

DOI: 10.5846/stxb201901190153

乔雪丽, 郑江华, 穆晨. 基于多源遥感数据的草地净初级生产力质量评价. 生态学报, 2020, 40(5): 1690-1698.
Qiao X L, Zheng J H, Mu C. Evaluation of grassland NPP quality based on multi-source remote sensing data. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1690-1698.

基于多源遥感数据的草地净初级生产力质量评价

乔雪丽¹, 郑江华^{1,2,*}, 穆晨³

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 新疆草原总站, 乌鲁木齐 830000

摘要:植被净初级生产力 NPP(Net Primary Production)的遥感估算与分析对全球生态系统具有重要指导意义, 不同尺度的遥感影像上占主导地位的地物景观信息是不同的, 现代生态研究多尺度分析至关重要。以青海省海北藏族自治州为研究区, 使用 Landsat 8 OLI 遥感影像、天宫二号宽波段成像仪影像、融合影像 (Landsat 8 OLI 影像和天宫二号宽波段成像仪影像融合) 联同 MODIS 影像, 作为 CASA 模型的输入参数, 探究不同尺度下的研究区域 NPP 的空间分布情况, 并对比分析不同数据源数据在估算 NPP 时的精度。结果表明: (1) Landsat 8 OLI 数据的 NPP 值位于 $150-200 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 所占比例最高; 天宫二号宽波段成像仪影像数据和融合后影像的 NPP 值位于 $50-100 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 所占比例最高; MODIS 数据的 NPP 值位于小于 $50 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 比例最高。 (2) 天宫二号宽波段成像仪影像数据的均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE) 和平均绝对百分比误差 (MAPE) 最小, 与 Landsat 8 OLI 影像反演的草地 NPP 值相关度最高, 表明天宫二号宽波段成像仪影像数据在描述草地 NPP 时精度高于融合影像和 MODIS 影像; MODIS 影像在描述该区域的草地 NPP 时误差值较大, 精度最低。

关键词: Landsat 8 OLI; 天宫二号; MODIS; 时空融合; 净初级生产力

Evaluation of grassland NPP quality based on multi-source remote sensing data

QIAO Xueli¹, ZHENG Jianghua^{1,2,*}, MU Chen³

1 College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China

3 Xinjiang Grassland Central Station, Urumqi 830000, China

Abstract: Remote sensing estimation and analysis of Net Primary Production (NPP) have important roles for global ecosystem conservation. The dominant information of ground object landscape in remote sensing images of different scales is different. The multi-scale analysis of modern ecological research is crucial. This study area is Haibei Tibetan Autonomous Prefecture in Qinghai Province. We used Landsat 8 OLI remote sensing image, Wide-band Imaging Spectrometer (WIS) of Tiangong-2, fusion image (Landsat 8 OLI images and WIS of Tiangong-2 fusion), and MODIS image as input parameters of CASA model. We aim to explore the spatial distribution of NPP at different scales in study area, and to comparatively analyze different source data in estimating the accuracy of the NPP. The results showed that: (1) the NPP value using Landsat 8 OLI data was $150-200 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and the proportion was the highest. The NPP value of the WIS of Tiangong-2 data and the fusion image were $50-100 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, which accounted for the highest proportion. The NPP value of MODIS data's proportion of less than $50 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ was the highest. (2) The root mean square error (RMSE), MAE, and MAPE of the WIS of Tiangong-2 data were the smallest. The correlation between the WIS of Tiangong-2 image's grassland NPP value inversed by Landsat 8 OLI image was the highest. It indicated that the accuracy of the WIS of Tiangong-2 data for

基金项目:新疆草原总站委托项目(201604051290); 新疆青年科技创新人才工程(QN2016YX0347)

收稿日期:2019-01-19; 网络出版日期:2019-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Zheng_jianghua@126.com

describing grassland NPP was higher than that of fusion image and MODIS image. The MODIS image has a large error value and the lowest accuracy in describing the grassland NPP in this region.

Key Words: Landsat 8 OLI; Tiangong-2; MODIS; temporal-spatial fusion; net primary productivity

陆地生态系统的碳循环是全球变化研究的核心内容之一^[1-2]。草地净初级生产力(NPP)是草地碳固定能力的重要表征,草地NPP研究通过对草地生态系统生产力的模拟,定量分析其生产力的时空变化,正确评价在自然条件下草地的生产能力,从而对系统分析草地在全球气候变化中的生态价值和贡献、研究陆地碳循环机制等方面的研究提供了依据^[3]。草地NPP的研究对于合理利用草地资源,最大限度地提高草地产量以及对草地农业生态系统中的碳循环研究都具有重要的指导意义^[4-6]。

