

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0046

宋清洁,崔霞,张瑶瑶,孟宝平,高金龙,向宇轩.基于小型无人机与 MODIS 数据的草地植被覆盖度研究——以甘南州为例.草业科学,2017,34(1):40-50.

Song Q J, Cui X, Zhang Y Y, Meng B P, Gao J L, Xiang Y X. Grassland fractional vegetation cover analysis using small UAVs and MODIS——A case study in Gannan Prefecture. Pratacultural Science, 2017, 34(1): 40-50.

基于小型无人机与 MODIS 数据的 草地植被覆盖度研究

——以甘南州为例

宋清洁¹, 崔霞¹, 张瑶瑶¹, 孟宝平², 高金龙², 向宇轩³

(1.兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室,甘肃 兰州 730000; 2.草地农业生态系统国家重点实验室,兰州大学草地农业科技学院,甘肃 兰州 730020; 3.兰州大学资源环境学院,甘肃 兰州 730000)

摘要:以甘南州为研究区,采用 Canon 数码相机和小型无人机搭载相机在不同大小样方上获取草地植被覆盖度数码照片,结合 2015 年 5 月—10 月的 Terra/MODIS 植被指数产品 MOD13Q1,分析了增强型植被指数(EVI)和归一化植被指数(NDVI)与草地植被覆盖度之间的相关性,建立了研究区草地植被覆盖度的回归模型,并对模型进行了精度评价,筛选出甘南州草地植被覆盖度最优遥感反演模型,并对草地生长季时期覆盖度时空上的动态特征进行分析。结果表明,1)利用小型无人机搭载相机获取草地大样方植被数码照片的方法能用于地面草地覆盖度数据的获取;2)与 NDVI 相比,用 EVI 估算草地覆盖度更优,因此确定基于 EVI 构建的对数模型为甘南州草地植被覆盖度最优反演模型,模型精度可达 88.00%;3)研究区 2015 年生长季草地植被覆盖度除了低平地草甸在 8 月达到最大值外,其它草地类型均在 7 月达到最大值;4)甘南州以中高植被覆盖度为主,主要分布在玛曲、碌曲、夏河以及合作四县市。整体而言,中西部和西南部区域草地覆盖度高于东部。通过精确草地植被覆盖度模型的建立,不仅有利于及时准确的了解草地植被覆盖度的时空分布状况和季节性动态变化,也有利于维护甘南州草地生态系统的持续稳定发展。

关键词:Terra/MODIS;NDVI;EVI;相关性分析;遥感反演模型;精度评价;草地覆盖度动态分析

中图分类号:S812-05;S127 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0629(2017)1-0040-11*

Grassland fractional vegetation cover analysis using small UAVs and MODIS ——A case study in Gannan Prefecture

Song Qing-jie¹, Cui Xia¹, Zhang Yao-yao¹, Meng Bao-ping², Gao Jin-long², Xiang Yu-xuan³

(1.Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2.State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 3.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Gannan Prefecture was selected as the study area. Photos of different sized subplots of grasslands were taken with a camera (Canon) and small UAVs (unmanned aerial vehicles). Terra/MODIS MOD13Q1 vegetation indices were obtained from May to October 2015. Correlation analyses were conducted between vegetation indices [enhanced vegetation index (EVI), normalized difference vegetation index (NDVI)] and grass-

* 收稿日期:2016-01-22 接受日期:2016-04-05

基金项目:兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(lzujbky-2015-140);国家自然科学基金项目(41401472,31372367);兰州大学地理学基地科研训练及科研能力提高项目(J1210065)

第一作者:宋清洁(1992-),女,河南睢县人,在读硕士生,主要从事草地遥感研究。E-mail:songqj15@lzu.edu.cn

通信作者:崔霞(1984-),女,甘肃民勤人,讲师,博士,主要从事环境遥感应用研究。E-mail:xiacui@lzu.edu.cn

<http://cykx.lzu.edu.cn>

land fractional vegetation cover (FVC), and regression models were determined. Based on the accuracy of different regression models, the best estimation model for grassland FVC in Gannan Prefecture was selected, and grassland spatio-temporal characteristics of FVC during the growing season were analysed. The results showed that 1) small UAVs carrying cameras could be used to obtain digital photos containing data on grassland FVC; 2) EVI was more correlated with grassland FVC than NDVI, and the logarithmic model based on EVI was the most suitable model for monitoring grassland FVC in Gannan Prefecture, with model accuracy reaching 88.00%; 3) grassland FVC of flat meadows in 2015 reached the maximum in August, and the remaining grassland types reached the maximum in July; 4) grasslands in Gannan Prefecture were dominated by high and mid-grassland FVC levels, and these grasslands were mainly distributed in Maqu County, Luqu County, and Xiahe County and Hezuo City. Overall, the grassland FVC in the mid-western and south-western areas was better than that in the eastern area. Establishment of the best model for grassland FVC was beneficial not only in elucidating the spatio-temporal distribution and seasonal dynamic variation of grassland FVC, but also to the maintenance of stable development of grassland ecosystems in Gannan Prefecture.

Key words: Terra/MODIS; NDVI; EVI; correlation analysis; remote sensing inversion model; accuracy assessment; dynamic analysis of grassland fractional vegetation cover

Corresponding author: Cui Xia E-mail: xiacui@lzu.edu.cn

草地是陆地生态系统的重要组成部分^[1],具有水源涵养、水土保持和气候调节等重要功能,也是畜牧业的经济支柱^[2]。描述草地的生物物理参数主要有植被类型、盖度、生物量、反照率、粗糙度、叶面积指数等^[3-4],其中植被盖度是指样地中地上部分的全部植物个体(包括叶、茎、枝等)的垂直投影面积占样地总面积的百分比^[5-6],是表征生态系统植被群落生长状况及生态环境质量的重要参数,其值大小能直接反映出一个地区的生态状况^[7]。所以,精准草地盖度遥感模型的建立,不但能及时准确地掌握草地植被覆盖度的时空分布状况和季节性动态变化规律,而且有利于维护草地生态系统的持续稳定发展。

