引文格式：周杨,王春林,李昌柯,等. 基于Sentinel-2和GF-2的草地地上生物量遥感反演[J]. 地理空间信息, 2025, 23(10):63-67. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.10.014

基于 Sentinel-2 和 GF-2 的草地地上生物量遥感反演

周　杨[1,2]，王春林[1*]，李昌柯[3,4]，韩金龙[1]，郭　锐[1]

（1. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心，北京 100055；2. 中国地质大学（北京），北京 100083；
3. 中测新图（北京）遥感技术有限责任公司，北京 100039；4. 北京市低空遥感数据处理工程技术研究中心，北京 100039）

摘　要：针对传统的野外实测草地地上生物量耗时耗力、测量难度大、空间和时间上的局限性等问题，提出了一种基于Sentinel-2和GF-2的遥感反演方法。分析了草地地上生物量和归一化植被指数等5种植被指数的相关性，基于Sentinel-2、GF-2遥感影像数据和野外实测样方数据构建遥感反演模型，选取最优反演模型进行精度验证和大尺度遥感反演。研究结果表明：Sentinel-2的反演效果优于GF-2，Sentinel-2的多元线性回归模型拟合效果最优，决定系数达到0.897，均方根误差为10.93 g/m^2，平均相对误差为13.62%，研究结果可为草地资源监测、生物量估算等提供参考依据。

关键词：地上生物量；遥感反演；Sentinel-2；GF-2；植被指数

中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）10-0063-05

Remote Sensing Inversion of Aboveground Biomass in Grassland Based on Sentinel-2 and GF-2

ZHOU Yang[1,2], WANG Chunlin[1], LI Changke[3,4], HAN Jinlong[1], GUO Rui[1]

(1. Command Center of Natural Resource Comprehensive Survey, China Geological Survey, Beijing 100055, China;
2. China University of GeoSciences, Beijing 100083, China;
3. China TOPRS Technology Co., Ltd., Beijing 100039, China;
4. Beijing Low Altitude Remote Sensing Data Processing Engineering Technology Research Center, Beijing 100039, China)

Abstract: We proposed a grassland aboveground biomass inversion method based on Sentinel-2 and GF-2 remote sensing image data to address the issues of traditional field measurements of grassland aboveground biomass, such as time-consuming and labor-intensive, difficult measurement, and spatio-temporal limitations. We analyzed the correlation between grassland aboveground biomass and five vegetation indexes, and constructed remote sensing inversion model based on Sentinel-2 and GF-2 remote sensing image data and field measured plot data. Then, we selected the optimal inversion model for accuracy verification and large-scale remote sensing inversion. The research results show that the inversion effect of Sentinel-2 is better than GF-2, and the multiple linear regression model of Sentinel-2 has the best fitting effect, with an R of 0.897, a root mean squared error of 10.93 g/m^2, and a mean relative error of 13.62%, which can provide reference basis for grassland resource monitoring and biomass estimation.

Key words: aboveground biomass, remote sensing inversion, Sentinel-2, GF-2, vegetation index

随着遥感技术及遥感数据的广泛应用[1-5]，光谱和空间分辨率越来越高，将遥感技术与传统测量方法相结合，在大范围草地AGB测量的研究中具有越来越大的优势[6-7]。遥感影像经过波段运算可得到能够反映植被生长状况的植被指数，植被指数利用了绿色植物对红光波段的强吸收、对近红外波段的强反射原理，以及地上植被的光谱特性。随着研究的深入，植被指数在作物估产、生物量估算、草地干旱监测等方面得到了应用。因此，可利用多光谱或高光谱遥感影像的红光、近红外等波段，通过波段间的数值计算，构建各种植被指数，从而实现对草地AGB的快速、非接触、大尺度遥感反演，降低对草地资源的现场破坏，同时还可发挥遥感影像的时间序列优势，提高草地监测的效率和频率，为草地资源监管提供及时有效的技术手段，提升监管水平。

