

成年个体密度、距海远近及下层植被对烟台 黑松海防林天然更新的影响

张志东, 韩广轩, 毛培利, 王光美, 薛钦昭

(中国科学院 烟台海岸带可持续发展研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 为阐明黑松 (*Pinus thunbergii*) 海防林天然更新的影响机制, 在对烟台典型样地样方调查的基础上, 采用统计分析方法, 分析成年个体密度、距海岸距离、草本和灌木盖度对其天然更新的影响。结果表明, 黑松海防林径级分布呈逆 J 字型分布, 判定系数 R^2 达到了 0.99, 表明所调查的黑松种群是一个能够自我维持、稳定发展的异龄种群; 幼苗和幼树随着成年个体密度和距海岸距离的增加, 个体数呈先上升后下降趋势, 而随着草本和灌木盖度的增加, 表现出下降倾向; 小树个体数与灌木盖度呈正相关, 与成年个体密度、距海岸距离和草本盖度关系不明显。处于不同生活史阶段的幼龄植株在成年个体密度、距海岸距离及下层植被的影响下表现出了不同的适应策略和机制, 理解这些更新规律, 是黑松海防林可持续管理的前提。

关键词: 种群生态; 天然更新; 大小结构; 黑松; 海岸防护林

中图分类号: S718.55⁺1.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3037(2009)05-0782-09

沿海防护林是海岸带生态系统中最基本的生物资源, 是沿海地区整个生态系统的核心, 具有最大的生物量, 为各种动物、植物、微生物提供良好的生存环境, 形成一个和谐的、统一的、相对稳定的生态系统^[1]。这一系统在土壤改良^[2]、保持水土^[3]、农业增收^[4,5]、保护物种和维护沿海生态安全^[5]等方面都发挥了巨大的效益。但由于沿海防护林多处于海岸风口地段, 海风、海雾及恶劣的生境条件严重影响了海防林的天然更新。如何维持海岸林的防护效益的可持续性, 已成为目前海岸防护林经营管理的一个难点^[6]。

天然更新是森林生态系统自我繁衍恢复的手段。在更新过程中, 从种子生产、扩散、萌发、幼苗定居、生长的每一个环节都会受到各种生物和非生物因素的影响。因此如何更好地揭示森林天然更新规律, 进而对森林生态系统可持续经营和保护提供理论指导, 一直是森林生态学领域研究的焦点问题之一^[7]。密度制约是影响天然更新的重要因素。成年个体密度高的林分往往限制幼苗的定居和生长^[8], 而郁闭度保持在 0.5~0.6 的林分更有利于幼苗的成活^[9]; 林下灌草植被能降低地表光照, 改变凋落物的分布, 进而对幼苗的定居产生影响^[7]; 此外不同的光照条件^[10]、土壤异质性^[11]、水分^[12]等环境因子以及间伐^[6]等采伐方式均会对天然更新的效果产生影响。诚然国内外学者对有关天然更新规律进行了大量的研究, 形成了不少更新机制和理论, 但由于森林的天然更新所涉及的因素非常复杂, 再加上不同的学者研究的树种、林分和区域不同, 在很多方面仍然存在着争议^[13]。因此, 在特定地区、特定森林类型, 尤其在研究

收稿日期: 2008-10-18; 修订日期: 2008-12-09。

基金项目: 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所前沿领域资助项目 (A3JO708BX); 烟台市科学技术发展计划项目 (2008155)。

第一作者简介: 张志东 (1978-), 男, 河北唐山人, 博士, 主要研究方向为海岸带资源保护与森林生态。E-mail: zdzhang@yic.ac.cn

致谢: 野外工作得到中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所刘玉虹、李秋艳、刘苏静等同志的协助, 谨致谢忱。

