

# 基于 Landsat 8 OLI 数据的砒砂岩区生物量遥感估算

刘雨晴, 闫峰, 陈俊翰

(中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091)

**摘要:**为了评价砒砂岩区植被生长状况和地上生物量的空间分布特征,采用 Landsat 8 OLI 和同期实测生物量数据对砒砂岩区生物量估算方法进行了研究。结果表明:(1) NDVI, RVI, SAVI, MSAVI 与地上生物量(Above ground biomass, AGB)的相关性显著,其中 MSAVI 和 AGB 的相关性最高( $R^2 = 0.4416$ ), SAVI 次之( $R^2 = 0.3923$ ), NDVI ( $R^2 = 0.1375$ )和 RVI( $R^2 = 0.1306$ )相对最低, NDVI 和 RVI 在荒漠生态系统生物量遥感估算中并不是效果最佳的植被指数;(2) 高斯低通  $3 \times 3$  滤波核滤波的 MSAVI 与 AGB 的相关性( $R^2 = 0.4757$ )高于未滤波处理图像,滤波后建立的 AGB-MSAVI\_GLPF3 估算模型平均相对误差 MRE 为 13.41%,模型具有较高的估算精度;(3) 遥感估算 2019 年砒砂岩研究区总 AGB 为  $9.2 \times 10^5$  t,其中 AGB 低值区的面积占比为 13.03%, AGB 中值区面积占比为 47.56%, AGB 高值区面积占比为 39.41%。荒漠生态系统 AGB 与 MSAVI 的相关性显著,基于高斯低通滤波建立起的 AGB-MSAVI\_GLPF3 模型可以较好地实现砒砂岩区 AGB 遥感估算。

**关键词:**生物量; 遥感估算; 砒砂岩区

**中图分类号:**K903; P534.63; TP79

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)02-0135-06

## Applying Landsat 8 OIL to Estimate Biomass in Pisha Sandstone Area

LIU Yuqing, YAN Feng, CHEN Junhan

(Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** In order to evaluate the vegetation growth status and the spatial distribution characteristics of above ground biomass (AGB) in the Pisha sandstone area, Landsat 8 OLI image and in situ AGB data in the same period were used to study the AGB estimation method in the Pisha sandstone area of the Ordos Plateau. The results show that: (1) NDVI, RVI, SAVI and MSAVI had significant correlations with AGB; the correlation coefficient between MSAVI and AGB was the highest ( $R^2 = 0.4416$ ), correlation coefficient between SAVI and AGB was also higher ( $R^2 = 0.3923$ ), while the correlations between NDVI, RVI and AGB were relatively low, and the coefficients of determination were 0.137 5 and 0.130 6, respectively; among the four commonly used vegetation indexes, NDVI and RVI were not the best ones for biomass estimation in desert ecosystems; (2) the correlation between AGB and MSAVI filtered by Gaussian low pass filtering with kernel size  $3 \times 3$  was higher than the image without filtering; the average relative error of AGB-MSAVI\_GLPF3 estimation model established with filtering process was 13.41%, and the model had a higher estimation accuracy; (3) the total AGB of the study area in Pisha sandstone was  $9.2 \times 10^5$  t in 2019, including 13.03% of low value AGB area, 47.56% of middle value AGB area and 39.41% of high value AGB area. The correlation between AGB and MSAVI was significant in desert ecosystem and the AGB-MSAVI\_GLPF3 model established based on Gaussian Low Pass Filter could estimate AGB accurately in the Pisha sandstone area.

**Keywords:** biomass; remote sensing estimation; Pisha sandstone area

在全球变暖的背景下,地球表层系统内的碳汇(源)和碳循环过程等问题引起了国际社会的密切关

注<sup>[1-3]</sup>。作为土壤—植被—大气循环系统中的重要纽带,植被通过光合作用和呼吸作用将大气中  $\text{CO}_2$  进

收稿日期:2020-04-07

修回日期:2020-05-05

资助项目:国家重点研发计划项目“鄂尔多斯高原砒砂岩区生态综合治理技术”(2017YFC0504502);中国林业科学研究院重点项目(CAF-YBB2018ZA004)

第一作者:刘雨晴(1997—),女,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为环境遥感。E-mail:matcha19@qq.com

