期与物候规律。可根据已知品种物候期与未知品种物候期间的顺序性、相关性规律推断未知品种。③ 依据植物种植历史等文化因素。例如，日本东京樱花 (*Cerasus yedoensis*) 在 19 世纪中期才被大范围种植，在此之前的历史文献中记载的樱花应为矮樱 (*Prunus jamasakura*) 的物候期^[20]。

其次，对于物候期的确定问题，通常依照现代物候观测对各个物候期的划分标准，将历史文献中的文字描述进行归类定级，以确定相应的物候期。例如，《中国物候观测方法》中将开花盛期定义为 在观测的树木上有一半以上的花蕾都展开花瓣^[21]。当历史文献中对物候现象的文字描述中出现 桃花遍野、丁香如云、梅花齐放 等能体现 一半以上 程度的描述时，即可将该文字描述的物候现象确定为开花盛期。利用此方法可以处理物候期描述相对模糊的问题 (表 1)。进一步研究中，应注意中国历史物候资料的标准化和规范化处理，比如采用国外作物物候观测的编码系统进行物候期归档和管理^[22]。

另外，在有些情况下，可用与物候事件有较高相关性的事务日期来替代物候期。例如，日本有观赏樱花的习俗，而大规模观赏樱花的日期通常是在樱花的盛花期，因此可将

史载举办赏花集会的日期作为樱花盛花期^[23]。再如,历史上赋税的收取总是紧随作物的收获期。因此文献记载中的收税日期可代表葡萄、谷物等农作物的成熟期^[24]。

3 利用物候学重建历史气候变化的方法

利用物候学重建历史气候变化的基本步骤为:首先利用现代物候观测资料和器测气象资料建立物候期与气候因子的关系,再将预处理后的历史物候记录代入之前的关系式反推出历史气候变化。物候学方法可重建的气候因子包括温度、降水、沙尘、梅雨、极端天气现象等,但以重建历史温度变化的研究最为多见。因此,本文着重讨论物候学重建历史温度变化的方法。

气温与物候现象的相关性是利用物候学方法重建历史温度变化的基础。对北半球中高纬度地区的研究表明,在影响植物物候期的诸多环境要素中(气温、光照、降水、养分等),气温所起作用最大^[25]。一般来讲,在一定范围内,气温的升高可促进酶的活性^[26],使春季物候期提前^[27],秋季物候期推迟^[28],植物的生长期延长^[29]。植物的发育进度不是与物候现象发生时的温度有关,而是与过去一段时间内温度的累加和成比例,这一累加和被称为植物完成发育期所需要的积温^[30]。同时,一些植物需要一定的低温条件打破休眠才能促进芽(叶芽和花芽)的发育^[31]。以上述物候与气温关系的基本理论为基础,目前物候学重建历史温度变化的方法可分为古今对比、回归模型和过程模型三类。

3.1 古今对比法

古今对比法是指利用历史文献中的物候记录与动植物分布界限记录,与现代同类数据作对比,根据物候期的古今差异定性推断温度的古今差异。在古今对比法中,常用来指示古今温度差异的物候现象有:初终霜雪日期^[5]、初次结冰日期和最先消融日期^[32]、植物的花期^[33]和年内作物成熟次数^[34]等。在某些情况下,古今对比法可定量地给出历史温度变化距平值。例如,竺可桢的研究中关于南宋冷期的结论^[6],是通过融雪日晚(当时国都杭州雪延迟至暮春融化)、终雪日晚(1131-1260年间最迟降雪日期比此前推迟1个月),以及初雪日早(1170年范成大出使金国北京西山极早降雪)等物候事实归纳而来。根据上述推断,竺先生认为南宋时期(即12世纪)杭州气温比当代要冷1~2℃,这些物候证据得到了日本京都樱花开放日期推迟的印证,证明东亚地区在该时期存在普遍寒冷的气候。古今对比法能够识别历史时期特定地区和时段温度变化,形成对历史温度状况的基本认识。但只能对历史温度变化进行定性概括或利用临界值与极端值进行经验性定量概括,重建的温度变化准确性相对较低。

