



基于物候相机归一化植被指数估算高寒草地植物地上生物量的季节动态

陈哲¹ 汪浩^{2*} 王金洲¹ 石慧瑾¹ 刘慧颖³ 贺金生^{1,2}

¹北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京大学生态中心, 北京 100871; ²兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000; ³华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241

摘要 准确评估地上生物量对优化草地资源管理和理解草地碳、水和能量平衡具有重要意义。该文通过近地遥感归一化植被指数(NDVI)构建最优经验模型, 对青藏高原高寒草地地上生物量进行估算。该文利用2018–2019年5–9月野外实测的地上生物量和植物冠层光谱仪(RapidSCAN)测定的 $NDVI_{RS}$ 数据, 构建了生长季不同时期地上生物量的估算模型; 并结合2018年NetCam物候相机测定的 $NDVI_{Cam}$ 时间序列数据, 实现地上生物量季节动态的模拟。主要结果: (1) $NDVI_{Cam}$ 、 $NDVI_{RS}$ 与地上生物量具有相似的单峰型季节变化格局, 但 $NDVI$ 峰值出现的时间(7月)较地上生物量(8月)更早; (2) 基于 $NDVI$ 的生物量估算最优经验模型在5、7和9月是幂函数, 在6和8月是二次多项式, 估算精度为0.29–0.77; (3) 基于 $NDVI_{Cam}$ 时间序列数据, 生长季不同时期建模($R^2 = 0.91$)较单一时期(9月)建模($R^2 = 0.49$)对地上生物量季节动态的估算更为准确。这些结果表明, 近地遥感是估算高寒草地植物地上生物量的有效手段, 开展季节性植物生长调查将有助于准确评估草地资源。

关键词 物候相机; 近地遥感; 归一化植被指数; 地上生物量; 高寒草地; 青藏高原

陈哲, 汪浩, 王金洲, 石慧瑾, 刘慧颖, 贺金生 (2021). 基于物候相机归一化植被指数估算高寒草地植物地上生物量的季节动态. 植物生态学报, 45, 487-495. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0076

Estimation on seasonal dynamics of alpine grassland aboveground biomass using phenology camera-derived NDVI

CHEN Zhe¹, WANG Hao^{2*}, WANG Jin-Zhou¹, SHI Hui-Jin¹, LIU Hui-Ying³, and HE Jin-Sheng^{1,2}

¹Institute of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China; ²State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; and ³School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract

Aims Accurate assessment of plant aboveground biomass is important for optimizing grassland resource management and for understanding the balance of carbon, water and energy fluxes in grassland ecosystems. This study constructed the optimal empirical models by near-surface remote sensing normalized difference vegetation index (NDVI) data, and then estimated plant aboveground biomass in an alpine grassland on the Qingzang Plateau.

Methods Using the dataset of both the field-measured aboveground biomass and the $NDVI_{RS}$ observed by plant canopy spectrometer (RapidSCAN), we constructed the empirical models for estimating aboveground biomass in different phases of the growing season across 2018 and 2019. Using the $NDVI_{Cam}$ time series observed by phenology camera and the estimated models, we simulated seasonal dynamics of aboveground biomass in 2018.

Important findings (1) The seasonal dynamics of $NDVI_{Cam}$, $NDVI_{RS}$ and aboveground biomass exhibited a similar unimodal pattern; however, the timing of peak $NDVI$ (August) preceded that of peak aboveground biomass (July). (2) The best model for estimating aboveground biomass is the power function in May, July and September, and the quadratic equation in June and August. The estimation accuracy ranged from 0.29 to 0.77. (3) The estimation of aboveground biomass based on the models in different phases of growing season ($R^2 = 0.91$) showed a higher accuracy compared to that based on the model at a single time (September) ($R^2 = 0.49$). Our results suggest that the near-surface remote sensing is an effective approach for estimating alpine grassland aboveground biomass, and further investigation on the seasonal growth of plants will help accurately evaluate grassland resources.

收稿日期Received: 2020-03-19 接受日期Accepted: 2020-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(31630009、31901168和31901145)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (31630009, 31901168 and 31901145).

* 通信作者Corresponding author (wanghao@lzu.edu.cn)

Key words phenology camera; near-surface remote sensing; normalized difference vegetation index (NDVI); aboveground biomass; alpine grassland; Qingzang Plateau

Chen Z, Wang H, Wang JZ, Shi HJ, Liu HY, He JS (2021). Estimation on seasonal dynamics of alpine grassland aboveground biomass using phenology camera-derived NDVI. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 487-495. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0076

植物地上生物量(AGB)通常指特定时刻单位面积上植物地上部分的干质量,对生态系统碳、水和能量的平衡有着重要作用(Scurlock *et al.*, 2002; Piao *et al.*, 2007)。同时,地上生物量影响着草地饲料供给,决定了草原的畜牧养殖承载力(Yahdjian & Sala, 2006)。因此,准确估算草地地上生物量对于评估草地生产力、优化草地资源管理以及维持草地生态系统稳定性等具有重要意义(Parton *et al.*, 1995; Liang *et al.*, 2016)。

野外收获法是测量草地地上生物量最为准确的方法,但费时、费力,且受到地形、交通等多种因素的限制,难以实现对生物量高频率、大范围的监测。随着科学技术的发展,卫星遥感因其观测覆盖范围广、空间连续且受地形限制小等特点(Xu *et al.*, 2013),越来越多被用于植物地上生物量的估算。遥感归一化植被指数(NDVI)能够有效反映植物绿度的年内和年际变化,在基于卫星遥感的地上生物量研究中被广泛应用(Huete *et al.*, 2002; Craine *et al.*, 2012; 刘帆等, 2018)。通常,基于NDVI的地上生物量估算法可分为物理模型和经验模型两类。物理模型主要借助植被二向性反射与生物量之间的关系估算地上生物量,但结构较为复杂,且估算精度偏低(Zhu & Liu, 2015)。相比之下,经验模型是通过NDVI和实测地上生物量数据建立函数关系来实现;该方法操作简单,在实际工作中较多使用(王维枫等, 2008)。

