

龚志远, 李雪梅, 李秋萍, 等. 兰州植物园植被春季物候无人机监测[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(8): 1707-1712.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2023.08.010

# 兰州植物园植被春季物候无人机监测

龚志远, 李雪梅, 李秋萍, 赵俊卓, 李帆帆

(兰州交通大学测绘与地理信息学院/甘肃省地理国情监测工程实验室/地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 针对卫星遥感影像难以准确提取局部地区植被物候的问题,本研究以兰州植物园草坪草、连翘、牡丹、黄刺玫和香荚蒾等5种植被为研究对象,基于多时相无人机影像,提出了一种局部地区植被春季物候期估算方法。首先利用无人机获取的多时相兰州植物园植被影像,分析各植被超绿指数(*ExG*)、超绿超红差分指数(*ExGR*)、绿叶指数(*GLI*)和植被因子指数(*VEG*)等植被指数的时序变化特征,并进行一元三次多项式拟合,使用导数法提取各植被的发芽期、开花期、结果期等春季物候期,然后与人工观测物候资料进行比较,明确不同植被指数下物候期的估算精度。结果表明:除草坪草的发芽期和结果期以及牡丹的发芽期,4种植被指数估算得到的物候期基本一致,但其和实际物候期均存在不同程度的误差;发芽期估算误差最大的是黄刺玫,平均提前27 d,最小的是香荚蒾,平均推迟8 d;开花期估算误差较大的是草坪草和牡丹,平均误差均在20 d以上,最小的是连翘和香荚蒾;结果期估算误差最大的是香荚蒾,平均提前35 d,最小的是牡丹,平均提前5 d。基于*ExG*指数估算的开花期和结果期与实际观测期一致性最好,均方根差分别为14.01 d和17.28 d,而*VEG*指数估算发芽期效果最好,均方根差为13.81 d。本研究基于无人机遥感影像数据筛选出植被春季物候期监测适宜的植被指标,对局部地区植被物候监测研究具有一定意义。

**关键词:** 植被物候; 无人机; 监测; 植被指数

中图分类号: Q948.15

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2023)08-1707-06

## Unmanned aerial vehicle (UAV) monitoring of spring vegetation phenology in Lanzhou Botanical Garden

GONG Zhi-yuan, LI Xue-mei, LI Qiu-ping, ZHAO Jun-zhuo, LI Fan-fan

(Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University/Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring/National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that satellite remote sensing images are difficult to accurately extract vegetation phenology in local areas, this study took five vegetations such as lawn grasses, *Forsythia suspensa*, peony, *Rosa xanthina* and *Viburnum sargentii* in Lanzhou Botanical Garden as the research objects. Based on multi-temporal unmanned aerial vehicle (UAV) images, a method for estimating spring phenology of vegetation in local areas was proposed. Firstly, the multi-temporal vegetation images of Lanzhou Botanical Garden obtained by UAV were used to analyze the temporal variation characteristics

of vegetation indices such as excess green index (*ExG*), excess-green minus excess red index (*ExGR*), green leaf index (*GLI*) and vegetative index (*VEG*), and one-dimensional cubic fitting was performed. The derivative method was used to extract the spring phenological periods such as germination period, flowering period and fruiting period of each vegetation, and then compared with the artificial observation phenological data to clarify the estimation accuracy

收稿日期: 2022-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761014, 41971094, 42161025, 42104096); 兰州交通大学优秀科研平台(团队)科学研究资助计划项目(201806)

作者简介: 龚志远(1996-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事城市生态遥感研究。(E-mail) 1043287311@qq.com

通讯作者: 李雪梅, (E-mail) lixue mei@lztu.edu.cn

of phenological periods under different vegetation indices. The results showed that except for the germination and fruiting period of turfgrass and the germination period of peony, the phenological periods estimated by the four vegetation indices were basically the same, but there were different degrees of errors between them and the actual phenological periods. The largest estimation error of germination period was 27 days in advance for *Rosa xanthina*, and the smallest was *Viburnum insignis*, which was delayed by eight days. The error of flowering period estimation was larger in turfgrass and peony, and the average error was more than 20 days, and the smallest was *Forsythia suspensa* and *Viburnum sargentii*. The largest estimation error of fruiting period was *Viburnum sargentii*, with an average of 35 days in advance, and the smallest was peony, with an average of five days in advance. The flowering period and fruiting period estimated based on the *ExG* index had the best consistency with the actual observation period, and the root mean square errors were 14.01 d and 17.28 d, respectively. The *VEG* index had the best effect on estimating the germination period, and the root mean square error was 13.81 d. This study is based on UAV remote sensing image data to screen out suitable vegetation indicators for monitoring vegetation phenology in spring, which is of certain significance to the study of vegetation phenology monitoring in local areas.

