

DOI: 10.5846/stxb201410272098

王炜, 王保栋, 徐宗军, 章彦华, 王宗灵. 昌邑海洋保护区柽柳灌丛枝干生物量估算方法. 生态学报, 2016, 36(8): - .

Wang W, Wang B D, Xu Z J, Zhang Y H, Wang Z L. Modeling stem and branch biomass of *Tamarix* spp. in the Marine Protected Area in Changyi, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): - .

昌邑海洋保护区柽柳灌丛枝干生物量估算方法

王 炜¹, 王保栋^{1,*}, 徐宗军¹, 章彦华², 王宗灵¹

¹ 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

² 山东省潍坊市昌邑海洋生态特别保护区管理委员会, 昌邑 261300

摘要:柽柳属植物(*Tamarix* spp.)是我国沙漠干旱地区和滨海盐渍化地区的重要树种,具有较高的生态价值。在滨海地区,柽柳是一种典型灌木,分枝多、可塑性高,以往对柽柳生物量模型的研究,多以直立枝基径和长度作为自变量,此方法虽有较高精度,但工作繁琐。因此,研究以昌邑海洋生态保护区的柽柳林为对象,分别以株高冠幅组合、冠幅为自变量,以一元线性、幂函数、二次多项式等形式建立柽柳枝干鲜重的回归方程,并进行验证比较,目的是建立准确高效且适合滨海地区的柽柳生物量估测方法。结果表明:(1)对滨海地区柽柳林,冠幅和株高是较好的测树因子,以此建立回归方程,简便易行、准确可靠,应用前景较好;(2)综合方程的准确性和稳定性,无论以冠幅株高组合,还是单以冠幅作为自变量,均确定幂函数形式的回归方程为最优,经验证与实测值的偏差分别为-2.22%和 2.92%;(3)基于冠幅的方程虽预测精度稍差,但由于冠幅面积可从高分辨遥感影像上直接提取,因而有极好应用前景;(4) R^2 是评价模型优劣的重要标准,但仅以此为标准并不严谨,还需结合其他验证方法;(5)测区柽柳的株高、冠幅、鲜重的均值分别为(215.2±41.4) cm, (2.49±2.21) m², (4.15±5.80) kg,建议通过人工管理的方式提高林分质量。

关键词:柽柳;异速生长方程;冠幅;地上生物量

Modeling stem and branch biomass of *Tamarix* spp. in the Marine Protected Area in Changyi, China

WANG Wei¹, WANG Baodong^{1,*}, XU Zongjun¹, ZHANG Yanhua², WANG Zongling¹

¹ The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

² Changyi Special Marine Protected Area Management Committee, Weifang 261300, China

Abstract: *Tamarix* spp. are woody plants that are widely distributed throughout the world, and they have ecological importance in the arid and salinized areas of China. However, methods for modeling the biomass of *Tamarix* spp. and other multi-stemmed shrubs are inadequate. Diameter measurements (such as diameter at breast height) are frequently used and have proved to correlate well with biomass; however, such methods are difficult to apply for *Tamarix* because of its irregular growth patterns and multiple stems. Modeling shrub biomass has received more attention in recent years, and several studies have indicated that for shrubs shaped like cylinders or cones, the crown area was significantly correlated with shrub biomass. Considering the constraints of diameter measurements for *Tamarix* spp., we modeled *Tamarix* spp. biomass using crown width and height in Changyi Marine Protected Area (Shandong Province, China; 37°06'15"N, 119°22'00"E). The area containing *Tamarix* spp. (*T. chinensis* and *T. austromongolica*) was approximately 29.3 km². In February 2014, nine sample plots (30 m × 30 m) were selected, and three embedded plots (5 m × 5 m) were placed randomly in each plot. Prior to harvesting, the height (H), basal diameter (BD), and crown area (C) of 247 *Tamarix* individuals in the

基金项目:海洋公益性行业科研专项经费项目(201205008);山东省博士后创新项目基金

收稿日期:2014-10-27; **修订日期:**2015-12-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangbd@fio.org.cn

