

赵宏胜, 兰登明, 冯 霜, 等. 乌拉特后旗荒漠区 8 种灌丛地上部生物量模型[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(15): 297–305.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.15.054

乌拉特后旗荒漠区 8 种灌丛地上部生物量模型

赵宏胜, 兰登明, 冯 霜, 王 伟, 王志国

(内蒙古农业大学, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要:以乌拉特后旗荒漠区常见的 8 种灌丛[珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)、绵刺(*Potania mongolica*)、红砂(*Reaumuria soongorica*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)、甘蒙锦鸡儿(*Caragana opulens*)、短叶假木贼(*Auabasis brevifolia*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)和松叶猪毛菜(*Salsola laricifolia*)]为研究对象,采用样方调查法进行调查,灌丛的测量采用标准株结合标准枝法,计算获得其生物量,并测量高度、冠幅,对比分析生物量得大小,通过主成分分析确定预测函数模型的最优变量,然后建立单株灌丛生物量模型。结果表明,8 种灌丛依生物量大小排序为霸王>驼绒藜>绵刺>松叶猪毛菜>红砂>珍珠猪毛菜>甘蒙锦鸡儿>短叶假木贼,这与植物自身特性及放牧干扰有直接关系;根据 r^2 ,松叶猪毛菜、短叶假木贼、霸王地上部生物量与灌丛面积的平方(S^2)极显著相关,最优预测模型均为幂函数模型;绵刺地上部生物量与植株高度及冠幅面积乘积的平方(H^2S^2)极显著相关,最优预测模型为幂函数模型;驼绒藜地上部生物量与冠幅体积(HS)极显著相关,最优模型为幂函数模型;甘蒙锦鸡儿、红砂地上部生物量与植株高度的平方和面积的乘积(H^2S)极显著相关,最优预测模型为幂函数模型;珍珠猪毛菜地上部生物量与灌丛面积的平方及高度的乘积(HS^2)极显著相关,最优模型为线性函数。经预测值和实测值的拟合率(P)、相对误差[样本的平均误差(R_s)和样本的平均相对误差(R_{MA})]检验,发现 8 种灌丛预测模型精度检验结果均达标准水平。灌丛生物量预测模型的建立,可以为定性评价生态系统的稳定性提供数据支撑,为研究区内植物资源的开发利用提供理论依据,并为修复脆弱生态区提供科学的技术措施。

关键词:荒漠区;灌丛;生物量;主成分分析;预测模型

中图分类号: S718.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)15-0297-09

生物量是指某一时刻单位面积内实存生活的

有机物质总量^[1],是衡量一个生态系统土地生产力的重要指标^[2]。目前,对生物量的预测研究主要是通过建立数学模型法,不仅可以高效地掌握研究区内植物资源现状、环境状况及土地生产力,而且其操作性能强、实用性能好。

国内外学者对灌丛生物量的研究较多,主要针对对分布在林区、荒漠区的乔、灌丛生物量。杨昊天

收稿日期:2020-05-02

基金项目:国家科技基础资源调查专项(编号:2017FY100204)。

作者简介:赵宏胜(1995—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:1677945967@qq.com。

通信作者:兰登明,硕士,教授,主要从事野生动植物资源保护与利用工作。E-mail:landengming@163.com。

[2]张阿凤,潘根兴,李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报,2009,28(12):2459–2463.

[3]Ogawa M, Okimori Y. Pioneering works in biochar research, Japan [J]. Soil Research, 2010, 48(7):489–500.

[4]赵 红,袁培民,吕贻忠,等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤,2011,43(2):306–311.

[5]Zhao P, Shao M A, Wang T J. Spatial distributions of soil surface – layer saturated hydraulic conductivity and controlling factors on dam farmlands [J]. Water Resources Management, 2010, 24 (10): 2247–2266.

[6]陈凤琴,石 辉. 缙云山常绿阔叶林土壤大孔隙与入渗性能关系初探[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2005,30(2):350–353.

[7]胡克林,李保国,陈 研. 表层土壤饱和导水率的空间变异对农

田水分渗透的影响[J]. 水利学报,2006,37(10):1217–1223.

[8]崔英德. 复合肥的生产与施用[M]. 北京:化学工业出版社,1995.

[9]邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:70–96.

[10]宋宝栋,覃齐正,郭子玉,等. 生物炭添加量对南疆沙化土壤理化性质和水分特征的影响[J]. 塔里木大学学报,2018,30(4):70–75.

[11]Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science, 2009, 174(2):105–112.

[12]王文焰,张建丰,汪志荣,等. 砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究[J]. 农业工程学报,1995,11(1):104–110.

等对腾格里沙漠东南缘的红砂、珍珠猪毛菜、驼绒藜的地上部、地下部、器官生物量的分配进行过研究,并分别对地上部、地下部生物量的相关性进行了研究^[3]。刘欣等对塔湾克里地区的松叶猪毛菜生物量进行研究,并以株高、冠幅的最大直径、垂直直径为变量进行生物量的回归分析^[4]。赵梦颖等对分布在内蒙古温带地区的绵刺、霸王、红砂等 26 种灌丛的叶、根、枝等 3 种器官生物量的分配及预测模型进行了研究^[5]。

目前还没有关于乌拉特后旗荒漠草原灌丛生物量的研究,乌拉特后旗荒漠草原属于荒漠草原向荒漠过渡地带,生态系统较为脆弱,由于过度放牧及矿物开采,原本就比较脆弱的生态系统已遭到严重破坏。通过对当地灌丛生物量的研究,可以为研究区内植物资源的开发利用提供理论依据,还可以为修复脆弱生态区提供科学的技术措施^[6]。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

