

DOI: 10.5846/stxb201803290637

姚雪玲, 姜丽娜, 李龙, 王锋, 吴波, 郭秀江. 浑善达克沙地 6 种灌木生物量模拟. 生态学报, 2019, 39(3): - .

Yao X L, Jiang L N, Li L, Wang F, Wu B, Guo X J. Biomass simulation of six shrub species in Otindag sandy land. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): - .

浑善达克沙地 6 种灌木生物量模拟

姚雪玲¹, 姜丽娜², 李 龙³, 王 锋¹, 吴 波^{1,*}, 郭秀江⁴

1 中国林业科学研究院荒漠化所, 北京 100091

2 中国林业科学研究院林业新技术研究所, 北京 100091

3 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018

4 华北油田技术监督检验处计量中心站, 任丘 062552

摘要: 在干旱半干旱区, 乔木比较稀疏或难以存活, 灌木往往在植被群落中占有很大的优势地位, 其生态功能及生态学意义尤其值得重视。浑善达克沙地疏林草地是沙地顶级植物群落, 其中乔木稀疏分布, 而灌木在沙甸以及沙陇背风坡呈密集分布。灌木在固定沙丘、改良土壤、提供栖息地等方面具有重要的生态意义, 其生物量组成也在沙地植被群落中占有很大比重。已往的研究中, 灌木相比乔木通常处于次要地位, 对灌木的研究尚不充分, 灌木生物量的模拟方法亦多采用乔木生物量的模拟方法。然而灌木形态结构与乔木有明显差异, 专门针对灌木的生物量模拟方法研究尚不多见。以 6 种沙地灌木为样本, 基于异速生长模型, 对比了若干地表测量指标对灌木生物量的预测能力, 其中设计了一种更贴近灌木实际形态的圆台体积作为新的预测指标。研究表明: (1) 在单因素指标中, 相比高度和地径, 冠幅与灌木生物量的相关性更强。(2) 相比单因素指标, 复合指标与灌木生物量之间的相关性更强。其中冠幅相关的复合指标更优于地径相关的复合指标。这预示着冠幅以及冠幅相关的复合指标对灌木生物量具有较好的预测能力。(3) 圆台体积能进一步提高对灌木生物量的预测能力。相关分析和拟合评价结果显示, 圆台体积与灌木生物量的相关性更强, 拟合误差较小, 并且对于不同的灌木种类, 其相关性和拟合精度表现出较高的稳定性。这意味着圆台体积对于不同的灌木种类, 均具有较好的生物量预测效果。因此建议, 在灌木属性测量较为充分的情况下, 圆台体积是更为理想的预测指标, 而在测量不充分情况下, 冠幅及其相关复合指标更适宜进行灌木生物量预测。研究结果最终建立了 6 种沙地灌木的圆台体积—生物量的异速生长模拟方程, 为进一步研究沙地灌木的碳储量以及灌木在半干旱植物群落中的生态意义提供科学基础。

关键词: 浑善达克沙地; 灌木; 生物量; 模型; 半干旱

Biomass simulation of six shrub species in Otindag sandy land

YAO Xueling¹, JIANG Lina², LI Long³, WANG Feng¹, WU Bo^{1,*}, GUO Xiujiang⁴

1 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Research Institute of Forestry New Technology, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 College of Desert Control Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

4 Technical Supervision Department of Huabei Oilfield, Metrology Center Station, Renqiu 062552, China

Abstract: In arid and semi-arid regions, trees are sparse or have difficulty surviving, and shrubs often occupy a dominant position in vegetation communities. The ecological functions and ecological value of shrubs are particularly worthy of attention in these regions. The sparse-elm grassland in Otindag Sandy Land is the climatic climax community; the trees are sparsely distributed, while the shrubs are densely distributed between the dunes or on the leeward slopes of the dunes.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0500801-03); 中国林业科学研究院基金 (IDS2018JY-3, IDS2018JY-4); 国家自然科学基金项目 (41401212)

收稿日期: 2018-03-29; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wubo@caf.ac.cn