embedded plots were measured. Fresh weights (*FW*) were collected after harvesting. At the time of sampling, the trees had no foliage, and thus the *FW* included only stems and branches. One hundred and eighty-nine individuals were selected randomly to establish the regression equations, while the remaining 58 individuals were used for testing the accuracy of these equations. *CH* (the product of *C* × *H*) and *C* were chosen as independent variables, and the regression equations were established in the form of linear, power-law, and quadratic polynomials. The equations based on *CH* were $FW = 0.856 \times (CH) - 0.879$ ($R^2 = 0.884$, $F = 1428.5$), $FW = 0.403 \times (CH)^{1.226}$ ($R^2 = 0.900$, $F = 1396.1$), and $FW = 0.010 \times (CH)^2 + 0.562 \times (CH) + 0.114$ ($R^2 = 0.903$, $F = 875.7$), whereas the equations based on *C* were $FW = 2.462 \times C - 1.893$ ($R^2 = 0.825$, $F = 881.8$), $FW = 0.900 \times C^{1.440}$ ($R^2 = 0.861$, $F = 966.3$), and $FW = 0.144 \times C^2 + 1.007 \times C + 0.127$ ($R^2 = 0.864$, $F = 600.7$). Although quadratic polynomial equations had higher R^2 values, the power-law functions performed best in the test, as they had deviations of 2.22% (*CH*) and 2.92% (*C*). Furthermore, because the power-law function is the most widely used allometric equation, we recommend establishing regression equations using power-law functions in this area. As tree crown properties can be reconstructed using high-resolution satellite data, allometric equations that use *C* as the only independent variable may provide a more cost-efficient way of monitoring, reporting, and verifying the carbon stocks of *Tamarix* spp. The mean values of *H*, *BD*, *C*, and *FW* in the study area were (215.2 ± 41.4) cm, (4.2 ± 1.9) cm, (2.49 ± 2.21) m², and (4.15 ± 5.80) kg (mean ± SD), respectively; therefore, artificial management should be enhanced to improve the stand quality.

Key Words: *Tamarix* spp.; allometric equation; crown area; above-ground biomass

森林生态系统的生物量和生产力不仅是反映森林生态系统基本特征的重要指标,也是研究森林生态系统物质循环和能量流动,评价森林生态系统生产潜力以及进行森林生态系统经营管理必需的基础数据^[1]。在全球气候变化的背景下,国际碳贸易市场逐渐形成,生态系统碳储量问题成为国际上的热点问题^[2],而森林生物量对于森林生态系统的研究以及全球碳储量的监测是一个重要理论依据,生物量模型则是计算森林生物量的主要途径^[3]。

2007年,减少发展中国家毁林和森林退化引起的碳排放(Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries, REDD+)议题纳入《巴厘行动计划》,得到了国际社会广泛的关注和推动,而实现其可测、可报告和可核查的三可目标,需要大量精确可靠、可供核实的森林资源动态观测资料,因此开发可靠而简便经济的测量方法是目前的一大挑战^[4-6]。

灌木生物量是群落和生态系统研究中的重要内容,是进行物质循环研究的基础,具有重要意义,但与乔木生物量研究相比,其受到的重视还远远不够。怪柳属(*Tamarix* spp.)植物在世界有着广泛的分布,是公认的耐旱耐盐碱植物^[7]。由于其深根潜水、成林迅速的特性,在北美及澳洲对当地原生植被造成了破坏^[8-9]。在我国,怪柳属(*Tamarix* spp.)植物是沙漠干旱地区绿化造林和盐碱地土壤改良的重要树种。其中怪柳(*T. chinensis*)和甘蒙怪柳(*T. austromongolica*)在我国北方滨海湿地广泛分布,成为主要的建群种之一,对维持滨海湿地生态系统平衡具有重要作用^[10-11]。

灌木形态具有近椎体、柱体的特征^[12],体积和生物量的关系比面积和生物量的关系要更紧密相一致^[13],近年来,已经有研究表明冠幅对于多枝怪柳(*T. ramosissima*)生物量预测是一个较好的测树因子,但研究也指出怪柳属内各物种的生长特点和分布生境差异较大,对测树因子的选择以及生物量回归方程的数学形式,都有待更多的研究加以验证^[14-15],对滨海盐渍化地区怪柳生物量模型的研究更是鲜见报道。因此,本研究以昌邑国家级海洋特别保护区内怪柳林为对象,分别以冠幅株高组合和冠幅为自变量,建立怪柳枝干生物量的回归方程,验证以冠幅作为主要测树因子估算怪柳生物量的可行性,为研究我国北方滨海怪柳林生物量及固碳能力提供技术依据。

1 研究区域

昌邑海洋生态特别保护区位于山东省昌邑市,莱州湾南岸,东西长 5000 m,南北长 7000 m,总面积 29.3 km²,中心坐标为 37°06′15″ N, 119°22′00″ E。保护区在 2007 年 10 月获得国家海洋局批准建立,是我国唯一以柽柳为主要保护对象的国家级海洋特别保护区,也是在山东省设立的首个国家级海洋特别保护区。保护区包括柽柳林、滩涂湿地、浅海等多种生态类型。保护区内柽柳林面积达到 29.3 km²,在全国滨海盐碱地区罕见。

保护区所在区域属于温带半湿润季风性大陆性气候,气候温和,光照充足,热量丰富,四季分明。多年平均气温 11.9 ℃,多年平均降水量为 628.6 mm,降水多集中在 7、8 月,降水量约占全年降水量的 52%,年平均总蒸发量远大于年平均降水量。保护区所在的莱州湾南岸,呈东西带状分布。地势呈南高北低,地面坡降 0.27‰ - 0.31‰,地质构造属于华北地台渤海凹陷的一部分,地层为第四纪堆积层,地势平坦,地貌形态属堆积平原海岸,土壤母质为近代黄河冲积物,保护区土壤有机质含量低,平均含量为 0.420%,全氮、全磷的含量也不高,平均含量分别为 284 mg/kg 和 487 mg/kg^[16]。