通信作者:闫峰(1973—),男,江苏连云港人,博士,副研究员,主要从事环境遥感和灾害学研究。E-mail:njuyf@163.com

行转化和固定,对调节大气中 CO<sub>2</sub> 浓度、减缓温室效应具有重要意义。植被的地上生物量(Above ground biomass, AGB)是表征植被生命活动的重要指示因子,一般是指植物的枝、叶、花等在土壤以上的生物量,在植被生物量碳汇评价中应用广泛<sup>[4-5]</sup>。传统 AGB 测算方法主要是通过样方调查采用收割的方式进行,这在实际操作中体现出费时、费力、效率低下等缺点,无法准确实现宏观 AGB 定量监测。遥感技术使信息的获取从传统的“点”测量向“面”测量有了质的飞跃,在一定程度上弥补了传统 AGB 监测方法的不足,被认为是实现大面积 AGB 快速监测估算的一项切实可行的高科技手段,并具有广阔的应用前景<sup>[6-7]</sup>。在植被 AGB 遥感估算研究方面, Todd 等<sup>[8]</sup>利用 Landsat TM 数据计算的归一化植被指数 NDVI、绿度植被指数 GVI 等光谱指数,估算了科罗拉多东部的短草草原的生物量。Zheng 等<sup>[9]</sup>采用 Landsat ETM+ 数据研究了 NDVI 与松树林 AGB 之间的关系并对北威斯康星松林的生物量进行了估算。Battude 等<sup>[10]</sup>采用 Sentinel 高时空分辨率数据进行了玉米的生物量和产量估算。国内学者在生物量遥感估算研究方面,牛志春等<sup>[11]</sup>利用多种植被指数建立青海湖环湖地区草地生物量遥感监测模型,并比较多种模型优劣。刘沁茹等<sup>[12]</sup>分析多光谱地表参数与低分辨率遥感数据森林 AGB 统计关系,建立降尺度模型并实现森林 AGB 高分辨率向低分辨率转变。葛静等<sup>[13]</sup>利用黄河源区草地生物量数据和 MODIS 卫星遥感资料,结合农业多光谱相机 ADC 数据建立草地 AGB 反演模型,对黄河源区高寒草地的生物量进行了监测。刘莉等<sup>[14]</sup>利用 Landsat 8 数据与实测湿地 AGB 数据,通过生物量模型分析黄河三角洲自然保护区湿地植被生物量分布规律。综观当前生物量遥感估算研究成果,发现已有研究主要集中在森林、草原、农田等生态系统,对荒漠生态系统研究相对较少<sup>[7]</sup>,加强荒漠生态系统 AGB 估算研究对于全面评价地球表层系统碳汇变化意义重大。

砒砂岩区作为我国荒漠生态系统中的重要地理单元,由于砒砂岩成岩程度低、沙粒间胶结程度差、结构强度低,遇水如泥、遇风成砂,水土流失非常严重<sup>[15]</sup>。鄂尔多斯高原是砒砂岩分布最典型地区,也是黄河粗泥沙主要来源,生态环境脆弱性问题十分突出<sup>[16]</sup>。随着黄河流域生态环境保护上升为重大国家战略,研究砒砂岩区植被生物量变化对于全面评估砒砂岩区生态环境状况,积极推进黄河流域生态环境治理具有积极意义<sup>[17]</sup>。因此,本研究拟采用 2019 年 Landsat 8 数据对鄂尔多高原砒砂岩区植被 AGB 进

行遥感估算,为科学了解黄河流域砒砂岩区碳汇实况和完善荒漠生态系统生物量遥感估算方法提供技术支持。

## 1 研究区概况

研究区地处鄂尔多斯高原,主要位于 38°59′—39°40′N,109°59′—110°44′E,是我国砒砂岩的主要分布区之一,也是我国北方农牧交错带的生态脆弱区,主要包括内蒙古自治区伊金霍洛旗、准格尔旗,陕西省神木县、府谷县。气候类型为中温带大陆性气候,受季风影响,冬季多西北风,漫长而寒冷,夏季受偏南暖湿气流影响,雨热同期,春季多风少雨,秋季凉爽。四季分明,无霜期较长,日照充足<sup>[18]</sup>。多年平均气温 6.2~8.7℃,累计夏季平均日较差 12.2℃,冬季平均日较差 14.4℃;年降水量 340~420 mm,降水主要集中在 6 月和 8 月,占年总降水量的 64%,降水量在空间分布上体现为自东南向西北逐渐递减的特征。年日照时数为 2 740~3 100 h,植被类型独特,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<sup>[19]</sup>;土壤类型以栗钙土、棕钙土、灰钙土、灰漠土和潮土为主<sup>[20]</sup>。

## 2 研究数据与方法

### 2.1 研究数据

研究中采用 Landsat 8 OLI 遥感影像(Path/Row:127/33),影像成像时间为 2019 年 8 月 23 日。影像成像期研究区自然植被生长旺盛,AGB 基本处于其年内最大值状态。所选影像研究区上空无云层遮挡,成像质量良好。对影像采用基于 MODT-RAN4 模型的 FLAASH 模块进行辐射校正和大气校正,校正中选用中纬度夏季大气模型及乡村气溶胶模型,获得研究区各波段的地物反射率数值。

