

植物物候对气候变化的响应

陆佩玲¹, 于 强^{2*}, 贺庆棠¹

(1. 北京林业大学资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:植物物候的变化可以直观地反映某些气候变化, 尤其是气候变暖。植物生长节律的变化引起植物与环境关系的改变。生态系统的物质循环(如水和碳的循环)等过程将随物候而改变。不同种类植物物候对气候变化的响应的差异, 会使植物间和动物间的竞争与依赖关系也发生深刻的变化。目前欧洲、美洲、亚洲等许多地区均有关于春季植物物候提前, 秋季物候推迟, 使植物的生长季延长, 从而提示气候变暖的趋势。植物物候的模拟模型构成生态系统生产力模型的重要部分。

关键词:植物物候; 气候变化; 生长季; 物候模型

文章编号: 1000-0933(2006)03-0923-07 **中图分类号:** S153 **文献标识码:** A

Responses of plant phenology to climatic change

LU Pei-Ling¹, YU Qiang^{2*}, HE Qing-Tang¹ (1. College of Forest Resources and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 923 ~ 929.

Abstract: Changes in plant phenology directly manifests the change of climate, especially climate warming. The changes in rhythm of plant growth may alter plant-environment relationships, hence the mass cycles, such as water and carbon, in the ecosystem. Individual plant species respond to climatic changes differently, which may cause great changes in competition and dependence among different species and plant-animal interactions. In the past few years, many reports showed that the plant phenology toward early in spring and late in autumn in Europe, America, and Asia. The changes in plant phenology result in a lengthening growing season, and indicate a warming climate. Phenological model is an important component of ecosystem productivity models, which may play a key role in analysis of vegetation-atmosphere interactions.

Key words: plant phenology; climatic change; growth season; phenology model

研究由环境因子驱动的植物发育期的物候学(Phenology)是一门古老学科, 物候学主要是研究自然界动植物与环境条件(气候、水文、土壤条件)周期性变化之间相互关系的科学^[1]。物候学研究植物的生长荣枯、动物的季节活动, 从而了解气候变化对动植物影响以及自然季节变化规律^[2]。由环境因子驱动的植物和动物的季节活动对环境变化敏感并且容易观测^[3]。因而, 物候是气候变化的重要感应器。近 100a 来, 尤其是在最近 20 多年, 气候变暖已成为全球关注的重要问题。物候对全球变暖的响应研究正在成为物候研究的一个新的热点领域^[4]。本文将简要概述国内外气候变化对植物物候影响的研究进展, 并对我国将来物候研究提出建议和展望。

1 植物物候对气候变化响应的研究意义

1.1 物候研究的意义

植物物候是指植物受生物因子和非生物因子如气候、水文、土壤等影响而出现的以年为周期的自然现象,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40328001)

收稿日期: 2005-07-13; **修订日期:** 2005-12-20

作者简介: 陆佩玲(1964~), 女, 江苏苏州人, 博士, 副教授, 主要从事森林气象和森林生态研究. E-mail: pllu2004@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yuq@igsnrr.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No.40328001)

Received date: 2005-07-13; **Accepted date:** 2005-12-20

Biography: LU Pei-Ling, Associate professor, mainly engaged in forest meteorology and forest ecology. E-mail: pllu2004@yahoo.com.cn

它包括各种植物的发芽、展叶、开花、叶变色、落叶等现象。物候是监测气候对植被影响优秀仪器,气候变化可以通过物候年变化(如叶片的展开、开花)等来监测^[5]。当研究对生物圈有影响的因子时,研究气候变化对植物发育的影响非常重要^[6]。物候易于观测和理解,物候资料和物候的变化容易被普通大众所接受,能作为气候变化对生态影响的感应器,因此,必须建立基于气候变化公约的物候监测计划^[7]。

基于 21 世纪温室气体的增加,科学家预测地球上温度将继续升高 1.4 到 5.8℃,这将对地球上的自然系统和人类社会产生相当大的后果,过去 10a 的气候变化已大大影响到物候期,20 世纪温度的升高已经延长了生长季平均 3 个星期,将来的气候变化将毫无疑问影响到自然历^[8]。物候资料对于管理农业和林业、控制病虫害、保护生物多样性、以及人类健康起了关键性的作用^[9]。Sparks^[1]指出生态学家和政策决策者目前对物种将怎样受气候变化影响非常关注,不幸的是关于动植物的监测很少,无法显示物种响应气候的长期趋势。