本研究选取阿巴嘎旗草地覆盖区域作为研究实验区，通过野外实地测量得到实测草地AGB；基于Sentinel-2、GF-2两类遥感影像，构建归一化植被指数等5种植被指数，并分析与实测草地AGB的相关性；结合植被指数和实测草地AGB建立一元线性、非线性和多元线性回归模型；利用均方根误差（root mean squared error，RMSE）和平均相对误差（mean

第一作者简介：周杨（1987—），硕士，工程师，从事信息通信、信息化系统工作，E-mail：zhouyang_zh@mail.cgs.gov.cn。
通信作者：王春林（1973—），本科，高级工程师，从事信息通信、信息化系统工作，E-mail：1793858625@qq.com。

relative error，MRE）对反演模型进行精度验证；最后，基于构建的最优反演模型对研究区草地AGB进行大尺度遥感反演。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

阿巴嘎旗的地理位置处于内蒙古高原东部，海拔960~1 500 m，属典型草原草场，草地资源丰富，全旗土地总面积27 495 km^2，其中可利用草场面积为24 813 km^2，占总面积的91.35%。根据第三次国土调查数据公报，阿巴嘎旗草地255.76万 hm^2，其中，天然牧草地2 556 683.07 hm^2，占99.97%；人工牧草地366.88 hm^2，占0.01%；其他草地548.61 hm^2，占0.02%，主要植物有羊草、狗尾草、刺藜、野韭、大针茅等。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 野外实测数据获取与处理

为分析草地AGB与植被指数的相关性，以及验证和评价遥感反演模型的精度，采用野外实地测量方法获取采样点实测草地AGB。

2020年8月10日—2020年8月15日进行野外实测数据的获取。按照草地优势植物种单一、不同盖度且地势平坦等设置22个长1 km、宽1 km大小的样地，然后在每个样地内沿对角线方向，分别设置3个长1 m、宽1 m大小的样方，样方分布如图1所示。

为保证野外实地测量数据的有效性和准确性，对实测数据进行清洗，将表现异常的实测数据进行删除。



图1 样方分布图

审图号：蒙S(2020)030号

本研究最终使用了65个样方的实测草地AGB。通过统计，各个样方的草地AGB介于19.98~281.49 g/m^2，65个样方实测草地AGB的平均值为81.92 g/m^2。

1.2.2 遥感影像数据获取与处理

本研究采用Sentinel-2和GF-2遥感影像进行实验研究，其中，Sentinel-2是一颗光谱成像卫星，覆盖13个光谱波段；GF-2是一颗亚米级高分辨率遥感卫星，波段范围覆盖全色波段，以及绿光、红光、近红外等多光谱波段。Sentinel-2的光谱信息丰富，GF-2的空间分辨率高[8]，通过2种分别不同优势的遥感影像数据可以反映在草地AGB遥感反演中，光谱分辨率和空间分辨率的有效性及适用性。

为确保后续精度验证的可靠性，选取2020年8月且云量较少的Sentinel-2、GF-2遥感影像，与实测草地AGB处于同一时期，获取的遥感影像数据具体信息见表1。

遥感反演具体流程如图2所示。

表1 遥感影像数据信息

序号	数据源	成像日期	影像名
1	Sentinel-2	2020年8月15日	S2B_MSIL2A_20200815T030549_N0214_R075_T50TLP_20200815T054811
2	GF-2	2020年8月6日	GF2_PMS1_E114.5_N43.8_20200806_L1A0004973963
3	GF-2	2020年8月6日	GF2_PMS1_E114.5_N44.0_20200806_L1A0004973982
4	GF-2	2020年8月6日	GF2_PMS1_E114.7_N44.3_20200806_L1A0004973976
5	GF-2	2020年8月6日	GF2_PMS2_E114.8_N43.9_20200806_L1A0004974267
6	GF-2	2020年8月6日	GF2_PMS2_E114.9_N44.1_20200806_L1A0004974259
7	GF-2	2020年8月6日	GF2_PMS2_E114.9_N44.3_20200806_L1A0004974257
8	GF-2	2020年8月6日	GF2_PMS2_E115.0_N44.5_20200806_L1A0004974256
9	GF-2	2020年8月6日	GF2_PMS2_E115.1_N44.6_20200806_L1A0004974253

