

基于 Landsat 8 和 Sentinel-2 数据的 砒砂岩区生物量估算的差异性

刘雨晴^{1,2}, 闫峰^{1,2}, 陈俊翰^{1,2}, 何晨阳^{1,2}

(1.中国林业科学研究院 生态保护与修复研究所, 北京 100091; 2.中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要: [目的] 分析基于不同空间分辨率遥感影像估算的地上生物量(above ground biomass, AGB)差异,为遥感估算荒漠生态系统 AGB的研究中不同空间分辨率影像的选择提供依据。[方法] 在地面 AGB调查的基础上,结合 Landsat 8 与 Sentinel-2 影像建立 AGB-MSAVI 统计模型,对砒砂岩区 AGB进行了遥感估算,并分析不同植被覆盖区(高、中、低)AGB估算的差异性。[结果] Landsat 8 与 Sentinel-2 影像均能较好地实现 AGB估算,AGB估算结果在空间分布上具有相似性。基于 Landsat 8 和 Sentinel-2 数据估算 AGB模型平均相对误差分别为 13.41%和 11.42%,基于 Sentinel-2 数据的 AGB估算精度较高。[结论] 不同植被覆盖区 Sentinel-2 与 Landsat 8 数据估算的 AGB存在一定的差异,低植被覆盖和高植被覆盖区,两种遥感数据估算的 AGB差异相对较小;中植被覆盖区,遥感数据受到空间分辨率的制约,空间异质性影响相对显著,两种遥感数据估算的 AGB差异较大。高空间分辨率遥感影像对 AGB估算精度的提高具有一定效果。

关键词: 地上生物量; Landsat 8; Sentinel-2; 砒砂岩区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)04-0188-07

中图分类号: K903, S127

文献参数: 刘雨晴, 闫峰, 陈俊翰, 等.基于 Landsat 8 和 Sentinel-2 数据的砒砂岩区生物量估算的差异性[J].水土保持通报, 2022, 42(4):188-194. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.024; Liu Yuqing, Yan Feng, Chen Junhan, et al. Differences in biomass estimation in a feldspathic sandstone area by Landsat 8 and Sentinel-2 data [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4):188-194.

Differences in Biomass Estimation in a Feldspathic Sandstone Area by Landsat 8 and Sentinel-2 Data

Liu Yuqing^{1,2}, Yan Feng^{1,2}, Chen Junhan^{1,2}, He Chenyang^{1,2}

(1. Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry,

Beijing 100091, China; 2. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] Differences in above ground biomass (AGB) estimation based on remote sensing images with different spatial resolutions were analyzed, and a basis for the selection of different spatial resolution images for remote sensing estimation of AGB in desert ecosystems was provided. [Methods] Based on a ground-based AGB survey, the AGB-MSAVI statistical model was established by combining Landsat 8 and Sentinel-2 images to estimate AGB in a feldspathic sandstone area by remote sensing, and to analyze the differences between the two estimates in different vegetation coverage areas (high, medium, and low). [Results] Both Landsat 8 and Sentinel-2 images could estimate AGB well, and the spatial distributions of AGB estimation results were consistent. The mean relative errors for the AGB estimation models based on Landsat 8 and Sentinel-2 data were 13.41% and 11.42%, respectively, and the accuracy of AGB estimation based on Sentinel-2 data was relatively higher. There were some differences in AGB estimated by Sentinel-2 and Landsat 8 data in different vegetation coverage areas. [Conclusion] In the low and high vegetation coverage areas, the differences between AGB estimated by Sentinel-2 and Landsat 8 data were relatively

收稿日期:2021-12-01

修回日期:2022-01-29

资助项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项“面向埃及荒漠化防治技术研究与示范”(CAFYBB2019GB001)

第一作者:刘雨晴(1997—),女(汉族),山东省临沂市人,硕士研究生,研究方向为环境遥感。Email:975480570@qq.com。

通讯作者:闫峰(1973—),男(汉族),江苏省连云港市人,博士,副研究员,主要从事环境遥感和灾害学研究。Email: fyan@caf.ac.cn。

small. In contrast, in the medium vegetation coverage area, the spatial heterogeneity was relatively significant, the remote sensing data were constrained by the spatial resolution, and the differences between AGB estimated by the two images were relatively large. The high spatial resolution remote sensing images were effective for improving AGB estimation accuracy.