相对匮乏的沿海防护林区揭示天然更新影响机制仍然具有重大的现实和理论意义。

烟台市现有沿海防护林约 $16\ 700\ \text{hm}^2$,是中国北方地区保护最完善、功能最完备的沿海防护林带之一。其对于保障该区域的社会、经济良性发展发挥着巨大的作用。黑松 (*Pinus thunbergii*)具有喜海洋气候,适应性强,抗海风、耐瘠薄,在中性或微碱性砂壤、海岸能良好生长等特点,是烟台海防林的重要造林树种之一。虽然黑松具有适应海岸生长的特点,但目前黑松海防林仍存在着结构单一、林龄老化、天然更新困难等问题^[14],严重影响其生态和防护效能的正常发挥。基于此点考虑,本文以山东烟台地区黑松海岸防护林为研究对象,分析其种群结构,并首次探讨成年个体密度、距海岸距离、下层草本和灌木盖度对其天然更新的影响,旨在阐明黑松防护林的天然更新影响机制,为黑松沿海防护林的自我维持和可持续经营提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所临海台站 ($121^{\circ}41'57''\text{E}$, $37^{\circ}27'15''\text{N}$),属暖温带季风气候区,四季分明,热量充足,雨量充沛。年平均温度 11.5°C ,年平均降水量 $680\sim 930\ \text{mm}$,无霜期平均为 $180\ \text{d}$,年平均绝对湿度为 71% ,年平均日照时数为 $2\ 400\sim 2\ 500\ \text{h}$,日照率为 60% 。研究区海拔高度 $1\sim 2\ \text{m}$,地势平坦,坡度小于 5° ;土壤为滨海砂地土壤,基质以中、粗砂为主,有机质含量很低,含有少量的盐分^[15]。黑松林栽植于 20 世纪 50 年代,林下植被比较简单,灌木主要由紫穗槐 (*Amorpha fruticosa*)、单叶蔓荆 (*Vitex trifolia* Linn. var. *simplicifolia*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、野蔷薇 (*Rosa multiflora*)等组成;草本层物种主要为羊胡子草 (*Carex rigescens*)、虫实 (*Corispermum*)、刺沙蓬 (*Salsola ruthenica* Iljin var. *ruthenica*)、白茅 (*Imperata cylindrica* var. *major*)、马齿苋 (*Portulaca oleracea*)等。

1.2 常规种群结构调查

在垂直于海岸线方向上,每隔 $200\ \text{m}$ 设置 1 条样线,共 3 条样线。沿每条样线每隔 $50\ \text{m}$,设置 $10\ \text{m}\times 10\ \text{m}$ 的样方 1 个。每条样线设置 14 个样方,共 42 个样方。在每个样方中对乔木进行每木检尺,记录其高度、胸径等数量特征,其中低于 $150\ \text{cm}$ 的幼龄植株记录其数量,并采用查数轮生枝法确定其年龄。同时记录灌木的高度、丛径、盖度等。在每个 $10\ \text{m}\times 10\ \text{m}$ 乔木样方内选择 4 个顶点及对角线中心点调查 5 个 $1\ \text{m}\times 1\ \text{m}$ 的草本样方,调查草本层的冠径、丛径、盖度等。

1.3 大小结构

年龄结构是种群的重要特征,由于实际测得成年个体的年龄比较困难,许多学者以大小级结构代替年龄结构对乔木种群结构进行研究^[16,17],有时候大小可能是比年龄更好的繁殖产量的预测者^[18]。黑松种群的大小级结构可按照两种方式划分,高度 h 在 $1.5\ \text{m}$ 以下的幼树与幼苗按高度分为两级:将 $h < 0.33\ \text{m}$ 的黑松定为 I 级,将 $0.33\ \text{m} < h < 1.5\ \text{m}$ 的黑松定为 II 级; $h > 1.5\ \text{m}$ 的黑松则按胸径 (DBH) 大小分级,以 $1.06\ \text{cm}$ 为起点,DBH 每增加 $2\ \text{cm}$ 为一个大小级。依以上标准,对调查数据进行处理,总共划分了 13 个径级。以大小级为横轴,以各大小级的株数为纵轴作出黑松种群的大小级分布图。进一步用负幂函数: $y = ax^{-b}$ 拟合黑松种群的大小级分布,与观测值之间的拟合优度用判定系数 R^2 来表示。

1.4 天然更新规律分析

假设黑松成年个体密度、距海岸距离、草本层盖度和灌木层盖度对黑松种群天然更新具有重要的影响,为了揭示假设的正确与否,将黑松幼龄个体根据年龄划分为幼苗 ($1\sim 3$ 年生)、

幼树(4~9年生)和小树(10~12年生);将样方成年个体黑松种群密度分为7个等级,分别为:P1(900~1900株·hm⁻²),P2(1900~2500株·hm⁻²),P3(2500~3000株·hm⁻²),P4(3000~3500株·hm⁻²),P5(3500~4000株·hm⁻²),P6(4000~5000株·hm⁻²)和P7(>5000株·hm⁻²);在距海岸0~650m距离内,以100m为步长,共划分为7个距离类,分别为D1(0~100m),D2(100~200m),D3(200~300m),D4(300~400m),D5(400~500m),D6(500~600m)和D7(600~650m);将样方草本层盖度分为7个等级,分别为G1(<0.1),G2(0.1~0.2),G3(0.2~0.3),G4(0.3~0.4),G5(0.4~0.5),G6(0.5~0.7)和G7(>0.7);将样方灌木层盖度分为5个等级,分别为S1(<0.1),S2(0.1~0.2),S3(0.2~0.5),S4(0.5~0.7)和S5(>0.7)。分别探讨在各因子不同梯度内幼苗、幼树和小树个体数(以每hm²的个体数表示)的分布格局。