1.3 研究方法

1.3.1 植被指数计算方法

植被指数利用植被的光谱反射特性，能够对植被模拟和反映生长状况和覆盖情况[9]。本文综合考虑了波段反射率对绿色植被的敏感度，尽量剔除大气、土壤等影响，选用归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）、比值植被指数（relative vegetation index，RVI）、差值植被指数（difference vegetation index，DVI）、增强型植被指数（enhanced vegetation index，EVI）、归一化绿度植被指数（green normalized difference vegetation index，GNDVI）共5种植被指数开展研究[10-13]。各植被指数的计算公式

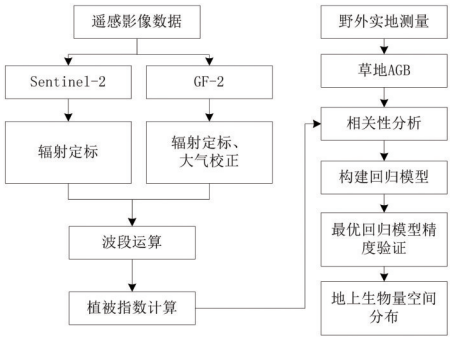


图2　遥感反演处理流程

表2　植被指数计算方法与优点

植被指数	计算公式	优点
NDVI	$NDVI=\frac{(NIT-RED)}{(NIR+RED)}$	在遥感影像植被分类研究中应用较广，能较好地反映植被长势及覆盖度[10-11]
RVI	$RVI=\frac{NIR}{RED}$	适用于反映茂盛、覆盖度较高的植被，其中，绿色植被的值较高，非植被的值较低[12]
DVI	$DVI=NIR-RED$	用于植被覆盖不高的区域
EVI	$\frac{EVI=2.5\times NIR-RED}{NIR+6.0\times RED-7.5\times BLUE+1}$	抗大气、土壤的干扰性强，用于植被茂密的区域[13]
GNDVI	$GNDVI=\frac{(NIR-GREEN)}{(NIR+GREEN)}$	对叶绿素敏感

注：NIR表示遥感影像近红外波段，RED表示红光波段，BLUE表示蓝光波段，GREEN表示绿光波段。

见表2。

NDVI主要应用于检测植被生长状态和植被覆盖度，在中等植被覆盖度下对土壤背景敏感性较高，适用于大尺度大范围的植被动态变化检测。RVI与植被的叶面积指数、叶绿素含量等植被生物因子相关性较高。DVI对土壤背景的影响较为敏感，且对植被的敏感去极化较小。EVI对土壤的抗干扰性强，对植被变化的监测具有较高的灵敏性。GNDVI是在NDVI的基础上改进而来的，以绿色波段替代红外波段，提高了植被指数对叶绿素的敏感度。因此，本文选取的5种植被指数对绿色植被的敏感度较高或极为敏感于土壤背景，适用于研究区的植被监测。

1.3.2　统计分析与精度评价

根据野外实测采样点的经纬度坐标，定位并提取对应在植被指数影像上的像元值，与野外实测草地AGB数据进行相关性分析，从而建立草地AGB估算模型[14]。

实测草地AGB与植被指数间的相关性采用R^2计算，如公式（1）。草地AGB反演模型的精度采用RMSE和MRE进行验证，计算公式分别见式（2）、（3）。

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

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

$$MRE=\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{|Y_i-Y_i'|}{Y_i}}{n} \quad (3)$$

式中，Y_i为每一个样方的实测草地AGB；Y_i'为每一个样方的反演草地AGB；$\bar{Y}_i$为参与反演的所有样方的实测草地AGB平均值；n为验证样本总数；R^2为反演值与实测草地AGB之间的拟合程度，当R^2越趋近于1，表示反演草地AGB与实测草地AGB相关性越好。