Keywords: aboveground biomass; Landsat 8; Sentinel-2; feldspathic sandstone area

地球表层生态系统碳循环与碳汇(源)问题在全球气候变化中扮演重要角色,与人类活动密切相关,在国际社会受到广泛的研究关注^[1-3]。植物碳库约占陆地生态系统蓄积的碳量的 1/3,植被作为碳循环中大气—植被—土壤循环系统的重要纽带,通过光合作用转化固定大气中的 CO₂ 和通过呼吸作用将 CO₂ 返回大气,在全球碳循环中起到重要作用。

2021年,中央财经委员会第九次会议报告中提出了要将碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局,力争2030年前实现碳达峰,2060年实现碳中和。这一生态目标需要通过节能减排、发展绿色低碳经济、增强植被碳汇等途径实现,切实做好陆地生态系统碳汇(源)对生态文明建设具有重要意义。荒漠生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,其植被的地上生物量(above ground biomass, AGB)是植被生物量碳汇评价的重要指标^[4-5],可以客观反映荒漠生态系统的固碳能力,揭示荒漠生态系统在全球变化的作用。因此估算荒漠生态系统生物量是评价荒漠地区植被碳汇的重要方法,更是总体评价中国碳平衡、陆地生态系统可持续性发展不可或缺的一环^[6]。传统生物量估算常常通过抽样调查方法采集点数据,采用样方统计法、经验估计法等,准确度较高但费时费力,难以实现 AGB 宏观动态监测。遥感技术的发展使得 AGB 的获取有着从“点”采集到“面”测量的飞跃,一定程度上弥补了 AGB 传统测量方法的不足,成为获取地上生物量的主要途径,具有广阔的应用前景^[7]。在遥感估算植被 AGB 方面,Zandler 等^[8]基于 Landsat OLI 与 RapidEye 数据采用逐步回归法、套索回归法、偏最小二乘法、脊回归法与随机森林方法对帕米尔高原荒漠地区的地上生物量进行估算,结果表明套索回归方法的估算生物量效果相对最好。Yadav 等^[9]整合森林资源、RS、GIS 技术即采用直接辐射关系(DRR)、K-近邻(K-NN)、传统协克里金(Cok)方法对森林生物量进行了估算,结果表明 K-NN 方法效果相对最好。Battude 等^[10]利用高分辨率 Sentinel-2 数据估算大面积玉米生物量与产量。国内学者在研究生物量遥感估算方面也取得了一定的成果,朴世龙等^[6]建立基于归一化植被指数 NDVI 的草地植被生物量估测模型,研究了中国草地生物量

及空间分布特征。刘占宇等^[11]利用光谱仪对内蒙古自治区锡林郭勒盟的天然草地进行高光谱遥感地面观测,从冠层尺度上对草地生物量进行量化。刘茜等^[12]分析了基于单源数据的参数化方法、基于多源数据的非参数化方法和基于机理模型的反演方法在森林地上生物量遥感估算中的应用。潘磊等^[13]利用 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据建立模型估算杉木地上生物量。菅永峰等^[14]利用高空间分辨率 GF-2 与 SPOT-6 卫星影像结合纹理特征与实测数据对北亚热带森林进行生物量估算。已有的生物量遥感估算研究主要针对于森林生态系统、草地生态系统、湿地生态系统、农田生态系统等,对荒漠生态系统的生物量遥感估算研究相对较少。

砒砂岩分布最典型区主要位于鄂尔多斯高原,其成岩程度低、沙粒间胶结程度差、结构强度低,是黄河粗泥沙的主要来源,砒砂岩区水土流失严重,生态环境十分脆弱。黄河流域生态保护作为国家重大战略,全面了解砒砂岩区的生态现状与治理措施,对砒砂岩区进行全面的生态评估和生态保护,对推动黄河流域地区进行重大生态保护、修复与建设具有积极的社会与经济意义^[15]。砒砂岩区植被生物量的估算对于全面了解植被生长与生态恢复状况,促进生态脆弱地区的可持续发展具有重要意义。砒砂岩地区地表异质性显著,不同空间分辨率的影像对地表信息的定量提取存在一定的差异^[16]。因此,本研究拟采用不同空间分辨率的 Landsat 8 数据与 Sentinel-2 数据,研究砒砂岩地区地上生物量遥感估算的差异性,为砒砂岩区生态治理与评估提供可靠的理论与技术支撑。

1 研究区概况

研究区位于 38°59′—39°40′N, 109°59′—110°44′E, 地处鄂尔多斯高原的内蒙古自治区与陕西省交界的毛乌素沙地北部,是中国覆沙砒砂岩主要分布区之一,也是中国北方农牧交错带的生态脆弱区。气候类型以温带大陆性气候为主,四季分明,雨热同期。多年平均气温 6~9℃,累计夏季平均日较差 12.2℃,冬季平均日较差 14.4℃,降水主要集中在 6—9月,年降水量 340~420 mm,主要降水空间特征为自西北向东南逐渐增多。日照时间较长,年日照时数为 2 740~3 100 h,年平均蒸发量 2 200~2 600 mm。

