

植物物候与气候研究进展

王连喜^{1,*}, 陈怀亮², 李 琪¹, 余卫东²

(1. 南京信息工程大学, 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044; 2. 河南省气象科学研究所, 郑州 450003)

摘要:植物物候及其变化是多个环境因子综合影响的结果,其中气候是最重要、最活跃的环境因子。主要从气候环境角度分析了植物物候与气候以及气候变化间的相互关系,概述了国内外有关植物物候及物候模拟等方面的研究进展。表明,温度是影响物候变化最重要的因子;同时,水分成为胁迫因子时对物候的影响也十分重要。近 50a 左右,世界范围内的植物物候呈现出了春季物候提前,秋季物候推迟或略有推迟的特征,从而导致了多数植物生长季节的延长,并成为全球物候变化的趋势。全球气候变暖改变了植物开始和结束生长的日期,其中冬季、春季气温的升高使植物的春季物候提前是植物生长季延长的主要原因。目前对物候学的研究方向主要集中在探讨物候与气候变化之间的关系,而模型模拟是定量研究气候变化与植物物候之间关系的重要方式,国内外已经开发出多种物候模型来分析气候驱动与物候响应之间的因果关系。另外遥感资料的应用也为物候模型研究提供了新的方向。物候机理研究、物候与气候关系以及物候模型研究将是研究的重点。

关键词:植物物候; 气候; 气候变化

Research advances in plant phenology and climate

WANG Lianxi^{1,*}, CHEN Huailiang², LI Qi¹, YU Weidong²

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China

Abstract: Of many environmental factors, the climate is the most important and active factor influencing plant phenology and its changes. In this paper, we first of all examine the relationship among the plant phenology, the climate and the climate change. Since numerical modeling is an important tool to quantify this relationship, we have further documented the recent research advances at home and abroad in areas of plant phenology and phenology simulation. It is shown that among climate variables, temperature is the most important factor to impact on the plant phenology. When water become a stress factor, its effect on the phenology is also significant. During the recent 50 years, the worldwide plant phenologies tend to have spring phenology advance and autumn phenology delay or slight delay, resulting in the growing season prolong for most plants. As a result of global warming, the temperature rising in winter and spring mainly leads to the spring phenology advance and the growing season prolong thereby. To further understand quantitative relationships between climate forcing and phenology response, we suggest further researches to be conducted in the areas such as, but not limited to, phenology mechanism, phenology relationships with climates and their changes, phenology modeling, and remote sensing applications.

Key Words: plant phenology; climate; climate change

植物物候是指植物受气候和其他环境因子的影响而出现的以年为周期的自然现象,包括植物的发芽、展叶、开花、叶变色、落叶等^[1],是植物长期适应季节性变化的环境而形成的生长发育节律^[2]。植物物候实质上是研究植物生长发育与环境条件的关系^[3],它不但能直观地指示自然季节的变化,还能表现出植物对自然环境变化的适应^[2]。研究物候规律的特征及其与主要的环境因子——气候因子间的关系在预报农时、指导农

基金项目:国家科技部公益性行业(气象)科研专项资助项目(GYHY(QX)2007-6-7);国家“十一五”科技支撑计划重大资助项目(2007BAC03A02)

收稿日期:2008-10-29; **修订日期:**2009-03-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wlx4533@sina.com

事活动,预测、鉴定气候变化趋势,指示病虫害的发生,气候的物候鉴定与预测,引种与选种等方面都具有重要的理论和现实意义。

随着全球气候变暖,植物物候也发生相应变化;而这种变化大多将导致植物生长季延长,由此引起植被生产力、结构组成及土壤-植被-大气系统水、热、碳交换的变化,进而影响到气候系统,加剧气候变化。植物物候还是陆面过程模型以及植被生产力模型的重要参数^[4],对植物物候的研究不仅有助于增进植被对气候变化响应的理解,而且对于提高气候-植被之间物质与能量交换的模拟精度,准确地评估植被生产力与全球碳收支具有重要意义。本文在查阅大量文献的基础上,对植物物候与气候以及气候变化间相互关系的研究成果进行综述,并提出了植物物候研究方面的一些建议,希望能作为以后相关研究的参考。