内蒙古乌拉特后旗(县、区)位于阴山山脉与蒙古高原的过渡带,属于半农半牧的农牧交错区,其生态价值和经济价值十分重要。地理坐标为 107°17′~116°53′E,40°43′~43°23′N,包括 12 个旗(县、区),总面积为 9.7 万 km²,海拔为 850~2 310 m,以低山丘陵和层状高平原地貌为主。土壤类型主要为栗钙土、棕钙土。该地属中温带半干旱大陆性季风气候,年均降水量为 200~400 mm,年均气温为 1.3~3.9℃,年均蒸发量为 1 740~2 300 mm^[7]。

1.2 试验方法

2019 年 7—9 月,以乌拉特后旗荒漠草原上分布的珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)、绵刺(*Potania mongolica*)、红砂(*Reaumuria soongorica*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)、甘蒙锦鸡儿(*Caragana opulens*)、短叶假木贼(*Auabasis brevifolia*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)、松叶猪毛菜(*Salsola laricifolia*)等 8 种灌丛、半灌丛为研究对象进行研究,具体方法如下。

(1)根据试验需要,综合考虑地形地貌、植物种分布等情况,在乌拉特后旗荒漠草原布设 40 个面积为 100 m×100 m 的样地,在每个样地的 4 个边角及中间分别布设 7 个 10 m×10 m 的灌丛样方,共 280 个样方。

(2)灌丛的测量采用标准株结合标准枝法,标

准株的选取根据样地内植株冠幅的大小,如果冠幅大小均匀,可选取 3 株冠幅相近的植株作为标准株;如果样方中植物的冠幅大小不一,分别可选取大、中、小等 3 个冠幅的植株作为标准株。这样不仅有很强的代表性,还可以减少破坏度,减轻工作量^[8]。

(3)标准枝法的依据为植株冠幅,冠幅大的植物不可能采用全株收获法进行收割,这样会破坏原本脆弱的生态系统,可以剪取植物的 1 个分枝,然后根据分枝生物量的大小计算整株植物的生物量,在取样前要先测量植株高度(H)、东西冠幅(D_1)、南北冠幅(D_2)等^[9]。

(4)利用植株高度、东西冠幅、南北冠幅这 3 个易测因子,求其灌丛面积(S),这里的灌丛面积即为植冠面积,灌丛面积的计算公式^[10]为

$$S = \pi \times \left(\frac{D_1 + D_2}{4} \right)^2 \quad (1)$$

(5)收取灌木地上标准枝,去除其中夹杂的砾石、干枝后,用百分之一的天平立即进行称质量,测定每种灌丛的鲜质量并记录,称质量之后,将其装在信封纸袋中,然后带回室内,在 105℃条件下杀青处理(约 10 min)后,再于 65℃烘箱中烘干至恒质量(8~12 h),测量其干质量并记录,单株地上部生物量等于测得的干质量乘以其分枝数,每类灌丛的地上部生物量等于单株地上部生物量乘以株数所得平均值^[11]。

(6)最后用样本的平均相对误差(R_{MA})、样本的平均误差(R_s)、拟合率(P)等 3 项指标对样本模型进行精度检验。

样本的 R_{MA} ^[12]计算公式:

$$R_{MA} = \frac{\sum (Y_i - Y_j)}{Y_i} \times 100\% \quad (2)$$

样本的 R_s ^[13]计算公式:

$$R_s = \frac{(\sum Y_i - \sum Y_j)}{\sum Y_j} \times 100\% \quad (3)$$

P ^[14]的计算公式:

$$P = \left[1 - \frac{(Y_i - Y_j)}{Y_i} \right] \times 100\% \quad (4)$$

式中: Y_i 为生物量实测值; Y_j 为生物量模型预测值; n 为植物样本量。

1.3 8 种灌丛的一般特征

选取珍珠猪毛菜、绵刺、红砂、驼绒藜、甘蒙锦鸡儿、短叶假木贼、霸王、松叶猪毛菜等 8 种具有代

表性的灌丛作为研究对象。以乌拉特后旗荒漠草原为研究区,选取 40 个调查样地,采用统一的公里网格(10 km × 10 km),对荒漠区的植物群落进行系统网格化,表 1 为调查样地的地理坐标分布;根据 1:1 000 000 万中国植被图和区域群落记载资料,

对比中分辨率成像光谱仪(MODIS)250 m × 250 m 数据集与《中国植被分布图》,对研究区的主要植物群落调查点进行系统布设,以保证各个样地均匀分布在研究区内,样地之间的距离至少大于 10 km,使所选样地具有代表性^[15]。

表 1 调查样地的地理坐标分布

灌丛类型	经度	纬度	样方数 (个)
霸王	106°38'49" ~ 107°06'28" E	42°08'28" ~ 42°17'47" N	36
驼绒藜	105°34'33" ~ 107°19'57" E	40°50'02" ~ 41°50'25" N	37
绵刺	105°43'46" ~ 107°18'24" E	40°58'25" ~ 42°08'02" N	44
松叶猪毛菜	106°04'26" ~ 107°19'57" E	41°50'25" ~ 41°21'43" N	25
红砂	105°22'46" ~ 107°16'58" E	41°10'42" ~ 42°17'60" N	36
珍珠猪毛菜	105°56'33" ~ 107°29'04" E	40°46'37" ~ 41°55'56" N	34
甘蒙锦鸡儿	106°13'34" ~ 106°46'07" E	41°56'41" ~ 42°07'21" N	35
短叶假木贼	106°04'26" ~ 107°13'15" E	41°21'43" ~ 42°12'55" N	33

2 结果与分析

由表 2 可以看出,不同灌丛的生物量表现为霸王 > 驼绒藜 > 绵刺 > 松叶猪毛菜 > 红砂 > 珍珠猪毛

菜 > 甘蒙锦鸡儿 > 短叶假木贼,8 种灌丛中生物量最大的为霸王,最小的为短叶假木贼,生物量的大小直接反映了土地生产力的大小,生物量越大,表明土地生产力越大,反之,表明土地生产力越小^[16]。