研究区土壤侵蚀现象严重,天然植被稀疏,属干旱草原,以荒漠草原群落、典型草原群落、沙生植物群落、局部滩地植被为主^[17],其植物群落的优势种和建群种为油蒿^[18];土壤类型以栗钙土、棕钙土、灰钙土为主^[19]。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

本研究采用与地面 AGB 实测调查准同步的 Landsat 8 与 Sentinel-2 数据。Landsat 8 数据重访周期相对较短、空间分辨率较高,在森林、湿地等不同生态系统地上生物量方面研究应用十分广泛^[20-22]。Sentinel-2 数据时间分辨率高、空间分辨率高且光谱信息丰富,在植被信息提取的研究中应用较广^[23-25]。研究采用的 Landsat 8OLI 遥感影像(Path/Row: 127/33)成像时间为 2019 年 8 月 23 日,空间分辨率为 30 m×30 m。Sentinel-2MSI 遥感影像(编号:T49 SDD)成像时间为 2019 年 8 月 27 日,空间分辨率为 10 m×10 m。所选影像成像时间天气晴朗、天空云量少,成像质量较好,此时对应地表植被生长状况相对良好,地物类型对比度相对明显。

2019 年 8 月下旬在研究区进行了地面植被 AGB 调查,在 AGB 测量时选取有代表性的 10 m×10 m 样方,用 GPS 记录采样点的位置,在每个样方内部选择 3 个 1 m×1 m 的小样方,采集地面以上茎叶部分称重记录进行烘干编号处理,取 3 个小样方测量值的平均值为该样地的 AGB,植被调查获取 47 个有效地面样方 AGB 数据(图 1)。

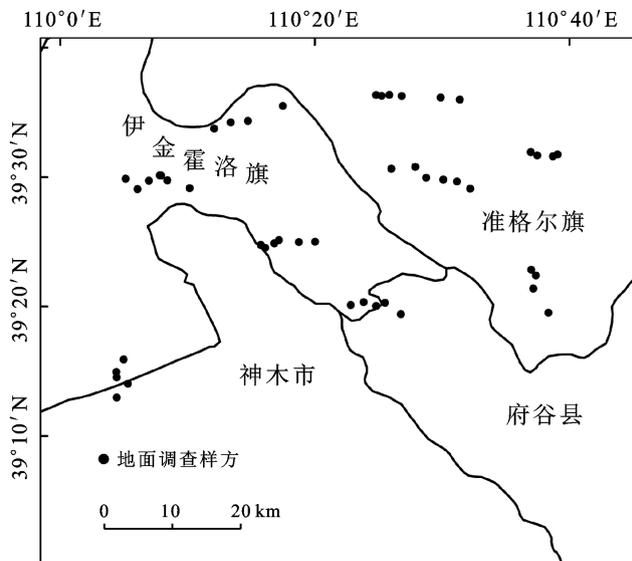


图 1 研究区调查样方分布图

2.2 研究方法

利用遥感影像不同波段线性或非线组合而成

植被指数可以反映地面植被的相关信息,植被指数作为卫星遥感数据中最具明确意义的指数之一,在反映植被生物量、植被覆盖状况、植被净生产力、植被生长程度^[26-28]等方面都有着重要作用^[29-31]。NDVI 作为应用最广的植被指数,在中等、较高植被覆盖地区对植被特征反应较为灵敏,但在植被覆盖度较低区域,NDVI 受下垫面土壤背景噪声信息影响较大。修正土壤调节植被指数(modified soil adjusted vegetation index, MSAVI)引入变量函数 L ^[32],植被信号的动态范围增大,可以减小荒漠地区的土壤背景影响,能够更好地实现植被信息提取与监测^[33]。砒砂岩地区植被覆盖度较低,土壤背景影响较大,因此本文选用能够较好消除土壤背景影响的 MSAVI 进行植被地上生物量的遥感估算。