物候是由环境因子驱动的动植物季节性活动的传统学科,已经发现与全球气候变化的研究有密切关系^[10]。物候对环境监测起到越来越重要的作用,它能监测与生态系统有关的气候参数^[11]。物候观测为植物生长和发育模型的设计和试验提供了资料,由温度驱动的热量累积对植物发育有很大影响,因此,自然物种的物候观测能用来描述气候^[12]。目前全球气候变化研究焦点在于物种如何响应过去以及将来的气候变化^[13, 1]。Chmielewski^[14]认为在确定植物如何响应区域气候条件和气候变化方面,物候观测是最敏感的资料之一。因此,近来物候已经成为生态研究的重要热点之一^[15],它在全球模型、全球监测和气候变化问题方面的研究具有重要作用^[10, 12, 16, 17]。物候在气候变化研究中对全球模型、遥感和影响评估非常重要^[7]。从以上分析看出,物候研究具有重要的理论意义,同时在生产实践上具有很大的应用潜力。

1.2 物候是国际前沿关注的焦点之一

国际生物气象学会(ISB, International Society of Biometeorology))物候委员会的主要宗旨是加强对气候变化影响植物动态的理解;监测动植物物候和生物多样性的变化,为生态系统全球变化监测和预报形成一个有效的研究系统。全球物候监测网(GPM, Global Phenological Monitoring)创始于国际生物气象学会“植物动态、气候和生物多样性”委员会,全球物候监测园主要建立在中纬度地区,选择了大量物种观测气候的物候响应,它的主要目标是连接局地物候监测网,鼓励建立和增加全球物候观测网,进一步加强世界物候学家之间的交流与合作,收集物候研究信息和建立资料库,鼓励气候变化、全球变化监测、农业、人类健康等方面的物候研究;物候学家已经建立了物候信息国际互联网站,如欧洲物候观测网(EPN, The European Phenology Network)和英国物候观测网(UKPN, The United Kingdom Phenology Network)等^[18]。

2 气候变化对植物物候的影响

就气候变化而言,物候是生态系统响应的感应器,由气候驱动的植物动态变化将影响到物种之间的相互作用和最终影响到生态系统的组成和结构,生物多样性也将响应这种变化,已经有许多关于气候变化对生态系统影响方面的研究^[1, 13, 19-22]。

近 50a 来,随着全球变暖,我国北方绝大部分地区,夏季明显增长,平均增长 5.8d;冬季变短,平均缩短 5.6d,春夏季明显提早,秋冬明显推迟。季节变化势必引起作物生长季和成熟期的变化^[23]。徐雨晴等^[24]分析了北京近 50a 春季物候的变化规律及其对气候变化的响应,近十几年来北京春季物候持续偏早,与北京近年持续的暖冬相一致,估计未来 10 多年春季物候仍持续偏早。郑景云、葛全胜等^[25, 26]根据中国科学院物候观测网络 26 个观测点的物候资料,分析了近 40a 我国木本植物物候变化及其对气候变化的响应,研究得到由于 20 世纪 80 年代以后我国大部分地区春季增温及秦岭以南地区降温,东北、华北及长江下游等地区物候期提前,西南东部、长江中游等地区物候期推迟。

长期物候观测资料对环境监测非常重要,由于有大量的观测资料,物候趋势在欧洲已经被研究^[7, 27-29],仅欧洲国际物候园(IPG, International Phenology Garden)就已经总结了欧洲中西部地区区域尺度的物候观测资料^[29, 30],这些研究显示现在的春季物候比 50a 前提前 10~20d,变化速率在物种之间、地区之间和年际之间有差异。Sparks 和 Carey^[1]用 200 年 Marsham 物候观测资料发现冬季温度的升高与某些植物开花提前相关,在过