表 2 乌拉特后旗荒漠草原常见 8 种灌丛的基本情况调查结果

灌丛类型	冠幅高度 (m)	东西冠幅 (m)	南北冠幅 (m)	灌幅面积 (m ²)	生物量 (g/m ²)
霸王	0.44 ± 0.14	0.77 ± 0.23	0.92 ± 0.26	2.43 ± 1.26	523.31 ± 22.09
驼绒藜	0.27 ± 0.13	0.45 ± 0.19	1.00 ± 0.58	2.09 ± 1.88	165.99 ± 31.75
绵刺	0.16 ± 0.06	0.33 ± 0.10	0.27 ± 0.09	0.08 ± 0.05	165.47 ± 10.73
松叶猪毛菜	0.20 ± 0.08	0.38 ± 0.14	0.32 ± 0.12	0.24 ± 0.29	56.52 ± 7.99
红砂	0.17 ± 0.05	0.39 ± 0.09	0.33 ± 0.08	0.43 ± 0.18	39.16 ± 2.23
珍珠猪毛菜	0.14 ± 0.03	0.28 ± 0.01	0.22 ± 0.05	0.21 ± 0.09	23.16 ± 5.15
甘蒙锦鸡儿	0.17 ± 0.07	0.30 ± 0.10	0.24 ± 0.08	0.25 ± 0.19	11.95 ± 1.00
短叶假木贼	0.10 ± 0.03	0.17 ± 0.05	0.15 ± 0.05	0.09 ± 0.06	7.16 ± 1.58

2.1 模型函数最佳自变量的选取

在模型函数的创建过程中,由于选取的自变量较多,只根据决定系数(r^2)的大小来确定最佳自变量,会使计算结果不准确,并且选取错误的自变量会使预测模型不实用。利用主成分分析法可以解决这一问题,利用降维思想,把多个指标转化为少数几个综合指标(即主成分),其中每个主成分都能够反映原始变量的大部分信息,且所含信息互不重复。这种方法在引进多方面变量的同时,将复杂因素归结为几个主成分,从而使问题简单化,同时得到的结果包含更加科学有效的数据信息。选取的自变量若满足如下条件:特征根 > 1、KMO(Kaiser -

Meyer - Olkin) < 0.7,且 P 值 < 0.01,则能使所建立的预测模型更为准确^[17-18]。

由主成分分析结果(表 3)可以看出,在乌拉特后旗荒漠草原分布的 8 种灌丛中,珍珠猪毛菜 HS^2 变量的特征根 > 1, KMO < 0.7 且 P 值 < 0.01,即 HS^2 可作为测量珍珠猪毛菜预测模型的最佳自变量;同理,根据特征根、KMO 和 P 值 3 个值可以判断,驼绒藜以 HS 作为预测模型最佳自变量;松叶猪毛菜、短叶假木贼和霸王以 S^2 作为预测模型的最佳自变量;红砂以 H^2S 作为预测模型的最佳自变量;甘蒙锦鸡儿、绵刺以 H^2S^2 作为预测模型的最佳自变量。

表 3 8 种灌丛预测模型最佳预测变量的选取

灌丛类型	自变量	公因子方差	初始特征值			提取平方和载入			KMO	P 值
			特征根	方差(%)	累计方差(%)	特征根	方差(%)	累计方差(%)		
珍珠猪毛菜	HS^2	0.981	5.178	86.306	86.306	5.178	86.306	86.306	0.565	0.0
	S^2	0.960	0.435	7.255	93.561	0	0	0	0	0.0
	HS	0.918	0.287	4.781	98.342	0	0	0	0	0.0
	H^2S^2	0.866	0.081	1.346	99.689	0	0	0	0	0.0
	H^2S	0.772	0.018	0.299	99.987	0	0	0	0	0.0
驼绒藜	HS	0.971	4.631	92.615	92.615	4.631	92.615	92.615	0.577	0.0
	HS^2	0.927	0.181	3.615	96.230	0	0	0	0	0.0
	S^2	0.914	0.117	2.334	98.564	0	0	0	0	0.0
	H^2S	0.910	0.071	1.418	99.982	0	0	0	0	0.0
	H^2S^2	0.909	0.001	0.018	100.000	0	0	0	0	0.0
松叶猪毛菜	S^2	0.971	4.688	93.326	93.326	4.688	93.326	93.326	0.583	0.0
	HS	0.966	0.207	4.146	97.508	0	0	0	0	0.0
	HS^2	0.943	0.101	2.016	99.523	0	0	0	0	0.0
	H^2S^2	0.940	0.022	0.440	99.964	0	0	0	0	0.0
	H^2S	0.848	0.002	0.036	100.000	0	0	0	0	0.0
绵刺	H^2S^2	0.960	4.219	84.384	84.384	4.219	84.384	84.384	0.576	0.0
	HS	0.944	0.668	13.366	97.750	0	0	0	0	0.0
	S^2	0.937	0.094	1.879	99.630	0	0	0	0	0.0
	HS^2	0.924	0.016	0.329	99.959	0	0	0	0	0.0
	H^2S	0.454	0.002	0.041	100.000	0	0	0	0	0.0
红砂	H^2S	0.964	4.490	89.807	89.807	4.490	89.807	89.807	0.570	0.0
	S^2	0.959	0.440	8.799	98.606	0	0	0	0	0.0
	HS	0.957	0.045	0.906	99.513	0	0	0	0	0.0
	H^2S^2	0.931	0.023	0.457	99.969	0	0	0	0	0.0
	HS^2	0.679	0.002	0.031	100.000	0	0	0	0	0.0
甘蒙锦鸡儿	H^2S^2	0.983	4.798	95.956	95.965	4.798	95.956	95.965	0.496	0.0
	H^2S	0.980	0.133	2.670	98.626	0	0	0	0	0.0
	HS	0.978	0.051	1.104	99.640	0	0	0	0	0.0
	S^2	0.952	0.018	0.358	99.998	0	0	0	0	0.0
	HS^2	0.904	0.000	0.002	100.000	0	0	0	0	0.0
短叶假木贼	S^2	0.984	4.793	95.854	95.854	4.793	95.854	95.854	0.586	0.0
	HS^2	0.982	0.113	2.295	98.114	0	0	0	0	0.0
	HS	0.959	0.072	1.440	99.554	0	0	0	0	0.0
	H^2S^2	0.956	0.021	0.423	99.976	0	0	0	0	0.0
	H^2S	0.911	0.001	0.024	100.000	0	0	0	0	0.0
霸王	S^2	0.961	4.544	90.879	90.879	4.544	90.879	90.879	0.551	0.0
	H^2S	0.955	0.321	6.417	97.296	0	0	0	0	0.0
	H^2S^2	0.936	0.101	2.010	99.306	0	0	0	0	0.0
	HS	0.928	0.033	0.656	99.961	0	0	0	0	0.0
	HS^2	0.764	0.002	0.039	100.000	0	0	0	0	0.0

