

引用格式: Li Shuzhen, Xu Dawei, Fan Kaikai, *et al.* Research of Grassland Aboveground Biomass Inversion based on UAV and Satellite Remoting Sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 272-278. [李淑贞, 徐大伟, 范凯凯, 等. 基于无人机与卫星遥感的草原地上生物量反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 272-278.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.1.0272

基于无人机与卫星遥感的草原地上生物量反演研究

李淑贞, 徐大伟, 范凯凯, 陈金强, 佟旭泽, 辛晓平, 王 旭

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 草原生物量是评价草原生态系统功能的重要参数。为了快速、准确、有效地估算草原地上生物量, 以呼伦贝尔草原为研究区, 基于无人机多光谱影像和卫星遥感(Sentinel-2)影像, 选择GNDVI、LCI、NDRE、NDVI、OSAVI、EVI等6个植被指数, 结合实测地上生物量数据, 建立植被指数回归模型, 并采用留一法交叉验证进行精度评价。结果表明: 基于无人机多光谱影像的LCI-生物量回归模型(RRMSE为18%, 测量值与预测值 R^2 为0.70)和NDRE-生物量模型(RRMSE为18%, 测量值与预测值 R^2 达到0.71)精度高于其他植被指数回归模型; 基于无人机多光谱影像的生物量-植被指数模型(RRMSE均低于22%)模拟精度均优于基于Sentinel-2影像的生物量-植被指数模型(RRMSE均高于25%), 可以更精确地反演草原地上生物量, 研究结果可为草原生物量精准反演提供科学方法和依据。

关键词: 无人机; Sentinel-2; 地上生物量; 红边; 植被指数

中图分类号: S812; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)01-0272-07

1 引言

草原是世界上分布面积最广、最重要的陆地生态系统之一。我国草原面积约占国土面积的41.7%, 是北方重要的绿色屏障, 对于生态安全和畜牧业发展有着至关重要的作用^[1]。生物量是评价草原生态系统功能的重要参数, 准确估算草原植被的地上生物量, 对于草原生态系统功能评估、合理利用草地资源具有重要意义^[2-3]。遥感技术以其探测周期短、现时性强、可大面积同时观测的特点, 已成为地物定性、定量探测的重要手段^[4]。植被指数作为广泛应用于植被遥感监测的指标之一, 主要利用不同波段的线性和非线性组合形成能反映绿色植被生长状况的特征指数^[5]。然而, 利用传统的卫星遥感数据估算草原地上生物量存在空间分辨率较

低、易受大气影响等诸多不足, 难以满足实际需求。近年来, 无人机以其获取影像速度快、空间分辨率高、云下获取影像等传统遥感技术无法比拟的优势, 在资源调查、环境监测、土地利用等方面有着广阔的应用前景^[6]。

目前, 国内外许多学者利用卫星遥感和无人机技术对草原生物量进行反演研究。张雅等^[10]利用Landsat-8 OLI数据获得NDVI、RVI、DVI、EVI、GNDVI和SAVI6种常用植被指数, 结合地面实测数据, 根据坡向分别建立紫泥泉牧场阴坡和阳坡的草原生物量遥感估算模型。Batistoti等^[7]利用无人机可见光影像建立了牧草冠层高度和生物量反演模型, 对巴西稀树草原生物量进行估算。张正健等^[8]以若尔盖草原典型样带的无人机可见光影像和地面实测数据为基础, 建立了地面实测生物量与多

收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-12-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFE0104500、2017YFC0503906), 中央级公益性科研院所基本业务费专项(1610132020028、1610132019024)。

