论文

基于物候记录的中国中部关中地区公元 600~902 年冬半年温度重建

刘亚辰^{①②}, 戴君虎^{②*}, 王焕炯^②, 叶瑜^①, 刘浩龙^②^① 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;^② 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

* 通讯作者, E-mail: daijh@igsnrr.ac.cn

收稿日期: 2016-01-12; 接受日期: 2016-04-01; 网络版发表日期: 2016-08-04

国家自然科学基金项目(批准号: 41171043、41430528)和国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2012CB955304)资助

摘要 历史文献中的物候记录是揭示气候变化的重要证据. 本文从隋唐时期历史文献中提取出周期性气象、水文事件(如初霜日期等)、农业物候记录(如春耕日期等)和观赏植物物候记录(如山桃始花等)等 77 个年份的 87 条历史物候记录. 通过建立现代物候期与气温的转换方程, 并代入上述历史物候期, 重建了中国中部关中地区公元 600~902 年的冬半年(10 月至次年 4 月)温度变化. 关中地区 600~902 年气候可划分为前暖后冷等 2 个阶段, 这一时期冬半年平均温度比 1961~1990 年高 0.23℃. 其中, 600~800 年冬半年温度比现代高 0.38℃, 而 800~902 年比现代低 0.08℃. 上述重建结果与已有研究在整个时段内的平均温度和由暖转寒的阶段相一致, 在各阶段的冷、暖程度上存在一定差异. 本研究为进一步了解中国隋唐时期的温度变化提供了参考.

关键词 物候记录, 温度重建, 隋唐时期, 中国关中地区

1 引言

世界范围内持续的温度观测起始于 1861 年(Houghton 等, 2001). 观测资料的缺乏是研究此前气候变化的主要挑战之一. 而以冰芯、树轮、孢粉和石笋等为代表的自然记录证据, 以及以历史文献为代表的非自然证据作为代用资料发挥了巨大作用.

物候学是研究自然界以年为周期重复出现的各种生物现象和部分非生物事件的发生时间, 及其与

环境条件周期性变化互相关系的科学(Schwartz, 2003). 历史文献中的物候记录作为气候变化的重要证据, 已被广泛用于重建历史时期温度等气候要素的长期变化. 在欧洲, 葡萄的成熟日期、谷物的收获日期、冰的始消融日期等物候期序列被用于重建部分地区和时段的历史温度变化(Chuine 等, 2004; Meier 等, 2007; Etien 等, 2008; Kiss 等, 2011; Možný 等, 2012). 在日本, 樱花的盛花期记录被用以重建中世纪以来的春季温度变化(Aono 和 Kazui, 2008; Aono 和

中文引用格式: 刘亚辰, 戴君虎, 王焕炯, 叶瑜, 刘浩龙. 2016. 基于物候记录的中国中部关中地区公元 600~902 年冬半年温度重建. 中国科学: 地球科学, 46: 1116~1122, doi: 10.1360/07SCES-2015-0251
英文引用格式: Liu Y C, Dai J H, Wang H J, Ye Y, Liu H L. 2016. Phenological records in Guanzhong Area in central China between 600 and 902 AD as proxy for winter half-year temperature reconstruction. Science China Earth Sciences, 59: 1827~1833, doi: 10.1007/s11430-016-5325-5

Saito, 2010).

悠久的历史留存下浩瀚的历史文献资料, 其中包含着丰富的历史物候记录. 基于这些历史物候记录, 中国学者整编出多条长时间尺度的历史物候数据序列, 为进一步重建历史时期气候变化提供了数据基础(龚高法等, 1984; 张学霞等, 2005; 郑景云等, 2012; Ge等, 2014). 竺可桢(1973)开创了利用物候记录重建历史气候变化的研究. 随后, Ge等(2003)主要采用物候证据, 重建了中国中东部地区过去2000年冬半年温度变化. 随着对历史物候记录的深入挖掘和现代物候观测资料的逐步积累, 研究者利用历史文献中的初、终霜雪(郑景云等, 2005; 郝志新等, 2009; 葛全胜等, 2010)和植物物候记录(张福春, 1999; 方修琦等, 2005; 刘炳涛和满志敏, 2012), 重建了中国不同地区和时段的历史温度变化.