$$MSAVI = (1 + \rho_{NIR}) - \frac{1}{2} \times \quad (1)$$

$$[(2 \times \rho_{NIR} + 1)^2 - 8 \times (\rho_{NIR} - \rho_R)]^{1/2}$$

式中: ρ_{NIR} 为近红外反射率; ρ_R 为可见光红波段反射率。

砒砂岩区植被稀疏,空间异质性明显。已有的砒砂岩区地上生物量研究表明,空间滤波可以在一定程度上抑制砒砂岩区因较多的裸露地表所显出的高频影像噪声^[34]。空间滤波处理方式较多,其中低通滤波(low pass filter, LPF)、中值滤波(median filter, MF)、高斯低通滤波(gaussian low pass filter, GLPF)等滤波处理图像具有平滑效果效果,均能一定程度上减小空间异质性以及影像与 GPS 定位误差的影响。砒砂岩地区的影像存在尖锐噪声,高斯低通滤波相对于其他滤波处理方法可以更好过滤图像的单点噪声从而减弱图像的“振铃”现象,处理后的植被指数与实测生物量的相关性最好,在滤波核尺度方面表现为 3×3 滤波核的滤波平滑结果与实测 AGB 之间的相关性最好,因此高斯低通 3×3 滤波核平滑处理对砒砂岩研究区具有较好的平滑效果。为了减小由于定位以及空间异质性等带来的误差,本文对 Landsat 8 与 Sentinel-2 影像数据计算出的 MSAVI 数据进行滤波平滑处理进而实现生物量遥感估算。

3 结果与分析

3.1 MSAVI 与 AGB 的相关性

将 Landsat 8 与 Sentinel-2 遥感影像反演的反射率带入公式(1)计算研究区的 MSAVI。本研究采用 3×3 尺度的滤波核的高斯低通滤波对 MSAVI 进行处理,在后文基于 Landsat 8 和 Sentinel-2 图像的

MSAVI 经 3×3 尺度高斯低通滤波后的数据分别表示为 $MSAVI_L$ 和 $MSAVI_S$ 。分析 3×3 滤波核尺度的高斯低通滤波 MSAVI 数据与 AGB 建立二维空间散点(图 2),分析实测 AGB 与 $MSAVI_L$, $MSAVI_S$ 相关性,结果表明 $MSAVI_L$ 在与 AGB 显著相关

($p < 0.01$),判定系数为 0.475 7, $MSAVI_S$ 与 AGB 显著相关($p < 0.01$),判定系数为 0.550 3。基于 Landsat 8 与 Sentinel-2 数据的 MSAVI 与砒砂岩研究区 AGB 实测数据均相关性显著, $MSAVI_S$ 数据与 AGB 相关性的判定系数高于 $MSAVI_L$ 。

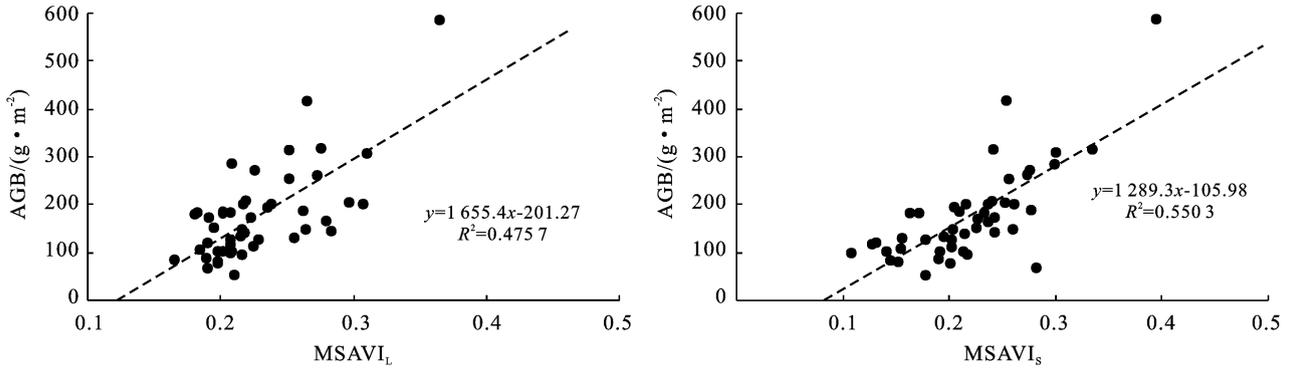


图 2 研究区修正土壤调节指数(MSAVI)与地上生物量(AGB)的相关性

3.2 AGB-MSAVI 模型

在众多的回归模型中,一元线性回归模型具有计算简单、表达直观、操作简单等特点而被广泛应用。本研究随机选取 30 个地面实测 AGB 结合同期不同数据源的 MSAVI 数据建立 AGB-MSAVI 一元线性回归模型:

$$AGB_L = 1683.9 \times MSAVI_L - 206.77 \quad (2)$$

$(R^2 = 0.4183, p < 0.01)$

$$AGB_S = 1102.7 \times MSAVI_S - 94.729 \quad (3)$$

$(R^2 = 0.5894, p < 0.01)$

式中: AGB_L 为基于 $MSAVI_L$ 的 AGB 估算值; AGB_S 为基于 $MSAVI_S$ 的 AGB 估算值。

为检验模型的实际应用效果与估算能力,用 17 个实测 AGB 样本点进行检验 AGB_L - $MSAVI_L$ 与 AGB_S - $MSAVI_S$ 估算模型。采用均方根误差(RMSE)与平均相对误差(MRE)对不同数据源的 AGB 拟合模型估算精度进行评价,样点带入验证后得到不同模型的 AGB 遥感估算误差评价结果(表 1)。