作者简介: 李淑贞(1996—), 女, 山东寿光人, 硕士研究生, 主要从事农业资源与环境遥感研究。E-mail: 82101202278@caas.cn

通讯作者: 王 旭(1978—), 男, 河南南阳人, 副研究员, 主要从事草地生态遥感研究。E-mail: wangxu01@caas.cn

种植被指数的回归模型,并对整个样带的生物量进行了估算^[8]。孙世泽等^[9]利用无人机高分辨率多光谱影像,结合地面实测数据,通过建立植被指数-生物量模型对天山北坡天然牧场草地地上生物量进行估算。尽管针对草原生物量遥感反演已开展了诸多研究,但多数研究基于单一遥感平台数据源,缺乏基于不同遥感平台数据源的生物量反演对比和精度评价研究,大多数无人机搭载的传感器缺少红边波段,而红边波段对绿色植被响应敏感,是植被光谱中反映植被长势最重要的波段之一。本研究以呼伦贝尔草原为研究对象,选择基于红边波段的无人机多光谱影像和卫星遥感影像,结合地面调查数据,通过建立不同植被指数与生物量反演模型,探讨基于无人机和卫星遥感的草原生物量反演方法,为天然草地资源多尺度高时效调查、健康评价和可持续管理提供科学方法和技术支撑。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区呼伦贝尔草原(115°31′~126°04′ E, 47°05′~53°20′ N),地处大兴安岭西麓,地势平坦开阔,东西延伸约 250 km,南北宽幅约

150 km,总面积约 $8.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[11]。研究区属温带大陆性季风气候,夏季温凉短促,冬季漫长寒冷。年平均气温 $-5 \sim 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最冷月(1月)平均气温在 $-18 \sim -30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,最热月(7月)平均气温在 $16 \sim 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,无霜期约 120 d;降水年际变化大且分布不均,年降水量 250~350 mm 左右,多集中在 6~9 月。该地区地带性草地类型为草甸草原、典型草原,草甸草原主要分布在呼伦贝尔草原东部的伊敏河流域,主要植物有贝加尔针茅(*Stipa Baicalensis*)、羊草(*Leymus chinensis*)、线叶菊(*Filifolium sibiricum*);典型草原主要分布在呼伦贝尔草原中部的乌尔逊河流域,主要植物有大针茅(*Stipa grandis*)、克氏针茅(*Stipa Krylovii*)、冷蒿(*Artemisis frigida*)等^[12]。

2.2 样地设置

沿呼伦贝尔草原东—西样带,设置南、北两条样线上 22 个样地(如图 1),涵盖海拉尔区、陈巴尔虎旗、新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗和鄂温克自治旗,包含刈割、放牧利用方式。选择地势较为平坦、植被类型组成相对均一的样地,同时考虑覆盖不同草原群落类型和利用方式。每个样地间隔 10~15 km,面积为 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 。

