

基于森林健康视角的北长山岛人工林生物量

池源¹, 郭振¹, 石洪华^{1*}, 沈程程^{1,2}, 刘永志³ (1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 3. 中国海洋大学数学科学学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 以山东省长岛县北长山岛为研究区, 通过现场调查、数学模型和 3S 技术, 分析人工林生物量的总量(全部生物量)、存量(活树生物量)、失量(死树生物量)和存量失量比, 并探讨生物量的影响因素。结果显示: (1) 北长山岛人工林生物量总量共 5.88 万 t, 均值为 145.8 t/hm², 高于全国和山东省的平均水平; 生物量存量共 3.79 万 t, 失量共 2.09 万 t, 其均值分别为 93.9 t/hm² 和 51.9 t/hm², 森林健康问题已经成为影响北长山岛人工林生物量的重要因素。 (2) 随着林分密度的增加, 生物量总量和存量呈现先上升后下降的趋势, 失量持续上升, 存量失量比则不断下降; 随着胸径的增大, 黑松的存量失量比逐渐减小, 刺槐则相反; NDVI 与生物量总量、存量和存量失量比呈显著正相关, 与失量呈显著负相关。 (3) 存量失量比与坡向、土壤含水率、全磷和总氮呈显著正相关, 与海拔、坡度、含盐量和全钾呈显著负相关, 与坡位、pH 值和总碳关系不明显。

关键词: 海岛人工林; 森林健康; 生物量; 存量失量比; 空间分布特征; 北长山岛

中图分类号: X826,Q948

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2016)08-2522-14

The plantation biomass on Beichangshan Island based on forest health. CHI Yuan¹, GUO Zhen¹, SHI Hong-hua^{1*}, SHEN Cheng-cheng^{1,2}, LIU Yong-zhi³ (1. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. College of Mathematics Science, Ocean University of China, Qingdao 266100, China). *China Environmental Science*, 2016, 36(8): 2522~2535

Abstract: In this study, Beichangshan Island in Changdao County of Shandong Province was used as the research area. On the basis of field investigation, the methods of mathematic model and 3S technology were adopted. The plantation biomass was classified as total biomass (TB), existent biomass (EB), and lost biomass (LB), which represents the biomasses of all trees, living trees and dead trees, respectively. The ratio of existent biomass to lost biomass (EB/LB) was used to describe the relationship between different components of biomass and to reflect the plantation health condition from a new perspective. Then, the spatial distribution patterns and the impacting factors of plantation biomass were discussed. The results revealed that TB of plantation on Beichangshan Island summed to 58.8 kt, with the average value of 145.8 t/hm², which was higher than that of the whole country and Shandong Province. EB summed to 37.9 kt with the average value of 93.9 t/hm², and LB summed to 20.9 kt with the average value of 51.9 t/hm², indicating that the health condition of plantation has been an important factor impacting the plantation biomass. With the increase in stand density, both TB and EB firstly increased and then decreased, while LB kept an increasing trend, whereas EB/LB showed the opposite trend. The diameter at breast height (DBH) of 10~20 cm accounted for the most biomass, and with the increase in DBH, EB/LB of *Pinus thunbergii* tended to decrease, while EB/LB of *Robinia pseudoacacia* showed the opposite trend. The normalized difference vegetation index (NDVI) was significantly positively correlated with TB, EB and EB/LB, but negatively correlated with LB. EB/LB was significantly positively correlated with slope aspect, soil moisture content, total phosphorus and total nitrogen but negatively correlated with altitude, slope, soil salinity and total potassium, and had no significant correlations with slope position, soil pH and total carbon.

Key words: island plantation; forest health; biomass; the ratio of existent biomass to lost biomass; spatial distribution characteristics; Beichangshan Island

收稿日期: 2016-01-07

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201505012); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2015G13)

* 责任作者, 副研究员, shihonghua@fio.org.cn

森林生物量是评估森林碳循环贡献的基础^[1-3],也是维持森林生态系统稳定性的基底^[4-5]。近年来,林火、病虫害、干旱等灾害频发,引发森林规模缩小和质量下降,使得森林健康问题愈发受到重视^[6-7]。森林健康直接影响着生物量的现存量 and 增长速度,并可能导致森林由碳汇变为碳源^[8]。海岛是重要生态功能的贮存库,是人类居住生活的载体,也是保护与利用海洋的支点。由于独特的自身条件和复杂的外界干扰,海岛生态系统具有明显的脆弱性^[9],尤其是我国北方海岛大都由基岩构成,土壤贫瘠且气候条件恶劣,使得原生林木发育不良,20 世纪 50 年代以来开展了持续广泛的人工林建设,有效增加了海岛森林覆盖率。人工林构成了岛陆植被生物量的主体,在海岛生物多样性维持、防风固土、水源涵养、固碳释氧、景观美学等方面发挥着至关重要的作用^[10]。然而,由于恶劣的生长环境和频发的自然灾害,海岛人工林健康状况往往受到较大威胁,且一旦遭到破坏很难恢复,对人工林生物量的组成和分布格局造成严重影响,进而对海岛生态系统稳定性构成制约。从森林健康的视角出发分析海岛人工林生物量,能够充分判断海岛陆地植被生物量的实际状况,对揭示海岛生态系统生物量及其分布特征具有重要意义。基于森林健康视角的生物量研究中,人工林的全部生物量(总量)实际上包括活树生物量(存量)和死树生物量(失量)两个部分,其所处地位和生态价值具有明显差别,但均对人工林生态系统具有重要意义。以往的研究大都仅关注生物量总量,近年来部分学者开始关注死树生物量(失量)的问题,但仅停留在描述和统计层面,对存量和失量的相互关系及变化规律缺乏探讨,且尚无完整的评估体系^[11-12]。与此同时,海岛生态系统的人工林生物量研究工作已经得到了初步开展^[10,13],但并未将森林健康状况考虑在内,亟待进一步的完善。

因此,本文基于森林健康视角,选择人工林建设的典型海岛——山东省长岛县北长山岛为研究区,在现场调查取样的基础上,借助数学模型和 3S 技术等手段,评估北长山岛人工林生物量总量及其构成(存量和失量),阐明海岛人工林生物量

的空间特征,探讨人工林生物量的影响因子,为海岛人工林建设和保护提供依据,也为森林生物量研究提供一种新思路。

1 研究区现状

1.1 海岛概况

北长山岛位于山东半岛北侧,黄、渤海交汇处,是山东省长岛县北长山乡政府所在地。海岛面积约 7.89km²,岸线长约 16.02km。该岛所在区域属于东亚季风气候区,年均气温 12.0℃,1 月平均气温-1.6℃,7 月平均气温 24.5℃;年均降水量约 537mm,降水多集中在 6~9 月;日照较为充足,年均日照时数 2612h。北长山岛山体众多,包括嵩山、西大山、北山等,山势大致呈南北走向,最高点海拔约为 190m;土壤主要有棕壤、褐土、潮土 3 大类,以棕壤土分布面积最大,土层厚度约为 30cm,多砂砾,土质较差^[10]。

1.2 海岛人工林建设状况

北长山岛原生林木发育不良,现有森林基本为人工林。与长岛县其他海岛相比,北长山岛拥有最大的人工林规模,以黑松和刺槐为主要人工林树种,群落内部夹杂着零星麻栎、辽东栎、香椿等原生树种。截止 2014 年 10 月,北长山岛人工林面积约 4.03km²,占海岛总面积 50%以上,构成海岛的生态屏障。然而,北长山岛人工林的生长条件较差,干旱、大风、病虫害等给人工林健康状况带来严重影响。目前,北长山岛人工林树木死亡现象普遍,生物量和生态功能受损明显。

2 材料与方法

2.1 数据来源

2.1.1 现场调查与取样 2014 年 9~10 月进行人工林群落现场调查与取样工作。以均匀分布为原则,结合群落类型和地形因素,在北长山岛人工林区域共布设 32 个样地,样地大小为 20×20m(图 1)。运用 GPS 手持机和罗盘测量各样地的经纬度和地形信息;记录并测量样地内胸径(DBH)≥3cm^[14]所有活立木和枯立木的种类、胸径、基径、树高、枝下高和冠幅,对于死亡后被砍伐清理剩下的树木残桩,测量其基径,最终统计的树木中包

括活树(活立木)和死树(枯立木和残桩).此外,采用多点混合取土样方法进行表层土壤取样,在每个样地内选取 3 个取样点,经均匀混合后作为该样地的土壤样品,在实验室内除去其中草根、大石砾等杂质,过 2mm 钢筛并磨细,在 105℃ 高温下烘至恒重,称量并计算土壤含水率;pH 值采用电位法进行测定,含盐量采用电导法进行测定,全氮采用半微量开氏法进行测定,全磷采用碳酸钠熔融法进行测定,全钾采用氢氧化钠熔融法进行测定,总碳采用高温灼烧法进行测定.