注:KMO 为用于比较简单相关系数和偏相关系数的指标; H^2S 、 H^2S^2 、 HS 、 HS^2 、 S^2 为由植株高度(H)和植株冠幅面积(S)简单自变量因子组成的复合因子变量,表 4、表 5、表 6 同。

2.2 灌丛生物量与各个模拟因子的相关性

由表 4 可知,珍珠猪毛菜的复合因子 H^2S 、 HS 、 H^2S^2 、 S^2 、 HS^2 与生物量间的相关性均达到显著或极显著水平,其中 HS^2 与生物量间的相关系数 >0.8 ; 驼绒藜的复合因子 H^2S 、 HS 、 H^2S^2 、 S^2 、 HS^2 与生物量间的相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$),其中 HS 、 S^2 、 HS^2 与生物量间的相关系数均大于 0.8; 松叶猪毛菜的复合因子 HS 、 H^2S^2 、 S^2 、 HS^2 与生物量间的相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$),其中 S^2 、 HS 、 H^2S^2 、 HS^2 与生物量间的相关系数均大于 0.7; 绵刺除 H^2S 与生物量间的相关性未达到显著水平外,其余 HS 、 H^2S^2 、 S^2 、 HS^2 与生物量间的相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$),其中 H^2S^2 、 HS 、 S^2 与生物量间的相关系数均大于 0.9; 红砂的复合因子 HS^2 、 H^2S 、 HS 、 H^2S^2 、 S^2 与生物量间的相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$),其中 H^2S 与生物量间的相关系数大于 0.8; 甘蒙锦鸡儿的植株 H^2S 、 HS 、 H^2S^2 、 S^2 、 HS^2 与生物量间的相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$),其中 H^2S 与生物量间的相关系数最大,达到 0.869; 短叶假木贼的复合因子 H^2S 、 HS 、 H^2S^2 、 S^2 、 HS^2 与生物量间的相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$),其中 S^2 与生物量间的相关系数最大,达到 0.934; 霸王复合因子 H^2S 与生物量间的相关性达到显著水平 ($P < 0.05$), H^2S^2 、 S^2 、 HS^2 与生物量间的相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$),其中 S^2 与生物量间的相关系数最大,达到 0.848。

综合表 3、表 4 可知, S^2 对松叶猪毛菜、短叶假木贼和霸王地上部生物量的贡献率最大,且相关性较高,可以作为预测以上 3 种灌丛地上部生物量的

最佳自变量; HS^2 对甘蒙锦鸡儿、珍珠猪毛菜地上部生物量的贡献率最大,且相关性较高,可以作为预测珍珠猪毛菜灌丛地上部生物量的最佳自变量; H^2S^2 对绵刺地上部生物量的贡献率最大,且相关性较高,可以作为预测其地上部生物量的最佳自变量; HS 对驼绒藜地上部生物量的贡献率最大,且相关性较高,可以作为预测驼绒藜灌丛地上部生物量的最佳自变量; H^2S 对红砂地上生物量的贡献率最大,且相关性较高,可以作为预测红砂地上部生物量的最佳自变量。

表 4 灌丛生物量与各模拟因子的相关性分析

项目	相关系数				
	H^2S	HS	H^2S^2	S^2	HS^2
珍珠猪毛菜生物量	0.598 *	0.613 *	0.661 *	0.716 **	0.812 **
驼绒藜生物量	0.760 **	0.832 **	0.745 **	0.819 **	0.820 **
松叶猪毛菜生物量	0.628 *	0.754 **	0.701 **	0.786 **	0.718 **
绵刺生物量	0.426	0.920 **	0.931 **	0.908 **	0.840 **
红砂生物量	0.863 **	0.789 **	0.777 **	0.794 **	0.759 **
甘蒙锦鸡儿生物量	0.869 **	0.821 **	0.814 **	0.853 **	0.812 **
短叶假木贼生物量	0.808 **	0.907 **	0.897 **	0.934 **	0.921 **
霸王生物量	0.651 *	0.795 **	0.808 **	0.848 **	0.829 **

注: ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$); * 表示显著相关 ($P < 0.05$)。

2.3 8 种灌丛的最优模型

由表 5 可知,乌拉特后旗荒漠草原 8 种灌丛生物量预测模型包含线性函数模型、幂函数模型和指数函数模型等 3 种模型,8 种灌丛模型的 r^2 为 0.733 ~ 0.841, F 值为 52.950 ~ 116.934, 总体呈现相关系数较高、估计值标准误差 (SEE) 较低的趋势。

