

遥感物候学研究进展

陈效逖, 王林海

(北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘 要:植物物候现象是环境条件季节和年际变化最直观、最敏感的生物指示器,其发生时间可以反映陆地生态系统对气候变化的快速响应。近年来,遥感物候观测因其具有多时相、覆盖范围广、空间连续、时间序列较长等特点,已成为揭示植被动态对全球气候变化响应与反馈的重要手段。文章在介绍植物物候遥感监测的数据集及其预处理方法的基础上,从植物物候生长季节的划分、植物物候与气候变化、植物物候与净初级生产量、植物物候与土地覆盖、植物物候与农作物估产等方面系统阐述了近 5 年来国内外遥感物候学研究的重要进展,并针对目前研究中存在的问题,提出近期遥感物候研究的主要方向:(1)发展一种更具普适性的物候生长季节划分方法;(2)通过开展植物群落的物候观测和选择合适的尺度转换方法,统一地面与遥感的空间信息;(3)定量分析植物物候变化对人类活动的响应机制;(4)选择适宜的数学方法和模型,实现各种不同分辨率遥感数据的融合;(5)通过动态模拟,预测植物物候对未来气候变化的响应。

关 键 词:遥感物候学;生长季节;净初级生产量;土地覆盖;农作物估产;气候变化

1 引言

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的发生时间,及其与环境条件(气候、水文和土壤)周期性变化相互关系的科学^[1,2]。物候现象如树木的开花、展叶、叶变色、落叶,鸟类的迁徙,昆虫的活动等不仅反映当地、当时的环境条件,而且反映过去一段时间内环境条件的积累^[1,3]。因此,生物物候现象是环境条件季节和年际变化最直观、最敏感的综合指示器,其发生时间可以反映陆地生态系统短期变化的特征^[4]。

传统的植物物候观测具有客观和准确的特点,但除了欧洲一些国家如德国外,地球上大部分地区缺乏覆盖范围广、时间序列长的植物物候观测数据,难以进行大尺度的物候时空分析。相比之下,由于遥感观测具有多时相、覆盖范围广、空间连续、时间序列较长,并能反映植物季节性生长发育的过程及其年际变化等特点^[3-6],所以通常作为估计地面宏观植物物候变化的依据^[7]。近年来,利用遥感方法对全球和区域尺度植物物候变化的研究,深化了人们对生物圈与大气圈之间相互作用机理的认识^[8],从而使遥感物候学成为全球气候变化与陆地生态系统动态研究的一个前沿领域。

自 Lloyd^[9]等在 1990 年提出利用归一化差值植被指数(NDVI)的阈值进行植物物候生长季节的划分之后,遥感物候学的研究不断深化并拓展,主要研究内容涉及植物物候生长季节的划分、气候与物候变化的关系、大尺度植被初级生产量的估算、土地覆盖的分类与监测、农作物的估产等。本文通过回顾和评述国内外近 5 年来遥感技术在植物物候研究方面的重要成果,概括遥感物候学的最新研究进展,并分析研究中存在的主要问题与挑战。

2 遥感数据及其预处理

2.1 数据集

自 1972 年第一颗地球资源卫星(Landsat)发射以来,遥感数据不断增多,数据的功能和用途也在不断变化。目前可用于监测植被动态的遥感数据有 NOAA-AVHRR, SPOT-VGT, MERIS, MODIS, MSS, TM 和 ETM⁺, SPOT4 和 5, CBERS-1/2, ASTER, RADAR, IKONOS, Quick-Bird 等。根据研究的目的、方法及精度要求的不同,可选择不同的遥感数据,如 NOAA-AVHRR、SPOT-VGT、MODIS 等低空间分辨率的数据,可用于区域、大洲或全球尺度的植被监测;而 MSS、TM 和 ETM⁺、ASTER 等高空间分辨

收稿日期:2008-06; 修订日期:2008-12。

基金项目:国家自然科学基金项目(40671028, 40871029)。

作者简介:陈效逖(1958-),男,北京市人,教授,主要从事植物物候学和气候变化研究。E-mail: cxq@pku.edu.cn

率的数据,则常用于小尺度土地利用与覆盖变化分析、植被制图和精细农业调控等。

2.2 数据预处理

在遥感数据采集和处理过程中,太阳高度角、观测角度,以及云、水汽、气溶胶、尘埃和传感器精度变化等因素,都会对植被动态监测的效果产生影响^[10]。因此,在进行遥感数据预处理前,常采用最大合成法(MVC)或最佳指数斜率提取法(BISE)检测数据时间序列中的局部异常点,并降低噪声,但仍不能去除亚像元内随机出现的残余云、霾等对数据精度的影响。同时,上述方法的采用还加剧遥感数据的不规则性波动,使反演难度增大、精度降低^[11,12]。因此,为了更真实地反映植被的动态,常对遥感数据进行重构,以降低数据的噪声水平,提高数据的质量。目前主要有三种数据重构方法,即空间域处理法、时间域处理法和非时空域处理法^[11]。

