

杉木×观光木异龄复层混交对林木生长及土壤理化性质的影响

刘 涛¹,王家妍¹,李万年²,莫雅芳¹,杨 梅^{2*}

(1. 广西国有高峰林场,广西 南宁 530001;2. 广西大学 林学院,广西 南宁 530004)

摘 要:为探究杉木纯林引入观光木转化为异龄复层林后土壤理化性质和土壤养分含量的变化特征,以及驱动土壤肥力变化的主要影响因子,以观光木纯林、杉木纯林和杉木林下套种观光木形成的杉木×观光木异龄复层林为对象,测定了3种林型下林分生长、林地土壤理化性质和养分含量及其化学计量比等指标,分析杉木×观光木异龄复层林林分结构、林木生长和土壤肥力质量特点。结果表明:1)异龄复层林中观光木和杉木的树高、胸径分别为5.3 m、2.52 cm和18.56 m、20.19 cm,显著高于纯林;2)3种林型间土壤物理性质差异显著。异龄复层林相比较纯林,土壤密度降低4.84%~11.94%,土壤孔隙度分别增加10.29%~22.27%,持水量增加8.62%~34.54%,有效改善了土壤孔隙结构和持水状况。3)各层土壤有机质、全N、全P、全K及速效养分与观光木、杉木纯林均差异显著,土壤养分含量随着土层加深而递减。各养分含量分别比杉木、观光木纯林高出7.87%~41.31%、14.32%~53.57%,各层土壤有机质和养分含量由大到小呈现为:异龄复层林、杉木纯林、观光木纯林。4)异龄复层林中C:N、C:P平均值分别为16.62、61.46,均低于杉木和观光木纯林,促进了土壤中N、P的有效释放。因此,在异龄复层林中观光木获得更适宜其生长的良好的遮阴环境,2个树种间形成生态位互补,提高了空间和自然资源的利用率,促进了树木生长。异龄复层林能显著提高土壤有机碳和养分含量,且明显高于纯林,在杉木林中套种观光木能加快土壤微生物的转化和矿化作用。

关键词:异龄复层混交林;林分改造;观光木混交;土壤理化性质;土壤养分化学计量比

中图分类号:S725.2

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)01-0125-06

Growth and Soil Physicochemical Properties in the Mixed Forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongioden odorum* in Different Aged and Multi-Layer Forests

LIU Tao¹, WANG Jia-yan¹, LI Wan-nian², MO Ya-fang¹, YANG Mei^{2*}

(1. Gaofeng State-Owned Forest Farm, Nanning 530001, Guangxi, China;

2. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract: In order to explore the change characteristics of soil physical and chemical properties and soil nutrient contents and the main factors driving the changes of soil fertility after the introduction of *Tsoongioden odorum* into the pure forest of *Cunninghamia lanceolata*, in this study, three forest types were used as the research objects, i. e., pure *T. odorum* and *C. lanceolata* forests, different-aged and multi-layered mixed forest of *T. odorum* & *C. lanceolata*. The stand growth index, soil physicochemical properties, nutrient contents and stoichiometric ratios of three forest types were measured. The stand structure, forest growth and soil fertility characteristics were analyzed. The results showed that 1) the values of the tree height and diameter at breast height (DBH) of *C. lanceolata* and *T. odorum* in the mixed forest were 5.3 m, 2.52 cm

收稿日期:2021-01-28 修回日期:2021-02-23

基金项目:广西林业科技推广示范项目(桂林科研[2021]21号);广西创新驱动发展专项(桂科AA17204087-8);国家重点研发计划项目(2017YFD0601101-2)。