去 80a 里爱沙尼亚春季提前了 8d。英国的物候趋势已经被 Fitterd 等^[31]以及 Sparks 和 Carey^[11]所描述,总的预测是全球温度升高 3.5℃,春季开花将提前 2 周左右。Walkovszky^[6]比较了匈牙利 1851 ~ 1994 年期间 3 个不同时段刺槐树开花期图,发现开花期明显提前了 3 ~ 8d,这种变化可能与春季平均温度有关。大量的物候研究报道了春季物候的提早^[15]。Ahas^[7]在欧洲爱沙尼亚 3 个观测点,收集了 132a 云雀到来的资料,78a 银莲花、樱桃树、苹果树和紫丁香开花期等物候资料,分析结果是在过去 80a 里,春季物候已经平均提前 8d。Sparks^[9]研究了英国 11 个植物物种 58a 的平均开花时间,结果表明由于气候变暖,春季和夏季物种的开花时间将会进一步提前。从 1951 起瑞士已经开始了全国物候观测,清楚的趋势是春季物候的提前和秋季物候的推迟^[28]。Ahas^[32]研究得到欧洲中西部春季物候提前 4 周,白桦树、苹果和紫丁香的春季物候每年提前 0.3d。

物候对气候变化的监测有贡献^[33]。物候期对气象条件的年际变化极其敏感,尤其在中纬度春季^[34],长期的物候记录提供了在特定地点某个生物对气候变化响应^[1]。研究显示在北美东北和西北部物候也有显著变化,在过去的 40a 里春季物候平均提前 4 ~ 5d^[35, 36]。Beaubien 和 Freeland^[35]报道了加拿大 Edmonton/Alberta 白杨树在 1990 ~ 1997 年中首次开花时间每 10a 提前 2.7d;1936 ~ 1996 年期间樱桃树的春季首次开花时间每 10a 提前 1.3d。

3 气候变化对植物生长季的影响

近年来,大尺度范围内陆地植被生长季的确定已经成为全球气候变化重要的科学问题。物候生长季成为一个全球陆地碳循环模型和净初始生产力模型的重要参数^[37],植物物候发生的时间和物候生长季长度是估算季节和年际气候变化对陆地植被影响,及其估算植被对 CO₂ 季节循环作用的主要状态变量。一些研究已经显示出在北半球生长季节的伸长^[16, 38]。

陈效述^[39]探讨了德国中部 Taunus 山区 3 个地点的树木物候生长季节与气温生长季节年际波动特征之间的关系,春季温度越高,温度 > 5℃ 初日越早,物候生长季越长;春季温度越低, > 5℃ 初日越晚,物候生长季越短。为了用陆地数据标准化植被指数 (NDIV) 资料获得精确的生长季估算,建立局地生长季和区域生长季之间以及表面物候生长季和卫星感应生长季之间的相互关系,这是研究全球变化影响的关键^[40]。

Myneni^[16]利用 1981 ~ 1991 年卫星资料注意到在北纬 45 ~ 70°N 生长季延长了 8d。Menzel^[3, 42]分析了欧洲 1959 ~ 1996 年期间国际物候园物候观测资料发现,叶片展开每年已经提前了 6.3d,而叶片变色每年已经推迟了平均 4.5d,因此平均年生长季增长了 10.8d。Chmielewski 等^[14]利用 1969 ~ 1998 年国际物候园物候资料,研究了近年来欧洲气候变化对植物发育的影响,研究结果是在早春 2 ~ 4 月份变暖 1℃ 将导致生长季提前 7d,年平均气温增加 1℃ 将导致生长季节延长 5d。Menzel^[30]分析了德国 20 种植物 1951 ~ 2000 年物候观测资料,研究发现春季温度每上升 1℃ 物候提前 2.5 ~ 6.7d,生长季延长 2.4 ~ 3.5d。

4 植物物候与气候变化模拟模型的研究

物候是研究由环境因子特别是气候因子驱动的季节性植物活动,因此已经逐渐被生物圈模型学家关注^[10, 16]。植物生长季是植被冠层光合作用活跃期,它是驱动陆地初始生产力和全球碳循环的主要因素,目前物候模型在区域生态系统模拟模型^[43, 44]和生物圈-大气圈综合环流模型中起了相当显著的作用^[45]。Schwartz^[17]认为物候模型将最终提供关键性的参数,这个参数在全球气候模拟中是必需的,目前这些值都来自于卫星遥感资料^[45]。