隋唐时期(581~907AD)的温度变化是中国历史温度重建研究的热点之一. 有关这一时期的温度变化研究, 目前主要存在如下三种观点: 第一种观点最早由竺可桢(1973)提出, 他根据历史文献中记载的长安城梅树和橘树的分布等, 认为整个隋唐时期温度都比现代温暖. 该观点一度成为对隋唐时期气候变化认识的主流说法(吴宏岐和党安荣, 1998; 朱士光等, 1998; 蓝勇, 2001). 然而, 满志敏(1998)认为隋唐时期长安城内的橘树因受到宫中专人的看护, 而不能作为气候温暖的证据. 他提出了第二种观点, 认为隋唐时期8世纪50年代以前气候温暖, 之后气候转寒. 基于历史文献的定量重建结果也支持第二种观点, 只是各研究在由暖转寒的时段划分上有所差别(Ge等, 2003; 葛全胜等, 2010). Yang等(2002)根据冰芯、

树轮、湖泊沉积和历史文献等代用资料的集成重建结果, 提出了第三种观点, 认为隋唐时期800s以前气候寒冷, 800s以后气候温暖. 综上所述, 有关隋唐时期温度变化的研究存在着一定争议. 究其原因, 可能是缺乏足够的证据用以支持定量重建. 因此, 有必要进一步挖掘隋唐时期的历史物候与气候证据, 并用于重建这一时期更高分辨率和确定性的历史温度变化.

本研究通过提取隋唐时期历史文献中关中地区的物候记录, 依据现代物候与气温观测资料建立物候期距平与气温距平的转换方程, 将古今物候差异代入其中, 得到600~902年关中地区冬半年(10月至次年4月)温度变化, 并分析重建结果的不确定性以及该结果与相关研究的异同. 在此基础上试图回答如下两个问题: (1) 600~902年中国中部地区冷、暖程度如何? (2) 这一时期温度的波动情况是怎样的?

2 数据和方法

2.1 物候与气温数据

本文的研究区是中国中部的关中地区(33°35'~35°50'N, 106°18'~110°37'E)(图1). 该地区由于是隋唐时期(581~907AD)首都长安(今西安)所在地, 留存有许多由史官或有学之士记录的历史文献. 关中地区属于大陆性季风气候, 现代年平均气温7.8~13.5℃, 年平均降水500~700mm(钱林清, 1991).

本文共采用8个历史文献作为历史物候数据源(表1). 由于历史物候记录的记述缺乏现代系统观测的统一规范, 还需依据中国物候观测方法(宛敏渭和刘秀珍, 1979), 对提取出的原始物候数据进行物种鉴

图1 关中地区地理位置与历史文献中提及地点的现代名称

表 1 历史物候数据来源^{a)}

名称	作者	完成时间	记录涉及时间	可提取的信息*
《隋书》	魏徵等	636AD	581~618AD	a ₁ , b, c
《旧唐书》	刘昫等	945AD	618~907AD	a ₁ , b, c
《新唐书》	宋祁等	1060AD	618~907AD	a ₁ , b, c
《资治通鉴》	司马光等	959AD	403BC~959AD	a ₁ , b, c
《册府元龟》	王钦若等	1013AD	2550BC~907AD	a ₁ , a ₂ , b
《全唐诗》	彭定求等	1706AD	618~907AD	a ₁ , a ₂ , a ₃ , a ₄ , b, c
《唐会要》	王溥	961AD	618~907AD	a ₂
《通典》	杜佑	801AD	2550BC~741AD	a ₂

a) *可提取的信息, a: 物候信息, a₁: 周期性气象、水文事件; a₂: 农业物候信息; a₃: 观赏植物物候信息; a₄: 动物物候信息; b: 天气与气候相关现象; c: 人类对气候的感应信息

