

库布齐沙漠人工灌木林生物量的遥感估测模型构建¹⁾

郭玉东 张秋良 张榕 陈晓燕 弥宏卓

(内蒙古农业大学,呼和浩特,010010) (内蒙古社会科学院) (内蒙古林业和草原监测规划院)

摘要 以库布齐沙漠沙柳(*Salix psammophila*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、杨柴(*Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum*) 4种主要人工灌木林为研究对象,设置柠条锦鸡儿样地69块、沙棘样地53块、沙柳样地59块、杨柴样地39块,对每个样地选取1株标准株进行样品收集,计算全株生物量(含地下生物量)及样地生物量;以样地人工灌木林全株生物量为评价指标,以2017年陆地卫星8号携带的运营性陆地成像仪(Landsat 8 OLI)卫星遥感影像数据的遥感影响因素6个波段反射值(蓝光波段(B_2)、绿光波段(B_3)、红光波段(B_4)、近红外波段(B_5)、短波红外波段1(B_6)、短波红外波段2(B_7)),依据样地调查数据计算的植被影响因素5个植被指数(归一化植被指数($I_{V,ND}$)、增强型植被指数($I_{V,E}$)、比值植被指数($I_{V,R}$)、土壤调整植被指数($I_{V,SA}$)、修正的土壤调节植被指数($I_{V,MSA}$))为影响因素,应用逐步回归法,构建库布齐沙漠4种人工灌木林生物量(W)的遥感估测模型,探索提升估测库布齐沙漠人工灌木林生物量及生态系统碳储量精度的方法。结果表明:与柠条锦鸡儿林生物量相关性较高的遥感影响因素为 B_2 波段反射值(ε_{B_2})、 B_6 波段反射值(ε_{B_6}),与沙棘林生物量相关性较高的遥感影响因素为 $I_{V,R}$ 、 $I_{V,MSA}$,与沙柳林生物量相关性较高的遥感影响因素为 $I_{V,ND}$ 、 $I_{V,SA}$,与杨柴林生物量相关性较高的遥感影响因素为 B_6 波段反射值(ε_{B_6})。经相关分析,筛选出与生物量相关性较高的影响因素,应用逐步回归法,建立了柠条锦鸡儿、沙棘、沙柳、杨柴4种灌木林生物量的遥感估测模型;柠条锦鸡儿林生物量的遥感估测模型为多元线性回归方程,沙棘、沙柳和杨柴均为一元回归模型。柠条锦鸡儿林生物量的遥感估测最优模型为 $W_{NT} = 4.364 - 0.008\varepsilon_{B_2} + 0.002\varepsilon_{B_6}$,决定系数(R^2)为0.49,预估精度为72.1%;沙棘林生物量的遥感估测最优模型为 $W_{SJ} = -3.368 + 8.027I_{V,MSA}$, R^2 为0.51,预估精度为62.5%;沙柳林生物量的遥感估测最优模型为 $W_{SL} = -10.803 + 23.853I_{V,SA}$, R^2 为0.47,预估精度为76.5%;杨柴林生物量的遥感估测最优模型为 $W_{YC} = 1.643 - 0.0003\varepsilon_{B_6}$, R^2 为0.41,预估精度为72.2%。

关键词 灌木林;生物量;估测生物量模型;遥感;库布齐沙漠

分类号 S758;S718

Construction of Remote Sensing Model for Biomass Estimation of Artificial Shrubbery in Kubuqi Desert//Guo Yudong, Zhang Qiuliang, Zhang Rong (Inner Mongolia Agricultural University); Chen Xiaoyan (Inner Mongolia Academy of Social Science); Mi Hongzhuo (Inner Mongolia Forestry and Grassland Monitoring and Planning Institute)//Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(9): 56-60.