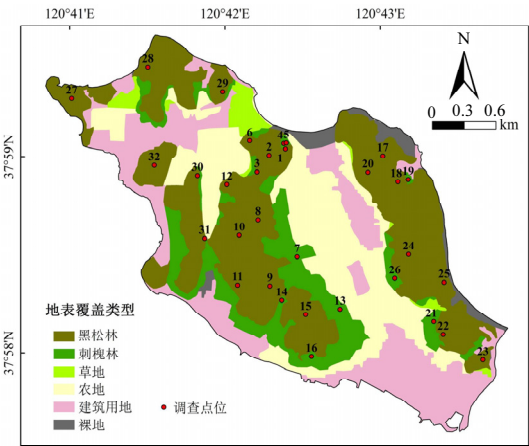


图 1 北长山岛地表覆盖类型和调查点位
Fig.1 Land cover types and sampling plots of Beichangshan Island

2.1.2 遥感影像 采用 2014-10-07 北长山岛所在区域的 ETM+ 遥感影像(分辨率为 30m)和 Aster GDEM 第二版 DEM 数据(垂直分辨率 20m,

水平分辨率 30m).利用 ENVI4.7 对 ETM+影像进行裁切、辐射定标和波段合成,进而通过 ArcGIS10.0 进行人机交互解译,结合现场实地调研进行校正得到北长山岛地表覆盖类型图(图 2),并计算人工林区域的归一化植被指数(NDVI);同时由 DEM 数据提取高程、坡度和坡向.为了建立人工林生物量与遥感数据的关系,选择 ETM+数据中能够反映植物状况的 B1-B5 和 B7 共 6 个波段,将其同高程、坡度、坡向一起重采样为 20×20m 的像元,提取 32 个调查点位的 6 个波段像元值以及高程、坡度和坡向数据;通过 ArcGIS10.0 的 Fishnet 工具在北长山岛人工林区建立 20×20m 网格,共划分 7629 个黑松林网格和 2457 个刺槐林网格,并提取每个网格中心点的 6 个波段像元值以及高程、坡度和坡向值.

2.2 生物量估算

2.2.1 数据处理 整理并统计各样地的经纬度、地形以及树木种类、数量、死亡率等.共调查树木 2411 棵,其中人工林群落建群种黑松占 66.8%,刺槐占 30.2%,天然原生树种麻栎等占 3%;树木总体死亡率达 31.4%,黑松死亡率为 33.5%,刺槐为 29.8%,天然树种仅为 2.8%.依据信息齐全的树木数据,建立黑松和刺槐的胸径-基径、树高-基径、树高-胸径回归方程(表 1),进而补全其他树木的胸径和树高信息.天然树种中死树极少(2 棵),均为自然死亡,呈枯立木状态,具有树高和胸径数据,已满足生物量估算的数据要求.

表 1 树木生长信息回归方程

Table 1 Regression equations of Tree Height (TH), Basal Diameter (BD) and Diameter at Breast Height (DBH)

树种	树高(y)-基径(x)	胸径(y)-基径(x)	树高(y)-胸径(x)
黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	$y = -2.466 + 3.403 \ln(x) \quad R^2 = 0.653$	$y = -0.222 + 0.772x \quad R^2 = 0.957$	$y = -1.156 + 3.264 \ln(x) \quad R^2 = 0.679$
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	$y = -1.863 + 3.551 \ln(x) \quad R^2 = 0.609$	$y = -0.218 + 0.837x \quad R^2 = 0.945$	$y = -0.649 + 3.357 \ln(x) \quad R^2 = 0.613$

2.2.2 样地生物量计算 采用环境状况相似区域且应用成熟的生物量相对生长方程对树木各组分生物量进行估算(表 2),对不同样地、不同树种生物量总量、存量、失量以及存量失量比进行统计.

2.2.3 人工林区域生物量估算 相关分析结果

显示,所选遥感影像数据与北长山岛人工林生物量具有密切关系,能够为整岛人工林区域生物量的反演提供支持.根据调查样地生物量计算结果,结合遥感影像数据进行人工林区域生物量的遥感反演.经分析发现,海岛人工林状态空间差异明显,活树和死树并存,使得其光学特征复杂,回归

模型难以充分反映人工林生物量与遥感数据的关系,人工神经网络由于具备自适应、自组织性和容错性对模拟这种较为复杂的关系更为适合^[19].本文通过 MATLAB R2012b,采用 2 层 BP(Back Propagation)神经网络模型,结合样地生物量结果和遥感数据反演北长山岛人工林区域的生物量.具体操作为:1)输入节点数为 6(6 个波段),输出节点数为 2(存量和失量);2)基于空间分布、群落类型在现有的 32 个样地中选择其中 5 个作为检验样本,其余 27 个作为训练样本,以检验模型精度;3)根据相关经验,经多次调试后隐藏层节点数取值为 10,输入层采用 tansig 函数,输出

层采用 purelin 函数,最大训练次数取 10000,目标均方误差为 10^{-5} ,样本训练采用 Levenberg-Marquardt 算法,逐次计算样本的均方误差,达到目标后终止训练,训练结果显示模型 R^2 达到 0.9991;4)输入检验样本的 6 个波段值,将模拟数据和实际数据进行对比(表 3),模拟存量的相对误差平均值为 7.65%,模拟失量的相对误差平均值为 16.35%,可基本满足要求;5)输入整岛人工林区域的 6 个波段值,模拟人工林区域的生物量存量和失量;6)根据人工林区域实际情况,对模拟异常值进行修正,得到北长山岛人工林区域生物量结果.

表 2 生物量相对生长方程^[15-18]
Table 2 Biomass Allometric growth equation

树种	器官	方程	拟合优度 R^2
黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	树干	$W=0.0702D^{1.5703}H^{1.1795}$	0.963
	树枝	$W=1.0395+0.014D^2H$	0.959
	树叶	$W=0.4234+0.01224D^2H$	0.957
	树根	$W=0.0152(D^2H)^{1.0199}$	0.968
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	树干	$W=\text{Exp}[-2.895531+0.86764\ln(D^2H)]$	0.989
	树枝	$W=\text{Exp}[-3.71916+0.79079\ln(D^2H)]$	0.932
	树叶	$W=\text{Exp}[-2.90872+0.45739\ln(D^2H)]$	0.795
	树根	$W=\text{Exp}[-2.16746+0.63276\ln(D^2H)]$	0.956
麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	树干	$W=0.06959(D^2H)^{0.86061}$	0.991
	树枝	$W=0.06716(D^2H)^{0.66863}$	0.782
	树叶	$W=0.04471(D^2H)^{0.59099}$	0.793
	树根	$W=0.01977(D^2H)^{0.88233}$	0.997
其他	树干	$W=0.021(D^2H)^{1.015}$	0.933
	树枝	$W=0.01(D^2H)^{0.921}$	0.702
	树叶	$W=2.588+0.001254(D^2H)$	0.515
	树根	$W=0.009(D^2H)^{0.992}$	0.921
	树干	$W=0.031(D^2H)^{0.977}$	0.994
	树枝	$W=0.006(D^2H)^{0.977}$	0.900
	树叶	$W=0.01(D^2H)^{0.807}$	0.825
	树根	$W=0.022(D^2H)^{0.831}$	0.907

注:W, 生物量, kg; D, 胸径, cm; H, 树高, m.