别和物候期鉴定。例如, 唐朝崇文馆学士刘宪在707年创作的《上巳日祓禊渭滨应制》中有如下诗句: “桃花欲落柳条长”。本文从这句诗中提取出桃花开花末期的物候期记录。但由于桃树包含多个品种, 还需根据桃树各品种的自然分布, 将这条记录中的桃树鉴定到种。在桃树的所有品种中, 山桃(*Amygdalus davidiana*)在关中地区所在的黄河中、下游地区较普遍(龚高法, 1983), 本文据此将这句诗鉴定为山桃开花末期的物候记录。此外, 本文用以物种鉴别的方法还包括利用不同物候期间的顺序性、相关性等规律, 以及查阅植物的引种历史等(刘亚辰等, 2014)。

本文初、终霜雪等物候期的发生日期由历史文献中该年第一次或最后一次出现霜、雪记载的日期确定。秋收日期则根据历史文献中记载的收税日期进行确定, 因为秋收和征秋税在时间上是紧密相连的(Aono和Kazui, 2008; Aono和Saito, 2010; Kiss等, 2011; Možný等, 2012)。最后, 还需依据万年历将历史文献中记载的农历日期转化为现代公历日期。

利用上述数据源和方法, 本文共提取出271条记录。这些记录可被划分为如下三类(表1)。

(i) 物候记录。本文共提取出77个年份的87条物候记录, 包括: (1) 42条周期性气象、水文记录(初、终霜雪日期); (2) 25条农业物候记录(春耕日期、冬小麦收获日期和秋收日期); (3) 20条观赏植物物候记录(山桃始花期、白花泡桐始花期、山桃盛花期、杏盛花期、牡丹盛花期、山桃开花末期、垂柳果实脱落始期)。这些物候记录被直接用以定量重建隋唐时期的温度变化。图2展示了本文的历史文献证据, 尤其是

历史物候数据在研究时段(600~902AD)的分布状况。在本文的研究时段内, 每10年存在至少一条物候数据的概率为83.9%, 每30年存在至少一条物候数据的概率为100%(图2)。因此, 从历史文献中提取的上述物候记录足够用以重建整个研究时段的温度变化。

(ii) 天气与气候相关现象。本文提取出降雪、降霜、植物的二次开花和水面结冰等第二类记录共计168条。

(iii) 人类感应证据。第三类证据包括“极寒”、“冻死”、“暖冬”等人类对天气及气候的感受状况, 共计16条。

第二类和第三类证据不参与定量重建, 而被用以验证最终的重建结果。通过对比第二、三类证据的发生频率和持续时间, 可间接指示气候的温暖或寒冷情况。

现代物候数据来自中国物候观测网西安站点的

图 2 研究时段内每 10 年历史物候记录的条数

数据. 除1997~2002年观测中断无记录外, 该站点自1963年以来, 在其他时段均有连续观测记录. 对应的现代气温数据来自中国气象局. 鉴于部分现代物候期观测记录的缺乏, 本文参照前人研究, 利用气象数据对这些物候期进行推算. 例如, 现代春耕日期以日平均气温稳定(连续5天)高于5℃为条件进行推算(葛全胜等, 2010). 同理, 现代秋收日期则依据日平均温度稳定(连续5天)低于10℃为条件进行推算(郝志新等, 2009).

2.2 转换方程的建立与温度序列的重建

大量研究表明, 气温对植物物候期具有显著影响, 而其他因素对植物物候的影响则处于次要地位(Sparks等, 2000; Root等, 2003; Badeck等, 2004; Dai等, 2013). 气温与植物物候之间的显著相关关系是基于历史物候记录重建历史温度变化的基础. 由于提取的历史物候事件大多发生于冬半年, 因此本文依照前人研究(Ge等, 2003; 郑景云等, 2005; 葛全胜等, 2010), 选择重建隋唐时期关中地区的冬半年温度距平. 另外, 通过分别计算相应物候期与冬半年平均温度以及年均温的相关系数, 本文发现所涉及的物候期都与冬半年平均温度具有更高的相关性(表2). 在将现代物候期数据与气温数据转换成相对于参考时

段(1961~1990年)的距平值序列之后, 本文利用线性回归方法建立物候期距平与气温距平的转换方程. 转换方程可表达如下:

$$y = ax_i + b, \quad (1)$$

式中, y 为单个年份的冬半年温度距平, x_i 为相应的物候期距平. 参数 a 和 b 由最小二乘法估计, 并分别表示线性回归方程的斜率和截距. 重建结果的不确定性由参数 a 和 b 在95%置信水平下的误差区间进行估计.