2　结果与分析

2.1　相关性分析

本研究利用SPSS软件分析5种植被指数与草地AGB的相关性。Sentinel-2植被指数与草地AGB的相关性如表3所示，相关性最高的为RVI、最低的为DVI，按照从大到小排序为RVI > NDVI > GNDVI > EVI > DVI。GF-2植被指数与草地AGB的相关性如表4所示，相关性最高的为NDVI、最低的为DVI，按照从大到小排序为NDVI > RVI > GNDVI > EVI > DVI。

表3　Sentinel-2相关性分析

NDVI	GNDVI	EVI	DVI	RVI
0.753*	0.752*	0.698*	0.611*	0.821*

注：*表示在0.01级别（双尾），相关性显著，下同。

表4　GF-2相关性分析

NDVI	GNDVI	EVI	DVI	RVI
0.606*	0.571*	0.554*	0.532*	0.589*

从表3、4可以看出：

1）2种遥感影像的植被指数与草地AGB的相关系数都在0.5以上，表明基于Sentinel-2、GF-2的植被指数均与草地AGB具有显著的相关性。

2）Sentinel-2遥感影像的RVI与草地AGB的相关性最高，GF-2遥感影像的NDVI与草地AGB的相关性最高。

3）GF-2的5种植被指数与草地AGB的相关性整体上要弱于Sentinel-2的5种植被指数。

综上，NDVI、RVI、DVI、EVI、GNDVI均与草地AGB具有显著的相关性，可利用这5种植被指数进

行草地AGB反演模型的构建。

2.2 草地AGB模型构建

从每个样本地块中随机选取2个样方的实测草地AGB用于草地AGB模型构建，剩余的21个实测草地AGB用于精度验证。

本研究在构建草地AGB模型时，使用了一元线性回归模型、非线性回归模型、多元线性回归模型。非线性回归模型采用了指数、对数、二次多项式、三次多项式。本研究构建的草地AGB模型和各模型的决定系数见表5。

