

林分密度对马尾松林下土壤养分及酶活性的影响^①

赵汝东^{1,2}, 樊剑波¹, 何园球^{1*}, 宋春丽^{1,2}, 屠人凤^{1,2}, 谭炳昌^{1,2}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 以退化马尾松林下土壤为对象, 通过调查我国红壤丘陵区典型林分密度的马尾松人工林, 研究林分密度对土壤养分和土壤酶活性的影响。3 种林分密度中, 1 560 株/hm² 左右中等林分密度的马尾松土壤有机质、全氮、全钾、速效钾、全磷、交换性钙和交换性镁等较高, 但土壤酸化也较严重; 同时, 1 560 株/hm² 左右马尾松林的土壤转化酶活性、脲酶活性和多酚氧化酶活性均较高, 但过氧化氢酶活性表现最低; 林分密度对马尾松土壤酸性磷酸酶活性影响不明显。因此, 适宜林分密度的马尾松人工林一定程度上可改善该区林下土壤肥力及生化强度。

关键词: 马尾松; 林分密度; 土壤养分; 土壤酶活性

中图分类号: S154.1

管理措施对人工林土壤酶活性有较大影响^[1-3]。其中, 林分密度除了对土壤性质、养分循环等有显著影响外^[4-5], 还参与林地生态系统的诸多方面, 如有研究^[6]表明林分密度对植被更新有重要影响; Arévalo 等^[7]指出林分密度显著影响林分群落结构及林分恢复; 姚东和等^[8]研究证实林分密度对林分生物量有显著影响。另外, 在侵蚀严重的地区, 林分密度还会影响水土保持效果^[9]。因此, 林分密度研究受到森林生态学者的重视^[10]。

土壤酶在陆地生态系统中有重要作用, 是表征森林土壤肥力的重要参数, 在林地生态恢复及土壤质量监测中有广泛研究^[11-14]; 此外, 土壤酶活性对生态系统的人为扰动较敏感, 并在土壤生态系统中有重要的生化功能^[15]。近年来, 诸多相关研究指出^[12,16], 土壤酶较之理化性质对疏伐措施响应敏感^[17], 但研究结论尚有分歧^[5,8,10]; 马尾松 (*Pinus massoniana*) 是我国红壤丘陵区植被恢复的主要树种, 但国内关于马尾松林分密度的研究较少。因此, 本文研究林分密度对马尾松林下土壤养分及酶活性的影响, 以期对该区马尾松人工林早期疏伐起一定指导作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于江西省赣县 (25°26' ~ 26°17'N,

114°42' ~ 115°22'E), 花岗岩发育的砖红壤 (钙质湿润富铁土), 中低山丘陵地形地貌, 海拔平均为 400 m 左右, 中亚热带丘陵季风湿润气候, 年均降水量约为 1 423 mm, 集中于 4—6 月, 年均温约为 19.4℃, ≥ 10℃ 积温为 5 528℃, 年均无霜期 289 天。

1.2 研究方法

研究样地位于赣县王母渡镇, 坡度 15° 左右, 坡向南偏东 20° 左右。马尾松为 20 世纪 80 年代末飞播造林, 后经疏伐, 林龄为 20 年左右。研究区林地退化严重, 林下基本无灌木, 草被主要是芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*)。在查阅文献和实地调查基础上, 参照前人研究较多的林分密度、该区马尾松林栽种面积 (代表性) 及林地退化情况, 确定不同密度梯度的马尾松样地。所选样地保证无人工干扰, 样地林分特征如表 1 所示。

调查和采样时间为 2009 年 3 月初。3 种不同林分密度样地随机设置 3 个 10 m × 10 m 样方, 样方间距大于 10 m, 样方内对受植被影响较大的表层土壤 (0~20 cm) 随机采取 5 点组成混合样, 分装于保鲜袋; 土壤样品一部分放于冰箱中 4℃ 冷藏保存, 其他样品避光风干、过筛后备用。凋落物量参照赣县林业局在样地附近 2008 年凋落物的收集工作: 林下设置 3 个 1 m × 1 m 的凋落物收集装置, 定期 (1~2 月) 进行凋落物烘干称重。

①基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-438-1) 和国家科技支撑计划课题项目 (2009BAD6B04) 资助。