然后, 将各历史物候期距平分别代入到对应的转换方程中, 即可得到历史时期单个年份的温度距平. 如果某个年份存在2条及以上的物候记录, 则分别将这些历史物候记录代入到对应的转换方程中, 再对得到的多个结果求算术平均, 作为该年的温度距平. 最后, 对上述得到的单个年份的温度距平重建结果进行10年滑动平均, 以反映历史时期温度的变化趋势.

3 结果

表2列出了本文通过线性回归方法得到的现代物候期距平与温度距平的转换方程(以1961~1990年为参考时段). 其中大多数(11/14)物候期与冬半年温度存在显著($P < 0.05$)的相关关系(表2). 各转换方程在

表2 各物候期与冬半年温度的转换方程^{a)}

物候期	转换方程	数据量	相关系数	95%置信水平上的标准误差(℃)
初霜日期	$y=0.031x+0.044$	53	0.39**	±0.74
终霜日期	$y=-0.030x-0.049$	53	-0.44**	±0.71
初雪日期	$y=0.0060x$	48	0.29	±0.34
终雪日期	$y=-0.0030x$	46	-0.17	±0.35
春耕日期	$y=-0.028x+0.19$	62	-0.38**	±0.77
冬小麦收获日期	$y=-0.088x+0.89$	22	-0.56*	±0.60
秋收日期	$y=0.029x+0.30$	61	0.28*	±0.80
山桃(<i>Amygdalus davidiana</i>)始花期	$y=-0.067x+0.34$	38	-0.53**	±0.67
山桃(<i>Amygdalus davidiana</i>)盛花期	$y=-0.075x+0.32$	38	-0.57**	±0.65
山桃(<i>Amygdalus davidiana</i>)开花末期	$y=-0.058x+0.42$	37	-0.47**	±0.70
白花泡桐(<i>Paulownia fortunei</i>)始花期	$y=-0.055x+0.60$	22	-0.54**	±0.70
牡丹(<i>Paeoniasuffruticosa</i>)盛花期	$y=-0.074x+0.29$	38	-0.61**	±0.63
杏(<i>Armeniaca vulgaris</i>)开花盛期	$y=-0.024x+0.15$	27	-0.28	±0.47
垂柳(<i>Salix babylonica</i>)果实脱落始期	$y=-0.045x+0.43$	25	-0.69**	±0.62

a) *在0.05水平(双侧)上显著相关; **在0.01水平(双侧)上显著相关

95%置信水平上的标准误差介于 $0.34\sim 0.80^{\circ}\text{C}$, 重建结果的平均误差为 0.63°C .

将历史文献中提取出的87条物候记录的距平值代入上述相对应的转换方程中, 即可得到600~902年关中地区的冬半年温度距平(图3). 由于有10个年份各存在2条记录, 因此最终重建结果为77个年份的冬半年温度距平. 该结果显示, 600~902年关中地区的冬半年温度平均值比现代(1961~1990平均值, 下同)高 0.23°C . 研究时段内, 关中地区冬半年温度主要经历了如下两个阶段的变化.

第一阶段(600~800AD)是一个相对温暖的时段, 冬半年温度比现代高 0.38°C . 这一时段的重建证据包括春耕日期、山桃始花期、冬小麦收获日期和秋收日期等的提前, 以及初雪日期的推迟等. 其中, 本文在这个时段提取出的15条春耕记录中, 有13条记录的日期比现代早. 天气与气候相关证据也支持上述重建结果. 本文从整个研究时段(600~902AD)共提取出有明确记载“冬无雪”的年份23个, 其中22年(95.6%)发生在600~800AD. 人类感应记录也支持这一时段较为温暖的结论. 例如,《资治通鉴》在贞观二十一年三月(647年4月10日至5月9日)有如下记录:“上得风疾, 苦京师盛暑”;《旧唐书》在736年有如下记载:“大热, 道路有暍死者”. 这一阶段重建的温度最高年份为664年, 其冬半年温度比现代高 1.75°C .