表 3 生物量模拟相对误差
Table 3 Relative errors of biomass simulation

样地号	实际存量 (t)	模拟存量 (t)	相对误差(%)	实际失量 (t)	模拟失量 (t)	相对误差(%)
6	5.37	4.95	-7.93	2.61	3.07	17.28
11	6.02	6.70	11.22	2.07	1.89	-8.91
17	3.49	3.18	-8.81	2.80	2.25	-19.67
21	2.54	2.69	5.84	0.31	0.39	27.48
31	2.10	2.01	-4.43	0.92	0.84	-8.39

2.3 影响因子分析

2.3.1 生物因子 选择样地尺度的树种、林分密度、胸径和区域尺度的 NDVI 进行分析.通过单因素方差分析法(One-way ANOVA)探讨不同树种和群落类型生物量的差异和特征;采用相关分析法探讨林分密度与生物量的相关关系,进而将林分密度划分为 30~50、50~70、70~90、90~110 和 110 以上(株/样地)共 5 个区间,通过单因素方差分析探明不同林分密度区间生物量的差异;分析不同树种生物量在不同胸径区间内的变化特征,天然树种数量仅占全部树木的 3%,不具有统计意义,仅对黑松和刺槐的胸径-生物量关系进行分析,将胸径划分为 3~5、5~10、10~15、15~20 和 20 以上(cm)共 5 个区间进行分析;采用相关分析法对人工林区域生物量与 NDVI 的关系进行分析.

2.3.2 生境因子 地形和土壤是人工林生物量的主要生境因子.地形因子中对海拔、坡度、坡向进行区域尺度分析,对坡位进行样地尺度分析.采用相关分析法分析海拔、坡度和坡向与生物量的相关性,采用单因素方差分析法探讨不同坡位生物量的差异.原始坡向值按 0~360 顺时针增大,0 为正北,180 为正南,以向阳性为原则,按照下式进行标准化:

$$AS_x = \frac{1 + \cos(\frac{A_x - 180}{180} \times \pi)}{2} \tag{1}$$

式中:AS_x 为 x 点标准化后的坡向值;A_x 为 x 点原始坡向值.

土壤因子包括含水率、pH 值、含盐量、全氮、全磷、全钾和总碳 7 项因子,根据 32 个样地的土壤因子结果,借助 ArcGIS 空间分析模块中的反距离权重(IDW)内插法进行空间差值,得到人工林区域的土壤因子结果,进而从区域尺度分析土壤因子与生物量的相关性.

3 结果

3.1 生物量估算结果

3.1.1 样地生物量 各样地生物量计算结果见表 4 和图 2.各样地中,生物量总量最大值为 9.66t(样地 15),最小值为 2.06t(样地 5),平均值为 5.62t;生物量存量最大值为 8.96t(样地 15),最小值为 1.59t(样地 8),平均值为 3.71t;生物量失量最大值为 4.73t(样地 24),最小值为 0.07t(样地 5),平均值为 1.91t.样地 5 拥有最大的存量失量比 26.79(96.4:3.6),而样地 28、22、29、24、8 存量失量比小于 1,且按上述顺序由大到小排列,所有样地总体存量失量比为 1.95.

表 4 样地生物量结果
Table 4 Biomass results of sampling plots

样地号	总量(t)	存量(t)	失量(t)	存量失量比	样地号	总量(t)	存量(t)	失量(t)	存量失量比
1	6.14	4.22	1.92	2.19	17	6.29	3.49	2.80	1.25
2	6.20	3.97	2.23	1.78	18	5.52	4.03	1.48	2.72
3	5.94	3.81	2.12	1.80	19	3.33	2.88	0.45	6.45
4	4.14	3.74	0.40	9.33	20	3.69	1.97	1.72	1.14
5	2.06	1.98	0.07	26.79	21	2.85	2.54	0.31	8.22
6	7.99	5.37	2.61	2.06	22	7.66	3.08	4.58	0.67
7	2.92	2.76	0.16	16.96	23	6.41	4.24	2.17	1.95
8	5.55	1.59	3.96	0.40	24	7.54	2.81	4.73	0.59
9	3.99	3.35	0.64	5.28	25	6.17	3.27	2.90	1.13
10	6.62	5.12	1.49	3.43	26	3.95	3.62	0.33	10.85
11	8.09	6.02	2.07	2.91	27	4.93	2.75	2.18	1.26
12	6.91	4.95	1.96	2.53	28	5.95	2.76	3.19	0.87
13	3.71	3.46	0.25	13.73	29	7.40	2.90	4.50	0.64
14	6.73	5.24	1.49	3.51	30	7.09	3.60	3.49	1.03
15	9.66	8.96	0.70	12.73	31	3.02	2.10	0.92	2.29
16	4.36	2.85	1.51	1.89	32	6.91	5.24	1.67	3.14

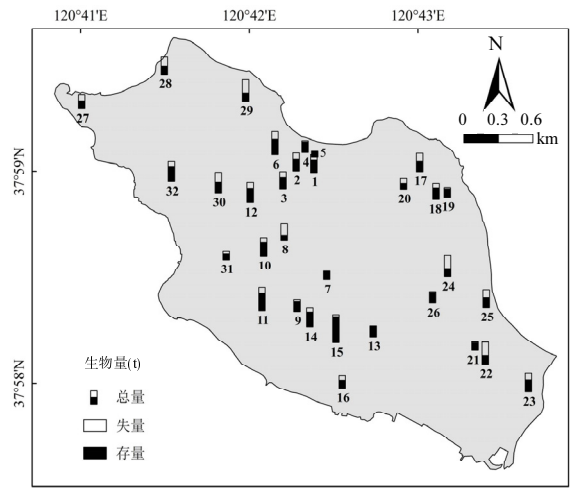


图 2 样地生物量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of biomass of sampling plots

3.1.2 区域生物量 北长山岛人工林区域生物量结果见表 5 和图 3.生物量总量总计为 5.88 万 t,其中黑松林占 82.8%,刺槐林占 17.2%;生物量存

量总计为 3.79 万 t,其中黑松林占 78.4%,刺槐林占 21.6%;生物量失量总计为 2.09 万 t,其中黑松林占 90.9%,刺槐林占 9.1%;黑松林的存量失量比为 1.56,低于刺槐林的 4.33,人工林区域总体存量失量比为 1.81.北长山岛人工林区域可划分为东部集中分布区、中西部集中分布区和西北部零散分布区.可以发现,不同区域的存量失量比表现出了明显差异:中西部集中分布区总体较高,而东部集中分布区和西北部零散分布区则明显偏低.