* 通讯作者 (yqhe@issas.ac.cn)

作者简介: 赵汝东 (1982—), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: zhrd255@gmail.com

表 1 马尾松样地林分特征

Table 1 Stand characteristics of different *Pinus massoniana* plots

林分密度 (棵/hm ²)	平均胸径 (cm)	冠幅 EW (m) × SN (m)	平均树高 (m)	郁闭度	凋落物 (kg/hm ²)
900	7.0	5.0 × 4.5	8.5	0.6	800
1 560	6.7	4.2 × 4.5	8.5	0.7	1 120
2 230	5.3	3.0 × 2.8	6.0	0.8	690

土壤有机质 (SOM)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK)、速效钾 (AK)、碱解氮 (AN)、土壤黏粒含量 (CC)、pH 值 (水土比 2.5:1)、阳离子交换量 (CEC) 测试采用参考文献 [18] 的方法, 交换性钙 (Ca)、镁 (Mg) 采用氯化铵浸提 ICP-AES 测定的方法。土壤酶活性分析按照关荫松 [13] 和周礼恺 [19] 的方法: 蔗糖酶活性 (INV) 采用 3,5 二硝基水杨酸比色法测定, 脲酶活性 (URE) 采用靛酚蓝比色法测定, 多酚氧化酶活性 (PPO) 采用邻苯三酚比色法测定, 过氧化氢酶活性 (CAT) 采用高锰酸钾滴定法测定, 酸性磷酸酶活性 (ACP) 采用磷酸苯二钠比色法测定。

1.3 统计分析

样地土壤理化性质及酶活性差异评价采用双尾方差分析 (LSD) 方法; 相关性检验采用简单相关分析

(Pearson) 方法。数据统计在 SPSS 16.0 中完成, 制表在 Excel 2003 中完成。

2 结果与分析

2.1 不同林分密度马尾松林下土壤养分性质

马尾松土壤养分性质如表 2 所示。有机质、全氮、全钾、速效钾、交换性钙和交换性镁含量均为中等林分密度样地显著 ($P < 0.05$) 较高; 阳离子交换量也表现为中等密度马尾松林最大, 但与低密度马尾松林差异不显著。土壤全磷含量不同马尾松林分密度表现为: 高密度 > 低密度 > 中密度。中等密度马尾松林的土壤 pH 显著 ($P < 0.05$) 低于高密度和低密度马尾松林。因此, 不同林分密度养分性质差异显著。

表 2 不同林分密度马尾松人工林土壤养分指标

Table 2 Soil nutrient properties in *Pinus massoniana* plantation of different forest density

林分密度 (棵/hm ²)	SOM (g/kg)	TN (mg/kg)	AN (mg/kg)	TP (mg/kg)	TK (g/kg)	AK (mg/kg)	pH	CEC (cmol/kg)	Ca (cmol/kg)	Mg (cmol/kg)
900	5.76 ± 0.11b	231.81 ± 6.28b	36.99 ± 1.91a	205.44 ± 4.37b	15.09 ± 0.63b	3.65 ± 0.20b	4.47 ± 0.02a	4.69 ± 0.12a	0.32 ± 0.05b	0.09 ± 0.01b
1 560	7.95 ± 0.08a	290.72 ± 21.65a	35.84 ± 2.24a	166.76 ± 6.29c	24.06 ± 1.29a	6.22 ± 0.87a	4.37 ± 0.01b	5.08 ± 0.30a	0.81 ± 0.06a	0.16 ± 0.01a
2 230	4.87 ± 0.11c	162.57 ± 6.61c	28.63 ± 1.60b	247.10 ± 3.22a	15.87 ± 0.53b	2.71 ± 0.17b	4.45 ± 0.01a	3.67 ± 0.07b	0.28 ± 0.01b	0.09 ± 0.01b

注: 同列不同字母表示差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 数据为平均值 ± 标准误, 下表同。

