

陆表物候监测的遥感指数多维度评估

孙莉昕, 朱文泉, 谢志英, 詹培, 李雪莹

1. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;
2. 北京师范大学 地理科学学部 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心, 北京 100875

摘要: 针对陆表植被物候监测已发展了很多遥感指数, 但不同遥感指数表征陆表植被季节性变化的能力存在差异。目前, 有关陆表植被物候遥感指数的评估大多在不同标准下开展, 导致研究结果间的可比性较差, 致使无法根据不同区域选择出最佳的遥感指数, 从而影响大尺度(如半球乃至全球)的陆表物候监测精度。本文在北半球中高纬度地区, 以75个碳通量塔站点的406条记录和129个物候相机站点的482条记录为参考标准, 对10种遥感指数应用于陆表物候监测的能力进行了系统性评估, 并从两个精度评估视角(物候提取准确度、物候变化趋势一致性)、4个维度(植被类型、地理环境、物候类型、物候事件)对比分析了各种情况下的最佳遥感指数及其精度。虽然部分遥感指数在多数情况下均表现最佳, 但不同植被类型、地理环境、物候类型(功能物候、结构物候)、物候事件(春季、秋季)组合情况下的最佳遥感指数并不聚焦于少数几种, 而是散布于各类遥感指数之中; 即使是采用了最佳遥感指数, 但在某些情况下, 其用于陆表物候监测的误差仍较大。从不同的精度评估视角来看, 物候提取准确度高的遥感指数并不一定与物候变化趋势一致性高的遥感指数相对应, 说明应根据关注视角来选择最佳遥感指数。本文研究结果可为不同情况下的陆表植被物候监测提供最佳遥感指数选择依据, 从而有利于提高大尺度的陆表植被物候监测精度以及评估其不确定性。

关键词: 遥感指数, 陆表植被物候, 植被类型, 地理环境, 结构物候, 功能物候

中图分类号: P2

引用格式: 孙莉昕, 朱文泉, 谢志英, 詹培, 李雪莹. 2023. 陆表物候监测的遥感指数多维度评估. 遥感学报, 27(11): 2653-2669

Sun L X, Zhu W Q, Xie Z Y, Zhan P and Li X Y. 2023. Multi-dimension evaluation of remote sensing indices for land surface phenology monitoring. National Remote Sensing Bulletin, 27(11): 2653-2669 [DOI: 10.11834/jrs.20221135]

1 引言

遥感观测的陆表物候量化了植被绿度发展时间和程度, 反映了陆表植被的季节动态 (Tong 等, 2019; Wang 和 Zhang, 2020), 是研究植被与气候相互作用的重要参数。遥感指数时序数据因能有效反映植被冠层的季节变化特征 (牟敏杰 等, 2012), 被广泛用于监测陆表植被的返青期、成熟期、衰败期和黄枯期等重要生长节点。其中, 生长季起始期 SOS (Start of Season) 和结束期 EOS (End of Season) 因与生态系统碳循环关系密切, 是现今大部分物候产品或陆表物候研究中最常采用的关键物候指标。利用遥感监测植被 SOS 和 EOS, 其本质在于从复杂的背景中 (土壤、雪和干植被等) 探测

绿色植被信号出现和消失所对应的时间。然而, 不同的遥感指数对于绿色植被信号的识别能力存在差异 (范德芹 等, 2016), 在不同的区域 (Heumann 等, 2007; Hird 和 McDermid, 2009; Beck 等, 2006; Sakamoto 等, 2005) 或不同的植被类型 (de Beurs 和 Henebry, 2004; Liu 等, 2016, 2017; Pastick 等, 2020) 中, 其物候监测能力也不尽相同。

目前, 用于陆表物候监测的遥感指数可概括为3大类。一是常用的增强植被信号的指数, 主要包括 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse 等, 1973)、EVI (Enhanced Vegetation Index) (Huete 等, 2002)、EVI2 (Two-band Enhanced Vegetation Index) (Jiang 等, 2008)、NIRv (Near Infrared Reflectance of Vegetation) (Badgley 等,

收稿日期: 2021-03-17; 预印本: 2022-01-20

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2020YFA0608504); 国家自然科学基金(编号:41771047)

第一作者简介: 孙莉昕, 研究方向为植被与生态遥感。E-mail: 201821051190@mail.bnu.edu.cn

通信作者简介: 朱文泉, 研究方向为植被与生态遥感、遥感图像处理与信息提取。E-mail: zhuwq75@bnu.edu.cn

2017)等。该类指数通过增强背景信息中的绿色植被信号或光谱特征来实现对陆表植被物候的监测(Badgley等, 2017; Li等, 2017; Wardlow等, 2007; 傅银贞, 2010)。二是专门设计用于提取植被物候的指数, 该类指数是专门针对物候监测需求、通过某种变换来弱化不必要的背景信息及其变化对物候监测的干扰。例如, 以降低雨雪导致的土壤湿度和亮度变化干扰而设计的PI (Phenology Index) (Gonsamo等, 2012)、对土壤亮度变化不敏感的PPI (Plant Phenology Index) (Jin和Eklundh, 2014)、针对高寒地区积雪和融雪对物候监测干扰而设计的NDPI (Normalized Difference Phenology Index) (Wang等, 2017)以及降低了秋季枯枝落叶影响的NDGI (Normalized Difference Greenness Index) (Yang等, 2019)等。三是其他反映植被冠层特征(如水分、色素)及地理环境(如土壤)的遥感指数。例如, 表征植被冠层含水量的LSWI (Land Surface Water Index) (Gao, 1996)、削弱土壤背景因素(土壤表面状况, 如粗糙度、秸秆残留物等; 土壤内在物理和化学性状, 如有机质、水分、颗粒大小等)影响的PVI (Perpendicular Vegetation Index) (Richardson和Wiegand, 1977)等。它们在提取低覆盖植被信息时具有一定的优势, 具备植被物候监测潜力, 被尝试应用于陆表物候提取(Chandrasekar等, 2010; Pidgorodetska和Zyelyk, 2015; 徐丹丹和李文龙, 2009)。

当前大尺度的陆表物候监测仍主要使用NDVI和EVI (Cao等, 2015; Clerici等, 2012; Pan等, 2012)。然而, 这些遥感指数由于自身结构的缺陷在某些方面存在一定的不足, 如NDVI指数在高生物量时呈现逐渐饱和的趋势、EVI指数对融雪或积雪较为敏感(Jiang等, 2008), 从而为物候提取引入了不确定性。其他遥感指数基于不同的研究目标提出, 其应用于陆表物候监测的能力也存在差异。虽然已有一些研究在特定区域针对某种或某几种植被类型评估了部分遥感指数应用于陆表物候提取的精度(Dong等, 2020; Dye等, 2016; Karkauskaite等, 2017), 但当前仍缺乏针对不同遥感指数在大尺度、多种植被类型以及各种地理环境中的陆表物候监测能力进行系统性分析, 从而无法为陆表物候监测时遥感指数的选择提供更全面的参考。此外, 以往的相关研究大多基于独立的标准开展, 这些研究的样本选取方式、检验数

据类型以及物候提取方法均存在较大差异, 使得不同研究之间的可比性较弱。

针对现有研究存在的以上问题, 本文旨在系统评估各遥感指数在大尺度区域、不同植被类型和不同地理环境下对陆表物候的监测能力, 以期为多维度及其组合情况下的陆表物候遥感监测最佳指数选择提供依据。本文选择地面观测站点丰富且植被生长季明显的北半球中高纬度区域分布广泛的4种植被类型(落叶阔叶林、常绿针叶林、草地和灌丛)为研究对象, 在统一的检验数据(功能物候和结构物候)下对比各遥感指数应用于陆表植被春、秋季(SOS和EOS)物候提取及变化趋势监测的精度; 综合评估各遥感指数应用于不同植被类型、不同地理环境、不同物候类型(结构物候、功能物候)和不同物候事件(春季物候、秋季物候)的监测能力。主要回答3个问题:(1)不同维度(植被类型、地理环境、物候类型、物候事件)及其组合情况下监测物候的最佳遥感指数是哪一种或哪些?(2)最佳遥感指数下的陆表物候监测精度如何?(3)不同精度评估视角(物候提取准确度、物候变化趋势一致性)的最佳遥感指数是否存在差异?

2 数据与方法

2.1 数据

2.1.1 碳通量数据

碳通量塔利用涡度相关技术连续观测地表生态系统与大气间CO₂、水分和能量的交换。基于碳通量塔获取的GPP (Gross Primary Productivity) 时序数据反映了植被光合能力的季节性变化, 由其得到的植被物候被定义为“植被光合物候”, 一般也称为植被功能物候。目前, 基于GPP监测的植被功能物候已被广泛用于陆表植被物候遥感监测结果的验证(牟敏杰等, 2012)。本文选择汇集了全球通量观测网络数据采集结果的FLUXNET 2015数据集(<https://fluxnet.org/data/fluxnet2015-dataset/>[2021-03-17]), 该数据集包含了北半球中高纬度区域212个站点, 数据年份为1991年—2014年, 但因站点而异。

2.1.2 物候相机数据

物候相机通常安装在高塔上(通量塔或瞭望塔), 以倾斜摄影的方式对地表植被进行连续观

测。通过处理分析物候相机拍摄的真彩色影像以获得可以表征植被冠层动态的绿色指数,如相对绿色指数GCC (Green Chromatic Coordinate),其时序数据能够反映植被冠层结构的变化,因此该数据监测的植被物候一般被称为结构物候,并被广泛用于陆表植被物候遥感监测结果的精度验证(Schwartz, 2013)。本文选用了最新版本的PhenoCam Dataset v2.0数据集([https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1674\[2021-03-17\]](https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1674[2021-03-17])),该数据集不仅包含逐日合成的GCC指数时序数据,同时也提供了经三次样条插值法拟合重构、使用相对阈值法(10%、25%和50%)提取的春秋季节物候结果(Richardson等, 2018)。该数据集包含了北半球中高纬度528个站点,数据年份为2000年—2018年,但因站点而异。