目前,对于草地植被覆盖度的估测主要有两种方法^[8]:地面测量法和遥感反演法。地面测量法主要包括拍照法、采样法、仪器法和目估法等^[9]。地面观测方法往往受到不同研究区空间异质性的影响,若扩展到整个区域有一定的难度,并且受人为因素影响大,对于草地植被覆盖度的大范围精确估测较难。可是此法有较高精度的样方尺度,因此经常将此法用来作为遥感反演的地面验证数据。遥感技术具有监测范围广、空间连续、周期短、受地面条件限制少、信息量大、资源消耗少等特点,有利于快速获取大区域草地植被覆盖度信息^[10]。在草地植被覆盖度的遥感研究方面,早期多用 NOAA/AVHRR (advanced very high resolution radiometer) 遥感资料进行研究^[11-13],随着 1999 年 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiom-

eter) 卫星的发射成功,MODIS 数据在土地覆盖、冰雪变化、监测荒漠化程度以及植被盖度等领域应用广泛^[14-20],利用 MODIS 植被指数数据估算草地植被盖度也成为研究热点^[21-23]。植被指数 (vegetation index, VI) 是由遥感卫星探测数据的线性和非线性组合而构成的可以反映绿色植被生长状况和分布特征的指数^[24],可以很好地反映盖度和生物量、绿色植被生长状况及空间分布格局等特征。其中增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI) 和归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)^[25] 已广泛应用于草地植被覆盖度及草地地上生物量、草地退化状况分析、草地利用强度分析等领域^[26-28]。

在草地植被覆盖度野外调查中,地表样方大小设置与对应的卫星影像分辨率大小之间的空间匹配问题一直是遥感反演中的难题。传统的利用照相法获取地表样方植被覆盖度基本都在较小样方上进行^[7,9,29-30],但对于中分辨率遥感数据来说,这种地面测量样方是否能很好地与遥感产品象元匹配,测量样方是否能体现对应遥感象元的地物状况还有待商榷。

针对以上问题,本研究利用小型无人机(大疆精灵 Phantom 3 Professional: 1/2.3 英寸 CMOS 影像传感器,有效像素 1 240 万;照片最大分辨率 4 000×3 000) 及 Canon 数码相机 (EOS 5D Mark II: 2110 万有效像素;最高分辨率 5 616×3 744) 获取草地植被覆盖度大样方的小样方实测数据,结合高时间分辨率的 Terra/MODIS 的植被指数产品 MOD13Q1,旨在建立基于大

样方实测数据和 MODIS 植被指数数据的甘南草地植被覆盖度反演模型,并分析甘南州 2015 年草地生长季(5 月—10 月)期间覆盖度时间与空间上的动态变化特征,为甘南州草地资源的可持续利用和动态监测提供科学合理的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘南藏族自治州位于甘肃省西南,处于黄土高原的西部和青藏高原东北边缘的过渡地段($33^{\circ}06' - 35^{\circ}44' N, 100^{\circ}46' - 104^{\circ}44' E$)^[29,31-33],境内地形复杂,山地、高原占土地总面积的 98% 以上,从西北到东南地势逐渐降低,平均海拔 3 000 m。甘南州属于高原大陆性气候,年降水量在 400~800 mm;年均温 1~3℃;全年平均日照时数 2 200~2 400 h,自西北向东南逐渐降低^[31]。甘南州草原牧草丰茂,是甘肃省重要的畜牧业生产基地,被誉为“亚洲最优良的牧场”之一,不仅具有很高的经济价值,而且有利于维护长江和黄河源头地区的生态安全。甘南州草地面积为 $2.602 5 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其占甘南州土地总面积的 67.64%,其中可以利用的草地面积大概为 $2.495 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占草地总面积的 95.86%;耕地面积为 $7.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占甘南州土地总面积的 2.01%^[34]。高寒草甸、高寒灌丛草甸、温性草甸草原、温性草原、沼泽、暖性草丛、低平地草甸地 7 种是甘南州的主要草地类型^[31,35-36],玛曲、碌曲、夏河、合作 4 个县市为甘南州的主要牧区。近几十年来,在自然和人为两种因素共同作用下,我国草原生态环境问题仍较突出^[37],甘南州草地植被出现退化状况^[29,38],在很大程度上阻碍了甘南州的进一步发展,与此同时也给当地的自然生态和社会经济系统的可持续性发展带来了不利影响^[29,38-39]。

1.2 数据获取

1.2.1 地面实测数据的获取 选择草地植被空间分布上较为一致、能够代表较大区域植被覆盖状况的地区设置 30 m×30 m 的样地,每块样地设置两种不同尺度的样方:小样方 5 个(1 m×1 m)^[9]和大样方 1 个(30 m×30 m)。对于小样方,用 Canon 数码相机垂直对样方进行拍摄,获取覆盖小样方的草地植被照片;对于大样方,用小型无人机在样地中心上空一定高度垂直对地拍摄,获取覆盖大样方的草地植被照片。每块样地具体调查内容包括草地植被覆盖度、生物量、牧草高度、土壤质地等指标,并使用 GPS 记录采样点的经

纬度及海拔信息。Canon 数码相机和小型无人机所拍摄的植被照片根据任世龙等^[40]对植被照片的处理方法进行处理,采用三人处理结果的均值作为该样方的草地植被覆盖度实测数据。甘南州牧区主要集中在玛曲、碌曲、夏河和合作 4 个县市,迭部、卓尼、临潭和舟曲主要为林地和农业用地,故样地主要分布在玛曲、碌曲、夏河和合作 4 个县市。2015 年 7 月—9 月草地生长季期间,在研究区共计调查样地 86 块,包含 430 个小样方和 86 个大样方(图 1)。

1.2.2 遥感数据的获取 本研究所用遥感数据为 MOD13Q1 产品,属于 NASA MODIS 陆地三级标准数据产品,包括 NDVI 和 EVI,空间分辨率 250 m。下载的 MOD13Q1 数据时间序列为 2015 年生长季(5 月—10 月)。此数据可在 NASA 对地观测系统数据共享平台上(EOS data gateway)下载(<http://delenn.gsfc.nasa.gov/-imswww/pub/imswelcome/>)^[29,32]。

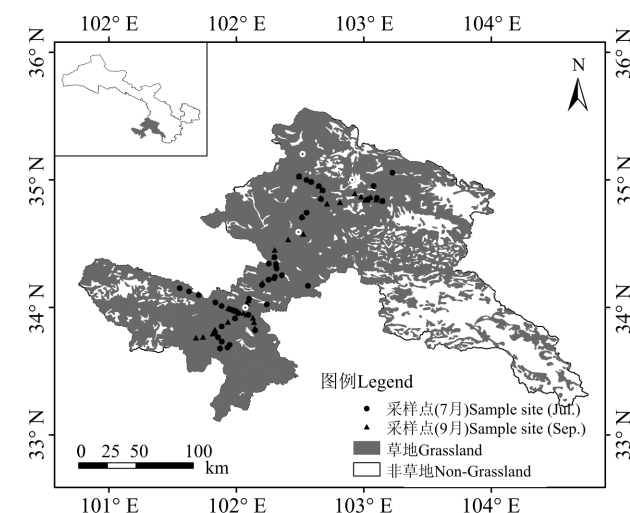


图 1 研究区及采样点分布图

Fig.1 Study area and distribution of sampling points

1.2.3 其它数据 甘南州行政边界图、甘南州草地类型图等相关空间数据库,数据来源于草地农业科技学院草地农业生态系统国家重点实验室。

1.3 研究方法

1.3.1 草地植被覆盖度信息获取 参考任世龙等^[40]对植被照片的处理方法对本研究中 Canon 数码相机和小型无人机所拍摄的植被照片进行处理。为了减少草地植被覆盖度计算中人为因素产生的误差,用三人处理结果的均值作为该样方的草地植被覆盖度数据。对于设置的 5 个小样方,用其均值作为该样地草地植被覆盖度验证数据。由于小型无人机拍摄照片覆盖面积较大,有部分无人机照片的草地植被覆盖度无法识