1 气候因子对植物物候的影响

植物在年周期中有顺序地进行着各个物候期的变化,是一个有机体与外界环境不断进行物流与能流的交换与积聚的过程,因此物候与植物的内在因素和外界环境因素关系密切。其外在环境因素包括温度、光照、水分、生长调节剂等。其中气温、光照、水分等气候因子则为主要影响因子。

1.1 温度对植物物候的影响

植物的生理活动是一系列的生化反应,温度会使酶的活性发生变化,温度升高可促进酶的活性,加快植物物候进程。因此,植物物候与气温状况息息相关,特别在植物各生长发育期的前期,各种物候期的开始日期与其前期气温之间有显著的相关性^[4-5]。王小兰^[3]对兰州市区 16 种树木的春季物候期进行的观测结果表明,树木物候期对气温的变化极其敏感,春季气温回升期间的降温会明显减缓树木的物候期进程。Zhang 等^[6]的研究表明,由于热岛效应,城市地区展叶物候通常比自然界植被提前 4—9d,叶变色延迟 2—6d。张学雷等^[7]的分析结果表明植物生长与温度之间的关系远比其与降水之间的关系密切,但物候期的提前与推迟对温度的上升与下降的响应是非线性的。徐雨晴等^[8]的研究也表明了这种非线性响应。

在中纬度地区,植物的春季物候,如发芽、展叶、开花的时期也主要取决于气温的高低^[9]。Menzel 等^[10]还用卫星数据论证了温度是影响物候变化的限制性因子。植物不但需要在一定温度环境中才能生长发育,而且需要一定的积温才能完成其生活周期,物候期持续的时期与活动积温有显著的相关性^[11]。张福春^[12]认为,春季树木的展叶开花等主要受春季气温波动的影响,果实或种子的成熟等主要取决于果实生长期的积温,秋季的树木开花和黄落叶等主要是由于气温下降到一定界限引起的。

不同季节的温度及温度变化对植物物候的影响效果是不同的,如张福春^[12]通过研究认为,冬季气温偏高不利于打破冬季芽的休眠,反而使开花期推迟,较冷的冬温有利于打破冬季休眠。而 Sparks 等^[13]的研究却显示出冬季气温升高,有些物种的开花期表现出提前的趋势。Myking 发现分别用恒温 and 变温处理对打破桦木芽的休眠没有差别^[14]。Sparks 和 Carey^[15]利用 Marsham 地区 200a 的物候观测资料发现,某些植物开花提前与冬季温度的升高相关。

由于气候随纬度、经度和海拔变化而存在的规律性变化,从而导致了物候现象随纬度、经度和海拔的变化具有推移性的特点。刘占林等^[16]通过观测发现,华山新麦草的传粉高峰期与海拔有一定的关系:海拔每升高 200m,传粉物候期就推迟 2—3d;黄敬峰等人^[17]认为,纬度愈高,海拔愈高,冬小麦冬前物候期愈早,而春季返青后物候期愈晚。霍普金司定律指出,在其它因素相同的条件下,北美洲温带纬度每向北移动 1°,经度向东移动 1°或上升 121.92m,植物的阶段发育在春天和初夏各延期 4d,在晚夏和秋天则恰相反,即提前 4d。

1.2 光照对植物物候的影响

影响物候的气候因素中,日照也是一个重要因素,植物具有光敏色素,其生活史中许多阶段与光有关,有时它的影响比温度还重要。一般情况下,缩短光照时间能促进短日照植物开花,使花期提前,而延长光照时间则延迟花期。对大多数树木而言,缩短光周期对诱导温带植物芽的休眠起关键作用,而在休眠期却不起主导作用^[18]。