自20世纪,随着遥感技术的迅速发展和基于遥感观测生理生态理论研究的进展,利用遥感影像反演陆地植被净初级生产力(NPP)成为模拟NPP的主要发展方向,这使得多尺度生态系统草地NPP的空间格局和过程的定量、动态观测成为可能^[7]。基于遥感数据的CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型建立在植物光合作用过程和Monteith^[8]提出的光能利用率概念上,因其能够在全球和区域尺度上很好地评估NPP的动态变化和时空变异性而得到广泛的应用^[9],例如周夏飞等利用CASA模型分析了2001—2015年青藏高原草地碳源/汇时空及其与气候因子关系^[10],黄露等利用CASA模型研究土地利用/覆盖变化对鄂尔多斯市草地生态系统净初级生产力的影响^[11],韩王亚等则利用CASA模型分析了2000—2015年拉萨河流域NPP时空变化及驱动因子^[12]。

随着遥感技术的迅速发展,中高空间分辨率遥感数据类型逐渐增多,为区域NPP估算提供了多源遥感数据。由于受时间分辨率及云雨天气的影响,难以获取完整时间序列的中高空间分辨率遥感影像。为解决中高空间分辨率卫星数据缺失的问题,基于多源遥感数据时空融合技术得到发展,并已在植被、土地覆盖与土地利用中得到较多的应用^[13-17]。近年来,大多数学者从不同的插值方法探究其对NPP精度的影响^[18-19],但研究不同数据源对草地NPP精度影响的学者较少。

基于以上背景,本文将处于亚洲大陆腹地的青海省海北藏族自治州作为研究区域,探讨多源遥感数据在反演草地NPP时的精度,并进行精度检验,为改善与提高该区域生态系统生产力的估算与模拟提供有效的数据参考与支撑。

1 研究区概况

本研究区域海北藏族自治州位于青海省东北部,北面与甘肃省毗邻。全州土地面积3.4万km²,横跨98°05'—102°41'E,36°44'—39°05'N如图1。境内最高海拔5287 m,最低海拔2180 m,海拔超过3000 m的高原面积约占全州土地总面积的85%为草原地带。海北藏族自治州位于亚洲大陆腹地,属高原大陆性气候,东南季风及西南季风微弱。受高海拔条件的制约,气温极低,按气候四季的标准划分,这里全年皆冬,无明显四季之分,仅有冷暖二季之别,干湿季分明^[20]。全年日照时数在2440—3140 h。年降水量300—500 mm,且集中在7、8月份,土壤以高山草甸土和山地草甸土为主,兼有黑钙土、栗钙土、灰褐土等,有机质含量丰富,有利于农作物和牧草的生长。

2 数据来源及预处理

2.1 遥感数据

2.1.1 Landsat 8 OLI 数据

研究中使用了Landsat 8 OLI(Operational land imager,陆地成像仪)影像(<http://www.gscloud.cn/>),Landsat 8卫星的成功发射(2013年2月在美国加州)使得Landsat对地观测得以继续^[21]。在性能上相比之前

的 Landsat 卫星拥有明显提升,除了保持前阶段 Landsat 系列的基本特征外,还在波段数量、光谱范围及辐射分辨率上进行了改进,这些优点将会对全球生态变化检测产生积极作用^[22]。本地区选取的 5 景影像的成像时间都在 2017 年 3 月份,且影像质量较好。

2.1.2 MODIS 数据

本研究首先将下载得到的 MODIS16 天合成产品 NDVI 影像 (<https://modis.gsfc.nasa.gov>), 一共 2 景影像。利用专业处理软件 MRT TOOLS 对数据进行格式转换、投影转换将 HDF 格式转换成 Tiff 格式,之后利用 ENVI 5.3 完成影像裁剪和拼接,以备后续工作使用。

2.1.3 天宫二号宽波段成像仪数据

研究中使用了天宫二号对地观测数据的宽波段成像仪数据 (<http://www.msadc.cn/sy/>), 天宫二号空间实验室于 2016 年 9 月 15 日成功发射,设计在轨寿命 2 年,是中国第一个真正意义上的空间实验室,将用于进一步验证空间交会对接技术及进行一系列空间试验。本研究使用数据为宽波段成像仪的可见光近红外数据的二级产品,已经过辐射定标和几何校正。研究中所使用的遥感数据介绍如表 1。

表 1 遥感数据介绍

Table 1 Introduction to remote sensing data

数据源 Data sources	覆盖范围 Coverage	重访周期 Revisit period	空间分辨率 Spatial resolution	通道数 Channel Number
Landsat 8 OLI	N81°—S81.5°	16 d	30 m, 全色波段 15 m	11
MODIS	全球	1—2 d	250—1000 m	36
天宫二号 Tiangong-2	N42°—S42°	最快 2—3 d	可见光近红外波段 100 m	14