2.1.3 遥感指数数据

用于陆表物候监测的卫星遥感时序数据通常要求具有较高的时间分辨率,以准确地反映植被整个生长季的生长变化。本文选择8天合成、500 m空间分辨率的MOD09A1地表反射率数据,其较高的时间分辨率和较长的在轨年限极大满足了卫星遥感指数评估需求。针对上述212个通量观测站点和528个物候相机观测站点的中心位置,提取3×3窗口下9个像元的红光、近红外、绿光、蓝光及短波红外波段反射率,以均值作为中心像元各波段反射率值,并基于这些波段计算待评估的遥感指数(NDVI、EVI、EVI2、NIRv、PPI、PI、NDPI、NDGI、PVI、LSWI)(表1)。此外,本文还获取MODIS合成数据观测时刻的DOY信息用于构建遥感指数时间序列。

表1 遥感指数计算

Table 1 Calculation of remote sensing indices

遥感指数	计算公式*	参考文献
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$	Rouse等(1973)
Enhanced Vegetation index (EVI)	$EVI = 2.5 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + 6\rho_{Red} - 7.5\rho_{Blue} + 1}$	Huete等(2002)
Two-Band Enhanced Vegetation Index (EVI2)	$EVI2 = 2.5 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + 2.4\rho_{Red} + 1}$	Jiang等(2008)
Near Infrared Reflectance of Vegetation (NIRv)	$NIRv = NDVI \times \rho_{NIR}$	Badgley等(2017)
Phenology Index (PI) ^a	$PI = \begin{cases} 0, & \text{if NDVI or NDII} < 0 \\ NDVI^2 - NDII^2 & \\ 0, & \text{if PI} < 0 \end{cases}$	Gonsamo等(2012)
Plant Phenology Index (PPI) ^b	$PPI = -K \times \ln \left(\frac{M - DVI}{M - DVI_s} \right)$	Jin和Eklundh(2014)
Normalized Difference Phenology Index (NDPI)	$NDPI = \frac{\rho_{NIR} - (\alpha\rho_{Red} + (1-\alpha)\rho_{SWIR})}{\rho_{NIR} + (\alpha\rho_{Red} + (1-\alpha)\rho_{SWIR})}$	Wang等(2017)
Normalized Difference greenness index (NDGI)	$NDGI = \frac{\varepsilon\rho_{Green} + (1-\varepsilon)\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\varepsilon\rho_{Green} + (1-\varepsilon)\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$	Yang等(2019)
Land Surface Water Index (LSWI)	$LSWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$	Gao(1996)
Perpendicular Vegetation Index (PVI) ^c	$PVI = \frac{\rho_{NIR} - \alpha\rho_{Red} - \beta}{\sqrt{\alpha^2 + 1}}$	Richardson和Wiegand(1977)

注: * 计算公式中红光反射率 ρ_{Red} 对应MODIS的B1波段,近红外反射率 ρ_{NIR} 对应B2波段,蓝光反射率 ρ_{Blue} 对应B3波段,绿光反射率 ρ_{Green} 对应B4波段,短波红外反射率 ρ_{SWIR} 对应B6波段

$$^a NDII = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$$

^b M 是利用2000年—2018年非裸地冠层植被反射率数据计算得到(Jin和Eklundh, 2014; Yang等, 2019); K 是根据 M 和太阳天顶角(θ_i)计算的增益因子,其中 $d_c = 0.00336 + 0.0477/\cos\theta_i$, $K = \left(1 / \left(4 \times (d_c + (1 - d_c) \times (0.5/\cos\theta_i))\right)\right) \times ((1 + M)/(1 - M))$

^c α, β 是土壤线的斜率和截距

2.2 方法

2.2.1 站点筛选

本文基于北半球中高纬度区域的212个通量站点,结合各站点一年对应的遥感指数时序曲线,

剔除通量数据集中不具备完整且明显植被季节生长变化特征的站点一年数据,共筛选出406条质量较高(年NEE_QC>0.75)的站点一年数据。其包括了75个通量站点(图1(a)),各植被类型所包含的通量站点数及站点一年记录数详见表2。

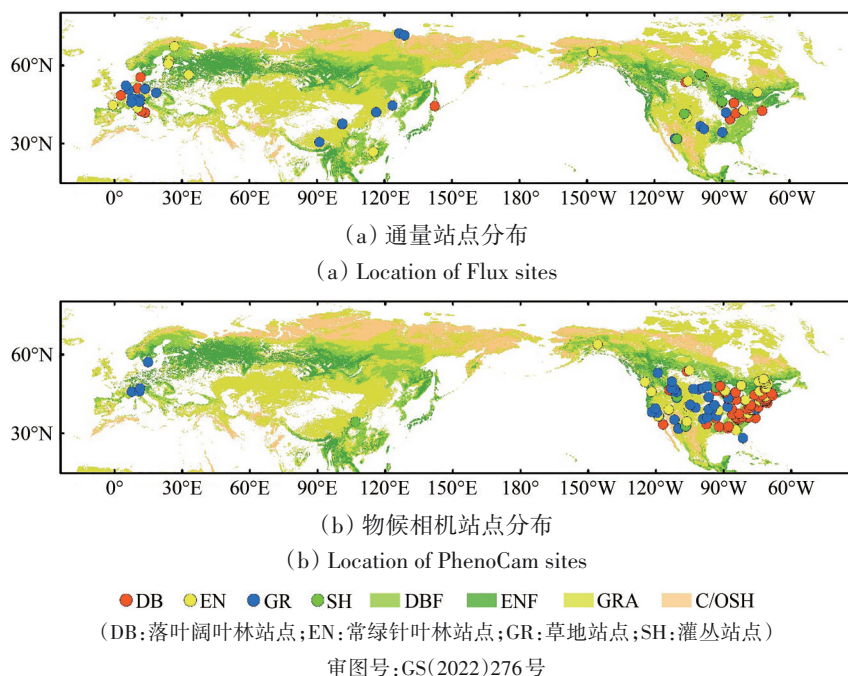


图1 通量和物候相机站点分布及对应的植被类型

Fig. 1 Location of Flux sites and PhenoCam sites and the spatial distribution of vegetation types

表2 各植被类型所包含的通量塔与物候相机站点数及站点一年记录数

Table 2 The number of flux sites, PhenoCam sites and data records for different vegetation types

站点类型	植被类型	站点/个	站点一年/条
通量塔	落叶阔叶林	18	130
	常绿针叶林	28	156
	草地	24	99
	灌丛	5	21
物候相机	落叶阔叶林	68	286
	常绿针叶林	24	67
	草地	29	109
	灌丛	8	23

基于北半球中高纬度区域的528个物候相机站点,考虑该数据集存在一架物候相机在某一站点同时监测了多种植被类型的情况,剔除了相机主要观测类型与站点类型不一致的站点数据,并参考各站点一年对应的遥感指数时序曲线,共筛选出485条站点一年数据。其包括了129个物候相机观测站点(图1(b)),各植被类型所包含的物候相机站点数及站点一年记录数详见表2。

为评估雪、水分以及枯枝落叶覆盖3个常见影响因素形成的不同地理环境下遥感指数适宜性,本文针对北半球中高纬度区域的75个通量站点和129个物候相机站点(图1),一方面基于Köppen-

Geiger世界气候分类图(<http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/shifts.htm>[2021-03-17])筛选出符合4种地理环境(即:降雪、无雪、无雪且湿润和无雪且干燥)的站点;另一方面根据植株生长变化导致地表覆盖情况不同的现象又将其划分两种环境(春季换叶/秋季落叶(枯萎))站点(表3)。其中,春季换叶现象主要发生在常绿林和周围依附的常绿型灌丛中,秋季落叶(枯萎)现象主要发生在草地、落叶林和周围依附的落叶型灌丛中。6种地理环境及分布详见图2。

表3 各地理环境所包含的通量与物候相机站点数及站点一年记录数

Table 3 The number of flux sites, PhenoCam sites and data records for different geographical environments

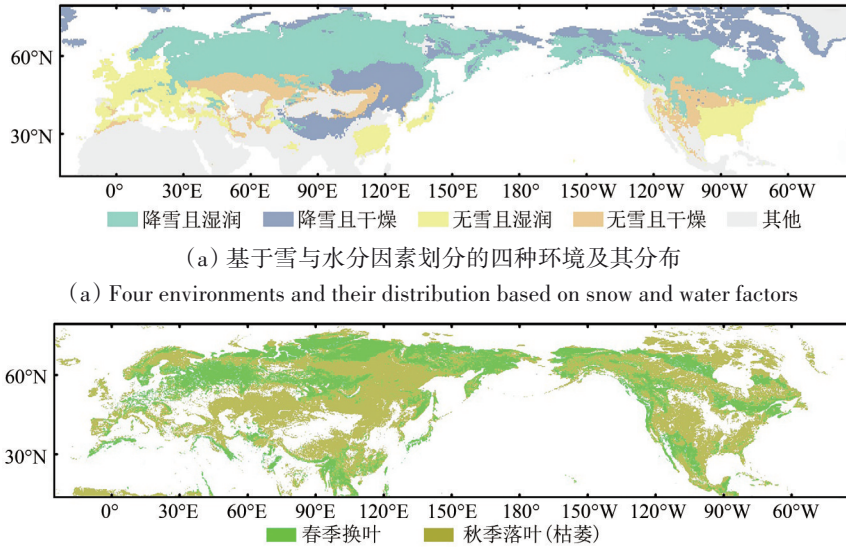
站点类型	地理环境	站点/个	站点一年/条
通量塔	降雪/无雪	47/28	264/142
	无雪且湿润/干燥	8/20	34/108
	春季换叶/秋季落叶(枯萎)	30/45	250/156
物候相机	降雪/无雪	62/67	230/255
	无雪且湿润/干燥	51/16	209/46
	春季换叶/秋季落叶(枯萎)	24/105	47/418

2.2.2 物候期提取

现有研究表明双Logistic函数对卫星遥感监测物候的指数时序数据和通量站点监测的GPP时序

数据重构效果非常好 (Busetto 等, 2010)。本文采用双 Logistic 曲线对 MODIS 遥感指数时序数据和通量塔 GPP 时序数据进行拟合 (图 3、图 4), 得到逐