温度结合日照处理能明显地调节植物物候期。有关研究^[8]表明,变温和持续延长日照时间最能促进植

物花芽开放,在昼夜温度分别为 20℃ 和 10℃ 时,当日照时间在 6h 的基础上每天延长 10min,再利用变温处理能使萌芽期提前 10d 或更多,当缩短日照时间,花芽萌发期推迟。郑景云等人^[19]认为,冬季和早春植物开花的主要影响因素是温度,晚春和早夏植物开花受温度和日照同时影响,而晚夏植物花粉的开始传播主要受日照的影响。

1.3 水分对植物物候的影响

水是影响植物物候期的另一重要气候因子。干旱会延缓植物的生长发育,使发育的物候期推迟。干旱发生时,光、热条件再好,植物也不能利用,在这种情况下,水就成为影响植物生长发育的主要生态因子。

低地地区的雨养作物物候,特别是使谷物获得高产的最佳开花时期与水分的可利用性关系密切^[20]。调查分析表明,在丘陵地区,谷物在花序出现期遭受干旱会使花期推迟^[21],但有时利用干旱处理能使某些植物花期提前^[22]。灌溉对物候期有一定影响,泰国东北部地区的试验表明,对低地的大部分作物而言,灌溉能使花期提前 6d 到 7d^[21]。Walker 等^[23]指出,高山和北极植物物种的生长和开花期与融雪日期密切相关,因为融雪引起水分和温度的变化,从而影响植物的生长、开花、繁殖和植物种群动态。

降水对植物开花的影响在热带和干旱地区植物上表现尤其明显,Lampe 等人^[24]对委内瑞拉东北部的荆棘林地和灌木丛研究发现,因为受干旱条件严重影响,当降水一发生就立即响应开花,因此有着非常一致的物候同步性。另外在一定光照条件下,改变空气湿度也能引起植物物候变化,如 24h 光照条件下,空气湿度增加,能稍微促进作物开花,当光照小于 24h 时,空气湿度增加却稍微推迟作物开花^[25]。

许多专家学者的研究都表明温度是影响物候变化的主要因子,并且温度的这种影响是非线性的。同时,水分成为胁迫因子时其对物候的影响将显得十分重要,尤其是气候变暖所导致的降水变率增大,干旱性质的极端气候事件增多,这需要我们在今后的研究中加以关注。不过,气候因子对植物物候的影响是综合的,如果再考虑到实际当中其他因子对植物物候的影响,如 CO₂、O₃、UV-B 辐射等,植物物候的变化将更为复杂。

2 植物物候变化研究

以全球气候变暖为主要特征的全球气候变化已成为事实,IPCC 第 4 次(2007)评估报告指出,气候系统变暖是毋庸置疑的。最新更新的过去 100a(1906—2005)的变暖趋势为 0.74℃(0.56—0.92℃),这比 TAR(第 3 次评估报告)的趋势 0.6℃(0.4—0.8℃)要高。许多观测资料表明,近百年来全球气候正经历一次以变暖为主要特征的显著变化。探讨物候与气候变化之间的关系是当前物候学研究的重要方向之一。

植物生长发育受气候、土壤等因素的影响综合反映在物候现象中,而各种植物的物候期均按一定的先后次序出现,前一个物候期来临的迟早与继后出现的物候现象的迟早有密切关系,并且各年各物候期的出现都有其规律性。Roetzer 等^[26]分析发现,1951—1995 年间中欧无论是城市或乡村地区,植物生长季均提前到来,春季叶片展开平均提前了 6d,而秋季叶片变色平均推迟了 4.8d,使得平均年生长季延长 10.8 d^[27]。White 等^[28]在美国东部地区 12 个站点进行观测也得到了相似的结果。在地中海地区,大多数常落叶性植物叶子的生长比 50a 前平均提早了 16d,落叶时间平均推迟了 13d^[29]。德国植物春季物候比 50a 前提早了 10—20d,变化速率依物种、地区和年际的不同而异^[30]。

大量研究报道了春季植物开花期的提前。欧洲中西部地区植物春季物候期在 1951—1998 年间提前了 4 周,其中白桦树、苹果、紫丁香和椴树的花期平均每年提前 0.1—0.3d^[31]。匈牙利地区 1851—1994 年间^[32]、美国华盛顿地区 1970—1999 年间^[33]以及威斯康辛南部地区 1936—1998 年间^[34],植物花期都提前了约 1 周。研究表明^[13],全球温度升高 3.5℃,春季开花将提前 14d 左右。

