



联合Sentinel-1与Sentinel-2数据的青藏高原东缘草地地上生物量反演

孙剑 杜忠 林用智 王杰

Inversion of aboveground biomass of grassland on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau combined with Sentinel-1 and Sentinel-2 data

SUN Jian, DU Zhong, LIN Yongzhi, WANG Jie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0456>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

青藏高原高寒草甸退化对草地群落生物量及其分配的影响

Effect of rangeland degradation on biomass allocation in alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China

草业科学. 2021, 38(8): 1451 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0710>

牦牛放牧强度对青藏高原东缘高寒草甸群落结构与土壤理化性质的影响

Effects of grazing intensity on community structure and the soil's physical and chemical properties in an alpine meadow on the Eastern Qinghai-Tibet Plateau

草业科学. 2019, 36(4): 1022 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0046>

青藏高原东缘高寒草甸区欧拉型藏羊生长发育规律

The growth and development of Oula-type Tibetan sheep in an alpine meadow area at the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau

草业科学. 2017, 11(2): 396 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0383>

青藏高原东缘高原鼯鼠种群抗药性评估

Anticoagulant resistance evaluation in plateau zokor (*Eospalax baileyi*) based on *Vkorc1* gene variation in eastern Qinghai-Tibetan Plateau

草业科学. 2019, 36(11): 2952 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0007>

不同放牧制度对土壤种子库的影响——以青藏高原东缘高寒草甸为例

Effect of grazing systems on soil seedbank: A case study of an alpine meadow in the eastern Qinghai-Tibet Plateau

草业科学. 2018, 12(4): 791 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0271>

青藏高原草地联户经营对牧民非农就业与收入的影响：基于青海与甘肃牧区调查数据的实证分析

The impact of multi-household rangeland operation on non-agricultural employment and household income in the Qinghai-Tibet Plateau: An empirical analysis based on Qinghai and Gansu survey data

草业科学. 2021, 38(12): 2524 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0166>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0456

孙剑, 杜忠, 林用智, 王杰. 联合 Sentinel-1 与 Sentinel-2 数据的青藏高原东缘草地地上生物量反演. 草业科学, 2023, 40(8): 1977-1987.

SUN J, DU Z, LIN Y Z, WANG J. Inversion of aboveground biomass of grassland on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau combined with Sentinel-1 and Sentinel-2 data. Pratacultural Science, 2023, 40(8): 1977-1987.

联合 Sentinel-1 与 Sentinel-2 数据的青藏高原东缘草地地上生物量反演

孙剑, 杜忠, 林用智, 王杰

(西华师范大学地理科学学院, 四川南充 637009)

摘要: 为探究协同主被动遥感在估算草地地上生物量 (AGB) 方面的潜力, 本研究以青藏高原东缘阿坝藏族羌族自治州红原县为研究区, Sentinel-1 SAR 数据和 Sentinel-2 多光谱影像为数据源, 采用多元线性回归、逐步回归、半经验物理模型方式进行建模, 探究 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据协同反演草地 AGB 的能力。结果表明, 协同反演精度优于 Sentinel-2 单一数据源反演精度 (多元线性回归模型的模型精度 R^2 从 0.74 增加到了 0.83)。另外, 联合 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据, 采用逐步回归方法建立 AGB 模型, 模型精度 R^2 达到了 0.78; 半经验物理模型的模型精度 R^2 为 0.77。总体上, Sentinel-1 影响因子能在一定程度上提高了反演模型精度, 多种建模方式最终反演的 AGB 结果与实测草地 AGB 相符, 研究结果可为研究区乃至整个青藏高原东缘草地 AGB 精确估算提供科学依据。

关键词: 回归分析; 半经验物理模型; 协同反演; 地上生物量; Sentinel-1; Sentinel-2; 红原县

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2023)08-1977-11

Inversion of aboveground biomass of grassland on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau combined with Sentinel-1 and Sentinel-2 data

SUN Jian, DU Zhong, LIN Yongzhi, WANG Jie

(College of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China)

Abstract: The aim of this study was to explore the application potential of collaborative active and passive remote sensing in aboveground biomass (AGB) estimation of grassland. In this study, Hongyuan County, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, on the eastern edge of the Qinghai-Tibetan Plateau was used as the study area. We investigated the ability to retrieval grass AGB by combining Sentinel-1 and Sentinel-2 data, using multiple linear regression, stepwise regression, and semi-empirical physical modeling, with Sentinel-1 synthetic aperture radar data and Sentinel-2 multispectral images as the data sources. The results showed that the cooperative inversion accuracy was better than the inversion accuracy of the Sentinel-2 single-data source (the accuracy, R^2 , of the multiple linear regression model increased from 0.74 to 0.83). In addition, combining Sentinel-1 and Sentinel-2 data with stepwise regression, the AGB model accuracy (R^2) was 0.78, and the semi-empirical physical model accuracy (R^2) was 0.77. In general, the Sentinel-1 influence factor improved the accuracy of the inversion model to some extent, and the final inverse AGB results from multiple modeling approaches were consistent

收稿日期: 2022-05-31 接受日期: 2022-11-26

基金项目: 第三次新疆综合科学考察子项目“空天地网一体化监测综合集成系统构建 (2021xjkk140502)”; 西华师范大学青藏高原东缘高寒牧区生态保护与高质量发展研究创新团队 (CXTD2020-3); 南充市应用技术与开发专项项目 (17YFZJ0014)

第一作者: 孙剑 (1995-), 男, 四川广元人, 在读硕士生, 研究方向为遥感数字图像处理与数据挖掘。E-mail: sunjian_cwnu@163.com

通信作者: 王杰 (1984-), 男, 四川南充人, 讲师, 博士, 研究方向为遥感数字图像处理与数据挖掘。E-mail: wangjie308@mails.ucas.ac.cn

with the measured grassland AGB. The results of this study provide a scientific basis for the accurate estimation of AGB in the study area and even the eastern edge grassland of the whole Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: regression analysis; semi-empirical physical model; co-inversion; aboveground biomass; Sentinel-1; Sentinel-2; Hongyuan County

Corresponding author: WANG Jie E-mail: wangjie308@mails.ucas.ac.cn.