**Key words:** vegetation phenology; unmanned aerial vehicle (UAV); monitoring; vegetation index

植被是陆地生态系统重要组成部分,在区域碳循环、局部地区气候调节中具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。植被物候是植被生长过程中的重要指标,一方面体现植被的发育状态,另一方面是评估植被生产力的关键因子。因此,植被物候的监测有助于对植被生长状态的掌握,为植被生长调控提供依据<sup>[3-4]</sup>。

目前,植被物候监测通常有目视观测、高空遥感监测和近地面监测等方法<sup>[5]</sup>。目视观测法主要通过布设观测网络对植被物候期及生长参数进行人工获取,如泛欧物候网络(PEPN)<sup>[6]</sup>和美国国家物候网(NPN)<sup>[7]</sup>等。这种方法虽然简单易行,但其获取的数据代表性差、观测成本高<sup>[8-9]</sup>。高空遥感监测是利用卫星遥感数据对地表植被物候期进行监测。通常根据植被生长过程中植被指数的变化特征进行植被物候期的反演<sup>[10-12]</sup>。高空遥感监测具有覆盖面积广,时间序列长等优点<sup>[12]</sup>。基于卫星遥感影像的植被物候监测方法通常包括植被指数时间序列重建和植被物候参数提取两个步骤。由于卫星观测角度、云、地形变化和几何误差等诸多因素会降低长时间序列数据质量,因此需要对原始时间序列数据重建<sup>[13-14]</sup>。重建的方法主要有拟合法和滤波法。拟合法是选取一个函数,通过最小二乘法逼近原时间序列,从而达到重建时间序列的目的;滤波法则是使用窗口平滑的方式去重建时间序列<sup>[15]</sup>。重建时间序列后,一般利用阈值法进行物候期的估算<sup>[16-17]</sup>。近地面观测是基于无人机等平台利用物候相机获取植被图像,进而进行物候期的估算<sup>[18]</sup>。与目视观测和卫星遥感监测相比,近地面监测可实现空间尺度和时间尺度的平衡<sup>[19]</sup>。同时,在近地面监测中使用

普通的数码相机即可进行植被影像的获取和物候分析<sup>[20]</sup>。

鉴于利用无人机监测植被物候的研究相对较少,特别是季节尺度内的物候变化监测。本研究选取兰州植物园内草坪草、连翘、牡丹、黄刺玫和香荚蒾等 5 种植被为研究对象,在植被物候期人工观测的同时,利用无人机获取植物园高时空分辨率遥感影像,基于不同的植被指数,构建不同植被春季物候期(发芽期、开花期和结果期等)的估算方法,并对不同植被指数提取春季物候期的精度进行比较与分析,旨在为基于无人机的植被物候监测提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

兰州植物园(103°42'42"E, 36°07'30"N)位于甘肃省兰州市安宁区,占地面积 0.369 km<sup>2</sup>,海拔高度 1 500 m,年日照时数 2 476.4 h,年平均气温 8.9 °C,年平均降水量 349.9 mm,年蒸发量 1 664 mm,年平均风速 3.6 m/s。兰州植物园属温带大陆性气候,四季分明。园内植被密集,物种丰富。研究区位置如图 1 所示。

### 1.2 数据获取与研究方法

1.2.1 地面监测数据获取及植物物候观测 在植物园区内选取草坪草、连翘、牡丹、黄刺玫和香荚蒾等 5 种植被为监测对象,每种植被的样地约 5~10 m<sup>2</sup>。从 2021 年 3 月 1 日至 2021 年 7 月 6 日进行植被物候监测。在发芽和叶片展开的关键阶段,每周观察不低于 3 次,其他阶段每周观察不低于 2 次。

记录每个样地内植被发芽、开花、结果等物候期,研究中分别以样方内 90% 植株达到发芽状态日期、90% 花开放日期、90% 花完全凋谢日期作为植被发

芽期、开花期和结果期<sup>[18]</sup>。因草坪草没有花期和结果期,研究中以草的高度达到 3 cm 和 6 cm 的日期作为草坪草开花期和结果期<sup>[21]</sup>。