国内学者的研究也表明了同样的物候变化趋势,王传海等^[35]的研究表明,近 10 余年西安市植物园 20 种木本植物物候变化明显表现为所有植物春季物候逐年提前、大多数植物秋季物候逐年推迟的趋势,春季物候对气候变化的响应程度显著大于秋季物候,大多植物生殖生长期的物候变化幅度大于营养生长期。此外,李长青等人^[36]根据 1980—2001 年辽宁自然物候观测资料,统计分析了全省植物的变化特点以及物候现象的年际变化,得到了辽宁物候期的一般特征。黄中雄^[37]还尝试用木棉树物候期做农作物适宜播种期预报,取得较

好效果。

大量的研究表明,世界范围的植物物候主要呈春季物候提前,秋季物候推迟或略有延迟的特征,这直接导致了大多数的植物生长季节的延长。由于物候与温度的密切关系,也就表明了全球气候是变暖的趋势。植物物候现象是全球变化最敏感、最精确的指示剂,以自然物候指标来指示环境变化的研究在国外已非常普遍,而且其结果越来越多地被 IPCC 的评估报告等国际重大环境评估报告所采用。国际生物气象组织物候委员会及其它一些国际物候研究组织与机构还把物候作为监测全球环境变化的一个重要手段。我国国家气候委员会也准备将物候观测列入“气候资料与监测计划”^[38]。

气候变化不仅影响植物的物候变化,气候变暖还会导致世界尤其是我国陆地生态质量的大幅下降,并造成未来主要植被分布可能发生明显变化。

3 植物物候变化的模拟研究

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被生态系统的影响至关重要。为了定量研究气候变化对物候的影响,描述气候驱动与物候响应之间的因果关系,有必要建立能够反映其间规律的各种物候模型。植物物候模型是定量描述物候与环境因子(主要是气象因子)关系的模型,物候模型的研究为人类生产实践活动提供了依据和指导,具有重要的实践意义。另外植物物候模型不仅是植物生长模拟模型的输入项,而且在植被模型中嵌入物候模型也是模型的发展趋势。在全球变化的大背景下,物候模型通过量化物候期的变化来反映和预测气候的变化趋势,或用于气候资料的补差,推导气候变化规律^[39]。

目前国内外建立的物候模型主要包括统计分析模型^[40]和以植物生长规律分析为主的机理模型^[41]。前者主要通过数学统计方法直接建立植物物候期与气象因子(主要是与温度有关的因子)之间的关系,后者则以植物的生理生态过程为基础,根据生理发育时间恒定的原理,引入重要的遗传参数(包括气候参数),由这些参数的相互作用共同决定每日生理效应的大小,其积累形成每日的生理发育时间。

模拟物候期最古老的是 1735 年由 Reaumur 建立的热时模型,即积温模型。这类模型通常是精确描述资料的统计模型,这种仅基于温度影响,或考虑温度与光因子综合影响的模型由于是建立在对长期观测资料的统计分析上的,因而是相当经验性的,如通过所观测到的植物发芽、展叶、开花等始期与同期有时还包括前期的温度、光照、降水等要素值之间建立相关统计模型。这种模型使用最为广泛,可以对植物的物候期进行预测。

机理模型主要应用于作物模型中,在诸多参数中,光温对作物发育影响速率的计算是研究的关键。作物物候模型在最初都假设光温函数是线性的,而现在都应用了改进的非线性光温函数,如 Setiyono 等将非线性 β 函数引入大豆物候模型中,并且在每个发育阶段所使用的模型各异,取得了很好的模拟效果^[42]。