草地资源具有重要的经济价值和生态功能,在畜牧业发展、生物多样性保护、缓解全球气候变化等方面起着至关重要的作用^[1-4]。青藏高原的高寒天然草地受人类干扰和气候变化的影响较大。近年来,供水不足、过度放牧、草地利用率低下等原因导致高寒草地出现了不同程度退化现象^[5]。灌丛化的加重,导致牧草生产减少,草地生态系统逐步遭到破坏。因此,利用遥感技术进行大面积、及时有效地评估草地地上生物量(aboveground biomass, AGB),对高寒草地及青藏高原生境质量的保护具有重要现实意义。

目前,光学遥感数据已被广泛用于基于统计模型的生物量估算^[6-7]。但光学影像易受云雾影响,使得传感器无法准确获取地物信息,且在中度或高度的植被密度中存在过饱和问题^[8]。相较于光学传感器,合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)波长较长,不受云雾影响,对地表植被有一定的穿透性,能较为准确地获取植被的结构信息。因此,SAR数据逐渐成为草地生物量研究中的重要数据源^[9]。Moreau和Toan^[10]发现C波段雷达数据ERSAR的后向散射系数对植被生物量很敏感,并与草地生物量之间建立对数统计回归模型,反演了安第斯湿地牧草生物量。Santos等^[11]使用P波段多极化AirSAR数据,采用指数模型和多项式模型成功反演了巴西亚马逊河流域热带雨林的主生林和次生林植被生物量。随着遥感技术和研究方法的发展,有效地结合光学数据和微波数据的优势,利用经验模型、多元线性回归等方法反演植被生物量已成为一种研究趋势。同时,高空间分辨率的SAR和多光谱数据为提升AGB反演精度提供了更多可能性,如欧空局(<https://www.esa.int/>)哨兵系列卫星数据,其中Sentinel-1为SAR数据,Sentinel-2为多光谱数据,两者分辨率可增强到10m,适用于AGB的估算^[12]。潘磊等^[13]结合Sentinel-1与Sentinel-2数据,以福建省三明市将乐国有林场为研究区,利用多元线性逐

步回归方法,探索联合Sentinel-1与Sentinel-2在估算森林AGB方面的优势,其调整决定系数(R^2_{adj})达到了0.575,相较于仅使用Sentinel-2数据提升了0.064。而Chang和Shoshany^[14]结合Sentinel-2 NDVI及Sentinel-1 VH极化的后向散射系数建立的半经验物理模型,联合估算了地中海灌木林AGB,融合模型的决定系数(R^2)达到了0.866,也取得了很好的反演精度。综上,基于仅使用光学数据或微波数据估算草地AGB已有大量研究,但多模态数据和相应特征参数的选择对草地AGB反演建模仍有发展空间,另外关于草地AGB估算的研究方法多种多样,但旨在对比分析不同模型反演精度和区别的研究较少。

因此,本研究以红原县为研究区,联合Sentinel-2数据、Sentinel-1数据,利用多元线性回归、半经验物理模型等方式建立草地AGB遥感反演模型,用留一交叉验证法对反演精度进行评价,最终得到了红原县草地AGB,实现了红原县草地AGB的数字制图,以期优化AGB遥感反演模型、青藏高原地区的草地保护与生态建设等提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

红原县地处四川省西北部、阿坝藏族羌族自治州的中部,位于101°51′~103°22′ E, 31°51′~33°33′ N,属青藏高原的东南缘。年平均气温为1.1℃,无明显季节变化。境内平均海拔3500m左右,红原县地势由东南向西北倾斜,地貌由山原向丘状高原过渡,小盆地分布广泛。红原以寒草地和亚高山草地为主,境内天然草地面积达 $77.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占县境总面积的92.97%,属纯牧业县^[15]。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 样本采集与处理

野外数据采集时间为2021年8月。共设置了

10 个样区 (图 1), 样区的大小为 1 000 m × 1 000 m, 每个样区内设置 3~5 个样点。由于样区内草种类类型较多, 且空间分布不均匀, 在一个样点 (10 m × 10 m) 大小范围内按等边三角形布设 3 个 0.5 m × 0.5 m 的样方。实测时使用 GPS 记录 3 个样方中心 (等边三角形中心) 坐标, 并记录实测点位海拔、土壤类型和质地、草样本的株高等参数。草地 AGB 的获取方法: 在设定样方内齐地刈割, 并现场记录其鲜重, 返回实验室后用烘箱烘干至恒重, 并记录干草重, 最后求取 3 个样方干草重量的平均值作为该样点的生物量。本次在 10 个样区内共设定 132 个样方, 采集草地 AGB 样本共 44 个, 剔除数据处理过程中造成 AGB 损失的数据, 确定样本数据 40 个。从每个样区均选取 2~4 个样点 (共 30 个样点) 用于构建反演模型, 其余 10 个样点用于模型精度检验。

1.2.2 遥感数据预处理

Sentinel-2 数据获取及预处理。 Sentinel-2 影像为光学影像, 受云层干扰较大。本研究以红原试验区域同一时期 4 景云量较少的 Sentinel-2 影像 (云量 < 10%) 为研究数据, 数据来源于美国 USGS 网站 (<https://earthexplorer.usgs.gov>)。使用欧洲空间局 SNAP 8.0 对 L2A 级数据 (已经过大气校正) 进行超级分辨率增强, 将影像分辨率增强至 10 m, 然后导

入 ENVI 5.3 进行镶嵌、裁剪等操作。处理完成后, 使用 B12、B8A、B2 波段合成显示, 结果如图 2(a) 所示, 从波段合成图可看出研究区内无大片云雾遮挡, 色彩对比明显, 数据质量较高。

Sentinel-1 数据获取及预处理。 Sentinel-1 卫星由两颗极轨卫星 A 星和 B 星组成, 搭载有 C 波段的合成孔径雷达 (SAR), 其空间分辨率为 10 m × 10 m, 包含 VH 和 VV 两种极化方式。为了减少由天气因素、 Sentinel-2 与 Sentinel-1 过境时间不同而引起的误差, 选阿拉斯加数据中心 (<https://search.asf.alaska.edu/>) 提供的与 Sentinel-2 同日过境的 Sentinel-1 GRD 产品为研究数据, 该影像覆盖了整个研究区, 并用 SNAP 8.0 对 GRD 数据进行预处理和信息提取。将提取的 VV、VH 极化的 C 波段数据导入 ENVI 5.3 进行裁剪, 并交叉合成显示, 结果如图 2(b) 所示。

植被指数和叶面积指数。植被指数 (vegetation index, VI) 能反映植被生长和覆盖状况, 可作为植被覆盖及变化监测的标志^[8], 能从宏观上快速准确地分析草地生长状况。本研究从 Sentinel-2A 影像中获取了 5 个植被指数 (表 1)。草地 AGB 与植被指数之间有着良好的正相关关系^[16]。因此, 可用这 5 个植被指数与实测样本相结合, 构建 AGB 估算模型。