2 研究方法

2.1 柽柳实测灌丛选取及生物量调查

为促进保护区柽柳林分更新,保护区管委会选定一处 330 m×120 m 的示范样地(四角坐标:37°5′38.37″ N, 119°21′25.90″E; 37°5′35.72″N, 119°21′26.13″E; 37°5′35.86″N, 119°21′41.34″E; 37°5′39.36″N, 119°21′41.62″E),于 2014 年 2 月对样地内的柽柳进行平茬,样地内主要伴生种有獐毛(*Aeluropus sinensis*),茵陈蒿(*Artemisia capillaris*),鹅绒藤(*Cynanchum chinense*),狗尾草(*Setaria viridis*)等。本研究借此机会,将示范样地划分为 30 m×30 m 的方格,从中选取 9 个方格,再从每个方格中随机选取 3 个 5 m×5 m 的小样方,在平茬之前测量了小样方内所有柽柳的株高(H , height)、基径(BD , basal diameter)、冠幅(C , crown width)的直径(D , diameter),共计测量了 247 株柽柳。

测量完毕后立即进行平茬(留茬高度 5—10 cm),并称取对应的地上部分鲜重(FW , fresh weight),由于柽柳冬季落叶,所统计的鲜重仅为枝干鲜重,不包括叶鲜重。为估算测区柽柳枝干的干重占鲜重的比例,随机选取了 3 丛柽柳枝干,带回实验室,称取鲜重后,置于 85℃ 的烘箱中至恒重,以此计算干重。

2.2 回归方程的建立

2.2.1 自变量的选择

建立灌木生物量模型,首先要选择植物形态易测因子作为估测参数,通常采用的易测因子有基径(D)、株高(H)、冠幅(C)、冠幅直径(D_c)等。借鉴乔木研究经验,以基径作为自变量的回归方法虽然有较高的精度,但由于是基于单枝来估算灌丛生物量,因而测量过程繁琐、工作量较大;而且由于柽柳形态可塑性较高,给标准枝的确定增加了难度,使得该方法的应用难于推广^[14-15, 17-18]。与柽柳类似,相当一部分灌木并无乔木那样明显的基径,因而有很多学者推荐使用植冠体积估测灌木生物量,因为植冠体积体现了灌木形态近椎体、柱体的特征^[1, 12],其中较有代表性的有 $D_c^2 H$ ^[19-20] 和 CH ^[21]。董道瑞等^[15]对塔里木河下游柽柳灌丛地上生物量的研究表明,冠幅单变量的柽柳生物量估测模型也具有较高的精度。因此,本研究分别以 CH 和 C 作为自变量,建立生物量回归方程。

冠幅面积的计算采用温洛克国际推荐的方法^[22]:

$$C = \pi \times \frac{D1}{2} \times \frac{D2}{2} \quad (1)$$

式中, $D1$ 和 $D2$ 分别为树冠的东西向和南北向直径。

2.2.2 回归方程的形式

常用的生物量回归方程有幂函数、一元线性和二次多项式等^[12],其中幂函数方程是估测乔木和灌木生物

量最为常见的模型,得到了普遍的认可。在本研究中,分别以此三种函数形式建立方程,其基本形式如下:

$$\text{幂函数:} \quad y = ax^b \quad (2)$$

$$\text{一元线性方程:} \quad y = a + bx \quad (3)$$

$$\text{二次多项式:} \quad y = a + bx + cx^2 \quad (4)$$

2.2.3 回归方法

采用科学绘图和数据分析软件 Origin 8.0 的非线性拟合 (Nonlinear Curve fit) 方法对数据进行回归,建立方程并进行方差分析,建立的方程以非线性回归 (Nonlinear regression) 的方法进行检验。共统计了 247 株怪柳,利用 Excel 的随机数生成函数,对 247 株怪柳随机编号(0—3 的 4 个自然数),编号为 1—3 的怪柳用于建立生物量回归方程(共计 189 株),编号为 0 的怪柳用于方程的验证(共计 58 株)。

2.2.4 数据描述统计及制图

本研究利用 Excel (Microsoft Corporation, USA) 和 SPSS 13.0 (IBM Corporation, NY, USA) 进行数据整理、描述统计分析,利用 origin 8.0 (OriginLab Corporation, MA, USA) 绘制图形。

3 结果与分析

3.1 测树因子的频率统计

测区怪柳株高、基径、冠幅、鲜重的均值分别为 (215.2 ± 41.4) cm, (4.2 ± 1.9) cm, (2.49 ± 2.21) m², (4.15 ± 5.80) kg。干重与鲜重的比值为 (79.1 ± 1.3) %。