2.2 气象数据

模型中需要月均温(0.1℃)、月降水量(0.1 mm)和月均辐射(0.01 MJ/m²)参数,气象数据从国家气象信息中心获取 (<http://data.cma.cn>)。本研究月均温、月降水量气象站点是基于海北藏族自治州 300 km 的缓冲区区域选取的 33 个气象站点。月均辐射数据站点的选取是基于海北藏族自治州 500 km 的缓冲区区域选取的 13 个气象站点。气象要素栅格图像的生成过程如下:①根据所获取的站点的经纬度信息,将其转换成空间矢量数据,定义空间投影与影像信息保持一致的 WGS84 坐标系;②进行 Kriging 插值,利用掩膜工具裁剪海北藏族自治州的栅格图像。以上处理基于 ArcGIS 10.2 软件实现。

2.3 土地利用类型数据

本研究采用的海北藏族自治州植被覆盖分类方法已发表在《地理学报》英文版上^[3],数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 的 2015 年中国土地利用现状遥感监测数据库数据集。将所获取的土地利用类型图像在 ArcGIS 中利用栅格计算器提取高覆盖度草地、中覆盖度草地和低覆盖度草地,并利用全国基础数据库(2017 融合版)裁剪青海省海北藏族自治州地区的草地利用类型图(图 2)。

3 方法

3.1 Gram-Schmidt 图像融合

基于格拉姆-施密特(Gram-Schmidt)变换的融合方法是一种多光谱数据融合方法^[23],其融合效果较好,可使空间信息明显增强,光谱保真度较高^[24]。图像融合方法如图 3。

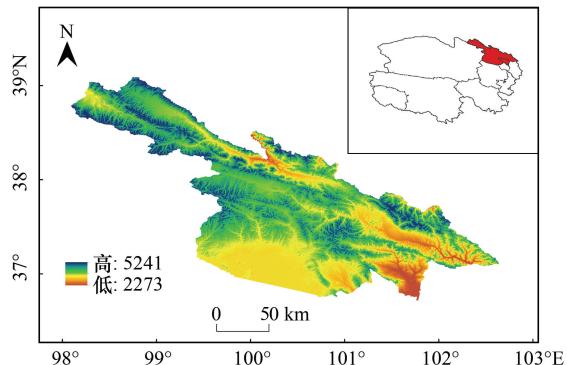


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of the research area

本研究为验证天宫二号宽波段成像仪数据在估算草原 NPP 方面的精度,将高分辨影像 Landsat 8 OLI 影像与经过几何校正的天宫二号宽波段成像仪影像进行 Gram-Schmidt 图像融合。

3.2 NPP 估算模型

已被全球 1900 多个实测站点校准的 CASA 模型,是由遥感、气象、植被以及土壤类型数据共同驱动的光能利用率模型。采用朱文泉等改进的 CASA 模型计算海北藏族自治州的草地 NPP^[25], CASA 遥感估算模型为:

$$NPP = P_{\text{PAR}} \times F_{\text{FPAR}} \times \min(T_s, W_s) \times E_{\max} \quad (1)$$

式中, P_{PAR} 为光合有效辐射, 单位为 MJ/m^2 ; F_{FPAR} 为植被层对入射光合有效辐射(PAR)的吸收分量, CASA 模型使用归一化差异植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 代替 F_{FPAR} 进行估算, 无单位; T_s 为温度对光能利用率的影响, 无单位; W_s 为水分对光能利用率的影响, 无单位; E_{\max} 为最大光能利用率, 单位为 gC/MJ ; SR 代表比值植被指数, PAR 是根据 SR 和 NDVI 估算得到的。根据查阅文献可知 3 月该地区的最大光能利用率为 0.115、0.085 和 0.07^[3]。CASA 模型中静态参数如表 2。

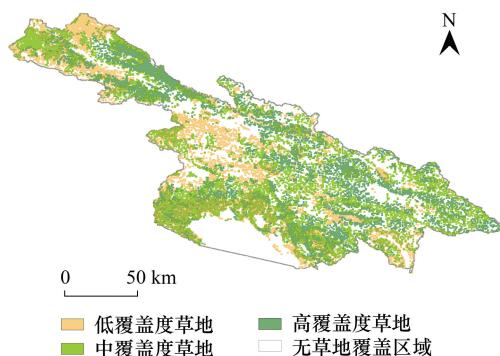


图 2 海北藏族自治州草地利用类型图

Fig. 2 Map of grassland utilization types in Haibei Tibetan autonomous prefecture