Shrubs have significant ecological functions in fixing sand dunes, improving soils, providing habitats, and increasing vegetation biodiversity. Shrub biomass accounts for a large proportion of the sandy land vegetation community. According to previous studies, shrubs are usually less important than trees, but the research on shrubs is not yet sufficient. The present shrub biomass simulation method is mostly adapted from the methods used for trees. However, the morphological characteristics of shrubs are obviously different from those of trees. A biomass prediction model specific for shrubs urgently needs to be developed. In this study, six dominant shrub species were investigated. Based on an allometric model, seven shrub measurements were used as predictors and compared to assess their abilities to predict shrub biomass. Among the seven measurements, a circular platform volume model, which has a structure close to the actual shape of a shrub, was designed as a new predictor. In this study, correlation coefficients and three model-fitting accuracy evaluation indices [including determination of the R^2 coefficient, significance index p -values, and standard error of the estimate (SEE)] were used to assess the prediction ability of the seven measurements. The results showed that: (1) Among the single measurements, the correlation coefficient between the crown diameter and biomass was highest, compared to those between height or ground diameter and biomass. (2) The correlation between the composite indices and shrub biomass was much stronger than that between the single measurements and biomass. In addition, the crown-related composite indices had stronger correlations with biomass than the ground diameter-related composite index did. This indicates that the crown diameter or crown-related composite indices may be better in predicting shrub biomass. (3) The circular platform volume model further improved the ability to predict shrub biomass. The results of correlation analysis and fitting analysis showed that the correlation between the circular platform volume and biomass was stronger and the fitting error was smaller compared with other prediction indicators. The correlation and fitting accuracy between circular platform volume and biomass were similar across different shrub species. This means that the circular platform volume model has better and more-stable prediction ability than other models for many shrub species, which implies that it is also more scalable. Therefore, we suggest that the circular platform volume is an ideal predictor when shrubs are adequately measured in the field. Otherwise, if the shrubs are not sufficiently measured, the crown diameter and crown-related composite indices are more suitable for the prediction of shrub biomass. In sum, this study established a biomass prediction model based on the circular platform volume of the six sandy shrub species, which provides a scientific basis for further study of the shrub carbon sink in sandy land and the ecological significance of shrubs in semi-arid and arid regions.

Key Words: Otindag sandy land; shrub; biomass; model; semi-arid

灌木林是自然界中广泛存在的一种重要的陆地生态系统类型。长期以来,灌木林因与乔木林相比所占比例较小处于次要地位而较少受到重视,关于灌木林生物量的研究国内外报道也相对较少^[1]。灌木在森林生态系统中虽然占全部生物量的很小部分,但是在荒漠、高原、干热河谷、荒山荒地和石漠化等生态脆弱地区,灌木仍然占有很大比重,对生态系统的稳定与平衡具有十分重要的意义^[2]。在我国干旱、半干旱地区有大量灌木分布,灌木兼有防风固沙、保持水土、改良盐碱地等多种生态功能。研究灌木生物量是植被生态学研究的一个重要内容,是衡量植被生产力的重要指标,它对于研究灌木生长发育规律、灌木在生态系统中的作用和地位等都具有重要意义^[3-4]。

常用的植物生物量测定方法主要有3种:一种是直接收获法,刈割地表植株后称重;第二种是样方法,用单位面积的生物量推算整体生物量;第三种是数学模型法,通过建立生物量与易测因子(树高、地径等)的相关方程,来推算单株树木、单位面积部分或整体的生物量^[5]。在干旱半干旱区,植被稀少,直接刈割采伐灌木会对生态环境造成破坏,因而不适宜大规模采用^[6]。而灌木在水平分布上又具有明显的不连续性和不均匀性,不适合像草本那样用样方收获法测定其生物量。较为适宜的方法是数学模型法。目前预测灌木生物量的数学模型主要有线性模型、多项式模型、幂指数异速生长模型等^[1]。常用的预测因子主要包括地径、高度、冠

幅、盖度、年龄、分枝数(株数)等,以及以此为基础构建的植冠面积、植冠体积、地径与高度乘积、地径平方与高度乘积等复合因子,在文献中已有大量应用^[7-13]。目前的灌木生物量预测方法大都来源于乔木生物量预测方法,专门针对灌木的生物量预测方法研究尚不充分。而灌木具有其特殊的个体形态结构,如灌木较低矮,多是丛生,主杆不明显等^[5]。针对灌木本身的形态特征,探讨特别适用于灌木的生物量预测方法,提高灌木生物量预测精度,将对灌木的生物量以及碳汇贡献的研究具有积极意义。