空间域处理指对遥感数据进行空间上的局部平均,减少局部异常点,便于区域和全球尺度植被变化趋势的识别。Myneni 等^[13]基于纬度地带性分布特征对 NDVI 数据进行纬度带平均,诊断出 1981–1991 年间北半球植被活动的变化趋势。Lim 等^[14]利用北美的土地覆盖分类,重构了 NDVI 时间序列数据,表明植物物候与南方涛动指数关系密切。Potter 等^[15]结合 NDVI 与光合有效辐射比率(FPAR)数据,对比分析了大陆尺度的碳沉降特征。这些工作都是从大尺度上对植物物候的空间变化进行宏观的分析,但忽略了生态过程中许多小尺度的重要信息,因此,无法鉴别物候变化的区域性和地方性差异。

时间域处理指对遥感数据进行时间域上的局部平均,从而降低噪声水平,主要采用滤波函数对数据进行重建。Reed 等^[5]利用中值滤波法,减少了云等引起的 NDVI 突变值,提取了植物物候季节变化的特征,但却损失了植物最大绿度的信息^[12]。Moody 等^[16]基于傅立叶滤波函数重构了数据集,增加了物候季节划分的可信度,但该方法对遥感数据中的伪高值和伪低值敏感,故重建的数据较观测数据有一定偏差^[11]。Jonsson 等^[17]利用不对称高斯基函数对西非地区 AVHRR–NDVI 时间序列数据进行平滑处理,得出该区域植物物候的年际变化信息。Chen 等^[18]利用 Savitzky–Golay 滤波法对中国地区 SPOT–VGT 数据进行光滑处理,提取了高质量的数据。Zhang 等^[19]和 Fisher 等^[20]利用 Logistic 函数对 MODIS–EVI 和 Landsat 时间序列数据进行季节性

拟合,提取出植物物候变化曲线。而 Sakamoto 等^[21]选择小波分析法对日本的 MODIS–EVI 数据进行了滤波处理,结果表明,小波滤波处理有利于提高农作物估产的精度。总之,时间域处理仅从时间维出发,通过提取异常值前后时段的遥感数据平均值或使用前后多时段遥感数据拟合曲线估算值来代替原来的异常值,但却忽略了大气和下垫面条件的差异性,因此,也会导致物候信息的失真。

非时空域处理指不需要进行空间或时间域上的平均,即可有效降低大气和传感器影响的数据处理^[11],主要分为两个步骤:首先基于遥感数据,利用谐波分析法模拟出年际物候信息,其次,对年内物候信息进行高次多项式样条函数拟合,从而达到时间序列数据的平滑。对美国西部主要土地覆盖类型的物候变化分析表明,该方法能提高年内物候变化的检测能力,并更好地揭示区域土地覆盖变化的趋势。Hermance 等^[22]借助该方法对典型农业区、高海拔山区灌丛和半干旱草地的遥感数据进行曲线拟合,精确地诊断出植物物候的短期与长期变化。

3 植物物候生长季节的划分

物候生长季节指一年中植物可以生长的天数,它是陆地碳循环和净初级生产量 (net primary production, NPP) 模拟的重要参数,其变化受季节性气温、降水、土壤温度、土壤水分等因素的显著影响。精确地划分植物物候生长季节并分析其时空变化特征,有助于揭示陆地生态系统对气候变化的快速响应^[23–25]。目前,基于遥感数据划分物候生长季节的方法主要有:阈值法、时间序列法、物候期频率分布型–遥感综合法、主分量分析法、曲线拟合法等^[24]。

北半球温带是全球气候变化最显著的区域之一,该区域的物候生长季节研究,对于深入认识陆地生态系统对气候变化的响应具有典型性。Suzuki 等^[26]基于静态阈值法分析了亚洲北部植物变绿期、旺盛光合期和凋落期的空间变化,结果表明,该区域植物物候变化存在明显的梯度特征,西部较早、东部较晚。在 45°N ~50°N 的横断面上,哈萨克斯坦的植物变绿期、旺盛光合期、凋落期的开始分别比蒙古提前 3.4 周、8.7 周、13.4 周;而在 50°N ~60°N 的横断面上,40°E 地区植物变绿期和旺盛光合期的开始分别比 115°E 地区早 3.8 周和 3.9 周,凋落期的开始无明显的东西差异。这种植物物候的空间差