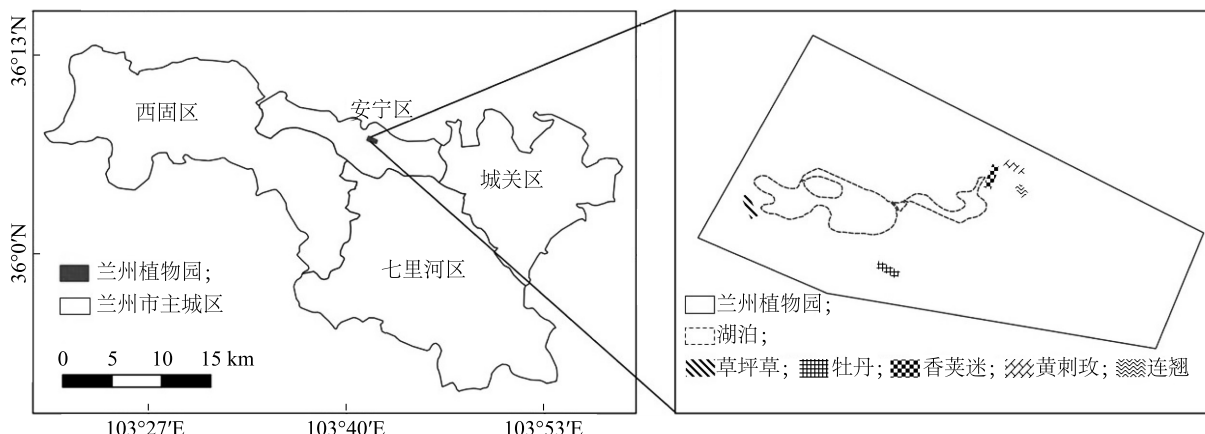


图1 研究区位置示意图

Fig.1 Location diagram of study area

1.2.2 无人机遥感影像的采集和处理 研究中利用大疆 Phantom 4 RTK 无人机(深圳大疆科技创新有限公司产品)获取兰州植物园可见光遥感影像。从 2021 年 3 月 1 日至 2021 年 7 月 6 日,选择光照条件合适的天气(晴天或多云天)进行无人机航测。无人机参数设置为:飞行高度 200 m,速度 10 m/s,空间分辨率 5.4 cm,航向重叠度 80%,旁向重叠度 70%,每次采集时间约 16 min 40 s。影像采集时间间隔不超过 7 d。植物园内布设 8 个地面控制点,用于无人机遥感影像的匹配。基于采集的无人机遥感影像制作数字正射影像图(Digital orthophoto map, DOM),以纯相元数据提取各植被类型的植被指数。

1.2.3 植被指数的计算 目前已定义的植被指数超过 40 种,基于可见光波段可获取的植被指数主要有超绿指数( $ExG$ )、超绿超红差分指数( $ExGR$ )、绿叶指数( $GLI$ )和植被因子指数( $VEG$ )等 4 种,其算法如下<sup>[9]</sup>:

$$ExG = 2g - r - b \quad (1)$$

$$ExGR = ExG - (1.4r - g) \quad (2)$$

$$GLI = \frac{2g - r - b}{2g + r + b} \quad (3)$$

$$VEG = \frac{g}{r^{0.667} \times b^{0.333}} \quad (4)$$

式中  $r$ ,  $g$ ,  $b$  分别为无人机影像中红、绿、蓝 3 个波段的反射率。

为便于数据处理,研究中以日序(Day of year, DOY)表示日期,例如 1 月 10 日记为一年中的第 10 d,简记为 10。

1.2.4 物候期的估算及精度评估 研究中采用三次多项式对植被指数时间序列数据进行拟合,通过对三次多项式求取一阶导数,解得一阶导数为 0 所对应的时间分别为模拟发芽结束期和结果期,而一阶导数取最大值时所对应的时间为模拟开花期<sup>[18]</sup>。再根据地面观测得到的不同植被实际物候期,计算模拟物候期的均方根差( $RMSE$ ), $RMSE$  的计算方法如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (5)$$

式中,  $X_i$ ,  $Y_i$  分别代表植被物候期的实际值和模拟值,  $n$  为样本数。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被指数动态变化