本研究以浑善达克沙地榆树疏林 6 种主要灌木为研究案例,采用几种常用的灌木生物量预测方法,同时设计了一种圆台体积—生物量预测方法,通过对这些方法对生物量的预测能力的评估,来探讨更适用于灌木的生物量预测方法。研究最终给出了 6 种沙地灌木的最优生物量预测模型。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究样地(面积 1 km²)位于浑善达克沙地中部的典型榆树疏林分布区,位于锡林郭勒盟正蓝旗桑根达来镇东北 30 km 处(图 1)。该地区平均海拔 1300 m,受温带半干旱气候控制,年均温度 0.5—3.5℃,年均降水量 250—400 mm,年均蒸发量 2000—2700 mm,全年盛行西风,年均风速 3.5—5.5 m/s,主要土壤类型为栗钙型风沙土。榆树疏林是浑善达克沙地和科尔沁沙地中的顶级植被群落,也是沙地分布最广泛的生态系统之一,在京津冀风沙源区起到重要的防风固沙作用^[14]。榆树疏林景观特征为榆树乔木稀疏散布于草地之中,沙甸和沙丘背风坡分布有密集灌丛。其中灌木丛分布面积大,植株密集,是地表植被生物量的重要组成部分。灌木林因其覆盖度大,树冠靠近地表,生长密集,物种多样性较高,在防护地表沙化、改良土壤、为野生动物提供栖息地等方面发挥着重要的生态功能。对于榆树疏林生态系统中榆树生物量的研究已有不少报道^[15]。而对于其中灌木生物量的研究较为缺乏^[16]。

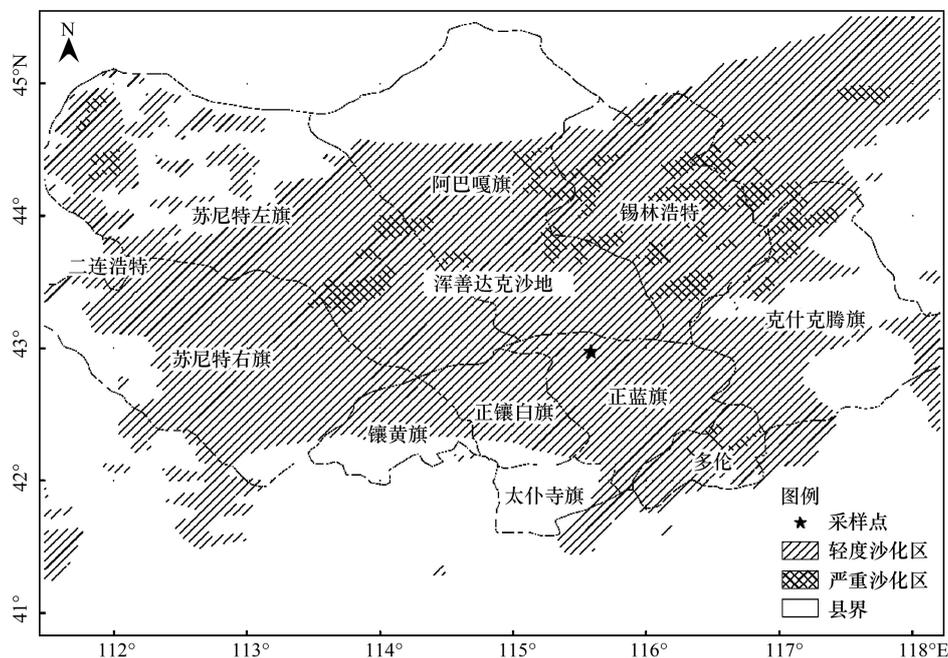


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Schematic of the study location

1.2 采样方法

2015 年 8 月,对浑善达克沙地疏林草地的六种主要灌木类型,包括茶藨子(*Ribes nigrum* L.)、柴桦(*Betula gmelinii* Bge)、锦鸡儿(*Caragana sinica* Rehd.)、小红柳(*Salix microstachya* Turcz.)、小黄柳(*Salix gordejewii*

Chang et SkV.)、绣线菊(*Spiraea Salicifolia L.*), 每种灌木根据其高度和冠幅等级, 选择不同大小的 20 株代表木, 测定每株灌木的长地径、短地径、长冠幅、短冠幅、高度等属性。按一定比例采用地面交割法, 测定其地表鲜生物量, 取一定比例的枝条, 实验室烘干后测得水分含量, 通过比例换算得出整个植株的干生物量。