统计了测区 247 株怪柳四个指标的频率分布,以便了解该区域怪柳群落的生长特征。

测区怪柳的株高在 150—270 cm 之间的有 213 株,占总数的 86.2%,其中 170—190 cm 的怪柳数量最多(48 株,占比 14.2%)。高于 270 cm 和低于 150 cm 的怪柳各有 17 株(各占 6.9%)。

测区怪柳的基径在 1.5—5.5 cm 之间的有 203 株,占总数的 82.2%,其中 2.5—3.5 cm 之间的怪柳数量最多(71 株,占比 28.7%)。大于 5.5 cm 的有 34 株(13.8%),小于 1.5 cm 的仅 10 株(4.0%)。

测区怪柳的冠幅大都在 2.5 m² 以内,有 188 株(62.7%),其中 0.5—1.5 m² 的最多(86 株,34.8%),2.5—4.5 m² 的有 32 株(13.0%),4.5—13.5 m² 的有 27 株(10.9%)。

测区怪柳的鲜重基本在 2.5 kg 以内,有 194 株,占总数的 78.5%,2.5—12.5 kg 的有 38 株(15.4%),12.5—47.5 kg 的仅有 15 株(6.1%)。

3.2 基于 CH 的怪柳灌丛生物量回归方程(图 2 a)

I. 线性回归方程结果:

$$FW = 0.856 \times (CH) - 0.879 \quad R^2 = 0.884 \quad (5)$$

II. 幂函数回归方程:

$$FW = 0.403 \times (CH)^{1.226} \quad R^2 = 0.900 \quad (6)$$

III. 二次多项式回归方程:

$$FW = 0.010 \times (CH)^2 + 0.562 \times (CH) + 0.114 \quad R^2 = 0.903 \quad (7)$$

显著性检验结果显示,三种回归方程的 F 值分别为 1428.475, 1396.059, 875.729, 均大于 $F(0.01, 1, 187) = 6.772$, 通过显著性检验。三个方程的 R^2 值接近, 对数据的拟合度均较好, 其中幂函数和二次多项式的 R^2 几乎一致。

3.3 基于冠幅 C 的怪柳灌丛生物量回归方程(图 2 b)