3.2 回归模型

回归模型是利用物候事件发生的时间与温度的线性回归关系建立模型,用以模拟物候

表1 历史文献文字记载归类定级举例

Tab.1 Examples of the classification and grading of phenological records in historical documents

物候期	文字描述
展叶始期	出芽成叶、微露绿色等
展叶盛期	杨柳绿、柳丝绿等
芽开放期	柳放稍、柳芽稍吐、柳芽尤短等
开花始期	蕊甚稀、花开二分、初开、桃始发红、半开等
开花盛期	花灿然、花遍野、花齐放、花如云、花甚浓等
开花末期	花将谢、花半落、花已过、花渐过、花已残等
果实脱落开始期	柳絮飞等

期与温度的关系。该模型是重建历史温度变化的有效方法之一。具体步骤为：① 运用最小二乘法建立现代温度序列和物候期序列的线性回归方程；② 历史物候期记录输入到回归模型中重建出历史温度变化。

回归模型常基于单一物候期重建历史温度变化。例如，Menzel^[35]、Maurer^[36]、Meier^[37]等利用可追溯到中世纪的葡萄收获期物候观测记录^[38]，带入线性回归模型，重建了欧洲部分区域历史时期的夏季气温。也有研究基于多物候期重建历史温度变化。在这种情况下，需要通过相关分析，将不同物候期转化为新定义^[39]或选定的^[16]标准物候期，然后再带入回归方程重建历史温度变化。

回归模型建立的依据是研究区内物候期与温度在统计学意义上的数量关系。因此，当所建立的回归方程应用于不同地点或较大区域时，可能存在不适用的问题。葛全胜等^[40]和郑景云等^[41]采用区域集成法解决了此问题。该方法首先利用搜集到的所有物候记录，重建出研究区各站点特定时段的历史气温变化；然后，根据现代气温观测资料得出各站点温度变化对研究区温度变化的贡献率；最后将各站点的温度变化根据贡献率推算出整个研究区的温度变化^[40]。

回归模型建立的依据是物候期与气温的相关关系，较少考虑植物的生理生态过程及环境因子对生物的影响机制。因此回归模型在使用时，需要经过严格的准确度检验和误差评估过程。

3.3 过程模型

物候过程模型是指通过植物每日发育进度与温度的关系，模拟植物生长发育过程，从而建立温度与物候期的数学关系^[42]。其重建步骤与回归模型相类似，即首先建立模拟物候期的过程模型，再输入历史物候期记录，计算出相应的历史温度。但不同点在于模型参数的确定：过程模型参数确定的方法一般为最小二乘法，即找出一组模型参数使得模型预测值与观测值之间的误差平方和最小。

在重建历史温度变化研究中，最常用的过程模型是春暖（Spring Warming，简称SW）模型^[30]。其公式如下：

$$F^* = \sum_{t_0}^y C(x_t) \quad (1)$$

$$C(x_t) = \begin{cases} 0 & \text{if } x_t < T_b \\ x_t - T_b & \text{if } x_t \geq T_b \end{cases} \quad (2)$$

式中： F^* 为植物发育所需积温； y 是物候事件发生的时间； x_t 为第 t 天的日平均气温； $C(x_t)$ 为逐日发育进度； t_0 是逐日发育进度开始累积的时间； T_b 为发育所需的下限温度；当 $C(x_t)$ 的累加和达到预先设定的 F^* 时即认为植物完成发育过程。该模型认为，当温度超过发育所需的下限温度（ T_b 一般在0~10℃之间）后，发育进度将随着温度的升高呈现线性增长的趋势（图2a）。Chuine等在利用葡萄收获期重建的法国勃艮第地区历史温度变化^[15]研究中，所用的方法即为SW模型。