别,因而剔除相应样地小样方获取的草地植被覆盖度数据,研究区共计调查样地 73 块,包含 365 个小样方和 73 个大样方。

1.3.2 卫星遥感数据的处理 运用 MRT(modis re-projection tool)进行数据读取^[25],同时转换遥感影像的数据格式和地图投影;然后运用 ArcGIS 软件掩膜提取研究区数据。

在使用 MOD13Q1 数据之前将每个象元值缩小 10 000 倍,以得到真实的 EVI、NDVI 值,并将 16 天植被指数数据采用最大值合成法(maximum value composite,MVC)^[41]生成 5 月—10 月生长季的月植被指数及 2015 年年最大植被指数。

1.3.3 不同样方大小获取草地植被覆盖度结果相关性分析 为了检验利用小型无人机对大样方(30 m×30 m)获取地面草地植被覆盖度方法的准确性,对大样方的草地植被覆盖度与同一样地所设置的 5 个小样方(1 m×1 m)的覆盖度均值之间进行相关性分析。

1.3.4 草地植被覆盖度反演模型的构建及精度评价 草地遥感植被覆盖度研究中用到的模型一般有线性和非线性两种。但是由于不同研究区水热条件、植被特征、土壤等条件不同,最终确定采用的模型也不同^[42]。

采用统计分析软件的回归分析方法,分别以每块样地的 EVI、NDVI 两种植被指数作为自变量,对应的小型无人机获取的草地植被覆盖度数据作为因变量,建立草地植被覆盖度与 EVI、NDVI 两种植被指数之间的回归模型。

均方根误差(root mean square error, RMSE)^[25,29,32] 常用来衡量模型的估测能力、描述模型的不确定性以及量化模型精度^[43],RMSE 数值越低,表明回归模型精确度越高^[44]。以 Canon 数码相机获取的样地草地植被覆盖度为真实值,对所建立的回归模型进行精度评价,分别计算各反演模型估测的草地植被覆盖度与真实值之间的平均相对误差(P)(式 1)、均方根误差(RMSE)(式 2),分析各回归模型的草地植被覆盖度估测精度(Accuracy)(式 3),筛选出研究区草地植被覆盖度监测的最佳遥感反演模型。

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{100 \times |y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \right]}{n} \quad (1)$$

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

$$Accuracy = 1 - P/100 \quad (3)$$

式中: n 为总验证样本数; y_i 为第 i 个样地 Canon 数码相机获取的草地植被覆盖度值; $\hat{y}_i$ 为模型反演出的第 i 个预测值。

1.3.5 草地植被覆盖度空间反演 利用最终确定的研究区遥感监测模型及 2015 年 5 月—10 月生长季月植被指数及 2015 年年最大植被指数分析甘南州不同草地类型植被覆盖度月季变化特征及全州 2015 年草地植被覆盖度空间分布特征。

1.3.6 草地植被覆盖度分级 利用 2015 年 MODIS 年年最大植被指数数据及甘南州草地植被覆盖度最优反演模型计算得出甘南州 2015 年草地植被覆盖度年最大数据。根据甘南州 2015 年生长季草地植被覆盖度^[32]、国家《土地利用现状调查技术规程》、全国《草场资源调查技术规程》以及前人关于植被划分的标准^[45-47],同时结合甘南州植被特有的生态特征,将研究区的草地植被覆盖度分为五级。一级植被:植被覆盖度大于 80%,属高覆盖度植被,相当于高产草地、密灌木地;二级植被:植被覆盖度为 60%~80%,属中高覆盖度植被,相当于中高产草地;三级植被:植被覆盖度为 40%~60%,属中覆盖度植被,相当于中产草地;四级植被:植被覆盖度为 20%~40%,属低覆盖度植被,相当于中低产草地;五级植被:植被覆盖度小于 20%,属低覆盖度植被,相当于强度、中度沙漠化土地,低产草地。

2 结果与分析

2.1 不同样方大小获取的草地植被覆盖度相关性分析

利用小型无人机对大样方(30 m×30 m)获取地面草地植被覆盖度与同一样地所设置的 5 个小样方(1 m×1 m)草地植被覆盖度(Canon 数码相机获取的数据)的平均值进行相关性分析(图 2)。结果表明,两种不同样方大小获取的草地植被覆盖度之间具有很高的相关性($R^2=0.963$, $P<0.01$)。说明利用小型无人机对地面大样方拍摄的方法可以用于地面草地植被覆盖度数据的获取。

2.2 草地植被覆盖度反演模型构建及精度评价

通过统计分析软件分析出小型无人机获取的地面草地植被覆盖度与 MODIS 两种植被指数(EVI, NDVI)之间的线性、对数、乘幂、增长及指数回归模型(表 1)可以看出,草地植被覆盖度与 EVI、NDVI 之间均具有显著的相关性。对于 EVI 而言,对数模型($R^2=$

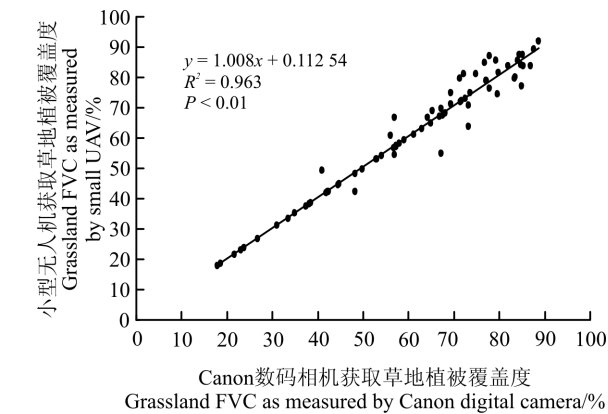


图 2 Canon 数码相机和小型无人机获取草地植被覆盖度相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between the grassland fractional vegetation cover (FVC) as measured by Canon digital camera and small unmanned aerial vehicles (UAV)