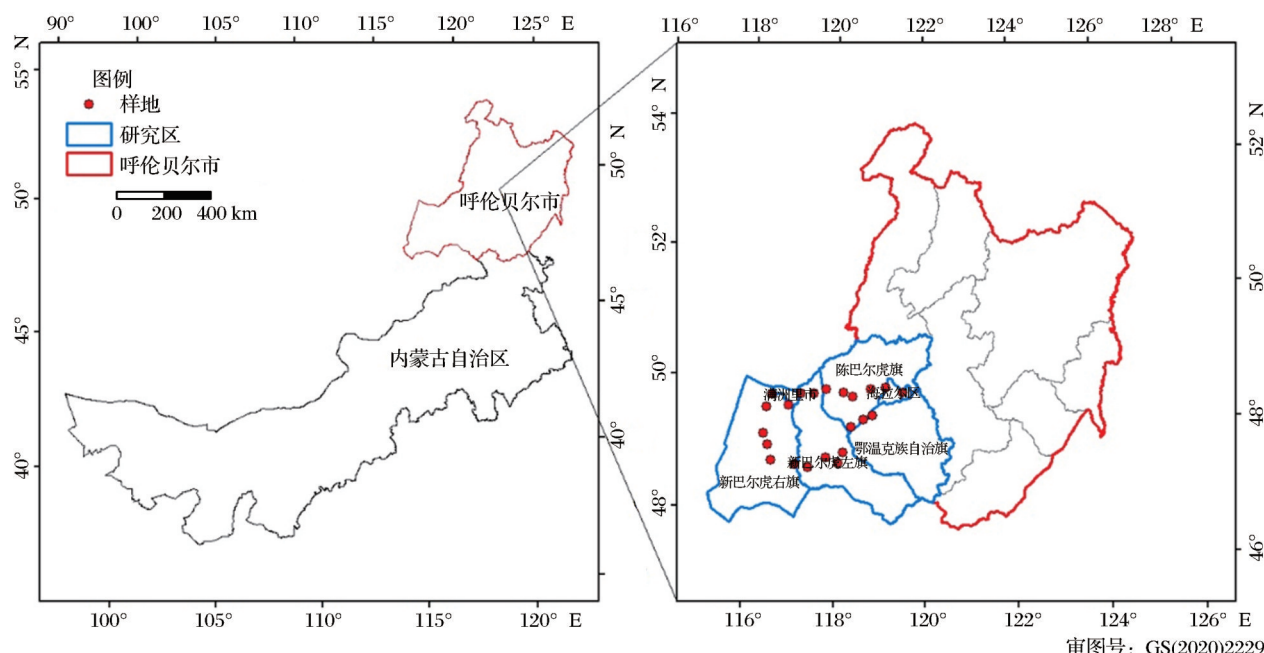


图1 研究区及样点地理位置示意图

Fig.1 The location of study area and sampling points

2.3 数据获取与处理

2.3.1 无人机图像获取与处理

研究采用大疆精灵 Phantom 4 搭载的多光谱传

感器,包含红光、蓝光、绿光、近红外、红边 5 个波段。选择晴空天气飞行,根据样地选择规划飞行航线,设置飞行面积 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$,飞行高度 100 m。利

用大疆智图软件完成图像辐射定标、正射校正以及图像镶嵌,由镶嵌结果中各波段反射率计算得到绿色归一化植被指数(GNDVI)、叶片叶绿素指数(LCI)、归一化差异红边(NDRE)、归一化植被指数(NDVI)、优化土壤调整植被指数(OSAVI)、增强型植被指数(EVI) 6 个常用植被指数,计算公式见表 1。

2.3.2 样地调查与地上生物量测量

每个样地内随机选择 3 个样方(1 m×1 m),利用手持 GPS 终端记录其位置信息。调查指标包括草原类型、物种、高度、多度、覆盖度和生物量等。采用收割法获取样地样方内的地上植物活体部分,称取鲜重,在恒温(65℃)下烘干 24 h 至恒重,称取干重^[13]。

2.3.3 Sentinel-2 影像获取与处理

研究选用 5 景同期 Sentinel-2AMSI 多光谱遥感影像(<https://scihub.copernicus.eu/>), Sentinel-2 是高分辨率多光谱成像卫星,其搭载的多光谱成像仪(MSI),可提供植被、土壤和水覆盖、内陆水路及海岸区域等影像^[14]。Sentinel-2 卫星高度为 786 km,覆盖 13 个光谱波段,幅宽达 290 km。研究选用的 L2A 级数据主要包含经过大气校正的大气底层反射率数据,计算得到绿色归一化植被指数 GNDVI、LCI、NDRE、NDVI、OSAVI、EVI 6 个植被指数,获得每个样地所在像元的植被指数(表 1),其中 ρ_{nir} 、 ρ_{red} 、 ρ_{green} 、 ρ_{blue} 、 $\rho_{rededge}$ 分别表示近红外、红、绿、蓝、红边波段的反射率。

表 1 植被指数与计算方法

Table 1 Vegetation indices and formulas

植被指数	计算公式
绿色归一化植被指数 GNDVI	$\frac{\rho_{nir} - \rho_{green}}{\rho_{nir} + \rho_{green}}$
叶片叶绿素指数 LCI	$\frac{\rho_{nir} - \rho_{rededge}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$
归一化差异红边 NDRE	$\frac{\rho_{nir} - \rho_{rededge}}{\rho_{nir} + \rho_{rededge}}$
归一化植被指数 NDVI	$\frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$
优化土壤调整植被指数 OSAVI	$\frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + 0.16}$
增强型植被指数 EVI	$2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue} + 1}$

2.4 模型构建及精度评价

光谱指数法是遥感反演地表参数的基本方法之一^[15],研究基于实测草原植物鲜重和干重,分别

与无人机、卫星遥感获取的植被指数进行回归分析。针对无人机影像,在无人机图像生成的各光谱指数图像中提取样方植被指数值,分别与 22 个采样点共 66 个样方实测值建立线性回归模型。针对卫星影像,提取 Sentinel-2A 植被指数图像中样点所在像元值作为该样点植被指数,基于 22 个采样点实测值分别与 Sentinel-2A 计算的植被指数建立线性回归模型。决定系数 R^2 是指回归直线与样本观测值拟合优度的相对指标,反映了因变量的变异中能用自变量解释的比例, $0 < R^2 < 1$,其值越接近于 1 表明样本拟合程度越好^[16]。