Four typical artificial shrubbery (*Caragana korshinskii*, *Hippophae rhamnoides*, *Salix psammophila* and *Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum*) in Kubuqi desert area were selected as the research object, and 69 plots, 53 plots, 59 plots, and 39 plots were set up, respectively. One standard plant was selected from each plot for sample collection, and the whole plant biomass (including underground biomass) and plot biomass were calculated. The biomass of whole plant of artificial shrubbery in the sample plot was taken as the evaluation index, with the operational land imager carried by Landsat 8 in 2017 (Landsat 8 OLI) satellite remote sensing image data are affected by the reflection values of six bands (blue light band (B_2), green light band (B_3), red light band (B_4), near-infrared band (B_5), short-wave infrared band 1 (B_6), short-wave infrared band 2 (B_7)), according to the sample survey data calculation of vegetation factors five vegetation index (normalized difference vegetation index ($I_{V,ND}$), enhanced vegetation index ($I_{V,E}$), the ratio vegetation index ($I_{V,R}$), soil adjusted vegetation index ($I_{V,SA}$), modified soil vegetation index ($I_{V,MSA}$) for influence factors of the stepwise regression method. A remote sensing estimation model for four kinds of artificial shrubbery biomass (W) in the Kubuqi desert was constructed, and a method to improve the estimation accuracy of artificial shrubbery biomass and ecosystem carbon storage in the Kubuqi Desert was explored. The remote sensing influencing factors with higher correlation with *Caragana korshinskii* forest biomass were B_2 band reflection value (ε_{B_2}) and B_6 band reflection value (ε_{B_6}), the remote sensing influencing factors with higher correlation with *Hippophae rhamnoides* forest biomass were $I_{V,R}$ and $I_{V,MSA}$, the remote sensing influencing factors with higher correlation with *Salix psammophila* forest biomass were $I_{V,ND}$ and $I_{V,SA}$. And the reflection value of band B_6 (ε_{B_6}) was the influencing factor with high correlation with *Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum* forest biomass. Based on the correlation analysis, the influencing factors with high correlation with biomass were screened, and the biomass estimation models of *Caragana korshinskii*, *Hippophae rhamnoides*, *Salix psammophila* and *Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum* were established by using stepwise regression method. The estimation model of biomass of *Caragana korshinskii* was a multiple linear regression equation, and the regression model of *Hippophae rhamnoides*, *Salix psammophila* and *Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum* was a single linear regression model. The optimal model for estimating biomass of *Caragana korshinskii* forest was $W_{NT} = 4.364 - 0.008\varepsilon_{B_2} + 0.002\varepsilon_{B_6}$, the coefficient of determination (R^2) was 0.49, and the prediction accuracy was 72.1%. The optimal model for estimating *Hippophae rhamnoides* forest bi-

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2022.09.003

1) 内蒙古自治区应对气候变化及低碳发展专项资金项目(内发改环资字[2016]615号)。

第一作者简介:郭玉东,男,1988年4月生,内蒙古农业大学林学院,博士研究生。E-mail:guoyudong2012@yeah.net。

通信作者:张秋良,内蒙古农业大学林学院,教授。E-mail:zql@mail@vip.sina.com。

收稿日期:2021年7月22日。

责任编辑:张玉。

omass by remote sensing was $W_{SJ} = -3.368 + 8.027I_{V,MSA}$, R^2 was 0.51, and the prediction accuracy was 62.5%. The optimal model for estimating *Salix psammophila* forest biomass by remote sensing was $W_{SL} = -10.803 + 23.853I_{V,SA}$, R^2 was 0.47, and the prediction accuracy was 76.5%. The optimal remote sensing estimation model of *Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum* forest biomass was $W_{YC} = 1.643 - 0.0003\varepsilon_{B_6}$, R^2 was 0.41, and the prediction accuracy was 72.2%.

Keywords Shrubbery; Biomass; Biomass estimation model; Remote sensing; Kubuqi desert

生物量是整个生态系统运行的能量基础,是生态系统生产力水平的主要体现,也是衡量植物群落贡献量和评价生态系统生产潜力的重要指标之一,它直接反映了生态系统功能的强弱,对生态系统结构的形成有着非常重要的影响^[1]。区域尺度森林生物量的估测,主要有依据森林资源清查、依据遥感估测的两种方法^[2]。遥感数据,因其可快速定量获取区域尺度森林生物量及其变化的优点,因此应用遥感技术定量反演森林生物量及模型拟合,已成为当前国内外的研究热点^[3-5]。随着遥感技术的飞速发展和国家森林资源清查体系的不断推进,依据样地实际调查数据和遥感影像相结合的方法,已逐渐成为当今森林碳储量反演的主要手段^[6-9];近些年来,较多研究应用遥感技术替代传统的调查方法进行森林生物量的估测,实现了小到林分、大到区域等不同空间尺度的森林生物量估测^[10-12]。