异与积温和降水量有关。Delbart 等^[25,27]利用归一化植被水分指数(NDWI)分析亚欧大陆植物生长季节的变化, 结果显示, 1982–1991 年期间的生长季节开始日期平均提前了 8 天, 1991–2004 年生长季节开始日期提前速度变缓, 但仍然提前了 3.5 天, 而 1993–2004 年生长季节结束日期则平均推迟了 3.6 天。在美国, Reed 等^[8]研究认为, 北美春季物候期提前的区域较少, 而秋季物候期延迟的区域较多。Zhang 等^[19]利用分段 Logistic 函数, 分析了美国东北部物候生长季节的变化, 得出植被变绿期在南部始于 3 月末至 4 月初, 平均向北移动 1 个纬度, 森林与自然植被变绿期推迟 1.7 天, 而城市绿地与农田变绿期推迟 2.2 天; 植被凋落期无明显空间变化趋势; 植被休眠期开始日期自北向南从 10 月末推迟至 11 月末, 推迟的幅度依地表覆盖类型的不同而不同, 森林与自然植被每降低 1 个纬度推迟 2.4 天, 而城市绿地与农田推迟 4.4 天。遥感与地面物候观测资料对比分析发现^[4,28], 两者差异为 3~4 天。

在国内, Chen 等^[4]利用物候期频率分布型–遥感综合法, 探讨了中国东部温带地区物候生长季节的时空变化特点, 结果显示, 在不同纬度带和整个研究区域, 生长季节结束日期呈显著推迟的趋势, 而开始日期则呈不显著提前的趋势, 这与欧洲生长季节开始日期显著提前而结束日期不显著推迟的变化趋势不同; 北部纬度带的生长季节平均每年延长 1.4~3.6 天, 全区的生长季节平均每年延长 1.4 天, 与同期北半球和欧亚大陆生长季节延长的趋势数值相近。于信芳等^[29]利用 MODIS 数据分析得出, 东北森林地区树木在第 100~150 天开始生长, 到第 260~290 天逐渐停止生长, 生长季节长度为 140~180 天, 与 Chen 等^[4]的结果相近。王宏等^[30]利用阈值法和滑动平均法对我国北方植物物候生长季节变化的分析表明, 不同植被类型生长季节的趋势变化亦不同, 典型草原和荒漠草原生长季节的开始日期提前, 结束日期推迟, 而温带落叶阔叶林则开始日期和结束日期均推迟。大部分纬度带的生长季节开始日期表现为提前的趋势, 结束日期表现为推迟的趋势, 生长季节在延长。此外, 丁登和陈效述^[31]利用中值法、经验公式法、延迟滑动平均法和原型曲线法, 划分了我国温带草原区和暖温带落叶阔叶林区的生长季节, 并进行了地面检验, 结果表明, 生长季节开始的划分, 无论在草原区还是在森林区都以原型曲线法最为适宜, 而生长季节结束的划分, 草原

区以中值法最好, 森林区以原型曲线法最佳。

4 植物物候与气候变化

IPCC 第四次评估报告指出, 1906–2005 年全球平均气温升高了 $0.74 \pm 0.18^\circ\text{C}$ 。气候变暖通过引起植物物候生长季节的变化, 改变植物光合作用和呼吸作用期间的长度, 进而影响全球植被–大气间季节性碳循环的格局^[32,33]。可见, 探索植物物候与气候变化的关系, 对于大尺度生长季节动态及其对气候变化响应与反馈的模拟与预测研究, 具有至关重要的意义。

研究显示, 全球植被物候生长季节的格局与季节性气温的变化^[26]关系密切, 在中高纬度地区最为显著^[27,34,35]。Cleland 等^[32]通过模拟变暖、提高 CO_2 浓度、N 沉降及增加降水的变化, 得出变暖是草原植物开花与冠层变绿提早的关键因子。近百年的全球变暖已导致草本植物开花期的提前及生长季节结束的延迟, 也延长了植物个体生长发育的时间^[32]。