I. 线性回归方程结果:

$$FW = 2.462 \times C - 1.893 \quad R^2 = 0.825 \quad (8)$$

II. 幂函数回归方程:

$$FW = 0.900 \times C^{1.440} \quad R^2 = 0.861 \quad (9)$$

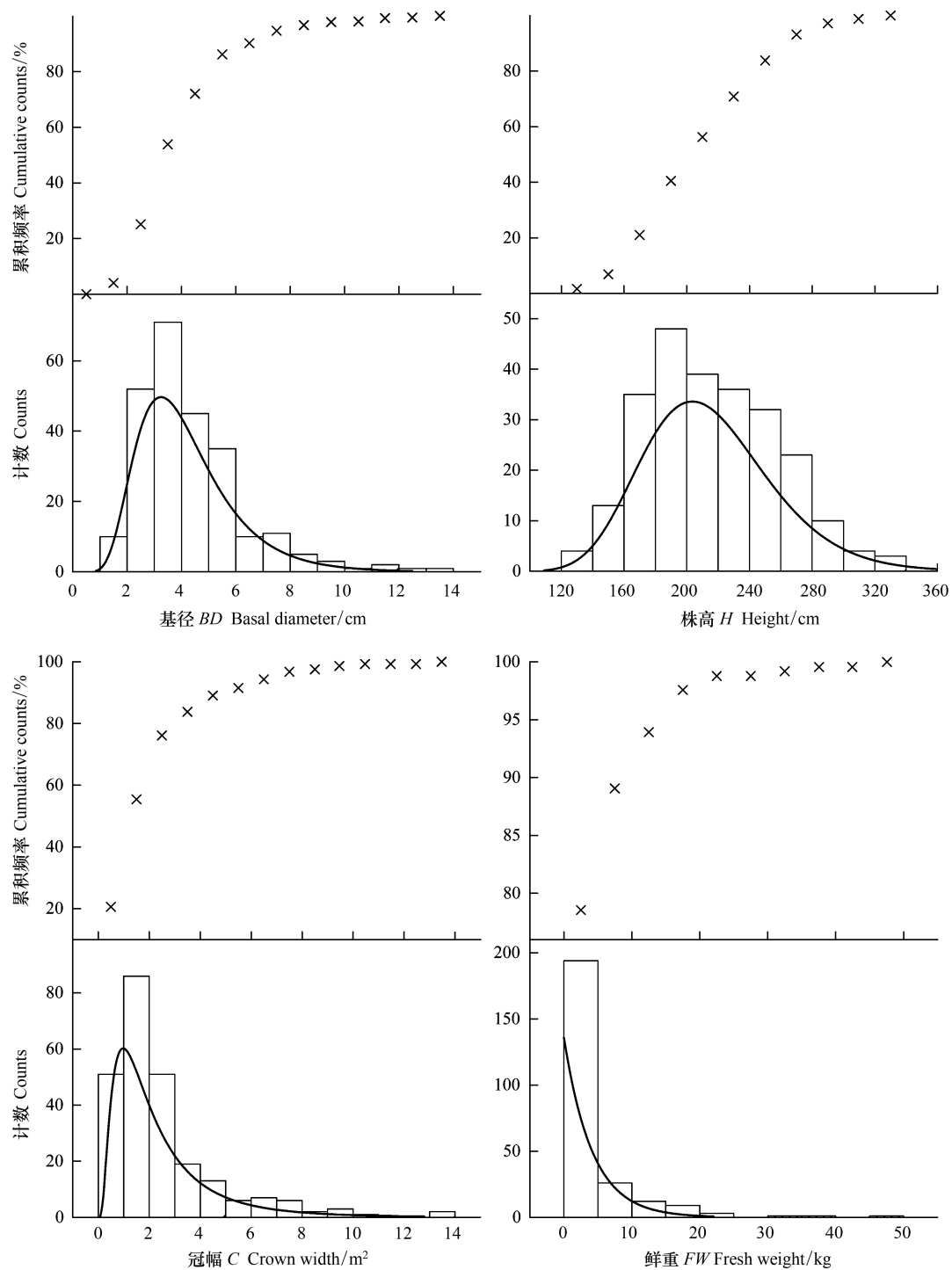


图1 测区柽柳的测树因子频率统计

Fig.1 Frequency analysis of Tamarisk's basal diameter (BD), height (H), crown width (C) and fresh weight (FW)

III. 二次多项式回归方程:

$$FW = 0.144 \times C^2 + 1.007 \times C + 0.127 \quad R^2 = 0.864 \quad (10)$$

显著性检验结果显示,三种回归方程的 F 值分别为 881.818, 966.266, 600.691, 均大于 $F(0.01, 1, 187) = 6.772$, 通过显著性检验。三个方程的 R^2 值与以 CH 为自变量的回归方程相比较, 均有一定程度的降低, 其中线性回归的下降幅度最大, 但总体上 R^2 仍然较好。幂函数和二次多项式的 R^2 几乎一致。