长期以来,遥感生物量反演主要应用于乔木林^[13-17],在灌木林尤其是荒漠地区的灌木林方面研究甚少。为此,本研究以库布齐沙漠沙柳(*Salix psammophila*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、杨柴(*Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum*) 4种主要人工灌木林为研究对象,设置柠条锦鸡儿样地 69 块、沙棘样地 53 块、沙柳样地 59 块、杨柴样地 39 块,对每个样地选取 1 株标准株进行样品收集,计算全株生物量(含地下生物量)及样地生物量;以样地人工灌木林全株生物量为评价指标,以 2017 年陆地卫星 8 号携带的运营性陆地成像仪(Landsat 8 OLI)卫星遥感影像数据的遥感影响因素 6 个波段反射值(蓝光波段(B_2)、绿光波段(B_3)、红光波段(B_4)、近红外波段(B_5)、短波红外波段 1(B_6)、短波红外波段 2(B_7))、依据样地调查数据计算的植被影响因素 5 个植被指数(归一化植被指数、增强型植被指数、比值植被指数、土壤调整植被指数、修正的土壤调节植被指数)为影响因素,应用逐步回归法,构建库布齐沙漠 4 种人工灌木林生物量的遥感估测模型。旨在为探索准确估测库布齐沙漠人工灌木林生物量及生态系统碳储量的方法提供参考。

1 研究区概况

研究区以库布齐沙漠为主体,行政区域上属于鄂尔多斯市的杭锦旗、达拉特旗、准格尔旗。库布齐

沙漠地处我国西北部内陆,介于 $107^\circ \sim 111^\circ 30' E$ 、 $39^\circ 15' \sim 40^\circ 45' N$ 之间;气候属于典型温带大陆性干旱季风气候,冬季寒冷少雪、夏季高温多雨、春季多风少雨、秋季凉爽,四季温差较大。1 月份最冷,极端最低气温 $-32.1^\circ C$; 7 月份最热,极端最高气温 $38.7^\circ C$ 。年日照时间 $3\ 000 \sim 3\ 200\ h$,无霜期 $122 \sim 160\ d$ 。东部水分条件较好,属于半干旱区;西部雨水较少,为干旱区;年总降水量 $150 \sim 400\ mm$,年平均降水量 $249\ mm$,从东向西逐步减少,降水主要集中在 7~8 月份;年蒸发量 $2\ 100 \sim 2\ 700\ mm$,干燥度为 $1.5 \sim 4.0$;年平均风速 $3 \sim 4\ m \cdot s^{-1}$,大风时间 $25 \sim 35\ d$ ^[18]。植被主要分为荒漠植被、沙生植被、草原植被、人工植被等;其中,人工植被主要以柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙柳(*Salix psammophila*)、花棒(*Corethroedendron scoparium*)、杨柴(*Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、旱柳(*Salix matsudana*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 等为主^[19]。2020 年森林资源统计数据显示,研究区柠条锦鸡儿、沙棘、沙柳、杨柴人工林总面积约 $365\ 635\ hm^2$,占人工造林总面积的 89.14%。其中,柠条锦鸡儿人工林面积最大,占研究区人工造林总面积的 36.88%;沙柳、杨柴次之,分别占研究区人工造林总面积的 25.71%、20.03%;沙棘人工林面积最小,占研究区人工造林总面积的 6.52%。

2 研究方法

2.1 样地设置及数据来源

样地实测数据:野外调查,根据 4 种灌木分布的情况,各随机布设 $30\ m \times 30\ m$ 样地,记录每块样地的中心坐标、海拔、坡度、坡向、株行距、伴生种等信息;对样地内所有灌木每木调查,记录地径、株高、冠幅、分枝数等生长指标。

用于遥感估测生物量的样地数据,采用平均标准株法推算。其中,柠条锦鸡儿、沙棘、沙柳、杨柴,分别布设 69、53、59、39 块典型样地。对每个样地至少选取 1 株标准株进行样品收集,计算出全株生物量(含地下生物量),然后乘以样地株数,即得到所有样地生物量。

