

# 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述

范德芹<sup>1</sup>, 赵学胜<sup>1</sup>, 朱文泉<sup>2\*</sup>, 郑周涛<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

**摘要:** 基于植物物候的遥感监测对于研究植被对气候变化的响应具有重要的科学价值。本文在阐述植物物候遥感监测原理及其通用技术流程的基础上, 分别从植被类型及其所处的地理条件、遥感数据源及其预处理、植物物候遥感识别方法和植物物候遥感监测结果评价4个方面分析了影响植物物候遥感监测精度的因素, 并针对当前研究中存在的不足, 探讨了提高植物物候遥感监测精度的可行性途径, 即建立高分辨率的近地面遥感定点观测及数据共享网络, 发展普适性更强的卫星遥感时序数据去噪及植被指数曲线重建方法, 寻求稳定性更高的植物物候期遥感识别方法, 探索综合运用地面观测、遥感监测与模型模拟实现物候观测空间尺度拓展的可能性。

**关键词:** 植物物候; 遥感; 植被指数; 时间序列; 精度; 影响因素; 综述

## 1 引言

物候是动植物发育或生活周期随季节变化的现象, 如植物的发芽、开花、落叶, 动物的迁移、繁殖等(Rathcke et al, 1985)。植物物候对气候变化的响应表明, 长时间、大尺度的物候观测结果可在时空上反映气候变化(Peñuelas et al, 2002; Walther et al, 2002), 尤其是温度的变化(Myneni et al, 1997)。20世纪90年代中期以来, 随着全球气温升高, 植物物候已经发生了变化(Schwartz et al, 2006; Zhu, Tian et al, 2012), 这种变化同时导致了群落和生态系统结构、植被生产力、土壤—植被—大气系统之间能量和水分交换的变化(Piao et al, 2008; Dragoni et al, 2011); 这些变化反过来又会影响和加剧气候变化(Peñuelas et al, 2009)。因此, 开展植物物候研究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均具有重要意义(Walther et al, 2002)。

植物物候监测主要指通过各种方法和手段来

监测植物生长节律的季节性和年际变化。目前, 植物物候监测方法主要有地面观测法、遥感监测法、模型模拟法。地面观测方法是传统的物候监测方法, 主要用于观测物种在个体水平上的生长节律变化, 是针对某一个或多个物种进行的单株、定点观测。地面观测方法对于单株和小区域范围的物候研究具有时间精度高、易于操作等优点, 仍然是目前研究群落结构随季节变化的基本方法。但由于植物物候地面观测站点分布不均、覆盖的空间范围有限且缺少广泛的地面观测数据(Schwartz et al, 2006), 因此它很难在更大尺度上反映区域的植物物候状况(Menzel et al, 2006)。遥感监测方法主要是根据任何目标物都具有发射、反射和吸收电磁波的性质, 利用传感器对地物波谱信息进行记录。由于卫星遥感具有大面积监测地物的特点, 使其可以在区域乃至全球尺度, 通过监测地表植被指数变化情况, 来监测植被的物候变化(Reed et al, 2005)。遥感监测结果在像元尺度上, 反映植物群落或生态系统的植被生长状态及变化特征, 这与地面观测的植物个体或物种水平的物候现象存在很大差异

收稿日期: 2015-06; 修订日期: 2015-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371389, 41171306) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41371389, No.41171306]。

作者简介: 范德芹(1982-), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士后, 主要从事遥感数据处理研究, E-mail: kinly129@163.com。

通讯作者: 朱文泉(1975-), 男, 湖南永兴人, 博士, 教授, 主要从事植被与生态遥感研究, E-mail: zhuwq75@bnu.edu.cn。

引用格式: 范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 等. 2016. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述[J]. 地理科学进展, 35(3): 304-319. [Fan D Q, Zhao X S, Zhu W Q, et al. 2016. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data[J]. Progress in Geography, 35(3): 304-319.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.03.005

(Badeck et al, 2004; 陈效述等, 2009)。虽然目前有很多基于卫星遥感数据进行植物物候识别的方法, 但各具优缺点, 不同方法往往仅对特定研究区域或特定植被类型有效, 不具有普适性(陈效述等, 2009)。因此, 应根据研究区域、植被类型的不同, 选择适当的遥感监测方法, 并结合地面物候观测数据对其加以参数化和本地化。模型模拟法主要是指在个体和种群水平上通过研究植物生长节律的生理发生机制, 建立植物物候模型来研究植物物候的时空变化。目前各物候模型大多是利用地面观测数据在物种水平建立物候模型(Chuine, 2000; Morin et al, 2009), 少数采用遥感数据在种群或群落水平构建物候模型(Fan et al, 2015; Xin et al, 2015), 通过模型模拟在机理上反映植物内在的生长过程。

植物物候遥感监测结果的精度主要取决于具体的植被类型及其所处的地理条件、遥感数据源及其预处理方法、植物物候遥感识别方法、植物物候遥感监测结果评价等, 因此, 本文旨在分析遥感监测的各个环节对植物物候提取精度的影响, 并探寻提高植物物候遥感监测精度的可行性途径。

## 2 植物物候遥感监测原理

### 2.1 植被指数

植物物候遥感监测主要利用时间序列植被指数, 如增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)、归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)等。NDVI是目前应用最广泛的植被指数, 可部分消除太阳高度角和大气等观测条件影响的噪声, 其公式本身的特点使之对叶绿素敏感(Gao et al, 2000), 曲线幅度大, 从而能够灵敏地监测植被的长势特征。但其公式在高生物量地区易饱和(Gao et al, 2000), 易受植被冠层和土壤背景信息、双向反射等的影响。EVI对植物形态和冠层结构等信息响应敏感, 从而有效提高了高生物量地区植被长势的监测精度, 同时公式中加入了背景信息修正的参数, 消除了大部分土壤背景信息的影响, 采用蓝光波段进行计算以减少大气中气溶胶影响(Huete et al, 2002)。EVI数据合成时优先选择无云干扰且传感器视角小的像元, 其数据质量与其他植被指数相比更好。EVI在以上各方面的改进, 为定量开展遥感研究提供了更好的基础; 但EVI时序数据的曲线幅度较小, 可能会影响其对植被绿度

的反映; 此外, 由于对数据进行了大气和土壤背景值的校正(Jiang et al, 2008), 因此EVI对土壤背景的噪声不敏感。

植被指数时序数据可以反映植物的生长节律。基于MODIS NDVI数据(空间分辨率为250 m, <http://lpdaac.usgs.gov/>), 植被类型选取依据源于国际地圈生物圈计划(IGBP)的全球植被分类方案, 制作了常见植被类型的NDVI时序数据及其遥感识别的物候期示意图(图1), 并进行去噪和拟合(双高斯函数)处理。由图1可见, 在一年内, 不同植被类型的NDVI, 其极值、幅度、幅宽和生长周期均存在较大差别, 如常绿林的幅宽最大, 但一年内的NDVI值变化不大; 一年一熟的农作物、落叶阔叶林、草地、混交林、灌木在一年内完成1个生长周期; 而在有些地区农作物或将完成2~3个生长周期(一年种植两至三茬)。

植被指数时序数据所反映出的植物生长节律可用于植物物候期的识别。如图1a为温带落叶阔叶林的NDVI时序数据曲线(图1中横坐标表示年积日(Day of Year, DOY), 指一年从1月1日起累积的天数。例如: 每年的1月1日的年积日为1, 2月1日的年积日为32, 以此类推), 根据地面观测的返青期和落叶末期可以在曲线上找到对应的NDVI值, 通过分析该NDVI值及其在曲线中的位置则可找出其特征(见3.3节), 然后就可依据该特征来识别其他落叶阔叶林的生长季起始和结束日期。图1e为具有旱季—雨季之分的亚热带常绿阔叶林NDVI时序数据曲线, 虽然常绿阔叶林无生长季起始与结束之分, 但从这条曲线上找出雨季来临和结束后的植物生长旺季起始与结束日期。

### 2.2 通用技术流程

植物物候遥感监测的主要技术环节包括遥感数据预处理和物候期估算。基于MODIS NDVI数据, 以落叶阔叶林的返青期和常绿阔叶林的生长旺季起始日期识别为例, 阐述植物物候遥感监测的通用技术流程(图2)。从图2可见, 落叶阔叶林和常绿阔叶林的NDVI时序数据曲线存在差异, 这种差异会影响后面的植物物候期识别结果和精度。由于原始NDVI时序数据存在较多的噪声, 因此需对其进行去噪声处理, 图2示意了两种不同的去噪声处理方法, 不同的去噪方法也会影响NDVI时序数据曲线的特征(如极值、幅度和幅宽等)。对于去噪声处理后的NDVI时序数据, 不同的植物物候估算方