确定植物物候响应环境变化的类型和机制,对预测气候变化对植物和植物生态系统的影响是非常必要。过去研究主要注重某一植物开花期预测模型的研究上,还没有研制出比较不同植物的物候期模型^[1]。近 100a 来,学术界对植物物候的研究有两个主要方面:(1)注重植物发育期与非生物环境因素如光周期、平均温度、积温、水分和积雪等之间的关系;(2)注重植物物候的遗传基础和自然过程^[46]。

为了定量研究气候变化对植物生长的影响,有必要开发各种物候模型用来描述气候驱动与植物物候响应之间的因果关系。物候模型或物候—气候模型是相当经验性的,它们的建立要求对长期观测资料进行统计分析,在一些文献刊物中,有大量的模型描述物种物候对温度的响应,模型方法有各种统计分析模型^[47]、机理模

型^[48],这种模型通常仅仅基于温度的影响,或考虑温度与光周期或其他光因子的综合影响^[49, 50];有关水分与物候之间相互关系的研究就相应很少。通用模型通常是精确描述资料的统计模型,然而作为统计模型,并不能描述气候与物种之间的机理关系;它们估算将来气候变化的潜力是有限的^[12]。

Snyder^[51]认为热量通常被用来预测植物物候发育速率,发育速率作为空气温度的函数,随温度的增加接近与线性增加,热量如度-小时、度-天被用于定量计算物候发育速度。植物发育预报通常是用度-日方法进行,如适当的界限温度和基本温度的选择,以及累积温度起始时间的准确选择等,有计算温度曲线的积分法、三角形方法、正弦波方法等^[52, 53]。另外,模型的改进可以用度-日方法计算加入上限温度或加入影响物候的其他环境因子如水分、光量和光质^[54, 55]。模拟物候期最古老最广泛使用的是积温方法,累积某一界限温度以上平均温度被作为独立变量,如树木发芽,瞬时温度被认为直接同发芽速率有关,而积温代表芽的发育状态,按传统的积温方法,芽的发育速率假设同温度是线性关系,然而已经提出了不同的响应函数^[56],在动力发芽模型中,这种响应有时代替温度的线性函数^[49]。Sparks^[9]表明开花期对温度的响应被认为是接近线性关系。在Marsham物候资料的分析中曲线关系是很明显的^[1]。Ahas^[57]利用爱沙尼亚1948~1996年3个气象站24个物候期编辑了物候历,并分析了气候变化上下2℃变化后物候的可能变化,用线性统计分析显示春季和夏季物候提前,而秋季推迟。Leinonen^[56]评论了不同的动力物候模型方法,并利用一个基于过程的森林生态系统模型估算了光合作用持续时间对北方针叶林净初始生产力和总初始生产力的重要性,模型预测到由于气候变暖导致了光合作用持续时间的延长。

局地尺度上物候模型的近期进展是充分地改进区域物候模型,自从20世纪80年代,几种物候模型已经被改进^[58, 59],这些基于过程的模型,它们的假设是基于物候对各种环境变量响应的实验结果,即使它们是在局部地区拟合的,但允许大尺度的预测。物候模型的尺度能力从来没有被预测过,是因为无论在内部条件^[48, 60]还是在外部条件下拟合总是不精确,通过模型拟合方法和模型统计假设的改进^[59, 61],模型的有效性已得到改进。Chuine^[62]利用19世纪末美国俄亥俄州物候资料以及20世纪Ontario、Québec与Maryland空中花粉资料进行了研究,结果显示特殊物种物候模型尽管是在局部地区拟合的,但也能预报区域性物候,植物*Ulmus americana*的开花时间每年提前0.2d,此模型能预测与气候变化有关的物候趋势。