基于经验模型估算法的前人研究多使用生长季单一时期(一般不多于3个月)卫星遥感NDVI和实测地上生物量数据建立关系(金云翔等, 2011; 除多等, 2013a; Main-Knorn *et al.*, 2013; Jin *et al.*, 2014; 张旭琛等, 2015)。然而,已有研究表明,NDVI与地上生物量之间的关系在生长季内可能并不恒定。例如,在西藏高寒草地,地上生物量与NDVI在5月呈现为一元线性关系;在生长季其他月则呈现为指数函数关系,且函数参数随月份而变化(除多等, 2013b)。因此,仅使用单一时期数据构建经验模型对地上生物量季节动态的估算将会引起较大的不确定性,而基于生长季不同时期建模的估算可能更为准确。

此外,基于卫星NDVI的生物量估算受到大气条件和卫星观测时空分辨率的影响。前人研究发现,云和气溶胶会降低卫星遥感NDVI估算地上生物量的准确性(葛静等, 2017)。卫星影像因其空间分辨率低,对异质性较强的草地生物量估算能力有限(Piao *et al.*, 2019);另外,卫星遥感获取影像的时间间隔较长,难以实现生物量的实时估算(Jin *et al.*, 2014)。近年来,近地遥感如物候相机和手持式植物冠层光谱仪,能够连续地获取高时空分辨率的植被光谱信息(Petach *et al.*, 2014; Filippa *et al.*, 2018),且受大气条件影响较小(Sonnentag *et al.*, 2012; 周宇庭等, 2013),很大程度上弥补了卫星观测的不足,为植物地上生物量的准确实时估算提供了新手段。目前,北美和欧洲已经建立了物候相机观测网,用于中小尺度的植被生长监测(Wingate *et al.*, 2015; Klosterman *et al.*, 2018)。然而,物候相机在我国还处于起步阶段,较少被应用于植被生长研究。

青藏高原面积约为250万km²,平均海拔在4000 m以上,是世界上海拔最高、面积最大的高原,被称为“世界屋脊”“地球第三极”(Qiu, 2008)。高寒草地占据了青藏高原面积的60%,为当地畜牧业养殖提供了优质的牧草资源(Xu *et al.*, 2018)。近50年来,青藏高原年平均气温每10年上升0.3–0.4 °C,是全球同期平均升温速率的2倍左右(陈德亮等, 2015);降水格局也在发生改变,呈现北部增加、南部减少的趋势(Shen *et al.*, 2015)。如此快速的气候变化已经对青藏高原高寒草地植物的生长产生了巨大的影响(Xu *et al.*, 2018; 杨元合, 2018)。最新研究表明,气候变暖使高寒草地快速生长期提前开始,导致春季地上生物量生产增加;而土壤水分降低加速快速生长期结束,导致秋季地上生物量生产降低(Wang *et al.*, 2020)。因此,亟需建立遥感NDVI和地上生物量之间的最优模型,为气候变化背景下高寒草地上生物量变化的面上评估提供支持,这将有利于制定科学合理的高寒草地管理制度和保证当地畜牧业的可持续发展。本研究以青藏高原东北部的高寒草地为研究对象,基于2018–2019年物候相机和手持式光谱仪NDVI时间序列以及野外调查地上生物量

季节动态数据,以期评估近地遥感监测草地地上生物量季节变化的有效性,并通过构建经验模型,比较单一时期建模和生长季不同时期建模两种方法在草地地上生物量估算中的效率。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究样地位于青海海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站(简称海北站)。海北站地处青藏高原东北部、祁连山南麓,37.50°–37.75° N, 101.20°–101.38° E, 海拔3 200 m。在本研究的两年中(2018–2019年),海北站年平均气温为–1.1 °C,最冷月为1月(–15.1 °C),最暖月为8月(11.0 °C);年降水量为403.9 mm,且大约80%的降水集中于生长季(5–9月)(图1A)。样地植被类型为高寒草甸,常见物种包括垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、异针茅(*Stipa aliena*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、高山豆(*Tibetia himalaica*)、青藏扁蓿豆(*Medicago archiducis-nicolai*)、麻花苻(*Gentiana straminea*)、线叶龙胆(*Gentiana farreri*)、美丽风毛菊(*Saussurea pulchra*)和羊茅(*Festuca ovina*)等。

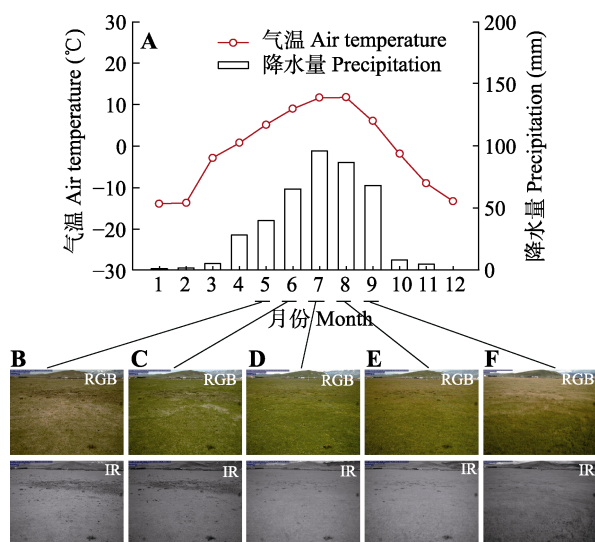


图1 海北站气温和降水的季节动态以及生长季各时期高寒草地植被生长状况。A, 2018和2019年的月平均气温和月降水量。B–F, 5–9月高寒草地植被生长的物候相机图像。NIR, 近红外图像; RGB, 红绿蓝图像。

Fig. 1 Seasonal dynamics of air temperature and precipitation, and the alpine grassland vegetation growth in different phases of the growing season at Haibei Station. **A**, Mean monthly air temperature and precipitation in 2018 and 2019. **B–F**, Pictures of plant growth from May to September as photographed by phenology camera. NIR, near-infrared images; RGB, red-green-blue images.