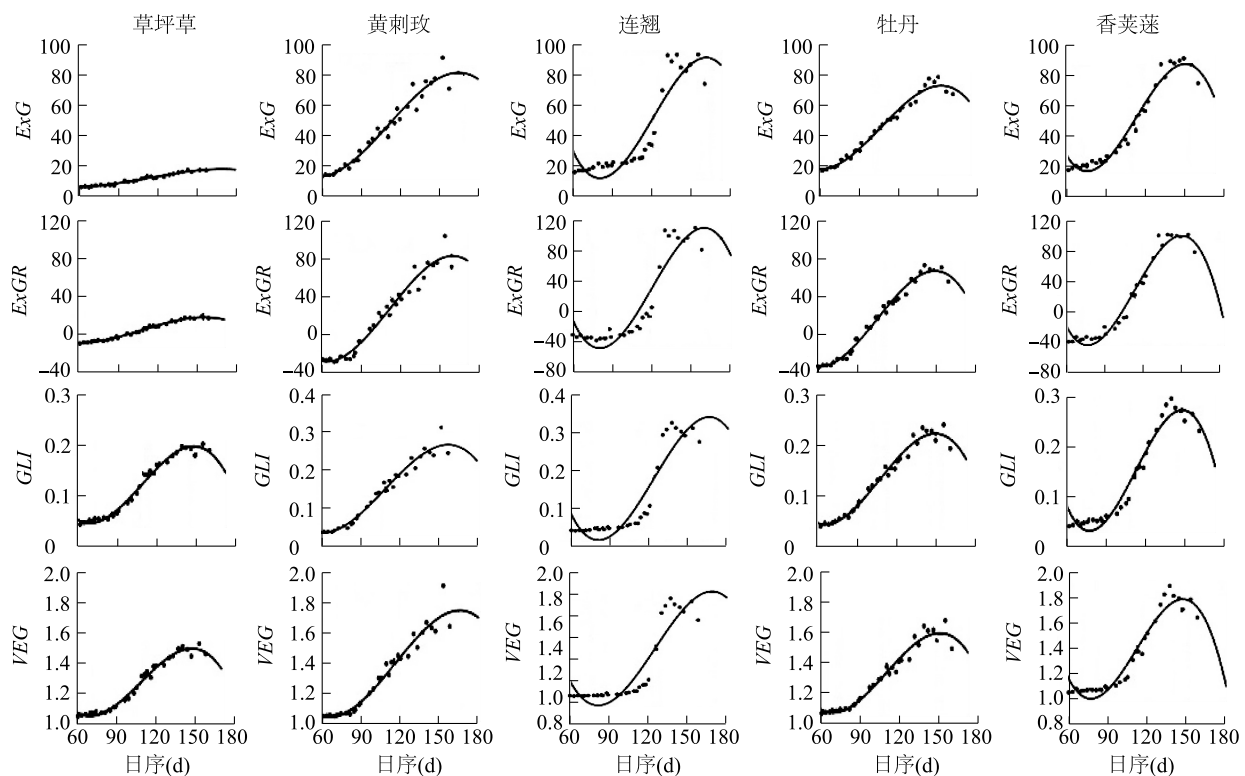
3-7 月是植被生长的旺盛期,不同植被的 4 个植被指数都呈现上升趋势,如图 2 所示。从图中可以看出,草坪草植被指数是 5 种植被中增加速度最慢的,草地  $ExG$  和  $ExGR$  指数呈现缓慢的增加趋势,远低于其他植被的  $ExG$  和  $ExGR$  指数。连翘的 4 种植被指数在日序 130 d (5 月 10 日)左右时突然大幅度增加,而在日序 150 d (5 月 30 日)以后,指数

波动不大。牡丹和香荚迷在日序 150 d 以后,4 种植被指数均有下降的趋势。

## 2.2 物候期估算精度

根据植被指数拟合曲线得到不同植被的模拟物候期和地面实测物候期如表 1 所示。从表中可以看出,草坪草、黄刺玫、牡丹等植被 4 种植被指数估算得到的发芽期早于实际观测期,而连翘、香荚迷的估算发芽期迟于观测期。黄刺玫的发芽期预测误差最大,4 种植被指数下,估算的发芽期平均提前 27 d;而香荚迷发芽期预测误差最小,4 种植被指数下,估算的发芽期平均推迟 8 d。4 种植被指数下,估算的连翘