SW模型有多种改进形式，有些模型假设随着温度升高，日发育进度呈非线性增长。典型的案例为DTS（The number of days transformed to standard temperature）模型，其逐日发育进度（图2b）计算公式为：

$$C(x_t) = \exp\left\{\frac{R_a(x_t - T_b)}{R \cdot x_t \cdot T_b}\right\} \tag{3}$$

式中： R 为通用气体常数($8.314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)； E_a 为温度对植物发育的影响参数(56 kJmol^{-1})。DTS模型在日本被广泛用以重建历史温度变化（以樱花盛花期记录为基础）^[20]。

另外一些模型假设在高于一定的温度后，植物的发育进度将停止，并认为存在一个对植物发育最适的温度（图2c）。该类模型最典型的例子是改进的SW模型，其公式为：

$$C(x_t) = \begin{cases} \frac{2(x_t - T_b)^\alpha (T_{opt} - T_b)^\alpha - (x_t - T_b)^\alpha}{(T_{opt} - T_b)^{2\alpha}} & \text{if } T_b \leq x_t \leq T_{max} \\ 0 & \text{if } x_t < T_b \text{ or } x_t \geq T_{max} \end{cases} \tag{4}$$

$$\alpha = \frac{\log 2}{\log \left[\frac{(T_{max} - T_b)}{(T_{opt} - T_b)} \right]} \tag{5}$$

式中： T_{max} 为植物发育的上限温度； T_{opt} 为发育的最适温度。研究者常将该模型用以模拟葡萄的转熟（veraison）过程，并据此重建了法国勃艮第和巴黎地区的历史温度变化^[43]。

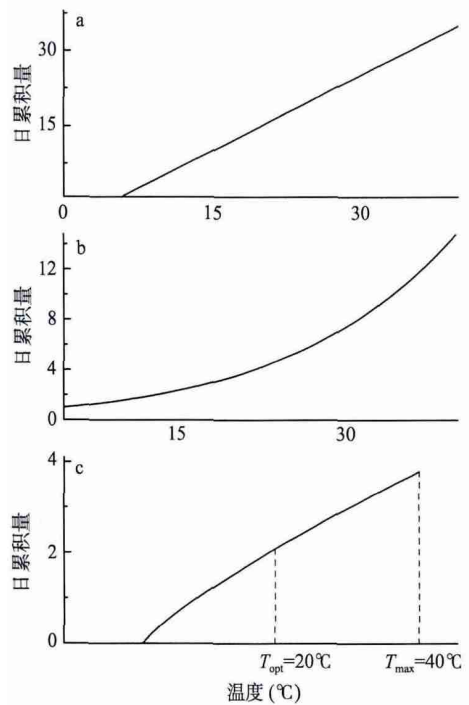
上述三种模型均未考虑春化作用对发育的影响，认为植物在达到发育下限温度之前已经经过充分冷激处理。因此，SW模型、DTS模型和改进的SW模型均可被看作是基于积温理论的过程模型。

三种重建方法中，古今对比法能够对历史气候变化形成较为直观的认识，但较难进行定量刻画；回归模型方法可以方便地建立物候变化与温度变化的定量关系，但单一地点建立的回归模型不能用于较大区域的重建研究；过程模型在重建精度更高，且单一站点建立的模型可推广至区域使用，但模型参数的确定较为复杂，需要耗费更多的计算时间。近年来的研究多采用过程模型方法以提高重建结果的精度。

4 物候资料重建结果对认识历史气候变化的作用

近年来，国内外学者利用历史物候学方法重建了不同时段、不同地区、不同分辨率的历史气候变化。这些重建结果显著地增强了人类对过去2000年气候变化特征，尤其是中世纪暖期、小冰期和过去百年等典型时段气候变化的认识。

