

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.004

植被物候模型研究进展

刘 慧,白音包力皋

(中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要: 回顾植被物候监测现状,总结基于站点的物候模型和基于遥感的物候模型研究进展,提出基于遥感的物候模型研究面临的主要挑战,对可能的发展方向提出建议和展望:一是开展水文学和区域物候模型的交叉研究;二是探索量化影响要素控制作用的方法;三是构建具有预测能力的区域物候模型。

关键词: 植被物候监测;区域物候模型;植被返青;综述

中图分类号: S127;S161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)01-0023-07

Overview on the research of vegetation phenological model

LIU Hui, Baiyinbaoligao

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The research on the vegetation phenology evolution and its driving forces are of critical importance for the eco-system, global meteorological and hydrological processes. Meanwhile, it is a highlighted topic in the meteorological hydrology and eco-hydrology community. Based on the review of the progress made on the vegetation phenology observation and phenological model research based on the in-situ observation and remote sensing, the main challenges of the remote sensing based phenological modeling research were summarized. Then, the suggestions and prospection were proposed as follows; (1) carry out the research based on both the hydrological and large scale phenological models; (2) investigate quantitative methods to evaluate the control of environmental factors; (3) develop phenology predicting models.

Key words: vegetation phenology observation; regional phenological model; vegetation green-up; overview

陆地植被在地球能量转化和物质循环中起着巨大的作用,其初级生产力对人类有十分重要的意义。已有研究表明,全球气候变化对植被生产力产生了显著的影响^[1],趋势性气候变化引起的物候变化改变了植被生命周期,成为影响陆地植被初级生产力的重要因素^[2-3]。因此,研究趋势性气候变化条件下的植被物候响应对于当前气候变化背景下的陆地植被初级生产力的分析等具有重要意义。

物候指的是自然现象发生的时间,如候鸟迁徙、植物开花、树叶在秋季变色和脱落等。对于植被来说,物候包括发芽、返青、开花、结果和衰亡等。当前气候变化趋势主要表现为全球变暖^[4],气温升高使植被物候产生了变化,如多种植被的开花、返青时间随着温度升高呈现提前的趋势^[5-6]。虽然物候变化是缓慢渐进的过程,但其对外部环境的影响却是深远的。植被物候对森林和草地生态系统有重要影响。草原区的牧草如果不能及时返青,杂草将侵占资源而抑制牧草生长,从而影响当地的牧业^[7];植被物候的变化对植物生物量及大气中二氧化碳的含量都有影响,进而影响全球碳循环和气候。同时,物候变化也通过截留和蒸发显著影响水文循环和径流过程,近年来开始受到研究者的关注,尤其是对年内降水相对均匀流域的径流季节变化的影响。例如 Czikowsky 等^[8]研究了美国东北部的径流季节变化,结果表明物候对径流的影响显著,甚至物候

基金项目: 国家自然科学基金(51409268)

作者简介: 刘慧(1985—),女,高级工程师,博士,主要从事生态水文、植被物候研究。E-mail:wuyouliuhui@163.com

引用本文: 刘慧,白音包力皋. 植被物候模型研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):23-29. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.004.

的变化可以直接从径流的变化来推测;Thompson 等^[9]和 Ye 等^[10]发现如果不考虑植被物候,那么美国东南部流域的蒸发和径流模拟结果较差,如果用温度修正来考虑物候的影响则会大幅度改进预测结果;也有研究表明,在落叶林地区由物候变化引起的蒸腾变化是造成径流季节变化的重要原因^[11]。总之,在气候变化背景下,物候演变及其影响要素研究对生态系统、全球气候和水文过程具有重要意义,已成为国际气象水文和生态水文学研究的前沿和热点。

遥感技术和水文学的发展为物候研究提供了更多的研究手段和发展方向,同时基于遥感观测的物候模型研究作为研究热点也面临新的挑战。本文对植被物候检测手段和植被物候模型的研究进展进行总结,重点分析基于遥感的植被物候模型研究面临的主要挑战,并提出具有潜力的研究方向。由于植被返青是植被生命周期中第一个且十分重要的物候,所以文中多以返青为例展开描述。