开花期迟于实际值,其他 4 种植物的开花期估算值均早于实际值。4 种植被指数下,草坪草的开花期估算误差最大,平均提前 24 d,而连翘和香荚迷的开花期估算误差较小,连翘平均推迟 3.75 d,香荚迷平均提前 3.75 d。4 种植被指数下,5 种植被的结果期估算值均早于实际值,其中香荚迷结果期的估算误差最大,4 种植被指数下平均提前 35 d,而牡丹的误差最小,平均提前 5 d。除草坪草的发芽期和结果期以及牡丹的发芽期外,4 种植被指数对 5 种植被 3 个物候期的估算,比较一致。



ExG: 超绿指数; ExGR: 超绿超红差分指数; GLI: 绿叶指数; VEG: 植被因子指数。

图 2 不同植被 3-7 月植被指数动态变化特征

Fig.2 The dynamic change characteristics of vegetation index in different plants from March to July

不同植被指数下,4 种植被关键物候期的模拟值均方根差 ( $RMSE$ ) 如表 2 所示。从表中可以看出,4 种植被指数下,3 个物候期的  $RMSE$  一般为 13~22 d。其中,结果期的  $RMSE$  最大,平均为 20 d。4 种植被指数下,开花期的  $RMSE$  最小。VEG 指数下,估算的 5 种植被发芽期  $RMSE$  最小,即 VEG 指数适合 5 种植被发芽期的估算。同样,ExG 指数下,估算的 5 种植被结果期  $RMSE$  最小,即 ExG 指数适

合 5 种植被结果期的估算。由于自然植被物候监测中只要  $RMSE \leq 21$  d 就认为物候期监测精度合格<sup>[18]</sup>,因此,本研究基于无人机遥感影像数据进行植被物候监测的方案能满足物候监测需求。

## 3 讨论与结论

本研究基于 2021 年 3 月 1 日至 2021 年 7 月 6 日兰州植物园 5 种植被物候期地面观测数据和多时



相无人机遥感影像,基于4种可见光波段的植被指数,提出了典型植被春季关键物候期估算方法,并分析了不同指标下的估算精度。结果表明,除草坪草的发芽期和结果期以及牡丹的发芽期,4种植被指

数估算得到的物候期基本一致,但其和实际物候期存在不同程度的误差。基于 *ExG* 指数估算的开花期和结果期与实际观测期一致性最好,而 *VEG* 指数估算发芽期的精度最好。

表1 不同植被指数下,5种植被关键物候期的模拟值与观测值比较

Table 1 Comparison of simulated values of the key phenological stages of five vegetations by different vegetation indices with observed values

植被类型	发芽期 (d)					开花期 (d)					结果期 (d)				
	<i>ExG</i>	<i>ExGR</i>	<i>GLI</i>	<i>VEG</i>	<i>OBS</i>	<i>ExG</i>	<i>ExGR</i>	<i>GLI</i>	<i>VEG</i>	<i>OBS</i>	<i>ExG</i>	<i>ExGR</i>	<i>GLI</i>	<i>VEG</i>	<i>OBS</i>
草坪草	57	60	67	69	74	113	108	107	108	133	170	154	146	141	171
黄刺玫	58	63	62	65	89	111	112	110	115	120	165	158	158	165	173
连翘	79	80	80	81	65	119	120	123	125	118	159	160	166	168	175
牡丹	59	61	63	68	72	104	105	105	109	126	149	148	147	148	153
香荚蒾	74	75	75	76	67	111	112	110	112	115	148	149	145	146	182

*ExG*、*ExGR*、*GLI*、*VEG* 分别为超绿指数、超绿超红差分指数、绿叶指数和植被因子指数估算的物候期;*OBS* 为实际观测的物候期。

表2 不同植被指数下春季关键物候期估算的均方根误差

Table 2 Root mean square error (RMSE) of key phenological stage estimation in spring under different vegetation indices

物候期	均方根误差 (d)			
	<i>ExG</i>	<i>ExGR</i>	<i>GLI</i>	<i>VEG</i>
发芽期	18.24	16.01	15.15	13.81
开花期	14.01	15.11	15.91	14.12
结果期	17.28	19.25	21.62	21.61