遥感数据:本研究选用陆地卫星 8 号携带的运营性陆地成像仪(Landsat 8 OLI)卫星遥感影像数

据,选取其中6个波段,地面分辨率为30 m。选择2017年的四景影像,遥感数据编号分别为LC81270332017171LGN00(6月20日获取)、LC81270322017171LGN00(6月20日获取)、LC81280322017194LGN00(7月13日获取)、LC81290322017217LGN00(8月5日获取);样地调查时间为2017年6~9月份,影像获取时间与野外调查时间比较接近。四景影像可以覆盖所有的样地点(见图1)。

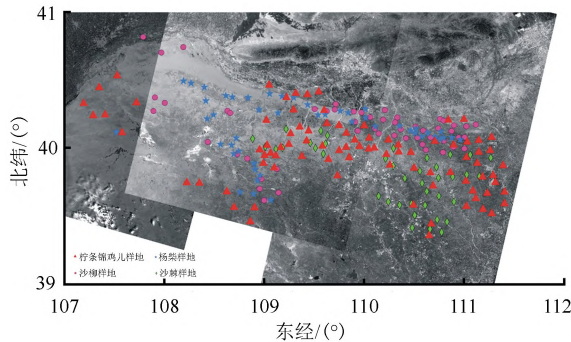


图1 遥感影像覆盖范围及样点布设

2.2 遥感影像预处理

在遥感影像数据分析和应用过程中,地表物的光谱信息是定量计算的一个主要依据,而遥感影像在获取时会存在多种因素的干扰,致使遥感数据产生较大误差,因此在提取遥感数据之前需要对遥感影像进行一定的预处理^[5]。针对库布齐沙漠及收集的遥感影像参数等特点,本研究主要其对遥感影像进行辐射定标、几何校正、大气校正等处理。

2.3 估测生物量评价指标体系的构建

遥感影响因素提取:根据需要提取遥感影响因素的数据共6个波段(见表1)。

表1 提取遥感影响因素数据的各波段特征

波段	波长/ μm
B ₂ (蓝光波段)	0.45~0.51
B ₃ (绿光波段)	0.53~0.59
B ₄ (红光波段)	0.64~0.67
B ₅ (近红外波段)	0.85~0.88
B ₆ (短波红外波段1)	1.57~1.65
B ₇ (短波红外波段2)	2.11~2.29

植被指数提取:利用卫星不同波段的光谱数据进行组合计算得到植被指数。由于其优良的特性,植被指数被作为一种高效的遥感手段,广泛应用于植被研究的多个方面,如反映植被的生长、健康状况及其生物量等。多年来已研究发展了多个不同的植被指数^[20-22],本研究选取了归一化植被指数($I_{V,ND}$)、增强型植被指数($I_{V,E}$)、比值植被指数($I_{V,R}$)、土壤调整植被指数($I_{V,SA}$)、修正的土壤调节植被指数($I_{V,MSA}$)等5个植被指数进行遥感估测生

物量方程拟合。

——归一化植被指数($I_{V,ND}$)。该指数对植被生长状态及空间分布密度反映较为敏感,其值随植被覆盖度的增大而增大,植被可以得到有效的突出。 $I_{V,ND} = (\varepsilon_{B_5} - \varepsilon_{B_4}) / (\varepsilon_{B_5} + \varepsilon_{B_4})$; ε_{B_5} 为B₅波段反射值, ε_{B_4} 为B₄波段反射值。

——增强型植被指数($I_{V,E}$)。使植被信号得到了增强,校正了土壤背景和气溶胶散射的影像,植被茂密的区域更敏感。 $I_{V,E} = 2.5(\varepsilon_{B_5} - \varepsilon_{B_4}) / [(\varepsilon_{B_5} + (6\varepsilon_{B_4} - 7.5\varepsilon_{B_2}) + 1)]$; ε_{B_2} 为B₂波段反射值。

——比值植被指数($I_{V,R}$)。是绿色植物灵敏指示的重要参数,与植被叶干生物量等相关性较高,是反演植物生物量有利的植被指数之一。 $I_{V,R} = \varepsilon_{B_5} / \varepsilon_{B_4}$ 。