分析表 1 中基于不同数据源的遥感估算 AGB 误差,结果表明, AGB_L 估算模型 RMSE 为 58.598 3, MRE 为 0.134 1; AGB_S 估算模型 RMSE 为 38.257 3, MRE 为 0.114 2。两种遥感估算 AGB 模型中 MSAVI 与 AGB 相关性显著, RMSE 与 MRE 均相对较低, AGB_L - $MSAVI_L$ 与 AGB_S - $MSAVI_S$ 模型均能够较好实现砒砂岩区生物量估算。将 $MSAVI_L$ 与 $MSAVI_S$

分别代入基于多元遥感数据的不同像元尺度的生物量遥感估算模型公式(2)与公式(3),计算鄂尔多斯高原砒砂岩研究区 AGB(图 3)。AGB 估算结果表明,基于 Landsat 8 数据估算数据研究区 AGB 平均值为 180.07 g/m^2 ,基于 Sentinel-2 数据估算数据研究区 AGB 平均值为 165.71 g/m^2 。在 AGB 相对低值区 ($AGB < 50 \text{ g/m}^2$) 面积占比相对较少,主要分布在研究区北部的伊金霍洛旗东部、准格尔旗西南部和神木市北部,多集中于建筑物、水体、半固定沙地,以河流城镇为主体成斑块状分布,其余地区呈点状分布; AGB 中值区 ($50 \text{ g/m}^2 \leq AGB < 200 \text{ g/m}^2$) 所占面积比例较大,主要分布于研究区北部、西部的伊金霍洛旗中东部、准格尔旗西部和西南部以及神木市北部,在研究区呈片状分布; AGB 相对高值区 ($AGB \geq 200 \text{ g/m}^2$) 的面积比例介于低值与中值之间,主要分布在研究区北部、西南部和东南部的府谷县西部、神木市中北部和准格尔旗西南部,多集中于林地、耕地,在河流两侧形成条带状分布,部分呈现零星分布。不同数据源的遥感估算模型所估算的 AGB 在研究区的空间分布基本一致。

表 1 基于 Landsat 8 与 Sentinel-2 数据的 AGB 估算模型误差

模型	均方根误差 RMSE/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	平均相对误差 MRE/%
AGB_L - $MSAVI_L$	58.598 3	13.41
AGB_S - $MSAVI_S$	38.257 3	11.42