(1) 物候学方法重建的历史气候变化结果为中世纪暖期的存在提供了佐证。竺可桢^[6]利用物候等证据的重建结果表明，与国际上公认的900-1300年的中世纪暖期相比，中国的



a为SW模型；b为DTS模型；c为改进SW模型($T_{opt}=20^\circ\text{C}$, $T_{max}=40^\circ\text{C}$)
图2 三种积温模型模拟的发育积累量与日均温变化的关系($T_b=5^\circ\text{C}$)

Fig. 2 The relationship between the development accumulation and the daily mean temperature in three degree-day models ($T_b=5^\circ\text{C}$)

暖期出现在隋唐时代(589-907年)。满志敏等^[44]利用植物的种植北界等物候资料重建的结果表明,中国在9世纪初到13世纪存在与欧洲中世纪暖期相对应的温暖气候。张德二利用亚热带植物分布资料的重建结果支持了满志敏等的结论,并进一步估算出13世纪中叶中国中部地区年平均气温较现代高 1°C 左右^[45];葛全胜等的2000年重建结果显示930-1310年为中国东部的中世纪暖期,且存在1050年和1250年两个暖锋,增暖距平 0.5°C 左右^[13]。以樱花盛花期观测记录为基础重建的气温序列表明,日本9-14世纪存在与欧洲相一致的中世纪暖期^[17]。由此可见,东亚地区普遍存在中世纪暖期,但不同研究结果在暖期的起止时间和增暖程度方面存在一定的差异。

(2) 物候学方法重建结果进一步证实了小冰期的存在。关于小冰期的起止时间,存在较多分歧,一般把1450-1850年作为小冰期的时限^[46]。竺可桢的重建结果证明了该小冰期在中国的存在,但具体的寒冷时段为1470-1520年,1620-1720年和1840-1890年^[6];葛全胜等的重建结果表明,中国东部地区1321-1920年处于寒冷时期,且明清时期的冷期在起止时间和冷暖程度上与公认的小冰期相当^[47],这一结果与日本樱花盛花期重建结果相一致^[17]。欧洲中部地区作物收获记录重建的过去1000年温度变化序列表明,1550-1850年比现代要冷 2.5°C 左右^[48];捷克谷物收获期重建的1501-2008年3-6月的温度显示,在1650-1800年存在一个与公认小冰期相对应的寒冷期^[16]。上述重建结果证明在1480-1850年间,世界范围内存在相对一致的小冰期,各地区间的差异仅体现在寒冷时期的起讫时间之上。

(3) 过去百年物候资料重建结果印证了20世纪的气候增暖。利用冬小麦收获期序列重建的捷克1501-2008年3-6月的平均气温结果显示,1951年以来的气候状况是整个研究时段最为温暖的^[16];法国勃艮第地区葡萄收获期的重建结果显示20世纪后半叶气候开始持续增暖,且在2003年气温距平达到了前所未有的 5.86°C ^[15]。瑞士^[37]和意大利蒂拉诺地区^[49]基于葡萄收获期序列的重建结果、德国^[48]和捷克^[16]基于作物收获期序列的重建结果都得到了与之类似的结论。在东亚,日本樱花盛花期序列的重建结果表明,1820年前后日本气温开始有增暖趋势,且在1940以后增暖较为迅速^[17];葛全胜等的2000年重建结果表明,1920年左右中国东部地区气候开始增暖,且在20世纪后期升温极为迅速^[50]。以上结果均很好反映了20世纪后半叶的急剧增温过程。同时,这一时段系统、完备的物候观测数据和气象数据也是建立精准物候模型的基础资料,为认识物候期发生机理和重建历史气候变化提供了理论依据。