——土壤调整植被指数($I_{V,SA}$)。是在 $I_{V,ND}$ 的基础上加入了土壤调节影响因素,有效降低了土壤背景影响,增加植被信息提取的精度。 $I_{V,SA} = (1+L)(\varepsilon_{B_5} + \varepsilon_{B_4}) / (L + \varepsilon_{B_5} + \varepsilon_{B_4})$; L 为土壤调节系数。

——修正的土壤调节植被指数($I_{V,MSA}$)。是为更进一步削弱裸土影响而提出的一种植被指数,它能减弱土壤背景的噪声。 $I_{V,MSA} = \{2\varepsilon_{B_5} + 1 - [(2\varepsilon_{B_5} + 1)^2 - 8(\varepsilon_{B_5} + \varepsilon_{B_4})]^{1/2}\} / 2$ 。

借助ENVI 5.3软件中的Vegetation Index Calculator工具计算所需5个植被指数。

2.4 遥感估测生物量模型的构建

多元回归分析是研究多个影响因素与评价指标之间关系的常用分析方法,定量地描述一个评价指标与多个影响因素间的线性依存关系^[23]。目前多元回归分析方法应用较为广泛,理论较为成熟,可以在多种影响因素共同影响时建构一个完整的预测模型。一般表达式为: $W = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_ix_i$; W 为拟合生物量, b_0 为常数, b_i 为 x_i 的回归系数, x_i 为影响因素。

本研究随机选择样本数量的70%作为建立模型的样本数据,剩余30%作为检验模型精度的样本数据。本研究采用精度检验的指标:决定系数

(R^2)、均方根误差 $E_{RMS} = \{[\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2] / 2\}^{1/2}$ 、相对均方根误差 $E_{RRMS} = \{[\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2] / 2\}^{1/2} \times (1/y)$ 、模型精度 $P = 1 - |y - y'| / y$; 式中, n 为样地数量, y'_i 为第 i 块样地的预估值, y_i 为第 i 块样地的实测值, y 是所有样地实测值的平均值。

3 结果与分析

采用皮尔逊相关分析法筛选对估测各树种生物量影响最显著的遥感影响因素和植被影响因素,相

关系数越高说明影响因素包含植被生长发育的光谱信息量越大。借助 SPSS 软件,以样地生物量为评价指标,以遥感影响因素和植被影响因素作为影响评价指标的影响因素进行相关分析(见表 2)。由表 2 可见:柠条锦鸡儿生物量,与归一化植被指数($I_{V,ND}$)、增强型植被指数($I_{V,E}$)呈显著正相关($P < 0.01$),与其他影响因素呈显著负相关($P < 0.01$);其中,与 B_2 波段反射值(ϵ_{B2})的相关系数绝对值最大,与增强型植被指数($I_{V,E}$)的相关系数绝对值最小。沙棘林生物量,与归一化植被指数($I_{V,ND}$)、增强型植被指数($I_{V,E}$)、修正的土壤调节植被指数($I_{V,MSA}$)呈显著正相关($P < 0.01$),与其他影响因素呈负相关。沙柳林生物量,与所有波段反射值呈显著负相

关($P < 0.01$),与所有植被指数呈显著正相关($P < 0.01$)。沙柳林生物量,与 $B_2 \sim B_7$ 波段反射值、比值植被指数($I_{V,R}$)呈显著负相关($P < 0.01$),与归一化植被指数($I_{V,ND}$)、增强型植被指数($I_{V,E}$)、土壤调整植被指数($I_{V,SA}$)、修正的土壤调节植被指数($I_{V,MSA}$)呈显著正相关($P < 0.01$),其中与 B_6 (短波红外波段 1)波段反射值(ϵ_{B6})的相关系数绝对值最大。

综上所述,每个树种生物量与多个影响因素呈显著正或负相关关系,说明这些影响因素中包含了大量的植被生长信息;因此筛选显著性强的影响因素作为构建模型的影响因素,本研究只筛选相关系数绝对值大于 0.5 的遥感影响因素。