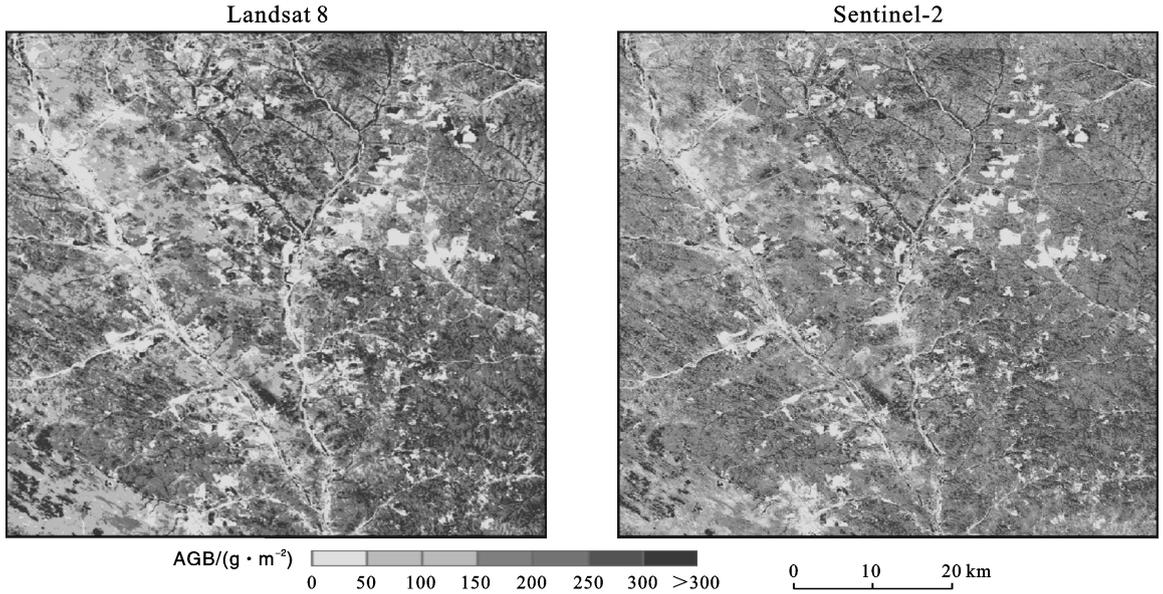


图 3 基于 Landsat 8 与 Sentinel-2 数据估算的研究区的植被地上生物量

3.3 AGB 估算差异性

基于 Landsat 8 和 Sentinel-2 数据的砒砂岩区 AGB 估算结果在空间分布上具有一致性,但是在具体数值分布方面也存在一定的差异性。植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC) 是刻画地表植被覆盖的重要参数,也是评判土地荒漠化程度的重要指标。已知地表信息近似由纯净植被信息与纯净土壤背景信息组成,则对应地表的遥感像元则由一定覆盖比例的纯净土壤背景像元与纯净植被像元表示。利用反映植被覆盖面积的比例的 FVC,针对不同植被覆盖水平比较 AGB 估算结果可以较为直观地反映出

生物量的估算受到遥感数据空间分辨率影响的大小。国家林业和草业局将植被覆盖度 40% 定为轻度与中度荒漠化沙地的划分指标^[35],根据不同外力作用条件下将植被覆盖度 70% 作为土地轻度荒漠化与未荒漠化的分级指标^[36],因此,对研究区按照低植被覆盖度区 ($0 \leq FVC < 0.4$)、中植被覆盖度区 ($0.4 \leq FVC < 0.7$) 和高植被覆盖度区 ($0.7 \leq FVC < 1$) 3 个植被覆盖度水平分析 AGB 估算的差异性。在 3 类等级植被覆盖区域内分别选取 3 个 $900 \text{ m} \times 900 \text{ m}$ 样方,计算每个样方 AGB 遥感估算值的最大值、均值,并以 AGB_L 样方数据为基准计算 AGB 均值的相对误差(表 2)。

表 2 基于 Landsat 8 与 Sentinel-2 遥感数据的植被地上生物量估算样方对比

样方编号	植被覆盖度 (FVC)	最大值/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)		均值/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)		相对误差/%
		Landsat 8	Sentinel-2	Landsat 8	Sentinel-2	
S ₁	0.35	777.85	658.66	109.16	93.81	14
S ₂	0.38	442.02	445.37	108.93	95.53	12
S ₃	0.39	364.32	312.99	92.97	100.19	8
S ₄	0.56	713.2	572.51	175.56	145.39	17
S ₅	0.62	398.78	438.16	200.44	162.06	19
S ₆	0.69	621.83	551.4	235.3	193.32	18
S ₇	0.71	528.97	572.87	242.66	205.55	15
S ₈	0.77	559.61	557.28	268.97	228.12	15
S ₉	0.78	587.83	507.59	264.09	223.87	15

在低植被覆盖区 ($0 \leq FVC < 0.4$), 样方 FVC 在 0.35~0.39 之间。AGB_L 与 AGB_S 样方最大值分别在 364.32~777.85 g/m^2 , 312.99~658.66 g/m^2 之间, 变化幅度较大。AGB_L 与 AGB_S 样方中 S₁, S₂, S₃ 的 AGB 均值分别在 92.97~109.16 g/m^2 , 93.81~

100.19 g/m^2 之间, 相对误差分别为 14%, 12%, 8%, 平均相对误差为 11%, 不同影像遥感估算 AGB 的样方均值差异相对较小。在中等植被覆盖区 ($0.4 \leq FVC < 0.7$), 样方 FVC 在 0.56~0.69 之间。AGB_L 与 AGB_S 样方最大值分别在 398.78~713.2 g/m^2 ,