叶面积指数 (leaf area index, LAI) 是监测植被生

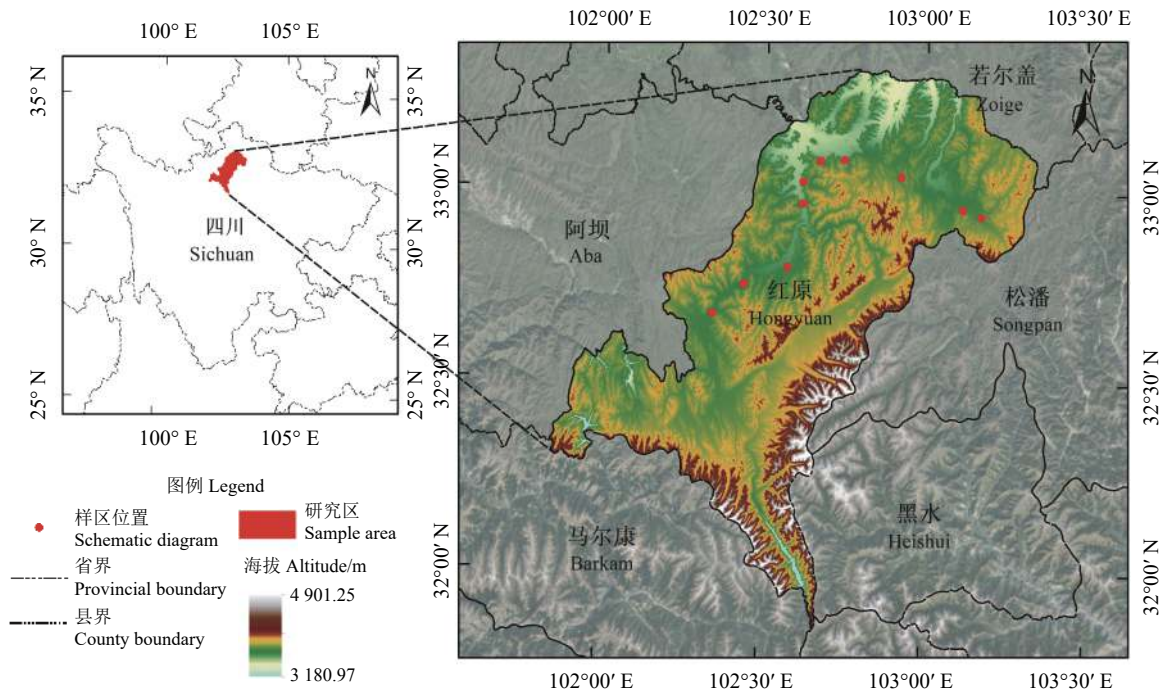


图 1 研究区位置及样区示意图

Figure 1 Location of the study area and schematic diagram of the sample area

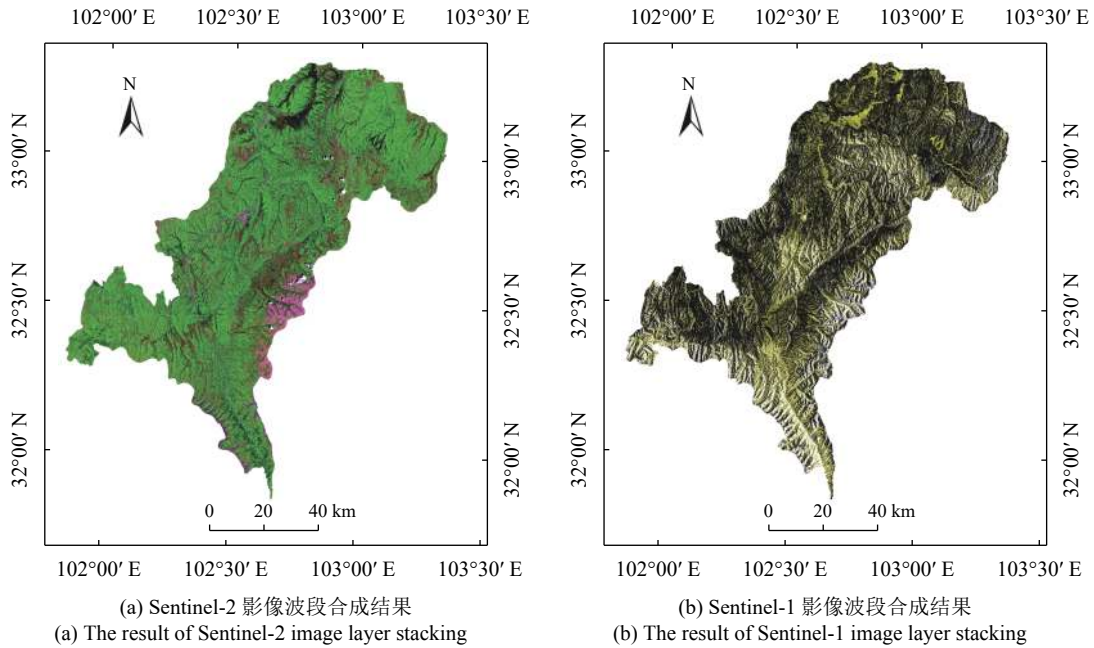


图 2 Sentinel 影像预处理结果

Figure 2 Results of Sentinel image pre-processing

长状况和预测产量的重要变量，也常被用于全球空间尺度的作物生长监测、作物病虫害监测和产量估算等^[17]。针对 Sentinel-2 影像，SNAP 8.0 提供了特定的模块来获取叶面积指数，步骤如下：先将影像重采样到 10 m；再使用 SNAP 8.0 内置的生物物理

处理器导出 LAI。这个生物物理过程使用了 Sentinel-2 影像的 8 个波段 (B3、B4、B5、B6、B7、B8A、B11、B12) 并考虑了太阳天顶角、方位角等参数。SNAP 反演的 LAI 和实测的 LAI 总体一致，表明可用于大规模的植被监测^[18-19]。

表 1 Sentinel-2 植被指数及计算公式
Table 1 Sentinel-2 vegetation index and calculation formula

| 变量名称 Name of variable | 属性 Attributes | 计算公式 Calculation formula |
|--------------------------|---|---|
| NDVI | 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index | $NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$ |
| DVI | 差值植被指数 Difference vegetation index | $DVI = NIR - RED$ |
| RVI | 比值植被指数 Relative vegetation index | $RVI = \frac{NIR}{RED}$ |
| EVI | 增强型植被指数 Enhanced vegetation index | $EVI = 2.5 \times \frac{NIR - RED}{NIR + 6.0 \times RED - 7.5 \times BLUE + 1}$ |
| GNDVI | 绿度植被指数 Green normalized difference vegetation index | $GNDVI = \frac{(NIR - GREEN)}{(NIR + GREEN)}$ |

NIR代表Sentinel-2影像的B8(近红外)波段, RED代表B4(红)波段, BLUE代表B2(蓝)波段, GREEN代表B3(绿)波段。

NIR represents the B8 (Near Infrared) band of Sentinel-2 imagery; RED represents the B4 (Red) band; BLUE represents the B2 (Blue) band; GREEN represents the B3 (Green) band.