物候资料重建结果与其他资料重建结果具有较高的一致性,主要表现在如下两个方面。首先,物候资料重建结果与历史文献中其他类型记录重建结果有较高的相似性。郑景云等^[51]运用相关分析、小波分析、聚类分析、假设检验等统计学方法比较了基于历史文献重建的近2000年中国温度变化研究后,发现对于同一地区的物候记录重建结果与其他类型记录重建结果具有较高相似性。对于不同地区,二者重建的温度变化序列也具有一定的相关性,且重建区域越接近其相关系数也越高。由此证明,不同区域的重建差异主要来源于地区间的气候差异,而非记录类型的选取。其次,物候资料重建结果与其他代用资料重建结果有较高的一致性。Ge等^[52]通过比较物候资料与其他代用资料的重建结果,发现在千年尺度上,物候资料重建结果与其他自然资料重建结果有几乎一致的波动规律,其重建结果差异主要因不同代用资料对气候变化的敏感度不同引起。因此,历史物候记录可与其他代用资料相结合,共同反映历史气候变化。

5 结论与讨论

综上所述,近年来利用物候学方法重建历史气候变化的研究已经取得显著进展。研究结果为准确地认识历史气候变化提供了重要证据。但在资料的整编与利用、重建方法的创新与评估和重建结果的比对等三个方面还有待深入研究:

(1) 历史物候资料的系统整编和利用。已在各朝正史、文人与农场主日记、农业收成档案等史籍中物候记录的提取与利用方面开展了较多工作。未来研究可着力于对诗文集、农书以及医书中历史物候资料的提取、整编与利用,因为这些古籍中蕴含着丰富的农作物物候信息和常见观赏植物的物候期信息。在对历史物候记录进行预处理的过程中,有必要建立统一的历史物候资料整编规范,以尽可能消除在物种、物候期确定过程中人为主观因素的影响,进一步提高历史物候资料的利用水平。历史气候变化研究中,史载物候记录主要出现在中国东部地区,因此挖掘广大西部地区的古代文献物候记录也是一项亟需深入开展的工作。

(2) 重建方法的创新与评估。从植物生理学角度出发,通过控制实验(例如模拟增温)定量研究物候期与环境因子间的关系,建立新的物候-气候关系模型并服务于重建研究。另外,加强现有方法间的对比研究,分析物候对气温等环境要素敏感性的区域差别,对各方法的不确定性进行评估,为以后研究的方法选择提供理论支撑。

(3) 不同重建结果间的比对。加强物候学重建结果与历史文献中其他资料重建结果以及其他代用资料重建结果间的比对研究,可重点从物候学重建结果间的空间代表性对比以及对同一区域与其他代用资料重建结果的一致性分析入手,从而获得对历史气候变化更为可靠的认识。

参考文献(References)

- [1] Barr A, Black T A, McCaughey H. Climatic and phenological controls of the carbon and energy balances of three contrasting boreal forest ecosystems in western Canada. In: Noormets A. Phenology of Ecosystem Processes. New York: Springer, 2009. 3-34.
- [2] Root T L, Price J T, Hall K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421 (6918): 57-60.
- [3] 龚高法. 历史时期气候变化研究方法. 北京: 科学出版社, 1983: 43-44. [Gong Gaofa. Historical Periods of Climate Change Research Methods. Beijing: Science Press, 1983: 43-44.]
- [4] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC: Cambridge University Press, 2007. 65-66.
- [5] 竺可桢. 南宋时代我国气候之揣测. *科学*, 1925, 10(2): 151-164. [Zhu Kezhen. Speculation of climate in Southern Song Dynasty. *Science Magazine*, 1925, 10(2): 151-164.]
- [6] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. *中国科学: A辑*, 1973, 2(1): 168-189. [Zhu Kezhen. A preliminary study on climate changes since the last 5000 years in China. *Science in China*, 1973, 2(1): 168-189.]
- [7] 郑景云, 满志敏, 方修琦, 等. 魏晋南北朝时期的中国东部温度变化. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 129-140. [Zheng Jingyun, Man Zhimin, Fang Xiuqi, et al. Temperature variation in the Eastern China during Wei, Jin and the Southern and Northern Dynasties. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 129-140.]
- [8] 方修琦, 萧凌波, 葛全胜, 等. 湖南长沙, 衡阳地区 1888-1916 年的春季植物物候与气候变化. *第四纪研究*, 2005, 25 (1): 74-79. [Fang Xiuqi, Xiao Lingbo, Ge Quansheng, et al. Changes of plants phenophases and temperature in spring during 1888-1916 around Changsha and Hengyang in Hunan Province. *Quaternary Sciences*, 2005, 25 (1): 74-79.]
- [9] 萧凌波, 方修琦, 张学珍. 19 世纪后半叶至 20 世纪初叶梅雨带位置的初步推断. *地理科学*, 2008, 28(3): 385- 389.