在地面生物量调查方面,2019 年 8 月在研究区开展地面植被调查和生物量测定试验。在生物量调查时选择有代表性的样地设置 10 m×10 m 样方,在每个样方内部选择 3 个 1 m×1 m 的小样方并用 GPS 记录采样点的位置。在采集样方内齐于地面上方植物的茎叶部分,并称重记录装袋,将每一个样地所采集的植物带回实验室,在 54℃ 的烘箱内进行烘干至重量不再变化时,取 3 个小样方测量值的平均值为该样地的 AGB,植被调查共获取 47 个有效地面样方生物量数据。

### 2.2 研究方法

利用遥感各波段间线性或者非线性相互组合成的植被指数可反映植被的绿色植被叶面积指数、植被

覆盖度、绿色生物量等 90% 以上的植被信息,利用植被指数探测研究区内 AGB 具有较高灵敏性<sup>[21-22]</sup>。在众多的植被指数中,NDVI(归一化植被指数)是目前最常见应用最广泛的植被指数,通过对红与近红外波段进行归一化处理,能较好反映植被空间分布状况与生长状况。RVI(比值植被指数)计算较为简单,易操作性使得该植被指数应用较为广泛。SAVI(土壤调节植被指数)<sup>[23]</sup>在 NDVI 基础上加入了土壤调节因子,减少了土壤背景影响。而 MSAVI(修正土壤调节植被指数)<sup>[24]</sup>不但可以消除土壤背景,还适合于植被覆盖度不同的下垫面。本研究中选择应用较为广泛的 NDVI, RVI, SAVI 和 MSAVI 研究砒砂岩区 AGB 遥感估算能力差异。

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

$$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_R} \quad (2)$$

$$SAVI = (1 + L) \frac{\rho_{NIR} + \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_{NIR} + L} \quad (3)$$

$$MSAVI = (1 + \rho_{NIR}) - \frac{1}{2} \times [(2 \times \rho_{NIR} + 1)^2 - 8 \times (\rho_{NIR} - \rho_R)]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: $\rho_{NIR}$  为近红外反射率; $\rho_R$  为可见光红波段反射率; $L$  为土壤调节系数,一般取 0.5。

砒砂岩区地处荒漠生态系统植被稀疏,在 Landsat 8 OLI 像元尺度水平上地物的空间异质性依然十分明显。在地面生物量测定地理定位中受卫星信号和 GPS 灵敏度差异等因素的影响,真实地理位置和

GPS 定位之间存在一定的误差。在遥感影像方面,遥感系统中成像系统本身以及图像几何校正也会使影像产生误差。滤波处理能有效抑制图像噪声并在一定程度上降低地表异质性的影响,在砒砂岩区 AGB 遥感估算中采用空间滤波的方法,以减小空间异质性和卫星系统定位误差对生物量遥感估算精度的影响。因此,本研究在地上生物量遥感估算中,首先比较分析多种植被指数与地面实测 AGB 之间的相关性,其次选用与 AGB 相关性较高的植被指数,研究其经不同滤波处理后与 AGB 之间相关性变化,最后选择相关性最高的植被指数与地面实测 AGB 建立统计回归模型,在模型误差分析的基础上最终实现 AGB 遥感估算。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生物量与植被指数的相关性

把经大气校正后的遥感影像的各波段反射率带入公式(1)–(4)分别计算研究区的 NDVI, RVI, SAVI 和 MSAVI 等植被指数,并分析 4 种植被指数与准实时测定的 AGB 的相关性(图 1)。结果表明 NDVI 和 RVI 在  $p < 0.05$  水平上与 AGB 显著相关,其相关系数分别为 0.371, 0.361; SAVI 和 MSAVI 在  $p < 0.01$  水平上与 AGB 显著相关,其相关系数分别为 0.626, 0.665。4 种常用的植被指数中 AGB-MSAVI 和 AGB-SAVI 相关性明显高于 AGB-NDVI 和 AGB-RVI, 其中 AGB-MSAVI 的相关性最为显著。因此,本研究在砒砂岩区 AGB 遥感估算中选择 MSAVI 与地面实测生物量做进一步的建模分析。