气候变化对不同植被类型生长季节的影响存在着明显的差异。在北美, 年平均陆地表面温度每升高 1°C , 自然植被的生长季节开始日期提前约 5 天, 大于欧洲和亚洲地区^[36]。一般来说, 森林的响应程度比灌木和草原显著。降水对干旱或半干旱区植物物候变化影响明显, 如非洲、澳洲和南美洲南部的草原、灌木和稀疏草原等地区生长季节的延长完全依赖于降水条件的改变, 响应的滞后期约为 20~40 天^[35]。城市内物候生长季节的开始日期比农村平均提前 2~9 天, 结束日期比农村平均推迟 2~16 天, 且北美大陆比欧亚大陆的城乡差异更为明显, 这与城市化加剧了“热岛效应”有关^[36]。对蒙古草原地区的研究表明^[37], 春季的降水对典型草原植物返青起着控制作用, 而气温对荒漠草原植物返青的影响更大。在欧洲, 植物物候提前和延迟的趋势与冬季海面温度异常和北大西洋涛动密切相关^[38], 而在北美, 植物物候的年际与年内差异与北美季风和 EN-SO 导致的降水变化有关^[39]。Xiao 等^[40]和 Huete 等^[41]对南美亚马孙河流域热带雨林区的研究表明, 植物物候变化主要受制于太阳辐射变化与病虫害, 遥感植被指数最大值出现在干旱季节后期至雨季前期, 与季节性降水的关系不密切。

在我国, Chen 等^[4]的研究表明, 在 1982–1993 年期间, 东部温带地区物候生长季节多年平均起讫

日期的空间格局与春季和秋季平均气温的空间格局相关显著;生长季节结束日期的显著推迟与晚春至夏季的区域性降温有关,而生长季节开始日期的不显著提前则与晚冬至春季气温趋势的不稳定变化有关;在年际波动方面,生长季节开始和结束日期分别与 2~4 月平均气温和 5~6 月平均气温呈负相关关系。Piao 等^[42]统计分析了 1982–1999 年我国温带地区遥感物候变化与气温和降水的关系,指出物候期开始时间与其发生前 2~3 个月的平均气温密切相关,春季气温升高 1℃,物候期提前 7.5 天,秋季气温升高 1℃,物候期推迟 3.8 天。此外,降水的变化也对物候期产生影响,但降水对不同植被类型物候期的影响程度不同。

5 植物物候与植被净初级生产量

植被净初级生产量(NPP)是指绿色植物在单位面积、单位时间内通过光合作用固定的有机物质总量(GPP)扣除自养呼吸(RA)消耗的有机物质数量后剩余的部分。研究表明,气候变化已导致全球植被净初级生产量发生了比较明显的变化^[15,43]。Hazarika 等^[44]利用 MODIS 数据反演植被叶面积指数(LAI)的季节变化,再结合生态模型,模拟了全球 NPP 的变化,结果显示,全球 NPP 以热带雨林地区最高,其次是北纬 60°附近的寒带地区。在 1982–1999 年期间,全球 NPP 增加了 6%(3.4PgC),以南半球热带地区的增加最为显著,其中,亚马孙河流域热带雨林地区 NPP 的增加量占全球增加量的 42%^[43]。

Kimball 等^[45]利用雷达遥感数据监测寒带及亚高山常绿针叶林带的物候生长季节,并与实地观测和生态系统过程模型(BIOME-BGC)模拟结果进行了对比,发现遥感生长季节开始日期和长度与实测和模型输出非常一致,并且与 NPP 的区域格局也具有较好的一致性。利用 AVHRR 数据模拟泛北极盆地和阿拉斯加地区 NPP 时空格局的结果显示,近 20 年来气候变暖导致的生长季节延长,直接影响到植物的光合作用和固碳能力,使该地区 NPP 增加了 2.7%/10a,表明北半球高纬地区的碳循环在加快^[46]。

Picard 等^[47]利用 SPOT-VGT 数据计算了寒带落叶林地区的植被水指数(NDWI),并比较了根据 NDWI 和 NDVI 值确定的芽膨大期的差异,发现利用 NDWI 值反演的芽膨大期精度更高。据此,将根据 NDWI 值得到的芽膨大期嵌入到 SDGVM 模型的物

候模块中,模拟出 NPP 的空间变化。结果显示,植物发芽时间若有 1 天的变化,将导致 $10\text{gCm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 的 NPP 变化。如果遥感监测的芽膨大期与实地观测日期之间存在 6.5 天的差异,将会导致 $41\text{gCm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 的 NPP 差异。因此,准确地确定植物物候生长季节开始日期是估测大尺度净初级生产量的关键所在。

Xiao 等^[48]利用遥感植被光合模型估测了常绿针叶林地区 GPP 的季节与年际变化,并进行了点对点的检验,发现模拟结果与通量塔观测数值有较好的一致性。Churkina 等^[49]利用 NOAA-AVHRR 和 SPOT-VGT 数据对 28 个碳通量观测站的植物物候生长季节进行了划分,统计结果显示,站点生长季节长度与碳吸收时期之间的关系密切。