表 2 不同树种生物量与各个影响因素之间的相关系数

相关因素	各相关因素间的相关系数										
	ϵ_{B2}	ϵ_{B3}	ϵ_{B4}	ϵ_{B5}	ϵ_{B6}	ϵ_{B7}	$I_{V,ND}$	$I_{V,E}$	$I_{V,R}$	$I_{V,SA}$	$I_{V,MSA}$
W_{NT}	-0.67**	-0.65**	-0.63**	-0.49**	-0.57**	-0.56**	0.63**	0.45**	-0.64**	0.63**	0.64**
W_{SJ}	-0.61**	-0.61**	-0.65**	-0.21	-0.62**	-0.65**	0.71**	0.70**	-0.72**	0.71**	0.72**
W_{SL}	-0.60**	-0.60**	-0.60**	-0.44**	-0.57**	-0.60**	0.69**	0.61**	0.68**	0.69**	0.68**
W_{YC}	-0.53**	-0.60**	-0.63**	-0.63**	-0.65**	-0.63**	0.59**	0.62**	-0.58**	0.59**	0.58**

注:**表示极显著相关($P < 0.01$)。 W_{NT} 为柠条锦鸡儿林生物量, W_{SJ} 为沙棘林生物量, W_{SL} 为沙柳林生物量, W_{YC} 为杨柴林生物量; ϵ_{B2} 为 B_2 波段反射值, ϵ_{B3} 为 B_3 波段反射值, ϵ_{B4} 为 B_4 波段反射值, ϵ_{B5} 为 B_5 波段反射值, ϵ_{B6} 为 B_6 波段反射值, ϵ_{B7} 为 B_7 波段反射值; $I_{V,ND}$ 为归一化植被指数, $I_{V,E}$ 为增强型植被指数, $I_{V,R}$ 为比值植被指数, $I_{V,SA}$ 为土壤调整植被指数, $I_{V,MSA}$ 为修正的土壤调节植被指数。

借助 SPSS 22.0 统计分析软件,将与各灌木林生物量相关性较高的影响因素和 4 种灌木林生物量进行多元逐步线性回归。在建模过程中,一般认为各影响因素之间会存在多重共线性问题,这样会导致参数估计值的方差增大;因此在进行多元回归分析时选择逐步多元线性回归方法,进而剔除多重共线性较高的影响因素。

经过逐步多元线性回归(见表 3)可见:估测柠条锦鸡儿生物量的模型保留了 B_2 波段反射值(ϵ_{B2})、 B_6 波段反射值(ϵ_{B6})2 个影响因素,得出 1 个关于 B_2 波段反射值(ϵ_{B2})的一元线性方程和 1 个关于 B_2 波段反射值(ϵ_{B2})、 B_6 波段反射值(ϵ_{B6})的多元方程。估测沙棘、沙柳、杨柴生物量的模型只保留了 1 个影响最显著的影响因素,其他影响因素均被剔除。根据筛选原则,选择决定系数(R^2)最高的为最优方程,因此选择多元回归方程为估测柠条锦鸡儿生物量的最优回归模型(R^2 为 0.49);一元线性方程为估测沙棘、沙柳、杨柴生物量的最优回归模型(R^2 分别为 0.51、0.47、0.41)。采用 F 检验对各回归模型进行检验, $P < 0.01$,说明本研究建立的遥感估测 4 种灌木生物量模型均通过了显著性检验。

利用检验样地实测值对模型进行精度检验,4 种灌木检验样地数分别为柠条锦鸡儿 21 块、沙棘 16 块、沙柳 18 块、杨柴 12 块。采用均方根误差、相对均方根误差、模型精度对方程进行检验(见表 4)。

由表 4 可见:4 种灌木生物量的遥感估测方程相对均方根误差分别为 23.6%、27.0%、29.2%、41.1%,方程预估精度全部达到 60%以上。

表 3 各树种生物量与各影响因素逐步多元线性回归结果

树种	回归模型	R^2	标准误	F 值
柠条锦鸡儿	$W_{NT,1} = 7.228 - 0.004\epsilon_{B2}$	0.45	0.47	54.29**
	$W_{NT,2} = 4.364 - 0.008\epsilon_{B2} + 0.002\epsilon_{B6}$	0.49	1.26	32.08**
沙棘	$W_{SJ} = -3.368 + 8.027I_{V,MSA}$	0.51	1.87	53.22**
沙柳	$W_{SL} = -10.803 + 23.853I_{V,SA}$	0.47	2.43	50.81**
杨柴	$W_{YC} = 1.643 - 0.0003\epsilon_{B6}$	0.41	0.22	26.29**

