

南亚热带马尾松×红锥混交林红锥的天然更新及环境解释*

李运筹¹, 周晓果¹, 温远光^{1,2}, 朱宏光^{1,2**}, 覃志伟¹, 蔡道雄^{2,3}, 贾宏炎^{2,3}, 李晓琼^{1,2}, 尤业明^{1,2}

(1. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 广西友谊关森林生态系统定位观测研究站, 广西凭祥 532600; 3. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600)

摘要:为揭示影响南亚热带马尾松×红锥混交林下红锥天然更新的关键环境因子,本研究以1983年造林的马尾松×红锥人工林为对象,选取3个研究样地,设置50个2 m×2 m的调查样方,对红锥更新苗、土壤理化性质、林分结构与光环境等展开调查。结果表明,不同样地红锥天然更新密度为(132 353±7 050)~(174 219±15 580)株·hm⁻²。5个高度级红锥更新苗密度差异显著,I级最大,V级最小,密度随高度级增加而递减。相关分析表明,土壤全磷含量对I、V级的红锥更新苗有明显的正效应,而对II、III级更新苗有明显的负效应;红锥I级苗与土壤pH值呈极显著正相关;近地层透光系数与I、II、III、IV级苗木密度呈负相关,与V级呈正相关;林分上层平均叶倾角、近地层叶面积指数则与I、II、III、IV级苗木密度呈正相关,与V级呈负相关。研究所选择的25个林分结构与土壤环境因子组合对红锥天然更新分布格局的变异解释率达到66.01%,解释效果显著($F=2.0229, P=0.027$)。土壤全磷含量、土壤pH值、海拔高度、林分上层平均叶倾角、近地层叶面积指数、近地层透光系数等6个因子是影响南亚热带红锥天然更新分布格局的关键因子。

关键词:红锥 人工林 天然更新 环境解释

中图分类号:S718.3 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2019)02-0207-08

0 引言

天然更新是森林生态系统自身不断完善与自我修复的重要方式,是森林生态系统可持续发展的基础,也是森林健康状况的重要表征,对森林生物多样性的维持、森林生态系统的稳定与发展、受破坏林地的生态恢复具有重要意义^[1]。森林天然更新的生态学过程非常复杂,影响因素很多,环境条件、自然与人

为干扰、更新树种自身的生物学与生态学特性以及与伴生种间的关系等,都对森林更新的进程有很大影响^[2-6]。在我国,目前已见报道的天然更新或人工促进天然更新的树种有83个,但关于人工林天然更新的影响因子仍缺乏可控的实验研究^[1]。张树梓等^[7]运用冗余度分析法(RDA)对华北落叶松更新苗密度与环境因子间的关系进行分析,发现早期生长中更新苗密度受土壤-枯落物因子限制比较大,而后期生长林分结构因子逐渐成为主要的限制性因子。张恰吟

*国家自然科学基金项目(31860171,31560201),广西重点研发计划项目(2018AB40007),广西自然科学基金项目(2016GXNSFBA380222,2017GXNSFAA198114),广西高等学校重大科研项目(201201ZD001),广西森林生态与保育重点实验室开放课题(QZKFKT2017-01)和广西林业厅科研项目(桂林科字[2009]第八号)资助。

【作者简介】

李运筹(1993—),男,硕士研究生,主要从事森林生态学研究。

【**通信作者】

朱宏光(1962—),男,硕士生导师,副研究员,主要从事森林生态和森林培育学研究,E-mail: xu980307@163.com。

【引用本文】

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20190506.008

李运筹,周晓果,温远光,等.南亚热带马尾松×红锥混交林红锥的天然更新及环境解释[J].广西科学,2019,26(2):207-214.

LI Y C, ZHOU X G, WEN Y G, et al. Environmental factors and natural regeneration of *Castanopsis hystrix* in a tropical *Pinus massoniana* × *C. hystrix* mixed plantation in Subtropical China [J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(2): 207-214.