0.707) 优于其它 4 种模型;对于 NDVI 而言,线性模型 ($R^2=0.694$) 优于其它 4 种模型。从精度评价结果(表 2)可以看出,EVI 对数模型的精度最高,达 88.00%,平均相对误差(P)和均方根误差(RMSE)最低。由此可见,基于 MODIS-EVI 对数模型反演的甘南州草地植被覆盖度与真实值最接近,能较好地模拟生长季期间草地生长状态和覆盖度动态变化。因此,基于 MODIS-EVI 的对数模型为甘南州草地植被覆盖度的最优模型:

$$y = 65.317 \ln x + 111.964 \quad R^2 = 0.707 \quad (4)$$

式中: y 为草地植被覆盖度预测值(%); x 为 MODIS-EVI。

2.3 草地植被覆盖度月度变化动态

从甘南州 2015 年草地植被生长季植被覆盖度变化动态分析可以看出,草地植被覆盖度在 7 月达到最大值(66.29%),最低值(14.21%)出现在 5 月。在生长季期间,草地植被覆盖度呈先增长再降低的单峰抛物线型(图 3)。草地于 5 月进入返青期且快速生长;6 月份的草地盖度较 5 月份增长了大约 34.07%;6 月到 7 月草地盖度继续上升;7 月—8 月为草地生长的旺盛期,在此时草地盖度达到了最大值,8 月以后气候渐冷,草地生长逐渐停止,因此 9 月的覆盖度较 8 月下降了 22.98%,到 10 月时草地植被覆盖度下降了 20.26%。

从甘南州不同草地类型植被覆盖度的月变化动态可以看出,低平地草甸 8 月达到最大值,其它类型草地均在 7 月达到最大值(图 4)。虽然沼泽类的覆盖度在 7 种草地类型中是最大的,但是沼泽在甘南州占的比例很少,所以对整个甘南州草地植被覆盖度影响不大。高寒草甸和高寒灌丛草甸是甘南州最主要的草地类型,植被覆盖度也相对较高,在很大程度上影响着甘南州草地植被覆盖度的动态变化。

2.4 草地植被覆盖度空间反演及分级

对甘南州 2015 年草地植被覆盖度进行分级,得到草地植被覆盖度空间分布图(图 5)。从中可以看出,甘南州中西部和西南部地区的草地植被覆盖度较东部高,以中高植被覆盖度为主,主要分布在玛曲、碌曲、夏河以及合作 4 个县(市)(表 3),草地植被覆盖度的等级都为二级,其它等级的草地植被覆盖度所占比例相对较少。

表 1 甘南州不同草地植被指数与草地植被覆盖度回归模型比较
Table 1 Comparison of regression models between fractional vegetation cover (%) and vegetation index in Gannan Prefecture (N=73)

回归模型 Regression model	植被指数 Vegetation index	模型方程 Equation	R^2	F
线性模型 Linear model	EVI	$y = 142.589x - 6.408$	0.686 **	155.012
	NDVI	$y = 151.267x - 43.266$	0.694 **	161.047
对数模型 Logarithm model	EVI	$y = 65.317 \ln x + 111.964$	0.707 **	171.524
	NDVI	$y = 95.605 \ln x + 97.899$	0.678 **	149.383
乘幂模型 Power model	EVI	$y = 154.345x^{1.277}$	0.667 **	142.087
	NDVI	$y = 118.962x^{1.908}$	0.666 **	141.262
增长模型 Growth model	EVI	$y = e^{2.750 + 2.735x}$	0.622 **	116.923
	NDVI	$y = e^{1.987 + 2.298x}$	0.665 **	140.974
指数模型 Exponential model	EVI	$y = 15.635e^{2.735x}$	0.622 **	116.923
	NDVI	$y = 7.292e^{2.735x}$	0.655 **	140.974

注: ** 表示极显著($P<0.01$);EVI 为增强型植被指数,NDVI 为归一型植被指数;表 2 同。
Note: ** means significant at the 0.01 level;EVI, enhanced vegetation index, NDVI, normalized difference vegetation index; Similarly for Table 2.

表 2 甘南州草地植被指数与植被覆盖度回归模型精度评价 (N=73)

回归模型	植被指数	模型方程	R^2	估测精度	平均相对	均方根
Regression model	Vegetation index	Model equation		Accuracy/%	误差 RE	误差 RMSE
线性模型	EVI	$y=142.589x-6.408$	0.686 **	87.31	12.69	11.19
Linear model	NDVI	$y=151.267x-43.266$	0.694 **	81.99	18.01	11.00
对数模型	EVI	$y=65.317\ln x+111.964$	0.707 **	88.00	12.00	10.69
Logarithm model	NDVI	$y=95.605\ln x+97.899$	0.678 **	81.52	18.48	11.17
乘幂模型	EVI	$y=154.345x^{1.277}$	0.667 **	86.78	13.22	11.77
Power model	NDVI	$y=118.962x^{1.908}$	0.666 **	82.47	17.53	11.17
增长模型	EVI	$y=e^{2.750+2.735x}$	0.622 **	85.23	14.77	13.48
Growth model	NDVI	$y=e^{1.987+2.2.982x}$	0.665 **	81.88	18.12	11.79
指数模型	EVI	$y=15.635e^{2.735x}$	0.622 **	85.23	14.77	13.48
Exponential model	NDVI	$y=7.292e^{2.735x}$	0.655 **	81.89	18.11	11.79

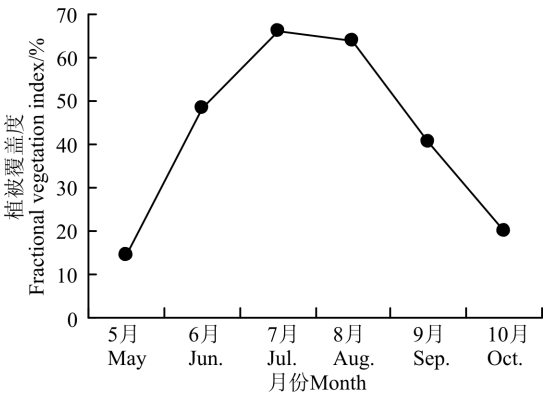


图 3 甘南州 2015 年生长季草地植被覆盖度月度变化动态

Fig.3 Monthly variation of grassland fractional vegetation cover in 2015 growing season in Gannan Prefecture

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究中草地盖度的调查方法采用小型无人机所拍摄的照片计算而得到,相较于传统地面样方尺度盖度数据,其主要特点包括:1)覆盖范围大(大小约 900 m²),具有更好的空间代表性,样方覆盖范围是传统调查样方的 900 倍,能够更好地反映草地地表盖度情况,传统的点测量数据缺乏中尺度甚至更大尺度的代表性,如何取得具有代表性的数据,也就是获得中尺度数据的真实值,是一个非常棘手的问题^[48],已有的对于大中尺度植被盖度的研究,通常借助较高分辨率遥感