1.5 统计分析

在黑松成年个体密度、距海岸距离、草本层盖度和灌木层盖度梯度之间的幼苗、幼树和小树个体数之间的差异采用非参数Kruskal-Wallis H检验;幼龄植株(幼苗、幼树和小树)个体数在黑松成年个体密度、距海岸距离、草本层盖度和灌木层盖度梯度之间的多重比较采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)。在检验之前,数据进行了秩变换处理,当方差齐时,采用最小显著差异法($P < 0.05$),当方差不齐时,采用Games-Howell法($P < 0.05$)。统计分析在SPSS16.0软件中进行。

2 结果

2.1 大小结构

在黑松林中小径级的个体占了相当大的比例,I和II径级的黑松分别占了总株数的35.05%和11.77%,DBH小于6.15cm的黑松占到了种群的67.25%;老龄级株数缺乏,从IX径级到XIII径级株数仅占总株数的5.58%,DBH大于16cm径级的黑松甚至不足0.1%(图1)。由负幂函数拟合曲线可知,整个黑松种群的径级分布呈逆J字型分布($R^2 = 0.99$),表明该黑松种群具有成熟稳定发展趋势。

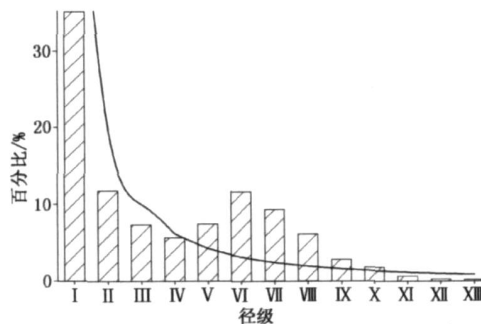


图1 研究区黑松种群的径级大小分布

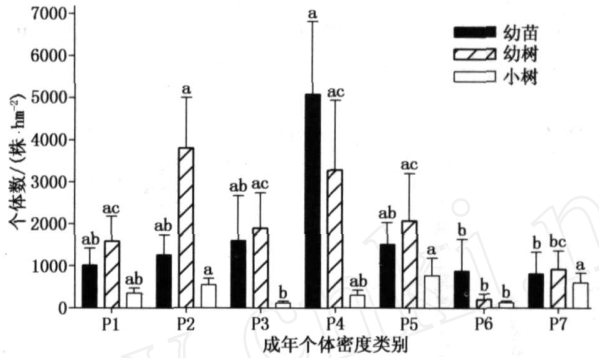
Fig. 1 The distribution of size classes for *Pinus thunbergii* population in the study area

2.2 天然更新规律

2.2.1 成年个体密度对更新的影响

虽然幼苗个体数在不同大小黑松成年个体密度样方间的差异并不明显($P > 0.05$),但

由图 2 仍然可以看出,最大的幼苗个体数 ($5\ 085.71 \pm 1\ 068.52$ 株· hm^{-2})发生在成年个体黑松种群密度在 $3\ 000 \sim 3\ 500$ 株· hm^{-2} 的样方中,次之出现在中等密度类(P3和 P5)中,最小的幼苗个体数 (812.50 ± 514.93 株· hm^{-2})出现在成年个体黑松种群密度在 P7 ($>5\ 000$ 株· hm^{-2})的样方中,且最大和最小幼苗个体数出现的样方间差异明显 ($P < 0.05$);幼树个体数在大小不同的黑松成年个体密度样方间的差异显著 ($P < 0.05$),随着黑松成年个体密度的增加,幼树个体数呈现出下降趋势,由 P2 的 $3\ 800 \pm 1\ 204.54$ 株· hm^{-2} 下降到 P6 的 200 ± 136.54 株· hm^{-2} (图 2);虽然小树个体数在黑松成年个体密度类间的差异仍然显著 ($P < 0.05$),但随着黑松成年个体密度的增加并未表现出明显的规律(图 2)。