第一作者:刘 涛,高级工程师。研究方向:森林培育及林业管理。E-mail:750904887@qq.com

* 通信作者:杨 梅,教授。研究方向:森林培育及地力维持。E-mail:fjyangmei@126.com

and 18.56 m, 20.19 m, respectively, which were significant higher than those in pure forest. 2) There were significant differences in soil physical characteristics among soil layers of 3 forest types. Compared with the pure forests, the soil density of the mixed forest decreased by 4.84%–11.94%, the soil porosity increased by 10.29%–22.27%, the water holding capacity increased by 8.62%–34.54%, and the soil pore structure and water holding capacity were improved. 3) There were significant differences in soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium and available nutrients among pure and mixed forests. The nutrient contents of the mixed forest were 7.8741.31% and 14.32%–53.57% higher than those of *C. lanceolata* and *T. odorum* pure forests, respectively. The contents of soil organic matter and nutrients were in the order of mixed forest, pure *C. lanceolata* forest, pure *T. odorum* forest. 4) The average values of soil C : N and C : P ratios in mixed forest were 16.62 and 61.46, respectively, which were lower than those of pure forests, indicating that in the mixed forest, both soil N and P effectively released. It was concluded that in the mixed forest, the *T. odorum* could obtain a better shade environment suitable for its growth, and the niche complementarity between the two tree species was formed, which improved the utilization rate of space and natural resources, and promoted the growth of trees. The contents of soil organic carbon and nutrients in the mixed forest were significantly higher than those in pure forest. Intercropping *T. odorum* in *C. lanceolata* forest could accelerate the transformation and mineralization of soil microorganisms.

Key words: different-aged and multi-layered mixed forest; stand transformation; *Tsoongioden odorum* mixed forest; soil physicochemical property; soil nutrient stoichiometry

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国特有的亚热带地区重要的人工用材林树种,人工林种植面积占我国人工林面积的18%^[1]。经营实践证明,长期营造杉木纯林存在树种结构单一、多样性下降、森林生态系统脆弱、林木生产力和立地质量下降等问题^[2]。相关研究表明,营建混交林能有效改善土壤养分,促进林木生长,提高林分结构稳定,增加物种多样性,改善林内生态环境^[3-4]等,孙思怡等^[5]研究指出,杉木林下套种阔叶树能明显改善土壤养分、微生物量、生态酶活性以及生态酶化学计量比。黄钰辉等^[6]研究指出,南亚热带杉阔混交林在土壤pH、速效N和速效P质量分数方面均有效升高,土壤改良作用明显。曾翼等^[7]对杉木人工林间伐后套种阔叶树种生长进行动态研究,发现大叶栎(*Quercus griffithii*)在杉木林下生长速度最快,林下光环境直接影响套种树种选择。康希睿等^[8]研究表明,构建密度适宜的杉木-樟木(*Sassafras tzumu*)-栎属树种中度混交林能提高林下更新潜力,增加群落的物种丰富度,优化林分结构。因此,营建杉木混交林,是解决杉木人工纯林主要问题和维持杉木可持续发展的有效途径。

观光木(*Tsoongioden odorum*)是木兰科观光木属的常绿乔木,木材性质优良,树皮、树根等器官含有抗癌药效成分,树叶、树枝可以用于提炼香精和香茶等,因曾遭受严重破坏,致使其野生资源极度稀少和种群数量不断减少,被列为国家珍稀濒危二级

保护植物^[9-10]。因此,为了保护观光木,扩大其种群数量,同时提高杉木人工林生态系统的持续生产力和稳定性,增加物种多样性,对杉木人工纯林进行改造试验,合理利用杉木成熟林的生长环境和观光木在幼龄林时期比较耐荫的生物学特性,在杉木人工林中引入观光木,构建杉×阔异龄复层混交林,充分利用2个树种在垂直空间上的互补生态位资源、高效利用自然资源、促进观光木的生长、改善立地条件,维持林地土壤肥力和生产力等。本研究通过分析杉木纯林、观光木纯林和杉木×观光木异龄复层混交林3种林分类型的林木生长指标、土壤理化性质、土壤养分含量及其化学计量比特征,探索不同营林模式下观光木和杉木的生长状况及林地土壤环境的变化规律。以了解不同林冠组成下杉木林和观光木的土壤养分限制状况,达到促进林木生长、提质增效,有效保护珍稀濒危树种等多重效益。对综合评价杉木和观光木人工林土壤肥力特征以及林木养分利用效率具有参考价值,也为退化土壤生态系统恢复和人工林持续经营管理,建立树种多样、结构合理、功能齐全、长期稳定的森林生态系统提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于广西现代林业科技示范园优良树种展示区(108°07′–109°21′E, 22°50′–23°33′N),低

丘陵山地地貌,属亚热带季风气候区,年平均气温 21.0℃,年降水量 1 200~1 500 mm,年日照时数 1 450~1 650 h,相对湿度大于 80%^[11]。成土母质以砂页岩为主,土壤为酸性赤红壤,质地中壤至轻黏,土层厚度 60~90 cm,表土层厚度 20 cm,平均 pH 值为 4.0~5.0,肥力中等。展示区内森林覆盖率 91.77%,林下常见植被有野漆(*Toxicodendron succedaneum*)、三叉苦(*Evodia lepta*)、山仓子(*Litsea cubeba*)、东方乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、铁芒箕(*Dicranopteris dichotoma*)、扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)等。