表 5 8 种灌丛生物量的最佳预测模型

灌丛类型	自变量	最佳函数模型	a	b	r^2	F	SEE
珍珠猪毛菜	HS^2	$y = a(HS^2) + b$	476.32	8.806	0.733	73.990	0.061
驼绒藜	HS	$y = a(HS)^b$	69.80	0.504	0.806	54.178	0.299
松叶猪毛菜	S^2	$y = a(S^2)^b$	206.83	0.213	0.800	59.833	0.116
绵刺	H^2S^2	$y = a(H^2S^2)^b$	4 925.90	1.371	0.823	96.226	0.366
红砂	H^2S	$y = a(H^2S)^b$	101.32	1.175	0.785	116.934	0.136
甘蒙锦鸡儿	H^2S	$y = a(H^2S)^b$	119.07	1.328	0.841	52.950	0.343
短叶假木贼	S^2	$y = a + b \ln(S^2)$	11.097	2.080	0.730	54.947	1.338
霸王	S^2	$y = a(S^2)^b$	173.76	1.170	0.770	79.967	1.700

注: a 、 b 为系数, F 为方差检验量, SEE 为估计值标准误差。

2.4 模型精度的检验

为了验证建立模型的研究区中其他地方的灌丛是否可用,本研究用预测值和实测值的拟合率

(P) 与相对误差[样本的平均误差 (R_s) 和样本的平均相对误差 (R_{MA})] 的比较双重标准对函数模型进行验证。一般来说,若 $R_s < 30\%$, $R_{MA} < 20\%$, $P >$

70% ,那么即可认为建立的函数模型对研究区灌丛生物量的测定效果较为准确。

由表 6 可知,通过对样本实测值和模型预测值的综合分析,8 种灌丛地上部生物量模型的精度检验均达到标准($R_s < 30\%$, $R_{MA} < 20\%$, $P > 70\%$) ,其中松叶猪毛菜以灌丛面积为自变量建立的幂函数模型对其地上部生物量的模拟估计效果最好, $R_s =$

5.58% , $R_{MA} = 0.32\%$, $P = 93.78\%$ 。依据样本拟合率进行排序得出:松叶猪毛菜 > 绵刺 > 甘蒙锦鸡儿 > 驼绒藜 > 霸王 > 珍珠猪毛菜 > 红砂 > 短叶假木贼。

通过对乌拉特后旗荒漠草原 8 种灌丛地上部生物量模型的 P 、 R_s 、 R_{MA} 进行综合对比分析可知,本研究所建立的数学模型精度均符合要求,拟合度较高。

表 6 8 种灌丛地上部生物量回归模型的精度检验结果

灌丛类型	最佳函数模型	自变量	R_s (%)	R_{MA} (%)	P (%)
珍珠猪毛菜	$y = 476.32(HS^2) + 8.806$	HS^2	19.90	1.90	84.61
驼绒藜	$y = 69.80(HS)^{0.504}$	HS	20.80	9.40	86.72
松叶猪毛菜	$y = 206.83(S^2)^{0.213}$	S^2	5.58	0.32	93.78
绵刺	$y = 4\,925.90(H^2S^2)^{1.371}$	H^2S^2	13.79	3.75	89.51
红砂	$y = 101.32(H^2S)^{1.175}$	H^2S	27.80	4.20	79.67
甘蒙锦鸡儿	$y = 119.07(H^2S)^{1.328}$	H^2S	14.35	6.40	87.06
短叶假木贼	$y = 11.097 + 2.080\ln(S^2)$	S^2	26.80	4.30	79.46
霸王	$y = 173.76(S^2)^{1.170}$	S^2	28.70	4.70	86.29

注: R_s 表示样本平均误差, R_{MA} 表示样本平均相对误差; P 表示拟合率。

2.5 8 种灌丛地上部生物量最优预测模型散点图

由图 1 可知,珍珠猪毛菜以 HS^2 为自变量建立的一元线性函数模型对其生物量的预测能力最佳($r^2 = 0.733\,0$, $P < 0.01$) ,函数模型为 $y = 476.32(HS^2) +$

8.806;由图 2 可知,驼绒藜以 HS 为自变量建立的幂函数模型对其生物量的预测能力最佳($r^2 = 0.806\,5$, $P < 0.01$) ,函数模型为 $y = 69.80(HS)^{0.504}$ 。

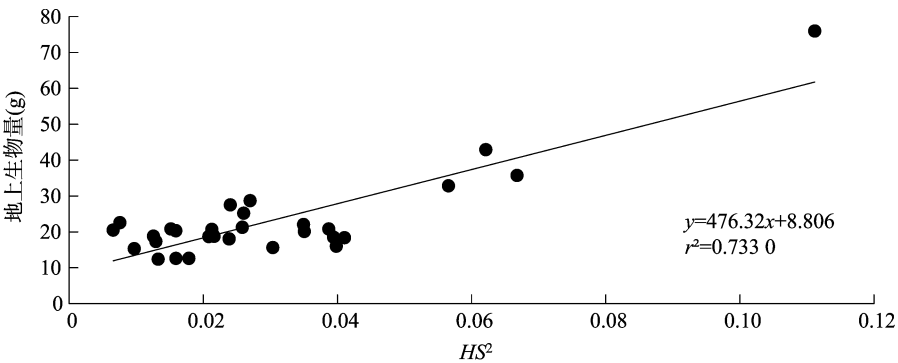


图1 珍珠猪毛菜最优地上部生物量回归方程散点图

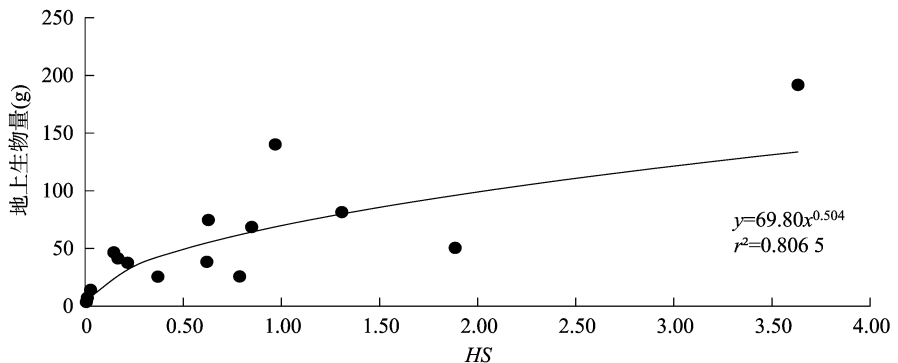


图2 驼绒藜最优地上部生物量回归方程散点图

由图 3 可知,松叶猪毛菜以 S^2 为自变量建立的幂函数模型对其生物量的预测能力最佳($r^2 = 0.800, P < 0.01$),函数模型为 $y = 206.83(S^2)^{0.214}$;