1.2 物候相机NDVI时间序列的获取

在2018年,采用NetCam SC物候相机(StarDot Technologies, California, USA)收集多光谱图像。物候相机安装于约3.0 m高的支架上;安装过程中最大程度固定相机,避免拍摄角度的变化。同时,为了避免周围物体的阴影进入,相机拍摄范围选择地势较为平坦且植被类型均一的区域。图像拍摄时间设置为8:00–18:00,拍摄频率为每小时一次。每次拍摄均获得红绿蓝(RGB)图像以及近红外(NIR)图像各一张(图1B–1F),以JPEG格式储存于数据采集器(CR6, Campbell Scientific, Utah, USA)中,全年共获取8 030幅图像。

使用Python 2.7软件,在图像中选择目标区域(ROI),并提取ROI中红光波段(R_{DN})以及近红外波段(NIR_{DN})的平均像元值(DN)用于计算物候相机NDVI ($NDVI_{Cam}$)。计算公式如下:

$$NDVI_{Cam} = \frac{NIR_{DN} - R_{DN}}{NIR_{DN} + R_{DN}} \quad (1)$$

为减少太阳高度角、光照条件以及露水等因素造成的影响,我们进一步分析了 $NDVI_{Cam}$ 的日动态。考虑到10:00–14:00的 $NDVI_{Cam}$ 最为稳定且达到最大值,本研究选取3 650幅该时间段的相机图像进行分析(图2A; Sonnentag *et al.*, 2012)。

1.3 植物地上生物量的测定

在2018和2019年分别开展高寒草地地上生物量的野外测定。在生长季(5–9月),每月对物候相机拍摄范围内的草地进行一至两次的地上生物量监测。每次监测先随机选取4个大样方(5 m × 5 m),并在每个大样方内设置5个小样方(0.5 m × 0.5 m);然后,用RapidSCAN CS-45手持植物冠层光谱仪(Holland Scientific, Nebraska, USA)获取每个小样方内植物的NDVI ($NDVI_{RS}$),并收获植物地上绿色部分。植物样品在65 °C恒温下烘干48 h至恒质量,随后称质量获得地上生物量。在本研究的两年间,每次测定15–20个小样方,共计270个样本数据。

1.4 经验模型的构建及精度验证

本研究在生长季(5–9月)中每个月分别构建以 $NDVI_{RS}$ 为自变量的生物量估算经验模型;模型类别包括回归模型、对数函数模型、幂函数模型、指数函数模型和多项式模型。实际操作中,先随机选取2/3的样方数据用于构建模型,剩下的样方数据用于模型的精度检验。本研究中,最优模型的选择基

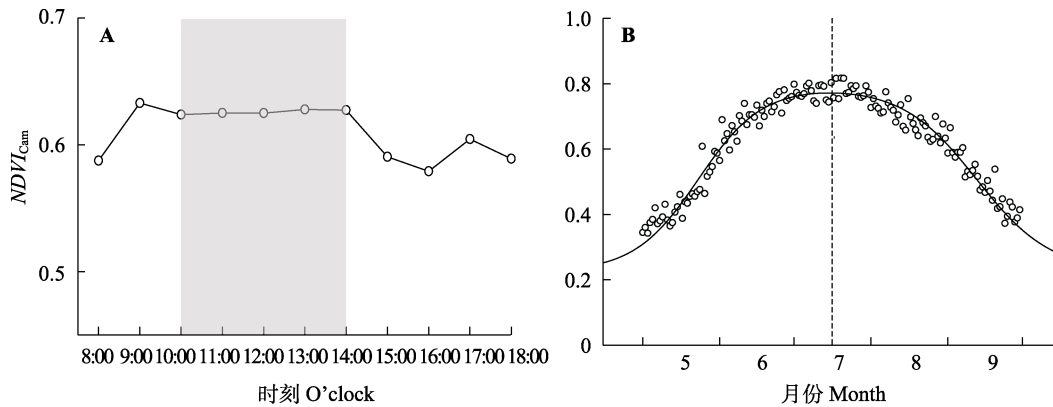


图2 海北站2018年5-9月物候相机归一化植被指数($NDVI_{Cam}$)的平均日动态(A)和季节动态(B)。A中阴影部分表示10:00-14:00物候相机的 $NDVI$ 最为稳定。

Fig. 2 Diurnal (A) and seasonal patterns (B) of normalized difference of vegetation index measured by NetCam ($NDVI_{Cam}$) from May to September in 2018 at Haibei Station. The shaded part in A indicates that the $NDVI$ of the phenology camera from 10:00-14:00 is the most stable.

于以下3个统计指标: 复相关系数(R^2)、均方根误差($RMSE$)和相对均方根误差($RMSE_r$)。其中, $RMSE$ 和 $RMSE_r$ 的计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSE_r = \frac{RMSE}{\bar{y}_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中, y_i 为实测草地上生物量, \hat{y}_i 为模型估算的地上生物量, n 为样本数量, \bar{y}_i 为实测地上生物量的平均值。 $RMSE$ 越小, 表明估算模型拟合效果越好; $RMSE_r$ 越小, 表示估算结果越接近真实值。

1.5 植物地上生物量季节动态的曲线拟合

基于物候相机 $NDVI_{Cam}$ 时间序列和最优经验模型, 本研究实现高寒草地上生物量的季节动态估算。考虑到植物在春季和秋季生长上的非对称性(Beck *et al.*, 2006; Busetto *et al.*, 2010), 采用双参数逻辑斯蒂函数对估算生物量的季节动态进行拟合。双逻辑斯蒂函数如下:

$$AGB(t) = AGB_{min} + (AGB_{max} - AGB_{min}) \times \left(\frac{1}{1 + e^{-mS \times (t-S)}} + \frac{1}{1 + e^{-mA \times (t-A)}} - 1 \right) \quad (4)$$