等^[8]研究发现,衰退的沙棘人工林更新情况因所处微地形环境不同而存在差异。唐继新等^[9]发现南亚热带米老排人工林天然种子更新幼树的数量和频度可以达到森林天然更新的良级标准,亦符合采伐迹地人工更新成林的验收标准。有研究者发现,针叶人工林下红锥更新密度与凋落物层厚度、草本盖度呈明显负相关,当母树的距离大于 5 m 时就会出现更新不良现象,认为草本盖度、凋落物层厚度、凋落叶中化感物质的抑制作用与母树的缺失可能是影响红锥天然更新的主要原因^[10];也有研究者认为,坡位是影响红锥天然更新的主要因子,而且林下红锥的更新状况与上层林木的生长表现密切相关,推测可能与光环境及养分竞争的差异有关^[11],但更多的影响因素或关键影响因子仍需深入研究。本研究以中国林科院热带林业实验中心伏波试验场的马尾松×红锥人工林为对象,从土壤因素与林分结构方面入手,系统探讨影响红锥天然更新的生物与非生物因子,并确定其中的关键影响因子,旨在为南亚热带红锥人工林可持续经营管理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于广西凭祥市中国林科院热带林业实验中心伏波试验场(22°02'N,106°51'E)。伏波试验场地形地貌复杂,海拔高度为 130~1 045 m,属南亚热带季风气候区,具有南亚热带和北热带气候特点,雨热充沛,年均气温 21℃,年降雨集中于 4~9 月份,年均降雨量 1 500 mm 左右,年均日照达 1 260 h,土壤类型以花岗岩风化形成的红壤为主^[12]。

1.2 样地设置

本研究以 1983 年造林的马尾松×红锥人工混交林为对象,选取 3 个代表性地段设置调查样地,共设置 50 个 2 m×2 m 的调查样方,其中样地 1 有 17 个样方,样地 2 有 16 个样方,样地 3 有 17 个样方。各样方的间距在 10 m 以上。

1.3 样地调查和取样

乔木层调查:以样方为中心,以 10 m 为半径,测定样方周围林分乔木层中红锥、马尾松的株数、树高、胸径等指标。

红锥更新苗调查:记录样方内所有红锥的幼苗幼树,并将红锥更新苗分为 5 个高度级,其中 I 级苗高 0~10 cm,II 级苗高大于 10 cm 且小于等于 30 cm,III 级苗高大于 30 cm 且小于等于 50 cm,IV 级苗高大于 50 cm 且小于等于 100 cm,V 级苗高>100 cm。

土壤样品采集:在每个 2 m×2 m 的调查样地随

机选取 3 个采样点,用内径为 8.5 cm 的不锈钢土钻采集 0~10 cm 土样,去除植物根系及石砾,混合均匀后过 2 mm 孔径筛,并分为 2 份:一份收集后立即存放在放有冰盒的保温箱里,运回实验室置于 4℃ 冰箱保存,用于含水率、铵态氮和硝态氮含量测定;另一份自然风干,用于土壤理化性质分析(pH 值、土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾等)。

林分冠层指标的测定:利用 CI-110 冠层分析仪,在每个样方中心点分别测定林分上层(距离地面 2 m)的叶面积指数(LAI-H)、平均叶偏角(MLA-H)、光透射系数(TC-H)以及林分近地层(距离地面 15 cm)叶面积指数(LAI-L)、平均叶偏角(MLA-L)、光透射系数(TC-L)。

红锥更新苗生物量的测定:在 3 个区域的林内随机选取 3 个 2 m×2 m 样方,采用收获法测定各级更新苗的地上、地下生物量鲜重;并采集地上和地下部分样品带回实验室,用 60℃ 恒温烘干至恒重,计算单位面积更新苗的生物量干重。

1.4 土壤化学性质的测定

土壤 pH 值采用 pH 计测定,土壤有机碳含量(Soil organic carbon, SOC)的测定采用重铬酸钾外加热法,全氮(Total nitrogen, TN)采用凯氏定氮法测定,全磷(Total phosphorus, TP)采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定,全钾(Total potassium, TK)采用 NaOH 熔融-火焰光度法,速效磷(Available phosphorus, AP)用钼锑抗比色法测定,速效钾(Available potassium, AK)采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定,铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)含量测定采用 KCl 溶液提取法并于全自动连续流动分析仪测定。

1.5 数据统计分析

利用 SPSS 22 软件进行数据统计分析:采用单因素方差分析(one-way ANOVA)中的 LSD 法进行多重比较(设置检验标准为 $P < 0.05$);采用皮尔森(Pearson)法对更新苗密度与环境因子进行相关分析(双尾检测)。采用冗余度分析(Redundancy analysis, RDA)检验红锥不同高度级更新苗密度与土壤、林分因子的关联性,此分析采用 R 3.5.1 软件的 vegan 程序包完成。

2 结果与分析

2.1 不同样地红锥更新苗的数量和结构

调查结果显示出,样地 1、样地 2 和样地 3 红锥更新幼苗幼树的密度分别为(132 353 ± 7 050)株·hm⁻²、139 706 株·hm⁻²和(174 219 ± 15 580)