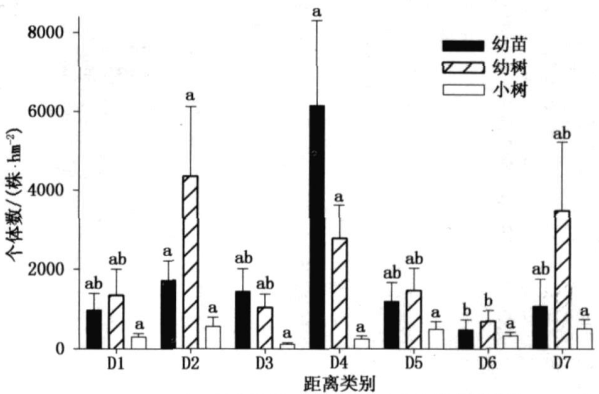
注:不同字母表示幼龄植株个体数在成年个体密度类间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 幼龄植株个体数随成年个体密度的变化

Fig. 2 The change of number of seedlings, saplings and small trees under different adult tree densities

2.2.2 距海岸远近对更新的影响

在所调查的整个距海岸距离 $0 \sim 650$ m 的黑松种群内,天然更新苗(幼苗、幼树和小树)的个体数并未表现出明显的差异 ($P > 0.05$),但由图 3 可以看出,在距海岸小于 400 m 的距离内,幼苗个体数受海陆相互作用的效果较明显,由距海岸 $0 \sim 100$ m 的 981.25 ± 417.75 株· hm^{-2} 猛增到距海岸 $300 \sim 400$ m 的 $6\ 158.33 \pm 153.28$ 株· hm^{-2} ,而距海岸 400 m 以后,幼苗个体数呈下降趋势,说明除了海陆相互作用尚有其它因素决定幼苗数的变化;随着距海岸距离



注:不同字母表示幼龄植株个体数在距离类间差异显著 ($P < 0.05$)。

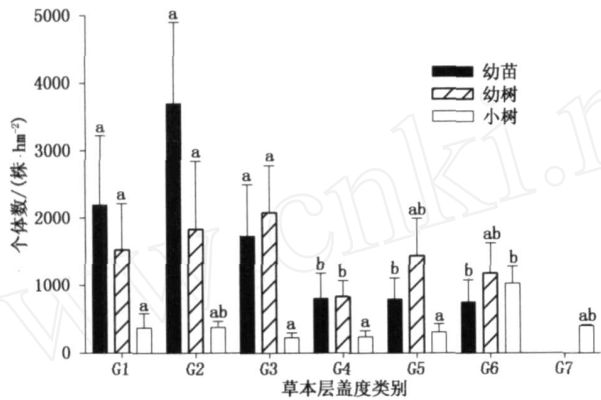
图 3 幼龄植株个体数随距海岸距离的变化

Fig. 3 The change of number of seedlings, saplings and small trees with increasing distance to the coast

的增加,幼树的个体数呈现了不同的变化趋势:由 0~200 m 的快速增长,到 200~500 m 的变化平稳,再到 500~650 m 的急剧上升 ($P < 0.05$);小树个体数的变化在整个距海岸距离内并未表现出明显的规律(图 3)。

2.2.3 草本层盖度对更新的影响

随着草本层盖度的增加,幼苗的个体数表现出下降趋势 ($P < 0.05$) (图 4)。最高的幼苗个体数 ($3\,694.44 \pm 1\,206.19$ 株 \cdot hm^{-2}) 出现在草本层盖度在 0.1~0.2 的样方中,在草本层盖度大于 0.3 的样方中,幼苗的个体数普遍降低,在覆盖度超过 0.7 的样方中,则没有幼苗出现;幼树的个体数在小于 0.3 的样方中变化不明显,在大于 0.3 的样方中,则表现出下降趋势,与幼苗相似,在覆盖度超过 0.7 的样方中,幼树缺失;小树的个体数在草本层覆盖度小于 0.5 的样方中差异不明显 ($P > 0.05$),最大的个体数出现在草本层覆盖度在 0.5~0.7 的样方中 ($P < 0.05$),在草本层覆盖度大于 0.7 的样方中亦有小树的出现(图 4)。