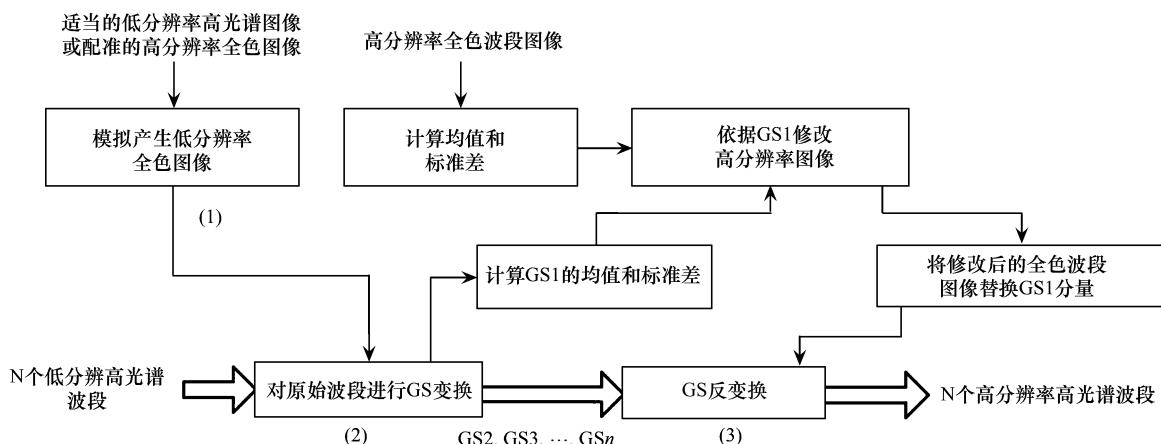


图 3 Gram-Schmidt 图像融合技术路线

Fig.3 Gram-Schmidt image fusion technology route

图中 GS: 格拉姆-施密特, Gram-Schmidt

3.3 检验方法

为检验不同数据源数据对草原 NPP 的预测精度, 在本研究中将高空间分辨率影像 Landsat 8 OLI 反演产生的每种 NPP 类型百分比作为参照物。将天宫二号宽波段成像仪数据、影像融合数据和 MODIS 数据分别与 Landsat 8 OLI 数据进行计算均方根误差(Root mean squared error, RMSE)、平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)、平均绝对百分比误差(Mean absolute percentage error, MAPE)和相关系数(Correlation coefficient) R_{xy} , 将其作为检验不同数据源精度的标准^[19]。MAE 由于将不同数据源草地 NPP 值与 Landsat 草地 NPP 值的差值绝对值化, 不会出现正负相抵消的情况, 因此能更好地反映偏离的实际情况; RMSE 表示不同类型数据源草地 NPP 值偏离程度, 可反映离散程度; MAPE 描述了偏离 Landsat 草地 NPP 值的相对程度^[26]; 采用逐像元的皮尔逊相关系数分析对海北藏族自治州的不同数据源数据的 NPP 值与 Landsat 8 OLI 的草地 NPP 之间的相

关性进行定量研究,并进行 F 检验,当 $P<0.05$ 时,相关性显著, R_{xy} 揭示不同遥感源的草地 NPP 值与 Landsat 8 OLI 草地 NPP 值之间的相关性。

表 2 CASA 模型静态参数

Table 2 Static parameters of CASA model

数据类型 静态参数值 Data types Static parameters	Landsat 8 OLI				天宫二号 Tiangong-2			
	NDVI _{max}	NDVI _{min}	SR _{max}	SR _{min}	NDVI _{max}	NDVI _{min}	SR _{max}	SR _{min}
31 高覆盖草地 Highly covered grassland	0.3158	-0.043	1.9231	0.9175	0.1516	-0.3141	1.3574	0.5220
32 中覆盖草地 Medium covered grassland	0.2863	-0.4218	1.8023	0.4067	0.1179	-0.3933	1.2673	0.4354
33 低覆盖草地 Low covered grassland	0.2501	-0.446	1.6670	0.3831	0.0036	-0.4165	1.0072	0.4119

数据类型 静态参数值 Data types Static parameters	融合影像 Fusion image				MODIS				
	NDVI _{max}	NDVI _{min}	SR _{max}	SR _{min}	NDVI _{max}	NDVI _{min}	SR _{max}	SR _{min}	
31 高覆盖草地 Highly covered grassland	0.1048	-0.3359	1.2341	0.4971	0.6251	0.0001	4.3348	1.0002	0.1150
32 中覆盖草地 Medium covered grassland	0.1023	-0.3321	1.2279	0.5014	0.7400	0.0001	6.6923	1.0002	0.0850
33 低覆盖草地 Low covered grassland	0.0885	-0.3475	1.1942	0.4842	0.6251	0.0001	4.3348	1.0002	0.070

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Z^0(x_i) - Z(x_i)|}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z^0(x_i) - Z(x_i)]^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Z^0(x_i) - Z(x_i)|}{\bar{Z}(x_i)} \quad (4)$$