- [Xiao Lingbo, Fang Xiuqi, Zhang Xuezhen. Location of rainbelt of Meiyu during second half of the 19th century to early 20th Century. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(3): 385-389.]
- [10] 刘炳涛, 满志敏. 《味水轩日记》所反映长江下游地区 1609-1616 年间气候冷暖分析. *中国历史地理论丛*, 2012, 27(3): 16-22. [Liu Bingtao, Man Zhimin. A study on climatic of cold and warm from 1609-1616 AD in Wei Shuixuan Diary in the lower reaches of Yangtze River. *Chinese Historical Geography*, 2012, 27(3): 16-22.]
- [11] Yang B, Braeuning A, Johnson K R, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 38-39.
- [12] 葛全胜, 郑景云, 方修琦, 等. 过去 2000 年中国东部冬半年温度变化. *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 2000 years. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(2): 166-173.]
- [13] 葛全胜, 王顺兵, 郑景云. 过去 5000 年中国气温变化序列重建. *自然科学进展*, 2006, 16(6): 689-696. [Ge Quansheng, Wang Shunbing, Zheng Jingyun. Reconstructed series of Chinese temperature changes over the past 5000 years. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(6): 689-696.]
- [14] Nordli P O Y. Reconstruction of nineteenth century summer temperatures in Norway by proxy data from farmers' diaries. *Climatic Change*, 2001, 48(1): 201-218.
- [15] Chuine I, Yiou P, Viovy N, et al. Historical phenology: grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 2004, 432(7015): 289-290.
- [16] Movzny M, Brazdil R, Dobrovolny P, et al. Cereal harvest dates in the Czech Republic between 1501 and 2008 as a proxy for March-June temperature reconstruction. *Climatic Change*, 2012, 110(3-4): 801-821.
- [17] Aono Y, Saito S. Clarifying springtime temperature reconstructions of the medieval period by gap-filling the cherry blossom phenological data series at Kyoto, Japan. *International journal of biometeorology*, 2010, 54(2): 211-219.
- [18] Grove J M, Conterio A. The climate of Crete in the sixteenth and seventeenth centuries. *Climatic Change*, 1995, 30(2): 223-247.
- [19] Mock C J. Historical evidence of a cold, dry summer during 1849 in the northeastern Great Basin and adjacent Rocky Mountains. *Climatic Change*, 1991, 18(1): 37-66.
- [20] Aono Y, Kazui K. Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century. *International journal of biometeorology*, 2008, 28(7): 905-914.
- [21] 宛敏渭, 刘秀珍. *中国物候观测方法*. 北京: 科学出版社, 1979: 34-35. [Wan Minwei, Liu Xiuzhen. *China's National Phenological Observational Criterion*. Beijing: Science Press, 1979: 34-35]
- [22] Meier U. *Growth Stages of Mono-and Dicotyledonous Plants: BBCH Monograph*. Berlin: Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, 2001. 10-25.
- [23] Zaiki M, Konnen G P, Tsukahara T, et al. Recovery of nineteenth-century Tokyo/Osaka meteorological data in Japan. *International Journal of Biometeorology*, 2006, 26(3): 399-423.
- [24] Kiss A, Wilson R, Bariska I. An experimental 392-year documentary-based multi-proxy (vine and grain) reconstruction of May-July temperatures for Kőszeg, West-Hungary. *International journal of biometeorology*, 2011, 55(4): 595-611.
- [25] Sparks T H, Jeffree E P, Jeffree C E. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(2): 82-87.
- [26] Bonhomme R. Bases and limits to using 'degree. day'units. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13(1): 1-10.
- [27] Beaubien E G, Freeland H J. Spring phenology trends in Alberta, Canada: Links to ocean temperature. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(2): 53-59.
- [28] Bradley N L, Leopold A C, Ross J, et al. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1999, 96(17): 9701-9704.
- [29] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397(6721): 659-660.
- [30] Hunter A F, Lechowicz M J. Predicting the timing of budburst in temperate trees. *Journal of Applied Ecology*, 1992, 29(3): 597-604.
- [31] Hänninen H. Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions: An ecophysiological approach to