1.3 预测指标的选择

本研究选择应用最为广泛的高度(h)、长冠幅(a_1)、短冠幅(b_1)、长地径(a_2)、短地径(b_2)5 项测量因子(图 2)。通过这 5 个单因子计算得出植冠体积(AH)、地径平方与高度乘积(D^2H)两个复合指标, 计算公式如下:

$$AH = \pi d_1^2 h \quad (1)$$

式中, d_1 是冠幅的半径, 既长半径和短半径 $1/2a_1$ 、 $1/2b_1$ 的平均值。 h 是植株高度。

$$D^2H = \pi d_2^2 h \quad (2)$$

式中, d_2 是基径的半径, 既长半径和短半径 $1/2a_2$ 、 $1/2b_2$ 的平均值。 h 是植株高度。

另外, 根据灌木的形态特征, 设计了倒圆台体积模型(V)作为新的预测指标。圆台体积模型公式如下:

$$V = \frac{1}{3}\pi h(d_1^2 + d_1 d_2 + d_2^2) \quad (3)$$

式中, d_1 、 d_2 和 h 含义同上。

以上述 5 个单因子和 3 个复合因子作为初始预测指标, 进一步通过相关分析和拟合分析, 评选出最优预测指标, 并采用最优指标对沙地 6 种灌木的生物量进行建模。

1.4 灌木生物量模型构建及精度评价

相对生长模型(也称异速生长方程)是应用最为普遍的一种生物量估计模型。大量研究表明, 相对生长模型相比其他模型, 如线性模型、多项式模型等, 其外推性和稳定性更好, 因此本研究选用该模型对灌木生物量进行拟合^[1,17]。相对生长模型的结构式表达如下^[18]:

$$y = \beta_0 x^{\beta_1} \quad (4)$$

式中 y 为灌木总生物量。 x 为代表灌木大小的变量, 即预测指标。 β_0 、 β_1 为模型参数^[1]。

模型拟合效果采用校正决定系数 $\text{Adj.}R^2$ 、显著性指标 p 值、估计值的标准误 SEE 指标进行评价。这些评价指标的公式及含义在很多文献中都有介绍, 这里不再赘述^[3,10]。

2 研究结果

2.1 预测指标与灌木生物量的相关性评价

对 6 种灌木生物量及各个预测指标进行相关分析, 相关系数及其显著性能初步反映各指标对生物量的预测能力^[19]。结果显示, 灌木高度和地径与生物量之间的相关性较弱, 相关系数小于 0.7。对于一些物种, 如锦鸡儿、绣线菊、柴桦等, 其相关性达不到显著水平(表 1)。冠幅与生物量相关系数在 0.7—0.8 之间, 相关性明显优于地径。复合因子能明显改善单因子与生物量之间的相关性。基于地径和高度的复合因子 D^2H 与生物量之间的相关性均值在 0.76, 明显优于高度和地径单因子。基于冠幅和高度的植冠体积与生物量的相关系数在 0.84, 也明显优于冠幅单因子。预示着复合因子对灌木生物量的预测能力更好, 这与已有研究结论一致^[20-21]。圆台体积能复合更多的测量指标, 其与生物量之间的相关性为 0.88, 在所有指标中表现最好。综合

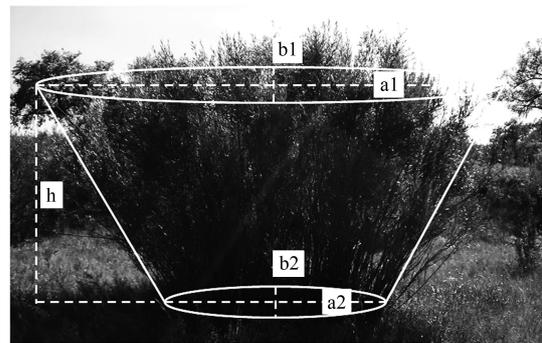


图 2 灌木属性测量指标示意图

Fig.2 Schematic diagram of the measurements of the shrub

a1: 最大冠幅, maximum crown diameter; b1: 最大冠幅的垂直交叉冠幅, the perpendicular diameter of a1; a2: 最大地径, maximum diameter at the base; b2: 最大地径的垂直交叉地径, the perpendicular diameter of b1; h: 最大高度, the distance between the ground surface and highest crown point