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中, n 为分类数; $Z^0(x_i)$ 为第 i 种类型 NPP 值的百分比; $Z(x_i)$ 为 Landsat 8 OLI 影像反演结果的第 i 种类型 NPP 值百分比; \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示 Landsat 8 OLI 与天宫二号、融合影像和 MODIS 影像反演的草地 NPP 样本值的平均值。

技术路线如图 4。

4 结果与分析

4.1 不同数据源数据反演 NPP 值

利用不同数据源的影像反演的青海省海北藏族自治州的 3 月份草地 NPP 值存在显著差异。从表 3 可以看出:Landsat 8 OLI 的 NPP 值位于 $150\text{--}200\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 所占比例最高为 30.14%, 所对应比例最接近的数据类型为 MODIS 数据为 18.55%; Landsat 8 OLI 反演 NPP 值大于 $200\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 的比例次之为 25.71%, 所对应比例最接近的数据类型为天宫二号宽波段成像仪影像数据类型; Landsat 8 OLI 反演 NPP 值 $100\text{--}150\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 的比例为 23.49%, 所对应比例最接近的数据类型为天宫二号宽波段成像仪影像数据; Landsat 8 OLI 反演

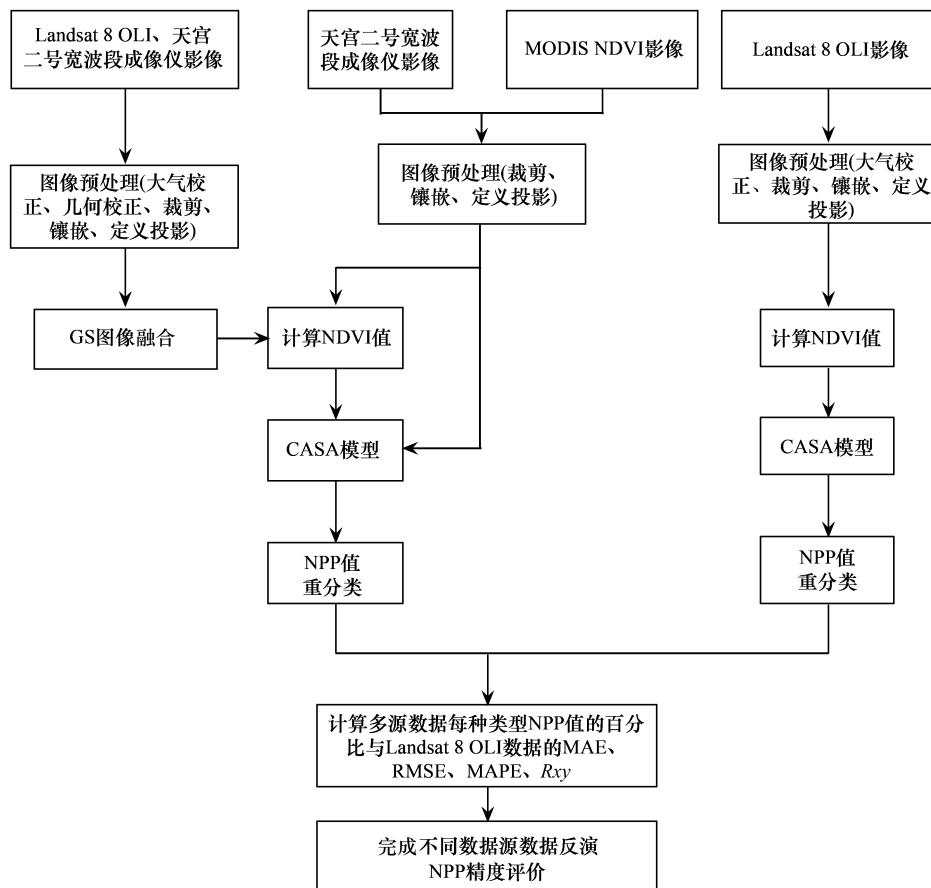


图4 技术路线图

Fig.4 Technical flowchart

NPP 值 $50-100 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的比例为 15.90%, 所对应比例最接近的数据类型为 MODIS 数据; Landsat 8 OLI 反演 NPP 值小于等于 $50 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的比例最小为 4.76%, 所对应比例最接近的数据类型为天宫二号宽波段成像仪影像数据类型。从图 5 中可以初步得到, 天宫二号宽波段成像仪影像数据反演的 NPP 值最为接近 Landsat 8 OLI 数据反演的 NPP 值, 反演 NPP 精度排序为天宫二号宽波段成像仪影像>融合影像>MODIS。

表3 海北藏族自治州 2017 年 3 月不同数据源数据 NPP 值分布范围所占比例

Table 3 Proportion of NPP value distribution range of different data sources in haibei Tibetan autonomous prefecture in March 2017