采用留一法交叉验证测试每个预测模型模拟精度。通过相对均方根误差(RRMSE)和相对误差(RE)对其进行精度评价,RRMSE 用来判断回归模型质量,衡量模型预测值与平均值之间偏差的均值,取值范围 0~100%,其值越小,模型预测精度越高。相对误差取值在 0~100% 之间,其值越小,误差越小,模型精度越高,RRMSE 和 RE 的计算公式如下:

$$RRMSE(\%) = \frac{1}{y_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}} \times 100\% \quad (1)$$

$$RE(\%) = \frac{y_i^0 - y_i}{y_i^0} \times 100\% \quad (2)$$

其中: y_i 为模型预测值; y_i^0 为地上生物量实测值; n 为验证样本数量; $\bar{y} = \frac{\sum_{i=0}^n y_i}{n}$ 。

3 结果与分析

3.1 基于无人机多光谱影像的草原地上生物量反演

表 2 是基于无人机多光谱影像植被指数的草原地上生物量回归模型,6 个植被指数与鲜重和干重均呈显著正相关线性回归关系,其中 LCI 和 NDRE 与生物量回归关系达到极显著水平, R^2 均达到 0.7 以上,模型拟合效果最优,而其他植被指数回归模型的 R^2 介于 0.5~0.7 之间。对同一植被指数来说,植被指数与植物鲜重估算模型的 R^2 大于干重,即鲜重拟合效果更好,且方差显著性检验 F 值最大,优于植被指数与植物干重回归模型。

图 2 是基于留一法交叉验证下不同无人机植被指数的 RRMSE 柱状图,可以看出,不同植被指数之间,LCI 鲜重模型 RRMSE 为 18%,测量值与预测值 R^2 为 0.70,NDRE 鲜重模型 RRMSE 同样为 18%,测量值与预测值的 R^2 达 0.71(表 3),即这两个植被指

表 2 基于无人机植被指数的草原地上生物量回归模型
Table 2 Regression model of grassland aboveground biomass based on UAV vegetation index

植被指数	生物量	估算模型	R^2	F	P
GNDVI	鲜重	$y = 840.19x - 104.50$	0.61	99.28	***
	干重	$y = 326.90x - 48.54$	0.56	82.87	***
LCI	鲜重	$y = 1\,453.52x + 68.41$	0.72	165.50	***
	干重	$y = 566.46x + 18.59$	0.67	130.80	***
NDRE	鲜重	$y = 2\,977.87x - 5.12$	0.73	168.60	***
	干重	$y = 1\,143.90x - 8.37$	0.66	121.80	***
NDVI	鲜重	$y = 542.77x - 17.15$	0.61	99.87	***
	干重	$y = 212.41x - 15.26$	0.57	85.60	***
OSAVI	鲜重	$y = 992.10x + 45.95$	0.61	99.23	***
	干重	$y = 394.52x + 7.84$	0.59	91.83	***
EVI	鲜重	$y = 110.32x + 52.82$	0.64	113.30	***
	干重	$y = 43.64x + 11.08$	0.61	101.40	***

注:***p<.001

数模型对生物量的估算精度最高。对同一植被指数,估算模型中植物鲜重的RRMSE明显低于干重,即每个植被指数对植物鲜重的估算能力高于干重。

表 3 基于无人机估算模型的精度评价
Table 3 Prediction accuracy based on UAV estimation models

	GNDVI	LCI	NDRE	NDVI	OSAVI	EVI
鲜重	0.58	0.70	0.71	0.59	0.58	0.62
干重	0.54	0.65	0.64	0.55	0.57	0.59

3.2 基于卫星遥感影像的草原地上生物量反演

由基于 Sentinel-2A 植被指数—生物量估算模型(表 4)可知, Sentinel-2A 影像计算的植被指数 GNDVI、LCI、NDRE、NDVI、OSAVI 和 EVI 与鲜重和干重均成正相关关系,其中 LCI 和 NDRE 与生物量达到显著水平。基于不同植被指数估算模型中, LCI 和 NDRE 模型拟合效果好, R^2 达到 0.35 以上,明显高于其他植被指数;并且同一植被指数模型中,对鲜重的估算模型方差显著性检验的 F 值也最大,即同一植被指数对植物鲜重变化更敏感。