1.3 研究方法

1.3.1 回归分析

回归分析 (regression analysis) 是生物量遥感估测中使用较广泛的分析方法, 能够表现两个 (多个) 相关变量间的定量关系。其中多元线性回归模

型 (复线性回归模型) 通常用于研究一个因变量与多个自变量的函数关系。其数学表达式为:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + C. \quad (1)$$

式中: Y 是因变量 (生物量的值), a_0 是常数项, X 是自变量 (遥感影像因子), X_1, \dots, X_n 是随机的变量,

a_1, \dots, a_n 为回归系数, C 为误差项。

逐步回归的基本方法是将变量逐一引入模型, 并对引入变量计算偏回归平方和, 经检验后剔除不显著的自变量, 从而建立最优的多元线性回归模型^[20]。

1.3.2 半经验物理模型构建

半经验物理模型综合了经验统计模型和物理模型的优点。模型所用的参数既有经验参数, 又具有一定的物理意义, 且模型表达也较为简洁。在宏观上, 草地的分布较为密集, 植被覆盖度高。相较于 Chang 和 Shoshany^[14] 研究的灌木, 红原县草地植被更浅, 8 月份草层高度大部分介于 0.15~0.45 m。因此, 利用 Sentinel-1 影像 C 波段能穿透草层到达地表的特点, 便能获取草层的结构信息。但草地上植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC) 的空间差异不大, 故在灌木 AGB 估算模型中调整 FVC 参数为 LAI, 构建了如下模型:

$$AGB = f(S2) \times \text{sqrt}[1 + f(S1) \times LAI \times e] \quad (2)$$

式中: AGB 为预测草地 AGB, $f(S2)$ 为根据 Sentinel-2 影像构建的草地 AGB 模型, $f(S1)$ 为根据 Sentinel-1 影像构建的体积回归函数, LAI 为叶面积指数, e 为系数。

1.3.3 精度评价

用均方根误差 (root mean squared error, RMSE)、平均相对误差 (mean relative error, MRE) 和决定系数 (R^2) 来评价反演预测值与实测值之间的精度和可信度。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2}{N - 1}}; \quad (3)$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - Y'_i|}{Y_i}}{N}; \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5)$$

式中: Y_i 、 Y'_i 分别为实测值、反演值, n 为样本数量, N 为预留样本数。 R^2 反映反演值与实测 AGB 之间的拟合程度, 当 R^2 越趋近 1, 表示反演 AGB 与实测

AGB 相关性越好。

2 结果与分析

2.1 草地地上生物量的模型构建

线性回归模型。经试验发现, 研究区内, Sentinel-1 VH dB 值与 AGB 之间的相关性优于 VV dB 值与 AGB 之间的相关性, 于是采用 VH dB 值构建模型 (表 2); 将 Sentinel-2 影像与采样点位置相结合, 提取出对应位置的 NDVI、DVI、RVI、EVI、GNDVI, 并结合实测生物量, 采用最小二乘回归的方法分别构建红原县草地 AGB 与上述各个植被指数之间的线性模型 (表 2)。

结果显示, 基于单一指标的线性回归模型中, NDVI、RVI、GNDVI 以及 LAI 与生物量之间有较高的拟合性, 其中, RVI 模型的拟合性最高, 决定系数 R^2 达到 0.61。多元回归模型中, 用 Sentinel-2 影像提取的 6 个因子建立的多元线性回归六参数模型以及 Sentinel-2 影像提取的 6 个因子结合 VH dB 值建立的多元线性回归七参数模型, 都有着较好的拟合精度, 在加入 VH dB 值后, 模型的 R^2 提升了 0.09, RMSE 减小了 $9.37 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, MRE 减小了 21.82%。采用逐步回归保留了 RVI 和 VH dB 值两个参数, 建立的模型相较于 AGB_{RVI} 模型, 决定系数 R^2 提升了 0.17, RMSE 减小了 $14.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, MRE 减小了 26.56%。

半经验物理模型。通过比较 Sentinel-2 影像的 5 个 AGB 估算模型, 选取最佳的 AGB_{RVI} 模型, 带入公式 (2), 替换 $f(S2)$ 参数, 再将公式 (5) 带入公式 (2), 替换参数 $f(S1)$, 便得到了一个包含 5 个系数 [其中 $f(S2)$ 含两个系数, $f(S1)$ 含两个系数, 再加上系数 e] 的半经验物理模型, 通过 IDL 8.5 程序设计平台, 运用曲线拟合方式, 以 30 个样本作为训练数据, 解算出 5 个系数, 分别为 110.945、7.432 55、-21.071 6、-1.361 20、0.145 245, 得到红原县草地 AGB 估算模型 [公式 (6)]。结果显示, 基于 Sentinel-2 和 Sentinel-1 的半经验物理模型, R^2 达到 0.77, RMSE 为 $43.88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, MRE 为 11.00%。

$$AGB = (7.432 55RVI + 110.945) \times \text{sqrt}[1 + (-1.361 20 \sigma_{VH}^0 dB - 21.071 6) \times 0.145 245 \times LAI] \quad (6)$$

表 2 回归模型建模精度
Table 2 Modeling accuracy of the regression model

| 类型 Type | 模型名称 Name of model | 模型 Model | 决定系数 R^2 | 均方根误差(RMSE) Root mean squared error/(g·m ⁻²) | 平均相对误差(MRE) Mean relative error/% |
|-----------------------------|-----------------------|--|---------------|---|--------------------------------------|
| 单一指标 Single indicator | AGB_{NDVI} | $y = -1\ 456.80 + 2\ 130.80x$ | 0.54 | 61.48 | 16.14 |
| | AGB_{DVI} | $y = -167.01 + 1\ 525.70x$ | 0.33 | 74.11 | 20.01 |
| | AGB_{RVI} | $y = 138.61 + 19.645x$ | 0.61 | 56.33 | 14.46 |
| | AGB_{EVI} | $y = -280.20 + 1\ 021.20x$ | 0.44 | 67.26 | 17.70 |
| | AGB_{GNDVI} | $y = -922.91 + 1\ 800.00x$ | 0.58 | 58.30 | 15.37 |
| | AGB_{LAI} | $y = -82.07 + 147.68x$ | 0.54 | 61.51 | 16.11 |
| | AGB_{VHdB} | $y = -628.47 - 51.409x$ | 0.44 | 68.54 | 16.91 |
| 多元回归 Multiple regression | $AGB_{Sentinel-2}$ | $y = -1\ 287.14 + 1\ 353.99NDVI - 6\ 207.69DVI - 9.67RVI + 3\ 964.15EVI + 42.49GNDVI + 77.43LAI$ | 0.74 | 46.36 | 11.96 |
| | $AGB_{Sentinel-1,2}$ | $y = -1\ 534.53 + 1\ 318.84NDVI - 3\ 980.34DVI - 4.26RVI + 2\ 520.66EVI - 126.58GNDVI + 53.21LAI - 28.26\sigma_{VHdB}^0$ | 0.83 | 36.99 | 9.35 |
| 逐步回归 Stepwise regression | $AGB_{Sentinel-2}$ | $y = 138.61 + 19.65RVI$ | 0.61 | 56.33 | 14.46 |
| | $AGB_{Sentinel-1,2}$ | $y = -487.96 + 15.97RVI - 34.68\sigma_{VHdB}^0$ | 0.78 | 42.21 | 10.62 |