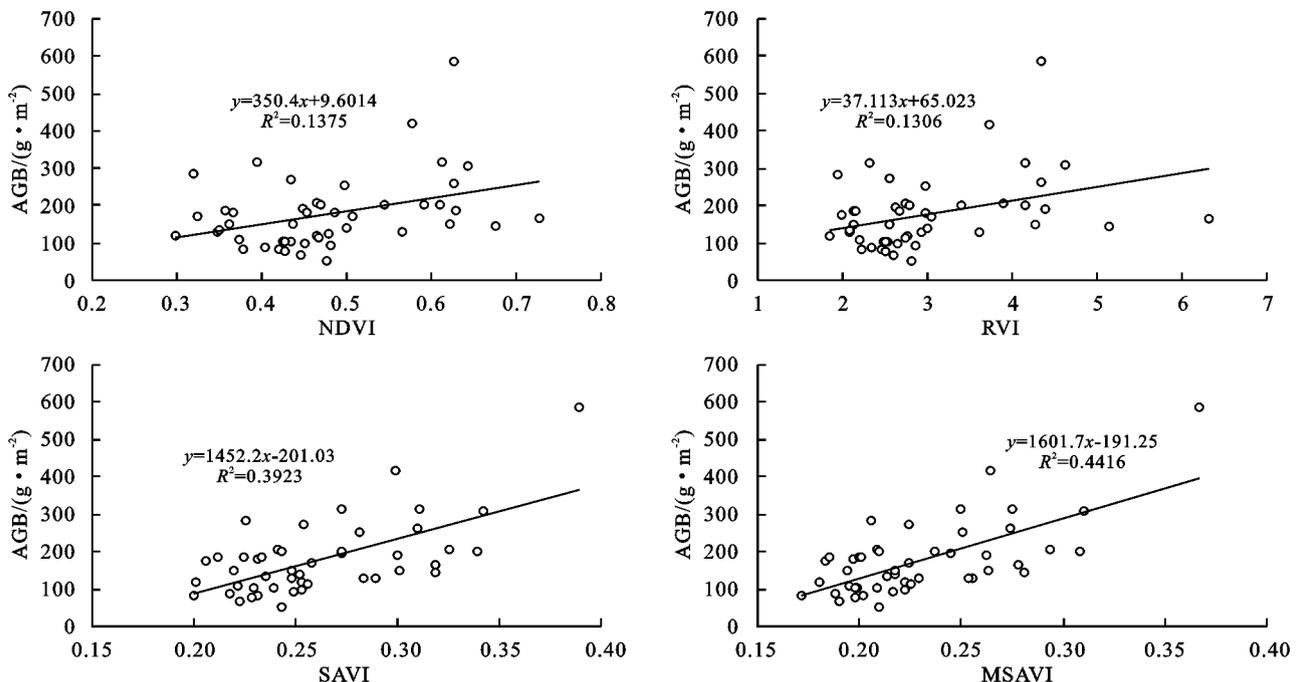


图 1 4 种植被指数与 AGB 空间散点图

### 3.2 植被指数的滤波处理

遥感影像滤波处理在一定程度上能够较好地减少影像噪声,图像常用的空间滤波处理主要有低通滤波(Low Pass Filter, LPF)、中值滤波(Median Filter, MF)、高通滤波(High Pass Filter, HPF)等方式。低通滤波属于频率域算法,可以增强图像的某些频率特征,改变地物目标与邻域或者背景之间的灰度反差,能滤除图像中高频部分,模糊图像的边缘及尖锐噪声。高斯低通滤波相对于理想低通滤波可以滤掉由于孤立的单点噪声而引起的灰度偏差而抑制图像的“振铃”现象。中值滤波具有抑制噪声(尤其是脉冲噪声)和保护边缘的特征,通过取中值方法赋予滤波核中心新值,在随机信号处理中效果明显<sup>[25]</sup>。高通滤波与低通滤波相反,图像处理中通过滤除图像中低频部分实现噪声去除。这些滤波均有平滑效果,能对影像进行平滑处理,减少影像空间异质性,减小定位误差的影响。空间滤波一般是通过滤波器在空域上使用空间卷积技术在原图上移动活动窗口进行局部运算,通过建立一个含有由系数矩阵或者权重因子矩阵构成的移动窗口,大小一般为奇数个像元,如 $3\times 3$ , $5\times 5$ , $7\times 7$ 等。

鄂尔多斯高原砒砂岩区地表裸露地较多,影像噪声主要表现为高频噪声较强,分别对 MSAVI 影像采用高斯低通滤波(Gaussian Low Pass Filter, GLPF)、低通滤波、中值滤波 3 种滤波方式,并按滤波窗口 $3\times 3$ , $5\times 5$ , $7\times 7$ 进行计算。后文分析中以 $3\times 3$ , $5\times 5$ , $7\times 7$ 滤波核高斯低通滤波处理的 MSAVI 分别表示为 MSAVI\_GLPF3, MSAVI\_GLPF5 和 MSAVI\_GLPF7, $3\times 3$ , $5\times 5$ , $7\times 7$ 滤波核低通滤波处理的 MSAVI 分别表示为 MSAVI\_LPF3, MSAVI\_LPF5 和 MSAVI\_LPF7, $3\times 3$ , $5\times 5$ , $7\times 7$ 滤波核中值滤波处理的 MSAVI 分别表示为 MSAVI\_MF3, MSAVI\_MF5 和 MSAVI\_MF7。