从个体树种物候到区域生态系统物候的移植,首先要求估算在局部尺度开发的物种物候模型在区域尺度上的有效性。在个体生物尺度上已经初步得到研究,但是目前必须外推到气候模型的区域尺度和全球尺度,遥感资料已经起了重要的作用,如冠层覆盖度标准差植被指数(NDVI)^[63]、叶面积指数^[64]和生产力等资料,某些研究已经用NDVI资料来估算区域物候^[65],以及开发区域尺度的物候模型。遥感技术的发展通过产生同生物圈有关的精确而广泛的资料库,也对物候的发展规律做出了贡献^[66]。White等^[42]提出了一个基于温度和积温的落叶阔叶林生长物候回归模型,从个体树木物候到区域生态系统物候的过渡,首先要求估算局地尺度物种物候模型在区域尺度上的有效性,NDVI资料提供了植被物候,空中花粉资料提供的是生产力物候,进一步说,NDVI提供了整个生态系统的响应而没有考虑遗传特征,空中花粉资料提供了遗传因素对气候的响应,虽然物候不能被用在初始生产力模型中,但它能有效地反映全球气候变化对植被的影响^[67]。

随着全球变化和气候年际变化发生,物候资料被认为是生物圈响应精确模型必要的输入项^[10, 18]。描述由气候季节性驱动影响树木物候的机理模型将得到开发和试验,仅仅用这种模型可以就气候变化对森林生态系统功能和生产力影响作出评估^[33, 68]。Kramer^[33]利用模型预测到温度升高1℃植物*Fagus sylvatica*展叶将提前3.6d。Kramer等^[69]综述了与北方针叶林、温带落叶林和地中海针叶林森林生态系统有关的物候模型,将这些物候模型耦合到基于过程的估算不同气候变化对生长影响的森林模型中,结果显示各类森林物候都大大影响到一定气候变化下的生长发育,然而这些物候模型、生长模型、参数变量的获得等方面都有很多不确定性。预报野生植物开花期对人类活动特别是对农事活动都是有用的,Cenci等^[70]根据意大利中部(Guidonia)1960~1982年500个物种开花期原始资料,建立了57个野生物种开花期预报3个物候-气候模型。

森林树木发芽、落叶、光合作用开始和结束时间等物候期和生长季都对北方森林年光合生产力有很大影

响^[16],随着全球温度的升高,物候变化可能是影响将来北方森林碳储存潜力最重要的因子之一,春季温度强烈影响发芽期或光合作用,在北方森林生态系统模型中,树木物候是最重要的过程之一,春季温度是影响树木发芽时间最重要的因子之一,建立发芽期与气象因子(如月平均气温)的经验模型^[47],但需要精确的气象资料如日平均温度、最低和最高温度等。动力模型方法给出更精确的预测,发芽动力模型主要基于春季发芽率依赖于气温这个事实,这个模型通常包含一个确定的界限温度,低于这个界限温度发育速度为零,而高于这个界限温度就假设有一个定量的温度响应(线性或非线性的)^[16]。

5 结语

目前全球特别是欧美国家关于植物响应气候变化的研究已经取得了很大进展,我国物候研究也取得了一定的成果,但下列诸方面的研究尚有待于加强:

(1) 应该加强我国物候期出现时间、物候期同生物因子和非生物因子的关系、以及同一物种及不同物种之间物候的相关关系的研究。气候变化将引起物种物候的变化,这将导致物种之间生产和竞争的改变以及物种之间相互作用的变化,这也应该是研究的重点。

(2) 尽管我国拥有大量的长期物候观测资料,但是监测评估和预测气候引起物候变化方面的研究很少,有待于进一步加强。在我国有价值的历史物候资料没有被充分利用,并由于目前资料拥有者不知道用它做什么或没有资金来对资料作数字化处理而面临资料的浪费和毁坏。

(3) 在我国区域和国家物候监测网之间几乎没有或仅有有限的合作和交流,缺少资料综合的途径;不同学科之间和学科内部(如生态、农业和人类健康等),对物候的监测、资料储存、资料分析和研究结果等方面缺少交流和有效的利用;没有看到物候资料潜在有效性,必须促进物候资料在我国乃至全球气候变化研究方面的实际应用。应该利用已有的长期物候观测资料提出有关生态、农业和人类健康方面的科学决策。