综上所述,利用遥感数据估算净初级生产量的关键是获得准确的植物物候生长季节开始和结束日期。因此,在生长季节划分的研究中,要重视选择最佳的划分方法,以提高 NPP 估算的精度。

6 植物物候与土地覆盖

土地覆盖状况是区域和全球尺度气候与生态系统过程模拟的重要参数^[51]。多光谱遥感分析表明,加入植物物候变化可提供更详细的土地覆盖信息^[5],同时土地利用和土地覆盖的变化也会影响到植物物候的变化^[8]。

基于单波段影像的土地覆盖分类受到越来越多的质疑,为了改进土地覆盖分类的精度,Aurdal^[51]等提出利用隐 Markov 模型结合多时相遥感数据模拟植物物候的变化趋势,并据此绘制了较高精度的植被分类图。Boles 等^[52]通过比较遥感陆地表面水分指数(LSWI)和增强型植被指数(EVI)在土地覆盖分类中的应用效果指出,LSWI 的季节性曲线可用来划分温带落叶植被的生长季节,而在生长季节峰值期,EVI 的季节性曲线比 LSWI 的季节性曲线波动范围更大,可用来识别不同的植被类型。因此,结合季节性 LSWI 和 EVI 指数的曲线特征,可实时而详细地生成土地覆盖图和植物物候图。

作为受人类活动影响明显不同的两类土地单元,城市与农村有着截然不同的生物群落和非生物环境条件组合。Zhang 等^[19]区分了城市与农村两种土地利用类型,并结合植物物候特征,提取出针叶林、落叶阔叶林、针阔叶混交林、草原、农田等土地覆盖信息^[36]。Beurs 等^[53]选择哈萨克斯坦不同时期温

度无差异的两个灌溉农业区,通过观测地表植物物候特征,发现土地覆盖类型有由农用地转向杂草地的趋势,这与人类活动和社会制度变迁有关。Souza 等^[54]通过比较遥感数据所反映的植物物候变化,得出森林的大面积砍伐^[54]与原始农作方式^[55]是造成热带森林大面积减少和土地退化的重要原因。

我国学者也开展了利用植物物候信息进行土地覆盖分类的研究。郑玉坤等^[56]利用傅立叶分析法揭示了我国全年及季节性土地覆盖变化的特点,并引入植物物候特征对土地覆盖进行分类。宫攀等^[57]选择了 NDVI 及陆表温度(LST)数据,较好地反映了东北地区植被的季相变化,进而划分了植被与非植被、一年一熟农作物、高盖度草地、落叶针叶林与落叶阔叶林等土地覆盖类型。张霞等^[58]构建了华北平原植被指数图像时间谱,提取 5 个表征植物物候差异的特征向量,并结合 LST 及坡度信息建立了分类二叉树,实现对土地覆盖的分类,通过比较实地调查结果与 TM 影像分类结果发现,利用植物物候信息进行土地覆盖分类的精度更高。

7 植物物候与农作物估产

农作物产量的大尺度和高精度遥感估测,可提高农作物产量预报准确性^[59]和农田管理的水平^[60]。农作物通常经历播种、营养生长、生殖生长和成熟等物候阶段,发育期变化对农作物产量的形成具有显著的影响。目前,基于遥感数据和物候学原理的农作物估产主要集中在对玉米^[59]、小麦和大麦^[60-62]、水稻^[21,63]、棉花、大豆等的产量估算。

利用卫星数据估算农作物的产量,最初是从小麦开始的,此后扩展到其他农作物。Lobell 等^[60]利用两年的 TM 数据并结合小麦的物候特征,通过建立基于作物光能利用率的简单作物估产模型,评估了墨西哥西北部小麦种植面积、种植时间与产量的关系。将估算的产量与地面实测产量进行比较发现,两者相差约 4%。Duchemin 等^[61]利用 STICS 模型分析了半干旱地区农作物的物候变化,结果显示,灌溉对农作物物候的影响显著,并进而影响到小麦和大麦的产量。在我国,张明伟等^[62]利用气候数据建立了作物物候指标模型以计算熟度指数,并选择季相差别最小的两时期遥感数据,采用图像差值法估算了北京市顺义地区冬小麦的播种面积变化,结果表明,结合物候模型与遥感数据是获取农作物播种

面积的较好方法之一。

水稻主要分布在亚洲,因此,对水稻的估产研究也集中在中国、日本^[21]、泰国^[63]等地。Sakamoto 等^[21]利用小波法对 MODIS-EVI 曲线进行处理,划分出日本的水稻生长阶段并估算了水稻的产量,对比分析表明,该方法可以提高水稻估产的精度。张峰等^[63]利用光学和微波遥感影像估算了泰国水稻的种植面积,并识别和计算了水稻的逐月种植情况及产量变化。