日 MODIS 遥感指数和 GPP 时序数据。基于此, 本文采用相对阈值法 (White 等, 1997) 提取植被春、秋季物候指标。

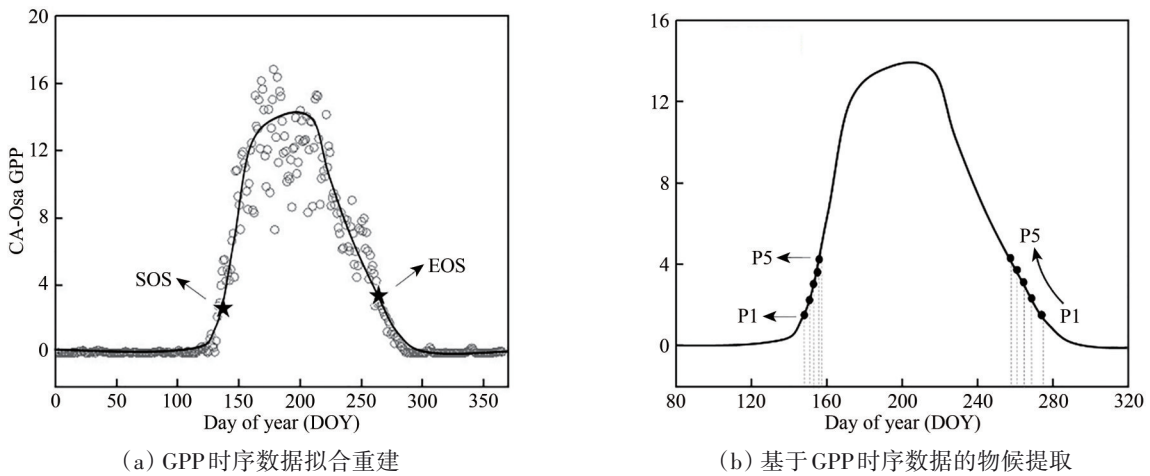


(a) 基于雪与水分因素划分的四种环境及其分布
 (a) Four environments and their distribution based on snow and water factors
 (b) 基于地表枯枝落叶因素划分的两种环境及其分布
 (b) Two environments and their distribution based on dry branches and fallen leaves on the surface

审图号:GS(2022)276号

图 2 各地理环境划分及空间情况

Fig. 2 Spatial distribution of different geographical environments based on different criteria



(a) GPP 时序数据拟合重建
 (a) Fitting and reconstruction of GPP time-series data
 (b) 基于 GPP 时序数据的物候提取
 (b) Extraction of phenological metrics based on GPP time-series data

图 3 GPP 时序数据重建和物候提取示意图(以 CA-Oas 通量站点 2007 年为例)

Fig. 3 A schematic diagram for the reconstruction of GPP time-series data and the extraction of phenological metrics at site CA-Oas in 2007

考虑到不同研究中植被物候期定义 的差异, 且基于碳通量数据获取的功能物候、基于物候相机获取的结构物候及利用遥感监测的陆表物候之间并无明确的阈值对应关系。因此, 针对不同验证数据, 本文定义了多个提取春、秋季物候的相对阈值 (表 4)。PhenoCam Dataset v2.0 数据集本

身提供了 10%、25% 和 50% 等 3 种相对阈值的物候提取结果 (图 5), 为保证交叉验证时遥感指数所取阈值范围与其一致, 以 GCC 时序数据获取的结构物候结果为参考时, 本文对遥感指数的相对阈值略有调整 (表 5)。

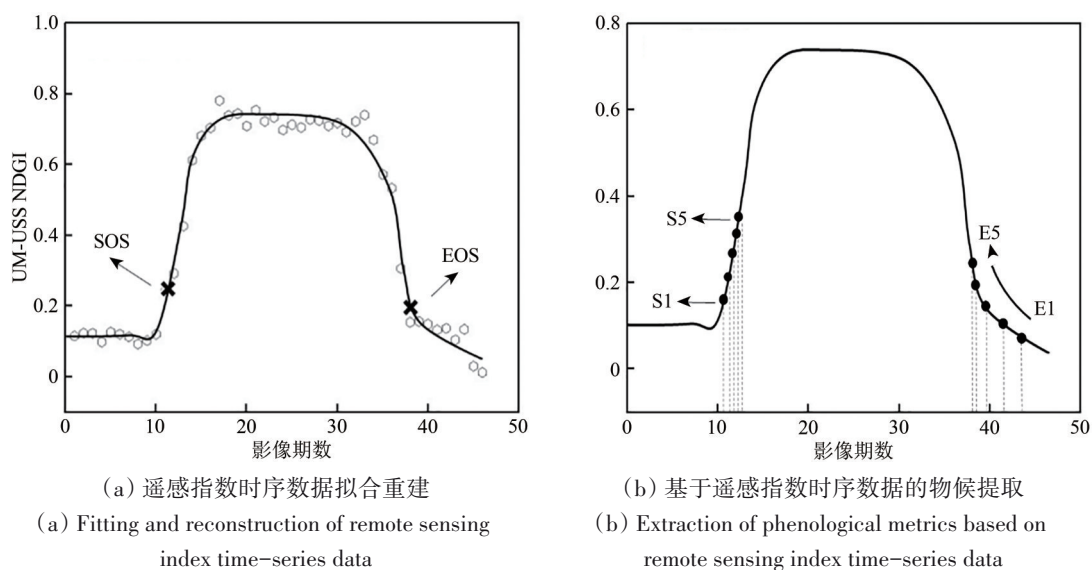


图4 遥感指数时序数据重建和物候提取示意图(以UM-MMS通量站点2009年NDGI指数为例)
 Fig. 4 A schematic diagram for the reconstruction of NDGI time-series data and the extraction of phenological metrics at site UM-MMS in 2009

表4 GPP及遥感数据中春、秋季物候提取的相对阈值定义
 Table 4 The relative thresholds for SOS and EOS extraction from GPP and remote sensing data

GPP相对阈值	遥感指数相对阈值	
	SOS	EOS
P1=10	S1=10	E1=10
P2=15	S2=15	E2=15
P3=20	S3=20	E3=20
P4=25	S4=25	E4=25
P5=30	S5=30	E5=30

2.2.3 精度评估及对比分析

精度评估指标采用均方根误差 RMSE 和一元线性回归的决定系数 R^2 来度量。RMSE 度量物候事件发生日期的准确性，RMSE 值越小则说明该指数提取的物候与参考数据（基于物候相机观测的结构物候和基于碳通量观测的功能物候）偏差越小； R^2 度量物候变化趋势的一致性， R^2 值越大则说明该指数提取的物候与参考数据的变化趋势越相似。

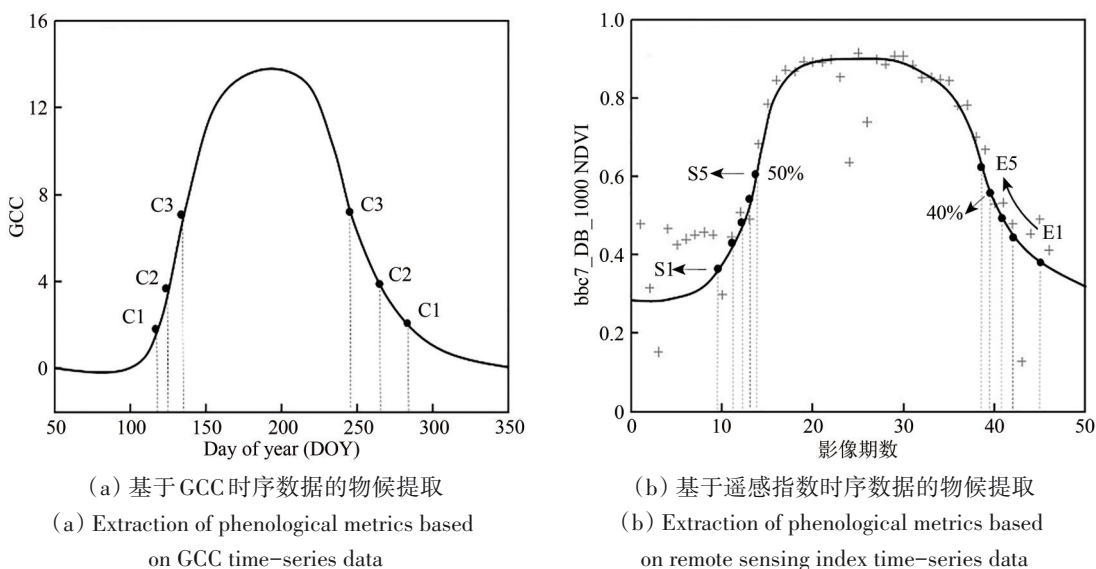


图5 基于GCC和遥感指数的物候提取阈值设置示意图(以bbc7_DB_1000物候相机站点2016年NDVI指数为例)
 Fig. 5 A schematic diagram for the extraction of phenological metrics based on GCC and NDVI time-series data with different relative thresholds at site bbc7_DB_1000 in 2016

表5 GCC及遥感数据中春、秋季物候提取的相对阈值定义
Table 5 The relative thresholds of SOS and EOS extraction from GCC and remote sensing data

GCC相对阈值	遥感指数相对阈值	
	SOS	EOS
C1=10	S1=10	E1=10
C2=25	S2=20	E2=20
C3=50	S3=30	E3=30
	S4=40	E4=40
	S5=50	E5=50

为避免不同数据源使用同一阈值提取的物候事件不对应或同一数据源使用单一阈值造成评估结果偏差的问题, 本文采用多个阈值交叉组合的检验方式。针对每个遥感指数, 分别利用通量站 GPP 数据和物候相机 GCC 数据提取的物候期作为参考标准, 通过 GPP 数据相对阈值 (表 4 中的 P1-P5) 和遥感指数相对阈值 (表 4 中的 S1-S5、E1-E5) 交叉组合可分别获得 SOS 和 EOS 各 25 个精度评估指标 (RMSE 或 R^2), 类似的 GCC 数据 (C1-C3) 可获得 15 个精度评估指标。

此外, 本文统计了每个遥感指数在多阈值下物候监测精度评估指标的范围、均值和中值; 并使用独立样本 t 检验来分析各遥感指数之间、功能物候和结构物候之间是否存在显著差异。以 RMSE 为例, 结构物候 (样本量为 15; 或功能物候, 样本量为 25) 中每两个遥感指数间进行独立样本 t 检验, 当 $p < 0.05$ 时说明这两个指数的物候提取准确