株 · hm⁻²。红锥不同级别更新苗密度差异很大, 从 I 级到 V 级呈明显下降趋势(图 1)。其中 I 级苗木密度最大, 平均达 76 100 株 · hm⁻², 占林分苗木总密度的 51.3%; II 级苗木密度平均为 31 450 株 · hm⁻², 占总密度的 21.2%; III 级苗木密度平均为 20 100 株 · hm⁻², 占总密度的 13.6%; IV 级苗木密度平均为 14 400 株 · hm⁻², 占总密度的 9.7%; V 级苗木最少, 平均仅有 6 200 株 · hm⁻², 占总密度的 4.2%。单因素方差分析(LSD 多重比较)结果表明, 3 个样地中分布的 I 级($F = 11.737, P = 0.000$)、III 级($F = 7.383, P = 0.002$)、V 级($F = 8.084, P = 0.001$)苗木数量存在显著差异(图 1)。

2.2 不同样地土壤肥力因子的比较

从表 1 可以看出, 不同样地的土壤全氮(TN)、全钾(TK)、速效钾(AK)、速效磷(AP)、碳磷比(C/P)、硝态氮(NO₃⁻-N)差异不显著($P > 0.05$), 其余各个因子都存在显著差异($P < 0.05$)。LSD 多重比较分析发现, 3 个样地的土壤氨态氮(NH₄⁺-N)存在显著差异, 以样地 3 的含量最高, 其次是样地 2, 样地 1 最低; 样地 3 的土壤全磷(TP)、有机质(SOM)、有机碳

表 1 土壤肥力因子的比较(平均值 ± 标准误)

Table 1 Comparison of soil fertility variables (mean ± SE)

项目 Item	样地 1 Sample plot 1	样地 2 Sample plot 2	样地 3 Sample plot 3
TN (g · kg ⁻¹)	1.971 ± 0.114 a	1.796 ± 0.080 a	1.832 ± 0.060 a
TK (g · kg ⁻¹)	23.082 ± 1.404 a	24.145 ± 1.808 a	26.965 ± 3.133 a
AK (mg · kg ⁻¹)	73.625 ± 3.550 a	71.071 ± 3.165 a	70.782 ± 3.715 a
AP (mg · kg ⁻¹)	2.264 ± 0.173 a	2.070 ± 0.134 a	2.17 ± 0.165 a
TP (g · kg ⁻¹)	0.873 ± 0.015 a	0.879 ± 0.025 a	1.005 ± 0.023 b
SOM (g · kg ⁻¹)	127.41 ± 1.350 a	131.414 ± 5.096 a	144.802 ± 5.231 b
SOC (g · kg ⁻¹)	73.904 ± 0.783 a	76.226 ± 2.959 a	83.992 ± 3.034 b
C/N	39.333 ± 2.061 a	43.811 ± 2.746 ab	46.342 ± 2.014 b
C/P	84.989 ± 1.410 a	88.265 ± 4.873 a	84.180 ± 3.686 a
N/P	2.269 ± 0.137 a	2.077 ± 0.112 ab	1.829 ± 0.054 b
pH	4.533 ± 0.019 a	4.598 ± 0.029 a	4.684 ± 0.028 b
NO ₃ ⁻ -N (mg · kg ⁻¹)	5.167 ± 0.193 a	5.054 ± 0.229 a	5.455 ± 0.221 a
NH ₄ ⁺ -N (mg · kg ⁻¹)	23.676 ± 0.780 a	29.989 ± 1.424 b	37.171 ± 1.200 c
WC (%)	25.38 ± 0.949 a	27.37 ± 0.716 ab	27.96 ± 0.927 b

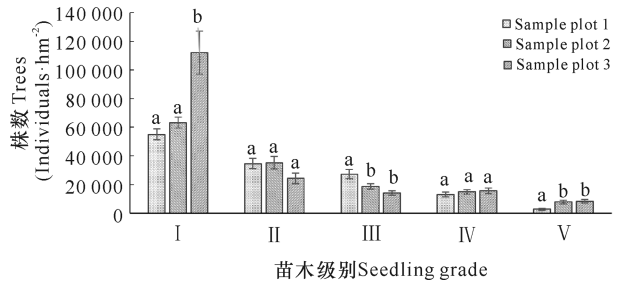
注: 表中不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平的显著差异

Note: Different letters in the table show significant differences at the level of $P < 0.05$