注:**表示影响极显著($P < 0.01$), R^2 为决定系数。

表 4 4 树种生物量的遥感估测模型检验结果

树种	均方根误差/ $t \cdot \text{hm}^{-2}$	相对均方根误差/%	模型精度/%
柠条锦鸡儿	1.04	23.6	72.1
沙棘	0.54	27.0	62.5
沙柳	1.71	29.2	76.5
杨柴	0.26	41.1	72.2

4 讨论

本研究依据陆地卫星 8 号携带的运营性陆地成像仪遥感影像数据和样地调查数据,应用逐步回归法,建立了柠条锦鸡儿、沙棘、沙柳、杨柴 4 种灌木林生物量的遥感估测模型,最优方程均通过显著性水平检验,4 种灌木林生物量的遥感估测模型预估精度分别为 72.1%、62.5%、76.5%、72.2%,拟合精度均达到 60%以上。

归一化植被指数($I_{V,ND}$)是应用较广泛的植被指数之一,但在本研究构建的估测生物量模型中并未出现归一化植被指数($I_{V,ND}$),表明归一化植被指数($I_{V,ND}$)不是库布齐沙漠地区估测人工灌木林生物量的最佳指数。其中,柠条锦鸡儿林生物量的估测模型中,出现的遥感影响因素为 B_2 波段反射值(ε_{B_2})、 B_6 波段反射值(ε_{B_6});沙棘林生物量的估测模型中,出现的影响因素为修正的土壤调节植被指数($I_{V,MSA}$);沙柳林生物量的估测模型中,出现的影响因素为土壤调整植被指数($I_{V,SA}$);杨柴林生物量的估测模型中,出现的影响因素为 B_6 波段反射值(ε_{B_6}); B_2 波段反射值(ε_{B_2})、 B_6 波段反射值(ε_{B_6})主要分辨土壤植被,修正的土壤调节植被指数($I_{V,MSA}$)、土壤调整植被指数($I_{V,SA}$)主要是降低土壤背景影响,说明在库布齐沙漠地区与辨别土壤有关的遥感影响因素对生物量的监测有较大关系,此类影响因素对于植被监测表现出更高灵敏度。

此外,遥感反映生物量模型的研究多集中于乔木林,在灌木林方面的研究较少,这是由于灌木植被可见光区域的植被叶绿素吸收带信息和近红外区域的持续高反射值信息较差,导致光谱仪不能够精确识别植被结构参数,进而不能准确反演灌木层生物量。目前,关于库布齐沙漠地区利用遥感影像数据构建生物量方程的相关研究还未见报道,本研究尚属首次,虽然拟合精度不是很高,但也可为该地区大尺度估测生物量提供一定参考。

5 结论

与柠条锦鸡儿林生物量相关性较高的遥感影响因素为 B_2 波段反射值(ε_{B_2})、 B_6 波段反射值(ε_{B_6}),与沙棘林生物量相关性较高的遥感影响因素为比值植被指数($I_{V,R}$)、修正的土壤调节植被指数($I_{V,MSA}$),与沙柳林生物量相关性较高的遥感影响因素为归一化植被指数($I_{V,ND}$)、土壤调整植被指数($I_{V,SA}$),与杨柴林生物量相关性较高的遥感影响因素为 B_6 波段反射值(ε_{B_6})。

通过相关分析筛选出与生物量相关性较高的影响因素,利用逐步回归法,建立了柠条锦鸡儿、沙棘、沙柳、杨柴 4 种灌木林生物量的遥感估测模型:柠条锦鸡儿林生物量的遥感估测模型为多元线性回归方程, $W_{NT,2} = 4.364 - 0.008\varepsilon_{B_2} + 0.002\varepsilon_{B_6}$ 、模型精度为 72.1%;其余 3 个树种生物量的遥感估测模型均为一元回归线性模型,沙棘林生物量的遥感估测模型为 $W_{SJ} = -3.368 + 8.027I_{V,MSA}$ 、模型精度为 62.5%,沙柳林生物量的遥感估测模型为 $W_{SL} = -10.803 +$