- modelling of bud burst phenology. *Canadian Journal of Botany*, 1995, 73(2): 183-199.
- [32] 龚高法, 张丕远, 张瑾璐. 北京地区自然物候期的变迁. *科学通报*, 1983, 28(24): 1517-1519. [Gong Gaofa, Zhang Piyuan, Zhang Jinrong. Changes of phenology in Beijing. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28(24): 1517-1519.]
- [33] 张福春. 花信风与我国公元六世纪气候的重建. *地理研究*, 1999, 18(2): 143-147. [Zhang Fuchun. China's flower calendar and reconstruction of climate in 6th century in China. *Geographical Research*, 1999, 18(2): 143-147.]
- [34] 牟重行. 中国五千年气候变迁的再考证. 北京: 气象出版社, 1996. 24-80. [MouChongxing. Further Exploration on the Climatic Changes during Last 5000 Years in China. Beijing: China Meteorological Press, 1996. 24-80.]
- [35] Menzel A. A 500 yearpheno-climatological view on the 2003 heatwave in Europe assessed by grape harvest dates. *Meteorologische Zeitschrift*, 2005, 14(1): 75-77.
- [36] Maurer C, Koch E, Hammerl C, et al. BACCHUS temperature reconstruction for the period 16th to 18th centuries from Viennese and Klosterneuburg grape harvest dates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2009, 114(D22).
- [37] Meier N, Pfister C, Wanner H, et al. Grape harvest dates as a proxy for Swiss April to August temperature reconstructions back to AD 1480. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(20): 1-6.
- [38] Etien N, Daux V, Masson-Delmotte V, et al. A bi-proxy reconstruction of Fontainebleau (France) growing season temperature from AD 1596 to 2000. *Climate of the Past*, 2008, 4(2): 91-106.
- [39] Rutishauser T, Luterbacher J, Jeanneret F, et al. A phenology-based reconstruction of interannual changes in past spring seasons. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005-2012), 2007, 112(G4).
- [40] 葛全胜, 何凡能, 郑景云. 中国历史地理学与 集成研究 . 陕西师范大学学报: 哲学社会科学版, 2007, 36(5): 22-26. [Ge Quansheng, He Fanneng, Zheng Jingyun. Chinese Histo-geography and "Integrated Research". *Journal of Shaanxi Normal University: Philosophy and Social Sciences Edition*, 2007, 36(5): 22-26.]
- [41] 郑景云, 邵雪梅, 郝志新等. 过去2000年中国气候变化研究. *地理研究*, 2010, 29(9): 1561-1570. [Zheng Jingyun, Shao Xuemei, Hao Zhixin, et al. An overview of research on climate change in China during the past 2000 years. *Geographical Research*, 2010, 29(9): 1561-1570.]
- [42] Cleland E E, Chuine I, Menzel A, et al. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(7): 357-365.
- [43] deCortázar-Atauri I G, Daux V, Garnier E, et al. Climate reconstructions from grape harvest dates: Methodology and uncertainties. *The Holocene*, 2010, 20(4): 599-608.
- [44] 满志敏, 张修桂. 中国东部中世纪温暖期的历史证据和基本特征的初步研究. 见: 张兰生. 中国生存环境历史演变规律研究. 北京: 海洋出版社, 1993. [Man Zhimin, Zhang Xiugui. Research on the documental evidence and the characteristics of MWP in the east part of China. In: Zhang Lansheng (ed.): *Research on the Past Life-Supporting Environmental Change of China*. Beijing: China Ocean Press, 1993.]
- [45] 张德二. 我国 中世纪温暖期 气候的初步推断. *第四纪研究*, 1993, 14(1): 7-15. [Zhang De'er. A study on the medieval warm period in China. *Quaternary Sciences*. 1993, 14(1): 7-15.]
- [46] 李明启, 靳鹤龄, 张洪等. 小冰期气候的研究进展. *中国沙漠*, 2005, 25(5): 731-737. [Li Mingqi, Jin Heling, Zhang Hong, et al. Advances of climate research in the Little Ice Age. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(5): 731-737.]
- [47] 葛全胜, 郑景云, 郝志新, 等. 过去2000年中国气候变化的若干重要特征. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(6): 934-942. [Ge Quansheng, Zheng Jingyun, Hao Zhixin, et al. General characteristics of climate changes during the past 2000 years in China. *Science China Earth Science*, 2012, 42(6): 934-942.]
- [48] Glaser R U D, Riemann D. A thousand-year record of temperature variations for Germany and Central Europe based on documentary data. *Journal of Quaternary Science*, 2009, 24(5): 437-449.
- [49] Mariani L, Parisi S, Failla O, et al. Tirano (1624-1930): A long time series of harvest dates for grapevine. *Italian Journal of Agrometeorology*, 2009, 14: 7-16.
- [50] Ge Quansheng, Zheng Jingyun, Man Zhimin et al. Key points on temperature change of the past 2000 years in China. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(8): 730-737.
- [51] 郑景云, 葛全胜, 方修琦, 等. 基于历史文献重建的近2000年中国温度变化比较研究. *气象学报*, 2007, 65(3): 428-439. [Zheng Jingyun, Ge Quansheng, Fang Xiuqi, et al. Comparison on temperature series reconstructed from historical documents in China for the last 2000 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(3): 428-439.]