度具有显著差异。

3 结果

3.1 总体对比

图 6 展示了各遥感指数物候监测的最佳精度 (最佳阈值详见表 A1, 多阈值结果详见图 A1)。综合来看, 各遥感指数在最佳阈值时所得到的最佳精度因物候类型、物候事件和物候评价指标的不同而存在明显差异。可以发现 NDGI 除了对功能物候的 EOS 提取误差较大之外, 是所有功能物候和结构物候中提取 SOS 与 EOS 的最佳指数。NDGI 在多数情况下都能获得精度较高的春、秋季物候监测结果, 但其监测精度在 SOS 与 EOS 之间、功能物候与结构物候之间却有所不同。从 SOS 与 EOS 的对比来看 (图 6), 结构物候中, 大多数遥感指数提取 SOS 的 RMSE 明显低于其提取 EOS 的 RMSE、SOS 的 R^2 高于 EOS 的 R^2 (图 6 (a) 和 (b)); 功能物候中, 大多数遥感指数监测 SOS 的准确度 (RMSE) 和物候变化趋势一致性 (R^2) 均明显优于 EOS (图 6 (c) 和 (d))。从结构物候与功能物候的对比来看, 结构物候中大多数遥感指数提取 SOS 和 EOS 的准确度均优于功能物候中, 但结构物候中大多数遥感指数监测的 SOS 变化趋势的一致性明显低于功能物候中的监测结果 (图 6 (b) vs. (d)), 而结构物候中监测的 EOS 变化趋势一致性与功能物候中的监测结果无明显差异。

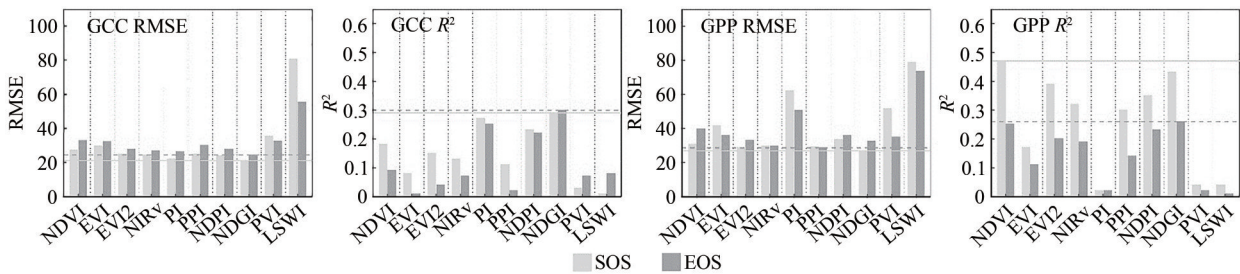


图6 全样本情况下各遥感指数物候监测最佳精度对比

Fig. 6 Comparison of optimum accuracy of phenological monitoring using different remote sensing indexes based on the whole samples

3.2 不同植被类型下的对比

结构物候中, 大多数遥感指数在不同植被类型 SOS 和 EOS 提取准确度上的差异较小 (图 7, 最佳精度及阈值详见表 A2), 多阈值的验证结果也表明各植被类型中存在至少 3 种遥感指数提取 SOS 和 EOS 的准确度较高, 且它们之间并无显著差异 (图 A2—A5)。其中, NDGI 是 4 种植被类型 SOS 提

取准确度均为较好的遥感指数 (RMSE 较小且在多阈值验证中与其他遥感指数无显著差异); 也是除落叶阔叶林 (监测精度最高的指数为 NIRv, 如图 7 (a) 所示; 而多阈值验证时最佳指数为 PVI, 如附图 2 所示) 外的其他 3 种植被类型 EOS 提取的准确度最佳的指数。虽然遥感指数间的精度差异较小, 但不同植被类型在最佳遥感指数下的监测

精度仍有所不同(图7和附图2—5):从SOS监测精度对比来看,落叶阔叶林SOS的RMSE明显低于其他植被类型,其他3种植被的 R^2 无显著差异,但

明显高于常绿针叶林;从EOS监测精度对比来看,草地EOS的RMSE明显低于其他植被类型,草地与灌丛的 R^2 明显高于两种森林。

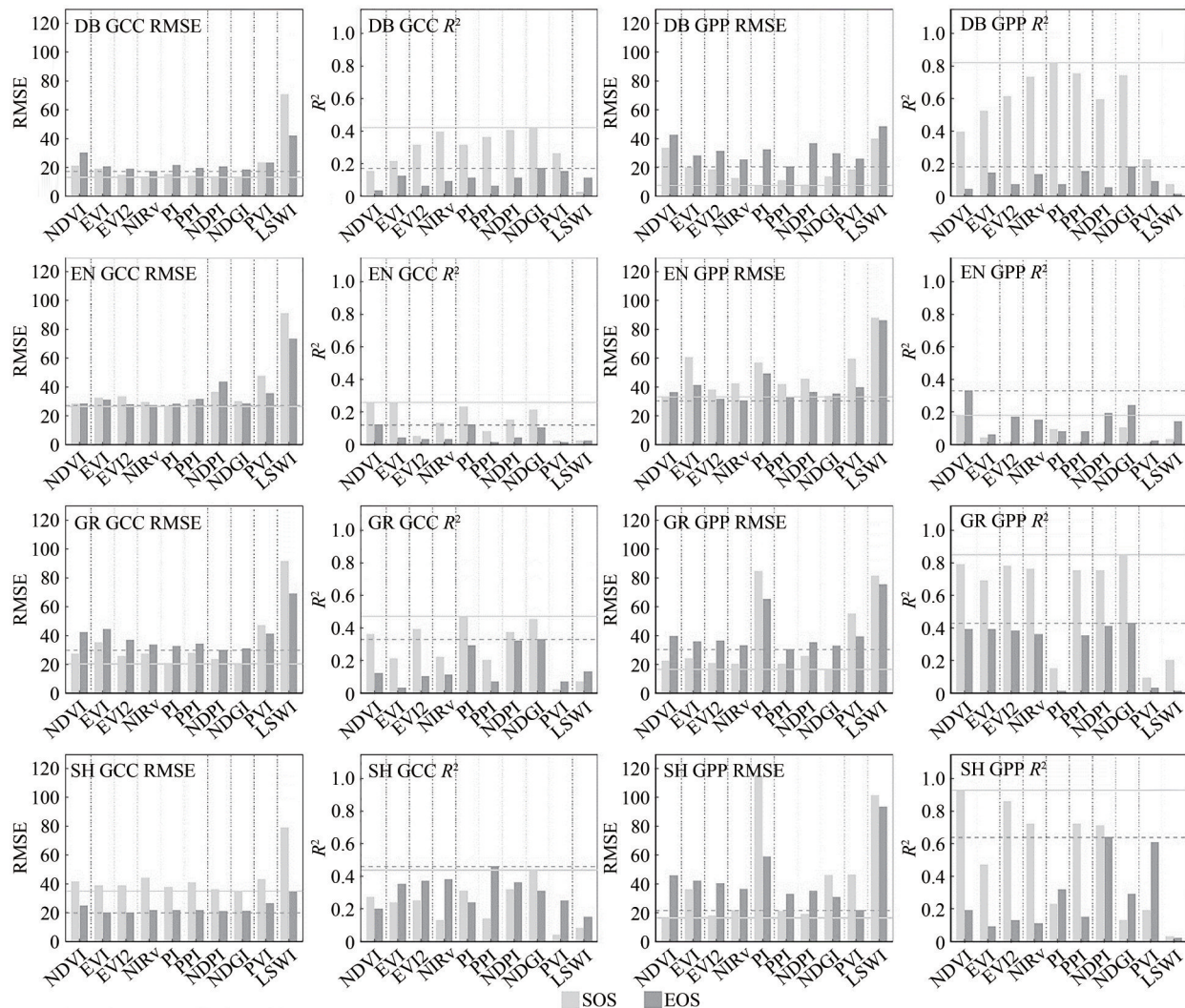


图7 各遥感指数在不同植被类型中物候监测最佳精度对比(DB:落叶阔叶林;EN:常绿针叶林;GR:草地;SH:灌丛)

Fig. 7 Comparison of optimum accuracy of phenological monitoring using different remote sensing indexes in different vegetation types (DB: deciduous broadleaved forest; EN: evergreen needleleaf forest; GR: grassland; SH: shrub)

功能物候中,大多数遥感指数在监测落叶阔叶林和草地物候时表现出较高的准确度,但在监测常绿针叶林和灌丛时表现较差;并且除了常绿针叶林外,大多数遥感指数能够较好的监测植被物候变化趋势(图7)。值得注意的是,部分遥感指数在监测物候变化趋势一致性时对植被类型和物候事件较为敏感。例如,PI在不同植被类型SOS和EOS监测中 R^2 存在非常明显的差异(图7(d)(h)(l)(p))。此外,不同植被类型SOS监测的最佳遥感指数各不相同;监测EOS变化趋势一致性最佳的遥感指数主要为NDGI和NDPI,而提取EOS准确度最佳的遥感指数均为PVI(图A2—A5)。不

同植被类型在最佳遥感指数下的物候监测精度也不尽相同(图7和图A2—A5):从SOS监测精度对比来看,落叶阔叶林的SOS提取准确度最高,常绿针叶林的SOS物候变化趋势一致性明显低于其他植被类型;从EOS监测精度对比来看,灌丛EOS的提取准确度和物候变化趋势一致性均明显优于其他植被类型。

3.3 不同地理环境下的对比

各遥感指数在不同地理环境下监测植被结构物候的能力有限,即便是达到最佳监测精度时,其监测的准确度和物候变化趋势一致性仍然较

低(图8, 最佳精度及阈值详见表A3)。例如, 在无雪且湿润地理环境下监测SOS表现最佳的EVI指数(图8(i)), 其RMSE接近20 d; 而在无雪(图8(f))、无雪且干燥(图8(n))以及秋季落叶(图8(v))环境下监测SOS表现最佳的NDGI指数, 其 R^2 仍不足0.5。从多阈值对比分析来看, 结构物候中, 不同地理环境SOS监测的最佳遥感指数相似, 以PI、PPI和NDGI为主; 除LSWI和NDVI外, 其他指数在大部分环境的EOS监测中差异较小; EOS提取准确度最佳的遥感指数在大部分环境中几乎相同, 但监测EOS变化趋势一致性最佳的遥感指数主要为NDPI、NDGI和PI(图A6—A11)。从SOS监测精度对比来看, 水分因素主导的地理环境差异使得植被结构物候监测存在明显的差异; 从EOS监测精度对比来看, 6种环境EOS监测在物候提取准确度上与SOS监测类似, 在降雪和无雪且干燥环境的EOS监测在物候变化趋势上明显高于其他环境, 但其精度仍然有限。