1 植被物候监测现状

植被物候监测手段可以分为两大类,一类是传统的基于站点的观测,另一类是基于遥感的植被物候监测。基于站点的观测可以根据研究目标获取多种植被生长数据,但是观测需要较长的时间和较高的人工成本,而且不能反映区域物候特征。基于遥感的监测能识别植被的生长茂盛程度,观测内容不如站点观测丰富,但是具有观测周期稳定和观测范围广的特点,能够及时反映区域物候变化。

基于站点的物候观测通常是记录植物生长周期各个特征物候发生的时间,如萌芽、展叶、开花、结果、落叶和休眠等^[12]。Do 等^[13]用平顶树的冠层丰满程度来定义其6个物候发展阶段。Shinoda 等^[14]定义物候发生时间为观测区域内半数草地发生该物候的时间。物候记录还包括植株高度、茎干直径、植物生理指标等数据。

利用遥感植被指数做植被物候监测已经有广泛的应用,遥感的植被指数,如归一化植被指数(normalized difference vegetation index, N_{DVI})和叶面积指数(leaf area index, L_{AI}),与绿色生物量、植被覆盖度等有良好的关系^[15]。 N_{DVI} 利用植被在近红外和红外波段的反射率相差较大的特性,并通过非线性拉伸放大其对比度,从而区分植被和其他地表覆盖,其计算公式如式(1)所示^[16]:

$$N_{DVI} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \tag{1}$$

式中: ρ_{NIR} 、 ρ_{red} ——近红外波段的反射率和红光波段反射率。

主要遥感植被指数数据源包括先进型甚高分辨辐射仪(advanced very high resolution radiometer, AVHRR)和中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据。如 Wei 等^[17]基于 AVHRR 数据,定义了植被生长期并对生长期内的 N_{DVI} 数值进行累加,研究 1982—2006 年的变化趋势,以此来表征植被物候的变化,发现中国物候的变化和经济社会发展有密切的关系。Kang 等^[18]用 MODIS 的 L_{AI} 数据计算混叶林的返青日期,并发现其返青日期和温度有较好的相关关系。

基于遥感数据的植被物候发生时间的计算模型有很多种,主要有阈值法^[19-21]、滑动平均法^[22]、最大变化斜率法^[23]、经验公式法^[24]等。这些方法都有各自的局限性,如适用范围有限、不能很好地反映多季植被的物候特征等。经研究发现植被从返青到成熟时间段内的 N_{DVI} 变化曲线具有对数曲线的特征^[25];Zhang 等^[26]利用 MODIS 数据建立了 N_{DVI} 时间序列的逻辑斯蒂模型,用于监测植被返青时间;Cao 等^[27]对该模型进行改进,使该方法不需要界定返青阈值,具有普适性,可以用于大范围的物候监测。

2 植被物候模型研究现状

在气候变化背景下,植被物候变化对生态系统及农业生产都具有重要的意义。从植被生理学的角度,植被物候取决于诸多要素,包括水分、养分、辐照、氧气和温度等^[28-29]。对于陆面生态系统,水分和温度(水热条件)通常被用于物候分析,很多研究致力于定量分析物候和环境影响要素之间的关系,依据这些关系建立的模型即为物候模型。目前的物候模型可分为2类:静态模型和动态模型。静态模型基于统计方法建立环境要素(如经纬度、气候因子)和植被物候的相关关系,该类模型不考虑环境要素对植被物候的影响机制。动态模型建立物候与环境要素之间的数学关系,探索物候发生机制。

目前,基于站点观测的研究以动态模型为主要研究方向,且较为深入,而基于遥感观测的动态模型处于探索阶段。需要注意的是,基于站点和遥感这2种不同观测方式的研究中对植被物候的定义不尽相同,例如

点尺度观测研究中针对具体研究对象有精确的定义,如“早春麦田半数以上的麦苗心叶(春生一叶)长出部分达到 1~2 cm 时称为返青”,然而基于遥感信息的物候识别则将遥感植被指数变化率最大的时间点定义为植被返青时间。因此,2 类研究虽然总体上具有相近的规律,但是在应用中需要注意其间的差异。