AGB_{NDVI} : 基于归一化植被指数的地上生物量估算模型; AGB_{DVI} : 基于差值植被指数的地上生物量估算模型; AGB_{RVI} : 基于比值植被指数的地上生物量估算模型; AGB_{EVI} : 基于增强型植被指数的地上生物量估算模型; AGB_{GNDVI} : 基于绿色归一化植被指数的地上生物量估算模型; AGB_{LAI} : 基于叶面积指数的地上生物量估算模型; AGB_{VHdB} : 基于Sentinel-1 VH dB的地上生物量估算模型; $AGB_{Sentinel-2}$: 基于Sentinel-2影像的地上生物量估算模型; $AGB_{Sentinel-1,2}$: 基于Sentinel-1和Sentinel-2影像的地上生物量估算模型。

AGB_{NDVI} : aboveground biomass model based on normalized difference vegetation index; AGB_{DVI} : aboveground biomass model based on difference vegetation index; AGB_{RVI} : aboveground biomass model based on relative vegetation index; AGB_{EVI} : aboveground biomass model based on enhanced vegetation index; AGB_{GNDVI} : aboveground biomass model based on green normalized difference vegetation index; AGB_{LAI} : aboveground biomass model based on leaf area index; AGB_{VHdB} : aboveground biomass model based on VH dB of sentinel-1 images; $AGB_{Sentinel-2}$: aboveground biomass model based on Sentinel-2 images; $AGB_{Sentinel-1,2}$: aboveground biomass model based on Sentinel-1 and Sentinel-2 images.

2.2 模型反演生物量精度验证

为验证模型精度,本研究选用剩余的 10 个样本作为验证数据,并以 Sentinel-2 多元回归六参数模型、Sentinel-2 结合 Sentinel-1 多元回归七参数模型、Sentinel-2 结合 Sentinel-1 逐步回归模型以及半经验物理模型 4 个较优草地 AGB 反演模型为代表,获取 10 个样本对应的草地 AGB 反演值,将其与实测数据进行对比分析,使用误差值与实测值的百分比大小来评价反演的精度。

在 Sentinel-2 建立的多元回归六参数模型中(图 3),反演值与实测值之间的误差有 7 个点在实测值的 10% 以内,有两个点在 10%~20%,有 1 个点在 20%~30%,实测值与估测值对比分析结果的 R^2 为 0.644 8, RMSE 为 37.32 g·m⁻², MRE 为 8.20%; 以

Sentinel-2 结合 Sentinel-1 建立的多元线性回归七参数模型,有 4 个点在实测值的 10% 以内,有 5 个点在 10%~20%,有 1 个点在 20%~30%,实测值与估测值对比分析结果的 R^2 为 0.714 5, RMSE 为 38.99 g·m⁻², MRE 为 9.93%; 以 Sentinel-2 结合 Sentinel-1 逐步回归模型,模型的反演值与实测值之间的误差有 7 个点在实测值的 10% 以内,有 3 个点在 10%~20%,实测值与估测值对比分析结果的 R^2 为 0.789 1, RMSE 为 33.49 g·m⁻², MRE 为 8.11%; 用 Sentinel-2 结合 Sentinel-1 建立的半经验物理模型,模型的反演值与实测值之间的误差有 5 个点在实测值的 10% 以内,有 5 个点在 10%~20%,实测值与估测值对比分析结果的 R^2 为 0.821 4, RMSE 为 36.89 g·m⁻², MRE 为 8.37%。