2.3 不同样地林分因子的比较

LSD 多重比较表明, 不同样地乔木层的密度(HSD、HMSD)、林分上层叶面积指数和透光系数(LAI-H、TC-H)、近地层平均叶倾角(MLA-L)等均无显著差异; 样地 2、样地 3 的林分上层平均叶倾角

(SOC)、pH 值与样地 1、样地 2 有显著差异, 样地 3 的含量最高; 样地 3 的 C/N 显著高于样地 1, 与样地 2 差异不显著; N/P 则表现为样地 1 显著高于样地 3; 土壤含水量(WC)则是样地 3 显著高于样地 1 (表 1)。



不同字母表示在 0.05 水平的显著差异(平均值 ± 标准误, $P < 0.05$)

Different letters show significant differences at 0.05 level (mean ± SE, $P < 0.05$)

图 1 红锥更新苗的密度分布

Fig. 1 Density distribution of the *C. hystrix* regenerated seedlings

(MLA-H)差异显著, 样地 1 和样地 2 的近地层叶面积指数(LAI-L)差异显著; 样地 1 的近地层透光系数(TC-L)、地上地下更新苗生物量(AB、UB)与样地 2、样地 3 有显著差异(表 2)。

表 2 林分因子的比较(平均值±标准误)

Table 2 Comparison of stand variables (mean±SE)

项目 Item	样地 1 Sample plot 1	样地 2 Sample plot 2	样地 3 Sample plot 3
HSD (trees · hm ⁻²)	333.35±30.685 a	352.24±38.675 a	278.75±29.043 a
HMSD (trees · hm ⁻²)	404.71±42.640 a	494.71±74.799 a	430.13±40.070 a
Alt (m)	606.912±0.572 a	599.335±0.515 b	580.544±2.212 c
LAI-H	2.376±0.038 a	2.431±0.058 a	2.329±0.060 a
MLA-H	22.230±1.676 ab	24.029±1.688 a	19.004±1.625 b
TC-H	0.109±0.004 a	0.106±0.004 a	0.115±0.005 a
LAI-L	2.354±0.046 a	2.486±0.055 ab	2.581±0.048 b
MLA-L	20.742±2.184 a	20.476±2.553 a	17.711±1.650 a
TC-L	0.115±0.004 a	0.100±0.005 b	0.089±0.004 b
AB (t · hm ⁻²)	1.366±0.110 a	2.003±0.181 b	2.037±0.185 b
UB (t · hm ⁻²)	0.496±0.036 a	0.640±0.050 b	0.647±0.053 b

注:表中不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平的显著差异

Note: Different letters in the table show significant differences at the level of $P < 0.05$

2.4 影响红锥天然更新的主要环境因子

2.4.1 更新苗密度与土壤和林分因子的相关性

从表 3 可以看出, I 级更新苗密度与土壤全钾含量(TK)、近地层叶面积指数(LAI-L)呈显著正相关关系,与土壤全磷含量(TP)、pH 值呈极显著正相关关系,但与海拔高度(Alt)、近地层透光系数(TC-L)呈极显著负相关关系; II 级更新苗密度与土壤全磷含量(TP)呈显著负相关关系,而与海拔高度(Alt)、林分上层平均叶倾角(MLA-H)则呈极显著正相关关系; III 级更新苗密度与土壤全磷含量(TP)呈极显著负相关关系,与海拔高度呈极显著正相关关系,而与

林分上层与近地层的平均叶倾角(MLA-H、MLA-L)有显著的正相关关系; IV 级更新苗密度与土壤全氮含量(TN)、近地层透光系数(TC-L)呈显著负相关关系,与硝态氮(NO_3^- -N)含量呈显著正相关关系,与近地层叶面积指数(LAI-L)、更新苗的地上地下生物量(AB、UB)呈极显著正相关关系; V 级更新苗密度与土壤全磷量呈(TP)显著正相关关系,与土壤铵态氮(NH_4^+ -N)、更新苗的地上地下生物量(AB、UB)呈极显著正相关关系,而与海拔高度(Alt)呈极显著的负相关关系。

表 3 更新苗密度与土壤、林分因子的相关性(Pearson 相关,双尾检测)

Table 3 Correlation between density of regenerated seedlings and factors of soil and stand (Pearson correlation coefficient, two tail test)