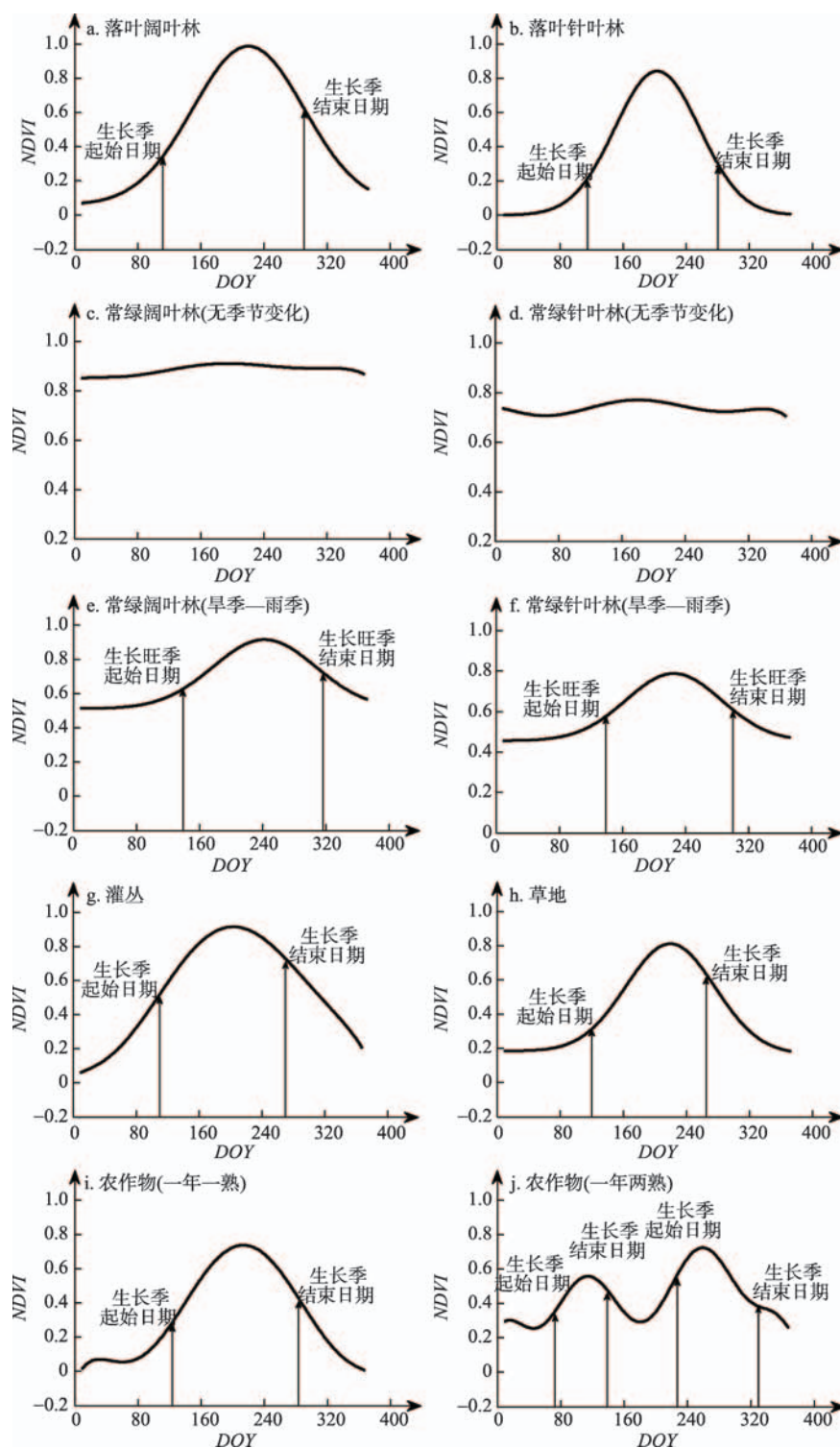


图1 常见植被类型的NDVI时序数据及其遥感识别的物候期示意图

Fig.1 NDVI time series for general vegetation types and the derived phenological stages

法也会影响最终的物候期识别结果和精度。由此可见,植物物候遥感监测结果的精度不但取决于具体的植被类型及其所处的地理条件,还与遥感数据源及其预处理方法、植物物候遥感识别方法等单个

技术环节以及各技术环节的优化组合有关。因此,要获得高精度的植物物候遥感监测结果,必须针对不同的植被类型及其所处的地理条件,从遥感数据源及其预处理、植物物候遥感识别方法等方面进行



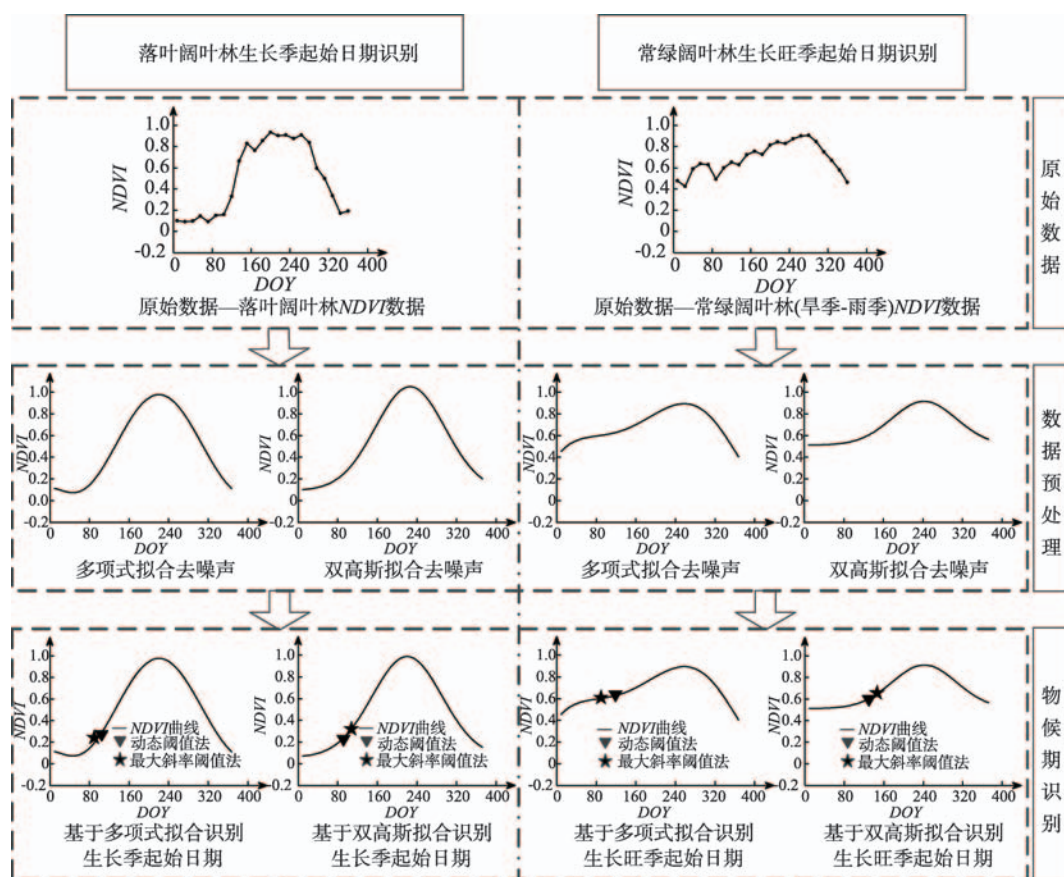


图2 植物物候遥感识别的技术流程

Fig.2 Main technical processes for plant phenology estimating based on remote sensing data

有针对性的优化组合设计。

### 3 影响植物物候遥感监测精度的因素

#### 3.1 植被类型及其所处的地理条件

不同的植被类型以及同一植被类型处于不同的地理条件(如位置、地形、土壤、气候等),其表现的光谱特征存在差异,从而导致植被指数时序曲线也存在差异,造成其最终的物候识别精度也有所不同(White et al, 2009)。

不同植被类型,其物候的遥感识别精度不同,如遥感数据识别的中国东北部森林的展叶期和落叶期的误差在10天左右(侯学会等, 2014),法国落叶阔叶林返青期的误差在8.5天左右(Soudani et al, 2008),青藏高原植被(主要为高寒草甸和高寒草原)返青期的误差达5~30天(Zhang et al, 2013)。遥感识别的河北省冬小麦、东北旱地作物的物候期与实际地面观测的物候期相近(张峰等, 2004; 司文才等, 2011)。此外,不同植被类型的植被覆盖度不同,

也会影响遥感监测其物候的精度,如阔叶林的郁闭度较针叶林高,其植被指数受环境影响相对较小;植被信号强烈的高覆盖度草地(如青藏高原的高寒草甸)较植被信号较弱的低覆盖度荒漠草原(如高寒半荒漠植被)更有利于物候期的遥感识别;农作物(如水稻、小麦、玉米、大豆)的光谱特征常常会因农作物类型、生长季、长势状况以及田间管理等不同而有所差别(Van Niel et al, 2004; Hartfield et al, 2013),因此其关键物候期(返青期、移栽期、抽穗期和收获期等)的识别应充分利用农作物的典型季相节律特征(Wardlow et al, 2007; Arvor et al, 2011; 胡琼等, 2015)。

从植被所处的地理条件来看,对于同一种植被类型而言,分布于中纬度(30~60°)比高纬度(60~90°)和低纬度(0~30°)更有利于遥感识别其物候期,一方面是因为中纬度地区的大气水汽含量相对较低(唐仁茂等, 2010),遥感成像时受太阳高度角、卫星扫描角及地球曲率的影响相对较小(张云松等, 2007),得到的遥感数据质量相对较好;另一方面则是因为