*ExG*、*ExGR*、*GLI*、*VEG* 分别为超绿指数、超绿超红差分指数、绿叶指数和植被因子指数。

目前,植被物候监测研究中大多使用中低分辨率卫星影像数据,如 Landsat, MODIS 和 AVHRR 等,这些卫星影像数据在研究较大空间尺度植被物候时具有一定优势,但是在研究小尺度植被物候时往往因遥感影像的分辨率过低导致研究结果精度不高。无人机能提供厘米级的遥感数据,因而其在小尺度植被物候监测中越来越受到重视。本研究基于无人机监测得到的可见光影像数据构建超绿指数、超绿超红差分指数、绿叶指数和植被因子指数,提出了一种季节内群落尺度植被物候的研究方法。虽然估算得到的物候期 *RMSE* 相对较大,但基本符合自然植被物候监测的精度要求。当然如何进一步优化算法提高模型估算精度还有待进一步研究。本研究还发现4种植被指数对不同植被、不同物候期的估算精度存在较大的差异,因此在实际工作中可针对具体植被和物候期,选择不同的植被指数来进行分析,以期得到更高的估算精度。

目前无人机在小范围植被甚至单个植株的物候

监测中具有较高的优势,但大范围植被的物候监测才更符合区域尺度植被生产力估算的需要,相信在未来随着民用无人机技术的发展以及新能源技术在无人机领域的应用,利用无人机对区域尺度植被物候监测能够实现。

## 参考文献:

- [1] 杜培军. 城市遥感的研究动态与发展趋势:“城市遥感”专栏导读[J]. 地理与地理信息科学,2018,34(3):1-4.
- [2] 皮新宇,曾永年,贺城墙. 融合多源遥感数据的高分辨率城市植被覆盖度估算[J]. 遥感学报,2021,25(6):1216-1226.
- [3] 吉珍霞,侯青青,裴婷婷,等. 黄土高原植被物候对季节性干旱的敏感性响应[J]. 干旱区地理,2022,45(2):557-565.
- [4] 韩宝龙,束承继,蔡文博,等. 植被群落特征对城市生态系统服务的影响研究进展[J]. 生态学报,2021,41(24):9978-9989.
- [5] ZENG L, WARDLOW B D, XIANG D, et al. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 237: 111511.
- [6] TEMPL B, KOCH E, BOLMGREN K, et al. Pan european phenological database (PEP725): a single point of access for European data [J]. Journal of Neurosurgical Sciences, 2018, 62: 1109-1113.
- [7] MAYER A. Phenology and citizen science: Volunteers have documented seasonal events for more than a century, and scientific studies are benefiting from the data [J]. Bioscience, 2010, 60(3): 172-175.
- [8] 竺可桢,宛敏渭. 物候学[M]. 长沙: 湖南教育出版社,1999.
- [9] 尹林江,周忠发,李韶慧,等. 基于无人机可见光影像对喀斯特地区植被信息提取与覆盖度研究[J]. 草地学报,2020,28(6): 1664-1672.

- [10] ZHANG X, FRIEDL M A, SCHAAF C B. Global vegetation phenology from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 111(G4): 367-375.
- [11] 项铭涛, 卫 炜, 吴文斌. 植被物候参数遥感提取研究进展评述[J]. *中国农业信息*, 2018, 30(1): 55-66.
- [12] 邵亚婷, 王卷乐, 严欣荣. 蒙古国植被物候特征及其对地理要素的响应[J]. *地理研究*, 2021, 40(11): 3029-3045.
- [13] ZHANG X. Reconstruction of a complete global time series of daily vegetation index trajectory from long-term AVHRR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 457-472.
- [14] 元志辉, 萨楚拉, 银山. 基于MODIS植被指数的浑善达克沙地植被物候变化[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5254-5263.
- [15] 王敏钰, 罗 毅, 张正阳, 等. 植被物候参数遥感提取与验证方法研究进展[J]. *遥感学报*, 2022, 26(3): 431-455.
- [16] 吴文斌, 杨 鹏, 唐华俊, 等. 基于NDVI数据的华北地区耕地物候空间格局[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 552-560.
- [17] WHITE M A, THORNTON P E, RUNNING S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(2): 217-234.
- [18] BERRA E F, GAULTON R, BARR S. Assessing spring phenology of a temperate woodland: A multiscale comparison of ground, unmanned aerial vehicle and Landsat satellite observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 223: 229-242.
- [19] VRIELING A, MERONI M, DARVISHZADEH R, et al. Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215: 517-529.
- [20] WINGATE L. Interpreting canopy development and physiology using a European phenology camera network at flux sites[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(10): 7979-8034.
- [21] 杨晓渊, 马 丽, 张中华, 等. 高寒草甸植物群落生长发育特征与气候因子的关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(9): 3689-3700.

(责任编辑: 石春林)