[52] Ge Quansheng, Zheng Jingyun, Tian Yanyu, et al. Coherence of climatic reconstruction from historical documents in China by different studies. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(8): 1007-1024.

The application of phenological methods for reconstructing past climate change

LIU Yachen^{1, 2}, WANG Huanjiong^{2, 3}, DAI Junhu², LI Tongsheng¹,
WANG Hongli^{2, 3}, TAO Zexing^{2, 3}

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Climate variations inferred from historical phenological records enhance our understanding of the characteristics of the past climate changes. However, the extraction and processing of historical phenological records, the selection of the reconstruction method and the assessment of reconstruction results need to be further summarized. This study first analyzed the data sources and spatial distribution of historical phenological records. Then we discussed pre-processing issue in phenological reconstruction studies such as identification of plant species and specific phenological phases. With regards to the reconstruction methods of past climate changes, we found that earlier studies used the simple comparative method, i.e. directly comparing phenological timing in ancient vs. modern times to reflect climate change. Recent studies often used more complex methods, such as regression and process-based models. Regression models combine the timing of phenological events with climatic factors without considering specific biological process, while process-based models formally describe known or assumed cause-effect relationships between biological processes and some driving factors, e.g. certain environmental variables for plants. The reconstruction results derived from these methods have been conducive to recognize historical climate changes in typical periods of the past 2000 years such as the Medieval Warm Period, the Little Ice Age and quick warming during the last 100 years. In addition, reconstruction results derived from the phenological evidences are consistent with the results derived from other paleoclimatic proxy data, such as tree rings and lake sediments. In the future, in order to obtain more solid and pronounced conclusions in this field, it is necessary to investigate the extraction techniques of historical phenology records, to improve the reconstruction methods and to comprehensively compare the previous reconstruction results, as well as to improve problematic approaches.

Key words: phenology; historical climate changes; climate reconstruction