中纬度地区的植被信号强度适中、季相变化也较为明显,避免了因植被信号太强导致植被指数易饱和或因植被信号太弱从而易受土壤背景等因素的影响。同种植被类型在不同地形条件下,植被反射率还受到太阳高度角、坡度、坡向的影响,一方面,改变了辐照方向,引起入射照度的变化,同时影响植物冠层的形态结构;另一方面,使植物和土壤的相对比例发生了变化(赵英时等, 2003; Matsushita et al, 2007)。因此在地形复杂地区,受地形影响的波段反射率会将误差引入植被指数评估中,导致植被指数不能正确反映植被内部物理机制或生物量的变化(Matsushita et al, 2007; 姚晨等, 2009; Wang et al, 2013)。植被所处地理位置的土壤因受湿度、有机质含量不同等影响,导致表面反射率存在差异,从而影响植被指数的质量,主要是由于太阳光透过植被冠层到达土壤表面,使土壤和植被之间会发生多次散射,土壤表面的不同反射特性影响了植被指数的计算精度(Hill et al, 2011)。此外,不同地区的气候特征也会影响植被指数,如高纬度、高海拔地区的积雪,低纬度地区多云雨雾的天气影响正常植被光谱信息的获取,从而容易干扰植物物候遥感识别(Delbart et al, 2005; White et al, 2009)。

### 3.2 遥感数据源及其预处理

#### 3.2.1 遥感数据源

卫星遥感数据具有大范围覆盖的优势,可以在种群、群落以及生态系统尺度上监测植物物候的时空变化(Delbart et al, 2006; Piao et al, 2006; Zhang et al, 2013)。基于遥感技术的植物物候监测一般采用时间分辨率较高的植被指数时序数据,如基于NOAA/AVHRR、SPOT-VGT、MODIS、MERIS等传感器的NDVI和EVI时序数据,其原始的时间分辨率为1天,合成后的植被指数数据产品一般为10天、15天或一个月。现有时间序列最长的植被指数时序数据为NOAA/AVHRR GIMMS NDVI 3g数据(Jiang et al, 2013),其时间跨度从1981年6月至今,但其空间分辨率较低(8 km),一个像元往往包含了多种植被类型,虽然可以在生态系统水平上监测植物物候变化,但很难从植物生理机制上对植物物候变化进行解释;MERIS和MODIS的植被指数数据空间分辨率提高到300 m和250 m,比较适合在种群或群落水平上监测植物物候变化,但其时间序列较短(分别自2003年5月和2000年2月之后才有数据)。除以上中低分辨率的遥感数据外,Landsat

TM/ETM+/OLI遥感数据由于具有时间跨度长和空间分辨率高的优势也逐步用于植物物候研究(Meilaas et al, 2013)。由于受云雨等天气条件的影响,光学遥感存在着数据质量不高的缺陷,而微波遥感则不易受天气条件的影响,从而可获得较高质量的植被数据,例如:Jones等(2012)使用AMSR-E被动微波数据研究植物物候,取得了较好的结果。

目前用于植物物候监测最为广泛的遥感数据为NOAA/AVHRR、SPOT-VGT和MODIS的植被指数时序数据,这些数据虽然具有大范围观测的优势,但因其观测时间相对地面观测来说较短,无法在更长的时间尺度上揭示植物物候变化规律;而且其空间分辨率较低,致使在多种植被类型混合的情况下很难分析植物物候变化的生理机制。

#### 3.2.2 遥感数据常规预处理

卫星遥感数据受传感器、卫星位置和运行状态、卫星观测角、地表起伏、云覆盖情况、水汽含量、气溶胶含量、太阳高度角等因素影响,得到的植被指数时序数据往往包含了大量的噪声,致使植被指数时序数据曲线的季节变化趋势及其蕴涵的物候特征并不明显,因而无法有效提取植物物候信息(于信芳等, 2006)。为消除和减少上述因素的影响,需要对其进行常规的数据预处理,如几何校正、辐射校正(辐射定标和大气校正)等,这是生成空间上可比、时间上一致的植被指数数据集的前提条件。

几何校正的目的是将遥感数据准确地与地球表面的位置一一对应,并使多期数据之间在地理位置上相互匹配。如果几何校正不准确,将使从数据集中获取的植被指数数据受到几何畸变的影响而与实际的地理位置不匹配,致使多期遥感数据的相同像元并不代表相同的地理位置,从而无法反映处于同一地理位置上的植被在时间上的变化,因此,得到精度较高的几何校正遥感数据集对于准确表达确定地理位置的植被生长规律具有重要意义。

大气校正主要是消除遥感影像中由于大气的反射、散射和吸收作用引起的误差的过程。大气对植被指数的影响主要体现在其对不同波段辐射的影响,一般对红光波段有增强作用,而对近红外波段有减弱作用(赵英时等, 2003; Hill et al, 2011)。大气效应对NDVI的影响以气溶胶最大,水汽次之,再次为瑞利散射。研究发现,不确定的大气影响所产生的冠层光谱变化有时超过植被自身的变化(Gao et al, 2000; Chappell et al, 2001; Rahman, 2001)。因



此,在计算植被指数之前,需要对大气效应进行校正。目前常用的大气校正方法主要包括暗目标像元法、地表实测线性回归法、大气辐射传输模型法等(徐永明等, 2010),其中辐射传输模型法,因其普适性好、精度较高,在近年来得到了广泛的应用。而对于植被而言,二向性反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)模型对于研究植被表面的二向性反射分布特征与植被的结构参数之间的关系具有重要意义(姚延娟等, 2007; Hill et al, 2011; Zhang et al, 2014)。二向性反射不仅有方向性,还依赖于入射方向。植被的辐射、反射、发射与其表面组成物质及冠层结构特征关系密切,不同的植被冠层将入射电磁波向四周散射(吸收除外),会形成不同的散射通量空间分布,反射的方向性是植被冠层结构特征和组成成分波谱特征的函数。因此有必要对遥感监测的植被波段数据进行BRDF的大气校正,从而为植被指数的计算提供有效的数据源。

### 3.2.3 植被指数去噪预处理

尽管目前大部分已有的植被指数数据产品(如NOAA/AVHRR GIMSS NDVI3g、SPOT-VGT NDVI和MODIS)已经进行了比较严格的常规预处理,并采用最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)(Holben, 1986)或限制视角的最大值合成法(Constrained View Angle-Maximum Value Composite, CVMVC),将多天植被指数时序数据进行了合成,但得到的植被指数时序数据产品仍存在噪声(Huete et al, 2002)。尤其是当合成期一直有云存在时,云会成为对植被指数产品质量影响最大的噪声。因此,在使用这些含有噪声的植被指数数据产品之前,需要对其作进一步的去噪声处理。

目前,对于植被指数时序数据的噪声去除方法主要为滤波法和曲线拟合法两大类。滤波法有最佳指数斜率法(Best Index Slope Extraction, BISE)(Viovy et al, 1992)、均值迭代滤波(Mean-Value Iteration Filter, MVI)(Ma et al, 2006)、S-G(Savitzky-Golay)滤波(Chen et al, 2004)、傅立叶变换(闫慧敏等, 2005)和谐波分析(Harmonic ANalysis of Time Series, HANTS)(Roerink et al, 2000)、变权重滤波(Changing-Weight, CW)(Zhu, Pan et al, 2012)等;曲线拟合法有非对称性高斯函数拟合(Jönsson et al, 2004)、双Logistic函数拟合(Beck et al, 2006)、多项式拟合等。

各种去噪声方法分别被国内外学者应用于全球不同区域和领域的研究,但有关各算法的优劣尚未达成共识(宋春桥等, 2011),基本不存在某种具有明显优势的算法,而是因研究区域、植被覆盖类型的不同特征和应用目的而异。上述各种植被指数时序数据去噪重建方法普遍存在以下问题:①各种方法的预处理效果与研究区域、研究目的相关,需要根据研究经验进行判断。②假设植被指数的时序变化对应于植被的生长过程,各项研究中均采用某一年的数据,根据植被生长周期对时间序列进行分段或对截止频率进行选择,需要预先掌握研究区域的植被覆盖情况及其物候特征。③假设植被指数时序数据中出现的陡升或陡降是受植物生长过程不一致的噪声干扰(Chen et al, 2004),可能会将导致由自然灾害(如森林火灾)或者人为管理(如农作物收割)引起的植被异常作为噪声剔除。④参数设置缺乏客观标准,需根据经验及多次试验进行判断,例如:BISE法需要研究者依据不同气候区和不同植被特征的研究经验,不断调整NDVI变化率的阈值及滑动窗口的大小;均值迭代滤波法需不断调整阈值的设置以避免遗漏有用的最大植被指数信息;S-G滤波是一种基于局域多项式最小二乘法拟合的滤波方法,需根据经验设定滤波窗口宽度和拟合阶次两个基本参数,若窗口宽度设置过小,会降低去噪声效果;若窗口宽度设置过大,会滤波过度,导致失去原始植被曲线特征;若拟合阶次设置过高,可能引入植被曲线的非真实波动;若拟合阶次设置过低,则难以描述植被曲线的细节变化信息。傅里叶变换法对频率分量个数比较敏感,若分量设置过大,可能人为引入噪声,导致曲线局部发生非真实跳动;若分量设置过小,则会导致重建曲线过于光滑,失去细节变化信息(颀继珍等, 2010);HANTS算法需设置误差阈值、频率个数、最大删除点个数以及有效数据范围等参数。⑤各种数据重建方法均不包含专门的噪声检测环节,仅根据经验在重建前进行预处理,将与重建数据偏离较大的原始数据直接作为噪声点去除,噪声定位精度和噪声检测的合理性有待提高,例如:S-G和CW方法根据植被生长特性,首先将NDVI突然降低0.4的点视为噪声,并用噪声点的邻近两点进行线性插值来获得该点的NDVI值,然后再进行S-G或CW滤波(Chen et al, 2004; Zhu, Pan et al, 2012);而BISE等滤波方法则没有数据预处理环节,而是直接根据经验设置