考虑各预测指标与生物量之间的相关性,选择圆台体积、植冠体积、 D^2H 三个指标进一步进行拟合评价。

表 1 灌木生物量与各模拟因子的相关性

Table 1 Correlation between biomass of shrubs and various simulation factors

物种 Shrub species	高度 Height	长冠幅 Long crown diameter	短冠幅 Short crown diameter	长地径 Long base diameter	短地径 Short base diameter	D^2H	植冠体积 Crown volume	圆台体积 Round table volume
茶彪子 <i>Ribes nigrum</i> L.	0.54 **	0.85 **	0.79 **	0.80 **	0.80 **	0.80 **	0.88 **	0.91 **
柴桦 <i>Betula gmelinii</i> Bge	0.48 **	0.68 **	0.65 **	0.65 **	0.17	0.63 **	0.70 **	0.79 **
锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i> Rehd.	0.29	0.73 **	0.68 **	0.69 **	0.48	0.72 **	0.77 **	0.87 **
小红柳 <i>Salix microstachya</i> Turcz.	0.74 **	0.75 **	0.89 **	0.77 **	0.70 **	0.88 **	0.91 **	0.95 **
小黄柳 <i>Salix gordejvii</i> Chang et SkV.	0.61 **	0.84 **	0.89 **	0.71 **	0.82 **	0.85 **	0.97 **	0.93 **
绣线菊 <i>Spiraea Salicifolia</i> L.	0.51 *	0.79 **	0.78 **	0.49 *	0.59 **	0.69 **	0.82 **	0.84 **
平均值 Average	0.53	0.77	0.78	0.69	0.59	0.76	0.84	0.88

D^2H : 地径平方与高度的乘积, the product of square base diameter and height; ** 表示达到极显著相关 $P < 0.001$; * 表示达到显著相关 $P < 0.05$

2.2 预测指标与灌木生物量的拟合分析

为进一步评价圆台体积、植冠体积、 D^2H 的 3 个指标对灌木生物量的预测能力,建立 3 个指标与生物量之间的异速生长模型,对模型的拟合效果采用校正决定系数 $Adj.R^2$ 和估计值标准误 SEE 进行评价。模型的结构见公式 4,模型参数以及评价指标值见表 2。为了使模型之间具有可比性,将原始数据进行标准化,绘制生物量和各个预测指标之间的异速生长方程拟合线(图 3),并对拟合方程的 $Adj.R^2$ 和 SEE 值绘制箱图进行对比(图 4)。结果显示,圆台体积—生物量异速生长模型的 $Adj.R^2$ 均值(0.76)较高,SEE 值(0.007)较小,说明相比植冠体积、 D^2H ,圆台体积对生物量具有更好的拟合精度。其中圆台体积模型和植冠体积模型之间的 $Adj.R^2$ 均值相差较小,然而植冠体积模型的 $Adj.R^2$ 值和 SEE 值在不同物种之间波动较大(表 2),在箱图中表现为变异范围较大(图 4),说明其对不同灌木种类进行生物量预测时稳定性较差。综合来看,植冠体积对生物量的预测效果优于 D^2H ,而圆台体积对生物量的预测精度以及稳定性方面均优于前两者指标。

表 2 灌木生物量异速生长模型参数及评价指标

Table 2 Parameters and evaluation indexes of allometric models for shrub biomass

物种 Shrub species	植冠体积 Crown volume				圆台体积 Round table volume				D^2H			
	β_0	β_1	$Adj.R^2$	SEE	β_0	β_1	$Adj.R^2$	SEE	β_0	β_1	$Adj.R^2$	SEE
茶彪子 <i>Ribes nigrum</i> L.	0.496	0.702	0.812	0.004	0.528	0.785	0.854	0.003	0.494	1.125	0.677	0.003
柴桦 <i>Betula gmelinii</i> Bge	1.055	0.675	0.609	0.019	0.971	0.698	0.690	0.004	0.473	0.768	0.566	0.009
锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i> Rehd.	0.234	0.441	0.532	0.004	0.393	0.520	0.658	0.005	0.864	0.724	0.636	0.007
小红柳 <i>Salix microstachya</i> Turcz.	0.767	0.801	0.804	0.023	0.723	0.814	0.870	0.011	0.392	0.832	0.755	0.015
小黄柳 <i>Salix gordejvii</i> Chang et SkV.	1.257	1.002	0.845	0.022	1.339	0.973	0.802	0.015	1.039	0.907	0.570	0.038
绣线菊 <i>Spiraea Salicifolia</i> L.	20.797	1.746	0.665	0.003	6.411	1.446	0.652	0.002	0.121	0.586	0.313	0.001
平均值 Average			0.711	0.013			0.755	0.007			0.586	0.012

β_0 : 异速生长模型参数, parameter of the allometric model; β_1 : 异速生长模型参数, parameter of the allometric model; $Adj.R^2$: 校正决定系数, adjusted coefficient of determination; SEE: 估计值的标准误, standard deviation; 异速生长模型公式为: $y = \beta_0 x^{\beta_1}$, $Adj.R^2$ 和 SEE 表征异速生长模型的模拟精度