表 5 北长山岛人工林生物量

Table 5 Plantation biomass on Beichangshan Island

群落类型	总量		存量		失量		存量失量比
	总和 (万 t)	均值(t/ 400m ²)	总和 (万 t)	均值(t/ 400m ²)	总和 (万 t)	均值(t/ 400m ²)	
黑松林	4.87	6.39	2.97	3.89	1.90	2.50	1.56
刺槐林	1.01	4.11	0.82	3.34	0.19	0.77	4.33
总计	5.88	5.83	3.79	3.76	2.09	2.08	1.81

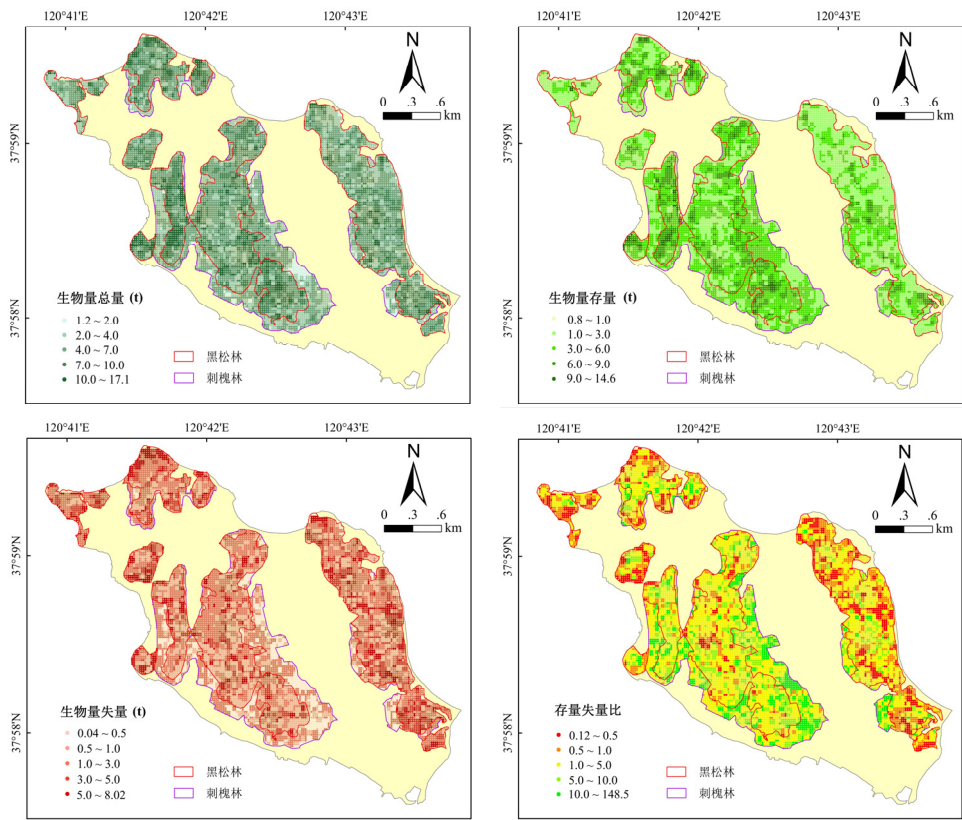


图 3 北长山岛人工林生物量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of plantation biomass on Beichangshan Island

3.2 影响因子分析

3.2.1 生物因子分析 (1)树种:单因素方差分析结果显示不同树种生物量表现出了显著的差异($P<0.001$),生物量均值黑松>刺槐>其他树种,标准差则是黑松>其他树种>刺槐;不同树种活树

和死树之间生物量也存在显著差异($P<0.001$),生物量均值黑松死树>黑松活树>刺槐活树>其他树种活树>刺槐死树>其他树种死树,标准差则是黑松死树>黑松活树>其他树种活树>刺槐活树>刺槐死树>其他树种死树(图 4).

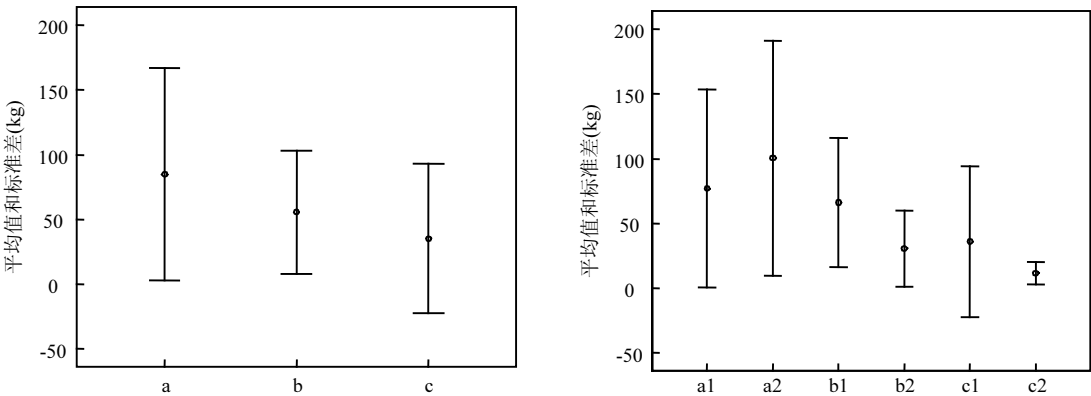
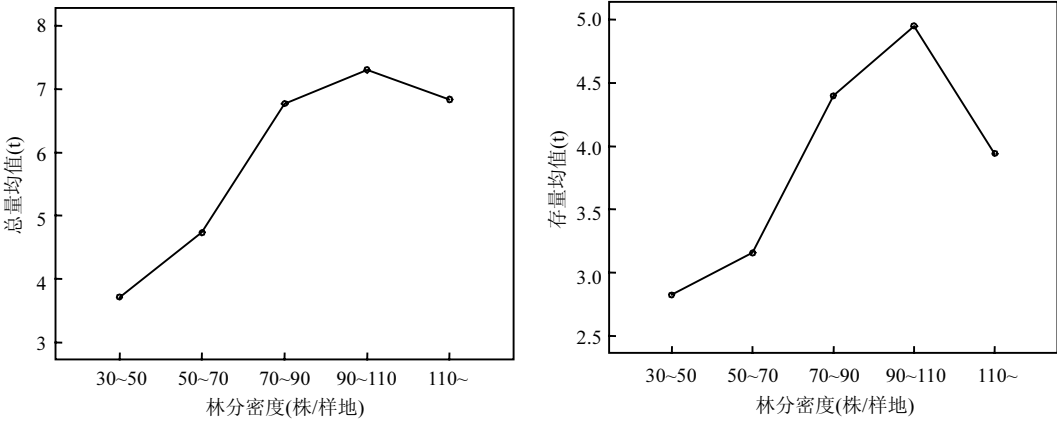


图 4 不同树种生物量对比
Fig.4 Contrast of biomasses among different tree species
a,黑松; b,刺槐; c,其他树种. 1,活树;2,死树

表 6 林分密度、NDVI 与生物量相关分析结果

Table 6 Results of correlation analysis between stand density and biomass, and between NDVI and biomass					
项目	相关分析	总量	存量	失量	存量失量比
林分密度	Pearson Correlation	0.662**	0.416*	0.459**	-0.413*
	Sig.(2-tailed)	0.000	0.018	0.008	0.019
NDVI	Pearson Correlation	0.095**	0.364**	-0.293**	0.237**
	Sig.(2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.000

注:**. $P<0.01$, *. $P<0.05$,下同.



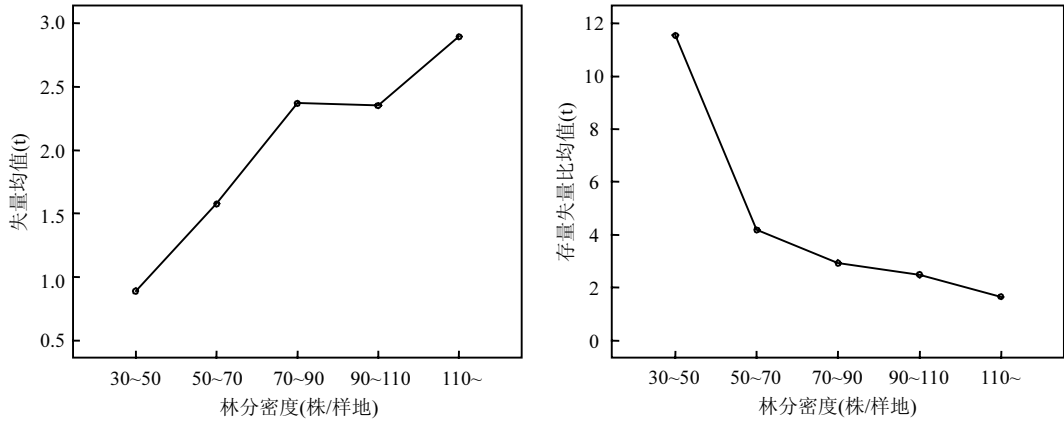


图 5 不同林分密度区间生物量对比

Fig.5 Contrast of biomasses among different stand density classes

(2)林分密度:相关分析结果表明,林分密度与生物量总量、存量和失量均显著正相关,与存量失量比呈显著负相关(表 6).单因素方差分析结果显示,生物量总量 ($P<0.001$)和存量/失量比 ($P=0.021$)在不同林分密度区间表现出显著的差异,存量($P=0.080$)和失量($P=0.098$)差异性则不明显.随着林分密度的增加,生物量总量和存量均呈现先上升后下降的趋势,在 90~110 林分密度区间达到最大值,在 110 以上林分密度区间有所下降,且存量的下降趋势更剧烈;生物量失量随林分密度的增大持续上升,且在 110 以上区间上升明显,存量/失量比则与之相反(图 5).