好参数后进行滤波。⑥一些曲线拟合法对初值有较强的依赖性,难以获取全局最优解。例如,非对称高斯函数和双逻辑斯蒂函数拟合法,受限于其基函数的强非线性,需通过非线性回归求解待定系数。但若采用牛顿法等经典优化算法,其收敛性随初值的选择不同差异较大,算法鲁棒性不强;若采用单纯形法等群体搜索的算法,在不同的初值条件下可能陷入不同的局部最优解(范德芹等, 2014)。因此,对于此类强非线性函数拟合问题,有必要引入禁忌搜索算法、模拟退火算法和人工神经网络等现代优化算法,来降低初值依赖性,确保获取全局最优解。

### 3.3 植物物候遥感识别方法

植物物候遥感识别主要是指根据植被指数时序数据来估算植物的物候期,尤其是植物生长季的起始和结束日期。近20多年来,全球已发展了大量利用植被指数时序数据监测植物物候的方法,主要包括阈值法、导数法、滑动平均法和函数拟合法。

阈值法通过对植被指数曲线设置一定阈值来确定植物的生长季起止时间,可进一步细分为固定阈值法(或全局阈值法)(Lloyd, 1990)和动态阈值法(或局部阈值法)(Jönsson et al, 2002)。Lloyd(1990)利用 NOAA/AVHRR NDVI 数据,设置 NDVI 等于 0.099 时作为植被生长季起始的阈值;Fischer(1994)也利用预先设置的阈值来确定生长季的起始和结束日期。固定阈值法对于确定当地植物生长季开始和结束期较为有效,但不能应用于具有不同土地覆盖类型和土壤背景的区域,动态阈值法则不受此限制。如 White 等(2006)采用 1982-2003 年的 AVHRR NDVI 数据,基于动态阈值法识别了加拿大东部地表植物的物候,并预测了短期植物物候。Delbart 等(2006)利用 SPOT-VGT 和 NOAA/AVHRR NDVI 数据,采用动态阈值法研究了 1982-2004 年欧亚大陆北部植被返青期的变化,发现 1982-1991 年植被返青期平均提前了 8 天,1993-2004 年植被返青期平均推迟了 3.6 天。司文才等(2011)采用 2000-2009 年 SPOT/VEGETATION NDVI 数据,采用动态阈值法求取了河北省冬小麦的返青期和抽穗期,发现冬小麦物候期总体上呈现由南到北逐渐推迟的空间分布规律。侯学会等(2013)利用 2001-2010 年 SPOT-VGT NDVI 数据,基于 S-G 滤波和动态阈值法,获取了中国北方农牧交错带的植被物候期,探讨了研究区域植被物候期的空间差异和时间

变化。许青云等(2014)基于 2003-2012 年 MODIS NDVI 数据,采用动态阈值法识别了陕西省农作物的物候期,并在此基础上实现了农作物种植模式和类型的识别。牟敏杰等(2012)选择北美洲 72 座通量塔观测的净生态系统碳交换(NEE)数据来计算植物物候,并以此作为参考数据,从可行性和准确性两方面对移动平均法、阈值法和函数拟合法三种常用的植物物候识别方法进行了综合评价,结果表明,动态阈值法对植物物候识别的可行性和准确性均最优;其次为 Logistic 函数拟合法中的一阶导数方法;而固定阈值法对植物物候识别的可行性和准确性均最差。阈值法充分体现了植被指数曲线的主要特征,但其阈值设定受到研究区域、植被类型、植被指数及人为经验等因素的影响。

导数法主要结合其他条件或方法,通过对植被指数曲线求导,将曲线上升速率最大值对应的日期定义为生长季起始日期,将曲线下降速率最大值对应的日期定义为生长季结束日期(White et al, 1997; Balzter et al, 2007)。如 Moulin 等(1997)通过导数法和经验系数,利用 NOAA/AVHRR NDVI 数据估算出了全球植物生长季的开始日期和结束日期。Yu 等(2003)提出了含有一组条件阈值的求导方法,估算了中亚东部地区植被的返青期。斜率最大值法对求解只有一个生长季的农作物较为有效,但存在两个生长季的农作物,其提取的第一个生长季的收获期会晚于实际收获期;同时,其对生长季内 NDVI 变化缓慢的植被生长季起止日期提取效果不好。Balzter 等(2007)提出了一种导数法和滑动窗口相结合的“驼背物候算法(Camelback Phenology Algorithm)”,利用 NDVI 数据,估算了西伯利亚中部和东部植物的生长季起始日期和结束日期。Sakamoto 等(2005)将农作物 MODIS EVI 时序数据曲线的上升速率出现最大值时对应的日期定为返青期;将二阶导数为 0 且导数由正变负的转折点对应的日期定为收获期。徐岩岩等(2012)基于 2008 年 MODIS EVI 数据,采用导数法求取了东北地区水稻的移栽期、抽穗期和成熟期。由于导数法不对误差进行分析,因此,它很难解释监测的植物物候变化是在合理的范围变化,还是存在显著的变化。同时,当植被指数曲线不存在突升和突降时,这种方法很难判断生长季起始日期和结束日期,尤其是当植被指数时序数据存在云污染时更难确定(Hudson et al, 2010)。



滑动平均法利用原始植被指数曲线与其滑动平均曲线的交叉点来判断植物物候期。Reed 等(1994)首先提出了延迟滑动平均法(Delayed Moving Average, DMA),利用 AVHRR NDVI 数据,分别求取了农作物、草地、灌木和森林四种植被的生长季起止日期,发现其与实际观测结果具有较好的一致性。Duchemin 等(1999)采用滑动平均法识别了温带落叶林的生长季起止日期。Schwartz 等(2002)分别采用季节性 NDVI 中点法、地表物候模拟法和延迟滑动平均法求取了美国大陆混交林和落叶林植被的生长季起始日期,发现延迟滑动平均法的精度优于另外两种方法。该方法可有效地监测实测数据较少地区的植被生长季。滑动平均法对一年内只有一个生长季的 NDVI 时间序列数据的计算更稳定、可靠,但对一年内存存在多个生长季或对降雨响应明显的地区,识别效果则较差,因为时间间隔的选择可能使第一个返青期无法监测(Hudson et al, 2010);如受春季融雪影响,遥感识别结果可能早于实际返青期(武永峰等, 2008);此外,滑动平均法对滑动窗口的设置较为敏感。

函数拟合法一般是用“S”形的多项式函数、Logistic 函数、傅里叶函数和高斯函数等对原始的植被指数时序数据进行拟合,然后基于拟合结果来估算植物物候。例如:Logistic 函数拟合法首先对 NDVI 时间序列数据进行逐年拟合,再以拟合曲线的曲率变化率的极值点来确定植被各物候转换期(Zhang et al, 2003)。Zhang 等(2003)首先提出 Logistic 函数拟合法,并对新英格兰中心附近区域植被的返青期、成熟期、衰落期和休眠期进行了识别。Logistic 函数拟合法不需预先定义阈值并进行数据平滑,在一定程度上减少了主观因素的影响,但由于不同植被的实际 NDVI 时间序列曲线并非理想的 S 型规则曲线,因此存在拟合不成功的情况,从而导致监测精度的降低(崔凯等, 2012)。谐波分析法利用离散傅里叶变换将 NDVI 时序数据分成多个不同频率的周期函数之和,再利用谐波特征值谐波特征值(振幅、相位和谐波余项)与地表植被动态特征之间的相关性,提取植物物候信息(张峰等, 2004; 那晓东等, 2007)。林忠辉等(2006)采用 1992 年 NOAA/AVHRR NDVI 数据,针对河北省南部地区的几种不同植被类型,首先利用改进的傅立叶算法对其 NDVI 时序数据进行重构,再采用谐波分析法提取了植被的物候期。Moody 等(2001)采用离散的傅里

叶分析法估算了美国加利福尼亚南部植物的物候。谐波分析法可以更好的去除 NDVI 时间序列中噪声的影响,但重建后的曲线可能过于平滑,曲线特征可能出现较大偏离,影响物候特征的判别(那晓东等, 2007)。Jönsson 等(2002)基于非对称高斯函数法对非洲植物的生长季开始和结束日期进行了估算。Wang 等(2014)基于非对称高斯和双逻辑斯蒂函数法计算了中国东北地区农作物的物候。函数拟合法对函数的初始值依赖性较强,难以获得全局最优解;同时,函数参数的优化受到原始植被时序数据个数的限制,即受到时间分辨率的限制而影响其拟合的精度(Hudson et al, 2010)。