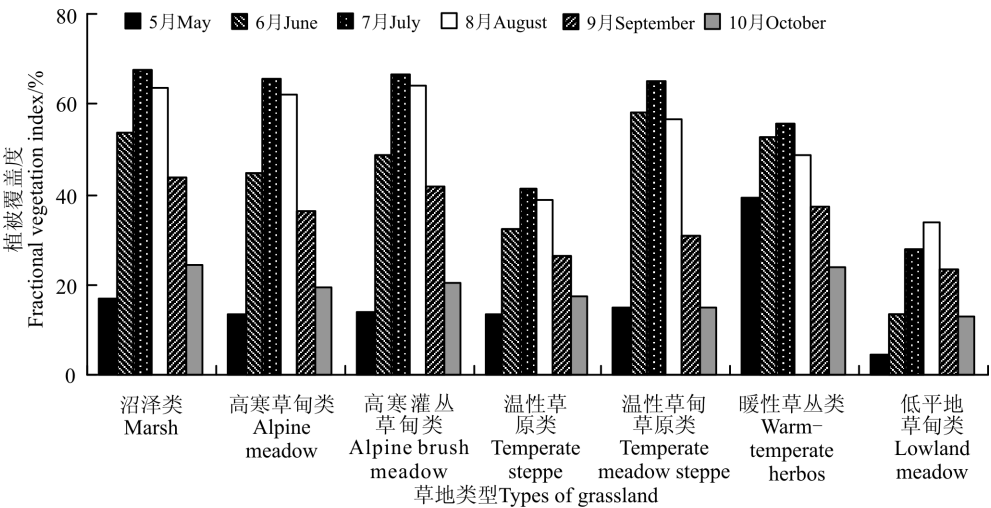


图 4 甘南州 2015 年生长季各类草地月最大植被覆盖度动态变化

Fig. 4 Maximum values of monthly fractional vegetation cover for different grassland types in 2015 growing season in Gannan

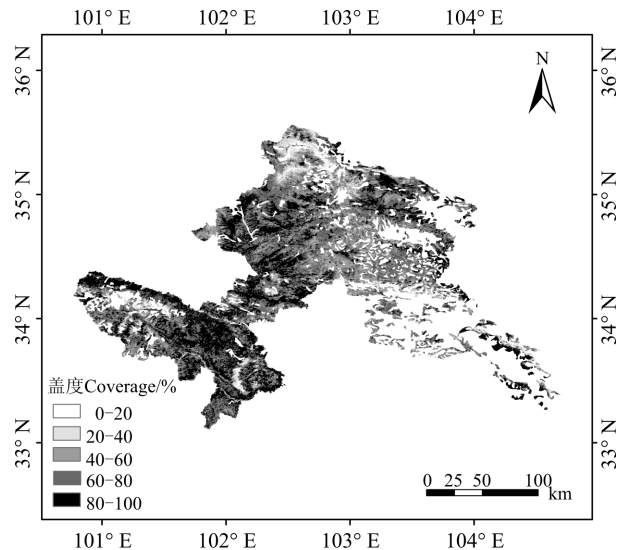


图 5 甘南州 2015 年生长季最大草地植被
覆盖度分级空间分布图

Fig.5 The largest classification of grassland fractional vegetation
cover spatial distribution in 2015 growing season

表 3 甘南州 2015 年生长季主要牧业县(市)
草地植被覆盖度及等级

Table 3 Value and level of grassland fractional vegetation
cover in 2015 growing season in the main pastoral
county of Gannan Prefecture

县(市) County (City)	面积 Area/km ²	草地植被覆盖度均值 The average of grassland FVC/%	植被覆盖度等级 The level of grassland FVC
玛曲 Maqu	10 190	74.85	二级 2nd
碌曲 Luqu	5 298	74.84	二级 2nd
夏河 Xiahe	6 274	70.37	二级 2nd
合作 Hezuo	2 670	70.70	二级 2nd

数据(如 TM、ASTER)改进较低分辨率遥感数据(如 MODIS)对植被覆盖度监测的精度^[49-50],但较高分辨率遥感数据的可获得性往往受到限制,采用无人机获取地面高分辨率盖度图像受天气干扰较小,可获得性高;2)操作快捷方便,效率高。在传统地表样方布置方法中,受样方大小的限制,往往通过增加样地内样方数目和改进采样布置方案来增加样地的空间代表性,在提高草地盖度反演模型精度的同时增加了工作量。而利用小型无人机摄影技术估测草地盖度大量减少地表采样工作(由原来的 3~5 个样方减少为 1 个样方)^[9,28],无需进入草地便可获取草地盖度信息,节省了大量时间和人力。3)估测精度较传统方法高,本研究中使用小型无人机照片所计算的盖度与传统方法所

计算的盖度之间有较高的相关性,其相关系数高达 0.963。与 NDVI、EVI 所构建的草地盖度反演模型精度较高,精度高达 81.99%和 88.00%。

近年来发展无人机为遥感平台的近地(50~100 m)遥感信息获取技术已成为构建星空一体化遥感系统的理想衔接点^[51],同时随着数码相机的普及,摄影技术已成为一种炙手可热的数字图像信息获取手段,基于数字图像技术的植物生物量、叶面积指数(LAI)估测研究也得到了长足发展^[52-54],本研究使用的小型旋翼无人机自带的相机不是专门为量测目的设计的,其边缘畸变不能被忽视,在今后利用无人机进行植被监测的研究中需要充分认识图像边缘畸变对地面实测值的影响。

3.2 结论

植被覆盖度是衡量植被状况的重要定量指标,本研究利用小型无人机获取的地面草地植被覆盖度数据结合高分辨率的 MODIS 植被指数数据(EVI,NDVI)确定甘南州草地覆盖度最优反演模型,与此同时分析了 2015 年生长季草地植被覆盖度的时空变化特征,得出如下主要结论:

1)利用小型无人机获取的地面大样方草地植被覆盖度数据与传统方法获取的小样方数据之间具有很高的相关性,说明小型无人机可以用于获取地面草地植被覆盖度数据,小型无人机的使用增大了监测样方的面积,不仅准确快捷而且使样方设置更具代表性,为快速获取地面草地植被状况提供了新的途径。