2.3 六种灌木的生物量模拟结果

基于以上各预测指标的对比分析,以圆台体积作为灌木的预测指标更为理想。对 6 种灌木的干生物量的

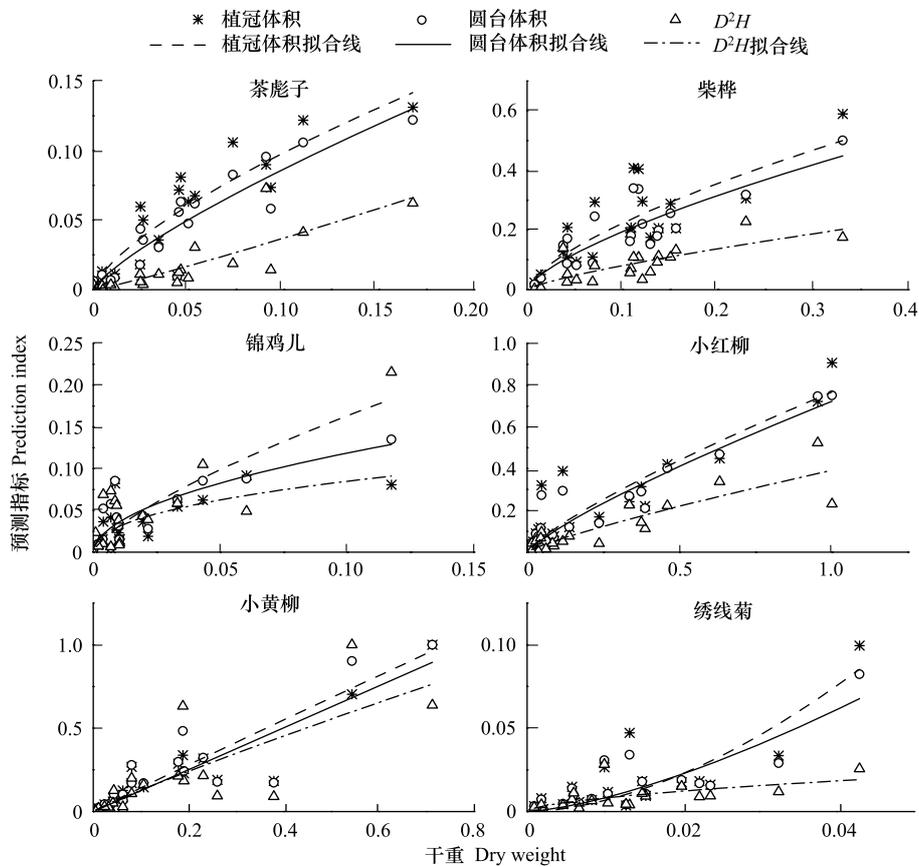


图3 灌木生物量和各预测指标的异速生长模型拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of allometry model for biomass and various predictive indexes of the six shrub species

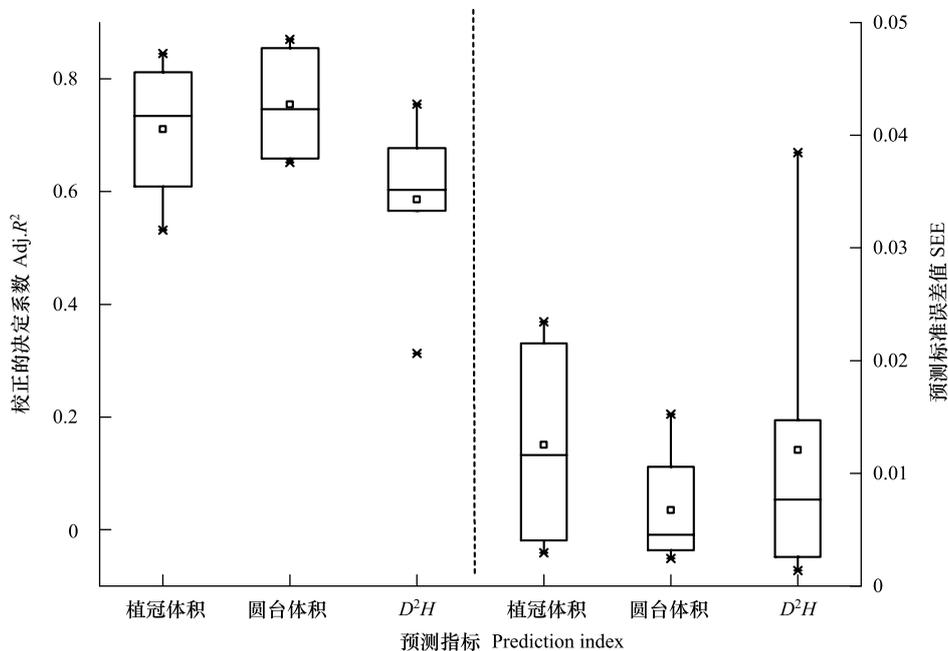


图4 基于 $Adj.R^2$ 和 SEE 的灌木生物量模型拟合精度评价

Fig.4 Evaluation of fitting precision of shrub biomass model based on $Adj.R^2$ and SEE