除小麦和水稻以外,Vinña 等^[59]利用遥感大气可见光抵抗指数(VARI)曲线,提取玉米生长过程中各阶段所反映的物候和生理发育特征,并用于估算和预报玉米的产量。

8 展望

综上所述,国内外在遥感物候学的研究方面已经取得了长足的进步,极大地推动了现代物候学的发展,并使之成为研究陆地生态系统对全球气候变化快速响应的学术前沿。然而,遥感物候学毕竟是一个新的研究领域,研究工作中尚存在着一些问题与不足。

(1)生长季节是植物物候研究中最重要状态变量之一,可用来精确地评价陆地生态系统季节和年际动态的定常性与非定常性。利用遥感数据确定植物物候生长季节的方法很多,但由于不同方法通常都是针对特定的研究区域或植被类型发展起来的,不具有普适性,所以,运用不同方法对某个区域或植被类型的生长季节进行划分,往往会得到完全不同的结果。因此,结合植物生长发育的多态性、土壤背景值以及区域气候特征^[64]等,发展一种更具普适性的植物物候生长季节划分方法,将是今后遥感物候学研究的重要方向。

(2)遥感数据描述的是地表景观的反射率信息,在有植被覆盖的区域则反映了像元尺度上植物群落的生长状况及其变化特征,这与地面观测的植物个体物候期存在着很大的差异。由于任何遥感物候分析的结果都需要通过地面检验予以评价,Chen 等^[65]和 Studer 等^[66]在小尺度上开展了一些物候遥感的地面验证工作,进行了有益的探索与尝试。在利用地面物候观测数据与遥感数据之间的统计模型进行植物物候时空外推的基础上,如何根据植物生长发育及其光谱特征,构建遥感反演植物物候的机

理模型,将是今后重要的研究切入点。此外,传统的物候观测通常针对某种植物的个体,而遥感数据所反映的则是景观尺度的物候特征,从而产生遥感数据与地面验证数据尺度不统一的问题。因此,从传统的植物个体物候观测转向植物群落物候观测是野外物候学的重要发展方向,而选择合适的尺度转换方法,统一地面与遥感的空间信息,则是进行更为科学的遥感物候地面验证的关键。

(3)人口分布、农业活动和城市化过程等使地表景观及环境状况发生显著的改变,从而导致植物物候期发生相应的变化。城市环境可以导致植物生长季节的延长,而农业耕作则可以改变植物物候的季节特征。定量分析植物物候变化对人类活动的响应机制,对于进一步认识人类活动强烈影响区域内植物物候动态特征及其成因,进而监测这些区域的土地覆盖变化和进行农作物产量估算,都具有重要的实践意义。

(4)到目前为止,植物物候的遥感分析大都采用较长时间序列的低空间分辨率遥感数据,这不仅会降低植物物候反演的空间精度,而且由于复合像元的作用,也会降低植物物候反演的客观性。因此,有必要选择适宜的数学方法和模型,将各种不同空间分辨率的遥感数据融合到一起,从而获取更详实、更可靠和更长时段的遥感物候信息。

(5)利用遥感数据划分植物物候生长季节是对过去植物物候时空格局的分析,认识过去是为了预测未来,随着区域气候模式和陆面模式的发展,结合遥感数据进行植物物候生长季节的动态模拟,并预测植物物候对未来气候变化的响应,将成为遥感物候学研究的一个新方向。

参考文献

- [1] 竺可桢,宛敏渭. 物候学(第 版). 长沙:湖南教育出版社, 1999, 1~4.
- [2] Lieth H (ed.). Phenology and Seasonality Modeling. New York: Springer-Verlag, 1974, 4.
- [3] Schwartz M D. Green-wave phenology. *Nature*, 1998, 394: 839~840.
- [4] Chen X Q, Hu B, Yu R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1118~1130.
- [5] Reed B C, Brown J F, VanderZee D, et al. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 1994, 5:703~714.
- [6] Moulin S, Kergoat L, Viovy N. Global-scale assessment of