数据类型 Data types	$\text{NPP} \leq 50$	$50 < \text{NPP} \leq 100$	$100 < \text{NPP} \leq 150$	$150 < \text{NPP} \leq 200$	$\text{NPP} > 200$
Landsat 8 OLI	4.76	15.90	23.49	30.14	25.71
天宫二号宽波段成像仪影像 Wide-band Imaging Spectrometer (WIS) of Tiangong-2	10.33	36.03	21.48	13.08	19.08
融合影像 Fusion image	28.08	28.54	19.62	12.58	11.18
MODIS	49.12	6.47	18.50	18.55	7.36

利用 CASA 模型反演的 NPP 值如图 5 所示。

4.2 不同数据源数据反演 NPP 值检验

统计不同数据源数据的 NPP 值分布比例(图 6), 将得到的 NPP 像元百分比值代入公式(2)、(3)、(4)和(5)中, 计算其 MAE、RMSE、MAPE 和 R_{xy} , 结果如表 4:

(1) 通过观察 MAE 值, 发现 $\text{MAE}(\text{天宫二号}) < \text{MAE}(\text{融合影像}) < \text{MAE}(\text{MODIS})$, 此处的 MAE 值代表 3 种

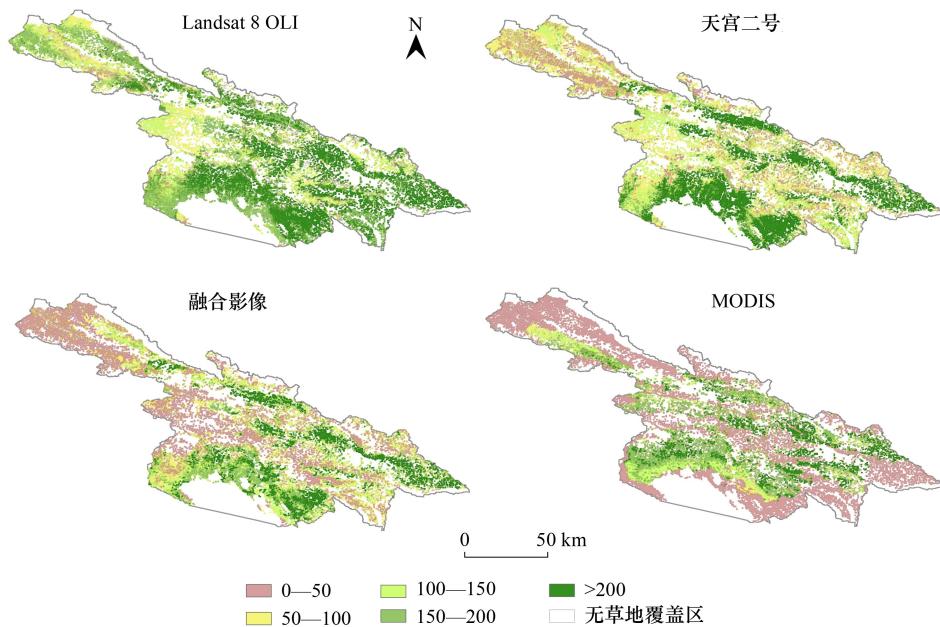


图 5 Landsat 8 OLI、天宫二号宽波段成像仪影像、融合影像和 MODIS 反演的 NPP 值

Fig.5 NPP values obtained by Landsat 8 OLI, Wide-band Imaging Spectrometer (WIS) of Tiangong-2, The fusion image and MODIS

数据源数据 NPP 值与 Landsat 8 OLI 草地 NPP 值偏离的实际情况。可知 MODIS 与 Landsat 8 OLI 草地 NPP 值的 MAE 最大, 反映了 MODIS 数据反演 NPP 值精度较差; 天宫二号宽波段成像仪影像数据的草地 NPP 值与 Landsat 8 OLI 数据的 NPP 值最为接近, 精度要高于另外两种数据。

(2) 比较表 4 中的 RMSE 值, 发现 RMSE(天宫二号) < RMSE(融合影像) < RMSE(MODIS), 此处的 RMSE 值代表 3 种数据源数据 NPP 值与 Landsat 8 OLI 草地 NPP 值偏离的实际情况。可知天宫二号宽波段成像仪影像数据相较于融合图像和 MODIS 影像与 Landsat 8 OLI 的草地 NPP 值偏离较小, 精度最高, MODIS 数据精度效果最差;

(3) 观察 MAPE 值, 发现 MAPE(天宫二号) < MAPE(融合影像) < MAPE(MODIS), 此处的 MAPE 值代表 3 种数据源数据 NPP 值与 Landsat 8 OLI 草地 NPP 值偏离的相对程度。天宫二号宽波段成像仪影像数据反演草地 NPP 值精度最高。