我国对于气候变化对植物物候影响的模型主要是经验统计模型,使用的方法有积分回归法^[12]、互相关系数法^[2]、聚类分析^[43]、主成分分析^[44]等。如采用积分回归法对全国物候观测网的数据进行统计分析,建立物候与年平均气候的线性统计模式,利用该模式计算表明:年平均温度上升 1℃,各种木本植物物候期春季一般提前 3—4d,秋季一般推迟 6—8d;大部分植物始花期提前 3—6d^[12]。

我国植物物候变化机理模型的研究还处于起步阶段,仅在作物物候模型方面的研究较为成熟^[45]。由高亮之等^[45]研制的水稻栽培模拟优化决策系统(RCSODS)包含了作物的物候模型。WCSODS 模拟系统中的小麦钟模型是一种混合型小麦生育期模型^[46]。张建华等^[47]提出考虑作物品种和环境因素来模拟作物物候规律,并以新疆棉花物候为例进行了模拟。

随着全球气候变化和年际变化的发生,植物物候被认为是陆面过程模型以及用于模拟植被生产力与类型变化的动态全球植被模型的重要参数。自 1970 年以来,已开发了几种区域物候模型并通过模型拟合方法和模型统计假设的改进^[48],使模型的有效性得到了提高^[49]。另外随着遥感资料的不断丰富,某些研究开始用 NDVI 资料来发展区域尺度的物候模型^[50]和估算区域物候^[51]。White 等^[28]提出了一个基于温度和积温的落叶阔叶林生长开始的物候回归模型,能有效地反映全球气候变化对植被的影响。

4 结语

自然物候变化作为指示气候与自然环境变化的综合指标,不仅反映了当时、当地的气候和环境状态,而且反映了过去相当长一段时间内气候条件和环境变化的积累对生物的综合效应。通过对物候资料和分析研究,掌握物候的变化规律,可以比较清楚地了解气候的变化情况及其对物候的影响;利用物候与气候的关系模式,可以鉴定地方气候的变化,并在缺乏气候资料的地方对气候变化趋势作预测^[8]。了解物候不仅有助于增进植被对气候变化响应的理解,而且对提高气候-植被之间物质与能量交换的模拟精度、准确评估植被生产力与全球碳收支具有重要意义^[5]。研究二者的相互关系,可为适应气候变化保护生态环境制定相应的政策和采取趋利弊害的对策提供参考。

目前在植物物候研究方面,国内外在植物物候期时空变化规律、气候变化(气温、降水)和物候变化之间的关系以及植物响应气候变化的研究等方面已经取得了很大进展,我国还在物候的实际应用方面取得了不少的成果。然而,总的来看,我国的专家学者应考虑在以下几个方面做更深入的工作:

(1) 物候机理研究

在众多的植物物候研究中,植物物候与环境因子的关系研究较多,而与植物生理关系的机理性研究偏少,许多研究都把中间的生理过程作为暗箱来处理,而直接研究外部因子与植物物候的关系。随着科学技术的发展,深入开展有关物候机理研究的条件已完全具备,通过观测与实验,深层次探讨造成和影响物候变化的原因与因子,探讨植物物候与植物生理的关系,并相应确定其生理指标来反映物候变化将会对物候学研究产生重要影响。

(2) 物候与气候关系等的综合研究

许多物候现象具有顺序性、相关性、同步性的特点,因此,可以用某一种物候指标的变化来分析整个物候现象的变化规律。尽管我国拥有许多长期物候观测资料,但是监测评估气候与气候变化研究还有待于进一步加强。如通过对古文献中的物候记载进行分析来恢复古气候,是通过物候资料研究气候变化的一个重要手段。

植物物候及其变化是多个环境因子综合影响的结果,其中气候是最重要、最活跃的环境因子,但目前在比较具显著生态学意义的气候参量和物候变化之间的关系,及二者相互作用的时效问题方面相对较弱,也比较缺乏多因子对植物物候的交互影响的分析研究。作为生态系统重要组成部分的植被,与气候变化间的相互关系已成为全球气候变化研究中的一个重要课题。植物对全球气候变化响应的研究可以揭示全球变化的生物学响应机制,是全球变化生态系统响应的研究基础,是植被-气候关系研究中的重要环节。