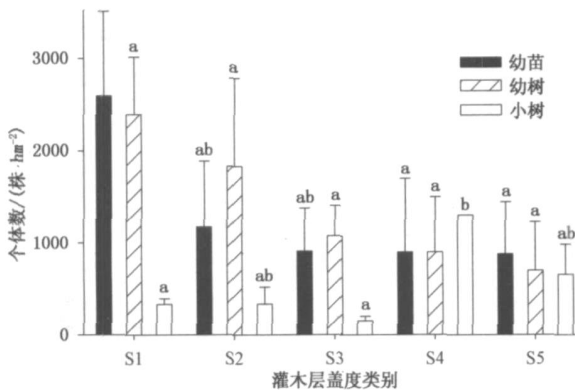
注:不同字母表示幼龄植株个体数在草本层盖度类间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 幼龄植株个体数随草本层盖度的变化

Fig. 4 The change of number of seedlings, saplings and small trees with different grass coverage

2.2.4 灌木层盖度对更新的影响

最高的幼苗个体数 ($2\,594.57 \pm 913.07$ 株 \cdot hm^{-2}) 出现在灌木层盖度在 < 0.1 的样方中(图 5),随着灌木层盖度的增加,幼苗的个体数表现出下降趋势,最低的幼苗个体



注:不同字母表示幼龄植株个体数在灌木层盖度类间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 幼龄植物个体数随灌木层盖度的变化

Fig. 5 The change of number of seedlings, saplings and small trees with different shrub coverage

数 ($881.25 \pm 563.41.19 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$) 出现在灌木层盖度大于 0.7 的样方中,且与灌木层盖度 < 0.1 的样方之间差异明显 ($P < 0.05$); 幼树个体数在灌木层盖度不等的样方之间差异不明显 ($P > 0.05$), 但由图 5 可以看出, 随着灌木层盖度的增加, 幼树的个体数仍表现出逐渐下降趋势; 小树的个体数在灌木层盖度小于 0.5 的样方之间变化不明显 ($P > 0.05$), 最高的小树个体数发生在灌木层盖度为 0.5 ~ 0.7 的样方中, 且与盖度小于 0.5 的样方间存在着显著差异 ($P < 0.05$)。

3 讨论

研究林木的径级结构特点不仅可以阐明林分的干扰历史, 评估种群稳定性^[19], 同时也是探讨不同树种更新模式的重要途径^[20]。由本文的分析结果可知, 在黑松沿海防护林中小径级的个体占了相当大的比例 (图 1), 这就说明幼苗和幼树数量丰富, 为林分的健康稳定发展提供了充足的保障。有的学者研究表明, 稳定型和增长型种群的大小结构分布曲线符合负幂函数分布, 而下降型种群的分布曲线不符合负幂函数分布^[17]。通过用负幂函数拟合结果来看, 整个黑松种群的径级分布呈逆 J 字型分布, 判定系数 R^2 达到了 0.99, 进一步证明了所调查的黑松样地是一个能够自我维持的异龄种群。

作为种群生态的基本机制, 密度制约在调节种群的动态变化过程方面发挥着重要的作用^[20]。这种密度制约效应在成年个体密度影响植物种群的补充方面表现得比较突出。由本文的分析结果可知, 黑松种群成年个体密度对幼苗和幼树更新均有不同程度的影响 (图 2), 随着密度的增加, 幼树个体数表现出下降趋势, 幼苗个体数也在成年个体密度大于 3 000 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的样方中下降明显。相似的现象发生在 Grace 和 Platt^[21] 对长叶松种群以及朱教君等^[6] 对日本黑松海岸林更新的研究中。这种现象是因为更新苗与周围的同种成年个体有着相似的资源需求, 进而在光、营养和其它资源方面竞争激烈。而这种种内竞争在减小种群补充可能性方面扮演着重要的角色^[22]。此外, 随着成年个体密度的增加, 导致了下层空间光照降低以及地面枯枝落叶层的增厚, 而这为病原体的滋生创造了适宜的环境, 进一步加剧了更新苗出生率减小或死亡率增加的趋势^[23]。然而, 这种密度制约效应存在着一个阈值, 也就是说并不是成年个体密度越小, 更新苗个体数越多。研究表明最大的幼苗个体数发生在成年个体黑松种群密度在 3 000 ~ 3 500 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的样方中, 最大的幼树个体数发生在 1 900 ~ 2 500 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的样方中, 而未发生在成年个体密度最小的 900 ~ 1 900 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的样方中 (图 2)。这可能是成年个体密度越小, 下层的透光率越高, 而过强的光照对黑松种子的萌发不利^[6]。此外, 幼苗 ($P > 0.05$) 和幼树 ($P < 0.05$) 个体数在成年个体密度梯度间变化程度的差异以及出现个体数峰值的样方成年个体密度大小的不同也反映了不同年龄的黑松更新苗耐荫性的差别。小于 3 年的黑松幼苗的耐荫性明显好于大于 3 年的幼树的耐荫性。相似的结论也可在臧润国等^[20] 对红松种群的研究中得到证实。