2.1 基于站点的物候模型

站点尺度的物候模型研究多基于站点观测的物候时间以及气象数据来开展,分析的物候影响要素包括温度、降水和土壤水分等。在众多研究中,度日法(degree-day)是一个经典方法,度日的定义为在规定的时间内高于某一阈值的温度累加值(参考 Wang^[30]的文章),该方法描述了植被物候发展过程中的热量条件。该方法后被推广为胁迫度日法(stress-degree-day),包含了水分胁迫的影响^[31]。在不同的地质和气候区都有开展气候、土壤水分和各种植被物候之间关系的研究,比如西红柿^[32]、树林^[33]、半落叶林^[13]、干旱区落叶林^[34]。Shinoda 等^[14]用站点观测物候数据和气象数据,以及水箱模型模拟的土壤水分数据,分析蒙古地区 3 个站点的草地物候和各影响要素之间的关系,研究发现草地返青之前 5 d 通常会有降水发生,生长季长度和期间发生的降水有较好的线性关系。Jolly 等^[34]利用改进的 BIOME-BGC 生态系统过程模型,将气象站点的温度和降水数据作为驱动,确定干旱区落叶林的返青日期和衰老日期,并用 AVHRR 的 N_{DVI} 数据验证模拟的 L_{AI} 结果。国内对植被物候模型的研究主要集中在作物物候模型方面,对森林和草地物候模型的研究很少^[30]。作物物候模型如 WOFOST(world food studies)、CropSyst(model)和 WCSODS(wheat cultivational simulation-optimization-decision making system)中的物候模型都是以积温作为植物发育速率的参数。已有的树木物候模型考虑的影响要素包括临界温度、积温和感光期等,由不同的影响要素出发发展了多种模型,如 Landsberg^[35]的平行模型、Kobayashi 等^[36]的三阶段模型、积温模型和感光性模型等。植被物候动态模型的主要类型根据植被类型总结如表 1 所示。

表 1 植被物候动态模型主要类型
Table 1 Main types of dynamic vegetation phenological models

植被类型	控制要素	代表模型	特 点
农作物	温度	WOFOST、CropSyst、WCSODS	包含物候模块的作物模型,基于积温理论
	光照等	CERES 系列模型 ^[37-38] 等	包含土壤水分平衡、作物生长、作物物候等模块
草 地	温度、光照、氮等	Hurley Pasture Model、GrazPlan、GROWEST、CENTURY ^[39] 等	单一草种或牧草生长管理系统,包含物候模块
树 木	温度	积温模型、平行模型、顺序模型、深度停滞模型、四阶段模型、统一模型等	基于积温理论
	温度、光照	促进-抑制模型	考虑温度、光照等多要素
	降水、土壤、氮等 碳平衡	改进的 BIOME-BGC 等 FBM/PLAI、CTEM ^[40] 等	基于环境要素的生态系统模型 基于碳循环的生态系统模型

2.2 基于遥感的区域物候模型

地面观测很难描述大尺度的植被物候空间分布及其变化,在近 20 年遥感技术被普遍应用于区域或者全球植被动态观测,其优点是覆盖面积广而且有固定观测周期^[22,26,41-42]。遥感技术的发展也促进了气候变化条件下对植被物候变化的研究^[43-45]。目前,通过遥感影像来识别区域植被物候发生时间已成为可能,从而推动了区域物候研究的发展。

当前基于遥感的区域物候模型研究大多是基于统计分析方法。基于统计分析的方法和成果较多,如有学者的研究表明中国东部温带地区植被多年平均返青时间和死亡时间的空间格局与春秋季节平均气温有显著相关关系^[46],温带地区植物物候现象开始日期与其前 2~3 个月的平均温度有重要的联系,伴随温度的升高温带地区的生长季平均延长 1.16 d/a,春季平均气温每上升 1℃植被返青时间将提前 7.5 d,如果同样的增温发生在秋季,植被冬眠的开始时间将推迟 3.8 d^[43]。Zheng 等^[47-48]的研究发现中国东部地区春季植被物候与温度有非线性关系。北京地区植物物候与温度的关系远比其与降水的关系密切^[49-50]。Shen 等^[45]研究了生长季开始前的气温和降水对青藏高原草原物候的影响,研究表明:湿润地区,生长季开始前的温度升高会提前生长季开始时间;干旱地区,生长季开始前的降水对生长季开始时间影响更显著。