式中, $AGB(t)$ 是一年中 t 时间的地上生物量; AGB_{max} 和 AGB_{min} 分别是每年地上生物量的最大值和最小值; mS 和 mA 分别表示生长季中期的最大增长速率和生长季后期的最大降低速率; S 和 A 分别表示最大生长速率和最大降低速率发生的时间。本研究中, 使用SPSS 20.0软件实现统计分析, 通过SigmaPlot 14.0软件完成制图。

2 结果和分析

2.1 高寒草地上生物量与 $NDVI$ 的季节变化

研究表明, 高寒草地 $NDVI_{Cam}$ 、 $NDVI_{RS}$ 和地上生物量具有相似的单峰季节变化格局, 但 $NDVI$ 和地上生物量达到峰值的时间不同(图2B, 图3)。

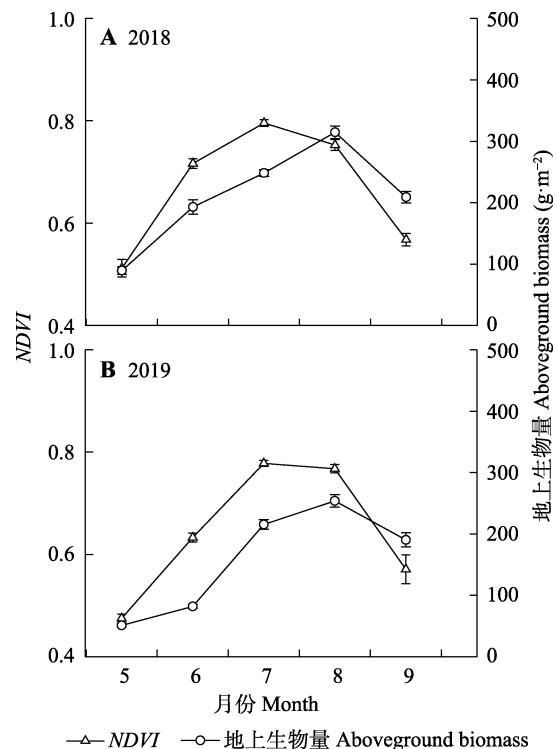


图3 海北站2018 (A)和2019年(B)生长季高寒草地手持式植物冠层光谱仪测量的归一化植被指数($NDVI$)与地上生物量的变化(平均值 \pm 标准误)。

Fig. 3 Dynamics of the normalized difference of vegetation index ($NDVI$) measured by RapidSCAN and aboveground biomass (mean \pm SE) of alpine grassland in the growing seasons of 2018 (A) and 2019 (B) at Haibei Station.

$NDVI_{Cam}$ 和 $NDVI_{RS}$ 均在7月达到峰值, 而地上生物量在8月达到峰值。相关性分析结果表明, 生长季不同月份 $NDVI_{RS}$ 与地上生物量之间均呈显著正相关关系($p < 0.05$); 并且, 除8月外, 其余月份的相关系数均高于0.6 (表1)。

2.2 高寒草地地上生物量与 $NDVI$ 之间的经验模型构建

在2018和2019年5–9月, 分别构建了 $NDVI_{RS}$ 与

表1 生长季不同月份高寒草地手持式植物冠层光谱仪测量的归一化植被指数与地上生物量之间的相关性

Table 1 Pearson correlation coefficients between normalized difference of vegetation index measured by RapidSCAN and aboveground biomass of alpine grassland in different months of the growing season

月份 Month	样本数 No. of samples	r	P
5	56	0.80	<0.001
6	34	0.88	<0.001
7	64	0.67	<0.001
8	51	0.31	0.03
9	63	0.78	<0.001

表2 2018和2019年生长季高寒草地手持式植物冠层光谱仪测量的归一化植被指数($NDVI_{RS}(x)$)与地上生物量(y)之间的经验模型构建

Table 2 Fitted regression equations between normalized difference of vegetation index measured by RapidSCAN ($NDVI_{RS}(x)$) and aboveground biomass (y) of alpine grassland across the growing seasons of 2018 and 2019

月份 Month	模型 Model	回归方程 Regression equation	R^2	$RMSE$	$RMSE_r$ (%)
5月 May ($n = 56$)	线性 Linear	$y = 397.3x - 130.6$	0.67	13.62	25.38
	对数 Logarithm	$y = 186.0\ln(x) + 198.3$	0.65	14.32	26.68
	指数 Exponent	$y = 2.0e^{6.9x}$	0.65	13.03	24.28
	乘幂 Power	$y = 615.1x^{3.3}$	0.67	12.45	23.19
	多项式 Quadratic	$y = 491.7x^2 - 83.7x - 14.7$	0.65	12.88	24.00
6月 June ($n = 34$)	线性 Linear	$y = 1080.5x - 595.7$	0.75	24.99	21.12
	对数 Logarithm	$y = 730.4\ln(x) + 423.1$	0.73	26.82	22.66
	指数 Exponent	$y = 0.7e^{7.7x}$	0.74	22.25	18.80
	乘幂 Power	$y = 939.7x^{5.2}$	0.74	21.95	18.55
	多项式 Quadratic	$y = 3363.7x^2 - 3537.5x + 979.2$	0.77	20.04	16.94
7月 July ($n = 64$)	线性 Linear	$y = 952.0x - 508.5$	0.72	39.94	18.54
	对数 Logarithm	$y = 730.2\ln(x) + 416.7$	0.71	40.35	18.73
	指数 Exponent	$y = 8.4e^{4.2x}$	0.73	38.00	17.64
	乘幂 Power	$y = 517.6x^{3.3}$	0.73	37.65	17.48
	多项式 Quadratic	$y = 1422.3x^2 - 1248.1x + 339.51$	0.72	38.95	18.08
8月 August ($n = 51$)	线性 Linear	$y = 532.0x - 105.1$	0.18	38.72	13.43
	对数 Logarithm	$y = 375.4\ln(x) + 403.0$	0.16	39.01	13.53
	指数 Exponent	$y = 81.9e^{1.7x}$	0.16	34.73	12.04
	乘幂 Power	$y = 402.3x^{1.2}$	0.14	35.28	12.23
	多项式 Quadratic	$y = 5968.0x^2 - 8287.3x + 3134.3$	0.29	31.70	10.99
9月 September ($n = 63$)	线性 Linear	$y = 507.3x - 85.5$	0.61	38.17	19.30
	对数 Logarithm	$y = 292.5\ln(x) + 371.7$	0.61	38.18	19.31
	指数 Exponent	$y = 48.0e^{2.5x}$	0.62	37.92	19.18
	乘幂 Power	$y = 448.2x^{1.4}$	0.63	37.68	19.06
	多项式 Quadratic	$y = -48.0x^2 + 563.9x - 101.8$	0.61	37.87	19.15