### 3.4 植物物候遥感监测结果评价

由于卫星遥感数据的空间分辨率相对较低,且受遥感数据本身的质量、数据预处理方法和物候识别方法影响,使得基于遥感数据获取的像元尺度上的植物物候期与地面观测的物种水平上的物候期存在差异,导致对遥感监测的植物物候期的可靠性评价成为难题。目前,大部分研究均采用地面观测的物候数据对遥感识别的物候数据进行验证。例如 Fisher 等(2006)利用地面物候观测结果对 Landsat 高分辨率和 MODIS 粗分辨率物候观测进行验证,量化评价了两种尺度下的植物物候遥感监测精度,发现植物物候遥感监测结果的均值可以反映精细尺度到粗尺度的统计转换,而局地微气候引起的物候空间差异则是造成地面与遥感观测不一致的主要原因;Yu 等(2010)利用 1982-2006 年 NOAA AVHRR NDVI 数据研究青藏高原植被春季物候时,采用平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)与均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)评价了地面观测数据与遥感监测结果之间的误差。在缺乏足够的地面物候观测数据时,常清等(2014)根据气象站点的日均温度,采用标准偏差法对植被生长季的遥感识别结果进行了间接验证;Zhang 等(2013)利用三种遥感数据源(GIMMS、SPOT VEGETATION、MODIS)识别青藏高原的植被返青期,然后采用趋势线一致法与地面观测的物候数据进行了直观的对比,交互评价了遥感识别的物候期是否合理。

实际上,因观测尺度(单株植物与遥感像元)和观测内容(植物的某一物候事件与植物的光谱响应)上的差异,遥感识别的植物物候期(如返青期、休眠期等)与地面观测到的具体物候事件(如植物发芽、



开花等)之间并不存在明确的对应关系(Schwartz et al, 2002; Fisher et al, 2006)。因此,应用地面观测结果来评价遥感监测结果时,不宜比较两者的具体时间点,而应综合比较二者的时空变化趋势是否一致。

## 4 讨论与展望

随着遥感技术的快速发展,基于遥感观测数据的大面积植物物候监测已逐步成为现实,并针对不同的研究区域及物种,在不同的时空尺度上建立了一系列有针对性的遥感物候监测方法。尽管如此,目前的遥感物候监测方法,还面临着数据分辨率不高、噪声干扰因素较多、物候期识别方法普适性较低、物候研究结果验证不充分等诸多难题,在很大程度上制约了遥感物候监测的深入开展。为推动大面积物候监测研究的持续发展,未来可分别从遥感数据源的质量提升及数据来源拓展、数据处理及分析、物候识别结果验证及物候预测等几个方面开展深入研究,以下分别对各项研究工作进行阐述。

### 4.1 建立高分辨率的近地面遥感定点观测网络

传统的植物物候数据采集方法是通过人工定点目视观测同时记录植物个体发育的各个物候事件(Sparks et al, 2002),这种方法适用于监测特定的物候期,如植物的发芽、开花、衰败等。遥感监测是利用植被指数在大尺度上监测植物光谱特征的变化。近年来,随着传感器技术和数字图像处理技术的发展,产生了一种监测植物物候的新方法,即近地面遥感监测。近地面遥感中,通过将每个光学传感器安装在离地表相对较近的位置(一般 $\leq 50$  m)来获取高时间和高空间分辨率的植物生长发育和衰败的光谱特征。它监测的植物物候尺度介于人工个体观测和遥感卫星像元监测之间,这对于各种应用而言是十分有利的。目前常用的近地面方法主要是基于宽波段辐射传感器、窄波段辐射传感器和数码相机的监测。

宽波段辐射传感器可用来测量大致在红光波段和近红外波段的光量子通量密度和总的短波太阳辐射,其监测结果与卫星监测结果相似。窄波段辐射传感器主要是监测特定区域和特定波段的电磁波谱特征,但其费用高于宽波段辐射传感器。这两种传感器输出的都是单一信息,因此它们反映的是一段时期观测的平均值,通常不含空间变化信息(Hilker et al, 2011),不能区分视区范围内不同的对

象和个体。数码相机的观测是在同一地点,使用相同拍摄角度和参数,针对同一研究对象、同一生态现象或过程,在不同时段进行拍摄,持续记录区域生态变迁并研究生态变化趋势(Webb et al, 2010),其主要原理是利用数码相机的红、绿、蓝色彩通道或更多通道(6个或更多特定波段),以及图形处理技术,构造与归一化差值植被指数类似的颜色指数,这不仅可在植物群落和生态系统水平上监测植被的优势物种组成结构、植被生长状况和物候、植被生产力等变化,同时随着数码相机时空分辨率的提高,还可监测植被组成成分,如冠层叶绿素、水分含量变化,以及植被冠层的光合速率等数据。因此该方法已成为“近地面”遥感的一种新方法(Richardson, Hollinger et al, 2009)。

目前,基于数码相机的定点重复观测法(Sonnentag et al, 2012)已在全球多个生态系统的物候研究中得到了应用。在单机监测方面,Richardson等(2007)利用数码相机监测了落叶阔叶林的返青期。Ahrends等(2009)采用数码相机监测了温带森林植被的物候,发现其与总初级生产力(GPP)密切相关。Kurc等(2010)利用数码相机监测了石炭酸灌木为优势物种的生态系统,发现其植被的绿色度与深层土壤湿度有很强相关性。Migliavacca等(2011)基于数码相机监测了高寒草原的植被物候,发现植被冠层绿色度与叶面积指数和冠层光合作用相关性强,可用来优化物候模型。Sonnentag等(2012)利用数码相机监测了森林生态系统的物候,发现可根据RGB颜色建立绿色色度坐标来研究物候。在联网观测方面,有些国家已经建立了数码相机物候观测网络。例如,在美国北部的12个森林中建立了一个类似的观测网络,用于监测植物冠层的展叶期(Richardson, Braswell et al, 2009)。Richardson、Braswell等(2009)利用数码相机物候观测网对森林物候期进行了监测,发现数码相机物候观测网能够很好地监测春季和秋季植被的物候。Coops等(2012)将数码相机网络观测的物候数据与遥感监测的物候数据进行了分析,发现数码相机观测的植被生长季起止日期较遥感监测数据均提前,但两者有较高的相关性。Graham等(2010)利用北美公共设施的1100多个数码相机观测的物候与遥感监测结果,选取其中30个观测点进行了比较,发现数码相机在噪声较少时对植被春季物候的估算误差与遥感监测的误差相近。

基于数码相机的定点重复观测具有人工观测和遥感监测的双重优点,即它具有一定的空间尺度融合能力,能在野外条件下自动、连续获取高时空分辨率图像(Migliavacca et al, 2011),从而可及时准确地获取植被群落的冠层生长状态(Sonnentag et al, 2012)。该方法已成为监测植物物候变化及其对环境因子响应的一种新手段(Kurc et al, 2010),同时也为植物物候遥感监测结果的地面验证提供了有效途径(Fisher et al, 2006),为建立高分辨率的近地面遥感定点观测网络提供了可能。在进行数码相机定点重复观测时,应注意选择合适的数码相机,并将其安置在合适的位置,但成像传感器的校准和长期的稳定性问题是目前的难题(Richardson, Braswell et al, 2009; Migliavacca et al, 2011; Sonnentag et al, 2012)。因此,未来应充分发挥数码相机的定点重复观测法在植物物候研究中的优势,一方面,需发展像美国和日本那样的网络化、自动化的大范围物候观测系统,如借鉴美国建立国家物候网(<https://www.usanpn.org/>)的经验,组织多个研究机构、野外观测站和公众共同参与物候观测,在统一的观测网架构及数据模型基础上实现物候数据共享,同时利用各种微型传感器和无线网络,建立可远程控制的、可自动拍摄的小范围物候监测系统,建立高分辨率的近地面遥感定点观测网络;另一方面,将其监测的植物物候信息与地面观测和卫星遥感数据相结合(Hufkens et al, 2012),作为遥感监测和地面监测的桥梁,实现遥感监测数据的地面验证和地面到遥感监测尺度的扩展,填补地面人工观测与区域遥感数据之间在时间和空间上的数据空缺。

#### 4.2 发展合适的卫星遥感时序数据处理方法

(1) 发展有效的植被指数时序数据噪声检测和去除方法。为提高植被指数时序数据预处理方法的普适性,减少对研究经验、研究区域、植被类别、参数设置的依赖,避免对地表覆盖类型的误判,应着力发展不依赖于初值和经验等的有效噪声检测方法。

(2) 发展合适的植被指数时序数据拟合方法。植被时序数据在去噪拟合时应保留其实际生长规律,以便提取到高精度的植物物候期信息。对于曲线拟合去噪声方法来说,可选择合理、稳定的函数集(如高斯函数集),增强对不同植物生长规律的数学表达能力,同时在函数拟合中引入现代优化算法(如模拟退火算法、遗传算法等),以此作为滤波、多