海岸带是海陆相互作用活跃的地带, 距海越近, 这种作用越强。潮汐、盐水的侵入、海风等对海防林更新、物种多样性构成了严重的威胁^[24, 25]。在海边频繁遭受潮汐侵袭的林分, 会导致物种多样性的下降以及更新苗的缺失^[25]。积水时间的增长也会大大加剧更新失败的风险^[26]。随着距海岸距离的增加, 幼苗的个体数表现出了增加趋势 (图 3), 恰恰反映了这种在海陆梯度上环境异质性的变化。然而, 在 400 m 以后, 这种作用的效果不是很明显。幼树个体数由距海岸 0 ~ 200 m 的快速增长, 到 200 ~ 500 m 的变化平稳, 再到 500 ~ 650 m 的急剧上升 (图 3), 反映了海陆相互作用由强、中到弱的梯度变化。而小树个体数的变化在

整个距海岸距离内并未表现出明显的规律。三种更新苗个体数在距海岸距离梯度上的变化差异,反映了对环境因素适应能力的差别。随着更新苗年龄的增长,显然对环境的适应能力和耐受程度在不断增加。通过本文的分析,海陆作用确实对黑松海防林天然更新造成了一定的影响,但是这种作用对更新苗个体数的变化影响距离有限,有些情况甚至不能解释。如在距海岸 400 m 以后,幼苗个体数随距海岸距离的增加呈下降趋势。这就说明其它因素的存在,如人为干扰削弱了海陆相互作用的影响。研究样地离村庄较近,每年春初、秋末两季,村民要收集黑松凋落物和枯草作薪柴。这种活动一方面会造成凋落层中的种子被收集,另一方面也容易对更新苗造成伤害,从而对天然更新造成影响。当然,本文只是以距离指标间接探讨海陆相互作用对天然更新的影响,将环境因子定量化直接分析海陆相互作用对天然更新的影响仍是我们继续努力的方向。

草本植物的存在极大地抑制木本植物的建立和生长^[27]。然而这里的研究表明并不是草本盖度最小的样方拥有最多的幼苗和幼树的个体数,反而是 2 级草本盖度 (0.1 ~ 0.2) 中幼苗和 3 级草本盖度 (0.2 ~ 0.3) 中幼树个体数量最高 (图 4)。这就说明一定的草本盖度对树木建立有一定的促进作用。一定数量草本覆盖减少了雨水对土壤的冲刷、增加了养分并改善了微环境 (沃岛效应)^[28],同时又最大限度地减少其对木本植物个体建立和生长的妨碍,达到一种动态平衡。但是草本覆盖对不同生活史阶段的黑松作用程度不同。随着更新苗幼苗、幼树和小树年龄的增长和本身高度的增加,草本覆盖的作用在不断减弱 (图 4)。

随着灌木层覆盖度的增加,幼苗和幼树的个体数量在不断减少,即使显著程度不同 (图 5)。O'Brien 等^[7]研究发现在其它影响因子固定的前提下,灌木覆盖每增加 1%,辐射松 (*Pinus radiata*) 的更新概率将下降 18.5%。这很可能是随着灌木覆盖度的增加,幼苗和幼树与灌木之间光竞争等也在不断增加^[29]。而黑松是一个喜光树种^[6],随着覆盖度的增加,适宜黑松更新的光照条件缺失,导致黑松幼苗和幼树死亡率增加。随着更新苗年龄的增长,植株高度不断增加,逐渐摆脱灌木的遮挡,光照条件已不是影响小树生长的限制因子,而水分的作用日益显现。灌木覆盖度高的样方,阻止了土壤水分的蒸发,满足了小树生长的需要。这可能是小树个体数量在灌木覆盖度大于 0.5 的样方中高的原因 (图 5)。可见,随着黑松更新苗生活史阶段的变更,灌木层的作用也在改变,由开始抑制幼苗建立逐渐过渡到促进幼龄植株生长。掌握黑松幼龄植株与灌木的相互作用机制可为人工促进天然更新和黑松海防林有效管理提供一定的借鉴。

参考文献 (References):