2)MODIS 产品的植被指数数据(EVI/NDVI)与甘南州草地植被覆盖度具有较强的相关性(表 1),说明 MODIS 产品在研究区具有很好的适用性,可以及时有效地监测甘南州草地动态变化,对促进当地牧业发展具有重大意义。与 NDVI 相比,EVI 可以更好地反映研究区草地植被覆盖度的时空差异,因此确定基于 EVI 构建的草地植被覆盖度最优反演模型为 $y = 65.317\ln x + 111.964$,该模型可以解释研究区草地植被覆盖度变化的 70.7%,精度可达 88.00%,能很好地模拟草地生长季期间(5 月—10 月)的草地植被覆盖度的动态变化。

3)研究区 2015 年生长季草地植被覆盖度在 7 月达到最大值(66.29%),在 5 月出现最低值(14.21%)。在生长季期间,草地植被覆盖度具有先上升后下降的特点,其变化趋势呈单峰抛物线型,草地植被覆盖度年最大值主要集中在 7 月—8 月,除了低平地草甸在 8

月达到最大值外,其它草地类型均在7月达到最大值。

4)甘南州2015年生长季草地植被覆盖度状况较好,中西部和西南部地区的草地植被覆盖度较东部高,以中高植被覆盖度为主(表3),主要分布在玛曲、碌曲、夏河以及合作4个牧业县(市),其它等级的草地植

被覆盖度所占比例相对较少,说明甘南州牧业县(市)草地状况良好。使用遥感技术进行大范围草地盖度分析可以为草地资源管理与合理规划放牧活动提供指导意见,甘南州主要牧业县(市)可实行划区轮牧,根据草地植被生长状况,合理配置草地。

参考文献 References:

- [1] 赵同谦,欧阳志云,贾良青,郑华.中国草地生态系统服务功能间接价值评价.生态学报,2004,24(6):1101-1110.
Zhao T Q,Ouyang Z Y,Jia L Q,Zheng H.Ecosystem services and their valuation of China grassland.Acta Ecologica Sinica, 2004,24(6):1101-1110.(in Chinese)
- [2] 查勇,Gao J,倪绍祥.国际草地资源遥感研究新进展.地理科学进展,2003,22(6):607-617.
Zha Y,Gao J,Ni S X.Most recent progress of international research on remote sensing of grassland resources.Progress in Geography,2003,22(6):607-617.(in Chinese)
- [3] 王宝元.保护草地生态环境走可持续发展之路.四川草原,2003(6):1-3.
Wang B Y.Protection of the eco-environment on grasslands and the paths to sustainable development.Sichuan Caoyuan, 2003(6):1-3.(in Chinese)
- [4] 高飞,邢文渊,李大平,赵睿,师庆东.和静草地覆盖度变化遥感监测及分析.草业科学,2007,24(4):27-30.
Gao F,Xing W Y,Li D P,Zhao R,Shi Q D.Remote sensing monitoring and analysis of grassland coverage in Hejing.Pratacul-tural Science,2007,24(4):27-30.(in Chinese)
- [5] 温庆可,张增祥,刘斌,乔竹萍.草地覆盖度测算方法研究进展.草业科学,2009,26(12):30-36.
Wen Q K,Zhang Z X,Liu B,Qiao Z P.Research progress in grassland fractional coverage estimation methods.Pratacultural Sci-ence,2009,26(12):30-36.(in Chinese)
- [6] Gitelson A A,Kaufman Y J,Stark R,Rundquist D.Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction.Remote Sens-ing of Environment,2002,80:76-87.
- [7] 陈建军,宜树华,任世龙,秦彧,王晓云.疏勒河上游高寒草地植被盖度反演及精度评价.草业科学,2014,31(1):56-65.
Chen J J,Yi S H,Ren S L,Qin Y,Wang X Y.Retrieval of fractional vegetation cover of alpine grassland and the efficiency of remote sensing retrieval in the upper of Shule River Basin.Pratacultural Science,2014,31(1):56-65.(in Chinese)
- [8] 顾祝军,曾志远.遥感植被盖度研究.水土保持研究,2005,12(2):18-21.
Gu Z J,Zeng Z Y.Overview of researches on vegetation coverage in remote sensing.Research of Soil and Water Conservation, 2005,12(2):18-21.(in Chinese)
- [9] 宜树华,王增如,谢霞,杨时海,黄磊,叶柏生.高寒草地植被盖度估算及其与冻土的关系.草业科学,2011,28(3):353-358.
Yi S H,Wang Z R,Xie X,Yang S H,Huang L,Ye B S.Estimation of fractional vegetation cover and its relation with permafrost in the upstream regions of Shule River Basin.Pratacultural Science,2011,28(3):353-358.(in Chinese)
- [10] 郭述茂.基于3S技术的高寒草地植被覆盖度分布特征及动态变化研究.兰州:兰州大学硕士学位论文,2009.
Guo S M.Research of vegetation coverage distribution changes of alpine grassland based on 3S technology.Master Thesis, Lanzhou:Lanzhou University,2009.(in Chinese)
- [11] Purevdorj T S,Tateishi R,Ishiyama T,Honda Y.Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices.Inter-national Journal of Remote Sensing,1998,19(18):3519-3535.
- [12] Zeng X B,Dickinson R E,Walker A,Shaikh M,Defries R S,Qi J G.Derivation and evaluation of global 1-km fractional vegeta-tion cover data for land modeling.Journal of Applied Meteorology,2000,39(6):826-839.
- [13] Wittich K P,Hansing O.Area-averaged vegetative cover fraction estimated from satellite data.International Journal of Biome-teorology,1995,38:209-215.
- [14] 赵彩霞,施昆,宁平.EOS-MODIS 在环境科学中的应用与研究进展.环境科学导刊,2008,27(2):15-20.
Zhao C X,Shi K,Ning P.Research progress of application of EOS-MODIS on environmental science.Environmental Science