功能物候中, 各遥感指数在不同地理环境下监测植被功能物候的能力仍然有限, 但部分遥感指数在物候变化趋势一致性监测中精度相对较高, 并对不同地理环境表现出一定的敏感性(图8)。例如, PPI指数的功能物候变化趋势一致性监测能力在无雪(图8(h))、无雪且干燥(图8(p))和春季换叶(图8(t))地理环境中表现不佳, 而在无雪且湿润(图8(l))和秋季落叶(图8(x))地理环境中表现相对较好。不同地理环境SOS监测的最佳遥感指数以PPI和NDGI为主; 除监测秋季落叶(枯萎)环境EOS的最佳指数为PPI外, 其他环境EOS提取准确度和监测变化趋势一致性的最佳指数主要为PVI、NDGI、PI(图A6—A11)。从SOS监测精度对比来看, 最佳指数为PPI的秋季落叶(枯萎)和无雪且湿润环境在监测精度(RMSE、 R^2)上明显优于最佳指数为NDGI的其他4种地理环境。从EOS监测精度对比来看, 大多数遥感指数在降雪环境中的物候提取准确度明显高于在其他环境的提取准确度, 但在降雪和无雪环境的 R^2 中无明显差异。此外, 在春季换叶和无雪且湿润地理环境中植被EOS监测在物候变化趋势一致性上明显高于在秋季落叶(枯萎)和无雪且干燥环境中的监测结果。

各地理环境中功能物候和结构物候监测的最佳遥感指数及其精度并存在明显差异。从SOS监测功能物候和结构物候的最佳遥感指数和监测精

度对比来看(图A6—A11), 除水分主导的两种环境外, 其他环境中监测功能物候和结构物候的最佳指数基本不同, 并且在大部分环境中功能物候和结构物候在监测精度方面均存在明显差异。例如, 降雪环境中监测功能物候SOS的 R^2 明显高于结构物候监测结果, 秋季落叶(枯萎)环境中监测SOS功能物候的RMSE和的 R^2 明显优于结构物候的监测结果。而在其他多数情况下, 结构物候的监测精度明显更高。从EOS功能物候和结构物候监测的最佳遥感指数和监测精度对比来看(附图6—11), 除枯枝落叶主导的两种环境外, 功能物候和结构物候提取准确度最佳的遥感指数均相同(PVI和PPI), 并且在大部分环境中功能物候和结构物候的监测精度也均存在明显差异。例如, 在无雪且干燥和秋季落叶(枯萎)环境EOS监测中功能物候的RMSE明显低于结构物候的RMSE, 在除降雪和秋季落叶(枯萎)环境外的其他环境EOS监测中功能物候的 R^2 均明显高于结构物候的 R^2 。

4 讨论

4.1 不同维度下的最佳遥感指数

虽然部分遥感指数(例如, NDGI和PPI)在多数情况下均表现最佳, 但不同植被类型、地理环境、物候类型(功能物候、结构物候)、物候事件(春季、秋季)及其组合情况下的最佳遥感指数并不聚焦于少数几种, 而是散布于各类遥感指数之中。以植被类型这一维度为例, 除LSWI指数外, 其余九种指数在物候提取准确度最佳指数或变化趋势一致性最佳指数中均有出现。虽然NDGI、PPI、PI和NDVI等指数在不同物候类型中适用性更广, 但其他指数在不同物候事件中也经常出现, 在其他维度中的最佳遥感指数分布特点类似(表A4)。现有大多数遥感指数使用2—3个波段的信息监测植被的季节性变化。然而, 有限波段所提供的信息不足以将不同类型的植被从复杂的背景信息中区分。近些年的研究致力于减少背景信息及其变化对植被物候监测的影响。例如, NDPI和NDGI均利用3个波段的信息削弱背景变化(例如, 融雪)对植被物候监测的影响, 均提升了植被物候监测的精度; 但在有秋季落叶的地理环境中, NDPI监测植被物候的能力不及NDGI。这表明相比NDPI, NDGI所使用的波段信息及其组合方式能够更好地区分绿色植被和干植被。目前已有

研究认为, NDGI指数是新兴物候指数中效果最好的 (Yang等, 2019; 刘喜龙, 2019), 本文研究结果与其较一致。除此之外, 本文也发现PPI指数与NDGI类似, 在大部分情况下均表现不错 (表A4)。

例如, 在落叶阔叶林SOS和EOS监测和其他植被类型EOS监测中其物候提取准确度最高, 在无雪且湿润、春季换叶和秋季落叶 (枯萎) 环境的SOS监测中物候变化趋势一致性最好等。

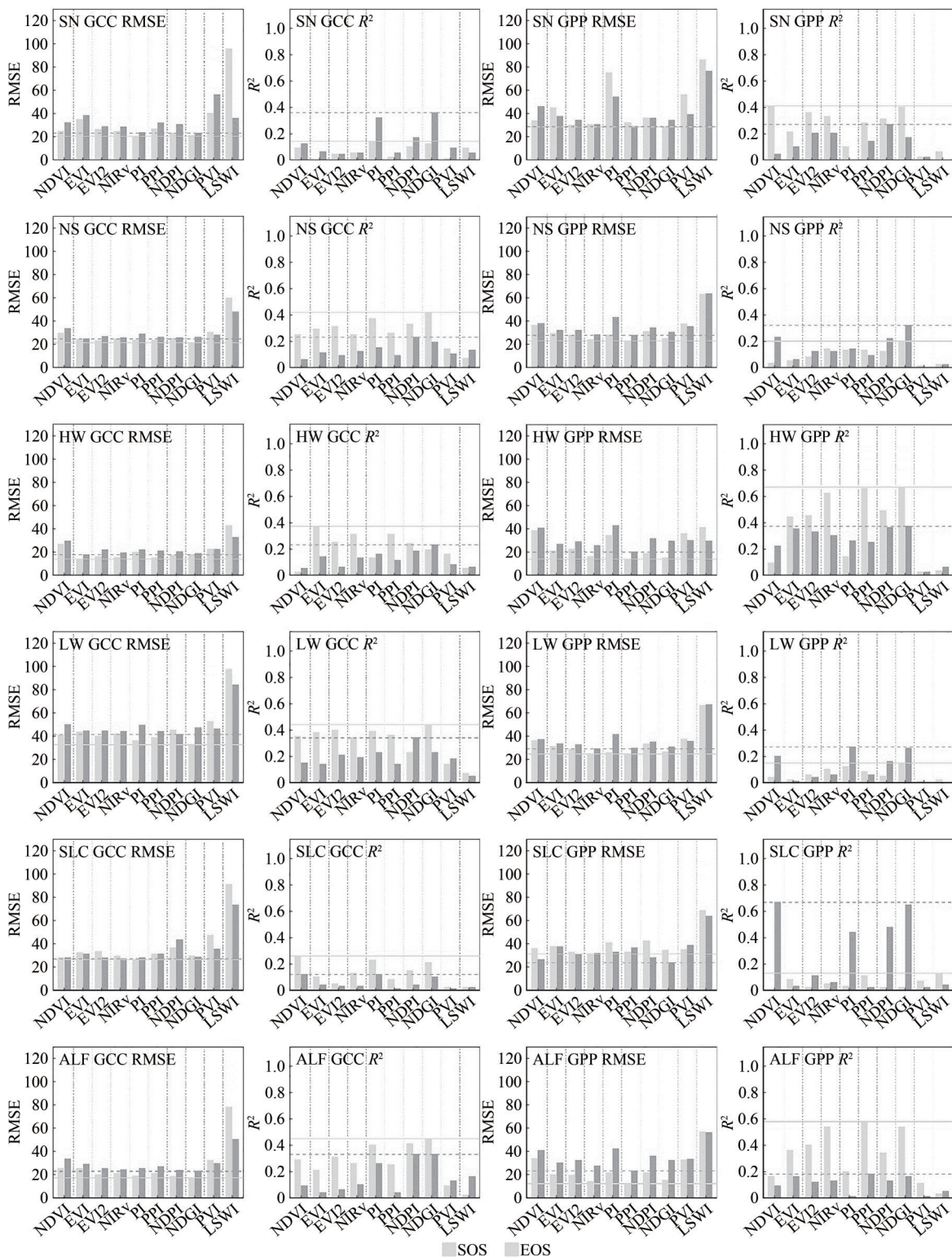


图8 各遥感指数在不同地理环境中物候监测最佳精度对比(SN:降雪;NS:无雪;HW:无雪且湿润;LW:无雪且干燥;SLC:春季换叶;ALF:秋季落叶(枯萎))

Fig. 8 Comparison of optimum accuracy of phenological monitoring using different remote sensing indexes in different geographical environments (SN: Snow; NS: No Snow; HW: High Wetness based on NS; LW: Low Wetness based on NS; SLC: Spring Leaf Change; ALF: Autumn Leaf Fall)

此外, 现有大尺度陆表物候监测产品大多基于 NDVI、EVI 和 EVI2 生产 (如 MCD12Q2 EVI (Zhang 等, 2003)、VIPPHEN EVI2 (White 等, 1997)、CMGLSP EVI2 (Zhang 等, 2014)、MOD09Q1P EVI (Tan 等, 2011) 和 AVHRRP NDVI (Reed 等, 1994))。虽然 NDVI、EVI 和 EVI2 在某些情况下确实为最佳指数 (附表 4), 如常绿针叶林的功能物候 SOS 监测最佳指数为 NDVI、灌丛的结构物候 EOS 监测最佳指数为 EVI 和 EVI2, 但这些产品常用的指数总体上并不如 NDGI 和 PPI。此外, Peng 等 (2017) 的研究也表明这些陆表物候产品仅在局部或特定区域的 RMSE 较高且年际变化差异不大, 但在监测大范围区域时的物候变化趋势一致性较差。因此, 未来大尺度陆表物候产品生产中选择普适性较高的 NDGI 或 PPI, 而在某些特定环境下则需选择该条件对应的最佳指数。