表5 草地AGB模型构建

模型类型		植被指数	Sentinel-2		GF-2	
大类	小类		模型	R^2	模型	R^2
一元线性回归模型	一元线性回归模型	NDVI	$y=273.698x-22.015$	0.552	$y=122.221x+45.664$	0.135
		RVI	$y=68.438x-66.829$	0.703	$y=24.161x+30.203$	0.063
		DVI	$y=0.056x-11.480$	0.285	$y=0.031x+32.357$	0.193
		EVI	$y=131.398x-22.905$	0.474	$y=44.799x+56.008$	0.100
		GNDVI	$y=558.936x-144.094$	0.578	$y=156.976x+16.663$	0.123
	指数	NDVI	$y=24.9761e3.097x$	0.471	$y=43.227e1.818x$	0.165
		RVI	$y=22.547e0.547x$	0.567	$y=24.546e0.554x$	0.126
		DVI	$y=34.661e0.001x$	0.151	$y=35.336e0.001x$	0.239
		EVI	$y=33.286e1.006x$	0.351	$y=38.619e1.055x$	0.150
		GNDVI	$y=10.989e4.706x$	0.518	$y=53.3189e0.154x$	0.173
	对数	NDVI	$y=214.418+120.067\log(x)$	0.406	$y=141.563+45.503\log(x)$	0.230
		RVI	$y=-40.332+164.508\log(x)$	0.600	$y=55.539+41.288\log(x)$	0.085
		DVI	$y=-567.083+87.932\log(x)$	0.240	$y=-315.115+54.194\log(x)$	0.261
		EVI	$y=110.328+96.391\log(x)$	0.337	$y=109.517+39.208\log(x)$	0.236
		GNDVI	$y=281.441+215.752\log(x)$	0.481	$y=151.601+76.879\log(x)$	0.174
非线性回归模型	二次多项式	NDVI	$y=245.972-1\,202.090x+1\,938.353\,3x^2$	0.795	$y=-46.702+745.021x-895.452x^2$	0.386
		RVI	$y=179.942-125.258x+34.602x^2$	0.830	$y=-146.558+187.437x-31.177\,9x^2$	0.366
		DVI	$y=492.552-0.589\,8x+0.000\,2x^2$	0.530	$y=-75.736+0.169x-3.967\,7e-05x^2$	0.369
		EVI	$y=191.771-356.963x+249.492x^2$	0.699	$y=-23.124+312.853x-175.616\,4x^2$	0.534
		GNDVI	$y=605.498-2\,972.178x+4\,026.619x^2$	0.868	$y=-275.215+1\,553.902x-1\,599.628x^2$	0.355
	三次多项式	NDVI	$y=-43.647+1\,338.314x-4\,974.209x^2+5\,853.984x^3$	0.833	$y=3.805+196.0388x+842.318x^2-1\,588.281x^3$	0.399
		RVI	$y=99.957-31.213x-0.240x^2+4.054x^3$	0.831	$y=-146.558+187.437x-31.177\,9x^2$	0.366
		DVI	$y=193.731-0.000\,2x^2+7.517e-08x^3$	0.563	$y=11.547-0.010x+7.184e-05x^2-2.098e-08x^3$	0.393
		EVI	$y=-20.037+428.946x-638.388x^2+306.799x^3$	0.743	$y=-28.785+345.037x-226.375x^2+21.595x^3$	0.534
		GNDVI	$y=198.928-3\,010.808x^2+5\,398.805x^3$	0.877	$y=-54.174-69.219x+2\,209.826x^2-2\,847.368x^3$	0.564
多元线性回归模型	多元线性回归模型	NDVI、RVI、DVI、EVI、GNDVI	$y=-134.754-429.463x_{NDVI}+264.565x_{GNDVI}-251.161x_{EVI}+0.011x_{DVI}+205.855x_{RVI}$	0.897	$y=160.044+469.543x_{NDVI}-360.726x_{GNDVI}+138.95x_{EVI}+0.039x_{DVI}-107.493x_{RVI}$	0.591

注：y表示野外实测草地AGB，x表示植被指数，x_{NDVI}表示NDVI，x_{GNDVI}表示GNDVI，x_{EVI}表示EVI，x_{DVI}表示DVI，x_{RVI}表示RVI。

从表5统计的草地AGB模型中可以看出，2种遥感影像反演效果最优的模型为多元线性回归模型，其中，Sentinel-2遥感影像多元线性回归模型的R^2为0.897，GF-2遥感影像多元线性回归模型的R^2为0.591。总体来看，Sentinel-2模型反演效果优于GF-2，这也印证了在草地AGB反演中，光谱分辨率的重要性。

2.3 模型反演生物量精度验证

为验证Sentinel-2和GF-2反演模型的精度，本研究选用未参与构建反演模型的21个样方的实测值作为验证数据，并以Sentinel-2和GF-2的多元线性回归模型为依据，反演21个样方对应的草地AGB数值。

对于每一个验证点，当前验证点的反演值减去实测值可以得到误差值，然后利用误差值占实测值的百分比作为评价反演模型精度的依据。

在基于Sentinel-2遥感影像建立的多元线性回归模型中，反演值与实测值之间的误差值占实测值10%以内的有6个点，有10个点在10%~20%之间，有5个点在20%~30%之间，RMSE为10.93 g/m^2，MRE为13.62%。

在基于GF-2遥感影像建立的多元线性回归模型中，反演值与实测值之间的误差值占实测值10%以内的有3个点，有6个点在10%~20%之间，有12个点在20%~30%之间，RMSE为17.54 g/m^2，MRE为19.32%。