项目 Item	I		II		III		IV		V	
	Pearson	P	Pearson	P	Pearson	P	Pearson	P	Pearson	P
TN	-0.03	0.835	-0.179	0.214	-0.03	0.839	-0.297*	0.036	-0.136	0.348
TK	0.310*	0.028	0.016	0.913	0.055	0.705	0.177	0.218	0.165	0.251
AK	0.037	0.8	0.077	0.594	0.102	0.48	0.047	0.746	-0.045	0.754
AP	0.199	0.165	-0.085	0.557	0.146	0.313	0.081	0.577	0.037	0.800
TP	0.462**	0.001	-0.314*	0.026	-0.427**	0.002	0.016	0.91	0.291*	0.040
SOM	0.196	0.172	-0.256	0.073	-0.157	0.278	-0.04	0.784	0.176	0.222
SOC	0.196	0.172	-0.256	0.073	-0.157	0.278	-0.04	0.784	0.176	0.222
C/N	0.106	0.462	0.002	0.987	0.016	0.913	0.167	0.245	0.186	0.196
C/P	-0.159	0.271	0.001	0.993	0.154	0.286	-0.022	0.881	-0.063	0.666
N/P	-0.252	0.078	0.011	0.937	0.192	0.181	-0.259	0.070	-0.256	0.073
pH	0.379**	0.007	0.047	0.748	-0.101	0.487	0.277	0.052	0.100	0.489
NO_3^- -N	0.114	0.432	0.071	0.622	0.110	0.449	0.289*	0.042	-0.034	0.812
NH_4^+ -N	0.207	0.149	-0.117	0.417	-0.238	0.096	0.109	0.453	0.383**	0.006
WC	0.124	0.389	0.104	0.474	-0.032	0.823	-0.13	0.369	0.077	0.597
Alt	-0.524**	0.000	0.401**	0.004	0.456**	0.001	-0.029	0.843	-0.405**	0.004
LAI-H	0.182	0.205	0.200	0.164	0.116	0.423	0.221	0.123	0.014	0.923

续表 3

Continued table 3

项目 Item	I		II		III		IV		V	
	Pearson	P	Pearson	P	Pearson	P	Pearson	P	Pearson	P
MLA-H	-0.097	0.503	0.392**	0.005	0.350*	0.013	0.271	0.057	-0.136	0.346
TC-H	-0.186	0.196	-0.165	0.252	-0.076	0.599	-0.092	0.526	-0.043	0.766
LAI-L	0.349*	0.013	0.110	0.445	0.028	0.847	0.374**	0.007	0.173	0.230
MLA-L	0.036	0.802	0.151	0.297	0.284*	0.045	0.005	0.972	-0.171	0.236
TC-L	-0.375**	0.007	-0.108	0.455	0.033	0.821	-0.300*	0.034	-0.278	0.051
AB	0.125	0.386	-0.097	0.503	-0.014	0.926	0.520**	0.000	0.839**	0.000
UB	0.154	0.284	0.006	0.967	0.131	0.366	0.694**	0.000	0.667**	0.000
HSD	-0.190	0.187	-0.113	0.436	-0.083	0.565	-0.192	0.183	0.049	0.734
HMSD	-0.060	0.679	-0.163	0.259	-0.142	0.327	-0.266	0.062	0.150	0.298

Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

2.4.2 更新苗空间分布格局的环境解释

冗余度(RDA)分析结果表明(图 2), 林分与土壤环境因子组合对林分更新苗密度空间格局变异的解释率达到 66.01%, 解释效果显著($F = 2.0229, P = 0.027 < 0.05$)。从前面 4 个排序轴所占的总信息量看, RDA1 排序轴解释 54.01%, RDA2 排序轴累积解释 61.72%, RDA3 排序轴累积解释 63.85%, RDA4 排序轴累积解释达 65.22%。前 4 个排序轴占近 2/3 的总信息量, 因此, 关于马尾松 × 红锥人工林的红锥天然更新状况可以由前面 4 个排序轴来进行解释。

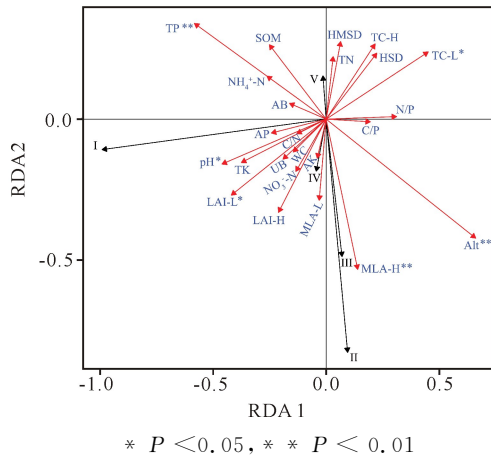


图 2 红锥更新苗密度与土壤、林分因子冗余分析

Fig. 2 Redundancy analysis of regenerated seedling density and stand factors

表 4 是 RDA 的解释变量与前两个排序轴相关关系分析结果。从表 4 可以看出, RDA1 轴更多地反映土壤全磷(TP)、海拔高度(Alt)、土壤 pH 值、近地层叶面积指数(LAI-L)、近地层透光系数(TC-L)、土壤全钾(TK)、土壤速效磷(AP)、土壤碳氮比(C/N)、土壤碳磷比(C/P)、土壤氮磷比(N/P)、土壤氨态氮