(3)胸径:黑松的生物量总量和存量在 10~15cm 胸径区间达到最大值,失量在 15~20cm 胸径区间内最大,随着胸径的增大,存量失量比逐渐减小;刺槐生物量总量和存量在 15~20cm 胸径区间达到最大值,失量在 10~15cm 胸径区间内最大,存量失量比随着胸径的增大逐渐增加,与黑松表现出相反的趋势(图 6).

(4)NDVI:与生物量各指标均显著相关,其中与总量、存量和存量失量比呈正相关,与失量则呈负相关(表 6).

3.2.2 生境因子分析 (1)地形:生物量指标与地形因子大都表现出显著的相关性(表 7).海拔和坡度与生物量总量、存量和失量呈正相关,与存量失量比呈负相关,坡向则与生物量总量和存量呈负相关,与存量失量比呈正相关.同时,海拔、坡

度和坡向之间存在一定的相关性.

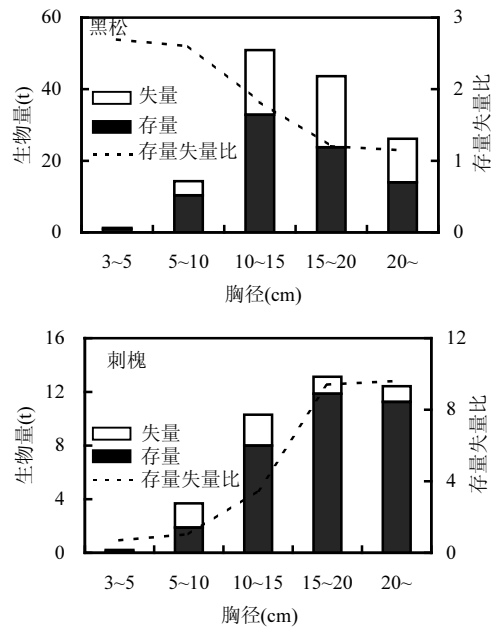


图 6 不同胸径区间生物量对比

Fig.6 Contrast of biomasses among different DBH classes

不同坡位样地生物量的单因素方差分析结果表明,山脊、坡肩、背坡、坡脚四种坡位相互之间生物量总量($P=0.244$)、存量($P=0.867$)、失量($P=0.126$)和存量失量比($P=0.329$)均不存在显著性差异.但对比坡脚与其他坡位类型生物量特征发现,生物量总量($P=0.044$)和失量($P=0.018$)存在显著差异,存量($P=0.708$)和失量存量比($P=$

0.064)差异不显著,坡脚处生物量的失量明显较小(图 7).

表 7 地形因子与生物量相关分析结果
Table 7 Results of correlation analysis between terrain factors and biomass

地形因子	项目	海拔	坡度	坡向	总量	存量	失量	存量失量比
海拔	Pearson Correlation	1	0.373**	-0.008	0.123**	0.136**	0.022*	-0.073**
	Sig.(2-tailed)		0.000	0.442	0.000	0.000	0.029	0.000
坡度	Pearson Correlation	0.373**	1	0.020*	0.092**	0.087**	0.033**	-0.045**
	Sig.(2-tailed)	0.000		0.040	0.000	0.000	0.001	0.000
坡向	Pearson Correlation	-0.008	0.020*	1	-0.141**	-0.162**	-0.017	0.043**
	Sig.(2-tailed)	0.442	0.040		0.000	0.000	0.084	0.000

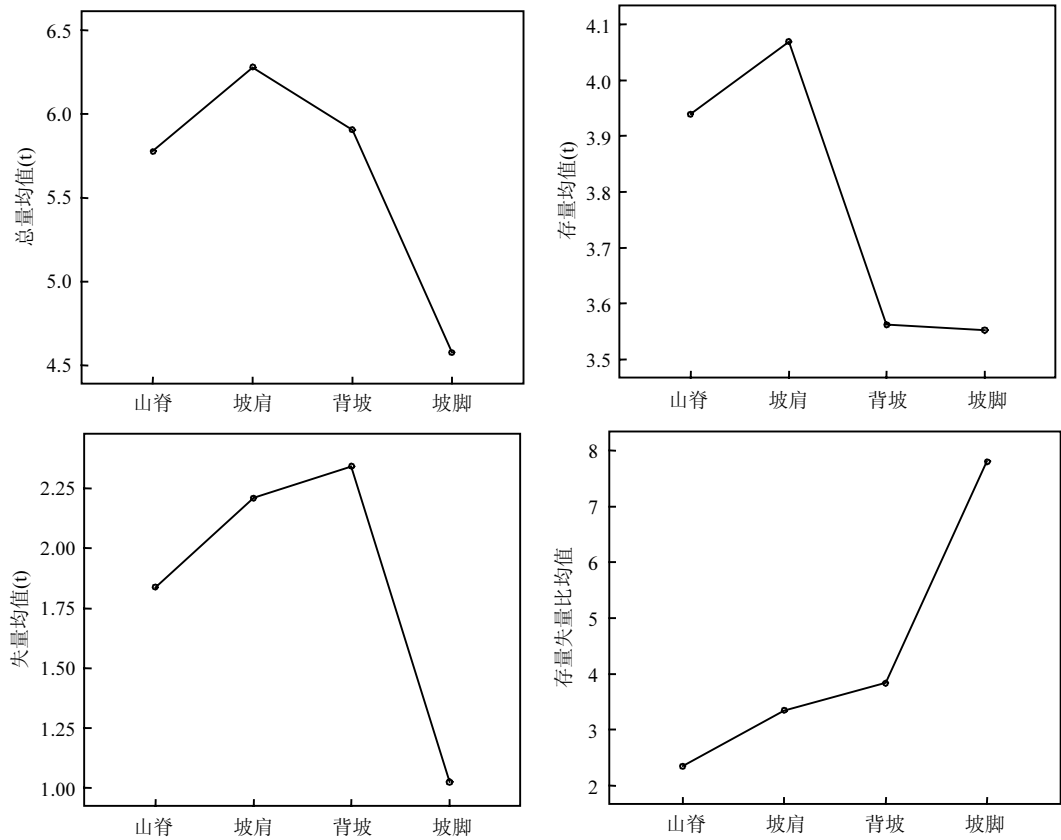


图 7 不同坡位生物量对比
Fig.7 Contrast of biomasses among different slope positions

(2)土壤:生物量与土壤各因子也多具有显著的相关性(表 8).含水率和全磷与生物量总量、存量、存量失量比呈显著正相关,与失量呈显著负相关,总氮也基本上表现出该特征,这 3 项因子与森林健康程度呈正相关;含盐量与生物量总量、失量和存量失量比呈显著负相关,全钾与生物量存量和存量失量比呈显著负相关,这 2 项因子与森林健康程度呈负相关;pH 值与生物量总量、存量和失量均呈显著负相关,与存量失量比相关性不显著,总碳与生物量失量呈正相关,与其他指标

未见显著关系,该 2 项因子与森林健康程度关系 不明显.