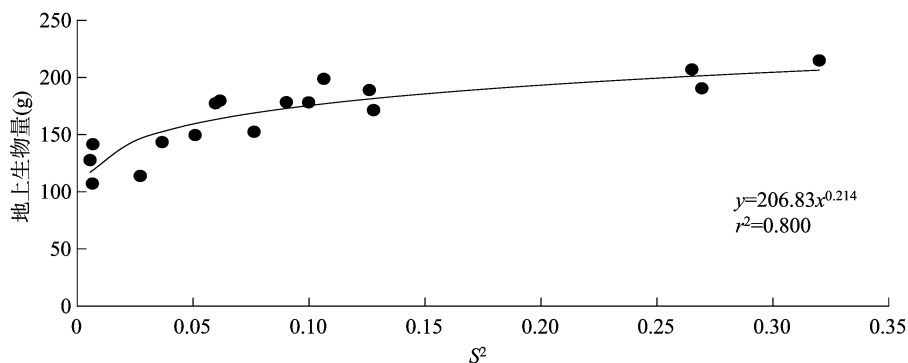


图3 松叶猪毛菜最优地上部生物量回归方程散点

由图 4 可知,绵刺以 H^2S^2 为自变量建立的幂函数模型对其生物量的预测能力最佳($r^2 = 0.823, P < 0.01$),函数模型为 $y = 4\,925.90(H^2S^2)^{1.371}$ 。

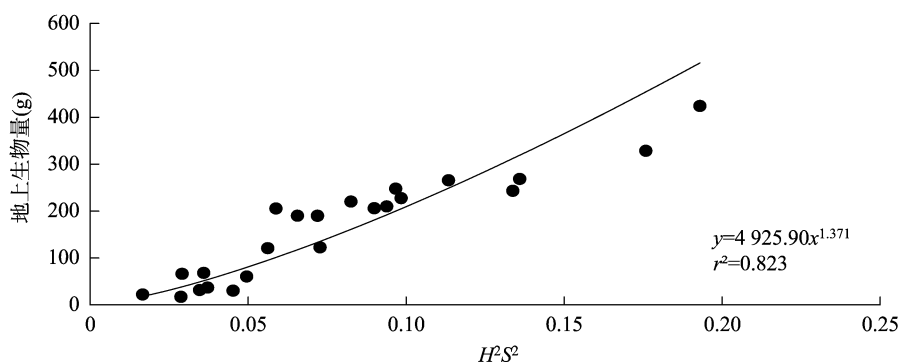


图4 绵刺最优地上部生物量回归方程散点

由图 5 可知,红砂以 H^2S 为自变量建立的幂函数模型对其生物量的预测能力最佳($r^2 = 0.785\,2, P < 0.01$),函数模型为 $y = 101.32(H^2S)^{1.175}$;

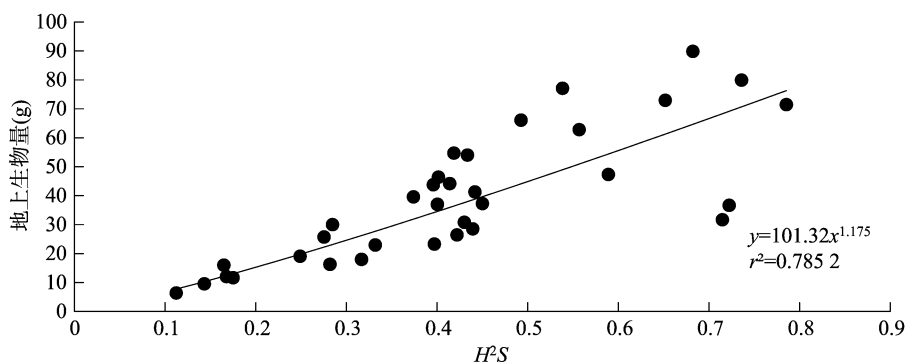


图5 红砂最优地上部生物量回归方程散点

可知,甘蒙锦鸡儿以 H^2S 为自变量建立的幂函数模型对其生物量的预测能力最佳($r^2 = 0.841, P < 0.01$),函数模型为 $y = 119.07(H^2S)^{1.328}$ 。

由图 7 可知,短叶假木贼以 S^2 为自变量建立的指数函数模型对其生物量的预测能力最佳($r^2 = 0.731\,7, P < 0.01$),函数模型为 $y = 11.097 + 2.0801\ln(S^2)$;由图 8 可知,霸王以 S^2 为自变量建立的幂函数模型对其生物量的预测能力最佳($r^2 = 0.770\,0, P < 0.01$),函数模型为 $y = 173.76(S^2)^{1.170}$ 。

3 讨论

本研究以乌拉特后旗荒漠草原为研究区,对分布其中的 8 种灌丛的地上部生物量进行研究。罗永开等对研究区内分布的灌丛地下生物量也进行过预测^[8,19],使人们对研究区的碳汇资源有一定程度