气候条件对植被物候的影响是近期研究的一个热点,主要研究集中于气温和降水对植被物候发生时间

的影响。许多基于遥感数据的研究表明,伴随着气温的升高,45°N 和 70°N 范围内的植被起始生长日期提前^[44,51-54]。同时,北美和欧洲的一些研究发现某些物种的起始生长日期推迟^[55-57]。Luo 等^[58]将统计模型(UniFore and UniChill 模型)应用于未来气候变化场景下落叶阔叶林返青日期的预测。已有的研究气候要素和植被物候关系的方法多为统计分析方法,建立模型定量分析的较少,建立定量分析模型而且用于预测的更为少见。Zhang 等^[59]建立了积温-低温日数模型(式(2)),该模型具有预测物候的可能性。

$$T_{TR} = \alpha + \beta e^{\gamma C_d} \tag{2}$$

式中: T_{TR} ——从年初到返青日期的温度高于 5℃ 的积温; C_d ——从 8 月至次年 7 月温度低于 5℃ 的日期数; α 、 β 、 γ ——参数。

2.3 遥感物候模型研究面临的挑战

基于遥感的物候研究具有覆盖面广、空间连续等优势,但因其观测内容有限,且空间尺度和传统研究有较大差异,因此虽然其可借鉴传统研究积累的经验,但在发展中仍面临诸多挑战。

一是已有的基于统计模型的研究中,对影响要素的统计多为在某一固定时段内的累加,这种处理方法不能准确地表达影响要素对物候的影响。Shen 等^[45]和 Liu 等^[60]的研究中对热量控制的返青日期和土壤水分控制的返青日期的定义为解决固定时段的问题提供了新思路,对今后的研究有很好的启发。

二是现有研究多用降水而非土壤水分作为植被生长影响要素。由于降水的相当一部分要转化为蒸发等形式,降水并不能直接反映植被可获得的水分,有研究表明在干旱半干旱地区随着返青期温度的升高可能造成蒸发增加,从而推迟植被返青时间^[61-62],因此降水量增加不一定导致植被返青日期提前。虽然土壤水分和降水条件相比是和植被生长更密切的影响要素,而且被普遍应用于基于传统地面观测的研究中,但在近期基于遥感观测的区域尺度物候研究中,水分条件常用降水来表征,可能是由于在大尺度上其更容易获得,在目前大尺度区域物候研究中基于土壤水分的物候模型非常稀少。

三是关于植被物候控制要素的研究较少,定量研究更少。如在研究草地返青的主导要素时,草地返青模型的回归效率系数可以在一定程度上判断哪个要素和草地返青的关系更密切,这也是当前分析植被物候主导要素的主流方法^[45,63]。但是已有研究多采用复相关系数,若检验某个要素对植被返青的影响是否显著,应采用其对应的偏相关系数来衡量,而且这种方法不能定量描述主导要素的影响程度,因为影响草地返青的各个要素有各自的量纲,所以无法通过直接比较它们的数值来确定主导要素。

3 结 语

植被物候研究是当前物候研究以及气象水文、生态水文研究的热点问题。伴随遥感技术发展,大尺度物候变化观测能力不断增强,为区域尺度的物候模型研究提供了有利条件。然而目前大尺度物候模型研究多基于统计模型,且和植被物候变化关系更直接的水分要素(土壤水分)未纳入区域物候模型,植被物候控制要素的定量描述也存在不足。

基于研究现状,植被物候模型研究可在以下方面期待新进展:一是加强水文模拟和区域物候模型的交叉研究,将水文模型的土壤水分模拟能力应用于区域植被物候的研究;二是探索环境要素和植被物候关系的量化研究方法,定量描述植被物候控制要素的控制作用;三是探索构建具有预测能力的物候模型,为气候变化条件下的生态规划和水资源管理提供支撑。