1.2 试验林营造

试验林地于 1995 年种植杉木纯林,苗木为广西区内 1 年生裸根苗,初植密度 2 500 株·hm⁻²,2003、2008、2013 年对杉木进行间伐。2013 年间伐后林地保留杉木 600 株·hm⁻²,同年按照 750 株·hm⁻² 的密度在杉木林下套种观光木,套种后杉木与观光木树种比例为 4:5;皆伐林地按照 1 350 株·hm⁻² 营造观光木纯林,观光木均为 1 年生实生苗(平均苗高 30 cm)。造林后,对观光木抚育 3 a,每年扩坎施肥 1 次,全林分割草抚育 2 次。

1.3 试验方法

1.3.1 样地设置和林木调查 2017 年 7 月,在杉木纯林、观光木纯林和杉木×观光木异龄复层林 3 种林地内,选择林木生长均匀的地段,遵循垂直等高线原则分别设置 3 个 20 m×20 m 样方。对样方内的林木进行每木调查,包括林木的胸径、树高、冠幅、地径、单株生物量等。

1.3.2 土壤采样 在每一个样地内选择未受人为干扰、植被结构和土壤具有代表性的地段,采取对角线法^[12],按照上、中、下坡位设置 3 个土壤样点,按照 0~20(A 层)、20~40 cm(B 层)从下而上分层采样,采用环刀法采集土壤样品用于测定土壤密度、总孔隙度等物理性质。同时使用土壤取样器分层采集土壤样品,并写好标签,做好标记后装到无菌塑封袋中带回实验室,室温下风干,除去植物根系、石砾等杂质,研磨过 60 目筛后将同一样地同一土壤层样品

混合均匀,按四分法选取后用于化学分析测定。

1.3.3 土壤理化性质测定 参照 GB 7848-7858-78《森林土壤养分分析》处理土壤样品。用 pH 计测定土壤的 pH,土壤有机碳(SOC)采用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 氧化法进行测定,土壤中全 N(TN)采用凯氏定氮法测定,水解 N 采用苯酚-次氯酸盐比色法测定,全 P(TP)用钼锑抗比色法测定,速效 P 用双酸浸提-钼蓝比色法测定,全 K(TK)用碱熔-钼锑抗比色法测定,速效 K 用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 对数据进行数据统计,用 SPSS 19.0 进行 T-检验、单因素方差分析、Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 生长情况

从表 1 可以看出,造林 4 a 后,异龄复层林中杉木树高远大于林中的观光木,形成明显异龄复层林分结构。异龄复层林中杉木树高和胸径分别为 18.56 m、20.19 cm,分别比杉木纯林高出 25.15%、9.79%。异龄复层林与纯林观光木的保存率分别为 87.24%和 76.67%,说明观光木早期生长更能适应杉木林下环境。观光木纯林平均树高、胸径、冠幅分别为 5.3 m、2.52 cm、1.55 m,观光木×杉木异龄复层林平均树高、胸径、冠幅分别为 5.4 m、2.7 cm、1.60 m。经 T-检验分析比较,异龄复层林中杉木和观光木胸径、树高均显著高于纯林($P<0.05$),综合以上指标,杉木×观光木异龄复层混交经营模式有利于杉木和观光木的生长。

林分直径分布是林分内不同直径林木按一定径阶排列的分布状态,以 2 cm 为 1 个径阶,2 种林分内观光木各径阶分布株数见图 1。混交后的株数径阶主要集中在 4~8 cm,而纯林在 6 径阶的分布明显高于纯林的其他径阶,约占纯林林分的 55%,相对来说,混交林中观光木的径阶分布范围较广,纯林内径阶分布范围更集中。

表 1 不同林分类型林木的生长情况

Table 1 Growth situations of different forest types

林分类型	树种	林龄/a	造林密度 (株·hm ⁻²)	保存率 /%	生长指标		
					平均胸径/cm	平均树高/m	平均冠幅/m
纯林	杉木	22	600	—	18.39±1.01b	14.83±1.18b	3.40±1.02a
	观光木	4	1 350	86.67	5.30±0.32b	2.52±0.59b	1.55±0.79a
异龄复层林	杉木	22	600	—	20.19±1.81a	18.56±1.64a	3.30±1.26a
	观光木	4	750	76.24	5.47±0.28a	2.74±0.17a	1.60±0.59a