438.16~572.51 g/m² 之间,变化幅度较大。AGB_L 与 AGB_S 样方中 S₄, S₅, S₆ 的 AGB 均值分别在 175.56~235.3 g/m², 145.39~193.32 g/m² 之间,相对误差分别为 17%, 19% 和 18%, 平均相对误差为 18%, 不同影像遥感估算 AGB 的样方均值差异中等。在高植被覆盖区(0.7≤FVC<1), 样方 FVC 在 0.71~0.79 之间。AGB_L 与 AGB_S 样方最大值分别在 528.97~587.83 g/m², 507.59~572.87 g/m² 之间,变化幅度较小。AGB_L 与 AGB_S 样方中 S₇, S₈, S₉ 的 AGB 均值分别在 242.66~268.97 g/m², 205.55~228.12 g/m² 之间,相对误差均为 15%, 不同影像遥感估算 AGB 的样方差异相对较小。AGB_L 样方最大值的变幅为 364.32~777.85 g/m², AGB_S 样方最大值的变幅为 312.99~658.66 g/m², 极值样方位于低植被覆盖区。AGB_L 样方均值的最小值为 92.97 g/m², 最大值为 268.97 g/m², 分别属于低植被覆盖区和高植被覆盖区; AGB_S 样方均值的最小值为 93.81 g/m², 最大值为 228.12 g/m², 分别属于低植被覆盖区和高植被覆盖区。随着样方区域植被覆盖度的增加, 基于不同空间分辨率影像遥感估算的 AGB 样方均值呈相应增加趋势, 且不同植被覆盖区样方 AGB 均值的相对误差均小于 20%, 基于不同空间分辨率影像遥感估算 AGB 数值变化趋势总体一致。AGB_L 与 AGB_S 在总体变化趋势上具有一致性, 通过分析不同植被覆盖区样方最大值和均值, 不同空间分辨率的 Landsat 8 与 Sentinel-2 影像估算 AGB 表现出一定的差异性。AGB_S 样方在均值与最大值总体略低于 AGB_L。样方 AGB 最大值在低、中等植被覆盖区的变幅较大, 在高植被覆盖区的变幅较小, 这一定程度上反映了研究区的 AGB 并非均匀变化的。样方 AGB 均值总体平均相对误差为 15%, 低植被覆盖区和高植被覆盖区 AGB 样方均值相对误差较小, 均小于或等于平均相对误差; 中等植被覆盖区 AGB 样方均值相对误差均大于平均相对误差, AGB_L 与 AGB_S 在中等植被覆盖区的差异性大于低、高植被覆盖区, 这意味着在植被覆盖度不同的区域, 遥感数据估算 AGB 在分布趋势相似的前提下依然存在一定的差异, 这可能是受到不同空间分辨率遥感数据的影响。

遥感数据估算 AGB 模型的精度受到数据源的空间分辨率高低的影响, 一般而言更高的分辨率在估算 AGB 中具有更好的优势^[14]。本文中选用的遥感影像为 Landsat 8 与 Sentinel-2 数据, 其空间分辨率分别为 30 和 10 m, 其 AGB 估算模型精度分别为 86.59% 和 88.58%, 均能较好估算研究区 AGB, 总体而言 Sentinel-2 用于估算 AGB 精度相对更好。砒砂岩区

地表植被的破碎化严重、空间异质性明显, 研究区连续数百平方米高植被覆盖度和低植被覆盖度区域相对较少, 中植被覆盖度面积占比相对较大。对应到遥感影像上, 植被和裸露地在较低空间分辨率影像上纯净像元相对较少, 植被与沙地交叠的混合像元占据研究区影像的绝大部分, 中等植被覆盖区遥感影像中表现为混合像元相对较多。混合像元影像的 DN 值可近似地等于像元内各种地物信息的加权平均值, 对于低植被覆盖度(如裸露地)和高植被覆盖度区, 研究区内 Landsat 数据的纯净像元对应到 Sentinel-2 数据像元植被信息差异较小; 中植被覆盖度区对应到 Landsat 8 影像为混合像元, 但对于 Sentinel-2 数据可能存在较多的混合像元和纯净像元, 这也使 Sentinel-2 数据对中植被覆盖度区的植被信息表达比 Landsat 8 更为精细, 进而使基于植被光谱信息拟合 AGB 的结果在中等植被覆盖区差异相对更大。空间分辨率是制约遥感数据估算 AGB 最主要的影响因素, 空间分辨率更高的 Sentinel-2 数据与 Landsat 8 数据相比 AGB 的估算精度较高, 结合研究区的面积以及植被分布特征选取相对更高空间分辨率的遥感影像对荒漠生态系统 AGB 遥感估算的应用十分重要。

4 结论

(1) MSAVI_L, MSAVI_S 与 AGB 相关性较好, R² 分别为 0.475 7 与 0.550 3, 能够较好实现 AGB 遥感估算。

(2) 随着样方区域内植被覆盖度的增加, AGB_L, AGB_S 均值均呈上升趋势, 并在总体空间分布趋势上一致。在低植被覆盖区与高植被覆盖区, Landsat 8 与 Sentinel-2 遥感数据源所估算 AGB 差别较小。

(3) 基于 Sentinel-2 比 Landsat 8 遥感影像的 AGB 遥感估算结果相对精度更高。在中等植被覆盖区, 因空间分辨率的不同导致空间异质性强弱有所差异, 遥感估算的 AGB_L 与 AGB_S 差异相对较大, 总体而言 AGB_S-MSAVI_S 估算模型效果更好。

[参 考 文 献]

- [1] Wang Jing, Feng Liang, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data [J]. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723.
- [2] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 等. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [3] 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 175-188.
- [4] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A, et al. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the