然而, 第一阶段并非持续温暖. 其间, 寒冷事件偶有发生. 例如, 上文提到的刘宪诗中的山桃开花末

期记录就比现代平均晚9天, 该年(707AD)的温度也比现代低 0.10°C . 同时, 656年的初霜记录比现代平均提前了34天, 温度也比现代低 1.01°C . 寒冷事件也在人类感应记录方面有所体现. 在这一时段,《新唐书》、《旧唐书》和《册府元龟》各有3条人畜冻死的记载.

在800年左右, 关中地区冬半年气候转寒, 进入第二个阶段(800~902AD). 这一时段的冬半年平均温度比现代低 0.08°C . 该重建结果与牡丹、杏盛花期较晚以及初雪日期较早有关.《新唐书》和《旧唐书》均记载了元和十五年(820AD)的第一次降雪日期为八月己卯(9月20日), 这比现代关中地区的平均初雪日期提前了56天, 其重建的冬半年温度比现代低 0.34°C . 天气与气候相关证据方面, 本文从整个研究时段(600~902AD)中共提取出86条寒冷事件(霜、雪)记录, 即整个研究时段的寒冷事件频率为0.28, 而第二阶段(800~902AD)的寒冷事件频率却高达0.39. 在这一时段, 历史文献中共出现“大雪”的记录34次, 而“无雪”的记录仅有4次. 人类感应证据也表明800~902AD相对寒冷. 唐朝诗人韩愈在803年创作的《苦寒》中就有“侵炉不觉暖”一句描述了当时的寒冷程度. 10年后, 他又在《酬蓝田崔丞立之咏雪见寄》之中写到“京城数尺雪, 寒气倍常年”, 再一次表明了这一时段的寒冷.

4 讨论

历史文献的不确定性检验与其他自然代用资料存在较大的差异(Pfister等, 2008). 本文的重建误差主要存在于如下几个方面. 首先, 本文的第一类误差源自历史文献本身. 由于中国历史文献存在“记异不记常”的特点(葛全胜和张丕远, 1990; 郑景云等, 2005; 郝志新等, 2009), 本文由初、终霜雪证据重建的结果可能反映的是气候的极端情况而非平均状况, 这类误差由于不可控而难以避免. 本文的第二类误差来自物候期距平与温度距平的转换方程. 如表2所示, 转换方程造成的误差在 $0.34\sim 0.80^{\circ}\text{C}$. 大多数情况下, 第二类误差对重建结果的影响仅体现在冷、暖程度上, 不会影响到各时段气候冷、暖的判定(图3).

为评估重建结果的准确性, 本文将600~902年关中地区冬半年温度距平序列与相关研究重建结果进

图3 关中地区 600~902 年冬半年温度距平

黑点代表重建的 77 个单年的冬半年温度距平, 黑色虚线为 10 年滑动平均后的结果, 灰色区域代表线性回归在 95%置信水平上的误差区间

行了对比. 为方便对比, 先将本文重建结果转换为30年分辨率的温度距平(图4a). 第一条用以对比的序列是基于历史文献重建的中国中东部分辨率为30年的冬半年温度距平(以1951~1980为参考时段)序列(Ge等, 2003)(图4b). 第二条对比序列为基于树轮重建的亚洲地区分辨率为年的年均温距平(以1961~1990为参考时段)序列(Ahmed等, 2013)(图4c). Ge等(2003)的重建结果在600~900AD内的温度距平(+0.29℃)和温度变幅(1.70℃)与本文的温度距平(+0.23℃)和温度变幅(1.33℃)相近. 此外, 上述两条序列在800s左右均存在一个明显的气候由暖转寒的过程, 且两序列最寒冷的时段都集中于研究时段的最后数十年. 三条序列都识别出了800~900AD这一相对寒冷的时段, 这也证明了基于历史文献资料, 尤其是基于历史物候资料的重建结果的有效性和准确性. 同时, 本文拥有更多的重建资料, 进一步提高了重建结果的可靠程度.