表 8 土壤因子与生物量相关分析结果
Table 8 Results of correlation analysis between soil factors and biomass

	项目	含水率	pH 值	含盐量	总氮	全磷	全钾	总碳
总量	Pearson Correlation	0.045**	-0.064**	-0.028**	0.004	0.049**	-0.014	0.019
	Sig.(2-tailed)	0.000	0.000	0.006	0.680	0.000	0.162	0.054
存量	Pearson Correlation	0.116**	-0.037**	0.005	0.033**	0.148**	-0.130**	-0.016
	Sig.(2-tailed)	0.000	0.000	0.638	0.001	0.000	0.000	0.098
失量	Pearson Correlation	-0.071**	-0.053**	-0.047**	-0.033**	-0.103**	0.135**	0.048**
	Sig.(2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
存量失量比	Pearson Correlation	0.055**	0.003	-0.035**	0.050**	0.061**	-0.127**	-0.016
	Sig.(2-tailed)	0.000	0.747	0.000	0.000	0.000	0.000	0.115

4 讨论

4.1 研究思路与方法探讨

(1)研究思路探讨: 在以往的森林生物量研究中,往往是大区域的生物量格局及其影响因子探讨^[20-21]或者是特定区域和群落的生物量估算^[22-23],鲜有基于森林健康视角的生物量研究.森林健康状况与生态功能和生物量的关系十分密切,树木在健康状况下拥有的各类生态功能,随着健康状况的恶化不断削弱;本研究区中,树木遭遇病虫害死亡后,经砍伐、清理、运输后通过焚烧等形式销毁,将生命周期内固定的碳重新释放入大气中,其生物量意义已经大打折扣.实际上,这部分的生物量是“丧失”或“丢失”的,将死树和活树一概而论地作为森林生物量是不合适的,但死树代表着森林曾经拥有的生物量,且部分死树可以作为鸟类、小型兽类的栖息地,其生物量是森林生物量总量中独特的组成部分,忽略掉这部分生物量显然也是不恰当的,因此,本文以北长山岛人工林生物量为研究对象,将生物量总量划分为存量和失量,探讨生物量各组分及其比例的变化特征和影响因子,以期阐明基于森林健康视角的人工林生物量.

(2)研究方法探讨:本文以现场调查为基础,结合遥感影像为研究提供数据支撑,采用的回归分析、方差分析、相关分析以及生物量相对生长方程均基于目前成熟的研究.由于条件限制,现场调查过程中并未进行标准木实测,采用了环境状

况相似区域、相同树木的相对生长方程对生物量进行计算.这些方程均基于大量的标准木实测,能够达到较高的拟合优度.本文黑松和刺槐的生物量相对生长方程分别采用许景伟等^[15]对烟台牟平沿海黑松林和毕君等^[16]对太行山坡地刺槐林的研究,与本研究区纬度较为一致,环境条件相似(沿海或山地),且在前期长岛地区人工林生物量研究中已经得到应用并取得了良好的效果^[10].麻栎等天然树种较少,调查的 2411 棵树中天然树种仅占 2.8%,本文对天然树种中数量相对较多的麻栎采用单独的、针对性强的方程进行计算,对于出现频率较小的树种则采用通用的、适应面广的方程进行计算.总体而言,所采用方程在本研究区具有适用性,可以保证生物量计算的科学性和准确性.此外,在条件允许时,开展黑松和刺槐的标准木实测进而建立北长山岛人工林的相对生长方程,能够进一步完善海岛人工林生物量的研究.

人工林区域生物量采用调查数据和 ETM+遥感影像,通过 BP 神经网络模型进行模拟.采用的遥感影像获取时间与现场调查时间一致,能够客观地反映海岛人工林区域实际状况,并与现场调查形成良好的契合.然而,由于遥感影像像元大小与调查样地面积大小不同,本文将 30m 的分辨率重采样为分辨率更高的 20m 以保证与调查样地面积一致,增加了误差出现的可能性.不过,通过 32 个点位生物量与所在像元 6 个波段 value 值的相关分析可以发现,生物量与各波段及其组合表现出了显著的相关性,这说明所选遥感影像

及其重采样后的数据用作人工林区域生物量反演是可行的.神经网络模型在生态学领域已有较多应用,对于光谱特征复杂的地物与遥感数据之间的关系建立具有独到的优势,且在已有研究中得到验证^[19,24].本文研究采用2层BP神经网络模型,经反复调试后,检验样本的平均模拟精度达到存量90%以上和失量80%以上,鉴于海岛人工林的特殊性,特别是死树光谱特征的复杂性,在现有的研究条件下,采用该模型估算北长山岛人工林区域生物量及其空间特征是可行的.在下一步的工作中,应通过现场采集人工林不同组分的实际光谱特征,结合高分辨率和高光谱遥感影像以得到更高精度的人工林生物量模拟结果.

4.2 生物量结果探讨

北长山岛人工林区域生物量总量均值为 $145.8\text{t}/\text{hm}^2$,高于全国平均水平 $74.7\text{t}/\text{hm}^2$ ^[21]和山东省的 $69.05\text{t}/\text{hm}^2$ (由碳储量推算)^[25],说明人工林建设有效改善了海岛的生态环境.需要注意的是,区域生物量失量均值达到 $51.9\text{t}/\text{hm}^2$,森林健康问题已经成为影响北长山岛人工林生物量的重要因素.黑松林生物量总量均值为 $159.6\text{t}/\text{hm}^2$,存量和失量均值分别为 $97.2\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $62.4\text{t}/\text{hm}^2$,总量高于山东沿海黑松人工林生物量 $95.1\text{t}/\text{hm}^2$,存量与之基本持平^[26];总量、存量和失量均高于安徽蚌埠市郊黑松人工林生物量 $64.6\text{t}/\text{hm}^2$ ^[27],总量高于福建平潭岛黑松防护林 $125.7\text{t}/\text{hm}^2$ ^[28],但存量和失量与之相比较低.刺槐林生物量总量均值为 $102.9\text{t}/\text{hm}^2$,存量和失量均值分别为 $83.6\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $19.3\text{t}/\text{hm}^2$,均低于甘肃退耕还林地刺槐人工林生物量 $129.7\text{t}/\text{hm}^2$ ^[29],也低于陕西渭北荒坡地刺槐人工林生物量 $134.4\text{t}/\text{hm}^2$ ^[30],但总量略高于河南中部刺槐人工林生物量 $81.35\text{t}/\text{hm}^2$ ^[31],远高于太行山刺槐人工林生物量 $23.4\text{t}/\text{hm}^2$ ^[32].这说明北长山岛黑松人工林的建设取得了明显的成效,但其健康状况对生物量带来明显制约;刺槐作为除黑松之外北长山岛最主要的树种,生物量与国内其他区域相比并不高,但对于维护海岛生态系统稳定性具有重要作用.

以往的研究大都以死亡率判断森林健康状况^[33-34],死亡率指的是死亡树木株数占树木总株

数的比例,对树木个体是无差别对待的,无法体现死树的状况以及在群落中的地位,特别是对于北长山岛这种常年持续开展人工林建设的区域,同一群落中不同树木的树龄有差别,个体差异明显,单以死亡率来判断北长山岛人工林健康状况是不全面的.因此,本文尝试提出了生物量总量、存量、失量和存量失量比的概念,不仅能够表示人工林的生物量构成,同时可以反映死亡树木的整体特征和个体差异,比死亡率包含更多的信息.本文调查结果显示树木总体死亡率达31.4%,黑松死亡率为33.5%,刺槐为29.8%,黑松林和刺槐林死亡率均较高,且相差不大.生物量评估结果显示,黑松林失量占比达到39.1%,存量失量比为1.56;刺槐林失量占比为18.8%,存量失量比为4.33;人工林区域生物量失量占比为35.6%,存量失量比为1.81.研究表明,成熟林死体生物量一般占总生物量的10%~20%^[35],可以发现,黑松林生物量失量明显偏高,刺槐林则处于相对正常的水平,总体上,北长山岛人工林生物量已经受到较大的损失.黑松死亡的主要原因为松材线虫病的干扰,其死树多为径级较大的树木,而干旱是刺槐死亡的主要原因,其死树多为小树,在森林生态系统中,大树能够发挥更重要的生态功能,是生态系统的主体,大树的死亡对整个森林生态系统的影响更为强烈.事实上,北长山岛及周边海岛的黑松林病虫害已经成为长岛县海岛生态环境面临的严重问题,常年开展的病虫害防治工作耗费了大量的精力,但目前仍无法完全控制松材线虫病的蔓延;刺槐林作为北长山岛人工林的重要组成,虽然其死亡率也较高,但死树多为小树,并未对生态系统功能带来严重威胁.因此,相比死亡率而言,生物量指标能够更全面地反映海岛人工林健康的实际状况.