项式拟合等传统方法的有益补充,增强对植物物候演化规律的最优描述能力,从数学角度保证植被指数曲线重建结果的稳定性,为物候期识别提供合理、准确的输入条件。

现有的各种拟合方法导致波峰的幅度和位置均可能发生变化,很难保持时序数据的物候特征,这就需要对植被指数拟合曲线的评价,不但要从视觉上评价拟合效果是否与原始数据一致(梁守真等, 2011),还需利用RMSE、相关系数等量化指标对拟合效果进行评价。如衡量拟合结果与原始数据之间的偏差(宋春桥等, 2011),利用赤池信息量准则(AIC)、贝叶斯信息准则(BIC)等方法评估拟合后的植被指数时间序列曲线保持原始植被生长季曲线特征的能力(Atkinson et al, 2012)。此外,对于单幅影像,还可采用方差法、局部方差法、去相关法、地学统计量法等(朱博等, 2010)方法,通过信噪比(SNR)来评价数据质量(朱博等, 2010)。可见,对植被指数时序数据拟合结果进行评价,既有利于保证数据拟合精度,也有利于保持植被指数时序数据质量和形状,使其波峰的幅度和位置能够更好、更真实地反映植被的生长状况和物候特征。

#### 4.3 发展植物物候遥感识别方法

目前,各种物候识别方法受植被类型、区域范围、生长周期、植被指数和参数设置等因素影响,其应用均具有一定的局限性,因此,未来应努力发展一些具有广泛普适性和稳定性的物候识别方法。

为提高植物物候遥感识别方法的鲁棒性(普适性),可在稳健的植被曲线重建结果基础上,发展基于植被内在生长特性的返青期估算方法,即物候期识别过程中所需的各项参数均根据其多年的时间演化规律确定,尽量减少或避免引入经验参数,综合发挥现有的阈值法、斜率法、曲率法等各种识别方法的优点,同时规避各自的不足,发展出诸如最大斜率阈值法等耦合识别方法,从而避免对研究经验、植被类型、研究区域的依赖,减少人为因素干扰,提高识别方法在不同地区、不同物种间的通用性。

#### 4.4 建立地面观测与卫星遥感监测之间的转换桥梁

##### 4.4.1 地面观测物候与遥感监测物候之间的内涵差异

地面物候观测针对单株植物或单个物种进行,观测到的物候通常定义为发芽期、展叶期、开花期、衰落期、收获期等,反映的是植株或物种水平的物候变化;而基于卫星遥感所识别的物候期与其存在本质差异,遥感数据描述的是地表景观尺度的光谱



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或生态系统的植被生长状况及变化特征(Badeck et al, 2004; 陈效述等, 2009; Xu et al, 2014),即遥感监测的物候期不是特定的物种的物候事件(如发芽,落叶等),因此,不能用传统的植物物候来定义遥感物候监测结果。许多学者根据各自研究内容对遥感识别的物候给出了不同的定义(Lloyd, 1990; Reed et al, 1994),如Moulin等(1997)根据一年内NDVI时间序列曲线的高低变化,将植物生长季定义为休眠期、生长期和衰老期,Xin等(2002)在对我国黄淮海平原植物物候进行遥感监测时,将冬小麦的生长季分为返青期、抽穗期和成熟期,将夏玉米的生长季分为出芽期、抽穗期和成熟期。

植物物候遥感监测目前主要是在大尺度上用于确定地表植物生长季的开始和结束日期(Schwartz et al, 2002),这两个物候期与植物的光合作用过程密切相关,即:生长季开始日期对应于区域内植物光合作用的开始日期,结束日期对应于区域内植物光合作用的结束日期,而并非传统意义上基于定点、定株观测定义的单一植物或植株的发芽期和落叶期。区域内最早展叶的植物出现绿色,并不一定表明植物遥感生长季的开始,因为遥感监测的生长季开始日期是区域内多数植物开始展叶的日期,该日期后植被进入衰亡或休眠阶段(武永峰等, 2008)。

#### 4.4.2 地面观测物候与遥感监测物候之间的尺度匹配

由于地面观测主要是在个体水平上通过物候观测网络对物种进行物候监测,而遥感监测则主要是在群落和生态系统水平上通过卫星监测地表植被指数变化,来监测区域植被的物候,因此,若采用地面观测的物候期对遥感监测的物候期进行验证,将产生监测尺度和监测内容上的不匹配,为此需要找到一种方法,将地面个体水平上观测的物候期扩展到遥感群落甚至生态系统尺度上。如基于地面观测的物候数据根据观测站点附近该植被的分布情况进行空间平均或根据生物量、覆盖度、叶面积指数等指标进行加权来确定一定区域范围的地面物候观测值,从而实现地面观测数据从个体水平到群落或生态系统、从点到面(区域)的尺度扩展。在此基础上与相同区域范围的遥感监测的物候数据进行匹配,实现遥感物候监测数据的地面验证。但目前地面个体物候观测的数据有限,一般一个站点

只有一个数据,而且遥感监测的植被指数数据分辨率较低,如NOAA AVHRR的分辨率为8 km,MODIS的分辨率为250 m,采用Landsat TM生成的数据虽达到了30 m,但这对于一个地面观测的单株植物物候数据来说,分辨率远不能满足要求,从而给尺度扩展带来困难。而随着数码相机技术的发展,可考虑将高分辨的数码相机监测作为遥感监测和地面观测植物物候的桥梁,以实现遥感监测数据的地面验证和地面到遥感监测尺度的扩展。

实际上,遥感监测和地面观测本就属于在不同尺度上对植物物候进行的监测,它们各自所反应的植物物候在本质上存在差异,因此,采用地面观测数据对遥感监测结果进行定量精确验证的必要性不强,但为提高遥感监测的可靠性,可采用地面观测的数据对遥感监测结果进行物候时空变化趋势的验证。同时,由于物候模型模拟结果也是一种重要的植物物候监测手段,因此,应将地面、遥感和模型模拟三种监测手段综合起来进行交互验证,以减少对植物物候变化监测的不确定性。

#### 参考文献(References)

- 常清,王思远,孙云晓,等. 2014. 青藏高原典型植被生长季遥感模型提取分析[J]. 地球信息科学学报, 16(5): 815-823. [Chang Q, Wang S Y, Sun Y X, et al. 2014. The remote sensing monitoring model of the typical vegetation phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geo-information Science, 16(5): 815-823.]
- 陈效述,王林海. 2009. 遥感物候学研究进展[J]. 地理科学进展, 28(1): 33-40. [Chen X Q, Wang L H. 2009. Progress in remote sensing phenological research[J]. Progress in Geography, 28(1): 33-40.]
- 崔凯,蒙继华,左廷英. 2012. 遥感作物物候监测方法研究[J]. 安徽农业科学, 40(10): 6279-6281, 6321. [Cui K, Meng J H, Zuo T Y. 2012. Monitoring of crop phenology with remote sensing[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 40(10): 6279-6281, 6321.]
- 范德芹,朱文泉,潘耀忠,等. 2014. 青藏高原小嵩草高寒草甸返青期遥感识别方法筛选[J]. 遥感学报, 18(5): 1117-1127. [Fan D Q, Zhu W Q, Pan Y Z, et al. 2014. Identifying an optimal method for estimating greenup date of *Kobresia pygmaea* alpine meadow in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Remote Sensing, 18(5): 1117-1127.]
- 侯学会,牛铮,高帅. 2014. 近十年中国东北森林植被物候遥感监测[J]. 光谱学与光谱分析, 34(2): 515-519. [Hou X H, Niu Z, Gao S. 2014. Phenology of forest vegetation in northeast of China in ten years using remote sensing[J].