n , 样本量。加粗项是生长季各月份的最优拟合模型。 $RMSE$, 均方根误差; $RMSE_r$, 相对均方根误差。

n , sample size. The bold parts are the optimal models in different months of the growing season. $RMSE$, root mean square error; $RMSE_r$, relative root mean square error.

DOI: 10.17521/cjpe.2020.0076

季节格局一致, 均呈现为单峰型(图4)。通过双参数逻辑斯蒂函数拟合发现, 两种方法的估算生物量到达峰值的时间不同。其中, 生长季不同时期建模下估算生物量的峰值时间为第215天(8月3日)(图4A), 而单一时期建模下估算生物量的峰值时间为第193天(7月12日)(图4B)。以2018年实测最大地上生物量的时间(8月, 图3)为准, 生长季不同时期建模的估算生物量峰值时间较单一时期建模更为准确。

与此同时, 图5显示, 生长季不同时期建模的估算生物量与2018年各月实测生物量值的散点图大致分布在1:1线附近, 回归方程斜率为1.12, 估算值与实测值之间的复相关系数(R^2)为0.91 (图5A); 相比之下, 单一时期建模的估算生物量与实测值的散点图斜率为0.82, R^2 为0.49 (图5B)。这些结果均表明, 较之与单一时期建模, 生长季不同时期建模方法对

高寒草地地上生物量的估算更为有效。

3 讨论

本研究基于 $NDVI_{Cam}$ 和 $NDVI_{RS}$ 时间序列数据, 结合野外测定地上生物量季节动态, 发现: (1) $NDVI_{RS}$ 能够较好地捕捉高寒草地地上生物量的季节动态, 但 $NDVI$ 峰值时间较地上生物量峰值时间更早; (2) $NDVI_{Cam}$ 有助于高寒草地地上生物量季节动态的准确估算; (3) 生长季不同时期建模比单一时期建模具有更高的地上生物量估算精度。

3.1 近地遥感能够有效捕捉地上生物量的季节动态

研究发现, 高寒草地 $NDVI_{RS}$ 与地上生物量在生长季期间均呈现相似的单峰变化格局。这一结果表明近地遥感 $NDVI$ 能够有效捕捉高寒草地植被生长的季节动态。我们发现的单峰型植被生长格局与其

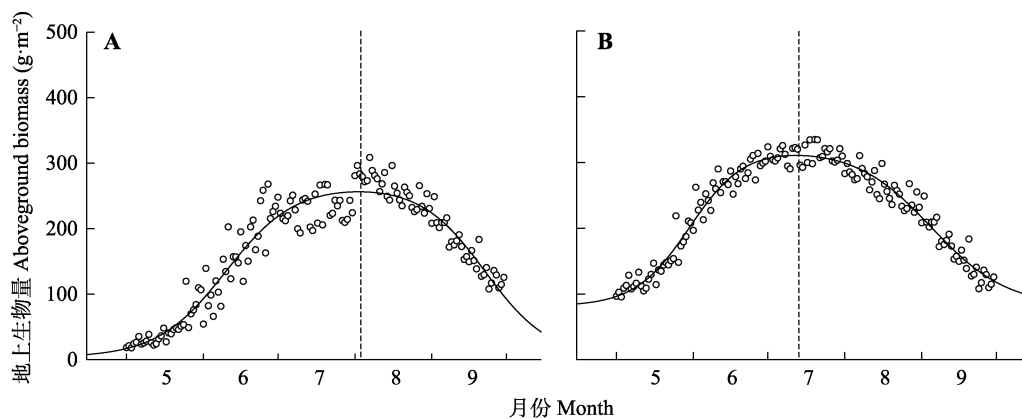


图4 基于物候相机归一化植被指数时间序列数据, 利用生长季不同阶段建模(A)和单一时期(9月)建模(B)分别估算2018年高寒草地生物量的季节动态。

Fig. 4 Seasonal dynamics of alpine grassland biomass estimated by the normalized difference of vegetation index measured by NetCam time series and the models in different phases of growing season (A) and at a single time (September)(B) in 2018.