- Survey, 2008, 27(2): 15-20. (in Chinese)
- [15] 刘闯, 文洪涛, 赵立成, 张玮. 我国 EOS-MODIS 地面站建设的现状、问题与对策. 遥感信息, 2003(4): 42-47.
Liu C, Wen H T, Zhao L C, Zhang W. Retrieving foliar biochemical components with statistical and physical models. Remote Sensing Information, 2003(4): 42-47. (in Chinese)
- [16] 王玮, 冯琦胜, 郭锐, 沙莎, 胡蝶, 王丽娟, 李耀辉. 基于长时间序列 NDVI 资料的我国西北干旱区植被覆盖动态监测. 草业科学, 2015, 32(12): 1969-1979.
Wang W, Feng Q S, Guo N, Sha S, Hu D, Wang L J, Li Y H. Dynamic monitoring of vegetation coverage based on long time-series NDVI data sets in northwest arid region of China. Pratacultural Science, 2015, 32(12): 1969-1979. (in Chinese)
- [17] 严建武, 李春娥, 袁雷, 陈全功. EOS-MODIS 数据在草地资源监测中的应用进展综述. 草业科学, 2008, 25(4): 1-9.
Yan J W, Li C E, Yuan L, Chen Q G. Application summary of EOS-MODIS data in the monitoring of grassland resources. Pratacultural Science, 2008, 25(4): 1-9. (in Chinese)
- [18] Maffei C, Leone A P, Vella M, Guiseppe M, Menenti M. The use of MODIS-simulated spectral bands for monitoring plant water stress as a help for dynamic fire risk assessment. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VIII, 2006 doi:10.1117/12.689905.
- [19] 李聪, 肖继东, 宫恒瑞, 石玉, 冯志敏. MODIS 数据在乌鲁木齐地区植被景观动态监测中的应用. 新疆气象, 2005, 28(3): 27-29.
Li C, Xiao J D, Gong H R, Shi Y, Feng Z M. The application of MODIS data to plant view dynamic monitoring in Urumqi. Bimonthly of Xinjiang Meteorology, 2005, 28(3): 27-29. (in Chinese)
- [20] 宫攀, 陈仲新. 基于 MODIS 数据的东北地区植被物候参数提取. 土壤通报, 2009, 40(2): 213-217.
Gong P, Chen Z X. Regional vegetation phenology monitoring based on MODIS. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(2): 213-217. (in Chinese)
- [21] 王春香, 张涤非, 任万辉. MODIS 数据植被覆盖度提取算法比较. 大气与环境光学学报, 2010, 5(6): 457-462.
Wang C X, Zhang D F, Ren W H. Comparison of vegetation coverage extracting based on MODIS data. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2010, 5(6): 457-462. (in Chinese)
- [22] Lehnert L W, Meyer H, Wang Y, Miehe G, Thies B. Retrieval of grassland plant coverage on the Tibetan Plateau based on a multi-scale, multi-sensor and multi-method approach. Remote Sensing of Environment, 2015, 164: 197-207.
- [23] 刘春静, 张丽, 周宇, 张炳华, 侯小丽. 中国新疆及中亚五国干旱区草地覆盖度反演与分析. 草业科学, 2016, 33(5): 861-870.
Liu C J, Zhang L, Zhou Y, Zhang B H, Hou X L. Retrieval and analysis of grassland coverage in arid Xinjiang, China and five countries of Central Asia. Pratacultural Science, 2016, 33(5): 861-870. (in Chinese)
- [24] 程乾, 黄敬峰, 王人潮. MODIS 和 NOAA/AVHRR 植被指数差异初步分析. 科技通报, 2005, 21(2): 205-209.
Cheng Q, Huang J F, Wang R C. Preliminary analysis of difference between MODIS and NOAA/AVHRR vegetation indices. Bulletin of Science and Technology, 2005, 21(2): 205-209. (in Chinese)
- [25] 方金. 基于多源遥感数据的甘南牧区草地生物量遥感监测研究. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2013.
Fang J. Monitoring grassland biomass based on multi-source remote sensing data in Gannan pastoral area. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)
- [26] 郭芬芬, 范建容, 边金虎, 刘飞, 张怀珍. 基于 MODIS NDVI 时间序列数据的藏北草地类型识别. 遥感技术与应用, 2011, 26(6): 821-826.
Guo F F, Fan J R, Bian J H, Liu F, Zhang H Z. Grassland types identification based on time-series MODIS NDVI data in northern Tibet. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(6): 821-826. (in Chinese)
- [27] 范瑛, 李小雁, 李广泳. 基于 MODIS/EVI 的内蒙古高原西部植被变化. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1671-1677.
Fan Y, Li X Y, Li G Y. Spatio-temporal vegetation variation in the western Inner Mongolia Plateau based on MODIS/EVI. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1671-1677. (in Chinese)
- [28] 除多, 次仁多吉, 王彩云, 姬秋梅, 德央. 利用 MODIS 数据估算西藏高原地表植被覆盖度. 遥感技术与应用, 2010, 25(5): 707-713.
Chu D, Cirenduoji, Wang C Y, Ji Q M, De Y. Vegetation coverage estimation over Tibetan Plateau using MODIS data. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(5): 707-713. (in Chinese)
- [29] 马琳雅, 崔霞, 冯琦胜, 梁天刚. 2001—2011 年甘南草地植被覆盖度动态变化分析. 草业学报, 2014, 23(4): 1-9.
Ma L Y, Cui X, Feng Q S, Liang T G. Dynamic changes of grassland vegetation coverage from 2001 to 2011 in Gannan Prefec-