- [1] 徐德成. 胶东沿海森林环境质量评价与分析 [J]. 海岸工程, 1993, 12(4): 46 ~ 53. [XU De-cheng The appraisal and analysis for the coastal forest environmental quality in Jiaodong Peninsular *Coastal Engineering*, 1993, 12(4): 46 - 53.]
- [2] 张纪林, 康立新, 季永华. 沿海防护林体系的结构与功能及发展趋向 [J]. 世界林业研究, 1998, 11(1): 50 ~ 56. [ZHANG Ji-lin, KANG Li-xin, JI Yong-hua The structure, function and developing tendency of the coastal windbreak system. *World Forestry Research*, 1998, 11(1): 50 - 56.]
- [3] 张金池, 臧廷亮, 曾锋. 盐质海岸防护林树木根系对土壤抗冲性的强化效应 [J]. 南京林业大学学报, 2001, 25(1): 9 ~ 12. [ZHANG Jin-chi, ZANG Ting-liang, ZENG Feng A study on soil anti-scourability intensification of protective forest root system in bedrock coast *Journal of Nanjing Forestry University*, 2001, 25(1): 9 - 12.]
- [4] 王贵霞, 李传荣, 杨吉华, 等. 山东省沿海防护林体系现状及建设对策探讨 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 118 ~ 120. [WANG Gui-xia, LI Chuan-rong, YANG Ji-hua, et al. Actuality and discussion for building countermeasures of coastal protecting forest-system in Shandong *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(2): 118 - 120.]
- [5] 胡海波, 张金池, 鲁小珍. 我国沿海防护林体系环境效应的研究 [J]. 世界林业研究, 2001, 14(5): 37 ~ 43. [HU Hai-

- bo, ZHANG Jin-chi, LU Xiao-zhen. Study on environmental benefits of coastal windbreak system in China. *World Forestry Research*, 2001, 14(5): 37 - 43.]
- [6] 朱教君,李凤芹,松崎健,等. 间伐对日本黑松海岸林更新的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1361 ~ 1367. [ZHU Jiao-jun, LI Feng-qin, MATSUZAKI Takeshi, et al. Influence of thinning on regeneration in a coastal *Pinus thunbergii* forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1361 - 1367.]
- [7] O'Brien M J, O'hara K L, Erbilgin N, et al. Overstorey and shrub effects on natural regeneration processes in native *Pinus radiata* stands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240: 178 - 185.
- [8] Gagnon J L, Jokela E J, Moser W K, et al. Characteristics of gaps and natural regeneration in mature longleaf pine flatwoods ecosystems [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 187: 373 - 380.
- [9] 许景伟,王卫东,乔勇进,等. 沿海沙质岸基干林带黑松防护林的更新方式 [J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(5): 4 ~ 6. [XU Jing-wei, WANG Wei-dong, QIAO Yong-jin, et al. Regeneration methods of *Pinus thunbergii* protective forest in backbone forest belt of sandy seashore. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 31(5): 4 - 6.]
- [10] Holmes T H. Woodland canopy structure and the light response of juvenile *Quercus lobata* (fagaceae) [J]. *American Journal of Botany*, 1995, 82: 1432 - 1442.
- [11] 韩有志,王政权. 森林更新与空间异质性 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 615 ~ 619. [HAN You-zhi, WANG Zheng-guan. Spatial heterogeneity and forest regeneration. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5): 615 - 619.]
- [12] Veenendaal E M, Emst W H O, Modise G S. Effect of seasonal rainfall pattern on seedling emergence and establishment of grasses in a savanna in south-eastern Botswana [J]. *Journal of Arid Environments*, 1996, 32: 305 - 317.
- [13] 汤景明,翟明普. 影响天然林树种更新因素的研究进展 [J]. 福建林学院学报, 2005, 25(4): 379 ~ 383. [TANG Jing-ming, ZHA IMing-pu. Advances in the factors affecting natural forest regeneration. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 25(4): 379 - 383.]
- [14] 许景伟,王卫东,王月海,等. 沿海黑松防护林低产、低质、低效成因的调查报告 [J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(5): 96 ~ 98. [XU Jing-wei, WANG Wei-dong, WANG Yuehai, et al. Investigation report on the reasons of low-yield, poor-quality, inferior-function of coastal protective forest of *Pinus thunbergii* Parl. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 31(5): 96 - 98.]
- [15] 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. [XU Jing-wei, LI Chuan-rong, WANG Wei-dong, et al. Biomass and productivity of *Pinus thunbergii* protective forests in sandy coastal area. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, 33(6): 29 - 32.]
- [16] 刘峰,陈伟烈,贺金生. 神农架地区锐齿槲栎种群结构与更新的研究 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(4): 396 ~ 401. [LU Feng, CHEN Wei-lie, HE Jin-sheng. Population structure and regeneration of *Quercus Aliena* var *Acuteserrata* in Shennongjia. *Journal of Plant Ecology*, 2000, 24(4): 396 - 401.]
- [17] Johnson J B. Stand structure and vegetation dynamics of a subalpine treed fen in Rocky Mountain National Park, Colorado [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1997, 8: 337 - 342.
- [18] Harper J L. Population Biology of Plants [M]. New York: Academic Press, 1977.
- [19] Lorimer C G. Age structure and disturbance history of a southern Appalachian virgin forest [J]. *Ecology*, 1980, 61: 1169 - 1184.
- [20] 臧润国,刘静艳,董大方. 林隙动态与森林生物多样性 [M]. 北京:中国林业出版社, 1999. [ZANG Run-guo, LIU Jing-yan, DONG Da-fang. Gap Dynamics and Forest Biodiversity Beijing: China Forestry Publishing House, 1999.]
- [21] Grace S L, Platt W J. Effects of adult tree density and fire on the demography of pregrass stage juvenile longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) [J]. *Journal of Ecology*, 1995, 83: 75 - 86.
- [22] Wills C, Condit R, Foster R B, et al. Strong density- and diversity-related effects help to maintain tree species diversity in a neotropical forest [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, 94: 1252 - 1257.
- [23] Oliver C D, Larson B C. Forest Stand Dynamics [M]. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [24] Williams K, Meads M V, Sauerbrey D A. The roles of seedling salt tolerance and resprouting in forest zonation on the west coast of Florida, USA [J]. *American Journal of Botany*, 1998, 85: 1745 - 1752.
- [25] Desantis L R G, Bhotika S, Williams K, et al. Sea-level rise and drought interactions accelerate forest decline on the gulf coast of Florida, USA [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 2349 - 2360.