$23.853I_{V,SA}$ 、模型精度为 76.5%,杨柴林生物量的遥感估测模型为 $W_{YC} = 1.643 - 0.0003\varepsilon_{B_6}$ 、模型精度为 72.2%。4 种灌木林生物量的遥感估测模型拟合精度均达到 60% 以上,拟合效果较好,对库布齐沙漠地区灌木林生物量的遥感估测具有一定的参考性。

参 考 文 献

- [1] WOODWELL G M, WHITTAKER R H, REINERS W A, et al. The biota and the world carbon budget [J]. Science, 1978, 199: 141-146. doi:10.1126/science.199.4325.141.
- [2] 张志,田昕,陈尔学,等.森林地上生物量估测方法研究综述[J].北京林业大学学报,2011,33(5):144-150.
- [3] 徐天蜀.基于遥感信息的森林生物量、碳储量估测技术研究[J].林业调查规划,2008,33(3):11-13.
- [4] 何红艳,郭志华,肖文发.遥感在森林地上生物量估算中的应用[J].生态学杂志,2007,26(8):1317-1322.
- [5] 张慧芳.北京地区森林植被生物量遥感反演及时空动态格局分析[D].北京:北京林业大学,2008.
- [6] 廖力勤.基于 BP 神经网络的凌云县森林碳储量遥感反演研究[J].湖南林业科技,2018,45(4):33-39.
- [7] 刘双娜,周涛,舒阳,等.基于遥感降尺度估算中国森林生物量的空间分布[J].生态学报,2012,32(8):2320-2330.
- [8] 范文义,李明泽,杨金明.长白山林区森林生物量遥感估测模型[J].林业科学,2011,47(10):16-20.
- [9] FOODY G M, CUTLER M E, MCMORROW J, et al. Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data[J]. Global Ecology and Biogeography, 2001, 10(4):379-387.
- [10] 张良培,郑兰芬,童庆禧,等.利用高光谱对生物变量进行估计[J].遥感学报,1997,1(2):111-114.
- [11] 陆驰.基于 Landsat 的香格里拉市高山松地上生物量及其动态变化建模研究[D].昆明:西南林业大学,2017.
- [12] 刘治国.山西森林资源变化与优势树种碳储量动态研究[D].太原:山西大学,2017.
- [13] LEFSKY M A, COHEN W B, ACKER S A, et al. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(3):339-361.
- [14] 邢素丽,张广录,刘慧涛,等.基于 Landsat ETM 数据的落叶松林生物量估算模式[J].福建林学院学报,2004,24(2):153-156.
- [15] 徐婷,曹林,申鑫,等.基于机载激光雷达与 Landsat8 OLI 数据的亚热带森林生物量估算[J].植物生态学报,2015,39(4):309-321.
- [16] BACCINI A, LAPORTE N, GOETZ S J, et al. A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery[J]. Environmental Research Letters, 2008, 3(4).doi:10.1088/1748-9326/3/4/045011.
- [17] 王清梅,包亮,周梅,等.华北落叶松人工林生物量及碳储量遥感模型研究[J].林业资源管理,2014(4):52-57.
- [18] 闫德仁.库布齐沙漠生物结皮层的肥岛特征研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
- [19] 李博.内蒙古鄂尔多斯高原自然资源与环境研究[M].北京:科学出版社,1990.
- [20] 李娜.川西亚高山森林植被生物量及碳储量遥感估算研究[D].雅安:四川农业大学,2008.
- [21] 凌成星. Worldview-2 八波段影像支持下的湿地信息提取与地上生物量估算研究[D].北京:中国林业科学研究院,2013.
- [22] 乌如汗.正蓝旗草地上生物量遥感估算研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2018.
- [23] 石宽,刘琪璟,李法玲,等.大气校正对九连山植被覆盖度遥感估算的影响[J].广东农业科学,2014,41(9):198-202,2.
- [24] 岳彩荣.香格里拉县森林生物量遥感估测研究[D].北京:北京林业大学,2012.
- [25] 董道瑞.塔里木河下游胡杨、怪柳群落地上生物量遥感估测[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2012.