分别建立 GLPF, LPF 和 MF 共 3 种滤波方式,以 $3\times 3$ , $5\times 5$ , $7\times 7$ 滤波核尺度的 MSAVI 滤波数据与 AGB 建立二维空间散点图(图 2)。分析不同滤波方式和滤波核处理后的 MSAVI 与地上实测生物量的相关性,结果表明 GLPF, LPF 和 MF 这 3 种滤波方式下不同滤波核尺度滤波处理后的 MSAVI 均在 $p<0.01$ 水平上与 AGB 显著相关,在滤波核尺度方面表现为 $3\times 3$ 滤波核的滤波结果与实测 AGB 之间的相关性最好,其判定系数 $R^2$ 分别为 0.475 7, 0.431 9, 0.395 0。在 $5\times 5$ 与 $7\times 7$ 滤波核水平下,AGB-MSAVI 的相关性随滤波核尺度的增加而相对降低,这应该和滤波核尺度的增大,MSAVI 滤波平滑结果反而在一定程度上抑制

了植被信息空间的差异性有关。GLPF, LPF 和 MF 共 3 种滤波方式中,MSAVI\_GLPF3, MSAVI\_GLPF5 和 AGB 的判定系数 $R^2$ 分别为 0.475 7, 0.459 7, 均高于未经滤波处理的 AGB-MSAVI 判定系数( $R^2=0.4416$ )。根据不同滤波方式和滤波核处理的 MSAVI 与实测 AGB 的相关性分析结果,本研究选用高斯低通滤波 $3\times 3$ 处理后的 MSAVI\_GLPF3 数据进行砒砂岩区 AGB 遥感估算建模。

### 3.3 模型建立

在众多的统计回归模型中,一元线性回归模型具有计算简单易于操作、表达更为直观的优点。因此,在砒砂岩区 AGB 遥感估算模型建立中,从地面实测的 47 个 AGB 样本中随机选择 30 个样本,结合同期 MSAVI\_GLPF3 数据,建立 AGB-MSAVI\_GLPF3 一元线性回归模型:

$$\text{AGB}=1683.9\times\text{MSAVI\_GLPF3}-206.77$$

$$(R^2=0.4183, p<0.01) \quad (5)$$

为了进一步检验建立的模型对于砒砂岩区 AGB 的实际估算能力差异,用预留的 17 个实测 AGB 数据作为检验样本代入 AGB-MSAVI\_GLPF3 模型。采用平均绝对误差 MAE、平均相对误差 MRE、均方根误差 RMSE 进行 AGB-MSAVI\_GLPF3 模型误差分析。误差分析结果表明:AGB-MSAVI\_GLPF3 模型的 MAE, MRE 和 RMSE 分别为 2.743 3, 0.134 1, 58.598 3, AGB 估算平均精度为 86.59%, 所建立的 AGB-MSAVI\_GLPF3 模型能够较好地实现鄂尔多斯砒砂岩区 AGB 遥感估算。

把研究区 MSAVI 进行按 $3\times 3$ 滤波核进行高斯低通滤波处理后,代入生物量遥感估算模型(公式 5)计算鄂尔多斯砒砂岩研究区 AGB(图 3)。分析砒砂岩区 AGB 空间分布状况,结果表明:2019 年研究区平均 AGB 为 $180.07\text{ g/m}^2$ ,总 AGB 为 922 415.21 t。不同等级 AGB 在空间份上存在较大的差异。研究区内 AGB 相对低值区( $\text{AGB}<50\text{ g/m}^2$ )的面积占总面积比例为 13.03%,地物类型为水体、半固定沙地以及建筑用地,主要分布在伊金霍洛旗东部、准格尔旗西南部和神木县北部地区;AGB 中值区( $50\text{ g/m}^2\leq\text{AGB}<200\text{ g/m}^2$ )的面积总占比为 47.56%,AGB 中值区的地物类型为固定沙地、草地和林地,主要分布在伊金霍洛旗中东部、准格尔旗西部和西南部和神木县北部等地区;AGB 高值区( $\text{AGB}\geq 200\text{ g/m}^2$ )的面积占比为 39.41%,AGB 高值区地物类型为林地、耕地,主要分布在府谷县西部、神木县中北部和准格尔旗西南部等地区。