(3) 模型研究与构建

植物物候被认为是陆面过程模型以及用于模拟植被生产力与类型变化的动态全球植被模型的重要参数^[4],也是生物圈响应精确模型必要的输入项。由于对物候定量研究起步比较晚,目前植物物候模型主要是研究森林和农田生态系统与气候变化的关系,在物候模型、生长模型和参数变量的获得等方面都有很多不确定性,机理模型还属于起步阶段并且基本上是针对农作物的。因此,完善已有的模型以及更全面地构建各类植物物候模型,并通过模拟推算更加精确地物候参数与生物量来提高陆面过程模型的精度十分重要。逐步开发能描述气候季节性驱动影响的树木、牧草、作物机理模型,用于对森林、草地、农田生态系统的功能和以及气候变化对生产力的影响做出评估也是今后物候研究的重要方面。

此外,也应重视新技术、新方法及其它相关资料数据的应用研究,如遥感资料已证明在许多方面都是非常有效地研究数据源,在宏观生态研究方面已取得许多进展,通过遥感数据与地面定点观测资料的结合分析,可进一步推动物候研究的深入。研究的目的在于应用,应努力促进物候资料在环境变化与影响研究方面的实际应用,充分发挥已有物候观测资料在生态、农业和人类健康等方面的积极作用,为正确决策提供科学依据。

References:

- [1] Lu P L, Yu Q, He Q T. Responses of plant phenology to climatic change. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 923-929.

- [2] Zhang X X, Ge Q S, Zheng J Y. Relationships between climate change and vegetation in Beijing using remote sensed data and phenological data. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 499-506.
- [3] Wang X L. Observation on spring phenophase of 16 trees in Lanzhou city. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2005, 31(3): 74-75.
- [4] Myking T. Spring index models: dormancy, budburst and impacts of climatic warming in coastal-inland and altitudinal *Betula pendula* and *B. pubescens* ecotypes//Lieth H, Schwartz M D. *Phenology of Seasonal Climates* I. The Netherlands Backhuys Publishers, 1997: 51-66.
- [5] Li R P, Liu X M, Zhou G S. The characteristics of *Phragmites* phenology in Panjin wetland and its responses to climatic change. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, 22(4): 30-34.
- [6] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitude inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 2004, (10): 1133-1145.
- [7] Zhang X X, Ge Q S, Zheng J Y, Zhang F C. Responses of spring phenology to climate changes in Beijing in last 150 Years. *Agricultural Meteorology*, 2005, 26(3): 263-267.
- [8] Xu Y Q, Lu P L, Yu Q. Review and Prospect in the Researches of Influence of Climate Change on Plant Phenology. *Resources Science*, 2004, 26(1): 129-137.
- [9] Chmielewski F M, Thomas R. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 101-112.
- [10] Menzel A. Progress in phenology monitoring, data analysis, and global change impacts. Freising, Germany, 2000.
- [11] Zhang X B, Ren J R, Zhang D E. Phenological observations on *Larix principis-rupprechtii* Mayr in primary seed orchard. *Journal of Forestry Research*, 2001, 12(3): 201-204.
- [12] Zhang F C. Effects of global warming on plant phenological events in China. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(5): 403-408.
- [13] Sparks T H, Carey P K, Combes J. First leafing dates of trees in Surrey between 1947 and 1996. *London Naturalist*, 1997, 76: 15-20.
- [14] Myking T. Effects of constant and fluctuating temperature on time to budburst in *Betula pubescens* and its relation to bud respiration. *Trees*, 1997, 12(2): 107-112.
- [15] Sparks T H, Carey P D. The responses of species to climate over two centuries: an analysis of the Marham phenological record, 1736-1947. *Journal of Ecology*, 1995, 83: 321-329.
- [16] Liu Z L, Song X, Li S, Zhao G F. Pollination phenology and an indirect estimate of gene flow in natural populations of *Psathyrostachys huashanica*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(4): 426-430.
- [17] Huang J F, Wang X Z, Cai C X. Research on winter wheat phenology and climate in Xinjiang. *Agricultural Meteorology*, 2000, 21(1): 14-19.
- [18] Hanninen H. Modeling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. *Acta Forestalia Fennica*, 1990, 213: 1-47.
- [19] Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X. Effect of climate warming on plant phenology change in China in last 40 years. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(20): 1584-1587.
- [20] Cavender-Bares J, Potts M, Zacharias E, Bazzaz F A. Consequences of CO₂ and light interactions for leaf phenology, growth and senescence in *Quercus rubra*. *Global Change Biology*, 2000, 6: 877-887.
- [21] Chen X Q, Zhang F C. Spring phenological change in Beijing in the last 50 years and its response to the climatic changes. *Agricultural Meteorology*, 2001, 22(1): 1-5.
- [22] Zhou X N. *Agricultural Phenology*. Beijing: Agriculture Press, 1983.
- [23] Walker M D, Ingersoll R C, Webber P J. Effects of interannual climate variation on phenology and growth of two alpine forbs. *Ecology*, 1995, 76: 1067-1083.
- [24] Lampe M G, Bergeron Y, McNeil R, Leduc A. Seasonal flowering and fruiting patterns in tropical semi-arid vegetation of northeastern Venezuela. *Biotropica*, 1992, 24: 64-76.
- [25] Mortensen L M, Field T. Effects of air humidity, lighting period and lamp type on growth and vase life of roses. *Scientia Horticulture*, 1998, 73(4): 229-237.
- [26] Roetzer T, Wittenzeller M, Haeckel H, Nekovar J. Phenology in central Europe-differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(2): 60-66.
- [27] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397(6721): 659.
- [28] 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(3): 139-145.
- [29] Peñuelas J, Filella I. Phenology: Responses to a warming world. *Science*, 2001, 294: 793-795.
- [30] Menzel A. Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change*, 2003, 57: 243-263.