参考文献:

[1] 季劲钧,黄玫,刘青. 气候变化对中国中纬度半干旱草原生产力影响机理的模拟研究[J]. 气象学报, 2005, 26(3): 257-266. (JI Jinjun, HUANG Mei, LIU Qing. Modeling studies of response mechanism of steppe productivity to climate change in latitude semiarid regions in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 26(3): 257-266. (in Chinese))

[2] 赵亮,王芳,杨志华,等. 物候分化对天然草地群落生产力的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(6): 1048-1051. (ZHAO Liang, WANG Fang, YANG Zhihua, et al. Effects of phenophase differentiation on production of grassland community[J]. Pratacultural Science, 2011, 28(6): 1048-1051. (in Chinese))

[3] 程曼,王让会,薛红喜,等. 干旱对我国西北地区生态系统净初级生产力的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 1-7. (CHENG Man, WANG Ranghui, XUE Hongxi, et al. Effects of drought on ecosystem net primary production in northwest [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 1-7. (in Chinese))

- [4] IPCC. Climate change 2014: synthesis report; Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva: IPCC, 2014.
- [5] LIU Xianfeng, ZHU Xiufang, ZHU Wenquan, et al. Changes in spring phenology in the Three-Rivers Headwater Region from 1999 to 2013[J]. Remote Sensing, 2014, 6:9130-9144.
- [6] 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[J]. International Journal of Biometeorology, 2000, 44(2): 82-87.
- [7] 纪亚君. 高寒草地毒草的危害及防除利用研究[J]. 杂草科学, 2005, 23(4): 3-5. (JI Yajun. Damage and control research of alpine grassland poisonous weeds[J]. Weed Science, 2005, 23(4): 3-5 (in Chinese))
- [8] CZIKOWSKY M J, FITZJARRALD D R. Evidence of seasonal changes in evapotranspiration in eastern US hydrological records [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(5): 974-988.
- [9] THOMPSON S E, HARMAN C J, KONINGS A G, et al. Comparative hydrology across AmeriFlux sites: the variable roles of climate, vegetation, and groundwater[J]. Water Resources Research, 2011, 47(W00J07)
- [10] YE S, YAEGER M A, COOPERSMITH E, et al. Exploring the physical controls of regional patterns 5 of flow duration curves- Part 2: role of seasonality and associated process controls[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussion, 2012, 9: 7035-7084.
- [11] CAYAN D R, KEMMERDIENER S A, DETTINGER M D, et al. Changes in the onset of spring in the western United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82: 399-415.
- [12] 王继林, 于洪波, 何虎林, 等. 物候观测与造林树种的选择[J]. 甘肃科技, 2006, 12(12): 218-219. (WANG Jilin, YU Hongbo, He Huping, et al. Phenological observation and selection of afforestation tree species [J]. Gansu Science and Technology, 2006, 12(12): 218-219. (in Chinese))
- [13] DO F C, GOUDIABY V A, GIMENEZ O, et al. Environmental influence on canopy phenology in the dry tropics[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 215(1/2/3): 319-328.
- [14] SHINODA M, ITO S, NACHINSHONHOR G U, et al. Phenology of mongolian grasslands and moisture conditions[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan: Ser II, 2007, 85(3): 359-367.
- [15] BARET F, GUYOT G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J] Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2/3): 161-173.
- [16] ROUSE J W, HAAS R H, SHELL J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[C]//FREDEN S C, MERCANTI EP, BECKER M. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Technical presentations, section A, vol. 1. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration (NASA SP-351), 1973: 309-317.
- [17] WEI Haiyan, HEILMAN P, QI Jianguo, et al. Assessing phenological change in China from 1982 to 2006 using AVHRR imagery [J]. Frontiers of Earth Science, 2012, 6(3): 227-236.
- [18] KANG S, RUNNING S W, LIM J, et al. A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: an application of MODIS leaf area index[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(2): 232-242.
- [19] LLOYD D. A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(12): 2269-2279.
- [20] WHITE M A, THORNTON P E, RUNNING S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1997, 11(2): 217-234.
- [21] 常守志, 王宗明, 宋开山, 等. 基于 N_{DVI} 数据的三江平原农田物候监测[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(1): 82-88. (CHANG Shouzhi, WANG Zongming, SONG Kaishan, et al. Monitoring cropland phenology in Sanjiang plain based on N_{DVI} data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(1): 82-88. (in Chinese))
- [22] REED B C, BROWN J F, VANDERZEE D, et al. Measuring phenological variability from satellite imagery[J]. Journal of Vegetation Science, 1994, 5(5): 703-714.
- [23] KADUK J, HEIMANN M. A prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models[J]. Climate Research, 1996, 6(1): 1-19.
- [24] MOULIN S, KERGOAT L, VIOVY N, et al. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements[J]. Journal of Climate, 1997, 10(6): 1154-1170.
- [25] VILLEGAS D, APARICIO N, BLANCO R, et al. Biomass accumulation and main stem elongation of durum wheat grown under Mediterranean conditions[J]. Annals of Botany, 2001, 88(4): 617-627.