同样利用交叉检验对遥感估算模型进行精度评价,得到如图 2 所示柱状图, Sentinel-2A 植被指数对植物干重估算模型的 RRMSE 介于 0.30~0.32 之间;对鲜重的估算中, LCI 和 NDRE 模型的 RRMSE 最低,说明基于卫星遥感的 LCI 和 NDRE 模型对地上生物量的估算精度更高。同一植被指数对鲜重的估算模型 RRMSE 均低于 30%,即基于卫星遥感影像的植被指数模型更适合估算植物鲜重估算。

表 4 基于 Sentinel-2 植被指数草原地上生物量回归模型
Table 4 Regression model of grassland aboveground biomass based on Sentinel-2 vegetation index

植被指数	生物量	估算模型	R^2	F	P
GNDVI	鲜重	$y = 664.1x - 81.90$	0.27	7.30	*
	干重	$y = 273.44x - 48.67$	0.25	6.72	*
LCI	鲜重	$y = 1\,572.61x + 73.03$	0.36	11.27	**
	干重	$y = 580.98x + 24.27$	0.27	7.52	*
NDRE	鲜重	$y = 2\,536.58x + 52.59$	0.35	10.97	**
	干重	$y = 887.37x + 21.37$	0.24	6.34	*
NDVI	鲜重	$y = 376.02x + 69.72$	0.26	7.14	*
	干重	$y = 161.93x + 9.56$	0.27	7.43	*
OSAVI	鲜重	$y = 653.46x + 23.79$	0.27	7.48	*
	干重	$y = 258.93x - 1.04$	0.24	6.22	*
EVI	鲜重	$y = 620.67x + 48.88$	0.31	8.88	**
	干重	$y = 252.15x + 6.49$	0.28	7.85	*

注: *p<.05, **p<.005

表 5 基于 Sentinel-2 估算模型的精度评价
Table 5 Prediction accuracy based on Sentinel-2 estimation models

	GNDVI	LCI	NDRE	NDVI	OSAVI	EVI
鲜重	0.12	0.25	0.22	0.12	0.12	0.13
干重	0.11	0.13	0.12	0.12	0.10	0.11

3.3 基于无人机与 Sentinel-2 的草原地上生物量反演对比分析

由图 2 可以看出,基于无人机多光谱影像的植被指数—生物量模型精度均高于 Sentinel-2 影像植被指数模型,其鲜重、干重模型的 RRMSE 均低于基于 Sentinel-2 的鲜重、干重模型,且无人机植被指数模型相对误差较 Sentinel-2 模型小,因此基于无人机影像的植被指数与草原地上生物量有更好的对应关系,且拟合效果更优。

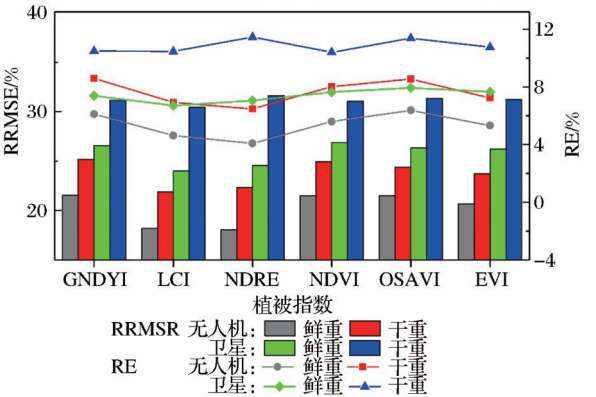


图 2 无人机与卫星植被指数模型精度对比
Fig.2 Comparison of accuracy between UAV and satellite vegetation index model