4.2 基于最佳遥感指数监测陆表物候的精度差异

本文研究结果表明 (表 A4), 在两个精度评估视角上, 基于最佳遥感指数监测不同维度及其组合情况下的陆表物候精度均存在差异, 其中监测精度最高时, RMSE 小于 10 天, R^2 大于 0.8。例如, 草地类和落叶阔叶林的功能物候 SOS 监测。但同时也发现, 在某些情况下即使是采用最佳遥感指数, 其用于陆表物候监测的误差仍较大 (最低监测精度: RMSE 接近 60 d, R^2 不足 0.1)。表明这些情况下的陆表物候监测结果可能存在较大不确定性。例如, 灌丛的结构物候 SOS 监测、降雪环境的 EOS 监测等情况的物候提取准确度较低; 常绿针叶林的结构物候监测、无雪且湿润环境的结构物候 EOS 监测等情况的物候变化趋势一致性较差。许多关于陆表物候提取的遥感指数研究的实验结果也间接证实了这些情况的存在, 如刘喜龙 (2019) 的研究结果也反映出所有遥感指数在降雪环境下的物候提取准确度偏低, Wu 等 (2014) 针对常绿针叶林探究的几种指数的物候趋势一致性普遍不高。

值得说明的是, 考虑到不同监测手段所获取的同名物候事件之间存在本质差异, 相同阈值下所估算的同名物候事件的发生时间并非完全对应, 本文采用了多组阈值交叉组合的方式, 因此每个指数的精度结果 (RMSE、 R^2) 并非是在某一特定阈值下与验证数据之间的偏差, 而是多组阈值下

的综合结果。这一综合结果所反映的误差应大于最优阈值下的误差, 但本文的核心是利用精度指标来比较不同指数监测能力的高低, 而非考察特定阈值下某指数的精度大小, 因此并不影响各指数在精度上的排序结果。在实际应用中, 学者们往往会结合研究区和研究对象选择最优的阈值来提取物候, 因此其指数的监测精度通常较好。如 Yang 等 (2019) 采用双 Logistic 方法并在其经验阈值下利用 NDGI 监测苔原物候, 以通量塔监测的功能物候为参考时, 其 SOS 的 RMSE 为 10.37 d、 R^2 为 0.92, EOS 的 RMSE 为 26.74 天、 R^2 为 0.59。

4.3 不同精度评估视角下的最佳遥感指数差异

从不同的精度评估视角来看, 物候提取准确度高、遥感指数与物候变化趋势一致性高的遥感指数并不完全相同, 应根据关注视角或研究目标来选择适宜的遥感指数。目前, 已有大部分遥感指数精度评估研究主要考虑的是物候提取准确度, 也有少部分研究对比的是物候变化趋势一致性 (范德芹等, 2014; Peng 等, 2017), 但基于现有研究结果无法准确针对具体研究目标 (短期的准确提取或长期的变化趋势监测) 来选择合适的遥感指数。而本文综合分析了这两个精度评估视角, 一方面对比发现了不同维度组合情况下两种精度评估视角的最佳遥感指数异同 (附表 4)。例如, 灌丛的结构物候 SOS 监测中, 物候提取准确度最佳的指数为 NDGI、PI 和 NDPI, 而物候变化趋势一致性最佳的指数为 PI; 无雪环境的功能物候 EOS 监测中, 物候提取准确度最佳的指数为 PVI、PPI 和 NIR_v, 而物候变化趋势一致性最佳的指数为 NDGI。另一方面基于评估结果可根据研究需求指导遥感指数的选择, 若关注短期内 (如当年或近几年) 的植被物候提取准确度时, 则考虑根据该区域情况 (植被类型、地理环境、物候类型、物候事件) 选择物候提取准确度最佳的遥感指数, 若关注植被物候的长期变化趋势, 则应选择该条件下物候变化趋势一致性最佳的遥感指数。

4.4 基于多维度全面评估遥感指数的优势

本文从 4 个维度 (植被类型、地理环境、物候类型、物候事件) 对用于陆表物候提取的遥感指数开展了系统的评估, 这一评估结果的优势在于可以指导多维度及其组合情况下的最佳遥感指数

选择。例如, 本文发现落叶阔叶林和常绿针叶林的功能物候 SOS 监测最佳指数分别为 PI 和 NDVI, 但其结构物候 SOS 监测的最佳指数分别为 PPI/ NIRv/NDGI (落叶阔叶林) 和 NDVI/PI/NDGI (常绿针叶林), 而 Gonsamo 等 (2012) 仅以功能物候评价指数监测精度, 虽然也证明了 PI 和 NDVI 在监测落叶阔叶林和常绿针叶林 SOS 时表现不错, 但并未进一步探究其在结构物候中是否同样适用。本文则针对结构物候和功能物候、SOS 和 EOS 以及植被类型的组合情况精准地提供适宜该条件的最佳指数。对于不同地理环境来说也类似, 例如, 本文发现降雪环境的结构物候 SOS 监测的最佳指数为 PI 和 NDPI。Wang 等 (2017) 也发现结构物候中 NDPI 和 PI 在降雪环境中显著优于 NDVI、NDII 等指数, 但本文同时探究得到功能物候中 NDGI 在降雪环境 SOS 监测上也表现不错, 为降雪环境下不同维度物候监测的最佳指数选择提供了科学全面的依据。

此外, 目前有关陆表物候遥感指数的评估大多在不同标准下开展, 导致研究结果间可能存在互相矛盾的现象, 且可比性差, 无法根据不同区域选择出最佳遥感指数。而本文在北半球中高纬度地区、统一标准 (两个精度评估视角和四个维度) 下对比评估了 10 种遥感指数, 更为全面系统地提供了不同情况下的最佳遥感指数的选择方案。例如, Wang 等人 (2017) 的研究认为 NDPI 抗雪性较好, 而 Jin 和 Eklundh (2014) 的研究中则表明 PPI 指数在雪的干扰下也能准确提取植被物候, 由于两者是在不同区域针对不同植被类型开展研究。因此, 无法直接对比研究中提供的指数精度来评估哪个指数更适用于降雪环境物候监测。根据本文研究结果可直观看到, 对于降雪环境下的春秋季物候提取, 无论是功能物候还是结构物候中 NDGI 和 PI 指数的监测能力 (物候提取准确度和物候变化趋势一致性) 均最佳, 而 NDPI 和 PPI 指数则是在某些情况下为最佳指数。例如, 功能物候 EOS 监测中, PPI 的物候提取准确度最佳, NDPI 的物候变化趋势一致性最佳。

4.5 本研究的不确定性及展望

用于计算遥感指数的基础数据、后续的数据预处理过程以及最终的物候识别方法均可能会给陆表物候监测精度评估结果带来不确定性。本文

基于 MOD09A1 数据计算并评估了 10 种遥感指数的陆表物候监测能力和适宜性, 但基于不同基础数据的物候期识别精度存在显著差异 (Delbart 等, 2006; Peng 等, 2017)。Yang 等 (2019) 对比基于 MCD43A4 和 MOD09A1 数据提取的物候结果发现 RMSE 差值最高 10d, R^2 差值达 0.3。因此, 考虑不同基础遥感数据 (如 NOAA/AVHRR、MODIS 和 SPOT 等) 对陆表物候监测精度的影响对于完善遥感指数评估具有重要价值。

本文旨在统一标准下评估遥感指数的陆表物候监测能力, 对 10 种遥感指数时序数据均选择目前较常用的预处理方法 (双 Logistic 拟合) 进行拟合重构。但目前大量研究表明, 森林及农作物监测中, 预处理方法的不同 (例如, 双 Logistic 拟合、非对称高斯线性拟合、最佳指数斜率提取、傅里叶变换以及 Savitzky-Golay 滤波) 确实影响了遥感指数物候提取精度 (Hird 和 McDermid, 2009; Beck 等, 2006; Sakamoto 等, 2005; Wang 等, 2014; Zhu 等, 2019), Zeng 等 (2020) 也提出经不同的去噪、插值方法处理后, 遥感指数所提取物候结果存在显著差异, 并且尚未有哪种方法具有较好的普适性或显著性优势。因此, 为更全面客观地评价遥感指数对陆表物候的监测能力, 应在今后的研究中进一步尝试不同的数据预处理方法以完善遥感指数的综合评估。例如, 针对本实验中时序曲线呈现 W 型或存在背景值的指数 (如, PVI、LSWI 和 EVI) 无法直接被常规方法 (例如, 双 Logistic 拟合、三次样条插值) 拟合重构, 利用解混合像元算法 (Cardot 等, 2008)、数据统计值 (Yuan 等, 2018) 或时相筛选 (例如, 春季 4—5 月 (Wang 等, 2011)、秋季 9—11 月 (Wu 等, 2012)) 等手段可有效提高指数的物候提取精度 (Guyon 等, 2011; Wu 等, 2014)。

为避免不同数据源使用同一阈值提取的物候事件不对应或同一数据源使用单一阈值造成评估结果偏差的问题, 本文选择了相对阈值法, 并采用多个阈值交叉组合的检验方式。近年来, 最大斜率法 (Kaduk 和 Heimann, 1996)、导数法 (White 等, 1997)、曲率变化率法 (Zhang 等, 2003)、滑动平均法 (Duchemin 等, 1999) 以及函数拟合法 (双 Logistic 函数、高斯函数、傅里叶函数等) 也被广泛应用 (Hudson 和 Keatley, 2010; 林忠辉和莫兴国, 2006; Wang 等, 2014; 张峰等, 2004)。目

前, 在森林、草地、灌丛以及农作物类型物候监测中均能较准确地提取关键物候事件日期 (Che 等, 2014; 范德芹等, 2014; 武永峰等, 2008; 徐岩岩等, 2012)。但不同物候识别方法的春季物候监测精度存在差异, 并且在一定程度上受地理位置和区域气候条件变化的影响 (Schwartz 等, 2002; Shen 和 Piao, 2013; Zhu 等, 2019), 若进一步开展与其他物候识别方法下遥感指数物候监测精度的对比研究, 有助于更客观地评估遥感指数用于陆表物候提取的适宜性。

此外, 除了本文所考虑的几种地理环境之外, 地形因素也会影响遥感指数的监测能力, 特别是在崎岖的山区。各遥感指数因其计算方式的不同而具有不同的地形效应。一般而言, 非全比值遥感指数 (例如, EVI) 相比于全比值遥感指数 (例如, NDVI) 对地形条件更加敏感 (Matsushita 等, 2007)。因此, 进一步的研究需要深入分析各遥感指数的地形敏感性, 以期为山区植被物候监测遥感指数的选择提供可靠依据。