- [31] Ahas R, Aasa A, Menzel A, Fedotova V G, Scheifinger M. Changes in European spring phenology. *International Journal of Climatology*, 2002, 22: 1727-1738.
- [32] Walkovszky A. Changes in phenology of the locust tree (*Rovinia pseudoacacia* L.) in Hungary. *International Journal of Biometeorology*, 1998, 41(4): 155-160.
- [33] Abu-Asab M S, Peterson P M, Shetler S G, Orli S S. Earlier plant flowering in spring as a response to global warming in the Washington D C area. *Biodiversity and Conservation*, 2001, 10: 597-612.
- [34] Bradley N L, Leopold C L, Ross J, Huffaker W. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96: 9701-9704.
- [35] Wang C H, Wu F Q, Li S J, Zhao G Q. Phenological changes of ligneous plants in Xi'an botanic garden in last 15 years. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(4): 261-264.
- [36] Li C Q, Liu L W. The statistical analysis of phenology in Liaoning. *Liaoning Meteorological Quarterly*, 2004, (2): 44-46.
- [37] Huang Z X. Discussion on the mode using *Bombax ceiba* phenology to forecast the suitable sowing date of crop. *Guangxi Agricultural Science*, 2004, 35(6): 454-455.
- [38] Zheng J Y, Zhang F C. 2002: the most abnormal year of phenology in Beijing for the last 150 years. *Meteorological Monthly*, 2002, 31(1): 19-22.
- [39] Han X M, Shen S H. Research progress on phenological models. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(1): 89-95.
- [40] Maak K, Storch H V. 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.
- [41] Kramer K. A modeling 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.
- [42] Setiyono T D, Weiss A, Specht J, Bastidas A M, Cassman K G, Dobermann A. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high yield conditions. *Field Crops Research*, 2007, 100: 257-271.
- [43] Cheng S M, Gu W C. The phenological division of distribution area in China for *Melia azedarach*. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(3): 186-191.
- [44] Feng L P, Gao L Z, Jin Z Q, Ma X M. Studies on the simulation model for wheat phenology. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(4): 418-424.
- [45] Gao L Z, Jin Z Q, Huang Y, Chen H, Li B B. Rice cultivational simulation-optimization-decision making system (RCSODS). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1992.
- [46] Gao L Z, Jin Z Q, Zheng G Q, Feng L P, Zhang L Z, Shi C L, Ge D K. Wheat cultivational simulation-optimization-decision making system (WCSODS). *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2000, 16(2): 65-72.
- [47] Zhang J H, Li Y C, Yu X J. Numerical study of crop phenological law. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(5): 635-639.
- [48] 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.
- [49] Chuine I. A unified model for budburst of trees. *Journal of Theoretical Biology*, 2000, 207: 337-347.
- [50] Liideke M B K, Ramage P H, Kohlmaier G H. The use of satellite NDVI data for the validation of global vegetation phenology models. *Ecological Modeling*, 1996, 91: 255-270.
- [51] Moulin S, Kergoat L, Viovy N, Dedieu G. Global scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements. *Journal of Climate*, 1997, 10: 1154-1170.