4 讨 论

研究利用 GNDVI、LCI、NDRE、NDVI、OSA-VI、EVI 6 个植被指数,通过建立回归模型估算草原地上生物量,研究结果显示 LCI 和 NDRE 的反演效果最好,说明基于红边波段构建的植被指数较其他植被指数的精度更高,红边和近红外区域是分析和估算生物量重要的选择之一^[18]。红边是绿色植物光谱曲线在(680~780 nm)之间快速变化的部分,Boochs 就提出“红边”可以通过向长波方向位移的方式来表示植物叶绿素浓度增加的观点,这一现象是由于叶绿素浓度增加植物的光合作用增强,需要消耗更多的光子^[19-20];Filella 等发现红边区间可以作为植物生长状况的指示区^[21]。在本研究中,基于植被指数的草原植被地上鲜重估算模型精度更高,植物群落地上生物量鲜重部分与植物含水量有密切关系^[22-23],根据我们的观测结果,呼伦贝尔草原地上植物平均含水量(64.41%)明显高于典型草原(42.89%)。由于草原植被群落的复杂性以及人类活动的干扰,草原植被群落含水量不均一,可能是影响基于植被指数的草原地上鲜重、干重差异性的原因^[24]。

此外研究还发现,基于无人机多光谱影像的植被指数回归模型精度明显优于 Sentinel-2 影像植被指数回归模型。Sentinel-2 的空间分辨率为 10 m、20 m 和 60 m,受到混合像元的影响,对模型精度产生较大影响^[25]。与卫星遥感相比,无人机多光谱影像地面分辨率达到厘米级,在小空间尺度上反演地上生物量明显优势,在前人研究中,无人机最优估算模型精度达到 80% 以上,然而其研究区尺度小,仅在研究区域具代表性,如高燕等^[26]以无人机可见光影像多种可见光植被指数和可见光波段,成功估算了升金湖草滩植被地上生物量。由于卫星遥感具有覆盖面积广、获取信息量多、可用于动态监测等众多优点,但对于光学传感器而言,天气状况对数据获取影响大,且由于地物类型的复杂性和不确定性而普遍存在“同物异谱”和“异物同谱”现象^[27]。无人机较高的空间分辨率以及云下成像等特点恰好弥补光学卫星遥感的不足,此外,由于无人机时效性强、效率高等优势,在草原地上生物量估算中极大减少外业样本采集工作,同时可以大大提高生物量的反演精度和效率。本研究覆盖呼伦贝尔草原主要群落类型及利用方式,且由于无人机续航时间、成像清晰度等因素给精度带来一定误差,最优

估算模型精度稍低。

5 结 论

基于红边和近红外波段的植被指数 LCI 和 NDRE 对草原地上生物量响应更敏感,利用 LCI 和 NDRE 构建的生物量回归模型精度最高;基于无人机多光谱影像的植被指数—生物量模型模拟精度均优于卫星遥感影像,无人机以其高空间分辨率以及云下获取影像的优势,在小尺度上比卫星遥感更精确地反演草原地上生物量,研究结果可为草原生物量精准反演提供科学方法和依据。

参考文献 (References):

- [1] Fang Jingyun, He Jinsheng, Xiao Yu, *et al.* Spatial distribution of grassland biomass in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(4):491-498. [贺金生, 方精云, 朴世龙, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4):491-498.]
- [2] Zhao F, Xu B, Yang X C, *et al.* Remote sensing estimates of grassland aboveground biomass based on MODIS Net Primary Productivity (NPP): A case study in the Xilingol grassland of Northern China [J]. Remote Sensing, 2014, 6: 5368-5386. DOI:10.3390/rs6065368.
- [3] Jin Yunxiang, Xu Bin, Yang Xiuchun, *et al.* Remote sensing dynamic estimation of grass production in Xilinguole, Inner Mongolia [J]. Scientia Sinica (Vitae), 2011, 41 (12): 1185-1195. [金云翔, 徐斌, 杨秀春, 等. 内蒙古锡林郭勒盟草原产草量动态遥感估算[J]. 中国科学:生命科学, 2011, 41(12): 1185-1195.]
- [4] Li Suying, Li Xiaobing, Ying Ge, *et al.* Vegetation indexes-biomass models for typical semi-arid steppe—A case study for Xilinhot in Northern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1):23-31. [李素英, 李晓兵, 莺歌, 等. 基于植被指数的典型草原区生物量模型——以内蒙古锡林浩特市为例[J]. 植物生态学报, 2007, 31(1):23-31.]
- [5] Yan Ruirui, Tang Huang, Ding Lei, *et al.* Natural mowing grassland resource distribution and biomass estimation based on remote sensing in Hulunber [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 210-218. [闫瑞瑞, 唐欢, 丁蕾, 等. 呼伦贝尔天然打草场分布及生物量遥感估算[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15):210-218.]
- [6] Wang Xiaolin, Wang Miaomiao, Wang Shaoqiang, *et al.* Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 152-159. [汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5):152-159.]