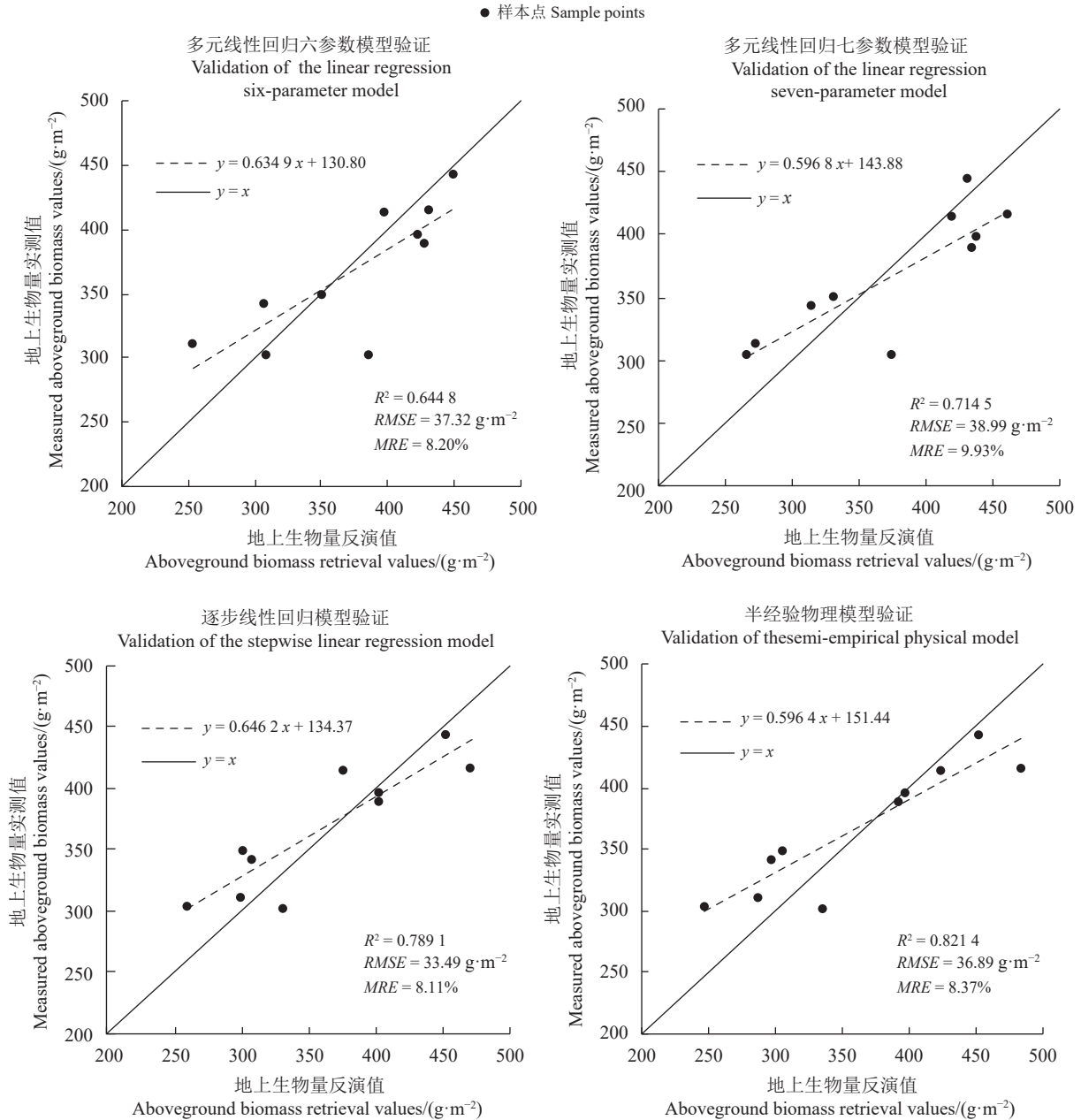


图 3 模型反演生物量结果精度验证

Figure 3 Accuracy validation of model retrieval biomass results

总体上, 上述的 4 个模型总体精度均较好, 在加入 Sentinel-1 的影响因子后, 与只用 Sentinel-2 建立的多元回归六参数模型相比, Sentinel-1 结合 Sentinel-2 多元回归七参数模型精度更高, 可用于红原县地区草地 AGB 的估算, 为草地生物量提供精确的评估和研究。

2.3 试验区域草地反演地上生物量制图

根据上述研究结果, 采用模型反演精度较高的 Sentinel-2 多元回归六参数模型、Sentinel-2 结合

Sentinel-1 多元回归七参数模型、Sentinel-2 结合 Sentinel-1 逐步回归模型以及半经验物理模型反演研究区 8 月份草地 AGB (图 4)。制图结果与草地实际分布状况一致, 在红原县境内大部分区域均有草地的分布, 尤其以中北部丘状高原最为典型。同时表现出明显的空间分布差异: 沙化地、裸地、水体内草地 AGB 接近于 0; 东南山原草地 AGB 大部分低于 100 g·m⁻²; 4 种模型反演的生物量制图结果整体一致, 均能准确展现红原县草地 AGB 的空间分布及其差异。

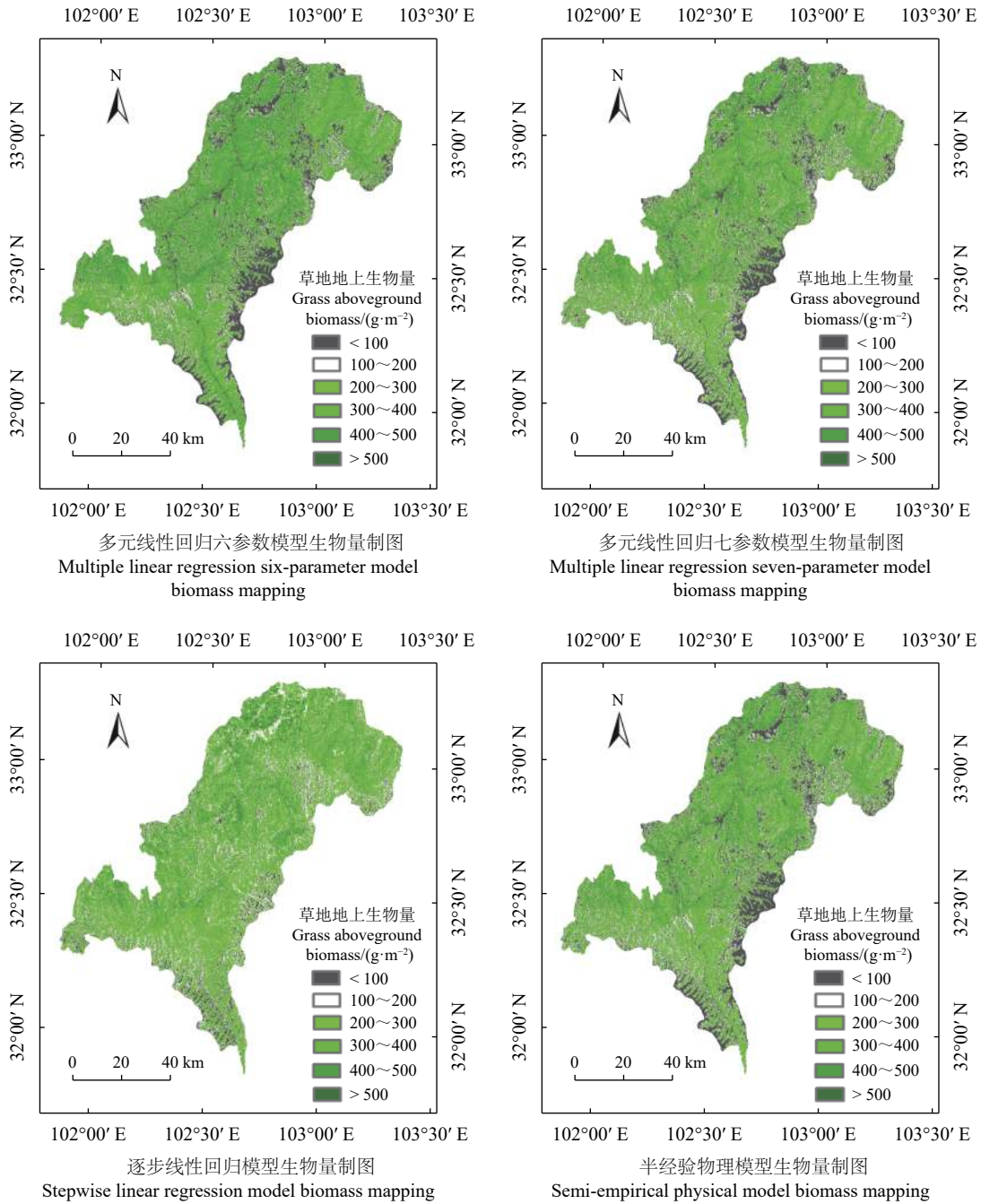


图 4 试验区草地地上生物量制图

Figure 4 Aboveground biomass mapping of grassland in the experimental area

3 讨论

从红原县草地 AGB 反演结果可以看出, 草地 AGB 较高值分布在中部和北部丘状高原地区, 其原因在于该区域有优质的牧草基地, 为保护草地, 合理利用草地资源, 当地实行草地围栏, 将草地划分为冬夏两季牧场, 极大程度上减小了放牧压力, 有利于推进牧场畜牧业可持续发展。东南山原草地