- [26] ZHANG Xiaoyang, FRIEDL M A, SCHAAF C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(3): 471-475.
- [27] CAO Ruyin, CHEN Jin, SHEN Miaogen, et al. An improved logistic method for detecting spring vegetation phenology in grasslands from MODIS EVI time-series data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200:9-20.
- [28] LAMBERS H, CHAPIN I F S, PONS T L. *Plant Physiology Ecology*[M]. 2nd edition. New York:Springer Science+Business Media, LLC, 2008.
- [29] 张立军, 梁宗锁. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [30] WANG Jenyu. A critique of the heat unit approach to plant response studies[J]. *Ecology*, 1960, 41:785-789.
- [31] IDSO S B, JACKSON R D, REGINATO R J. Extending the “degree day” concept of plant phenological development to include water stress effects[J]. *Ecology*, 1978, 59(3): 431-433.
- [32] WEAVER S E, TAN C S, BRAIN P. Effect of temperature and soil moisture on time of emergence of tomatoes and four weed species[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1988, 68(3): 877-886.
- [33] SEGHERI J, VESCOVO A, PADEL K, et al. Relationships between climate, soil moisture and phenology of the woody cover in two sites located along the West African latitudinal gradient[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(1/2): 78-89.
- [34] JOLLY W M, RUNNING S W. Effects of precipitation and soil water potential on drought deciduous phenology in the Kalahari [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(3): 303-308.
- [35] LANDSBERG J J. Apple fruit bud development and growth: analysis and an empirical model[J]. *Annals of Botany*, 1974, 38: 1013-1023.
- [36] KOBAYASHI K D, FUCHIGAMI L H, ENGLISH M J. Modeling temperature requirements for rest development in cornus-sericea[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1982, 107(5): 914-918.
- [37] 李荣平, 周广胜, 阎巧玲. 植物物候模型研究[J]. 中国农业气象, 2005, 26(4): 8-12. (LI Rongping, ZHOU Guangsheng, YAN Qiaoling. Research on vegetation phenological model[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(4): 8-12. (in Chinese))
- [38] 谢云, JAMES R K. 国外作物生长模型发展综述[J]. 作物学报, 2002, 28(2): 190-195. (XIE Yun, JAMES R K. A review on the development of crop modeling and its application[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(2): 190-195. (in Chinese))
- [39] 符瑜, 潘学标. 草本植物物候及其物候模拟模型的研究进展[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 319-325. (FU Yu, PAN Xuebiao. Research advances in herbage plant phenology and phenological model of grassland [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(3): 319-325. (in Chinese))
- [40] 范广洲, 贾志军. 植物物候研究进展[J]. 干旱气象, 2010, 28(3): 250-255. (FAN Guangzhou, JIA Zhijun. Study advances on plant phenology[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2010, 28(3): 250-255. (in Chinese))
- [41] JULIEN Y, SOBRINO J A. Global land surface phenology trends from GIMMS database[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(13): 3495-3513.
- [42] YANG Xi, MUSTARD J F, TANG Jianwu, et al. Regional-scale phenology modeling based on meteorological records and remote sensing observations[J]. *Journal of Geophysical Research (Biogeosciences)*, 2012, 117: G03029.
- [43] PIAO Shilong, FANG Jingyun, ZHOU Liming, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 672-685.
- [44] WANG Aihui, LETTENMAIER D P, SHEFFIELD J. Soil moisture drought in China, 1950-2006[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(13): 3257-3271.
- [45] SHEN Miaogen, TANG Yanhong, CHEN Jin, et al. Influences of temperature and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1711-1722.
- [46] 陈效逖, 胡冰, 喻蓉. 中国东部温带植被生长季节的空间外推估计[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 65-74. (CHEN Xiaodan, HU Bing, YU Rong. Spatial extrapolation of the vegetation growing season in temperate eastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 65-74. (in Chinese))
- [47] ZHENG Jingyun, GE Quansheng, HAO Zhixin, et al. Spring phenophases in recent decades over eastern China and its possible link to climate changes[J]. *Climatic Change*, 2006, 77(3/4): 449-462.
- [48] ZHENG Jingyun, GE Quansheng, HAO Zhixin. Impacts of climate warming on plants phenophase in China for the last 40 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47: 1826-1831.
- [49] 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[J]. 植物生态学报,