实测值和圆台体积进行异速生长方程拟合,模型参数及拟合结果见图 5,模型均通过显著性检验($P < 0.05$)。

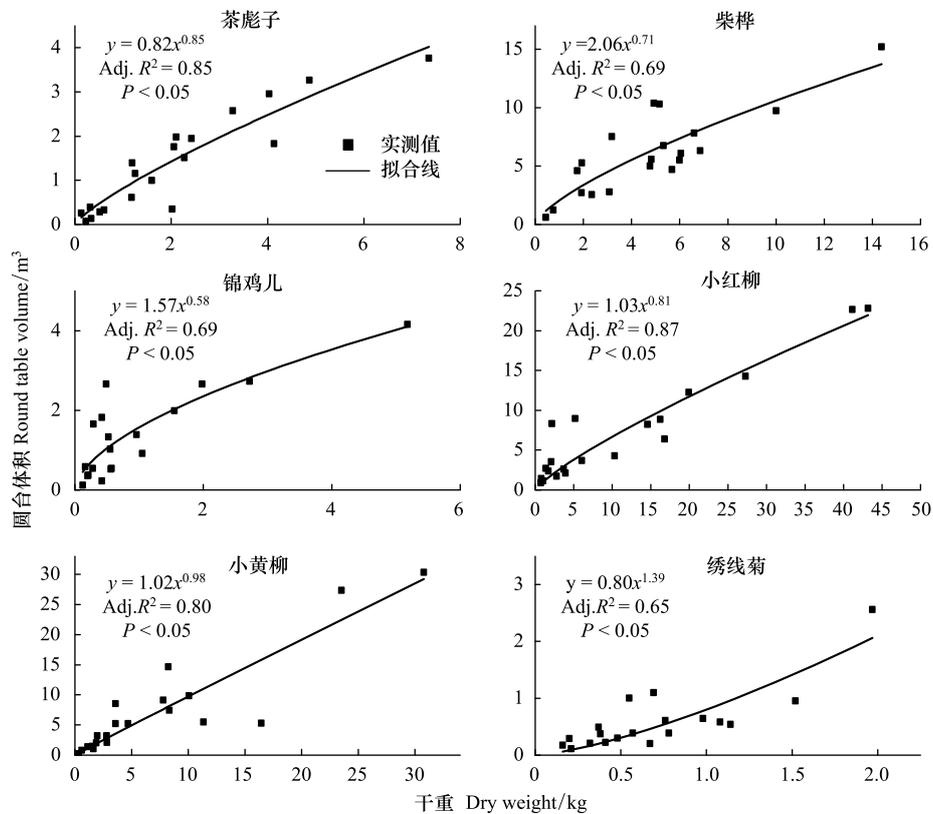


图 5 6 种灌木的圆台体积—生物量的异速生长模型

Fig.5 Allometric growth model of the round table volumetric-biomass of the six shrub species

3 结论与讨论

本研究对几种常见的生物量预测指标进行了对比分析,探讨了其对灌木生物量的预测能力。其中,特别设计了一种更贴合灌木形态特征的圆台体积作为新的预测指标。研究表明,单因素测量指标中,相比高度和地径,冠幅与灌木生物量之间的相关性更好,预示着冠幅对生物量的预测能力较高,很多研究中也类似结论^[6,21-22]。圆台体积、植冠体积和 D^2H 等复合指标与生物量的相关性比单因素指标更强,预示着复合指标能进一步提高灌木生物量预测能力,这也与已有研究结果一致^[20]。通过进一步的拟合精度评价,圆台体积相较于植冠体积和 D^2H ,其拟合度更好,误差较小。对于不同的灌木种类,如小红柳、柴桦、锦鸡儿等,其植冠形态和个体大小存在明显差异,然而其圆台体积与生物量之间均能保持较高的相关性,并且在拟合分析中,拟合误差变异较小。这意味着圆台体积对不同灌木种类的预测能力会较为稳定。另外,因圆台体积综合了包括高度、冠幅、地径等较多的测量属性在内,在野外测量较为充分的情况下,圆台体积是理想的生物量预测指标,而在野外测量指标不充分的情况下,冠幅或者基于冠幅的复合变量更适宜用来预测灌木生物量。