(4) 气候变化对生态系统、农业和人类健康的影响,在全球、中国、区域等各个尺度,同环境和社会经济政策有密切联系。为了有效监测、评估和预测气候引起的物候变化及其影响,必须加强国际间的合作,有效利用来自不同国家的物候资料。报纸和电视等新闻媒介应当关注物候的变化,物候监测的信息和研究结果应该通过网络来介绍,并要开发面向学校的教育资料。

References:

- [1] Sparks T H, Carey P D. The responses of species to climate over two centuries: an analysis of the Marsham phenological record, 1736 ~ 1947. *Journal of Ecology*, 1995, 83: 321 ~ 329.
- [2] Zhang F C. *Phenology*. Beijing: Meteorology Press, 1985.
- [3] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397: 659.
- [4] Fang X Q, Yu W H. A review of phenology responses to global climate warming. *Geography Science Advance*, 2002, 17: 714 ~ 717.
- [5] Rötzer T, Wittenzeller M, Haeckel H, *et al.* Phenology in central Europe-differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44: 60 ~ 66.
- [6] Walkovszky A. Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia*) in Hungary. *International Journal of Biometeorology*, 1998, 41: 155 ~ 160.
- [7] Ahas R. Long-term phyto-, ornitho- and ichthyophenological time-series analyses in Estonia. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 44: 119 ~ 123.
- [8] Van Vliet A J H, Schwartz M D. Editorial: Phenology and Climate: The timing of life cycle events as indicators of climatic variability and change. *International Journal of Climatology*, 2002, 22: 1713 ~ 1714.
- [9] 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: 82 ~ 87.
- [10] Schwartz M D. Green-wave phenology. *Nature*, 1998, 394: 839 ~ 840.
- [11] Penuelas J, Filella I. Phenology: responses to a warming world. *Science*, 2001, 294: 793 ~ 795.
- [12] Spano D, Cesaraccio C, Duce P, *et al.* Phenological stages of natural species and their use as climate indicators. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 42: 124 ~ 133.
- [13] Fitter A H, Fitter R S R. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 2002, 296: 1687 ~ 1691.
- [14] Chmielewski F-M, Rötzer T. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2001, 108: 101 ~ 112.