(4) R_{xy} 结果值为 R_{xy} (天宫二号) > R_{xy} (融合影像) > R_{xy} (MODIS), 此处的 R_{xy} 值代表 3 种数据源数据 NPP 值与 Landsat 8 OLI 草地 NPP 值的相关性。同样天宫二号宽波段成像仪影像数据反演草地 NPP 值与 Landsat 8 OLI 草地 NPP 值的相关度最高, 且相关性显著。

5 结论与讨论

本文基于 CASA 模型估算了青海省海北藏族自治州的草地植被净初级生产力, 同时从不同数据源数据出发, 分析了其对应的反演结果精度, 初步得到以下结论:

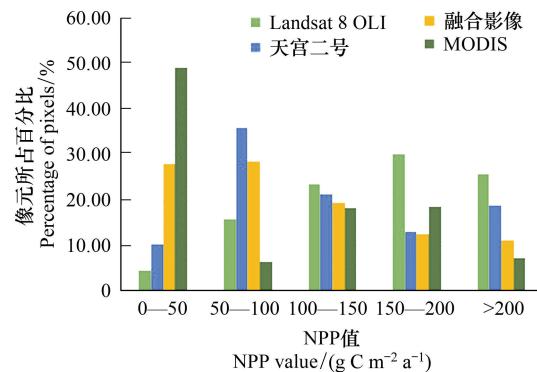


图 6 不同数据源数据 NPP 值分布比例

Fig.6 NPP value distribution proportion of data from different data sources

表4 评价指标计算结果

Table 4 Evaluation index calculation results

评价指标 Evaluating indicators	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE	平均绝对百分比误差 MAPE	相关系数 R_{xy}
数据类型 Data types				
天宫二号宽波段成像仪影像与 Landsat 8 OLI Wide-band Imaging Spectrometer (WIS) of Tiangong-2 and Landsat 8 OLI	10.28	12.45	51.41	0.8777
融合后的影像与 Landsat 8 OLI Fusion image and Landsat 8 OLI	14.38	15.73	71.91	0.8389
MODIS 与 Landsat 8 OLI MODIS and Landsat 8 OLI	17.74	22.60	88.72	-0.3257

(1) 青海省海北藏族自治州 2017 年 3 月的草地 NPP 值受不同数据源的影响而呈现不同的空间分布。Landsat 8 OLI 数据的 NPP 值位于 $150 \text{ g} - 200 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 所占比例最高; 天宫二号宽波段成像仪影像数据和融合后影像的 NPP 值位于 $50 \text{ g} - 100 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 所占比例最高; MODIS 数据的 NPP 值位于小于 $50 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 比例最高;

(2) 天宫二号宽波段成像仪影像数据较融合后影像和 MODIS 数据更能反映海北藏族自治州的草地净初级生产力的时空分布, MODIS 精度要低于天宫二号和融合影像反演的 NPP 值的精度;

(3) 天宫二号作为 2016 年 9 月 15 日成功发射的空间实验室, 适用于反演青海省海北藏族自治州的草地 NPP。

CASA 模型是光能利用模型, 其估算 NPP 值是基于植被光能利用效率和光合有效辐射, 估算结果能够表征未干扰天然草地的发育状况和演变过程, 但该模型参数中并未考虑人类活动, 如放牧强度和人工恢复等对于草地 NPP 的影响, 因此, 在 CASA 模型的改进和 NPP 的定量化估算中, 如何增加人为因素影响将是今后研究的方向之一^[27]。

如今, 研究者主要利用 MODIS 影像产品数据、Landsat 影像数据或 GIMMS 和 SPOT VGT 两种数据集的 NDVI 数据来反演植被的净初级生产力, 由于所研究对象空间尺度较大, 那么如何获取既具备高空间分辨率和高时间分辨率的影像仍是一个方法性的难点, 这也是今后的研究工作之一。

近年来, 越来越多的学者利用遥感数据参与到气候变化的研究中, 本团队也进行了相关研究^[28], 未来的工作中应继续深入探讨不同数据源与气候因子在 NPP 值之间的相关性和不同数据源对草地 NPP 的估算精度。基于不同数据源利用 CASA 模型对草地 NPP 估算的影响因素较多, 应扩大时间尺度、变换插值方法、探究草地类型对 NPP 的影响。研究中发现天宫二号宽波段成像仪影像数据反演的草地 NPP 精度高于利用 Gram-Schmidt 算法融合的影像数据, 误差原因的可能性有多种, 例如: 融合算法、模型参数或评价方法等, 应加大对此方向的研究, 从而对草业检测提供参考。