($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、苗木地上生物量(AB)等因子的影响; RDA2 轴则更多地反映林分上层平均叶倾角(MLA-H)、上层叶面积指数(LAI-H)、土壤全氮(TN)、土壤速效钾(AK)、土壤硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、林分上层透光系数(TC-H)与平均叶倾角(MLA-H)、林分乔木密度(HMSD)等因子的影响。

表 4 解释变量与排序轴的相关关系

Table 4 Correlation between explanatory and ordination axes

变量 Variables	RDA1	RDA2	r^2	P
TP	-0.82058	0.57153	0.3431	0.001**
Alt	0.80016	-0.59979	0.4677	0.001**
MLA-H	0.30831	-0.95129	0.2346	0.003**
pH	-0.96107	-0.27631	0.1529	0.021*
LAI-L	-0.84087	-0.54124	0.1581	0.025*
TC-L	0.89323	0.44961	0.1660	0.015*
TK	-0.93994	-0.34133	0.1051	0.071
SOM	-0.66292	0.74869	0.1038	0.052
SOC	-0.66292	0.74869	0.1038	0.052
LAI-H	-0.46258	-0.88658	0.1020	0.089
TN	0.03627	0.99934	0.0364	0.424
AK	-0.16898	-0.98562	0.0145	0.701
AP	-0.99235	-0.12348	0.0400	0.417
C/N	-0.94478	-0.32769	0.0125	0.745
C/P	0.98856	-0.15082	0.0263	0.550
N/P	0.99765	-0.06859	0.0655	0.207
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	-0.52071	-0.85374	0.0344	0.442
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	-0.82048	0.57168	0.0694	0.199
WC	-0.76457	-0.64454	0.0221	0.609
TC-H	0.57507	0.8181	0.0769	0.143
MLA-L	-0.00554	-0.99998	0.0611	0.211
AB	-0.90783	0.41933	0.0214	0.622
UB	-0.79204	-0.61047	0.0360	0.404
HSD	0.65183	0.75837	0.0677	0.203
HMSD	0.12311	0.99239	0.0567	0.231

Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

从表4与图2中所反映的综合信息可以看出,土壤全磷含量、海拔高度、林分上层平均叶倾角等3个因子达到极显著水平($P < 0.01$),土壤pH值、近地层叶面积指数、近地层透光系数等3个因子也达到显著水平($P < 0.05$),表明这6个因子为影响红锥更新苗密度空间分布格局的主要因子。

3 讨论

3.1 土壤环境因子对红锥天然更新的影响

天然更新是森林生态系统资源再生产的重要生物学过程,对森林生态系统的稳定与发展具有深远的影响。影响森林天然更新的因素很多,土壤环境条件便是其中的重要影响要素。从大尺度的空间角度来看,不同土壤类型对树种分布有明显的影[13];而小尺度上来说,土壤理化性状异质性的差异在一定程度上制约着幼苗的更新与分布格局[14-16],土壤氮素形态及其含量的改变都可能引起林下植物对有效养分资源利用效率的改变,进而对更新格局与更新过程产生重要影响[17]。任学敏等[18]研究证明林地土壤全磷含量、土壤pH值与牛皮桦更新苗密度呈显著正相关,本研究也得到类似的结果。本研究通过RDA分析发现,土壤全磷含量、土壤pH值是南亚热带地区红锥天然更新苗空间分布格局的两个主要影响因子,皮尔森(Pearson)相关性分析表明,土壤全磷含量对I、V级的红锥更新苗有明显的正效应,而对II、III级更新苗有明显的负效应,表明红锥在苗期的不同生长阶段对土壤含磷量的需求并不一致;分析结果还显示,红锥I级苗与土壤pH值呈极显著的正相关,表明红锥天然更新I级苗的初期生长更适宜pH值较高的土壤环境。