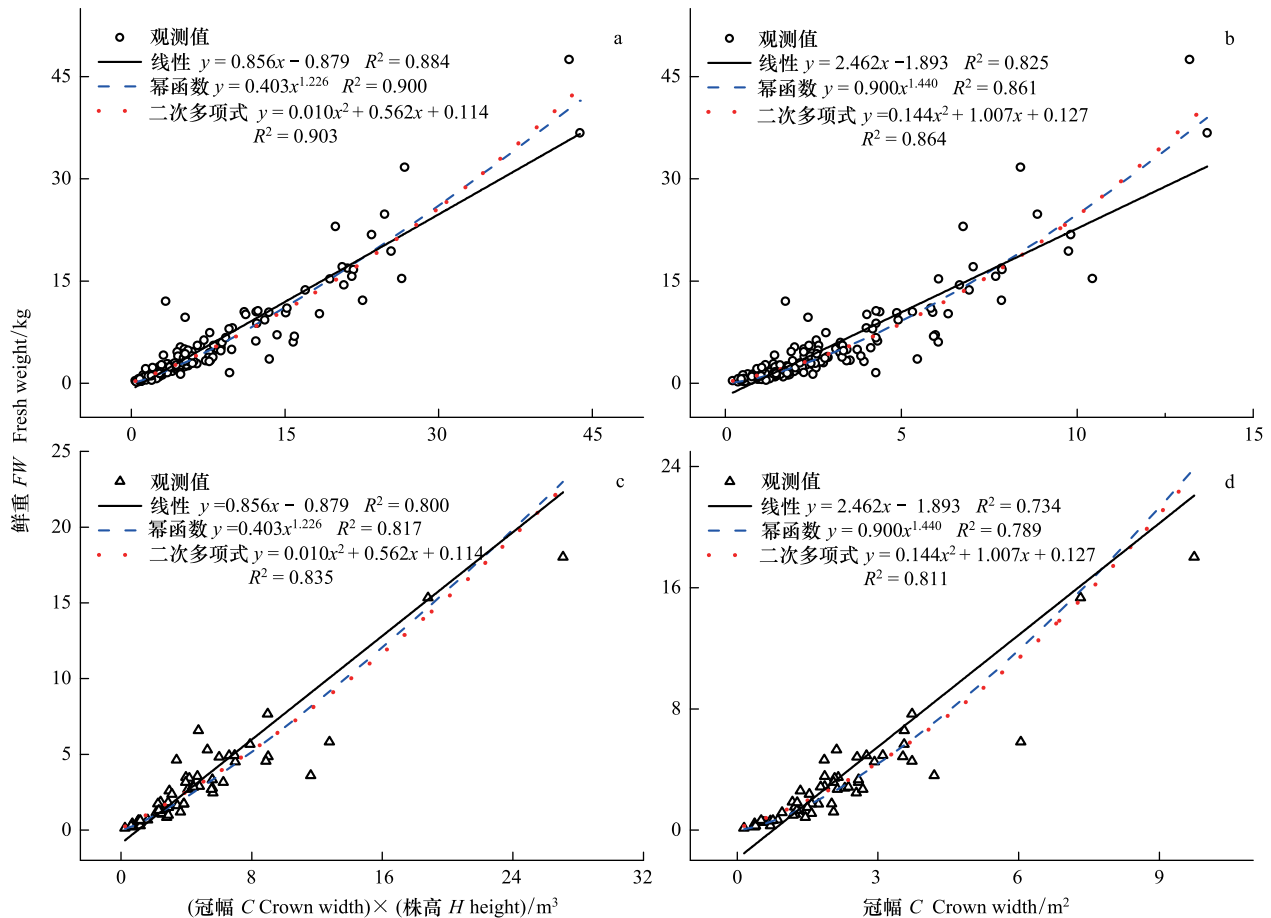


图2 柽柳灌木鲜重回归方程

Fig.2 Regression of Tamarisk fresh weight by CH and C

图 a 和 c 分别为基于 CH 的生物量回归方程的建立与检验,图 b 和 d 分别为基于 C 的生物量回归方程的建立与检验;○为鲜重观测值

3.4 回归方程的验证

将得到的回归方程对剩余 58 株柽柳的数据进行拟合验证,结果显示,基于 CH 的三个回归方程的 R^2 方均有下降,依次为 0.800, 0.817 和 0.835 (图 2 c)。基于 C 的三个回归方程的 R^2 方也均有下降,分别为 0.734, 0.789 和 0.811 (图 2 d)。基于 CH 的回归方程和基于 C 的回归方程均通过了显著性检验,且 R^2 较为理想,其中二次多项式回归方程的 R^2 最高。

对于植被碳储量的估算来讲,更为关注的是对总生物量估算的准确性。根据式 (5) — (10) 分别对 58 株柽柳的总生物量进行估算,并与实测值进行了比较。58 株柽柳的总鲜重实测值为 174.44 kg, 各方程的计算结果如表 1 所示。无论何种函数形式,基于 C 的方程预测值,均比基于 CH 的方程高 (7.54—10.66 kg)。幂函数的预测值与实测值的偏离最小,其中基于 CH 的方程和基于 C 的方程分别偏离 -2.2% 和 2.9%。基于 C 的线性和二次多项式方程预测结果偏离较多,分别为 10.9% 和 9.9%。

3.5 最优回归方程的确定及应用前景

3.5.1 对测树因子的应用前景分析

测区柽柳高度的频率曲线接近正态分布,可见基于 CH 的生物量方程中冠幅的大小对结果更具决定性 (图 1), 柽柳生长初期高生长非常迅速,扦插枝经过一年的生长平均株高可达 $1.5 \text{ m}^{[23]}$, 因而群落高度可较快的达到稳定,这也部分解释了为什么单以冠幅为自变量建立的生物量方程也具有较高的 R^2 。

与相关研究的对比可知,冠幅计算方法对回归结果的影响不大。Evangelista 等^[14] 对美国科罗拉多州多

枝柽柳(*T. ramosissima*)群落的研究中,围绕灌丛设置方形或矩形的样方,通过估测灌丛相对于样方的盖度来计算冠幅面积;董道瑞等^[15]将柽柳冠幅形状视作圆形,以东西向和南北向冠径的均值的一半作为圆的半径计算冠幅面积;本研究将柽柳冠幅形状视作椭圆,回归的 R^2 都较理想。

表 1 不同生物量回归方程的预测结果
Table 1 Predicted results of the biomass regression equations

自变量 Independent Variable	方程 Equation	决定系数 Determination coefficient R^2	预测值 Predictive value/kg	偏离 Deviation /%
基于冠幅株高(CH)的方程 Equations based on CH	$FW = 0.856 \times (CH) - 0.879$ $FW = 0.403 \times (CH)^{1.226}$	0.800 0.817	182.73 170.56	4.75 -2.22
(C = Crown Width, H = Height, FW = Fresh Weight)	$FW = 0.010 \times (CH)^2 + 0.562 \times (CH) + 0.114$	0.835	184.18	5.58
基于冠幅(C)的方程 Equations based on C	$FW = 2.462 \times C - 1.893$ $FW = 0.900 \times C^{1.440}$ $FW = 0.144 \times C^2 + 1.007 \times C + 0.127$	0.734 0.789 0.811	193.38 179.53 191.72	10.86 2.92 9.91

在本研究中,基于 C 与基于 CH 的方程相比, R^2 有一定的下降,而且在对总体生物量的估算验证中,无论何种方程形式,预测值普遍高于基于 CH 的方程,而与实测值偏差更大。因此,从准确性的角度考虑,对于该地区柽柳生物量预测,以冠幅和高度的组合作为测树因子符合其生长规律、准确且简便可行。