- vegetation phenology using NOAA/- AVHRR satellite measurements. *Journal of Climate*, 1997, 10:1154~1170.
- [7] 陈效述, 喻蓉. 1982~1999 年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化. *地理学报*, 2007, 62(1): 41~51.
- [8] Reed B C, Brown J F. Trend analysis of time-series phenology derived from satellite data. *IEEE Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Image*, 2005, 5:166~168.
- [9] Lloyd D. A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11:2269~2279.
- [10] 张峰, 吴炳方. 利用时序植被指数监测作物物候的方法研究. *农业工程学报*, 2004, 20(1):155~159.
- [11] Bradley B A, Jacob R W. A curve fitting procedure to derive inter-annual phonologies from time series of noisy satellite NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106:137~145.
- [12] 顾娟, 李新. NDVI 时间序列数据集重建方法述评. *遥感技术与应用*, 2006,21(4):391~395.
- [13] 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.
- [14] Lim C, Kafatos M. Frequency analysis of natural vegetation distribution using NDVI/AVHRR data from 1981 to 2000 for North America: Correlations with SOI. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(17):3347~3383.
- [15] Potter C, Klooster S, Myneni R, et al. Continental-scale comparisons of terrestrial carbon sinks estimated from satellite data and ecosystem modeling 1982~1998. *Global and Planetary Change*, 2003,39:201~213.
- [16] Moody A, Johnson D M. Land-surface phenologies from AVHRR using the discrete Fourier transform. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75(3):305~323.
- [17] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40: 1824~1832.
- [18] Chen J, Jonsson P, Tamura M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91:332~344.
- [19] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84:471~475.
- [20] Fisher J I, Mustard J F, Vadeboncoeur M A. Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100: 265~279.
- [21] Sakamoto T, Yokozawa M, Toritani H, et al. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96:366~374.
- [22] Hermance J F, Jacob R W, Bradley B A, et al. Extracting phenological signals from multiyear AVHRR NDVI time series: Framework for applying high-order annual splines with roughness damping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(10): 3264~3276.

- [23] Chen X Q, Pan W F. Relationships among phenological growing season, time-integrated NDVI and climate forcing in the temperate region of Eastern China. *International Journal of Climatology*, 2002, 22(14): 1781~1792.
- [24] 王宏,李晓兵,莺歌 等. 基于 NOAA-NDVI 的植被生长季模拟方法研究. *地理科学进展*, 2006, 25(6):21~32.
- [25] Delbart N, Kergoat L, Toan T L, et al. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97:26~38.
- [26] Suzuki R, Nomaki T, Yasunari T. West-east contrast of phenology and climate in northern Asia revealed using a remotely sensed vegetation index. *International Journal of Biometeorology*, 2003, 47:126~138.
- [27] Delbart N, Toan T L, Kergoat L, et al. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982-2004). *Remote Sensing of Environment*, 2006,101: 52~62.
- [28] Chen X Q, Tan Z J, 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(2): 97~101.
- [29] 于信芳, 庄大方. 基于 MODIS-NDVI 数据的东北森林物候期监测. *资源科学*, 2006, 28(4):111~117.
- [30] 王宏,李晓兵,李霞 等. 基于 NOAA NDVI 和 MSAV 研究中国北方植被生长季变化. *生态学报*, 2007, 27(2): 504~515.
- [31] 丁登, 陈效述. 我国遥感植被生长季节的地面检验研究——以温带草原和暖温带落叶阔叶林区为例. *遥感技术与应用*, 2007, 22(3): 382~386.
- [32] Cleland E E, Chiariello N R, Loarie S R, et al. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103:13740~13744.
- [33] Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 2008, 451:49~53.
- [34] Zhou L, Tucker C J, Kaufmann RK, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D17): 20069~20083.
- [35] Tateishi R, Ebata M. Analysis of phenological change patterns using 1982-2000 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(12):2287~2300.
- [36] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1133~1145.
- [37] Yu F F, Price K P, Ellis J, et al. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 42~54.
- [38] Stöckli R, Vidale P L. European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(17):3303~3330.
- [39] Weiss J L, Gutzler D S, Allred Coonrod J E, et al. Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environment*, 2004, 58:249~272.
- [40] Xiao X M, Hagen S, Zhang Q, et al. Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103:465~473.
- [41] Huete A R, Didan K, Shimabukuro Y E, et al. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L06405, doi: 10.1029/2005GL025583.
- [42] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 2006, 12: 672~685.
- [43] Nemani R, Keeling C, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300: 1560~1563.
- [44] Hazarika M K, Yasuoka Y, Ito A, et al. Estimation of net primary productivity by integrating remote sensing data with an ecosystem model. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94:298~310.
- [45] Kimball J S, McDonald K C, Running S W, et al. Satellite radar remote sensing of seasonal growing seasons for boreal and subalpine evergreen forests. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90: 243~258.
- [46] Kimball J S, Zhao M, McDonald K C, et al. Satellite remote sensing of terrestrial net primary production for the Pan-Arctic Basin and Alaska. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 783~804.
- [47] Picard G, Quegan S, Delbart N, et al. Bud-burst modeling in Siberia and its impact on quantifying the carbon budget. *Global Change Biology*, 2005, 11:2164~2176.
- [48] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89:519~534.
- [49] Churkina G, Schimel D, Braswell B H, et al. Spatial analysis of growing season length control over net ecosystem exchange. *Global Change Biology*, 2005, 11:1777~1787.
- [50] Townshend J R, Justice C, Li W, et al. Global land cover classification by remote sensing: Present capabilities and future possibilities. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35: 243~255.
- [51] Aurdal L, Huseby R B, Eikvil L, et al. Use of hidden Markov models and phenology for multitemporal satellite image classification: Applications to mountain vegetation classification. *Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images*, 2005, 5:220~224.
- [52] Boles S H, Xiao X M, Liu J Y, et al. Land cover characterization of temperate East Asia using multi-temporal VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90:477~489.
- [53] DeBeurs KM, Henebry G M. Land surface phenology, cli-