AGB 较低, 可能与东南山地海拔高差较大、地势较陡有关, 不利于牧草的生长。另外, 在适合草地生长但草地 AGB 较低的区域, 建议合理确定载畜量, 实行合理放牧, 继续加强防沙治沙、灭鼠种草等草地保护措施, 研究不同栽种模式的固沙效果, 改善土壤有机质及土壤水分状况。通过人力保护措施, 使草地能够继续发挥防风固沙、涵养水源、净化空气的作用, 提高草地植被盖度和草地生产力, 实现

红原县草地生态修复和畜牧业可持续发展。

本研究与前人的研究都证明了多光谱数据在估算 AGB 方面有较强的应用潜力^[6-7], 但受遥感技术、数据质量和建模方法等的限制, AGB 反演效果仍有提升空间。本研究中基于 Sentinel-2 多光谱数据单一指标的线性回归模型能较好地反演 AGB, 结合 Sentinel-1 与 Sentinel-2 特征参数的反演模型能进一步提升反演精度, 但对于生物量较大的样点, 仍存在预测草地 AGB 值小于实测草地 AGB 值的问题(图 3), 可能是 Sentinel-1 影像的 C 波段对植被生长旺盛、植被覆盖度较大区域的穿透能力有限, 不能较好地解决 Sentinel-2 多光谱影像反演生物量存在的过饱和问题。后续研究可以考虑使用波长更长的 L 波段或 P 波段来反演草地 AGB。

经验模型不涉及机理过程^[21], 与简单经验统计模型相比, 半经验物理模型所需参数较多, 但其以物理机理为依据, 并结合区域特征性参数, 能较好地反映区域实际情况。模型精度主要受自变量与因变量间相互关系的显著程度的影响。如本研究中仅根据实测的草地 AGB 参数与遥感影像特征参数构建的经验模型, 按照误差最小的原则筛选出构建模型所需的显著相关性因子, 从而得到较好的模型反演效果, 这在前人的研究中有所体现^[22-23]。而半经验模型既具有一定的物理学意义, 又通过引入经验系数改进模型假设的不足, 进而提升模型效果^[24]。如 Chang 和 Shoshany^[14] 提出的基于植被的生长形态形成的融合生物量模型(半经验物理模型)的准确率较传统的融合模型高 14% 左右。本研究也根据红原县的草地植被形态结构调整了 Chang 和 Shoshany^[14] 构建的反演模型中的 FVC 参数, 再结合草地植被的叶面积指数构建了半经验物理模型, 从而达到和经验模型等同的效果, 证明了半经验物

理模型在草地 AGB 反演中的实用性。

目前采用的反演模型相对传统, 建模的数据来源较单一, 后续可以基于 Lidar、SAR、多光谱影像等遥感数据, 使用机器学习方法以多模态遥感信息融合方式进行建模, 挖掘多模态数据在估测草地地上生物量的潜力。另外, 青藏高原东缘多为丘状高原, 区域内湿地较多, 地形起伏、土壤水分对雷达影像后向散射系数的影响较大, 今后可根据研究区的实际情况, 将地形、土壤水分的影响因素加入模型, 进一步细化草地上及地下生物量的反演研究, 这对红原县乃至整个青藏高原的草地生态质量监测及其固碳效应研究等都具有重要意义。

4 结论

本研究以青藏高原东缘阿坝藏族自治州红原县为研究区, 结合 Sentinel-1、Sentinel-2 主被动遥感影像和实测样地数据, 采用单一指标线性回归、多元线性回归、逐步回归及半经验物理模型方式建模, 对红原县草地 AGB 的反演模型效果和空间分布进行研究。结果表明: Sentinel-2 多光谱数据单一指标线性回归模型、Sentinel-2 多光谱数据多元线性回归模型与草地 AGB 之间有较高的拟合性; 结合 Sentinel-1 影响因子 VH dB 值建立的多元回归模型能进一步提高建模精度, 多元线性回归模型的模型精度 R^2 从 0.74 增加到了 0.83; 逐步回归模型 R^2 达到了 0.78, RMSE 为 $42.21 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$; 半经验物理模型 R^2 达到了 0.77, RMSE 为 $43.88 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, MRE 为 11.00%, 总体效果较好, 精度可靠, 可用于红原县草地 AGB 的估算; 草地 AGB 制图结果显示, 红原县草地 AGB 在中部和北部丘状高原地区较高 ($300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上区域较多), 东南山原草地 AGB 较低 ($100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下区域较多), 沙化地、裸地、水体内生物量接近于 0。

参考文献 References:

- [1] CARLYLE C N, FRASER L H, HADDOW C M, BINGS B A, HARROWER W. The use of digital photos to assess visual cover for wildlife in rangelands. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(6): 1366-1370.
- [2] SCURLOCK J M O, HALL D O. The global carbon sink: A grassland perspective. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 229-233.
- [3] CARDINALE B J, GROSS K, FRITSCHIE K, FLOBAUM P, FOX J W, RIXEN C, RUIJVEN J V, REICH P B, SCHERER-LORENZEN M, WILSEY B J. Biodiversity simultaneously enhances the production and stability of community biomass, but the effects are independent. *Ecology*, 2013, 98(8): 1697-1707.