随着 3S 技术的发展,冠幅面积已可以从高分辨率的遥感影像上直接提取,以冠幅建立的生物量回归方程在灌木林生物量预测领域将具有极好的前景^[24-26],本研究中的结果与董道瑞等^[15]在新疆地区进行的研究类似,柽柳灌丛冠幅与生物量具有较好的回归关系,万红梅等^[25]利用 QuickBird 影像信息提取塔里木河下游柽柳林冠幅,提取精度达到 76.24%。这在理论上预示着利用 3S 技术快速准确的测量、评估和验证柽柳群落生物量是切实可行的。

3.5.2 对回归方程形式的分析

本研究中,虽然二次多项式形式的方程 R^2 最高,但在验证过程中,出现对样本总体生物量的高估,其中基于 C 的方程尤为明显,造成了近 10% 的高估,而 R^2 稍低的幂函数方程表现更为稳定,最为接近实测值(表 1)。有学者指出,虽然 R^2 是最为通用的评价回归方程的标准,但其具有一定的欺骗性,必须加以甄别。比如 R^2 会随着多项式项数的增加而提高,但与此同时方差膨胀系数也可能随之大幅增加,导致方程预测性变差^[26]。可见仅以 R^2 作为评价模型的标准存在一定局限,需要结合其他标准,否则容易造成错误的判断。

在各个尺度的研究中,幂函数方程都被证明符合有机体生长繁殖的规律^[26-28],因而在各种形式的异速生长方程中,幂函数得到了最为广泛的应用,在本研究的回归验证中,幂函数的预测也最为稳健(表 1)。线性方程和多项式方程是经验公式,缺少生物学机理的支撑,在回归过程中会尽量贴近现有数据,导致对其他样本的预测不够稳健,而且随着项数的增加这一趋势愈发明显, R^2 极有可能虚高。柽柳灌丛形状的可塑性较高^[14],除非幂函数方程 R^2 实在相差太大,且用于建立回归方程的柽柳具有较高的代表性,否则不建议采用多项式形式建立柽柳的生物量回归方程。

4 结论及建议

本研究以昌邑海洋特别保护区柽柳林为对象,分别检验了以冠幅株高结合和以冠幅作为自变量,建立柽柳枝干生物量回归方程的方法,得出以下结论:

(1) 对于柽柳来说,无论以冠幅株高结合作为自变量,还是以冠幅作为自变量建立的柽柳枝干生物量回归方程,均符合灌木生长规律,是可靠而简便易测的,前者更为准确,后者在 3S 技术的支撑下有更好的应用前景。

(2) R^2 是评价回归方程的重要标准, 但仅以此作为判断标准有失严谨, 有必要对方程的预测精度进行检验。综合分析, 确定以幂函数形式建立的方程为最优方程, 分别为 $FW = 0.403 \times (CH)^{1.226}$ ($R^2 = 0.900$, $F = 1396$), $FW = 0.900 \times C^{1.440}$ ($R^2 = 0.861$, $F = 966$)。对验证样本总生物量的预测偏离分别为 -2.22% 和 2.92% 。

(3) 用于建模的怪柳样本是否具有代表性, 对模型的精度、回归系数及稳定性有较大影响。本研究中基径、冠幅、鲜重的频率统计曲线均存在明显的右偏(较长的右尾), 方程主要适用于基径细, 冠幅小的怪柳灌丛。受限于取样范围, 本研究建立方程所选取的样本对于该地区怪柳林的代表性, 有待扩大取样范围加以验证, 因此有必要对保护区内怪柳林的林分结构、土壤立地条件等生态环境因子, 进一步研究和梳理, 确定合理的取样方案, 从而优化回归系数, 提高方程对该地区大面积生物量估算的精度和稳定性。

(4) 从本研究来看, 测区怪柳不够健壮, 基径、冠幅的频率曲线右尾较长, 还有很大的生长空间, 测区怪柳灌丛的生物量较低, 一个重要的原因是林分密度不均, 部分区域过密, 导致直立枝细小, 林分质量较差。有研究认为, 近年来保护区怪柳林分质量不断下降, 低效怪柳林面积逐步扩大^[10]。因此, 建议通过人工管理的方式提高林分质量, 如采用间伐、轮伐、择伐、修枝等技术手段促进怪柳林分的更新, 增加固碳能力。

参考文献 (References):