5 结 论

本文在北半球中高纬度地区, 以 75 个碳通量塔站点的 406 条记录和 129 个物候相机站点的 482 条记录为参考标准, 通过双 Logistic 拟合重构、相对阈值法识别物候期、多阈值交叉验证评估精度的方式, 对 10 种遥感指数 (NDVI、EVI、EVI2、NIRv、PI、PPI、NDPI、NDGI、LSWI 和 PVI) 应用于陆表物候监测的能力进行了系统性评估, 并从两个精度评估视角 (物候提取准确度、物候变化趋势一致性)、4 个维度 (植被类型、地理环境、物候类型、物候事件) 对比分析了各种情况下的最佳遥感指数。主要有 3 方面发现: (1) 虽然部分遥感指数 (如 NDGI、PPI) 在多数情况下均表现最佳, 但不同植被类型、地理环境、物候类型 (功能物候、结构物候)、物候事件 (春季、秋季) 及其组合情况下的最佳遥感指数并不聚焦于少数几种, 而是散布于各类遥感指数之中, 如在不同地理环境中, 十种指数均表现出物候提取准确度最佳或物候变化趋势一致性最佳; (2) 即使是采用了最佳遥感指数, 但在某些情况下 (如灌丛的结构物候 SOS 监测、无雪且湿润环境的结构物候 EOS 监测), 其用于陆表物候监测的误差仍较大, 说明这些情况的陆表物候监测结果存在较大不确

定性, 应考虑从基础数据的选择、数据预处理方法和物候识别方法等可能影响陆表物候监测精度的方面进行改进; (3) 从不同的精度评估视角来看, 物候提取准确度高的遥感指数与物候变化趋势一致性高的遥感指数存在差异, 因此在开展陆表物候监测时, 应根据关注视角或研究目标来选择最佳遥感指数, 若关注植被物候发生时间, 则优先选择物候提取准确度高的最佳遥感指数, 若关注植被物候的长期变化趋势, 则应选择物候变化趋势一致性最佳的遥感指数。

相比于已有研究仅在各自的研究区内对比了多种指数, 且其精度评估仅服务于数据处理方法改进或发展新的遥感指数, 本文致力于为不同条件下的陆表物候遥感监测最佳指数选择提供系统的依据。一方面本文归纳总结了: (1) 不同维度 (植被类型、地理环境、物候类型、物候事件) 及其组合情况下监测其物候的最佳遥感指数; (2) 基于最佳遥感指数的陆表物候监测精度差异; (3) 不同精度评估视角 (物候提取准确度、物候变化趋势一致性) 的最佳遥感指数的差异。另一方面基于本文最佳遥感指数监测结果还可进一步分析: (1) 功能物候和结构物候的精度差异; (2) 春季物候和秋季物候的精度差异; (3) 不同植被类型或不同地理环境的精度差异。

基于本文对遥感指数开展的多维度全面评估结果和精度差异分析, 不仅可以指导多维度及其组合情况下的最佳遥感指数选择, 同时也为大尺度、高精度的陆表物候监测提供了新思路, 即采取“先分区选择最佳遥感指数、后汇总各区物候监测结果”的研究方式, 这样既可避免单一遥感指数或陆表物候产品在不同区域的物候监测精度差异对总体精度的影响, 而且更有利于提高大尺度乃至全球陆表物候的监测精度以及其不确定性评估。

参考文献 (References)

- Badgley G, Field C B and Berry J A. 2017. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. *Science Advances*, 3(3): e1602244 [DOI: 10.1126/sciadv.1602244]
- Beck P S A, Atzberger C, Høgda K A, Johansen B and Skidmore A K. 2006. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 100(3): 321-334 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.10.021]
- Busetto L, Colombo R, Migliavacca M, Cremonese E, Meroni M, Galv-

- agno M, Rossini M, Siniscalco C, Morra Di Cella U and Pari E. 2010. Remote sensing of larch phenological cycle and analysis of relationships with climate in the Alpine region. *Global Change Biology*, 16(9): 2504-2517 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02189.x]
- Cao R Y, Chen J, Shen M G and Tang Y H. 2015. An improved logistic method for detecting spring vegetation phenology in grasslands from MODIS EVI time-series data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200: 9-20 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.09.009]
- Cardot H, Maisongrande P and Faivre R. 2008. Varying-time random effects models for longitudinal data: unmixing and temporal interpolation of remote-sensing data. *Journal of Applied Statistics*, 35(8): 827-846 [DOI: 10.1080/02664760802061970]
- Chandrasekar K, Sessa Sai M V R, Roy P S and Dwevedi R S. 2010. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS vegetation index product. *International Journal of Remote Sensing*, 31(15): 3987-4005 [DOI: 10.1080/01431160802575653]
- Che M L, Chen B Z, Innes J L, Wang G Y, Dou X M, Zhou T M, Zhang H F, Yan J W, Xu G and Zhao H W. 2014. Spatial and temporal variations in the end date of the vegetation growing season throughout the Qinghai-Tibetan Plateau from 1982 to 2011. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190: 81-90 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.01.004]
- Clerici N, Weissteiner C J and Gerard F. 2012. Exploring the use of MODIS NDVI-based phenology indicators for classifying forest general habitat categories. *Remote Sensing*, 4(6): 1781-1803 [DOI: 10.3390/rs4061781]
- de Beurs K M and Henebry G M. 2004. Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. *Remote Sensing of Environment*, 89(4): 497-509 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.006]
- Delbart N, Le Toan T, Kergoat L and Fedotova V. 2006. 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*, 101(1): 52-62 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.11.012]
- Dong Q, Chen X H, Chen J, Zhang C S, Liu L C, Cao X, Zang Y Z, Zhu X F and Cui X H. 2020. Mapping winter wheat in North China using sentinel 2A/B data: a method based on phenology-time weighted dynamic time warping. *Remote Sensing*, 12(8): 1274 [DOI: 10.3390/rs12081274]
- Duchemin B, Goubier J and Courrier G. 1999. Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystems with NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 67(1): 68-82 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00067-4]
- Dye D G, Middleton B R, Vogel J M, Wu Z T and Velasco M. 2016. Exploiting differential vegetation phenology for satellite-based mapping of semiarid grass vegetation in the southwestern United States and Northern Mexico. *Remote Sensing*, 8(11): 889 [DOI: 10.3390/rs8110889]
- Fan D Q, Zhao X S, Zhu W Q and Zheng Z T. 2016. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data. *Progress in Geography*, 35(3): 304-319 (范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 郑周涛. 2016. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述. *地球科学进展*, 35(3): 304-319) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.03.005]
- Fan D Q, Zhu W Q, Pan Y Z, Jiang N and Zheng Z T. 2014. Identifying an optimal method for estimating green-up date of *Kobresia pygmaea* alpine meadow in Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Remote Sensing*, 18(5): 1117-1127 (范德芹, 朱文泉, 潘耀忠, 姜楠, 郑周涛. 2014. 青藏高原小嵩草高寒草甸返青期遥感识别方法筛选. *遥感学报*, 18(5): 1117-1127) [DOI: 10.11834/jrs.20143299]
- Fu Y Z. 2010. Study on Vegetation Index of Remote Sensing and Its Applications. Fuzhou: Fuzhou University (傅银贞. 2010. 遥感植被指数分析及应用研究. 福州: 福州大学)
- Gao B C. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 257-266 [DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3]
- Gonsamo A, Chen J M, Price D T, Kurz W A and Wu C Y. 2012. Land surface phenology from optical satellite measurement and CO₂ eddy covariance technique. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(G3): G03032 [DOI: 10.1029/2012jg002070]
- Guyon D, Guillot M, Vitasse Y, Cardot H, Hagolle O, Delzon S and Wigneron J P. 2011. Monitoring elevation variations in leaf phenology of deciduous broadleaf forests from SPOT/VEGETATION time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2): 615-627 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.10.006]
- Heumann B W, Seaquist J W, Eklundh L and Jönsson P. 2007. AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982-2005. *Remote Sensing of Environment*, 108(4): 385-392 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.025]
- Hird J N and McDermid G J. 2009. Noise reduction of NDVI time series: an empirical comparison of selected techniques. *Remote Sensing of Environment*, 113(1): 248-258 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.09.003]
- Hudson I L and Keatley M R. 2010. *Phenological Research: Methods for Environmental and Climate Change Analysis*. Dordrecht: Springer.
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X and Ferreira L G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 195-213 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2]
- Jiang Z Y, Huete A R, Didan K and Miura T. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112(10): 3833-3845 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.006]
- Jin H X and Eklundh L. 2014. A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. *Remote Sensing of En-*