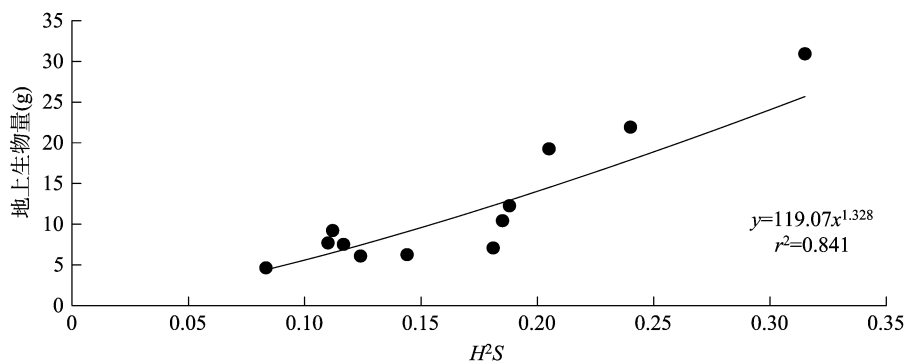


图6 甘蒙锦鸡儿最优地上部生物量回归方程散点图

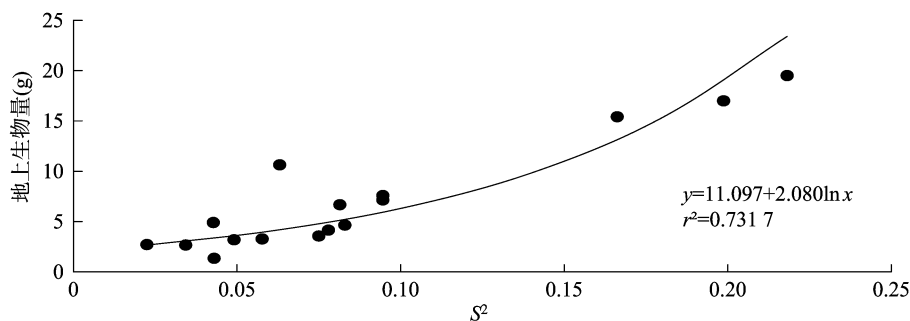


图7 短叶假木贼最优地上部生物量回归方程散点图

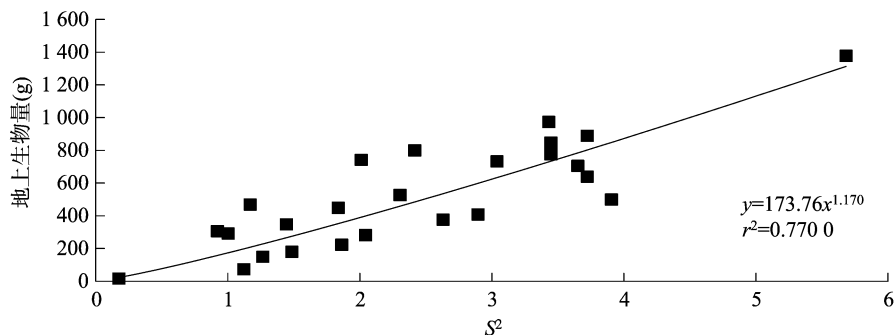


图8 霸王最优地上部生物量回归方程散点图

的了解,主要方法是通过建立数学模型进行生物量的预测,运用的模型包括幂函数模型、一元线性模型和指数函数模型等,这与大部分研究者研究灌丛生物量时所采用的数学模型一致,以幂函数模型为主,与赵梦颖等的研究结果^[5,20]一致,即幂函数模型对所研究灌丛地上部生物量的估测效果最佳。在研究过程中,以灌丛的 H^2S 、 HS 、 H^2S^2 、 S^2 、 HS^2 为自变量,与张殿岱等对塔里木盆地北缘绿洲-荒漠过渡带典型植物地上部生物量的研究^[21]相同,即通过单因子派生出 H^2 、 S^2 、 S^2H 、 H^2S 等复合因子进行拟合,拟合检验后发现,复合因子对预测生物量的模型效果高于单因子的预测效果,本研究结果与之一致,即复合因子对灌丛生物量的预测效果更好。在模型精度检验的基础上,曹萌等的模拟精度检验均

利用 R_s 和 R_{MA} 进行检验^[22-23]。本研究在此基础上,加入了预测值和实测值的拟合度作为另一个指标参数来检验模型的精度,对模型精度的检验更加精确。8 种灌丛、半灌丛生物量预测模型主要以复合因子灌丛面积、灌丛体积为自变量,这与姚雪玲等对浑善达克沙地 6 种灌丛生物量的模拟所得到的结论^[24]一致,即复合因子对预测灌丛生物量模拟得更好。

4 结论

由单因子植株高度(H)、植株冠幅(D)派生出复合因子 H^2S 、 HS 、 H^2S^2 、 S^2 、 HS^2 ,以这 5 项指标作为自变量建立植株地上部生物量的预测模型,通过主成分分析法,确定预测模型函数的最佳自变量。根据灌丛生物量与各模拟因子的相关性分析结果,得

出复合因子对研究灌丛地上部生物量的预测性更佳,在 0.01 水平上显著相关。

根据自变量与因变量的相关关系,所用函数模型包括一元线性函数模型、幂函数模型和对数函数模型,根据 5 项自变量与生物量的拟合结果可知,松叶猪毛菜、短叶假木贼和霸王地上部生物量与灌丛面积的平方(S^2)极显著相关,松叶猪毛菜地上部生物量最优预测模型为幂函数模型 [$y = 206.83(S^2)^{0.214}, P < 0.01$],霸王地上部生物量最优预测模型为幂函数模型 [$y = 173.76(S^2)^{1.170}, P < 0.01$],短叶假木贼地上部生物量最优预测模型为对数函数模型 [$y = 11.097 + 2.080 \ln(S^2), P < 0.01$];绵刺地上部生物量与植株高度及冠幅面积乘积的平方(H^2S^2)极显著相关,最优预测模型为幂函数模型 [$y = 4\,925.90(H^2S^2)^{1.371}, P < 0.01$];甘蒙锦鸡儿和红砂地上部生物量与植株高度的平方与面积乘积(H^2S)极显著相关,甘蒙锦鸡儿地上部生物量最优预测模型为幂函数模型 [$y = 119.07(H^2S)^{1.328}, P < 0.01$],红砂地上部生物量最优预测模型为幂函数模型 [$y = 101.32(H^2S)^{1.175}, P < 0.01$];驼绒藜地上部生物量与冠幅体积(HS)极显著相关,最优模型为幂函数模型 [$y = 69.80(HS)^{0.504}, P < 0.01$],珍珠猪毛菜地上部生物量与灌丛面积的平方与高度乘积(HS^2)呈极显著相关,最优模型为线性函数模型 [$y = 476.32(HS^2) + 8.806, P < 0.01$]。