- [1] 陶冶, 张元明. 荒漠灌木生物量多尺度估测——以梭梭为例. 草业学报, 2013, 22(6): 1-10.
- [2] Schulze E D, Wirth C, Heimann M. Managing forests after Kyoto. Science, 2000, 289(5487): 2058-2059.
- [3] 王天博, 陆静. 国外生物量模型概述. 中国农学通报, 2012, 28(16): 6-11.
- [4] Corbera E, Schroeder H. Governing and implementing REDD+. Environmental Science & Policy, 2011, 14(2): 89-99.
- [5] GOF-C-GOLD. A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring and Reporting Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions and Removals Caused by Deforestation, Gains and Losses of Carbon Stocks in Forests Remaining Forests, and Forestation. GOF-C-GOLD Report version COP17-1, GOF-C-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, 2011.
- [6] 雪明, 武曙红, 程书强. 我国 REDD+ 行动的测量、报告和核查体系. 林业科学, 2012, 48(3): 128-131.
- [7] Devitt D A, Piorkowski J M, Smith S D, Cleverly J R, Sala A. Plant water relations of *Tamarix ramosissima* in response to the imposition and alleviation of soil moisture stress. Journal of Arid Environments, 1997, 36(3): 527-540.
- [8] Griffin G F, Smith D M S, Morton S R, Allan G E, Masters K A, Preece N. Status and implications of the invasion of tamarisk (*Tamarix aphylla*) on the Finke River, Northern Territory, Australia. Journal of Environmental Management, 1989, 29(4): 297-315.
- [9] Shafroth P B, Briggs M K. Restoration ecology and invasive riparian plants: An introduction to the special section on *Tamarix* spp. in western North America. Restoration Ecology, 2008, 16(1): 94-96.
- [10] 夏江宝, 刘玉亭, 朱金方, 许景伟, 陆兆华, 刘京涛, 刘庆. 黄河三角洲莱州湾怪柳低效次生林质效等级评价. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1551-1558.
- [11] 何秀平, 王保栋, 谢琳萍. 怪柳对盐碱地生态环境的影响. 海洋科学, 2014, 38(1): 96-101.
- [12] 郑绍伟, 唐敏, 邹俊辉, 慕长龙. 灌木群落及生物量研究综述. 成都大学学报: 自然科学版, 2007, 26(3): 189-192.
- [13] 张峰, 上官铁梁. 关帝山黄刺玫灌丛群落结构与生物量的研究. 武汉植物学研究, 1991, 9(3): 247-252.
- [14] Evangelista P, Kumar S, Stohlgren T J, Crall A W, Newman G J. Modeling aboveground biomass of *Tamarix ramosissima* in the Arkansas River Basin of Southeastern Colorado, USA. Western North American Naturalist, 2007, 67(4): 503-509.
- [15] 董道瑞, 李霞, 万红梅, 林海军. 塔里木河下游怪柳灌丛地上生物量估测. 西北植物学报, 2012, 32(2): 384-390.
- [16] 汤爱坤, 刘汝海, 许廖奇, 王金玉, 刘一霆. 昌邑海洋生态特别保护区土壤养分的空间异质性与植物群落的分布. 水土保持通报, 2011, 31(3): 88-93.
- [17] 安尼瓦尔, 尹林克. 怪柳属植物的生物量研究. 新疆环境保护, 1997, 19(1): 46-50.
- [18] 赵成义, 宋郁东, 王玉潮, 蒋平安. 几种荒漠植物地上生物量估算的初步研究. 应用生态学报, 2004, 15(1): 49-52.
- [19] 王蕾, 张宏, 哈斯, 郑秋红, 刘连友. 基于冠幅直径和植株高度的灌木地上生物量估测方法研究. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2004, 40(5): 700-703.
- [20] 曾慧卿, 刘琪璟, 马泽清, 张海清, 蔡哲, 曾珍英, 李轩然. 千烟洲灌木生物量模型研究. 浙江林业科技, 2006, 26(1): 13-17.
- [21] 曾慧卿, 刘琪璟, 马泽清, 曾珍英. 基于冠幅及植株高度的灌木生物量回归模型. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2006, 30(4): 101-104.
- [22] Brown S, Pearson T, Walker S M, MacDicken K. Methods Manual for Measuring Terrestrial Carbon. Arlington VA: Winrock International, 2005.

- [23] 付任胜, 管长志, 尹立荣, 陈磊, 夏时云. 两个柽柳种生长发育特性及利用价值初步研究. 天津农业科学, 2010, 16(3): 112-114.
- [24] 曾慧卿, 刘琪璟, 冯宗炜, 马泽清, 胡理乐. 红壤丘陵区林下灌木生物量估算模型的建立及其应用. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2185-2190.
- [25] 万红梅, 李霞, 董道瑞, 刘欢. 塔里木河下游林地树冠 QuickBird 影像信息提取与分析. 西北植物学报, 2011, 31(9): 1878-1885.
- [26] Sileshi G W. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. Forest Ecology and Management, 2014, 329: 237-254.
- [27] West G B, Brown J H, Enquist B J. The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organisms. Science, 1999, 284(5420): 1677-1679.
- [28] Marquet P A, Quiñones R A, Abades S, Labra F, Tognelli M, Arim M, Rivadeneira M. Scaling and power-laws in ecological systems. The Journal of Experimental Biology, 2005, 208(9): 1749-1769.