- vironment, 152: 512-525 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.07.010]
- Kaduk J D and Heimann M. 1996. A prognostic phenology model for global terrestrial carbon cycle models. *Climate Research*, 6(1): 1-19 [DOI: 10.3354/cr006001]
- Karkauskaite P, Tagesson T and Fensholt R. 2017. Evaluation of the Plant Phenology Index (PPI), NDVI and EVI for start-of-season trend analysis of the northern Hemisphere boreal zone. *Remote Sensing*, 9(5): 485 [DOI: 10.3390/rs9050485]
- Li H, Chen Z X, Jiang Z W, Wu W B, Ren J Q, Liu B and Tuya H. 2017. Comparative analysis of GF-1, HJ-1, and Landsat-8 data for estimating the leaf area index of winter wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(2): 266-285 [DOI: 10.1016/s2095-3119(15)61293-x]
- Lin Z H and Mo X G. 2006. Phenologies from harmonics analysis of AVHRR NDVI time series. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 22(12): 138-144 (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. *农业工程学报*, 22(12): 138-144) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2006.12.029]
- Liu X L. 2019. *Remote Sensing of Vegetation Phenology in Snow-covered Area of Northern Hemisphere*. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China (刘喜龙. 2019. 北半球积雪地区遥感植被物候研究. 成都: 电子科技大学)
- Liu Y, Hill M J, Zhang X Y, Wang Z S, Richardson A D, Hufkens K, Filippa G, Baldocchi D D, Ma S Y, Verfaillie J and Schaaf C B. 2017. Using data from Landsat, MODIS, VIIRS and PhenoCams to monitor the phenology of California oak/grass savanna and open grassland across spatial scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237-238: 311-325 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.02.026]
- Liu Y X, Wu C Y, Peng D L, Xu S G, Gonsamo A, Jassal R S, Altaf Arain M, Lu L L, Fang B and Chen J M. 2016. Improved modeling of land surface phenology using MODIS land surface reflectance and temperature at evergreen needleleaf forests of central North America. *Remote Sensing of Environment*, 176: 152-162 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.021]
- Matsushita B, Yang W, Chen J, Onda Y and Qiu G Y. 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. *Sensors*, 7(11): 2636-2651 [DOI: 10.3390/s7112636]
- Mou M J, Zhu W Q, Wang L L, Xu Y J and Liu J H. 2012. Evaluation of remote sensing extraction methods for vegetation phenology based on flux tower net ecosystem carbon exchange data. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(2): 319-327(牟俊杰, 朱文泉, 王伶俐, 许映军, 刘建红. 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. *应用生态学报*, 23(2): 319-327) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.2012.0072]
- Pan Y Z, Li L, Zhang J S, Liang S L, Zhu X F and Sulla-Menashe D. 2012. Winter wheat area estimation from MODIS-EVI time series data using the Crop Proportion Phenology Index. *Remote Sensing of Environment*, 119: 232-242 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.011]
- Pastick N J, Dahal D, Wylie B K, Parajuli S, Boyte S P and Wu Z T. 2020. Characterizing land surface phenology and exotic annual grasses in Dryland ecosystems using Landsat and sentinel-2 data in Harmony. *Remote Sensing*, 12(4): 725 [DOI: 10.3390/rs12040725]
- Peng D L, Zhang X Y, Wu C Y, Huang W J, Gonsamo A, Huete A R, Didan K, Tan B, Liu X J and Zhang B. 2017. Intercomparison and evaluation of spring phenology products using National Phenology Network and AmeriFlux observations in the contiguous United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 242: 33-46 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.04.009]
- Pidgorodetska L V and Zyelyk Y I. 2015. Detection of winter crops by satellite data on the basis of soil-adaptive perpendicular vegetation index. *Astronomical School's Report*, 11(1): 91-98 [DOI: 10.18372/2411-6602.11.1091]
- Reed B C, Brown J F, VanderZee D, Loveland T R, Merchant J W and Ohlen D O. 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 5(5): 703-714 [DOI: 10.2307/3235884]
- Richardson A D, Hufkens K, Milliman T, Aubrecht D M, Chen M, Gray J M, Johnston M R, Keenan T F, Klosterman S T, Kosmala M, Melaas E K, Friedl M A and Frohling S. 2018. Tracking vegetation phenology across diverse North American biomes using PhenoCam imagery. *Scientific Data*, 5(1): 180028 [DOI: 10.1038/sdata.2018.28]
- Richardson A J and Wiegand C L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(12): 1541-1552
- Rouse J W, Haas R H, Schell J A and Deering D W. 1973. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS//Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp.* Washington: NASA
- Sakamoto T, Yokozawa M, Toritani H, Shibayama M, Ishitsuka N and Ohno H. 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96(3/4): 366-374 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.008]
- Schwartz M D. 2013. *Phenology: An Integrative Environmental Science*. 2nd ed. Dordrecht: Springer [DOI: 10.1007/978-94-007-6925-0]
- Schwartz M D, Reed B C and White M A. 2002. Assessing satellite-derived start-of-season measures in the conterminous USA. *International Journal of Climatology*, 22(14): 1793-1805 [DOI: 10.1002/joc.819]
- Shen M and Piao S. 2013. Increasing altitudinal spring phenology gradient of vegetation over the last decade in Qinghai-Tibetan Plateau/Paper Presented at the AGU Fall Meeting, GC33B-1117
- Tan B, Morisette J T, Wolfe R E, Gao F, Ederer G A, Nightingale J and Pedelty J A. 2011. An enhanced TIMESAT algorithm for estimating vegetation phenology metrics from MODIS data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote*

- Sensing, 4(2): 361-371 [DOI: 10.1109/JSTARS.2010.2075916]
- Tong X Y, Tian F, Brandt M, Liu Y, Zhang W M and Fensholt R. 2019. Trends of land surface phenology derived from passive microwave and optical remote sensing systems and associated drivers across the dry tropics 1992—2012. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111307 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111307]
- Wang C, Chen J, Wu J, Tang Y H, Shi P J, Andrew Black T and Zhu K. 2017. A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 196: 1-12 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.04.031]
- Wang J M and Zhang X Y. 2020. Investigation of wildfire impacts on land surface phenology from MODIS time series in the western US forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159: 281-295 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.027]
- Wang M, Tao F L and Shi W J. 2014. Corn yield forecasting in Northeast China using remotely sensed spectral indices and crop phenology metrics. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(7): 1538-1545 [DOI: 10.1016/S2095-3119(14)60817-0]
- Wang X H, Piao S L, Ciais P, Li J S, Friedlingstein P, Koven C and Chen A P. 2011. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(4): 1240-1245 [DOI: 10.1073/pnas.1014425108]
- Wardlow B D, Egbert S L and Kastens J H. 2007. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U. S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 108(3): 290-310 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.021]
- White M A, Thornton P E and Running S W. 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2): 217-234 [DOI: 10.1029/97GB00330]
- Wu C Y, Gonsamo A, Chen J M, Kurz W A, Price D T, Lafleur P M, Jassal R S, Dragoni D, Bohrer G, Gough C M, Verma S B, Suyker A E and Munger J W. 2012. Interannual and spatial impacts of phenological transitions, growing season length, and spring and autumn temperatures on carbon sequestration: a North America flux data synthesis. *Global and Planetary Change*, 92-93: 179-190 [DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.05.021]
- Wu C Y, Gonsamo A, Gough C M, Chen J M and Xu S G. 2014. Modeling growing season phenology in North American forests using seasonal mean vegetation indices from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 147: 79-88 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.001]
- Wu Y F, Li M S and Song J Q. 2008. Advance in vegetation phenology monitoring based on remote sensing. *Journal of Meteorology and Environment*, 24(3): 51-58 (武永峰, 李茂松, 宋吉青. 2008. 植物物候遥感监测研究进展. *气象与环境学报*, 24(3): 51-58) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2008.03.011]
- Xu D D and Li W L. 2009. Vegetation index controlling soil background[EB/OL]. *China Scientific Papers Online*. [2009-06-12]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200906-376> (徐丹丹, 李文龙. 2009. 控制土壤背景的植被指数[EB/OL]. *中国科技论文在线*. [2009-06-12]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200906-376>)
- Xu Y Y, Zhang J H and Yang L M. 2012. Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 32(7): 2091-2098 (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. *生态学报*, 32(7): 2091-2098) [DOI: 10.5846/stxb201108131186]
- Yang W, Kobayashi H, Wang C, Shen M G, Chen J, Matsushita B, Tang Y H, Kim Y, Bret-Harte M S, Zona D, Oechel W and Kondoh A. 2019. A semi-analytical snow-free vegetation index for improving estimation of plant phenology in tundra and grassland ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 228: 31-44 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.028]
- Yuan H H, Wu C Y, Lu L L and Wang X Y. 2018. A new algorithm predicting the end of growth at five evergreen conifer forests based on nighttime temperature and the enhanced vegetation index. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144: 390-399 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.08.013]
- Zeng L L, Wardlow B D, Xiang D X, Hu S and Li D R. 2020. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 237: 111511 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111511]
- Zhang F, Wu B F, Liu C L and Luo Z M. 2004. Methods of monitoring crop phenological stages using time series of vegetation indicator. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 20(1): 155-159 (张峰, 吴炳方, 刘成林, 罗治敏. 2004. 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*, 20(1): 155-159) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2004.01.038]
- Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Hodges J C F, Gao F, Reed B C and Huete A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 471-475 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00135-9]
- Zhang X Y, Tan B and Yu Y Y. 2014. Interannual variations and trends in global land surface phenology derived from enhanced vegetation index during 1982—2010. *International Journal of Biometeorology*, 58(4): 547-564 [DOI: 10.1007/s00484-014-0802-z]
- Zhu Y X, Zhang Y J, Zu J X, Wang Z P, Huang K, Cong N and Tang Z. 2019. Effects of data temporal resolution on phenology extractions from the alpine grasslands of the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 104: 365-377 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.05.004]

Multi-dimension evaluation of remote sensing indices for land surface phenology monitoring

SUN Lixin, ZHU Wenquan, XIE Zhiying, ZHAN Pei, LI Xueying

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Many remote sensing indices have been developed for land surface phenology monitoring, but the ability of different remote sensing indices to represent the seasonal changes of land surface vegetation differs. At present, the evaluations of remote sensing indices for land surface phenology monitoring are mostly conducted under different standards, which results in poor comparability among research results. Thus, the best remote sensing indices cannot be selected according to different regions based on the aforementioned research results, which would affect the large-scale (e.g., hemispheric and even global) land surface phenology monitoring. Taking 406 records from 75 carbon flux tower stations and 482 records from 129 phenological camera stations as the reference standard, this study systematically evaluated the application of 10 remote sensing indexes in monitoring land surface phenology in the middle and high latitudes of the northern hemisphere. In addition, the best remote sensing indices and their accuracy under different conditions were compared and analyzed from two evaluation perspectives (including phenological extraction accuracy and phenological change trend consistency) and four dimensions (including vegetation type, geographical environment, phenological type, and phenological event).

Although some remote sensing indices are the best in most conditions, the best remote sensing indices for different vegetation types, geographical environment, phenological types (functional phenology, structural phenology), and phenological events (spring and autumn) do not focus on a few of remote sensing indices but are scattered among all kinds of them. Even with the best remote sensing index, the error of land surface phenology monitoring is still large in some conditions. From different evaluation perspectives, the remote sensing indices with a high accuracy of phenology extraction are not exactly the same as those with a high consistency of phenological change trend, which suggests that the best remote sensing index should be selected according to the objects. The results of this study can provide the best remote sensing index selection basis for land surface phenology monitoring under different conditions, which will be helpful to improve the accuracy of large-scale land surface phenology monitoring and evaluate its uncertainty.

Key words: remote sensing index, land surface phenology, vegetation type, geographical environment, structural phenology, functional phenology
Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFA0608504); National Natural Science Foundation of China (No. 41771047)