根据模型 r^2 、 SEE 、模型参数的 F 检验值、拟合率、 R_s 和 R_{MA} 等 6 项评定指标对模型预测精确度进行检验,研究结果表明,6 项指标均达到标准, r^2 最小为 0.733,最大为 0.841, r^2 均大于 0.7;SEE 最大为 1.338,最小为 0.061, SEE 均小于 2;总体呈现 r^2 较高、 SEE 较低的趋势;拟合率最大为 93.78%,最小为 79.46%,拟合率均大于 70%; R_s 最大为 28.70%,最小为 5.58%, R_s 均小于 30%; R_{MA} 最大为 9.40%,最小为 0.32%, R_{MA} 均小于 20%。所建立的 8 种灌丛地上部生物量预测模型对研究区内灌丛地上部生物量的预测能力较高,可用于对乌拉特后旗荒漠草原乃至对阴山北麓地区的灌丛生物量进行预测。

参考文献:

[1] 彦 阁,胡晓海,孙海莲,等. 阴山北麓农牧交错区 2000—2015 年土壤流失及保持量变化研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2019,39(2):127—135.

[2] 兰 洁,肖中琪,李吉玫,等. 天山雪岭云杉生物量分配格局及异速生长模型[J]. 浙江农林大学学报,2020,37(3):416—423.

[3] 杨昊天,王增如,贾荣亮,等. 腾格里沙漠东南缘荒漠草地不同群落类型土壤有机碳分布及储量特征[J]. 植物生态学报,2018,42(3):288—296.

[4] 刘 欣,陆家宝,杨力军,等. 荒漠草地四种灌木单株生物量估测方法[J]. 青海畜牧兽医杂志,1995,25(3):28—29.

[5] 赵梦颖,孙 威,罗永开,等. 内蒙古 26 种常见温带灌木的生物量模型[J]. 干旱区研究,2019,36(5):1219—1228.

[6] 张俊怡,刘廷玺,罗艳云,等. 半干旱草原流域植被地上生物量时空分布特征及其影响因子[J]. 生态学杂志,2020,39(2):364—375.

[7] 吴晓光. 内蒙古阴山北麓生态退耕对土壤风蚀的影响及效应研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.

[8] 罗永开,方精云,胡会峰,等. 山西芦芽山 14 种常见灌木生物量模型及生物量分配[J]. 植物生态学报,2017,41(1):115—125.

[9] 仇 瑶,常顺利,张毓涛,等. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性[J]. 生态学报,2015,35(23):7842—7851.

[10] 王文栋,白志强,阿里木·买买提,等. 天山林区 6 种优势种灌木生物量比较及估测模型[J]. 生态学报,2016,36(9):2695—2704.

[11] 再努拉·热和木都拉,陈亚宁,艾力西尔·库尔班,等. 准噶尔盆地梭梭群落地上生物量及季节变化研究——以克拉玛依农业综合开发区为例[J]. 干旱区地理,2006,29(3):375—380.

[12] 李 刚,赵 祥,刘碧荣. 晋北 4 种灌木地上生物量预测模型的构建[J]. 林业资源管理,2014(1):71—76.

[13] 曾伟生. 国内外灌木生物量模型研究综述[J]. 世界林业研究,2015,28(1):31—36.

[14] 郭威星,蓝登明,王玉婕,等. 荒漠草原 6 种灌丛地上生物量分析[J]. 内蒙古林业调查设计,2019,42(6):87—89,93.

[15] 郭威星. 乌拉特中旗荒漠草原优势灌丛地上生物量分析及预测模型[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.

[16] 赵生龙,左小安,张铜会,等. 乌拉特荒漠草原群落物种多样性和生物量关系对放牧强度的响应[J]. 干旱区研究,2020,37(1):168—177.

[17] 刘 陟,周延林,黄 奇. 毛乌素沙地中间锦鸡儿生物量估测模型[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(7):128—133.

[18] 黄劲松,邸雪颖. 帽儿山地区 6 种灌木地上生物量估算模型[J]. 东北林业大学学报,2011,39(5):54—57.

[19] 党晓宏,高 永,蒙仲举,等. 西鄂尔多斯地区 5 种荒漠优势灌丛生物量分配格局及预测模型[J]. 中国沙漠,2017,37(1):100—108.

[20] 王 娟,汤 军,郭月峰,等. 内蒙古敖汉旗北部风沙土区两种灌木地上生物量估算模型[J]. 农业工程,2015,5(6):44—47,51.

[21] 张殿岱,王雪梅. 塔里木盆地北缘绿洲—荒漠过渡带典型植物地上生物量估测[J]. 生态学杂志,2019,38(10):3211—3220.

[22] 曹 萌,牛树奎,李连强,等. 松山自然保护区 5 种灌木的地上生物量模型[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2018,47(4):435—438.

[23] 崔玲玲,土艳丽,拉 多,等. 拉萨河流域 6 种典型灌木生物量预测模型的建立[J]. 西藏科技,2017(7):64—68.

[24] 姚雪玲,姜丽娜,李 龙,等. 浑善达克沙地 6 种灌木生物量模拟[J]. 生态学报,2019,39(3):905—912.