- ture, *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(4):1-9. (in Chinese)
- [30] Curran P J, Williamson H D. Sample size for ground and remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 1986, 20(1): 31-41.
- [31] 梁天刚, 崔霞, 冯琦胜, 王莺, 夏文韬. 2001—2008 年甘南牧区草地地上生物量与载畜量遥感动态监测. *草业学报*, 2009, 18(6): 12-22.
- Liang T G, Cui X, Feng Q S, Wang Y, Xia W T. Remotely sensed dynamics monitoring of grassland aboveground biomass and carrying capacity during 2001—2008 in Gannan pastoral area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(6):12-22. (in Chinese)
- [32] 马琳雅. 甘南州草地植被覆盖度与物候期时空变化动态特征. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2013.
- Ma L Y. Spatio-temporal dynamic changes of grassland vegetation cover and phenology in Gannan Prefecture. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)
- [33] 郭正刚, 高新华, 刘兴元, 梁天刚. 甘南草地类型的生态经济价值与功能及其分类经营. *山地学报*, 2004, 22(6): 655-660.
- Guo Z G, Gao X H, Liu X Y, Liang T G. Ecological economic value and functions and classification management for grassland in Gannan Prefecture, Gansu Province. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(6): 655-660. (in Chinese)
- [34] 甘肃省草原总站. 甘肃草地资源. 兰州: 甘肃科技出版社, 1999: 258-261.
- [35] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, Gower S T, Running S W, Zhao M S, Costa M H, Kirschbaum A A, Ham J M, Saleska S R, Ahl D E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3): 282-292.
- [36] 梁天刚, 冯琦胜, 夏文韬, 崔霞. 甘南牧区草畜平衡优化方案与管理决策. *生态学报*, 2011, 31(4): 1111-1123.
- Liang T G, Feng Q S, Xia W T, Cui X. Optimization strategy and management decision-making in balancing forage and live-stock in Gannan pastoral area. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 1111-1123. (in Chinese)
- [37] 杨旭东, 杨春, 孟志兴. 我国草原生态保护现状、存在问题及建议. *草业科学*, 2016, 33(9): 1901-1909.
- Yang X D, Yang C, Meng Z X. The current situation, problems and suggestions of grassland ecological protection in China. *Pratacultural Science*, 2016, 33(9): 1901-1909. (in Chinese)
- [38] 张维云, 公保才让, 仁青. 海南州发展草产业的前景与对策. *四川草原*, 2006(4): 57-60.
- Zhang W Y, Gongbaocairang, Ren Q. Prospects and countermeasures for the development of grass industry in Hainan Prefecture. *Sichuan Caoyuan*, 2006(4): 57-60. (in Chinese)
- [39] 朱建国, 袁翀. 甘南州发展草产业的前景与对策. *草业科学*, 2002, 19(2): 26-28.
- Zhu J G, Yuan C. Prospects and countermeasures for the development of grass industry in Gannan Prefecture. *Pratacultural Science*, 2002, 19(2): 26-28. (in Chinese)
- [40] 任世龙, 宜树华, 陈建军, 秦彧, 王晓云. 基于不同数码相机和图像处理方法的高寒草地植被盖度估算的比较. *草业科学*, 2014, 31(6): 1007-1013.
- Ren S L, Yi S H, Chen J J, Qin Y, Wang X Y. Comparisons of alpine grassland fractional vegetation cover estimation using different cameras and different image analysis methods. *Pratacultural Science*, 2014, 31(6): 1007-1013. (in Chinese)
- [41] 陈学兄, 张小军, 陈永贵, 常庆瑞. 陕西省 1998—2008 年植被覆盖度的时空变化研究. *武汉大学学报·信息科学版*, 2013, 38(6): 674-678.
- Chen X X, Zhang X J, Chen Y G, Chang Q R. Spatiotemporal change of vegetation coverage in Shaanxi Province from 1998 to 2008. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6): 674-678. (in Chinese)
- [42] 崔霞, 梁天刚, 刘勇. 基于 MOD09GA 产品的草地生物量遥感估算模型. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(5): 79-87.
- Cui X, Liang T G, Liu Y. Modeling of aboveground biomass of grassland using remotely sensed MOD09GA data. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2009, 45(5): 79-87. (in Chinese)
- [43] 冯琦胜, 高新华, 黄晓东, 于惠, 梁天刚. 2001—2010 年青藏高原草地生长状况遥感动态监测. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(4): 75-81.
- Feng Q S, Gao X H, Huang X D, Yu H, Liang T G. Remote sensing dynamic monitoring of grass growth in Qinghai-Tibet plateau from 2001 to 2010. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2011, 47(4): 75-81. (in Chinese)
- [44] 孟宝平, 陈思宇, 崔霞, 冯琦胜, 梁天刚. 基于多源遥感数据的高寒草地生物量反演模型精度——以夏河县桑科草原试验区为例. *草业科学*, 2015, 32(11): 1730-1739.

- Meng B P, Chen S Y, Cui X, Feng Q S, Liang T G. The accuracy of grassland vegetation biomass estimated model based on multi-source remote sensing data——As a case of experimental area in Sangke grassland in Xiahe County. *Pratacultural Science*, 2015, 32(11): 1730-1739. (in Chinese)
- [45] 赵军, 王小敏, 李东成. 基于 MODIS 的民勤绿洲植被覆盖变化定量分析. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(10): 91-96.
Zhao J, Wang X M, Li D C. Quantitative analysis on the vegetation coverage changes of Minqin Oasis based on MODIS. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(10): 91-96. (in Chinese)
- [46] 王浩, 李文龙, 杜国祯, 朱晓丽. 基于 3S 技术的甘南草地覆盖度动态变化研究. *草业学报*, 2012, 21(3): 26-37.
Wang H, Li W L, Du G Z, Zhu X L. Research on the change of grassland vegetation coverage using 3S technology in Gannan. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(3): 26-37. (in Chinese)
- [47] 叶贵祥, 李维青, 田源. 基于 NDVI 的干旱区典型绿洲植被覆盖动态变化分析——以策勒绿洲为例. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(9): 128-133.
Ye G X, Li W Q, Tian Y. Dynamic changes of vegetation cover in typical oasis of arid areas based on NDVI——A case study in Cele Oasis. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(9): 128-133. (in Chinese)
- [48] 张仁华, 田静, 李召良, 苏红波, 陈少辉. 定量遥感产品真实性检验的基础与方法. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(2): 211-222.
Zhang R H, Tian J, Li Z L, Su H B, Chen S H. Principles and methods for the validation of quantitative remote sensing products. *Scientia Sinica Terrae*, 2010, 40(2): 211-222. (in Chinese)
- [49] 张云霞, 张云飞, 李晓兵. 地面测量与 ASTER 影像综合计算植被盖度. *生态学报*, 2007, 27(3): 964-976.
Zhang Y X, Zhang Y F, Li X B. The synthetically estimating vegetation fractional coverage of grassland using field data and ASTER remote sensing imagine. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 964-976. (in Chinese)
- [50] 孟宝平, 崔霞, 杨淑霞, 高金龙, 胡远宁, 陈思宇, 梁天刚. 基于 Landsat 8 OLI 和 MODIS 数据的高寒草地盖度升尺度效应研究——以夏河县桑科草原试验区为例. *草业学报*, 2016, 25(7): 1-12.
Meng B P, Cui X, Yang S X, Gao J L, Hu Y N, Chen S Y, Liang T G. Scaling-up methodology for alpine grassland coverage monitoring based on Landsat 8 OLI and MODIS remote sensing data——A case study in Xiahe Sangke grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(7): 1-12. (in Chinese)
- [51] 高林, 杨贵军, 李红军, 李振海, 冯海宽, 王磊, 董锦绘, 贺鹏. 基于无人机数码影像的冬小麦叶面积指数探测研究. *中国生态农业学报*, 2016, 24(9): 1254-1264.
Gao L, Yang G J, Li H J, Li Z H, Feng H K, Wang L, Dong J H, He P. Winter wheat LAI estimation using unmanned aerial vehicle RGB-imaging. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(9): 1254-1264. (in Chinese)
- [52] 单成钢. 数字图像技术在冬小麦群体监测中的应用研究. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2006.
Shan C G. Application of digital image technology in winter wheat population monitoring. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [53] 李明, 张长利, 房俊龙. 基于图像处理技术的小麦叶面积指数的提取. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 205-209.
Li M, Zhang C L, Fang J L. Extraction of leaf area index of wheat based on image processing technique. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 205-209. (in Chinese)
- [54] 孙涛, 刘振波, 葛云健, 顾祝军. 基于数码相片 Gamma 校正的水稻叶面积指数估算. *生态学报*, 2014, 34(13): 3548-3557.
Sun T, Liu Z B, Ge Y J, Gu Z J. Estimation of paddy rice leaf area index based on photo gamma correction. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3548-3557. (in Chinese)

(责任编辑 苟燕妮)