土壤养分指标为中等密度马尾松林比高密度和低密度马尾松林高, 与林下调落物 (表 1) 表现一致, 尤其是有机质、全氮、碱解氮和速效钾, 受凋落物和林下植被影响明显 [5]。随着林分密度由低到中等, 凋落物量加大, 养分积累也增加, 而随林分密度进一步加大至高密度, 凋落物总量减少, 有机质及其他养分含量也降低。土壤中钾主要来源于母质风化, 但全钾含量也表现出与凋落物量一致的规律, 原因可能是: 对易缺钾的酸性土壤 [20] 而言, 凋落物的贡献愈显重要。土壤全磷亦受母质矿化影响, 相关分析显示, 土壤全磷与凋落物量间存在极显著性负相关关系 ($r = -0.818$, $P < 0.01$, $n = 9$), 原因可能在于中等密度马

尾松整体生物量较高, 对土壤中磷耗竭较大, 凋落物输入不及马尾松的吸收 [21]。因此对于严重退化马尾松人工林, 林分密度通过影响马尾松长势而影响土壤全磷含量, 在易缺磷的红壤地区更为明显。酸化是研究区域较为严重的问题, pH 研究结果表明中等密度马尾松林酸化最严重, 相关分析显示, pH 与凋落物间负相关极显著 ($r = -0.860$, $P < 0.01$, $n = 9$), 因此, 研究样地土壤酸化受凋落物影响, 可能与凋落物降解过程分泌出的有机酸有关 [22]。阳离子交换量受有机质影响 [23], 在中密度马尾松林地土壤中表现最高, 二者相关性呈极显著正相关 ($r = 0.829$, $P < 0.01$, $n = 9$)。另外, 速效钾一定程度上也受阳离子交换量影响 [23]。

对于酸性土壤而言,钙和镁是易缺乏的元素,土壤酸化一般伴随着钙离子的流失^[21],但酸度较高的中密度马尾松林土壤中,交换性钙镁均显著高于其他两种密度马尾松林。交换性钙镁的损失途径主要为淋失和植被吸收^[21],所以可能的原因是 3 种林分密度马尾松退化严重,受淋洗影响差别不大,而马尾松林地酸化主要来源于凋落物降解,但凋落物同时也增加钙镁输入,因此,交换性钙镁在中密度马尾松林地土壤中最

高。

2.2 不同林分密度马尾松土壤酶活性

马尾松林下土壤酶活性如表 3 所示。酶活性受马尾松林分密度影响明显。脲酶活性在中密度马尾松林显著 ($P<0.05$) 高于低密度和高密度马尾松林;转化酶活性和多酚氧化酶活性均为中密度>低密度>高密度;过氧化氢酶活性则表现为低密度>高密度>中密度;酸性磷酸酶活性林分密度间无统计性差异。

表 3 不同林分密度马尾松人工林土壤酶活性

Table 3 Soil enzyme activities in *Pinus massoniana* plantation of different forest density

林分密度 (棵/hm ²)	脲酶活性 (NH ₃ -N, mg/(g·24h))	酸性磷酸酶活性 (p-nitrophenol, mg/(g·24h))	转化酶活性 (glucose, mg/(g·24h))	过氧化氢酶活性 (KMnO ₄ , ml/(g·20 min))	多酚氧化酶活性 (gallnut, mg/(g·3h))
900	0.31 ± 0.01 b	0.25 ± 0.03 a	6.15 ± 0.06 b	0.16 ± 0.01 a	329.11 ± 8.77 b
1 560	0.37 ± 0.01 a	0.19 ± 0.02 a	6.57 ± 0.14 a	0.12 ± 0.01 b	370.79 ± 8.51 a
2 230	0.29 ± 0.01 b	0.28 ± 0.02 a	5.70 ± 0.07 c	0.14 ± 0.01 ab	214.47 ± 5.21 c

土壤酶活性受土壤微生物、根系分泌及动植物残体分解等影响^[15]。土壤转化酶可促进小分子糖的分解,与土壤有机质关系密切;土壤脲酶可促使土壤有机氮向挥发态或植物有效态转化,受土壤有机质含量、速效氮等因素影响^[24];多酚氧化酶可促进分解土壤中的芳香类物质,降低其对土壤及土壤生物的毒害^[15]。因此,中密度马尾松林有利于土壤有机物质降解、土壤有机氮向有效态氮转化、土壤中芳香类物质分解;低密度和高密度马尾松林在有机物降解及促进土壤有机氮转化方面相对较弱,并且林下土壤中芳香类物质呈相对积累态势。虽然中密度马尾松人工林凋落物量最高,但根系生物量一般随林分密度升高而变大^[8],且高密度林分根系在土壤中分布较广,而酶活性并未表现出这种随林分密度增大而升高的趋势,所以研究中马尾松根系对酶活性的影响尚需进一步证实;表 4 中 3 种酶活性与土壤全氮、土壤有机质间的显著或极显著正相关关系表明 3 种酶活性受有机质影响。所以中等密度土壤转化酶活性、土壤脲酶活性和多酚