4.3 影响因子探讨

人工林健康状况及生物量特征同时受到生物因子和生境因子的共同作用.树种、林分密度、胸径、NDVI等因子属于生物因子,是人工林健康状况和生物量的基础;气候、地形、土壤属于人工林生境因子,由于海岛生态系统属于小空间尺度的研究区,区域性的气候条件相对均一,而地形可以通过改变小气候条件或制约人类活动影响

人工林生长,土壤因子能够通过影响根系与土壤的生理生化作用进而作用于植被生长^[10],地形和土壤成为海岛人工林的主要生境因子。

(1)生物因子:不同树种生物量分析显示,黑松生物量总量、存量和失量均处于相对较高的水平,表明黑松原本是海岛人工林建设的理想物种,但其健康状况面临较大威胁;刺槐生物量总量均值与黑松相比较低,但其失量更低,说明刺槐林健康状况相对较好,已经成为海岛人工林建设不可或缺的重要组成部分;天然原生树种生物量均值处于较低的水平,但其健康状况良好,对于维持海岛生物多样性具有重要意义。

林分密度是影响人工林生物量的重要因子^[36],研究结果显示人工林生物量总量和存量随着林分密度的上升呈先增加后减少的趋势,这与王晓丽等^[13]的研究结果相一致。同时,生物量失量随着林分密度的上升持续增大,存量失量比例显著减小。林分密度的增大直接表示了群落树木数量的增加,使得种间竞争越发激烈,部分个体生长受到限制^[37]。本研究中各样地平均胸径与林分密度表现出显著的负相关关系($\text{Sig.} = 0.749$, $P < 0.01$),在低于 110 株/样地的林分密度区间,人工林群落种间竞争相对不明显,生态条件相对适宜,群落生物量总量、存量和失量随着密度的增加而提高;在大于 110 株/样地的林分密度区间,由于种间竞争的激烈,环境条件趋于恶劣,单株树木生物量下降明显,造成生物量总量和存量的减小,同时失量进一步增加,存量失量比持续降低。

人工林生物量在不同径级区间内具有较大差异。黑松和刺槐分别在 10~15cm 和 15~20cm 达到生物量最大值,说明 10~20cm 是北长山岛人工林生物量最大的胸径区间。此外,随着胸径的增大,黑松的存量失量比逐渐减小,刺槐则相反。黑松失量集中在较大径级内,这是由于大树相比小树更容易受到病虫害的影响^[38],且大树的生殖成熟和水分赤字引起较高的木质部空穴化和栓塞化^[38-39],加剧了大树的死亡;对刺槐而言,越小径级区间内存量失量比越低,干旱是北长山岛显著的自然特点,而干旱引起的死亡主要集中在小树^[39],这可能是刺槐生物量径级分布的原因。

NDVI 是植被生长状况的重要表征因子,研究结果显示了 NDVI 与生物量总量、存量和存量失量比呈显著正相关,与失量呈显著负相关,表示了 NDVI 较高的位置其生物量较高,且人工林健康状况较好。由于 NDVI 具有较为便捷的获取通道,因此 NDVI 可作为表征人工林生物量以及健康状况时空特征的重要指标。

(2)生境因子:在大区域或大地形梯度的研究中,地形通过改变气候条件进而影响植物生物量^[40],而北长山岛面积较小,最高点海拔不足 200m,地形分异梯度不明显,造成的气候条件差异也不显著。但是,北长山岛人工林建设的树种选择受到地形的制约,通常在海拔较低、坡度较小的坡脚位置种植刺槐林,而在海拔较高、坡度较大的其他位置更多地种植黑松,随着海拔、坡度和坡位的上升,群落类型按照刺槐林-黑松林的顺序逐渐转变。由上文分析可知,黑松林生物量总量、存量和失量均较高,同时存量失量比较低,刺槐林则与此相反,从而造成了不同海拔、坡度和坡位人工林的生物量出现显著差异。一般而言,坡向越接近正南能够获得更多的太阳辐射,从而拥有较高的生物量^[41],但南向也更容易受到干旱的胁迫,对植物生长带来限制^[42],这可能是坡向与生物量总量和存量呈负相关的原因。

土壤因子直接影响着植物群落的组成与生理活力,对植物的生长起着关键性的作用^[43]。北长山岛汇水区面积小,淡水缺乏,土壤含水率总体偏低^[44],干旱是制约人工林健康状况的重要因素,因此土壤含水率与人工林健康程度呈显著正相关;北长山岛土壤本身较为贫瘠,肥力较差^[9],全磷和总氮为植物生长提供必须的营养元素,同样与人工林健康程度呈显著正相关。土壤盐渍化是海岛生态系统面临的常见渐变性灾害^[44],土壤盐分过高会对植物健康生长构成制约,使得含盐量成为森林健康的负面因子。一般认为,大多数土壤养分在酸性环境下具有更强的有效性^[45],北长山岛 pH 值总体均处于偏低水平;同时,总碳往往与凋落物的多寡具有密切关系^[46],而北长山岛人工林死树的处理方式并未对群落凋落物带来明显影响,这可能是 pH 值和总碳对人工林健康状况影

响不显著的原因.此外,土壤钾通常被认为是植物生长的重要营养元素,在本研究区的实际条件下,应当对人工林健康具有正面作用,但分析结果显示,全钾与存量失量比呈显著负相关,其原因目前尚不清楚,应当通过进一步的调查和分析来进行论证.

5 结论

5.1 北长山岛人工林生物量总量共 5.88 万 t,均值为 $145.8\text{t}/\text{hm}^2$,高于全国和山东省的平均水平,人工林建设有效改善了海岛生态环境;生物量存量共 3.79 万 t,失量共 2.09 万 t,其平均值分别为 $93.9\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $51.9\text{t}/\text{hm}^2$,森林健康问题已经成为影响北长山岛人工林生物量的重要因素.

5.2 黑松林生物量总量占比 82.8%,均值为 $159.6\text{t}/\text{hm}^2$,存量和失量均值分别为 $97.2\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $62.4\text{t}/\text{hm}^2$,黑松构成了北长山岛人工林生物量的主体,但其健康状况面临较大威胁;刺槐林生物量总量占比仅 17.2%,均值为 $102.9\text{t}/\text{hm}^2$,存量和失量均值分别为 $83.6\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $19.3\text{t}/\text{hm}^2$,其生物量与国内其他区域相比并不高,但对于维护海岛生态系统稳定性具有重要作用.

5.3 随着林分密度的增加,生物量总量和存量呈现先上升后下降的趋势,生物量失量持续上升,存量失量比则不断下降;不同径级区间的生物量具有较大差异,10~20cm 是人工林生物量最大的胸径区间,随着胸径的增大,黑松的存量失量比逐渐减小,刺槐则相反;NDVI 与生物量总量、存量和存量失量比呈显著正相关,与失量呈显著负相关.

5.4 海拔和坡度与生物量总量、存量和失量呈显著正相关,与存量失量比呈显著负相关,坡向则与生物量总量和存量呈显著负相关,与存量失量比呈显著正相关;不同坡位的生物量不存在显著差异,但坡脚位置的生物量失量相对较小.土壤含水率和全磷与生物量总量、存量、存量失量比呈显著正相关,与失量呈显著负相关,总氮也基本上表现出该特征;含盐量与生物量总量、失量和存量失量比呈显著负相关,全钾与生物量存量和存量失量比呈显著负相关;pH 值与生物量总量、存量和失量均呈显著负相关,与存量失量比相关性

不显著,总碳与生物量失量呈正相关,与其他指标未见显著关系.