- Spectroscopy and Spectral Analysis, 34(2): 515-519.]
- 侯学会, 牛铮, 高帅, 等. 2013. 基于 SPOT-VGT NDVI 时间序列的农牧交错带植被物候监测[J]. 农业工程学报, 29(1): 142-150. [Hou X H, Niu Z, Gao S, et al. 2013. Monitoring vegetation phenology in farming-pastoral zone using SPOT-VGT NDVI data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29(1): 142-150.]
- 胡琼, 吴文斌, 宋茜, 等. 2015. 农作物种植结构遥感提取研究进展[J]. 中国农业科学, 48(10): 1900-1914. [Hu Q, Wu W B, Song Q, et al. 2015. Recent progresses in research of crop patterns mapping by using remote sensing[J]. Scientia Agricultura Sinica, 48(10): 1900-1914.]
- 梁守真, 施平, 邢前国. 2011. MODIS NDVI 时间序列数据的去云算法比较[J]. 国土资源遥感, (1): 33-36. [Liang S Z, Shi P, Xing Q G. 2011. A comparison between the algorithms for removing cloud pixel from MODIS NDVI time series data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, (1): 33-36.]
- 林忠辉, 莫兴国. 2006. NDVI 时间序列谐波分析与地表物候信息获取[J]. 农业工程学报, 22(12): 138-144. [Lin Z H, Mo X G. 2006. Phenologies from harmonics analysis of AVHRR NDVI time series[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 22(12): 138-144.]
- 牟敏杰, 朱文泉, 王伶俐, 等. 2012. 基于通量塔净生态系统碳交换数据的植被物候遥感识别方法评价[J]. 应用生态学报, 23(2): 319-327. [Mou M J, Zhu W Q, Wang L L, et al. 2012. Evaluation of remote sensing extraction methods for vegetation phenology based on flux tower net ecosystem carbon exchange data[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 23(2): 319-327.]
- 那晓东, 张树清, 李晓峰, 等. 2007. MODIS NDVI 时间序列在三江平原湿地植被信息提取中的应用[J]. 湿地科学, 5(3): 227-236. [Na X D, Zhang S Q, Li X F, et al. 2007. Application of MODIS NDVI time series to extracting wetland vegetation information in the Sanjiang Plain[J]. Wetland Science, 5(3): 227-236.]
- 司文才, 刘峻明. 2011. 冬小麦关键物候空间分布遥感监测方法研究[J]. 中国农业科技导报, 13(6): 82-89. [Si W C, Liu J M. 2011. Studies on remote sensing monitoring method for spatial distribution of winter wheat critical phenology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 13(6): 82-89.]
- 宋春桥, 游松财, 柯灵红, 等. 2011. 藏北地区三种时序 NDVI 重建方法与应用分析[J]. 地球信息科学学报, 13(1): 133-143. [Song C Q, You S C, Ke L H, et al. 2011. Analysis on three NDVI time-series reconstruction methods and their applications in North Tibet[J]. Journal of Geo-information Science, 13(1): 133-143.]
- 唐仁茂, 陈英英, 叶建元. 2010. 探空、地面及卫星资料反演水汽含量的比较[J]. 气象科学, 30(3): 373-377. [Tang R M, Chen Y Y, Ye J Y. 2010. The comparison of water vapor content retrieved by radiosonde, ground station and satellite data[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 30(3): 373-377.]
- 武永峰, 李茂松, 宋吉青. 2008. 植物物候遥感监测研究进展[J]. 气象与环境学报, 24(3): 51-58. [Wu Y F, Li M S, Song J Q. 2008. Advance in vegetation phenology monitoring based on remote sensing[J]. Journal of Meteorology and Environment, 24(3): 51-58.]
- 颀继珍, 王红说, 黄敬峰. 2010. 基于 MODIS 时间序列数据的作物季相信息提取[J]. 遥感技术与应用, 25(5): 647-652. [Xie J Z, Wang H S, Huang J F. 2010. Crop phenology information extraction using MODIS multi-temporal data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 25(5): 647-652.]
- 徐岩岩, 张佳华, Yang L M. 2012. 基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期[J]. 生态学报, 32(7): 2091-2098. [Xu Y Y, Zhang J H, Yang L M. 2012. Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 32(7): 2091-2098.]
- 徐永明, 覃志豪, 陈爱军. 2010. 基于查找表的 MODIS 逐像元大气校正方法研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 35(8): 959-962. [Xu Y M, Qin Z H, Chen A J. 2010. A pixel-by-pixel atmospheric correction algorithm for MODIS data based on look-up table[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 35(8): 959-962.]
- 许青云, 杨贵军, 龙慧灵, 等. 2014. 基于 MODIS NDVI 多年时序数据的农作物种植识别[J]. 农业工程学报, 30(11): 134-144. [Xu Q Y, Yang G J, Long H L, et al. 2014. Crop information identification based on MODIS NDVI time-series data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 30(11): 134-144.]
- 闫慧敏, 曹明奎, 刘纪远, 等. 2005. 基于多时相遥感信息的中国农业种植制度空间格局研究[J]. 农业工程学报, 21(4): 85-90. [Yan H M, Cao M K, Liu J Y, et al. 2005. Characterizing spatial patterns of multiple cropping system in China from multi-temporal remote sensing images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 21(4): 85-90.]
- 姚晨, 黄微, 李先华. 2009. 地形复杂区域的典型植被指数评估[J]. 遥感技术与应用, 24(4): 496-501. [Yao C, Huang W, Li X H. 2009. Evaluation of topographical influence on vegetation indices of rugged terrain[J]. Remote Sensing Technology and Application, 24(4): 496-501.]
- 姚延娟, 刘强, 柳钦火, 等. 2007. 异质地表的叶面积指数反演的不确定性分析[J]. 遥感学报, 11(6): 763-770.



- [Yao Y J, Liu Q, Liu Q H, et al. 2007. LAI inversion uncertainties in heterogeneous surface[J]. *Journal of Remote Sensing*, 11(6): 763-770.]
- 于信芳, 庄大方. 2006. 基于MODIS NDVI数据的东北森林物候期监测[J]. *资源科学*, 28(4): 111-117. [Yu X F, Zhuang D F. 2006. Monitoring forest phenophases of Northeast China based on MODIS NDVI data[J]. *Resources Science*, 28(4): 111-117.]
- 张峰, 吴炳方, 刘成林, 等. 2004. 利用时序植被指数监测作物物候的方法研究[J]. *农业工程学报*, 20(1): 155-159. [Zhang F, Wu B F, Liu C L, et al. 2004. Methods of monitoring crop phenological stages using time series of vegetation indicator[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 20(1): 155-159.]
- 张云松, 冯钟葵, 石丹. 2007. 卫星观测方位对遥感成像的影响[J]. *遥感学报*, 11(4): 433-438. [Zhang Y S, Feng Z H, Shi D. 2007. The influence of satellite observation direction on remote sensing image[J]. *Journal of Remote Sensing*, 11(4): 433-438.]
- 赵英时, 等. 2003. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社. [Zhao Y S, et al. 2003. *Yaogan yingyong fenxi yuanli yu fangfa*[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 朱博, 王新鸿, 唐伶俐, 等. 2010. 光学遥感图像信噪比评估方法研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 25(2): 303-309. [Zhu B, Wang X H, Tang L L, et al. 2010. Review on methods for SNR estimation of optical remote sensing imagery[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 25(2): 303-309.]
- Ahrends H E, Etzold S, Kutsch W L, et al. 2009. Tree phenology and carbon dioxide fluxes: Use of digital photography for process-based interpretation at the ecosystem scale[J]. *Climate Research*, 39(3): 261-274.
- Atkinson P M, Jeganathan C, Dash J, et al. 2012. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology[J]. *Remote Sensing of Environment*, 123: 400-417.
- Arvor D, Jonathan M, Meirelles M S P, et al. 2011. Classification of MODIS EVI time series for crop mapping in the state of Mato Grosso, Brazil[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 32(22): 7847-7871.
- Badeck F W, Bondeau A, Böttcher K, et al. 2004. Responses of spring phenology to climate change[J]. *New Phytologist*, 162(2): 295-309.
- Balzter H, Gerard F, George C, et al. 2007. Coupling of vegetation growing season anomalies and fire activity with hemispheric and regional-scale climate patterns in central and east Siberia[J]. *Journal of Climate*, 20(15): 3713-3729.
- Beck P S A, Atzberger C, Høgda K A, et al. 2006. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI[J]. *Remote Sensing of Environment*, 100(3): 321-334.
- Chappell A, Seaquist J W, Eklundh L. 2001. Improving the estimation of noise from NOAA AVHRR NDVI for Africa using geostatistics[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 22(6): 1067-1080.
- Chen J, Jönsson P, Tamura M, et al. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 91(3-4): 332-344.
- Chuine I. 2000. A unified model for budburst of trees[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 207(3): 337-347.
- Coops N C, Hilker T, Bater C W, et al. 2012. Linking ground-based to satellite-derived phenological metrics in support of habitat assessment[J]. *Remote Sensing Letters*, 3(3): 191-200.
- Delbart N, Kergoat L, Le Toan T, et al. 2005. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 97(1): 26-38.
- Delbart N, Le Toan T, Kergoat L, et al. 2006. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982-2004)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 101(1): 52-62.
- Dragoni D, Schmid H P, Wayson C A, et al. 2011. Evidence of increased net ecosystem productivity associated with a longer vegetated season in a deciduous forest in south-central Indiana, USA[J]. *Global Change Biology*, 17(2): 886-897.
- Duchemin B, Goubier J, Courrier G. 1999. Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystems with NOAA/AVHRR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 67(1): 68-82.
- Fan D Q, Zhu W Q, Zheng Z T, et al. 2015. Change in the green-up dates for *Quercus mongolica* in Northeast China and its climate-driven mechanism from 1962 to 2012[J]. *PLoS ONE*, 10(6): e130516.
- Fischer A. 1994. A model for the seasonal variations of vegetation indices in coarse resolution data and its inversion to extract crop parameters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 48(2): 220-230.
- Fisher J I, Mustard J F, Vadeboncoeur M A. 2006. Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite[J]. *Remote Sensing of Environment*, 100(2): 265-279.