氧化酶活性较高与凋落物及有机质和全氮含量较高有关。

土壤过氧化氢酶活性反映土壤对过氧化氢的分解能力^[13],研究结果与多酚氧化酶活性相反,中密度马尾松林下土壤对过氧化氢分解能力表现最弱,低密度马尾松林表现最强。原因在于中密度林凋落物量较高,而凋落物降解过程中可能会抑制过氧化氢酶的分泌^[15]。因此,中密度马尾松林中伴随着凋落物量的增加,过氧化氢类物质可能也相对累积,这与 pH 表现类似,两者间的相关性亦达显著水平 ($r=0.705$, $P<0.05$)。土壤酸性磷酸酶通过酶促作用可加速有机磷脱磷而提高磷有效性,在磷含量较低时会刺激磷酸酶的分泌^[25-26],结果表明,虽然中密度马尾松林土壤全磷含量(表 2)较低,但并未对酸性磷酸酶起到诱导作用,因为全磷含量并不能反映可被植物直接吸收的有效磷含量(3 样地土壤有效磷均未检出),表 4 中酸性磷酸酶活性与全磷含量间的相关性亦不显著,因此,林分密度对酸性磷酸酶分泌并无显著影响。

表 4 土壤酶活性与土壤化学性质间相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil enzyme activities and soil chemical properties

	ACP	INV	CAT	PPO	SOM	TN	AN	TP	TK	AK	PH
URE	-0.745*	0.811**	-0.558	0.794*	0.942**	0.848**	0.451	-0.870**	0.798**	0.867**	-0.723*
ACP		-0.564	0.288	-0.713*	-0.711*	-0.764*	-0.465	0.599	-0.472	-0.544	0.434
INV			-0.365	0.895**	0.894**	0.788*	0.520	-0.981**	0.807**	0.881**	-0.611
CAT				-0.066	-0.489	-0.183	0.058	0.348	-0.717*	-0.523	0.705*
PPO					0.864**	0.924**	0.704*	-0.932**	0.599	0.755*	-0.467

注: **表示双尾相关性达到 $P<0.01$ 显著水平, *表示双尾相关性达到 $P<0.05$ 显著水平。

3 结论

3 种林分密度中, 1 560 株/hm²左右林分密度的马尾松林下土壤有机质、全氮、全钾、速效钾、全磷、交换性钙和交换性镁等性质显著较高, 但土壤酸化也较严重。1 560 株/hm²左右马尾松土壤转化酶活性、脲酶活性和多酚氧化酶活性均较高, 但过氧化氢酶活性最低; 马尾松林分密度对酸性磷酸酶活性影响不显著。因此, 适宜的林分密度会显著提高土壤养分含量及生化强度, 这对马尾松人工林早期抚育措施有一定指导意义。

参考文献:

- [1] 周玮, 周运超. 北盘江喀斯特峡谷区不同植被类型的土壤酶活性. 林业科学, 2010, 46(1): 136-141
- [2] 张崇邦, 金则新, 柯世省. 天台山不同林型土壤酶活性与土壤微生物、呼吸速率以及土壤理化特性关系研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 51-56
- [3] Selman PC, Hart SC, Boyle SI, Stark JM. Red alder (*Alnus rubra*) alters community-level soil microbial function in conifer forests of the Pacific Northwest, USA. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(10): 1 860-1 868
- [4] 赵广亮, 王继兴, 王秀珍, 沈应柏, 周金池. 油松人工林密度与养分循环关系的研究. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 39-44
- [5] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华. 马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2 323-2 331
- [6] Chen XY. Effects of plant density and age on the mating system of *Kandelia candel* Druce (Rhizophoraceae), a viviparous mangrove species. Hydrobiologia, 2000, 432(1): 189-193
- [7] Arévalo JR, Fernández-Palacios JM. From pine plantations to natural stands. Ecological restoration of a *Pinus canariensis* Sweet, ex Spreng forest. Plant Ecology, 2005, 181(2): 217-226
- [8] 姚东和, 杨民胜, 李志辉. 林分密度对巨尾桉生物产量及生产力的影响. 中南林学院学报, 2000, 20(3): 20-23
- [9] 张建军, 毕华兴, 魏天兴. 晋西黄土区不同密度林分的水土保持作用研究. 北京林业大学学报, 2002, 24(3): 50-53
- [10] 刘玉宝. 29 年生杉木林下植物多样性与密度的关系. 福建林学院学报, 2005, 25(1): 27-30
- [11] Makoi JHJR, Ndakidemi PA. Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem. African Journal of Biotechnology, 2008, 7(3): 181-191
- [12] Zhang YM, Wu N, Zhou GY, Bao WK. Changes in enzyme activities of spruce (*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. Applied Soil Ecology, 2005, 30(3): 215-225
- [13] 关荫松. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986: 275-276, 296-297, 310-313, 324-325
- [14] Kandeler E, Tschirko D, Spiegel H. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. Biology and Fertility of Soils, 1999, 28(4): 343-351
- [15] Gu Y, Wang P, Kong CH. Urease, invertase, dehydrogenase and polyphenoloxidase activities in paddy soil influenced by allelopathic rice variety. European Journal of Soil Biology, 2009, 45(5/6): 436-441
- [16] 刘福德, 孔令刚, 安树青, 王华田, 姜岳忠, 高华林. 连作杨树人工林不同生长阶段林地内土壤微生态环境特征. 水土保持学报, 2008, 22(2): 121-125
- [17] 李国雷, 刘勇, 李俊清, 李瑞生. 油松飞播林土壤质量评判及其调控. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(3): 19-24
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12-13, 24-26, 106-108, 146-195, 266
- [19] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1987: 267-268
- [20] 王效举. 红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤变化特征的研究. 资源科学, 1998, 20(S1): 24-31
- [21] Federer CA, Hornbeck JW, Tritton LM, Martin CW, Pierce RS, Smith CT. Long-term depletion of calcium and other nutrients in eastern US forests. Environmental Management, 1989, 13(5): 593-601
- [22] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原小流域土壤 pH, 阳离子交换量和有机质分布特征. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2 710-2 715
- [23] 刘世全, 蒲玉琳, 张世熔, 王昌全, 邓良基. 西藏土壤阳离子交换量的空间变化和影响因素研究. 水土保持学报, 2004, 18(5): 1-5
- [24] 杨承栋, 孙启武, 焦如珍. 大青山二代马尾松土壤性质变化与地力衰退关系的研究. 土壤学报, 2003, 40(2): 267-273
- [25] 郑诗樟, 肖青亮, 吴蔚东, 何园球. 丘陵红壤不同人工林型土壤微生物类群、酶活性与土壤理化性状关系的研究. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 57-61
- [26] 杨玉盛, 邱仁辉, 俞新妥, 黄宝龙. 杉木连栽土壤微生物及生化特性的研究. 生物多样性, 1999, 7(1): 1-7

Effects of Stand Density on Soil Nutrients and Enzyme Activities in *Pinus massoniana* Plantation

ZHAO Ru-dong^{1,2}, FAN Jian-bo¹, HE Yuan-qiu¹, SONG Chun-li^{1,2}, TU Ren-feng^{1,2}, TAN Bing-chang^{1,2}

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The effects of stand density on soil nutrients and enzyme activities were studied through investigating typical plots of *Pinus massoniana* plantation in the hilly red soil region in southern China. *Pinus massoniana* plantation of middle stand density (1 560 tree/hm²) had higher levels of soil organic matter, total nitrogen, total potassium, exchangeable calcium and exchangeable magnesium but with the most serious soil acidification phenomenon. At the same time, also had higher soil invertase, urease and polyphenoloxidase activities in *Pinus massoniana* plantation of 1 560 tree/hm². But soil catalase activity was lowest in the *Pinus massoniana* plantation of middle stand density. Soil acid phosphatase activity did not respond obviously to the variation of stand density. Therefore, *Pinus massoniana* plantation with appropriate stand density can improve soil fertility and soil enzyme activities to some extent in the study region.

Key words: *Pinus massoniana*, Stand density, Soil nutrients, Soil enzyme activities