3.2 林分结构因子对红锥天然更新的影响

有研究者认为,更新苗的高度结构是探讨树种更新模式的重要途径[19]。本研究发现,不同高度级的红锥更新苗密度差异显著,I级密度最大,V级最小,表现出明显的依苗木生长级增加而递减的趋势,表明随着高度级的增加红锥更新苗受到相应限制。朱教君等[20]认为,在种源充足的林分中,环境因子是影响森林更新的主要因素。通常,林分的垂直结构、郁闭度和水平结构等通过对林分内植物、动物、微生物等生物因子以及光、温度、水等生境因子的影响,进而影响林木的天然更新[21-22],如朱教君等[14]研究表明土壤水分与土温条件影响樟子松种子的萌发并阻碍幼苗的生长。在本研究中,由林分结构构成的林分上层平均叶倾角、近地层叶面积指数、近地层透光系数3个要素是影响红锥更新空间分布格局的关键因子。

近地层透光系数与I、II、III、IV级苗木密度呈负相关,与V级呈正相关;而林分上层平均叶倾角、近地层叶面积指数则与I、II、III、IV级苗木密度呈正相关,与V级呈负相关,显示I、II、III、IV级阶段的更新苗有适应较低光照条件的生长习性。

3.3 影响红锥更新苗密度空间分布格局的环境解释

冗余度分析(RDA)是一种基于统计学角度评价一组变量与另一组变量数据之间关系的直接梯度分析方法,能直观地揭示植物群落或物种与环境之间的复杂关系,目前已广泛应用于植物生态学研究[23-25]。冗余度分析结果表明,本研究所选择的25个林分结构与土壤环境因子组合,对南亚热带红锥天然更新分布格局的变异解释率达到66.01%,解释效果显著($F=2.0229, P=0.027 < 0.05$)。本研究结果认为土壤全磷含量、土壤pH值、海拔高度、林分上层平均叶倾角、近地层叶面积指数、近地层透光系数等6个因子是影响南亚热带马尾松×红锥混交林红锥天然更新分布格局的关键因子。

参考文献

- [1] 连相汝,鲁法典,刘成杰,等.我国人工林天然更新研究进展[J].世界林业研究,2013,26(6):52-58.
- [2] INKYIN K, SU Y W, MYEONGJA K, et al. Factors affecting natural regeneration of tropical forests across a precipitation gradient in myanmar [J]. Forests, 2018, 9(3):143.
- [3] LUO Q H, CHEN Q M, NING H S, et al. Chronosequence-based population structure and natural regeneration of *Haloxyylon ammodendron* plantation in the southern edge of the Gurbantunggut Desert, Northwestern China [J]. Russian Journal of Ecology, 2017, 48(4):364-371.
- [4] CAUGHLIN T T, DE LA PEÑA - DOMENE M, MARTÍNEZ - GARZA C. Demographic costs and benefits of natural regeneration during tropical forest restoration [J]. Ecology Letters, 2018, 22(1):34-44.
- [5] ROCHA G P E, VIEIRA D L M, SIMON M F. Fast natural regeneration in abandoned pastures in southern Amazonia [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 370:93-101.
- [6] LI Y Y, TSANG E P K, CUI M Y, et al. Too early to call it success: An evaluation of the natural regeneration of the endangered *Metasequoia glyptostroboides* [J]. Biological Conservation, 2012, 150(1):1-4.
- [7] 张树梓,李梅,张树彬,等.塞罕坝华北落叶松人工林天然更新影响因子[J].生态学报,2015,35(16):5403-5411.
- [8] 张恰吟,朱清科,任正龔,等.地形对陕北黄土区衰退沙棘人工林天然更新的影响[J].林业科学研究,2017,30