- [15] Schwartz M D. Advancing to full bloom; planning phenological research for the 21st century. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 42: 113 ~ 118.
- [16] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, *et al.* Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386: 698 ~ 702.
- [17] Schwartz M D. Monitoring global change with phenology: the case of the spring green wave. *International Journal of Biometeorology*, 1994, 38: 18 ~ 22.
- [18] Van Vliet A J H, de Groot R S, Bellens Y, *et al.* The European Phenology Network. *International Journal of Biometeorology*, 2003, 47: 202 ~ 212.
- [19] Crick H Q P, Sparks T H. Climate change related to egg-laying trends. *Nature*, 1999, 399: 423 ~ 424.
- [20] Post E, Stenseth N C. Climatic variability, plant phenology, and northern ungulates. *Ecology*, 1999, 80: 1322 ~ 1339.
- [21] Roy D B, Sparks T H. Phenology of British butterflies and climate change. *Global Change Biology*, 2000, 6: 407 ~ 416.
- [22] Walther G R, Post E, Convey P. Ecological responses to recent climate changes. *Nature*, 2002, 416: 389 ~ 395.
- [23] Jiang Y D, Ye D Z, Dong W J. Regional climate change from the point of view of seasonality in China. *Climate Change Communication*, 2004, 3(2): 8 ~ 9.
- [24] Xu Y Q, Lu P L, Yu Q. Response of tree phenology to climate change for recent 50 years in Beijing. *Geographical Research*, 2005, 24(3): 412 ~ 420.
- [25] Zheng J Y, Guo Q S, Hao Z X. The effect of climate change on plant phenology in late 50 year in China. *Science Bulletin*, 2002, 47(20): 1582 ~ 1587.
- [26] Zheng J Y, Guo Q S, Zhao H X. The response of plant phenology to climate change in late 50 year in China. *China Agriculture Meteorology*, 2003, 24(1): 28 ~ 32.
- [27] Wielgolaski, F E, Klaveness D. Norwegian plant phenology, a brief review of historical data, and comparison of some mean first flowering dates(mFFD) for this and last century. *International Journal of Biometeorology*, 1997, 14: 208 ~ 213.
- [28] Defila C, Clot B. Phytophenological trends in Switzerland. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45: 203 ~ 207.
- [29] Menzel A, Estrella N, Fabian P. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 ~ 1996. *Global Change Biology*, 2001, 7: 657 ~ 666.
- [30] Menzel A. Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change*, 2003, 57: 243 ~ 263.
- [31] Fitter A H, Fitter R S R, Harris I T B, *et al.* Relationships between first flowering date and temperature in the flora of a locality in central England. *Functional Ecology*, 1995, 9: 55 ~ 60.
- [32] Ahas R, Aasa A, Menzel A, *et al.* Changes in European spring phenology. *International Journal of Climatology*, 2002, 22: 1727 ~ 1738.
- [33] Kramer K, Friend A D, Leinonen I. Modelling comparison to evaluate the importance of phenology for the effects of climate change in growth of mixed temperature-zone deciduous forests. *Climate Research*, 1996, 7: 31 ~ 41.
- [34] White M Z, Running S W, Thornton P E. The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 42: 139 ~ 145.
- [35] Beaubien E g, Freeland H J. Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44: 53 ~ 59.
- [36] Schwartz M D, Reiter B E. Changes in North American spring. *International Journal of climatology*, 2000, 20: 929 ~ 932.
- [37] Kaduk J, Heimann M A. Prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models. *Climate Research*, 1996, 6: 1 ~ 9.
- [38] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 1996, 382: 146 ~ 149.
- [39] Chen X. The relationship of trees phenology growth season and temperature growth seasons: an example of Taunus mountains in the middle of German. *Acta Meteorology Sinica*, 2000, 58: 721 ~ 737.
- [40] Chen X, Tan Z, Schwartz M D, *et al.* Determining the growing season of land vegetation on the basis of plant phenology and satellite data in Northern China. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44: 97 ~ 101.
- [41] Menzel A. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44: 76 ~ 81.
- [42] White M A, Thornton P E, Running S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1997, 11: 217 ~ 234.
- [43] Running S W, Nemani R R. Regional hydrologic and carbon balance responses of forests resulting from potential change. *Climatic Change*, 1991, 19: 349 ~ 368.
- [44] Goetz S J, Prince S D. Remote sensing of net primary production in boreal forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78: 149 ~ 179.
- [45] Sellers P J, Bounoua L, Collatz G J. Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate. *Science*, 1996, 271: 1402 ~ 1406.
- [46] Price M V, Waser N M. Effects of experimental warming on plant reproductive phenology in a subalpine meadow. *Ecology*, 1998, 79(4): 1261 ~ 1271.
- [47] Maak K, Storch H Von. Statistical downscaling of monthly mean air temperature to the beginning of flowering of *Galanthus nivalis* L. in Northern Germany. *International Journal of Biometeorology*, 1997, 41: 5 ~ 12.
- [48] Kramer K. Selecting a model to predict the onset of growth of *Fagus sylvatica*. *Journal of Applied Ecology*, 1994, 31: 172 ~ 181.
- [49] Hakkinen R, Linkosalo T, Hari P. Effect of dormancy and environmental factors on timing of bud burst in *Betula pendula*. *Tree Physiol*, 1998, 18: 707 ~

712.