- [7] Batistoti J, Junior J M, Lítavo, *et al.* Estimating pasture biomass and canopy height in Brazilian Savanna using UAV photogrammetry[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20):2447-2459.
- [8] Zhang Zhengjian, Li Ainong, Bian Jinhu, *et al.* Estimating aboveground biomass of grassland in Zoige by visible vegetation index derived from unmanned aerial vehicle image[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(1):51-62.[张正健,李爱农,边金虎,等.基于无人机影像可见光植被指数的若尔盖草地上生物量估算研究[J].遥感技术与应用,2016,31(1):51-62.]
- [9] Sun Shize, Wang Chuanjian, Yin Xiaojun, *et al.* Estimating aboveground biomass of natural grassland based on multispectral images of unmanned aerial vehicles[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(5):848-856.[孙世泽,汪传建,尹小君,等.无人机多光谱影像的天然草地生物量估算[J].遥感学报,2018,22(5):848-856.]
- [10] Zhang Ya, Yin Xiaojun, Wang Weiqiang, *et al.* Estimation of grassland aboveground biomass using Landsat-8 OLI satellite image in the Northern Hillside of Tianshan Mountain[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(6):1012-1021.[张雅,尹小君,王伟强,等.基于Landsat-8 OLI遥感影像的天山北坡草地上生物量估算[J].遥感技术与应用,2017,32(6):1012-1021.]
- [11] Wang Xu, Yan Yuchun, Yan Ruirui, *et al.* Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18):5631-5635.[王旭,闫玉春,闫瑞瑞,等.降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响[J].生态学报,2013,33(18):5631-5635.]
- [12] Wang Xu, Yan Ruirui, Deng Yu, *et al.* Effect of grazing on the temperature sensitivity of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe[J]. *Environment Science*, 2014, 35(5):1909-1914.[王旭,闫瑞瑞,邓钰,等.放牧对呼伦贝尔草原土壤呼吸温度敏感性的影响[J].环境科学,2014,35(5):1909-1914.]
- [13] Gao Yan, Liang Zeyu, Wang Biao, *et al.* UAV and satellite remote sensing images based aboveground biomass inversion in the meadows of Lake Shengjin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2):517-528.[高燕,梁泽毓,王彪,等.基于无人机和卫星遥感影像的升金湖草滩植被地上生物量反演[J].湖泊科学,2019,31(2):517-528.]
- [14] Wang Hanghang, Wang Jie, Cui Yuhuan, *et al.* Remote sensing monitoring on spatial differentiation of suspended sediment concentration in a river-lake system based on Sentinel-2 MSI imaging: A case for Shengjin Lake and connected Yangtze River section in Anhui Province[J]. *Environment Science*, 2020, 41(3):1207-1216.[王行行,王杰,崔玉环,等.基于Sentinel-2 MSI影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测:以安徽省升金湖与连接长江段为例[J].环境科学,2020,41(3):1207-1216.]
- [15] Zhang Yannan, Niu Jianming, Zhang Qing, *et al.* A discussion on applications of vegetation index for estimating aboveground biomass of typical steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(1):229-238.[张艳楠,牛建明,张庆,等.植被指数在典型草原生物量遥感估测应用中的问题探讨[J].草业学报,2012,21(1):229-238.]
- [16] Xie Lan, Gao Donghong. The application and comparison of different nonlinear fit methods[J]. *Journal of Mathematics in Practice and Theory*, 2009, 39(10):117-121.[谢兰,高东红.非线性回归方法的应用与比较[J].数学的实践与认识,2009,39(10):117-121.]
- [17] Yi Qiuxiang. Remote estimation of cotton LAI using Sentinel-2 multispectral data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(16):189-197.[易秋香.基于Sentinel-2多光谱数据的棉花叶面积指数估算[J].农业工程学报,2019,35(16):189-197.]
- [18] Guerini Filho, Kuplich, Quadros. Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel-2 remote sensing data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(8):2861-2876. DOI: 10.1080/01431161.2019.1697004.
- [19] Guo Yunkai, Liu Yuling, Xu Min, *et al.* Modeling and analysis of red edge index estimated by leaf Area Index in road vegetation[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(1):93-98.[郭云开,刘雨玲,许敏,等.植被叶面积指数估算的红边指数建模分析[J].测绘科学,2021,46(1):93-98.]
- [20] Boochs F, Kupfer G, Dockter K, *et al.* Shape of the red edge as vitality indicator for plants[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(10):1741-1753. DOI: 10.1080/01431169008955127.
- [21] Penuelas F J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(7):1459-1470. DOI: 10.1080/01431169408954177.
- [22] Zhao Yingshi. The principle and method of analysis of remote sensing application[M]. Beijing: Science Press, 2003.[赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2003.]
- [23] Dong Jianjun. Yield estimation of typical grassland based on multi-source satellite data: A case study of Xilin River Basin[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2013.[董建军,基于多源卫星数据的典型草原遥感估产研究——以锡林河流域为例[D].呼和浩特:内蒙古大学,2013.]
- [24] Liu Hong, Guo Wenli, Quan Weijun. Climatic division of the types and yields of grassland in Inner Mongolia[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, 22(3):329-335.[刘洪,郭文利,权维俊.内蒙古草地类型与生物量气候区划[J].应用气象学报,2011,22(3):329-335.]