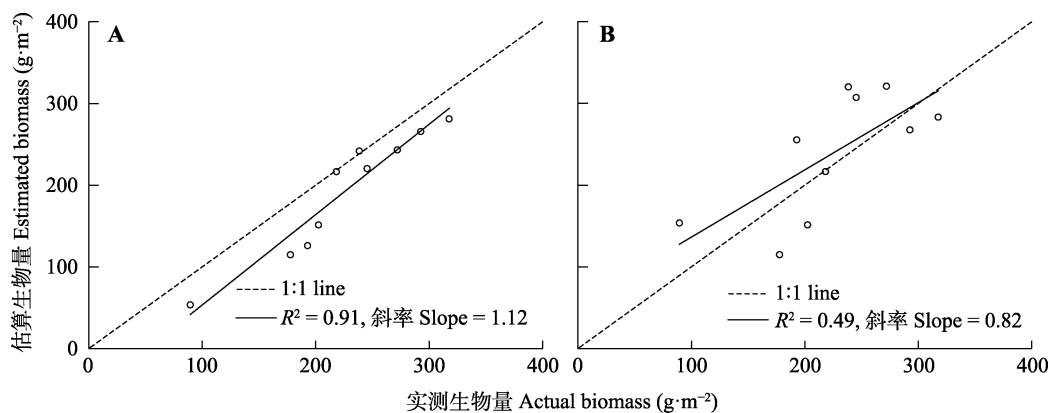


图5 生长季不同时期建模(A)和单一时期(9月)建模(B)下高寒草地上生物量的估算精度。实测生物量值是2018年生长季每次野外测定生物量的平均值($n = 10$); 估算生物量值通过最优经验拟合模型和物候相机归一化植被指数计算获得。

Fig. 5 Estimation of alpine grassland aboveground biomass using models in different phases of growing season (A) and at a single time (September)(B). The actual biomass is the averaged biomass for each measurement during the growing season of 2018 ($n = 10$). The estimated biomass is calculated by the optimal model and normalized difference of vegetation index measured by NetCam.

他高寒地区研究结果(杨淑霞等, 2018)基本相同, 这主要是由于高原季风性气候所致(刘艾和刘德福, 2005)。然而, 本研究进一步发现地上生物量相比于 $NDVI_{RS}$ 更晚达到最大值, 即 $NDVI$ 在7月达到峰值, 而地上生物量峰值发生在8月。这一现象可能与两方面原因有关。第一, $NDVI$ 在7月的植物冠层密度较高时产生饱和现象(杨嘉等, 2008), 导致比生物量更早达到峰值。通常, 在生长季前期植被盖度较低时, 随植物生长, 红光波段反射持续减弱, 近红外波段反射持续增强, $NDVI$ 随之呈现持续增长的趋势。然而, 当生长季中期植被盖度较高时, 叶绿素对红光波段的吸收达到饱和, 仅近红外波段的反射率随着植物的生长继续升高, 从而导致 $NDVI$ 增加速率随着地上绿色生物量的增加而减缓, 呈现饱和现象(王正兴等, 2003)。第二, $NDVI$ 更多反映了植物光合活性的季节变化, 这与群落尺度上叶片生物量和叶片氮含量直接相关。最新研究表明, 杂类草具有较大的叶面积和更高的叶片氮含量, 且生长速率达到峰值的时间比禾本科植物更早(He *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2020)。因此, 较早的杂类草生长峰值时间可能导致了较早的 $NDVI$ 峰值时间, 而较晚的禾本科植物生长导致生物量达到峰值时间更晚。

3.2 物候相机对地上生物量季节动态估算的实现

本研究结果表明, $NDVI_{Cam}$ 具有明显的日动态变化, 其在10:00–14:00达到峰值, 且数值最为稳定, 能够有效反映高寒草地植物生物量的季节动态。相比之下, 卫星遥感合成 $NDVI$ 的时间分辨率通常在8–30天(范德芹等, 2016; Zhang *et al.*, 2016), 且卫星过境很难保证出现在植物光合作用达到日最大值时段内。因此, 物候相机能够有效弥补卫星遥感 $NDVI$ 低时间分辨率的缺陷, 实现对植物生长过程的高频率监测。此外, 本研究结果也显示, 物候相机 $NDVI_{Cam}$ 在2018年生长季中基本没有出现异常值(图2B), 这表明物候相机能够在高寒地区实现植被光谱信息变化的高质量监测。然而, 大量研究表明, 卫星遥感 $NDVI$ 时间序列易受云层覆盖、大气气溶胶等因素影响, 常常存在大量噪声(陈效速和王林海, 2009); 即使经过复杂的数据预处理过程, $NDVI$ 的噪声也难以完全消除, 这在很大程度上影响了卫星遥感植被生长监测的准确性(夏传福等, 2013)。所以, “高空-近地”遥感结合是实现大范围、高频率、高质量植被生长过程监测的重要手段。

3.3 生长季不同时期建模较单一时期建模具有更高的地上生物量估算精度

本研究评估了生长季不同时期建模和单一时期建模估算得到的地上生物量结果, 发现基于生长季不同时期建模的估算效率更高。这可能是由于生长季各时期不同水热条件导致 $NDVI$ 与地上生物量的关系发生改变所致。在本研究观测的两年中, 生长季不同时期表现出不同的最优模型, 并且在不同时期的模型参数也呈现出明显变化。相比于单一时期模型的固定参数, 不同时期模型以及模型参数的变化能够包含更多的植物生长过程信息(除多等, 2013b; Zhu & Liu, 2015), 因此能够较好地反映生长季各个时期 $NDVI$ 与地上生物量之间的关系。这一研究表明, 传统使用的单一时期模型在高寒草地植物地上生物量的估算中可能引入较大误差。未来的高寒草地地上生物量估算研究应该注重地上生物量和 $NDVI$ 的季节动态变化, 构建更为准确的生长季不同时期经验模型。

4 总结

基于近地遥感(物候相机和手持式光谱仪)和野外调查数据, 本研究发现近地遥感能够有效用于高寒草地地上生物量的估算, 且能够提供高频率、高质量的植被生长信息。因此, 建立“地面-近地遥感-卫星遥感”的立体观测结构将有助于地上生物量季节动态的准确估算。另外, 本研究也发现较之于单一时期建模, 生长季不同时期建模能够有效提高地上生物量季节动态的估算效率。因此, 未来的研究应该关注不同季节的时间序列数据, 从而实现提高生物量动态估算的准确性。本研究结果将为准确评估高寒草地生产力提供理论基础, 有助于草地资源的科学利用和农牧区生态建设与环境保护管理。