综上，Sentinel-2建立的多元线性回归模型精度优于GF-2，可更好地用于大尺度的草地AGB反演，为草地AGB提供更加精确的评估和研究。

2.4　草地地上生物量空间分布

利用Sentinel-2多元线性回归模型对阿巴嘎旗南部地区开展大尺度遥感反演，反演结果如图3所示，可以看出，草地AGB空间分布有明显的差异，大致呈现由南向北递增、由西向东递减的趋势。北部地区的草地AGB普遍高于南部地区，北部地区大部分都在164 g/m^{2}以上，中部地区普遍低于145 g/m^2，南部地区普遍低于123 g/m^2。杨东开展了内蒙古草地地上生物量遥感动态监测及其驱动力分析，研究结果表明，阿巴嘎旗2001—2020年平均地上生物量为92 146 g/m^2，与本文研究结论基本相符合，能够准确展现草地AGB的空间分布及其差异。

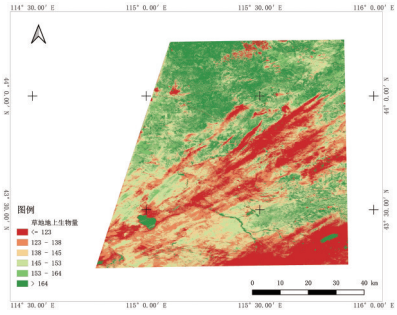


图3　草地AGB空间分布图

3　讨　论

本研究通过实验分析和精度验证，建立了最优的草地AGB遥感反演模型，研究结果表明，Sentinel-2遥感影像的反演效果整体上优于GF-2遥感影像，在草地AGB反演中，虽然Sentinel-2的空间分辨率不及亚米级的GF-2遥感影像，但Sentinel-2的光谱波段丰富，携带的红边波段使其在植被监测中更具有优势，为基于多光谱或高光谱遥感影像的草地AGB反演选取合适的遥感影像数据提供了参考依据。

本研究与前人的研究都表明了多光谱、高光谱遥感影像对于草地AGB反演的作用[15]，但由于受遥感技术、数据质量和建模方法的限制，草地AGB反演效果仍有提升的空间。

4　结　语

本研究针对阿巴嘎旗部分草地覆盖区，基于Sentinel-2、GF-2两类遥感影像，计算了NDVI、RVI、DVI、EVI、GNDVI5种植被指数，分析了与实测草地AGB的相关性，结合各植被指数和实测样方数据，采用一元线性、非线性、多元线性回归模型对草地AGB进行反演模型构建，并分析了部分地区草地AGB的大尺度反演效果和空间分布。研究结果表明，Sentinel-2的反演效果优于GF-2，Sentinel-2的多元线性回归模型与草地AGB之间有较高的相关性，R^2达到0.897，RMSE为10.93 g/m^2，MRE为13.62%，精度可靠，适用于阿巴嘎旗草地AGB的反演。草地AGB空间分布图显示，研究区的草地AGB在北部地区较高（164 g/m^{2}以上区域较多）。研究结果可为草地资源的合理开发和利用提供数据基础，提高草地监测的效率和尺度范围，提升草地资源监管的现代化水平。

参考文献

[1]　宋柯馨，蒋馥根，胡宗达，等. 西藏自治区草地地上生物量遥感反演研究[J]. 生态学报，2023，43(13)：5 600-5 613

[2]　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[D]. 长春：吉林大学，2019

[3]　Guerini F，Kuplich T，Quadros F. Estimating Natural Grassland Biomass by Vegetation Indices Using Sentinel-2 Remote Sensing Data[J]. International Journal of Remote Sensing，2020，41(8)：2 861-2 876

[4]　关欣. 基于高分1号卫星的巴音布鲁克草原退化程度的判断[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2018

[5]　黄家兴，吴静，李纯斌，等. 基于Sentinel-2和Landsat 8数据的天祝县草地地上生物量遥感反演[J]. 草地学报，2021，29(9)：2 023-2 030

[6]　张锦丽. 准噶尔盆地荒漠草地植被生物量遥感反演研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2020

[7]　雷瑛，刘园园. 基于多源遥感数据的草地生物量反演[J]. 无线电工程，2023，53(11)：2 515-2 528

（下转第77页）