- [4] ROGERS J, PARRISH C, WARD L, BURDICK D. Evaluation of field-measured vertical obscuration and full waveform lidar to assess salt marsh vegetation biophysical parameters. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 264-275.
- [5] 宋小艳, 王长庭, 胡雷, 刘丹, 陈科宇, 唐国. 若尔盖退化高寒草甸土壤团聚体结合有机碳的变化. *生态学报*, 2022, 42(4): 1538-1548.
SONG X X, WANG C T, HU L, LIU D, CHEN K Y, TANG G. Changes in soil aggregate-associated organic carbon of degraded alpine meadow in the Zoige Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(4): 1538-1548.
- [6] 张殿岱, 王雪梅, 咎梅. 基于Landsat 8 OLI影像的渭-库绿洲植被地上生物量估算. *草业学报*, 2021, 30(11): 1-12.
ZHANG D D, WANG X M, ZAN M. Estimation of above-ground vegetation biomass in Weih-Kuo Oasis based on Landsat 8 OLI image. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(11): 1-12.
- [7] 黄家兴, 吴静, 李纯斌, 秦格霞, 钱娟冰, 李怀海. 基于Sentinel-2和Landsat 8数据的天祝县草地地上生物量遥感反演. *草地学报*, 2021, 29(9): 2023-2030.
HUANG J X, WU J, LI C B, QIN G X, QIAN J B, LI H H. Remote sensing retrieval of grassland above-ground biomass in Tianzhu County based on Sentinel-2 and Landsat 8 Data. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(9): 2023-2030.
- [8] EISFELDER C, KUENZER C, DECH S. Derivation of biomass information for semi-arid areas using remote-sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(9): 2937-2984.
- [9] 吕丹红. 基于多源遥感数据的大安市草地地上生物量估算研究. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2019.
LYU D H. Estimation of grassland aboveground biomass based on multi-source remote sensing data in Daan City. Master Thesis. Changchun: Jilin University, 2019.
- [10] MOREAU S, TOAN T L. Biomass quantification of Andean wetland forages using ERS satellite SAR data for optimizing livestock management. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 477-492.
- [11] SANTOS J R, FREITAS C C, ARAUJO L S, DUTRA L V, JOSÉ C M, FÁBIO F G. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(4): 482-493.
- [12] MEER F D V D, WERFF H M A V D, RUITENBEEK F J A V. Potential of ESA's sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 148: 124-133.
- [13] 潘磊, 孙玉军, 王轶夫, 陈丽萍, 曹元帅. 基于Sentinel-1和Sentinel-2数据的杉木林地上生物量估算. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(3): 149-156.
PAN L, SUN Y J, WANG Y F, CHEN L P, CAO Y S. Estimation of aboveground biomass in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) forest combining data of Sentinel-1 and Sentinel-2. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 44(3): 149-156.
- [14] CHANG G J, SHOSHANY M. Mediterranean shrublands biomass estimation using Sentinel-1 and Sentinel-2. Beijing: 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016: 5300-5303.
- [15] 王敏, 高新华, 陈思宇, 冯琦胜, 梁天刚. 基于Landsat 8遥感影像的土地利用分类研究: 以四川省红原县安曲示范区为例. *草业科学*, 2015, 32(5): 694-701.
WANG M, GAO X H, CHEN S Y, FENG Q S, LIANG T G. The land use classification based on Landsat 8 remote sensing image: A case study of Anqu demonstration community in Hongyuan County of Sichuan Province. *Pratacultural Science*, 2015, 32(5): 694-701.
- [16] 赵慧芳, 李晓东, 张东, 校瑞香. 基于MODIS数据的青海省草地地上生物量估算及影响因素研究. *草业学报*, 2020, 29(12): 5-16.
ZHAO H F, LI X D, ZHANG D, XIAO R X. Aboveground biomass in grasslands in Qinghai Province estimated from MODIS data and its influencing factors. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(12): 5-16.
- [17] 江海英, 贾坤, 赵祥, 魏香琴, 王冰, 姚云军, 张晓通, 江波. 山地叶面积指数反演理论、方法与研究进展. *遥感学报*, 2020, 24(12): 1433-1449.
JIANG H Y, JIA K, ZHAO X, WEI X Q, WANG B, YAO Y J, ZHANG X T, JIANG B. Review on the theory, method, and research progress of leaf area index estimation in mountainous areas. *National Remote Sensing Bulletin*, 2020, 24(12): 1433-1449.

- [18] KGANYAGO M, MHANGARA P, ALEXANDRIDIS T, LANEVE G, OVAKOGLU G, MASHIYI N. Validation of sentinel-2 leaf area index (LAI) product derived from SNAP toolbox and its comparison with global LAI products in an African semi-arid agricultural landscape. *Remote Sensing Letters*, 2020, 11(10): 883-892.
- [19] VERRELST J, RIVERA J P, VEROUSTRAETE F, MUÑOZ-MARÍA J, CLEVERS J G P W, CAMPS-VALLS G, MORENO J. Experimental Sentinel-2 LAI estimation using parametric, non-parametric and physical retrieval methods: A comparison. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 108: 260-272.
- [20] 巨一琳, 姬永杰, 黄继茂, 张王菲. 联合LiDAR和多光谱数据森林地上生物量反演研究. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(1): 58-68.
JU Y L, JI Y J, HUANG J M, ZHANG W F. Inversion of forest aboveground biomass using combination of LiDAR and multispectral data. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 46(1): 58-68.
- [21] PHAM L T H, BRADYN L. Monitoring mangrove biomass change in Vietnam using SPOT images and an object-based approach combined with machine learning algorithms. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 128: 86-97.
- [22] 郭超凡, 陈泽威, 张志高. 基于最优模型选择的牧草地上生物量遥感估算研究. *草地学报*, 2021, 29(5): 946-955.
GUO C F, CHEN Z W, ZHANG Z G. Estimation of aboveground biomass of herbage by remote sensing based on optimal model selection. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(5): 946-955.
- [23] 李淑贞, 徐大伟, 范凯凯, 陈金强, 佟旭泽, 辛晓平, 王旭. 基于无人机与卫星遥感的草原地上生物量反演研究. *遥感技术与应用*, 2022, 37(1): 272-278.
LI S Z, XU D W, FAN K K, CHEN J Q, TONG X Z, XIN X P, WANG X. Retrieval of grassland aboveground biomass based on UAV and satellite remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37(1): 272-278.
- [24] 行敏锋, 何彬彬. 主被动遥感数据协同估算干旱区草原植被生物量. *遥感技术与应用*, 2015, 30(6): 1122-1128.
XING M F, HE B B. Estimation of grassland vegetation biomass using active and passive remote sensing data. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(6): 1122-1128.

(责任编辑 张瑾)

2023 年第 8 期《草业科学》审稿专家

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 安沙舟 | 曹文侠 | 曾彦军 | 柴琦 | 常生华 | 常小峰 | 陈曙 | 崔霞 |
| 干友民 | 高兴祥 | 郭强 | 侯扶江 | 侯瑞星 | 黄琳凯 | 黄荣 | 李建龙 |
| 李克梅 | 李平 | 李文静 | 李志华 | 梁巧兰 | 刘华梁 | 刘琳 | 刘权 |
| 刘文献 | 马轩龙 | 孟凡华 | 庞哲 | 冉涛 | 王金牛 | 王三根 | 王志远 |
| 温璐 | 徐波 | 闫涛 | 杨全刚 | 杨宪龙 | 杨振安 | 游成铭 | 鱼小军 |
| 张程 | 张红霞 | 张仁平 | 郑琛 | 周俊 | 周玉科 | | |

承蒙以上专家对《草业科学》期刊稿件的审阅, 特此表示衷心的感谢!