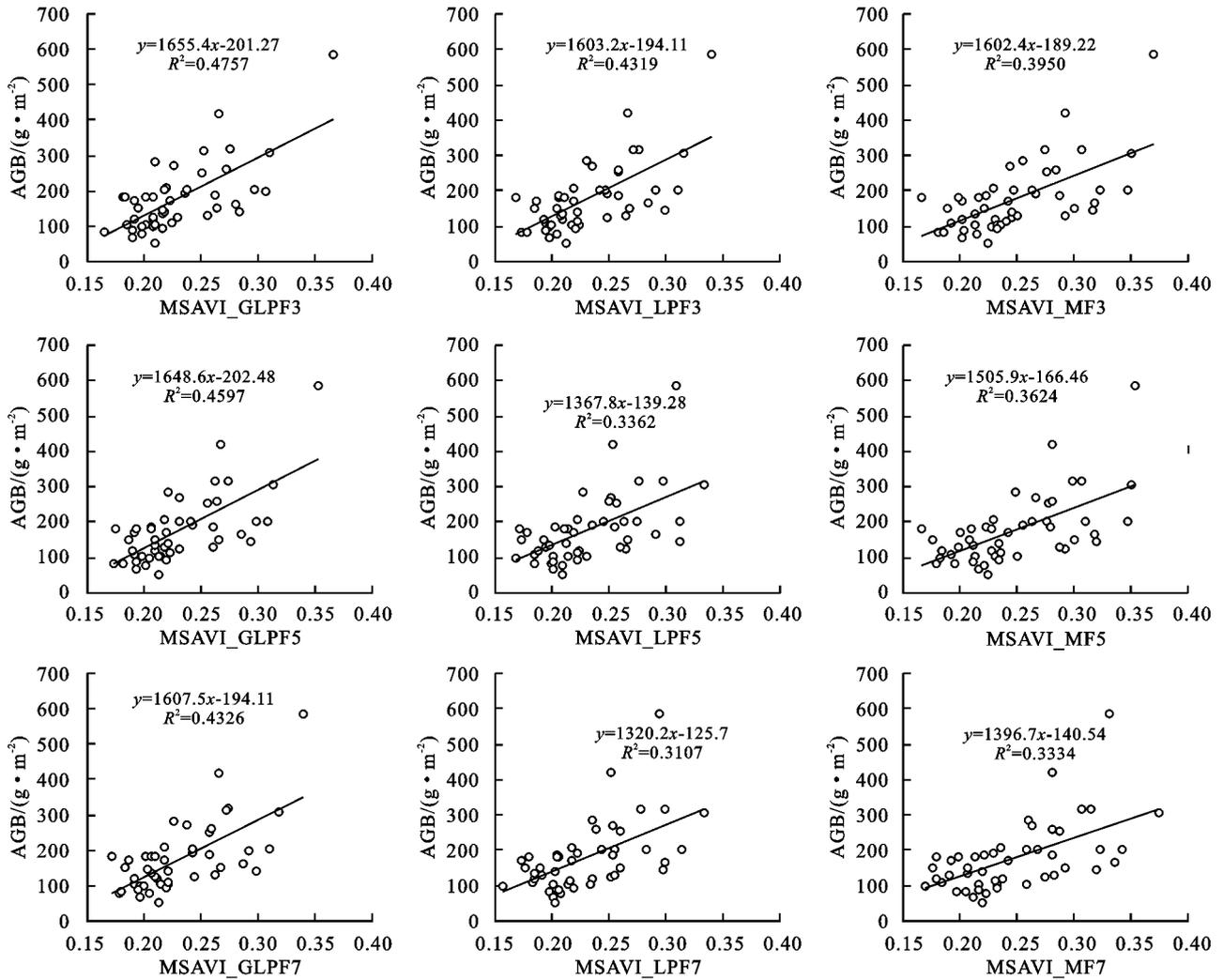


图 2 不同滤波处理 MSAVI 与 AGB 二维空间散点图

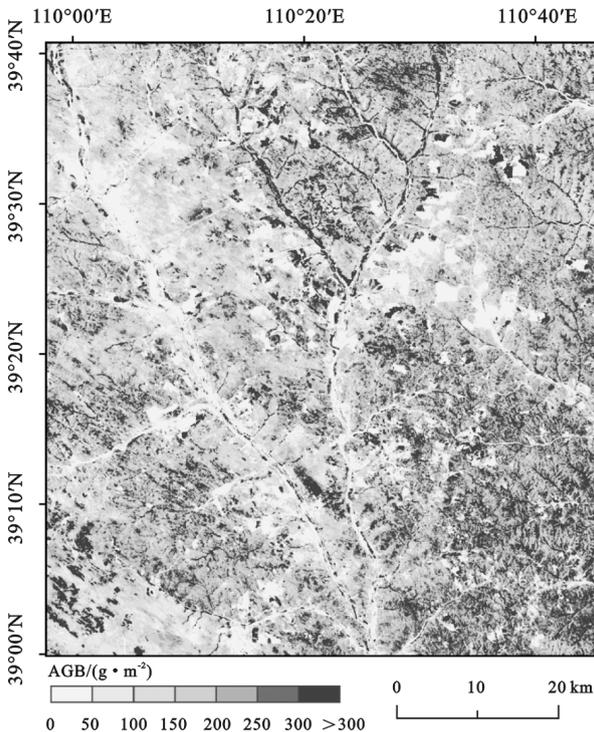


图 3 2019 年研究区 AGB 空间分布

## 4 讨论

一般情况下,不同地物的反射率存在一定的差异,根据植被的光谱特征,利用地物的可见光和近红外等波段的反射率进行一定的线性和非线性组合,计算能够进一步突出植被的叶绿素等信息,从而形成了数十种植被指数。植被指数是对地表植被状况的简单、有效和经验的度量,被广泛应用于植被生长状况、植被初级生产力和作物估产等方面,具有较广的实用性。植被指数与 AGB 之间具有较好的相关性,能够直接用以 AGB 的遥感估算。但是在荒漠生态系统 AGB 估算应用中,由于荒漠生态系统地表植被相对稀疏,地表裸露面积占比相对较多,地表异质性十分显著。虽然 NDVI 是当前生态学研究中的应用最为广泛,但在荒漠生态系统 AGB 遥感估算中可能并不是效果最佳的植被指数。MSAVI 和 SAVI 计算中在由于采用近红外和红光波段反射率的同时引入了土壤调节系数,在植被稀疏地区显示出与 AGB 之间具有较高的相关性;MSAVI 在运用中通过将 SAVI 中

的常数  $L$  修改为变量函数  $L$ , 从而增加了植被信号动态范围, 在荒漠化地区进一步减小土壤背景的影响, 对于植被监测表现出更高灵敏度, 能够较好地实现 AGB 遥感估算。植被指数与实测 AGB 之间的相关性研究结论与 Yan 等<sup>[26]</sup> 在毛乌素沙地 AGB 遥感估算的结果相一致。

遥感影像在接收和获取过程中存在噪声, 荒漠生态系统由于地表异质性显著, 遥感影像的噪声问题较为明显。遥感影像是由不同频率的成分组成, 在分析图像信号的频域特性时, 一幅图像的边缘、跳跃部分以及颗粒噪声代表图像信号的高频分量, 而大面积的背景区则代表图像信号的低频分量。