参考文献:

- [1] Cronan C S. Belowground biomass, production, and carbon cycling in mature Norway spruce, Maine, U.S.A [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003,33(2):339-350.
- [2] Muukkonen P. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe [J]. European Journal of Forest Research, 2007,126(2):157-166.
- [3] Woodbury P B, Smith J E, Heath L S. Carbon sequestration in the U.S. forest sector from 1990 to 2010 [J]. Forest Ecology & Management, 2007,241(1-3):14-27.
- [4] Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, et al. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry [J]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2003,35(5):103-105.
- [5] 薛达元,包浩生,李文华.长白山自然保护区森林生态系统间接经济价值评估 [J]. 中国环境科学, 1999,19(3):247-252.
- [6] 肖风劲,欧阳华,程淑兰,等.中国森林健康生态风险评价 [J]. 应用生态学报, 2004,15(2):349-353.
- [7] Tkacz B, Moody B, Castillo J, et al. Forest health conditions in North America [J]. Environmental Pollution, 2008,155(3):409-425.
- [8] 徐耀粘,江明喜.森林碳库特征及驱动因子分析研究进展 [J]. 生态学报, 2015,35(3):926-933.
- [9] 池源,石洪华,王晓丽,等.庙岛群岛南五岛生态系统净初级生产力空间分布及其影响因子 [J]. 生态学报, 2015,35(24):8094-8106.
- [10] 石洪华,王晓丽,王媛,等.北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子 [J]. 生态学报, 2013,33(19):6363-6372.
- [11] Ryan M G, Harmon M E, Birdsey R A, et al. A synthesis of the science on forests and carbon for U.S. forests [J]. Ecological Society of America: Issues in Ecology, 2010,13:1-16.
- [12] 杨方方,李跃林.鼎湖山粗死木质残体生物量特征 [J]. 应用与环境生物学报, 2011,(5):750-752.
- [13] 王晓丽,王媛,石洪华,等.海岛陆地生态系统固碳估算方法 [J]. 生态学报, 2014,34(1):88-96.
- [14] 方精云,王襄平,沈泽昊,等.植物群落清查的主要内容、方法和技术规范 [J]. 生物多样性, 2009,17(6):533-548.
- [15] 许景伟,王卫东,王月海,等.沿海沙质岸黑松人工林生物量的估测数学模型 [J]. 山东林业科技, 2004(5):47-49.
- [16] 毕君,黄则舟,王振亮.刺槐单株生物量动态研究 [J]. 河北林学院学报, 1993,8(4):278-282.
- [17] 安和平,金小麒,杨成华.板桥河小流域治理前期主要植被类型生物量生长规律及森林生物量变化研究 [J]. 贵州林业科技, 1991,19(4):20-34.
- [18] 刘蔚秋,余世孝,王永繁,等.黑石顶自然保护区森林生物量测定

- 的比较分析 [J]. 中山大学学报:自然科学版, 2002,41(2):80-84.
- [19] 吕 恒,江 南,罗澈葱.基于TM数据的太湖叶绿素A 浓度定量反演 [J]. 地理科学, 2006,26(4):472-476.
- [20] 罗天祥.中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型 [D]. 中国科学院研究生院(国家计划委员会自然资源综合考察委员会)博士学位论文, 1996.
- [21] 肖兴威.中国森林生物量与生产力的研究 [D]. 东北林业大学博士学位论文, 2005.
- [22] 牛攀新,宋于洋,周朝彬.准噶尔盆地梭梭群落生物量和碳储量 [J]. 生态学报, 2014,34(14):3962-3968.
- [23] 宁 晨,闫文德,宁晓波,等.贵阳市区灌木林生态系统生物量及碳储量 [J]. 生态学报, 2015,35(8):2555-2563.
- [24] Zheng W, Shi H H, Song X K, et al. Simulation of phytoplankton biomass in Quanzhou Bay using a back propagation network model and sensitivity analysis for environmental variables [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012,30(5):843-851.
- [25] 李海奎,雷渊才,曾伟生.基于森林清查资料的中国森林植被碳储量 [J]. 林业科学, 2011,47(7):7-12.
- [26] 许景伟,李传荣,王卫东,等.沿海沙质岸黑松防护林的生物量及生产力 [J]. 东北林业大学学报, 2005,33(6):29-32.
- [27] 张旭东,吴泽民,彭镇华.黑松人工林生物量结构的数学模型 [J]. 生物数学学报, 1994(S1):60-65.
- [28] 刘 骄,黄义雄,叶功富,等.福建沿海主要防护林树种的生物量、凋落物及其对林下土壤养分的影响 [J]. 水土保持研究, 2011,18(1):146-152.
- [29] 申家朋,张文辉.黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律 [J]. 生态学报, 2014,34(10):2746-2754.
- [30] 程积民,程 杰,高 阳.渭北黄土区不同立地条件下刺槐人工林群落生物量结构特征 [J]. 北京林业大学学报, 2014,36(2):15-21.
- [31] 李增录,张远立,张 楷,等.豫东刺槐人工林干物质生产及分配的研究 [J]. 河南农业大学学报, 1985,19(4):382-392.
- [32] 黄则舟,毕 君.太行山刺槐林分生物量研究 [J]. 河北林业科技, 1992(2):48-52.
- [33] van Nieuwstadt M G L, Sheil D. Drought, fire and tree survival in a Borneo rain forest, East Kalimantan, Indonesia [J]. Journal of Ecology, 2005,93:191-201.
- [34] 刘万德,臧润国,丁 易,等.海南岛霸王岭热带季雨林树木的死亡率 [J]. 植物生态学报, 2010,34(8):946-956.
- [35] Chaturvedi R K, Raghubansi A S, Singh J S. Carbon density and accumulation in woody species of tropical dry forest in India [J]. Forest Ecology and Management, 2011,262(8):1576-1588.
- [36] 刘 恩,刘世荣.南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征 [J]. 生态学报, 2012,32(16):5103-5109.
- [37] Donato D C, Kauffman J B, Mackenzie R A. Whole-island carbon stocks in the tropical Pacific: Implications for mangrove conservation and upland restoration [J]. Journal of Environmental Management, 2012,97:89-96.
- [38] Mueller R C, Scudder C M, Porter M E, et al. Differential tree mortality in response to severe drought: evidence for long-term vegetation shifts [J]. Journal of Ecology, 2005,93:1085-1093.
- [39] van Mantgem P J, Stephenson N L. Apparent climatically induced increase of tree mortality rates in a temperate forest [J]. Ecology Letters, 2007,10:909-916.
- [40] 杨凤萍,胡兆永,张硕新.不同海拔油松和华山松林乔木层生物量与蓄积量的动态变化 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2014,42(3):68-76.
- [41] 梁 倍,邸 利,赵传燕,等.祁连山天老池流域灌丛地上生物量空间分布 [J]. 应用生态学报, 2014,25(2):367-373.
- [42] 刘旻霞,王 刚.高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应 [J]. 生态学杂志, 2013,32(2):259-265.
- [43] Robertson G P, Vitousek P M. Nitrification potentials in primary and secondary succession [J]. Ecology, 1981,62:376-386.
- [44] 池 源,石洪华,郭 振,等.海岛生态脆弱性的内涵、特征及成因探析 [J]. 海洋学报, 2015,37(12):93-105.
- [45] Khattak R A, Hussain Z. Evaluation of soil fertility status and nutrition of orchards [J]. Soil & Environment, 2007,26(1):22-32.
- [46] Chi Y, Shi H H, Wang X L, et al. Impact factors identification of spatial heterogeneity of herbaceous plant diversity on five southern islands of Miaodao Archipelago in North China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016,34(5):937-951.

作者简介: 池 源(1988-),男,河南南阳人,助理研究员,硕士,主要从事海岛生态系统分析与评估等方面研究.发表论文 10 余篇。