参考文献

- Beck PSA, Atzberger C, Arild Høgda K, Johansen B, Skidmore AK (2006). Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 100, 321-334.
- Busetto L, Colombo R, Migliavacca M, Cremonese E, Meroni M, Galvagno M, Rossini M, Siniscalco C, Morra Di Cella U, Pari E (2010). Remote sensing of larch phenological cycle and analysis of relationships with climate in the Alpine region. *Global Change Biology*, 16, 2504-2517.
- Chen DL, Xu BQ, Yao TD, Guo ZT, Cui P, Chen FH, Zhang

DOI: 10.17521/cjpe.2020.0076

- RH, Zhang XZ, Zhang YL (2015). Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 60, 3023-3035. [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 郭正堂, 崔鹏, 陈发虎, 张人禾, 张宪洲, 张镔锂 (2015). 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. *科学通报*, 60, 3023-3035.]
- Chen XQ, Wang LH (2009). Progress in remote sensing phenological research. *Progress in Geography*, 28, 33-40. [陈效逯, 王林海 (2009). 遥感物候学研究进展. *地理科学进展*, 28, 33-40.]
- Chu D, Deji YZ, Pubu CR, Ji QM, Tang H (2013a). Above-ground biomass in the North Tibet and estimate model using remote sensing data. *Journal of Natural Resources*, 28, 2000-2011. [除多, 德吉央宗, 普布次仁, 姬秋梅, 唐洪 (2013a). 藏北草地地上生物量及遥感监测模型研究. *自然资源学报*, 28, 2000-2011.]
- Chu D, Pubu CR, Deji YZ, Ji QM, Tang H (2013b). Above-ground biomass estimate methods of grassland in the Central Tibet. *Journal of Mountain Science*, 31, 664-671. [除多, 普布次仁, 德吉央宗, 姬秋梅, 唐洪 (2013b). 西藏高原中部草地地上生物量遥感估算方法. *山地学报*, 31, 664-671.]
- Craine JM, Nippert JB, Elmore AJ, Skibbe AM, Hutchinson SL, Brunsell NA (2012). Timing of climate variability and grassland productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 3401-3405.
- Fan DQ, Zhao XS, Zhu WQ, Zheng ZT (2016). Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data. *Progress in Geography*, 35, 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. *地理科学进展*, 35, 304-319.]
- Filippa G, Cremonese E, Migliavacca M, Galvagno M, Sonnentag O, Humphreys E, Hufkens K, Ryu Y, Verfaillie J, Morra di Cella U, Richardson AD (2018). NDVI derived from near-infrared-enabled digital cameras: applicability across different plant functional types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 275-285.
- Ge J, Meng BP, Yang SX, Gao JL, Yin JP, Zhang RP, Feng QS, Liang TG (2017). Monitoring of above-ground biomass in alpine grassland based on agricultural digital camera and MODIS remote sensing data: a case study in the Yellow River Headwater Region. *Acta Prataculturae Sinica*, 26, 23-34. [葛静, 孟宝平, 杨淑霞, 高金龙, 殷建鹏, 张仁平, 冯琦胜, 梁天刚 (2017). 基于ADC和MODIS遥感数据的高寒草地地上生物量监测研究——以黄河源区为例. *草业学报*, 26, 23-34.]
- He JS, Wang Z, Wang X, Schmid B, Zuo W, Zhou M, Zheng C, Wang M, Fang J (2006). A test of the generality of leaf trait relationships on the Tibetan Plateau. *New Phytologist*, 170, 835-848.
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213.
- Jin Y, Yang X, Qiu J, Li J, Gao T, Wu Q, Zhao F, Ma H, Yu H, Xu B (2014). Remote sensing-based biomass estimation and its spatio-temporal variations in temperate grassland, northern China. *Remote Sensing*, 6, 1496-1513.
- Jin YX, Xu B, Yang XC, Li JY, Wang DL, Ma HL (2011). Remote sensing dynamic estimation of grass production in Xilinguole, Inner Mongolia. *Scientia Sinica Vitae*, 41, 1185-1195. [金云翔, 徐斌, 杨秀春, 李金亚, 王道龙, 马海龙 (2011). 内蒙古锡林郭勒盟草原产草量动态遥感估算. *中国科学: 生命科学*, 41, 1185-1195.]
- Klosterman S, Hufkens K, Richardson AD (2018). Later springs green-up faster: the relation between onset and completion of green-up in deciduous forests of North America. *International Journal of Biometeorology*, 62, 1645-1655.
- Liang TG, Yang SX, Feng QS, Liu BK, Zhang RP, Huang XD, Xie HJ (2016). Multi-factor modeling of above-ground biomass in alpine grassland: a case study in the Three-River Headwaters Region, China. *Remote Sensing of Environment*, 186, 164-172.
- Liu A, Liu DF (2005). A review of grassland biomass research in China. *Inner Mongolia Prataculture*, 17, 7-11. [刘艾, 刘德福 (2005). 我国草地生物量研究概述. *内蒙古草业*, 17, 7-11.]
- Liu F, Wang CK, Wang XC (2018). Application of near-surface remote sensing in monitoring the dynamics of forest canopy phenology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29, 1768-1778. [刘帆, 王传宽, 王兴昌 (2018). 近地遥感在森林冠层物候动态监测中的应用. *应用生态学报*, 29, 1768-1778.]
- Main-Knorn M, Cohen WB, Kennedy RE, Grodzki W, Pflugmacher D, Griffiths P, Hostert P (2013). Monitoring coniferous forest biomass change using a Landsat trajectory-based approach. *Remote Sensing of Environment*, 139, 277-290.
- Parton WJ, Scurlock JMO, Ojima DS, Schimel DS, Hall DO, Scopegram Group Members (1995). Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. *Global Change Biology*, 1, 13-22.
- Petach AR, Toomey M, Aubrecht DM, Richardson AD (2014). Monitoring vegetation phenology using an infrared-enabled security camera. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195-196, 143-151.
- Piao S, Fang J, Zhou L, Tan K, Tao S (2007). Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB2002. DOI: 10.1029/2005GB002634.
- Piao SL, Liu Q, Chen AP, Janssens IA, Fu YS, Dai JH, Liu LL,