然而, 三个重建结果同样存在差异. 研究时段内, Ge等(2003)的重建序列呈现出由最暖至最冷的非线性下降趋势, 而本文的重建结果更接近于暖-冷-暖-冷的波动形式. 两研究在各时段的冷、暖程度上也有所差异. 本文最暖的30年(600~630AD)温度比现代高0.86℃, 而最冷的30年(870~900AD)温度比现代低0.24℃. Ge等(2003)重建结果的最暖和最冷30年温度距平则分别为+1.10℃(630~660AD)和-0.60℃(870~900AD). 亚洲树轮的重建结果(Ahmed等, 2013)与本文的差异主要集中于800~900AD的寒冷程度之上. 上述三个研究的重建结果差异可能源自代用资料本身、数据的处理方式, 以及重建时、空分辨率差异等多个方面.

5 结论

尽管此前有许多研究对隋唐时期气候变化进行了探讨, 但本文首次系统采用物候记录分析研究时段关中地区的气候变化. 本文以历史文献中提取出的物候记录作为代用资料, 建立物候期距平与气温距平的转换方程, 将古今物候差异代入其中, 得到隋唐时期关中地区公元600~902年的冬半年温度距平. 结果显示, 关中地区600~902年的冬半年温度比现代略高. 其中, 前200年温度比现代高0.38℃, 而在

图4 600~900年温度重建结果对比

(a) 本文重建的关中地区分辨率为30年的冬半年温度距平; (b) 基于历史文献重建的中国中东部地区分辨率为30年的冬半年温度距平(Ge等, 2003); (c) 基于树轮重建的亚洲地区分辨率为30年的年均温距平(Ahmed等, 2013). 黑色虚线代表分辨率为1年的原始年均温距平序列

随后的时段气候转冷, 平均比现代低0.08℃. 上述结果为理解中国隋唐时期的气候变化提供了参考.

参考文献

- 方修琦, 萧凌波, 葛全胜, 郑景云. 2005. 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, 25: 74~79
- 葛全胜, 张丕远. 1990. 历史文献中气候信息的评价. 地理学报, 45: 22~30
- 葛全胜, 刘浩龙, 郑景云, 张学珍. 2010. 隋唐时期东中部地区温度变化的重建(601~920年). 科学通报, 55: 3048~3052
- 龚高法. 1983. 历史时期气候变化研究方法. 北京: 科学出版社. 53
- 龚高法, 张丕远, 张瑾璐. 1984. 北京地区自然物候期的变迁. 科学通报, 3: 1517~1519
- 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. 第四纪研究, 29: 871~879
- 蓝勇. 2001. 唐代气候变化与唐代历史兴衰. 中国历史地理论丛, 16: 4~15
- 刘炳涛, 满志敏. 2012. 《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, 27: 16~22
- 刘亚辰, 王焕炯, 戴君虎, 李同昇, 王红丽, 陶泽兴. 2014. 物候学方法在历史气候变化重建中的应用. 地理研究, 33: 2~15
- 满志敏. 1998. 关于唐代气候冷暖问题的讨论. 第四纪研究, 1: 20~30
- 钱林清. 1991. 黄土高原气候. 北京: 气象出版社. 54
- 宛敏渭, 刘秀珍. 1979. 中国物候观测方法. 北京: 科学出版社. 18
- 吴宏岐, 党安荣. 1998. 隋唐时期气候冷暖特征与气候波动. 第四纪研究, 2: 31~38
- 张福春. 1999. 花信风与我国公元六世纪气候的重建. 地理研究, 18:

- 143–147
- 张学霞, 葛全胜, 郑景云, 张福春. 2005. 近150年北京春季物候对气候变化的响应. *中国农业气象*, 26: 263–267
- 郑景云, 葛全胜, 郝志新, 仲舒颖, 马翔, 张学珍. 2012. 过去150年长三角地区的春季物候变化. *地理学报*, 67: 45–52
- 郑景云, 满志敏, 方修琦. 2005. 魏晋南北朝时期的中国东部温度变化. *第四纪研究*, 25: 129–140
- 竺可桢. 1973. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. *中国科学*, 2: 15–38
- 朱士光, 王元林, 呼林贵. 1998. 历史时期关中地区气候变化的初步研究. *第四纪研究*, 2: 1–11
- Ahmed M, Anchukaitis K J, Asrat A, Borgaonkar H P, Braidia M, Buckley B M, Buntgen U, Chase B M, Christie D A, Cook E R, Curran M A J, Diaz H F, Esper J, Fan Z X, Gaire N P, Ge Q S, Gergis J, Gonzalez-Rouco J F, Goosse H, Grab S W, Graham N, Graham R, Grosjean M, Hanhijarvi S T, Kaufman D S, Kiefer T, Kimura K, Korhola A A, Krusic P J, Lara A, Lezine A M, Ljungqvist F C, Lorrey A M, Luterbacher J, Masson-Delmotte V, McCarroll D, McConnell J R, McKay N P, Morales M S, Moy A D, Mulvaney R, Mundo I A, Nakatsuka T, Nash D J, Neukom R, Nicholson S E, Oerter H, Palmer J G, Phipps S J, Prieto M R, Rivera A, Sano M, Severi M, Shanahan T M, Shao X M, Shi F, Sigl M, Smerdon J E, Solomina O N, Steig E J, Stenni B, Thamban M, Trouet V, Turney C S M, Umer M, van Ommen T, Verschuren D, Viau A E, Villalba R, Vinther B M, von Gunten L, Wagner S, Wahl E R, Wanner H, Werner J P, White J W C, Yasue K, Zorita E. 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nat Geosci*, 6: 339–346
- Aono Y, Kazui K. 2008. Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century. *Int J Climatol*, 28: 905–914
- Aono Y, Saito S. 2010. Clarifying springtime temperature reconstructions of the medieval period by gap-filling the cherry blossom phenological data series at Kyoto, Japan. *Int J Biometeorol*, 54: 211–219
- Badeck F W, Bondeau A, Böttcher K, Doktor D, Lucht W, Schaber J, Sitch S. 2004. Responses of spring phenology to climate change. *New Phytol*, 162: 295–309
- Chuine I, Yiou P, Viovy N, Seguin B, Daux V, Ladurie E L. 2004. Historical phenology: Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 432: 289–290
- Dai J H, Wang H J, Ge Q S. 2013. Multiple phenological responses to climate change among 42 plant species in Xi'an, China. *Int J Biometeorol*, 57: 749–758
- Etien N, Daux V, Masson-Delmotte V, Stievenard M, Bernard V, Durost S, Guillemin M T, Mestre O, Pierre M. 2008. A bi-proxy reconstruction of Fontainebleau (France) growing season temperature from 1596 to 2000AD. *Climate of the Past*, 4: 91–106
- Ge Q S, Wang H J, Zheng J Y, Rutishauser T, Dai J H. 2014. A 170 year spring phenology index of plants in eastern China. *J Geophys Res Biogeosci*, 119: 301–311
- 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
- Houghton J T, Ding Y H, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. 2001. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 156
- Kiss A, Wilson R, Bariska I. 2011. An experimental 392-year documentary-based multi-proxy (vine and grain) reconstruction of May–July temperatures for Kőszeg, West-Hungary. *Int J Biometeorol*, 55: 595–611
- Meier N, Pfister C, Wanner H, Rutishauser T, Pfister C, Wanner H, Luterbacher J. 2007. Grape harvest dates as a proxy for Swiss April to August temperature reconstructions back to 1480AD. *Geophys Res Lett*, 34: 22–28
- Možný M, Brázdil R, Dobrovolný P, Trnka M. 2012. Cereal harvest dates in the Czech Republic between 1501 and 2008 as a proxy for March–June temperature reconstruction. *Clim Change*, 110: 801–821
- Pfister C, Luterbacher J, Wanner H, Wheeler D, Brázdil R, Ge Q S, Hao Z X, Moberg A, Grab S, del Prieto M R. 2008. Documentary evidence as climate proxies. Proxy-specific White Paper produced from the PAGES/CLIVAR workshop, Trieste: 1–5
- Root T L, Price J T, Hall K R, Schneider S H, Rosenzweig C, Pounds J A. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421: 57–60
- Schwartz M D. 2003. Phenology: An Integrative Environmental Science. Dordrecht. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 2
- Sparks T H, Jeffree E P, Jeffree C E. 2000. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *Int J Biometeorol*, 44: 82–87
- 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: 38–42