在荒漠生态系统中, GLPF, LPF 和 MF 这 3 种滤波方式均实现了图像的平滑降噪, 滤波后的 MSAVI 与均在  $p < 0.01$  水平上与 AGB 显著相关, 但是由于 GLPF 能够滤除荒漠生态系统中的高频噪声, 并能够保持着大面积的背景植被信息, 使 GLPF 处理的 MSAVI 与 AGB 的相关性高于 LPF 和 MF 滤波方式。此外, 受到荒漠生态系统地表异质性显著特征的影响, 在  $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7$  不同滤波尺度情况下, 随着滤波器尺度的增大, 滤波图像的过度平滑处理容易造成图像对应的植被信息丢失, 反而无法较好地实现 AGB 估算。因此, 在荒漠生态系统 AGB 遥感估算的实际应用中, 根据其地表的异质性实际情况, 选择合适的植被指数 (如 MSAVI), 并辅以合理滤波尺度的 GLPF 滤波方法十分重要。

## 5 结论

(1) 在荒漠生态系统中, 与 NDVI, RVI 和 SAVI 相比, MSAVI 能够更好地反演砒砂岩区的 AGB, 常用的 NDVI 在荒漠生态系统 AGB 估算中并不是效果最佳的植被指数。

(2) 高斯低通滤波能够减小影像与地面实测 AGB 的空间对应误差, 采用实测 AGB 和同期高斯低通滤波按  $3 \times 3$  滤波核处理后的 MSAVI\_GLPF3 数据建立一元线性回归模型, 其 MAE, MRE 和 RMSE 分别为  $2.743\ 3\ \text{g/m}^2$ ,  $13.41\%$ ,  $58.598\ 3$ , AGB 估算平均精度为  $86.59\%$ , 建立的 AGB-MSAVI\_GLPF3 模型能够较好地实现砒砂岩区 AGB 遥感估算。

(3) 2019 年砒砂岩研究区平均 AGB 为  $180.07\ \text{g/m}^2$ , 总 AGB 为  $922\ 415.21\ \text{t}$ 。AGB 低值区主要分布在伊金霍洛旗东部、准格尔旗西南部和神木县北部; AGB 中值区主要分布在伊金霍洛旗中东部、准格尔旗西部和西南部以及神木县北部; AGB 高值区主要分布在府谷县西部、神木县中北部和准格尔旗西南部。