致谢:感谢载人航天工程提供天宫二号宽波段成像仪数据产品。

参考文献(References):

- [1] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, Moore III B. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. *Science*, 1997, 278(5339): 870-873.
- [2] Marek M V, Hirose T, Walker B H. Global Changes and Terrestrial Ecosystems in Monsoon Asia. *Biologia Plantarum*, 1997, 39(3): 402-402.
- [3] 卫亚星, 王莉雯, 石迎春, 李路子. 青海省草地资源净初级生产力遥感监测. *地理科学*, 2012, 32(5): 621-627.
- [4] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 736-753.
- [5] 樊江文, 钟华平, 梁懿, 石培礼, 于贵瑞. 草地生态系统碳储量及其影响因素. *中国草地*, 2003, 25(6): 51-58.
- [6] 林慧龙, 常生华, 李飞. 草地净初级生产力模型研究进展. *草业科学*, 2007, 24(12): 26-29.

[7] 冯险峰, 刘高焕, 陈述彭, 周文佐. 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述. 自然资源学报, 2004, 19(3): 369-378.

[8] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9(3): 747-766.

[9] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.

[10] 周夏飞, 於方, 曹国志, 杨威杉, 周颖. 2001—2015年青藏高原草地碳源/汇时空变化及其与气候因子的关系. 水土保持研究, 2019, 26(1): 76-81.

[11] 黄露, 周伟, 李浩然, 周富春, 杨晗. 土地利用/覆被变化对鄂尔多斯市草地生态系统净初级生产力的影响. 水土保持通报, 2018, 38(4): 46-52, 59-59.

[12] 韩王亚, 张超, 曾源, 刘国华. 2000—2015年拉萨河流域NPP时空变化及驱动因子. 生态学报, 2018, 38(24): 8787-8798.

[13] Gao F, Masek J, Schwaller M, Hall F. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(8): 2207-2218.

[14] Hilker T, Wulder M A, Coops N C, Seitz N, White J C, Gao F, Masek J G, Stenhouse G. Generation of dense time series synthetic Landsat data through data blending with MODIS using a spatial and temporal adaptive reflectance fusion model. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(9): 1988-1999.

[15] Zhu X L, Chen J, Gao F, Chen X H, Masek J G. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11): 2610-2623.

[16] Wu M Q, Niu Z, Wang C Y, Wu C Y, Wang L. Use of MODIS and Landsat time series data to generate high-resolution temporal synthetic Landsat data using a spatial and temporal reflectance fusion model. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1): 063507.

[17] 牛忠恩, 闫慧敏, 黄政, 胡云锋, 陈静清. 基于MODIS-OLI遥感数据融合技术的农田生产力估算. 自然资源学报, 2016, 31(5): 875-885.

[18] 朱玉果, 杜灵通, 谢应忠, 刘可, 宫菲, 丹杨, 王乐. 不同气象插值方法精度评估及对草地NPP估算的影响. 水土保持研究, 2018, 25(6): 160-167.

[19] 任璇, 郑江华, 穆晨, 闫凯, 徐廷豹. 不同气象插值方法在新疆草地NPP估算中的可靠性评价. 草业科学, 2017, 34(3): 439-448.

[20] 李英年, 赵新全, 曹广民, 赵亮, 王勤学. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析. 高原气象, 2004, 23(4): 558-567.

[21] 徐婷, 曹林, 余光辉. 基于Landsat8OLI的特征变量优化提取及森林生物量反演. 遥感技术与应用, 2015, 30(2): 226-234.

[22] 徐涵秋, 唐菲. 新一代Landsat系列卫星: Landsat8遥感影像新增特征及其生态环境意义. 生态学报, 2013, 33(11): 3249-3257.

[23] Laben C A, Brower Bernard V. Process for Enhancing the Spatial Resolution of Multispectral Imagery Using Pan-sharpening: US, US6011875A. 2000-01-04.

[24] 李存军, 刘良云, 王纪华, 王人潮. 两种高保真遥感影像融合方法比较. 中国图象图形学报, 2004, 9(11): 1376-1385.

[25] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德永, 崔海波. 中国典型植被最大光利用率模拟. 科学通报, 2006, 51(6): 700-706.

[26] 邓维斌. SPSS19(中文版)统计分析实用教程. 北京: 电子工业出版社, 2012.

[27] 朱玉果, 杜灵通, 谢应忠, 刘可, 宫菲, 丹杨, 王乐, 郑琪琪. 2000—2015年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应. 生态学报, 2019, 39(2): 518-529.

[28] 任璇, 郑江华, 穆晨, 闫凯, 刘永强, 温阿敏, 杨会枫. 新疆近15年草地NPP动态变化与气象因子的相关性研究. 生态科学, 2017, 36(3): 43-51.