- [25] Lai Qiang, Li Qingfeng, Morigen Aoqier, *et al.* A study on factors affecting moisture content measurement and ratio of forage fresh weight to dry weight[J]. Chinese Journal of Grassland, 2008, 30(4):73-77.[来强, 李青丰, 莫日根敖其尔, 等. 影响牧草含水量测定以及牧草干鲜比的主要因素[J]. 中国草地学报, 2008, 30(4):73-77.]
- [26] Gao Yan, Liang Zeyu, Wang Biao, *et al.* UAV and satellite remote sensing images based aboveground biomass inversion in the meadows of Lake Shengjin[J]. Journal of Lake Science, 2019, 31(2):215-226.[高燕, 梁泽毓, 王彪, 等. 基于无人机和卫星遥感影像的升金湖草滩植被地上生物量反演[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2):215-226.]
- [27] Zeng Na, Ren Xiaoli, He Honglin, *et al.* Estimation of grassland aboveground biomass in Three-river Headwaters region based on neural network[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(1):59-66.[曾纳, 任小丽, 何洪林, 等. 基于神经网络的三江源区草地地上生物量估算[J]. 环境科学研究, 2017, 30(1):59-66.]

Research of Grassland Aboveground Biomass Inversion based on UAV and Satellite Remoting Sensing

Li Shuzhen, Xu Dawei, Fan Kaikai, Chen Jinqiang, Tong Xuze,
Xin Xiaoping, Wang Xu

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences,
Beijing 100081, China)

Abstract: Grassland biomass is an important parameter to evaluate the grassland ecosystem function. To estimate the grassland aboveground biomass rapidly, accurately and effectively, six vegetation indices (GNDVI, LCI, NDRE, NDVI, OSAVI and EVI) were selected and calculated based on UAV multi-spectral images and satellite remote sensing (Sentinel-2) images, combined with the ground measured biomass data. The vegetation index regression model was established, and the precision was verified by the left one method. The results showed that the accuracy of LCI-biomass regression model ($RRMSE = 18\%$, the measured and predicted $R^2 = 0.70$) and NDRE-biomass model ($RRMSE = 18\%$, the measured and predicted $R^2 = 0.71$) based on UAV multi-spectral images was higher than that of other vegetation-biomass models. The biomass-vegetation index models based on UAV multi-spectral images ($RRMSE$ lower than 22%) have better simulation accuracy than Sentinel-2 biomass-vegetation index models ($RRMSE$ higher than 25%), which can more accurately retrieve the aboveground biomass of Hulunbuir grassland. The results can provide scientific methods and basis for accurate retrieval of grassland biomass.

Key words: UAV; Sentinel-2; Aboveground biomass; Red edge; Vegetation index