## 参考文献:

- [1] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2173-2176.
- [2] Jones C D, Collins M, Cox P M, et al. The carbon cycle response to ENSO: A coupled climate-carbon cycle model study [J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(21): 4113-4129.
- [3] Zachos J C, Dickens G R, Zeebe R E. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics [J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 279-283.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Tucker C J, Fung I Y, Keeling C D, et al. Relationship between atmospheric  $\text{CO}_2$  variations and a satellite-derived vegetation index [J]. *Nature*, 1986, 319(6050): 195-199.
- [7] Yan F, Wu B, Wang Y. Estimating spatiotemporal patterns of aboveground biomass using Landsat TM and MODIS images in the Mu Us Sandy Land, China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200: 119-128.
- [8] Todd S, Hoffer R, Milchunas D. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(3): 427-438.
- [9] 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.
- [10] Battude M, Al Bitar 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: 668-681.
- [11] 牛志春, 倪绍祥. 青海湖环湖地区草地植被生物量遥感监测模型 [J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 695-702.
- [12] 刘沁茹, 孙睿. 森林生物量遥感降尺度研究 [J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 3967-3977.
- [13] 葛静, 孟宝平, 杨淑霞, 等. 基于 ADC 和 MODIS 遥感数据的高寒草地上生物量监测研究: 以黄河源区为例 [J]. *草业学报*, 2017, 26(7): 23-34.
- [14] 刘莉, 韩美, 刘玉斌, 等. 黄河三角洲自然保护区湿地植被生物量空间分布及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2017, 37(13): 4346-4355.

- 展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.
- [2] 田璐,张敬晓,高建恩,等.深层干化土壤水分恢复试验研究[J].农业机械学报,2019,50(4):255-262.
- [3] 孙剑,李军,王美艳,等.黄土高原半干旱偏旱区苜蓿—粮食轮作土壤水分恢复效应[J].农业工程学报,2009,25(6):33-39.
- [4] 孙长忠,黄宝龙,陈海滨,等.黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J].北京林业大学学报,1998,20(3):10-17.
- [5] 王志强,刘宝元,王旭艳,等.黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究[J].农业工程学报,2007,23(11):77-83.
- [6] 赵娇娜,徐学选,李星,等.长武塬区降雨入渗特征[J].中国水土保持科学,2012,10(4):37-44.
- [7] 陈洪松,邵明安,王克林.土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J].农业工程学报,2006,22(1):44-47.
- [8] 杜光波,倪万魁.降雨条件下黄土斜坡的入渗特征分析[J].安全与环境学报,2017,17(4):1387-1391.
- [9] 苏敬媛.黄土高原典型流域土壤水分时空变异及其养分特征对不同植被类型的响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [10] 肖婧,王兵.黄土丘陵区不同坡度撂荒地入渗特征影响因素试验研究[J].水土保持学报,2019,33(6):136-142.
- [11] 黄俊,金平伟,李敏,等.径流小区尺度土壤入渗率影响因子与估算模型研究[J].农业机械学报,2016,47(8):171-178.
- [12] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18.
- [13] 白盛元,汪有科,马建鹏,等.黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):218-223.
- [14] 雷志栋.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [15] 刘汗,雷廷武,赵军.土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(2):1-6.
- [16] 高正夏.新疆玛河流域平原区次降雨入渗补给系数变化规律研究[J].资源环境与工程,2014,28(4):582-586.
- [17] 白一茹.黄土丘陵区枣林土壤性质时空特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [18] 汪星,周玉红,汪有科,等.黄土高原半干旱区山地密植枣林土壤水分特性研究[J].水利学报,2015,46(3):263-270.
- [19] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林地土壤入渗过程分析[J].土壤学报,2009,46(5):953-958.
- [20] 李萍,李同录,王阿丹,等.黄土中水分迁移规律现场试验研究[J].岩土力学,2013,34(5):1331-1339.
- [21] Tu X B, Kwong A K L, Dai F C, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides[J]. Engineering Geology, 2009,105(1/2):134-150.

(上接第140页)

- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 丁一汇.中国气候[M].北京:科学出版社,2013.
- [19] 陈灵芝.中国植物区系与植被地理[M].北京:科学出版社,2019.
- [20] 赵其国,史学正.土壤资源概论[J].北京:科学出版社,2007.
- [21] 闫峰,吴波,王艳姣.2000—2011年毛乌素沙地植被生长状况时空变化特征[J].地理科学,2013,33(5):602-608.
- [22] 闫峰,卢琦,吴波,等.1981—2015年新疆生产建设兵团植被生长变化特征[J].干旱区地理,2018,41(3):553-563.
- [23] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote sensing of environment, 2002,83(1/2):195-213.
- [24] Qi J, Chehbouni A, Huete A, et al. A modified soil adjusted vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994,48(2):119-126.
- [25] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2013.
- [26] Yan F, Wu B, Wang Y. 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.