- Lian X, Shen MG, Zhu XL (2019). Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25, 1922-1940.
- Qiu J (2008). China: the third pole. *Nature*, 454, 393-396.
- Scurlock JMO, Johnson K, Olson RJ (2002). Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 8, 736-753.
- Shen M, Piao S, Dorji T, Liu Q, Cong N, Chen X, An S, Wang S, Wang T, Zhang G (2015). Plant phenological responses to climate change on the Tibetan Plateau: research status and challenges. *National Science Review*, 2, 454-467.
- Sonnentag O, Hufkens K, Teshera-Sterne C, Young AM, Friedl M, Braswell BH, Milliman T, O'Keefe J, Richardson AD (2012). Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 159-177.
- Wang H, Liu H, Cao G, Ma Z, Li Y, Zhang F, Zhao X, Zhao X, Zhao X, Jiang L, Sanders NJ, Classen AT, He JS (2020). Alpine grassland plants grow earlier and faster but biomass remains unchanged over 35 years of climate change. *Ecology Letters*, 23, 701-710.
- Wang WF, Lei YC, Wang XF, Zhao HY (2008). A review of forest biomass models. *Journal of Northwest Forestry University*, 23, 58-63. [王维枫, 雷渊才, 王雪峰, 赵浩彦 (2008). 森林生物量模型综述. 西北林学院学报, 23, 58-63.]
- Wang ZX, Liu C, Huete A (2003). From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 979-987. [王正兴, 刘闯, Huete A (2003). 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. 生态学报, 23, 979-987.]
- Wingate L, Ogée J, Cremonese E, Filippa G, Mizunuma T, Migliavacca M, Moisy C, Wilkinson M, Moureaux C, Wohlfahrt G, Hammerle A, Hörtnagl L, Gimeno C, Porcar-Castell A, Galvagno M, *et al.* (2015). Interpreting canopy development and physiology using a European phenology camera network at flux sites. *Biogeosciences*, 12, 5995-6015.
- Xia CF, Li J, Liu QH (2013). Review of advances in vegetation phenology monitoring by remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 17, 1-16. [夏传福, 李静, 柳钦火 (2013). 植被物候遥感监测研究进展. 遥感学报, 17, 1-16.]
- Xu B, Yang XC, Tao WG, Miao JM, Yang Z, Liu HQ, Jin YX, Zhu XH, Qin ZH, Lv HY, Li JY (2013). MODIS-based remote-sensing monitoring of the spatiotemporal patterns of China's grassland vegetation growth. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 3867-3878.
- Xu W, Zhu MY, Zhang Z, Ma ZZ, Liu HH, Chen LT, Cao GM, Zhao XQ, Schmid B, He JS (2018). Experimentally simulating warmer and wetter climate additively improves rangeland quality on the Tibetan Plateau. *Journal of Applied Ecology*, 55, 1486-1497.
- Yahdjian L, Sala OE (2006). Vegetation structure constrains primary production response to water availability in the Patagonian Steppe. *Ecology*, 87, 952-962.
- Yang J, Guo N, Huang LN, Jia JH (2008). Analyses on MODIS-NDVI index saturation in northwest China. *Plateau Meteorology*, 27(4), 198-205. [杨嘉, 郭妮, 黄蕾诺, 贾建华 (2008). 西北地区MODIS-NDVI指数饱和问题分析. 高原气象, 27(4), 198-205.]
- Yang SX, Feng QS, Meng BP, Gao JL, Ge J, Liang TG (2018). Temporal and spatial dynamics of alpine grassland biomass in the Three-River Headwater Region. *Pratacultural Science*, 35, 956-968. [杨淑霞, 冯琦胜, 孟宝平, 高金龙, 葛静, 梁天刚 (2018). 三江源地区高寒草地地上生物量时空动态变化. 草业科学, 35, 956-968.]
- Yang YH (2018). Ecological processes in alpine ecosystems under changing environment. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 1-5. [杨元合 (2018). 全球变化背景下的高寒生态过程. 植物生态学报, 42, 1-5.]
- Zhang B, Zhang L, Xie D, Yin X, Liu C, Liu G (2016). Application of synthetic NDVI time series blended from Landsat and MODIS data for grassland biomass estimation. *Remote Sensing*, 8, 10. DOI: 10.3390/rs8010010.
- Zhang XC, Zhu HZ, Zhong HP, Cheng YD, Jin GL, Shao XM (2015). Assessment of above-ground biomass of grassland using remote sensing, Yili, Xinjiang. *Acta Pratacultural Sinica*, (6), 25-34. [张旭琛, 朱华忠, 钟华平, 程耀东, 靳瑰丽, 邵小明 (2015). 新疆伊犁地区草地植被地上生物量遥感反演. 草业学报, (6), 25-34.]
- Zhou YT, Fu G, Shen ZX, Zhang XZ, Wu JS, Li YL, Yang PW (2013). Estimation model of aboveground biomass in the Northern Tibet Plateau based on remote sensing date. *Acta Pratacultural Sinica*, 22, 120-129. [周宇庭, 付刚, 沈振西, 张宪洲, 武建双, 李云龙, 杨鹏万 (2013). 藏北典型高寒草甸地上生物量的遥感估算模型. 草业学报, 22, 120-129.]
- Zhu X, Liu D (2015). Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 222-231.

责任编辑: 罗天祥 编辑: 赵航