参考文献 (References):

- [1] 曾伟生. 国内外灌木生物量模型研究综述. 世界林业研究, 2015, 28(1): 31-36.
- [2] Zandler H, Brenning A, Samimi C. Quantifying dwarf shrub biomass in an arid environment: comparing empirical methods in a high dimensional setting. Remote Sensing of Environment, 2015, 158: 140-155.
- [3] 李钢铁, 秦富仓, 贾守义, 董锦兰, 吉日格勒, 王满贵. 旱生灌木生物量预测模型的研究. 内蒙古林学院学报, 1998, 20(2): 26-32.
- [4] Conti G, Enrico L, Casanoves F, Díaz S. Shrub biomass estimation in the semiarid Chaco forest: a contribution to the quantification of an underrated carbon stock. Annals of Forest Science, 2013, 70(5): 515-524.

- [5] 卢振龙, 龚孝生. 灌木生物量测定的研究进展. 林业调查规划, 2009, 34(4): 37-40, 45-45.
- [6] Yang H T, Wang Z R, Tan H J, Gao Y H. Allometric models for estimating shrub biomass in desert grassland in northern China. *Arid Land Research and Management*, 2017, 31(3): 283-300.
- [7] 万五星, 王效科, 李东义, 冯学全, 张千千, 于小红. 暖温带森林生态系统林下灌木生物量相对生长模型. 生态学报, 2014, 34(23): 6985-6992.
- [8] 林伟, 李俊生, 郑博福, 郭建明, 胡理乐. 井冈山自然保护区 12 种常见灌木生物量的估测模型. 武汉植物学研究, 2010, 28(6): 725-729.
- [9] 赵蓓, 郭泉水, 牛树奎, 孙武, 张志旭. 大岗山林区几种常见灌木生物量估算与分析. 东北林业大学学报, 2012, 40(9): 28-33.
- [10] 何列艳, 亢新刚, 范小莉, 高延, 冯启祥. 长白山林区林下主要灌木生物量估算与分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(5): 45-50.
- [11] 仇瑶, 常顺利, 张毓涛, 王文栋, 何平, 王慧杰, 谢锦. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性. 生态学报, 2015, 35(23): 7842-7851.
- [12] 罗永开, 方精云, 胡会峰. 山西芦芽山 14 种常见灌木生物量模型及生物量分配. 植物生态学报, 2017, 41(1): 115-125.
- [13] Ludwig J A, Reynolds J F, Whitson P D. Size-biomass relationships of several Chihuahuan desert shrubs. *The American Midland Naturalist*, 1975, 94(2): 451-461.
- [14] 史宇飞, 金永焕, 金兰淑. 国内榆树疏林研究现状. 水土保持应用技术, 2011, (2): 32-35.
- [15] 赵云杰, 田赞, 王晓. 典型榆树疏林碳氮储量及其分配特征. 中国水土保持科学, 2014, 12(6): 82-89.
- [16] 马媛, 李钢铁, 潘羿壅, 麻云霞, 王强, 张驰. 浑善达克沙地 3 种灌木生物量的预测模型. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 198-201.
- [17] Rojo V, Arzamendia Y, Pérez C, Baldo J, Vilá B. Double sampling methods in biomass estimates of Andean shrubs and tussocks. *Rangeland Ecology & Management*, 2017, 70(6): 718-722.
- [18] 罗红, 李百炼. 异速生长模型研究概述. 生态学杂志, 2011, 30(9): 2060-2065.
- [19] Vora R S. Predicting biomass of five shrub species in northeastern California. *Journal of Range Management*, 1988, 41(1): 63-65.
- [20] 曾珍英, 刘琪璟, 曾慧卿. 江西千烟洲几种灌木生物量模型的研究. 福建林业科技, 2005, 32(4): 68-72.
- [21] Huff S, Ritchie M, Temesgen H. Allometric equations for estimating aboveground biomass for common shrubs in northeastern California. *Forest Ecology and Management*, 2017, 398: 48-63.
- [22] Zhang L, Cui G S, Shen W, Liu X S. Cover as a simple predictor of biomass for two shrubs in Tibet. *Ecological Indicators*, 2016, 64: 266-271.