2004, 28(4): 499-506. (ZHANG Xuexia, GE Quansheng, ZHENG Jingyun. Relationships between climate change and vegetation in Beijing using remote sensed data and phenological data[J]. Journal of Plant Ecology, 2004, 28(4): 499-506. (in Chinese))

[50] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 近 50 年北京植被对全球变暖的响应及其时效: 基于遥感数据和物候资料的分析[J]. 生态学杂志, 2005, 24(2): 123-130. (ZHANG Xuexia, GE Quansheng, ZHENG Jingyun. Impacts of lags of global warming on vegetation in Beijing for the last 50 years based on remotely sensed data and phenological information[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(2): 123-130. (in Chinese))

[51] MYNENI R B, KEELING C D, TUCKER C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. Nature, 1997, 386: 698-702.

[52] ZHOU Liming, TUCKER C J, KAUFMANN R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2001, 106(D17): 20069-20083.

[53] LUCHT W, PRENTICE I C, MYNENI R B, et al. Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect[J]. Science, 2002, 296: 1687-1689.

[54] PIAO Shilong, FRIEDLINGSTEIN P, CIAIS P, et al. Effect of climate and CO₂ changes on the greening of the Northern Hemisphere over the past two decades[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(23): L23402.

[55] JEONG S, HO C, GIM H, et al. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008[J]. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2385-2399.

[56] BRADLEY B A, JACOB R W, HERMANCE J F, et al. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(2): 137-145.

[57] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe[J]. Nature, 1999, 397: 659.

[58] LUO Xiangzhong, CHEN Xxiaoqi, WANG Lingxiao, et al. Modeling and predicting spring land surface phenology of the deciduous broadleaf forest in northern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014(8):33-41.

[59] ZHANG Xiaoyang, TARPLEY D, SULLIVAN J T. Diverse responses of vegetation phenology to a warming climate[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34, L19405.

[60] LIU Hui, TIAN Fuqiang, HU Hongchang, et al. Soil moisture controls on patterns of grass green-up in Inner Mongolia: an index based approach[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2013, 9(10):11641-11675.

[61] PIAO Shilong, CUI Mengdi, CHEN Anping, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1599-1608.

[62] YU Fangfang, PRICE K P, ELLIS J, et al. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(1): 42-54.

[63] SUN Zhigang, WANG Qinxue, XIAO Qingan, et al. Diverse Responses of remotely Sensitivity analysis of water balance components in forest and grass plot scale in hilly region using SWAT99.2[J]. Remote Sensing, 2014, 7:360-377.

(收稿日期:2017 -03 -28 编辑:高建群)