- matic variation, and institutional change: Analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89:497~509.
- [54] Souza Jr C M. Mapping land use of tropical regions from space. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(39): 14261~14262.
- [55] Morton D C, DeFries R S, Shimabukuro Y E, et al. Crop-land expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(39):14637~14641.
- [56] 郑玉坤,庄大方. 多时相 AVHRR 数据的傅立叶分析. *中国科学院研究生院学报*, 2003,20(1):62~68.
- [57] 宫攀, 陈仲新, 唐华俊 等. 基于 MODIS 温度/植被指数的东北地区土地覆盖分类. *农业工程学报*, 2006, 22 (9): 94~99.
- [58] 张霞, 孙睿, 张兵 等. 基于 MODIS 植被指数时间谱的华北平原土地覆盖分类. *农业工程学报*, 2006, 22 (12):128~132.
- [59] Vina A, Gitelson A A, Rundquist D C, et al. Monitoring maize(*Zea mays* L) phenology with remote sensing. *Agronomy Journal*, 2004, 96:1139~1147.
- [60] Lobell D B, Asner G P, Ortiz-Monasterio J I, et al. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: Estimates and uncertainties. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 94:205~220.
- [61] Duchemin B, Hadria R, Rodriguez J C, et al. Spatialisation of a crop model using phenology derived from remote sensing data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003, 4:2200~2202.
- [62] 张明伟, 周清波, 陈仲新 等. 基于物候模型的作物种植面积变化监测方法. *农业工程学报*, 2006, 22(10):139~144.
- [63] 张峰, 吴炳方. 泰国水稻种植面积月变化的遥感监测. *遥感学报*, 2004, 8(6):664~671.
- [64] 武永峰, 李茂松, 李京. 中国植被绿度期遥感监测方法研究. *遥感学报*, 2008, 12(1):92~103.
- [65] Chen X Q, Xu C X, Tan Z J. An analysis of relationships among plant community phenology and seasonal metrics of Normalized Difference Vegetation Index in the northern part of the monsoon region of China. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45(4): 170~177.
- [66] Studer S, Stöckli R, Appenzeller C, et al. A comparative study of satellite and ground-based phenology. *International Journal of Biometeorology*, 2007, 51:405~414.

Progress in Remote Sensing Phenological Research

CHEN Xiaoqiu, WANG Linhai

(College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Plant phenological phenomena are the most salient and sensitive bio-indicators of the environmental change at seasonal and interannual scales. Timings of plant phenological phenomena can indicate the rapid response of terrestrial ecosystems to climate change. Since the remote sensed phenology observation is characterized by multi-temporal, broad coverage, spatial continuity, and relatively long time series, recently, it has been an important means for detecting responses and feedbacks of vegetation dynamics to global climate change. On the basis of introducing remote sensing data sets and processing methods for monitoring plant phenology, we systematically reviewed important progresses in remote sensing phenology during the last five years worldwide focusing on identification of the phenological growing season, plant phenology and climate change, plant phenology and net primary production, plant phenology and land cover, and plant phenology and crop yield estimate, and so on. Then, we pointed out some existing problems in the current research, and tried to propose some main research aspects in the near future as follows: (1) developing a kind of more general technique for identifying the phenological growing season using remote sensing data; (2) unifying surface observed and satellite derived spatial information by carrying out plant community phenology observations and selecting appropriate scale transition methods; (3) analyzing quantitatively response mechanisms of plant phenology to human activities; (4) implementing amalgamation of remote sensing data with different spatial resolutions using suitable mathematical methods and models; and (5) estimating possible responses of plant phenology to future climate change by dynamic simulations.

Key words: remote sensing phenology; growing season; net primary production; land cover; crop yield estimate; climate change