- [50] Lemos Filho J P de, Villa Nova N A, Pinto H S. A model including photoperiod in degree days for estimating *Hevea* bud growth. *International Journal of Biometeorology*, 1997, 41: 1 ~ 4.
- [51] Snyder R L, Spano D. Determining degree-day thresholds from field observations, *International Journal of Biometeorology*, 1999, 42: 177 ~ 182.
- [52] DeGaetano A, Knapp W W. Standardization of weekly growing degree-day accumulations based on differences in temperature observation and method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 66: 1 ~ 19.
- [53] Yin X, Kropff M J, McLaren G, Visperas R M. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77: 1 ~ 16.
- [54] Caprio J M. Flowering dates and potential evapotranspiration and water use efficiency of *Syringa vulgaris* L. at different elevations in the western United States of America. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 63: 55 ~ 71.
- [55] Wilhelm W W, McMaster G S. The importance of the phyllocron in studying the development of grasses. *Crop Science*, 1995, 35: 1 ~ 3.
- [56] Leinonen I, Kramer K. Application of phenological models to predict the future carbon sequestration potential of boreal forests. *Climatic Change*, 2002, 5: 99 ~ 113.
- [57] Ahas R, Jaagus J, Aasa A. The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44: 159 ~ 166.
- [58] Hunter A F, Lechowicz M J. Predicting the time of budburst in temperate trees. *Journal of Applied Ecology*, 1992, 29: 597 ~ 604.
- [59] Chuine I, Cour P, Rousseau D D. Selecting models to predict the timing of flowering of temperate trees: implications for tree phenology modeling. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22: 1 ~ 13.
- [60] Kramer K. A modelling analysis of the effects of climatic warming on the probability of spring frost damage to tree species in The Netherlands and Germany. *Plant, Cell and Environment*, 1994, 17: 367 ~ 378.
- [61] Chuine I, Cour P, Rousseau D D. Fitting models predicting dates of flowering temperate-zone trees using simulated annealing. *Plant, Cell and Environment*, 1998, 21: 455 ~ 466.
- [62] Chuine I, Cambron G, Comtois P. Scaling phenology from the local to the regional level: advances from species-specific phenological models. *Global Change Biology*, 2000, 6: 943 ~ 952.
- [63] Yoder B J, Waring R H. The Normalized difference vegetation index of small Douglas-fir canopies with varying chlorophyll concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49: 81 ~ 91.
- [64] Spanner M A, Pierce L L, Running S W, et al. The seasonality of AVHRR data of temperate coniferous forests: relationships with leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 33: 97 ~ 112.
- [65] Moulin S, Kergoat L, Viovy N, et al. Global scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements. *Journal of Climate*, 1997, 10: 1154 ~ 1170.
- [66] Liideke M B K, Range P H, Kohlmaier G H. The use of satellite NDVI data for the validation of global vegetation phenology models. *Ecological Modelling*, 1996, 91: 255 ~ 270.
- [67] Osborne C P, Chuine I, Viner D, et al. Olive phenology as a sensitive indicator of future climatic warming in the Mediterranean. *Plant, Cell and Environment*, 2000, 23: 701 ~ 710.
- [68] Kramer K. Modelling comparison to evaluate the importance of phenology for the effects of climate change on growth of temperate-zone deciduous trees. *Climate Research*, 1995, 5: 119 ~ 130.
- [69] Kramer K, Leinonen I, Loustau D. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: an overview. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44: 67 ~ 75.
- [70] Cenci C A, Ceschia M. Forecasting of the flowering time for wild species observed at Guidonia, central Italy. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44: 88 ~ 96.

参考文献:

- [2] 张福春. 物候. 北京: 气象出版社, 1985.
- [4] 方修琦, 余卫红. 物候对全球变暖响应的研究综述. *地理科学进展*, 2002, 17(5): 714 ~ 717.
- [23] 姜允迪, 叶笃正, 董文杰. 从季节角度看中国区域气候变化. *气候变化通讯*, 2004, 3(2): 8 ~ 9.
- [24] 徐雨晴, 陆佩玲, 于强. 近 50 年北京树木物候对气候变化的响应. *地理研究*, 2005, 24(3): 412 ~ 420.
- [25] 郑景云, 郭全胜, 郝志新. 气候增暖对我国近 40 年植物物候变化的影响. *科学通报*, 2002, 47(20): 1582 ~ 1587.
- [26] 郑景云, 郭全胜, 赵会霞. 近 40 年中国植物物候对气候变化的响应研究. *中国农业气象*, 2003, 24(1): 28 ~ 32.
- [39] 陈效速. 论树木物候生长季节与气温生长季节的关系——以德国中部 Taunus 山区为例. *气象学报*, 2000, 58(6): 721 ~ 737.