- Gao B C, Li R R. 2000. Quantitative improvement in the estimates of NDVI values from remotely sensed data by correcting thin cirrus scattering effects[J]. *Remote Sensing of Environment*, 74(3): 494-502.
- Graham E A, Riordan E C, Yuen E M, et al. 2010. Public internet-connected cameras used as a cross-continental ground-based plant phenology monitoring system[J]. *Global Change Biology*, 16(11): 3014-3023.
- Hartfield K A, Marsh S E, Kirk C D, et al. 2013. Contemporary and historical classification of crop types in Arizona [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 34(17): 6024-6036.
- Hilker T, Gitelson A, Coops N C, et al. 2011. Tracking plant physiological properties from multi-angular tower-based remote sensing[J]. *Oecologia*, 165(4): 865-876.
- Hill M J, Román M O, Schaaf C B, et al. 2011. Characterizing vegetation cover in global savannas with an annual foliage clumping index derived from the MODIS BRDF product[J]. *Remote Sensing of Environment*, 115(8): 2008-2024.
- Holben B N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11): 1417-1434.
- Hudson I L, Keatley M R. 2010. Phenological research: Methods for environmental and climate change analysis[M]. Heidelberg, Germany: Springer.
- Huete A R, Didan K, Miura T, et al. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 195-213.
- Hufkens K, Friedl M, Sonnentag O, et al. 2012. Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology[J]. *Remote Sensing of Environment*, 117: 307-321.
- Jiang N, Zhu W Q, Zheng Z T, et al. 2013. A comparative analysis between GIMSS NDVIg and NDVI3g for monitoring vegetation activity change in the Northern Hemisphere during 1982-2008[J]. *Remote Sensing*, 5(8): 4031-4044.
- Jiang Z Y, Huete A R, Didan K, et al. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band [J]. *Remote Sensing of Environment*, 112(10): 3833-3845.
- Jones M O, Kimball J S, Jones L A, et al. 2012. Satellite passive microwave detection of North America start of season[J]. *Remote Sensing of Environment*, 123: 324-333.
- Jönsson P, Eklundh L. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8): 1824-1832.
- Jönsson P, Eklundh L. 2004. TIMESAT: A program for analyzing time-series of satellite sensor data[J]. *Computers & Geosciences*, 30(8): 833-845.
- Kurc S A, Benton L M. 2010. Digital image-derived greenness links deep soil moisture to carbon uptake in a creosote-bush-dominated shrubland[J]. *Journal of Arid Environments*, 74(5): 585-594.
- Lloyd D. 1990. A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 11(12): 2269-2279.
- Ma M G, Veroustraete F. 2006. Reconstructing pathfinder AVHRR Land NDVI time-series data for the Northwest of China[J]. *Advances in Space Research*, 37(4): 835-840.
- Matsushita B, Yang W, Chen J, et al. 2007. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density Cypress forest[J]. *Sensors*, 7(11): 2636-2651.
- Melaas E K, Friedl M A, Zhu Z. 2013. Detecting interannual variation in deciduous broadleaf forest phenology using Landsat TM/ETM+ data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 132: 176-185.
- Menzel A, Sparks T H, Estrella N, et al. 2006. Altered geographic and temporal variability in phenology in response to climate change[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 15(5): 498-504.
- Migliavacca M, Galvagno M, Cremonese E, et al. 2011. Using digital repeat photography and eddy covariance data to model grassland phenology and photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(10): 1325-1337.
- Moody A, Johnson D M. 2001. Land-surface phenologies from AVHRR using the discrete Fourier transform[J]. *Remote Sensing of Environment*, 75(3): 305-323.
- Morin X, Lechowicz M J, Augspurger C, et al. 2009. Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century[J]. *Global Change Biology*, 15(4): 961-975.
- Moulin S, Kergoat L, Viovy N, et al. 1997. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements[J]. *Journal of Climate*, 10(6): 1154-1170.
- Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. *Nature*, 386: 698-702.
- Peñuelas J, Filella I, Comas P. 2002. Changed plant and ani-



- mal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region[J]. *Global Change Biology*, 8(6): 531-544.
- Peñuelas J, Rutishauser T, Filella I. 2009. Phenology feedbacks on climate change[J]. *Science*, 324: 887-888.
- Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, et al. 2008. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming[J]. *Nature*, 451: 49-52.
- Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. 2006. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation [J]. *Global Change Biology*, 12(4): 672-685.
- Rahman H. 2001. Influence of atmospheric correction on the estimation of biophysical parameters of crop canopy using satellite remote sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 22(7): 1245-1268.
- Rathcke B, Lacey E P. 1985. Phenological patterns of terrestrial plants[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 16(1): 179-214.
- Reed B C, Brown J F. 2005. Trend analysis of time-series phenology derived from satellite data[C]//Proceedings of the 3rd International Workshop on the analysis of multi-temporal remote sensing images. Biloxi, MS: IEEE: 166-168.
- Reed B C, Brown J F, VanderZee D, et al. 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery[J]. *Journal of Vegetation Science*, 5(5): 703-714.
- Richardson A D, Braswell B H, Hollinger D Y, et al. 2009. Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology[J]. *Ecological Applications*, 19(6): 1417-1428.
- Richardson A D, Hollinger D Y, Dail D B, et al. 2009. Influence of spring phenology on seasonal and annual carbon balance in two contrasting New England forests[J]. *Tree Physiology*, 29(3): 321-331.
- Richardson A D, Jenkins J P, Braswell B H, et al. 2007. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest[J]. *Oecologia*, 152(2): 323-334.
- Roerink G J, Menenti M, Verhoef W. 2000. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9): 1911-1917.
- Sakamoto T, Yokozawa M, Toritani H, et al. 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 96(3-4): 366-374.
- Schwartz M D, Ahas R, Aasa A. 2006. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere[J]. *Global Change Biology*, 12(2): 343-351.
- Schwartz M D, Reed B C, White M A. 2002. Assessing satellite-derived start-of-season measures in the conterminous USA[J]. *International Journal of Climatology*, 22(14): 1793-1805.
- Sonnentag O, Hufkens K, Teshera-Sterne C, et al. 2012. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152: 159-177.
- Soudani K, Le Maire G, Dufrêne E, et al. 2008. Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 112(5): 2643-2655.
- Sparks T H, Menzel A. 2002. Observed changes in seasons: An overview[J]. *International Journal of Climatology*, 22(14): 1715-1725.
- Van Niel T G, McVicar T R. 2004. Determining temporal windows for crop discrimination with remote sensing: A case study in south-eastern Australia[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 45(1-3): 91-108.
- Viovy N, Arino O, Belward A S. 1992. The Best Index Slope Extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time-series[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 13(8): 1585-1590.
- Walther G R, Post E, Convey P, et al. 2002. Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 416: 389-395.
- Wang M, Tao F L, Shi W T. 2014. Corn yield forecasting in Northeast China using remotely sensed spectral indices and crop phenology metrics[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(7): 1538-1545.
- Wang Y T, Hou X Y, Wang M J, et al. 2013. Topographic controls on vegetation index in a hilly landscape: A case study in the Jiaodong Peninsula, Eastern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 70(2): 625-634.
- Wardlaw B D, Egbert S L, Kastens J H. 2007. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains[J]. *Remote Sensing of Environment*, 108(3): 290-310.
- Webb R H, Boyer D E, Turne R M. 2010. Repeat photography: Methods and applications in the natural sciences [M]. Washington DC: Island Press.
- White M A, De Beurs K M, Didan K, et al. 2009. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006[J]. *Global Change Biology*, 15(10): 2335-2359.
- White M A, Nemani R R. 2006. Real-time monitoring and short-term forecasting of land surface phenology[J]. *Remote Sensing of Environment*, 104(1): 43-49.
- White M A, Thornton P E, Running S W. 1997. A continental

- phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2): 217-234.
- Xin J F, Yu Z R, Van Leeuwen L, et al. 2002. Mapping crop key phenological stages in the North China Plain using NOAA time series images[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(2): 109-117.
- Xu H, Twine T E, Yang X. 2014. Evaluating remotely sensed phenological metrics in a dynamic ecosystem model[J]. *Remote Sensing*, 6(6): 4660-4686.
- Xin Q C, Broich M, Zhu P, et al. 2015. Modeling grassland spring onset across the western United States using climate variables and MODIS-derived phenology metrics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 161: 63-77.
- Yu F F, Price K P, Ellis J, et al. 2003. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 87(1): 42-54.
- Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. 2010. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(51): 22151-22156.
- Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, et al. 2013. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(11): 4309-4314.
- Zhang Q Y, Cheng Y B, Lyapustin A I, et al. 2014. Estimation of crop Gross Primary Production (GPP): I. impact of MODIS observation footprint and impact of vegetation BRDF characteristics[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 191: 51-63.
- Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 471-475.
- Zhu W Q, Pan Y Z, He H, et al. 2012. A changing-weight filter method for reconstructing a high-quality NDVI time series to preserve the integrity of vegetation phenology[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(4): 1085-1094.
- Zhu W Q, Tian H Q, Xu X F, et al. 2012. Extension of the growing season due to delayed autumn over mid and high latitudes in North America during 1982-2006[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 21(2): 260-271.

## Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data

FAN Deqin<sup>1</sup>, ZHAO Xuesheng<sup>1</sup>, ZHU Wenquan<sup>2\*</sup>, ZHENG Zhoutao<sup>2</sup>

(1. College of Geosciences and Survey Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Monitoring plant phenology with remote sensing data has important scientific value for studying the response of vegetation to climate change. A comprehensive analysis on the influencing factors of accuracy of plant phenology estimation based on principles and general technical processes of remote sensing application in vegetation monitoring was carried out by taking into account the following four aspects: the specific vegetation type and its geographical conditions; remote sensing data and pre-processing; techniques used to identify plant phenometrics; and evaluation of satellite-derived plant phenometrics. Potential methods for improving the accuracy of plant phenology monitoring are thoroughly discussed. These include: building high-resolution near-surface sensor-derived phenology observation and sharing network; developing universally applicable methods for noise removal of satellite remote sensing time-series data and reconstruction of vegetation index curves; searching more stable methods to estimate plant phenology; and exploring the possibility of synthesizing ground-based observation, remote sensing monitoring, and model simulation to achieve the spatial scaling-up of phenometrics.

**Key words:** plant phenology; remote sensing; vegetation index; time series; accuracy; influencing factor; review