- [26] Conner W H, Day J W. Rising water levels in coastal Louisiana: Implications for two coastal forested wetland areas in Louisiana[J]. *Journal of coastal Research*, 1988, 4: 589 - 596.
- [27] Zimmeman J K, Pascarella J B, Aide T M. Barriers to forest regeneration in an abandoned pasture in Puerto Rico[J]. *Restoration Ecology*, 2000, 8: 350 - 360.
- [28] Richards P W. *The Tropical Rain Forest: An Ecological Study*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [29] Aussenac G. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture[J]. *Annals of Forest Science*, 2000, 57: 287 - 301.

Effects of Adult Tree Density, Distance to Coast and Understory on Natural Regeneration of *Pinus thunbergii* Coastal Protection Forest in Yantai Region

ZHANG Zhi-dong, HAN Guang-xuan, MAO Pei-li, WANG Guang-mei, XUE Qin-zhao
(Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, CAS, Yantai 264003, China)

Abstract: *Pinus thunbergii* coastal protection forests are important as windbreaks and tide breaks and in stabilizing sand dunes and protecting the local environment. The sustainable development of *P. thunbergii* coastal forest depends, to a great extent, on the success of natural generation. However, the influence of ecological factors on the natural regeneration in a *P. thunbergii* coastal forest is rarely explored. In order to understand the natural regeneration mechanism of the *P. thunbergii* coastal protection forest, 42 plots (10 m × 10 m) were investigated in Yantai region of Shandong province, China. The effects of adult tree density, distance to coast, herbaceous and shrub cover on natural regeneration of *P. thunbergii* coastal protection forest were studied by statistical analysis methods. The results indicated that size structures of stand population of *P. thunbergii* exhibit the characteristic reverse J-distribution ($R^2 = 0.99$) generally indicative of self-replicating, stable, uneven-age population. The number of seedlings, saplings and small tree varied throughout the study plots depending on adult tree density, distance to coast, herbaceous and shrub cover. The number of seedlings and saplings increased first and then decreased with the increase of adult tree density and distance to coast, and showed descending trend with the increase of understory herbaceous and shrub cover. The individual number of small trees was positively correlated with shrub cover, and showed no clear correlation with adult tree density, distance to coast and herbaceous cover. Our results proved that different life stages (e.g., seedling, sapling, small tree) of regeneration plantlet exhibit different adaptive strategies and mechanisms under the impact of adult tree density, distance to coast and understory. An effective understanding of those regeneration rules is a prerequisite for developing sustainable management of *P. thunbergii* coastal protection forest.

Key words: population ecology; natural regeneration; size structure; *Pinus thunbergii*; coastal protection forest