- (2):300-306.
- [9] 唐继新, 贾宏炎, 曾冀, 等. 南亚热带米老排人工林皆伐迹地天然更新研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(3):59-63.
- [10] 赵总, 贾宏炎, 蔡道雄, 等. 红锥天然更新及其影响因子研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(11):76-83.
- [11] 邓硕坤, 廖树寿, 黄柏华, 等. 广西凭祥红锥人工林天然更新影响因素初探[J]. 广西林业科学, 2013, 42(1):48-51, 60.
- [12] HUANG X M, LIU S R, WANG H, et al. Changes of soil microbial biomass carbon and community composition through mixing nitrogen-fixing species with *Eucalyptus urophylla* in subtropical China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 73:42-48.
- [13] WIJESINGHE D K, JOHN E A, HUTCHINGS M J. Does pattern of soil resource heterogeneity determine plant community structure? An experimental investigation [J]. Journal of Ecology, 2005, 93(1):99-112.
- [14] 朱教君, 康宏樟, 许美玲. 科尔沁沙地南缘樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 人工林天然更新障碍[J]. 生态学报, 2007, 27(10):4086-4095.
- [15] 王蕙, 赵文智, 常学向. 黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异[J]. 生态学报, 2007, 27(5):1731-1739.
- [16] XU X N, WANG Q, SHIBATA H. Forest structure, productivity and soil properties in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Okinawa, Japan [J]. Journal of Forestry Research, 2008, 19(4):271-276.
- [17] 闫海冰, 韩有志, 杨秀清, 等. 关帝山云杉天然更新与土壤有效氮素异质性的空间关联性[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3):533-540.
- [18] 任学敏, 杨改河, 秦晓威, 等. 巴山冷杉-牛皮桦混交林乔木更新及土壤化学性质对更新的影响[J]. 林业科学, 2012, 48(1):1-6.
- [19] 张志东, 韩广轩, 毛培利, 等. 成年个体密度、距海远近及下层植被对烟台黑松海岸林天然更新的影响[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5):782-790.
- [20] 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.
- [21] ZHU J J, MATSUZAKI T, LI F Q, et al. Effects of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 182(1/2/3):339-354.
- [22] 李俊清, 李景文. 中国东北小兴安岭阔叶红松林更新及其恢复研究[J]. 生态学报, 2003, 23(7):1268-1277.
- [23] TER BRAAK C. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis [J]. Ecology, 1986, 67(5):1167-1179.
- [24] BORCARD D, LEGENDRE P, DRAPEAU P. Partialling out the spatial component of ecological variation [J]. Ecology, 1992, 73(3):1045-1055.
- [25] BURRASCANO S, LOMBARDI F, MARCHETTI M. Old-growth forest structure and deadwood: Are they indicators of plant species composition? A case study from central Italy [J]. Plant Biosystems, 2008, 142(2):313-323.

Environmental Factors and Natural Regeneration of *Castanopsis hystrix* in a Tropical *Pinus massoniana* × *C. hystrix* Mixed Plantation in Subtropical China

LI Yunchou¹, ZHOU Xiaoguo¹, WEN Yuanguang^{1,2}, ZHU Hongguang^{1,2}, QIN Zhiwei¹, CAI Daoxiong^{2,3}, JIA Hongyan^{2,3}, LI Xiaoqiong^{1,2}, YOU Yeming^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Guangxi Youyiguang Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi, 532600, China; 3. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi, 532600, China)

Abstract: In order to reveal the key environmental factors affecting the natural regeneration of *Castanopsis hystrix* in a mixed plantation of *Pinus massoniana* × *C. hystrix* in South China, taking the *P. massoniana* × *C. hystrix* mixed plantations afforested in 1983 as the object, 3 experimental plots were selected and 50 investigation sample plots were set to investigate the regenerated seedlings of *C. hystrix*, soil physical and

chemical properties, stand structure and light environment. The results showed that the natural regeneration density of *C. hystrix* varied from $(132\ 353 \pm 7\ 050)$ individuals $\cdot \text{hm}^{-2}$ to $(174\ 219 \pm 15\ 580)$ individuals $\cdot \text{hm}^{-2}$. There were significant differences among the density of the 5 height level of the regenerated seedlings. The density of the I level was the largest, and V level was the smallest. The density decreased as the growth stage increased. Correlation analysis showed that the total phosphorus content of soil had obvious positive effects on level I and level V renewed seedlings of *C. hystrix*, but had more obvious negative effects on the level II and level III seedlings. The level I seedlings were significantly positively correlated to soil pH. The penetration coefficient of the near-surface layer was negatively correlated with the density of seedlings of level I, II, III and IV, and positively correlated with level V. The average leaf angle of the upper layer of the stand and the leaf area index of the near-surface layer were positively correlated with the seedling density of level I, II, III and IV, and negatively correlated with level V. The combination of 25 stand structures and soil environmental factors selected in the study had a significant explanatory effect on the variation of the distribution pattern of natural regeneration of the seedlings, reaching 66.01% ($F = 2.022\ 9, P = 0.027$). Six factors including soil total phosphorus content, soil pH, altitude, upper average leaf angle, near-surface layer area index and near-surface layer light transmission coefficient are the key factors affecting the natural regeneration distribution pattern of the tropical *C. hystrix* in South China.

Key words: *Castanopsis hystrix*, planted forests, natural regeneration, environmental factors

责任编辑:米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>