参考文献:

- [1] 陆佩玲, 于强, 贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应. *生态学报*, 2006, 26(3): 923-929.
- [2] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 北京地区气候变化和植被的关系-基于遥感数据和物候资料的分析. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 499-506.
- [3] 王小兰. 兰州市区 16 种树木春季物候期观测. *甘肃林业科技*, 2005, 31(3): 74-75.
- [5] 李荣平, 刘晓梅, 周广胜. 盘锦湿地芦苇物候特征及其对气候变化的响应. *气象与环境学报*, 2006, 22(4): 30-34.
- [7] 张学霞, 葛全胜, 郑景云, 张福春. 近 150 年北京春季物候对气候变化的响应. *中国农业气象*, 2005, 26(3): 263-267.
- [8] 徐雨晴, 陆佩玲, 于强. 气候变化对植物物候影响的研究进展. *资源科学*, 2004, 26(1): 129-137.
- [12] 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. *地理学报*, 1995, 50(5): 403-408.
- [16] 刘占林, 宋颐, 李珊, 赵桂仿. 华山新麦草开花物候期观测和自然种群基因流的间接估测. *植物生态学报*, 2001, 25(4): 426-430.
- [17] 黄敬峰, 王秀珍, 蔡承侠. 新疆冬小麦物候与气候条件研究. *中国农业气象*, 2000, 21(1): 14-19.
- [19] 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响. *科学通报*, 2002, 47(20): 1584-1587.

- [21] 陈效速, 张福春. 近 50 年北京春季物候的变化及其对气候变化的响应. 中国农业气象, 2001, 22(1): 1-5.
- [22] 邹效孟. 农业物候学. 北京: 农业出版社, 1983.
- [35] 王传海, 吴飞倩, 李淑娟, 赵国强. 西安植物园木本植物近十余年物候变化的特征分析. 中国农业气象, 2006, 27(4): 261-264.
- [36] 李长青, 刘力威. 辽宁自然物候统计分析. 辽宁气象, 2004(2): 44-46.
- [37] 黄中雄. 木棉树物候期预报农作物适播期模式探讨. 广西农业科学, 2004, 35(6): 454-455.
- [38] 郑景云, 张福春. 2002 年: 北京 150 年来自然物候最为异常的年份. 气象, 2002, 31(1): 19-22.
- [39] 韩小梅, 申双河. 物候模型研究进展. 生态学杂志, 2008, 27(1): 89-95.
- [43] 程诗明, 顾万春. 苦楝中国分布区的物候区划. 林业科学, 2005, 41(3): 186-191.
- [44] 冯利平, 高亮之, 金之庆, 马新明. 小麦发育期动态模拟模型研究. 作物学报, 1997, 23(4): 418-424.
- [45] 高亮之, 金之庆, 黄耀, 陈华, 李秉梅. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统(RCSODS). 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
- [46] 高亮之, 金之庆, 郑国清, 冯利平, 张立中, 石春林, 葛道阔. 小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS). 江苏农业学报, 2000, 16(2): 65-72.
- [47] 张建华, 李迎春, 余行杰. 作物物候规律的模拟研究. 作物学报, 2000, 26(5): 635-639.