- Brazilian Amazon [J]. *Nature*, 2000, 403(6767):301-304.
- [5] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, 292(5525):2320-2322.
- [6] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 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.
- [7] Yan Feng, Wu Bo, Wang Yanjiao. Estimating spatio-temporal patterns of aboveground biomass using Landsat TM and MODIS images in the Mu Us sandy land, China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200(1):119-128.
- [8] Zandler H, Brenning A, Samimi C. Quantifying dwarf shrub biomass in an arid environment: Comparing empirical methods in a high dimensional setting [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158(1):140-155.
- [9] Yadav B, Nandy S. Mapping aboveground woody biomass using forest inventory, remote sensing and geostatistical techniques [J]. *Environmental Monitoring and Assessment* 2015, 187(5):4551-4563.
- [10] Battude M, Birar B A, Morin D, et al. Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 184(1):668-681.
- [11] 刘占宇, 黄敬峰, 吴新宏, 等. 草地生物量的高光谱遥感估算模型[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2):111-115.
- [12] 刘茜, 杨乐, 柳钦火, 等. 森林地上生物量遥感反演方法综述[J]. *遥感学报*, 2015, 19(1):62-74.
- [13] 潘磊, 孙玉军, 王轶夫, 等. 基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据的杉木林地上生物量估算[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(3):149-156.
- [14] 菅永峰, 韩泽民, 黄光体, 等. 基于高分辨率遥感影像的北亚热带森林生物量反演[J]. *生态学报*, 2021, 41(6):2161-2169.
- [15] 王瑞杰, 闫峰, 张学良. 2000—2015 年鄂尔多斯高原生态承载力时空变化特征[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1):91-98, 107.
- [16] 王瑞杰, 闫峰. 2000—2018 年西北砒砂岩区植被覆盖度与地形效应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4):1194-1202.
- [17] 程晓莉, 安树青, 钦佩, 等. 鄂尔多斯草地退化过程中植被地上生物量空间分布的异质性[J]. *生态学报*, 2003, 23(8):1526-1532.
- [18] 王庆锁, 梁艳英. 油蒿群落植物多样性动态[J]. *中国沙漠*, 1997, 17(2):55-59.
- [19] 王瑞杰, 吴林荣, 闫峰. 基于人粮关系的鄂尔多斯砒砂岩区土地资源承载力变化特征[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(6):142-148, 154.
- [20] Zheng D, Rademacher J, Chen J, et al. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM⁺ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(3):402-411.
- [21] 徐涵秋, 唐菲. 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义[J]. *生态学报*, 2013, 33(11):3249-3257.
- [22] 梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等. 2019 年中国陆表定量遥感发展综述[J]. *遥感学报*, 2020, 24(6):618-671.
- [23] William J F, Jadunandan D, Gary W, et al. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 82(1):83-92.
- [24] 郑阳, 吴炳方, 张森. Sentinel-2 数据的冬小麦地上干生物量估算及评价[J]. *遥感学报*, 2017, 21(2):318-328.
- [25] 柴国奇, 王静璞, 邹学勇, 等. 基于 Sentinel-2 数据的典型草原光合/非光合植被覆盖度估算[J]. *草业科学*, 2018, 35(12):2836-2844.
- [26] Anderson G L, Hanson J D, Haas R H. Evaluating landsat thematic mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 45(2):165-175.
- [27] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. *地理学报*, 2003, 58(1):119-125.
- [28] 陈效逖, 王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. *地理学报*, 2009, 64(1):84-94.
- [29] Katja B, Uta D, Eva S, et al. Quantification of aboveground rangeland productivity and anthropogenic degradation on the Arabian Peninsula using Landsat imagery and field inventory data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 115(2):465-474.
- [30] 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2):247-260.
- [31] 李亚峰, 唐立松. 中国北方典型荒漠区生长季降水特征和归一化植被指数的关系[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(5):1229-1237.
- [32] Qi J, Chehbouni A, Huete A, et al. A modified soil adjusted vegetation index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2):119-126.
- [33] Yan Feng, Wu Bo, Wang Yanjiao. Estimating aboveground biomass in Mu Us sandy land using Landsat spectral derived vegetation indices over the past 30 years [J]. *Journal of Arid Land*, 2013, 5(4):521-530.
- [34] 刘雨晴, 闫峰, 陈俊翰. 基于 Landsat 8 OLI 数据的砒砂岩区生物量遥感估算[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2):135-140.
- [35] 国家林业和草原局. 中国荒漠化和沙化状况公报[OL/R]. (2015-12-29). [2021-01-02]. www. forestry. gov. cn.
- [36] 闫峰, 丛日春. 中国沙地分类进展及编目体系[J]. *地理研究*, 2015, 34(3):455-465.