注:同列数据不同小写字母表示同树种总体均值经 T-检验后在 α=0.05 水平上差异显著。

2.2 土壤分析

2.2.1 不同林分土壤物理性质分析 由表 2 可知, 异龄复层林各层土壤密度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度与观光木、杉木纯林均存在显著差异 ($P < 0.05$), 异龄复层林物理性质均比纯林有不同程度的改善。3 种林分土壤密度为 $1.18 \sim 1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 土壤密度随着土层加深而增加。异龄复层林 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层土壤密度分别为 1.18 、 $1.27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 分别比观光木纯林下降 11.94% 和 10.56% , 比杉木纯林下降 4.84% 、 5.93% 。在同层土壤的孔隙度比较中, 异龄复层林土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度均大于观光木和杉木纯林, 相比纯林分别增加 $10.29\% \sim 22.27\%$ 。杉木林下套种观光木后土壤密度减少, 孔隙度增加, 表明异龄复层林有利于改善土壤内部结构, 土壤结构更加疏松, 透气性更好, 有利于土壤养分和水分输送。

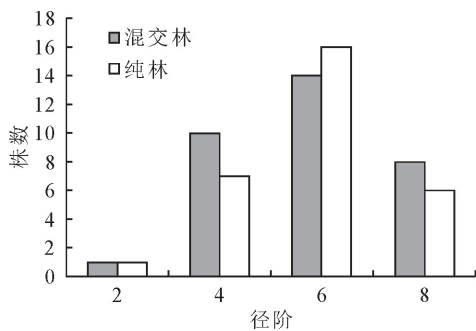


图 1 不同林分类型内观光木径阶分布

Fig. 1 Diameter distribution of *Tsongioden odorum* in different forest types

从表 2 可知, 异龄复层林 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤层的最大持水量、毛管持水量和田间持水量分别比观光木纯林提高 34.54% 、 25.23% 、 33.01% , 比杉木纯林提高 8.62% 、 8.32% 、 12.11% ; $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土壤层最大持水量、毛管持水量和田间持水量分别比观光木纯林增加 14.46% 、 18.26% 、 18.35% , 比杉木纯林提高 6.99% 、 4.00% 、 16.01% , 表明杉木林林下套种观光木后较观光木、杉木纯林的土壤持水量有所增加。

2.2.2 不同林分土壤化学性质分析 由表 3 可知, 异龄复层林土壤 pH 较纯林有所提高, 各层土壤有机质、全 N、全 P、全 K 及速效养分与观光木、杉木纯林均存在显著差异 ($P < 0.05$), 土壤养分含量随着土层加深而递减。3 种林分土壤有机碳、全 N、全 P 平均含量分别为 27.79 、 1.52 、 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中异龄复层林表层土壤 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 有机质、全 N、全 P、全 K、水解 N、速效 P、速效 K 比观光木纯林提高

34.63% 、 68.31% 、 58.97% 、 21.99% 、 59.88% 、 70.72% 、 28.73% , 比杉木纯林提高 20.75% 、 44.98% 、 67.57% 、 20.87% 、 39.52% 、 61.28% 、 18.94% ; 异龄复层林 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土壤层有机质分别比杉木和观光木纯林提高 29.00% 、 35.06% , 各养分含量分别比杉木、观光木纯林高出 $7.87\% \sim 41.31\%$ 、 $14.32\% \sim 53.57\%$, 说明异龄复层林对表层土壤的有机质和养分的影响更为强烈, 对表层土壤 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 影响超过更深层次 ($20 \sim 40 \text{ cm}$) 的土壤。各层土壤有机质和养分含量由大到小呈现为: 异龄复层林、杉木纯林、观光木纯林。

表 2 不同林分土壤物理性质比较

Table 2 Comparison of soil physical properties of different stands

指标	林型	土层	
		0~20 cm	20~40 cm
土壤密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	异龄复层林	$1.18 \pm 0.06\text{b}$	$1.27 \pm 0.08\text{b}$
	观光木纯林	$1.44 \pm 0.07\text{a}$	$1.52 \pm 0.05\text{a}$
	杉木纯林	$1.24 \pm 0.09\text{b}$	$1.24 \pm 0.09\text{b}$
最大持水量 / %	异龄复层林	$44.25 \pm 4.14\text{a}$	$32.77 \pm 2.13\text{a}$
	观光木纯林	$32.89 \pm 3.28\text{c}$	$28.63 \pm 3.23\text{c}$
	杉木纯林	$40.74 \pm 2.53\text{b}$	$30.63 \pm 2.67\text{b}$
毛管持水量 / %	异龄复层林	$32.41 \pm 2.86\text{a}$	$28.37 \pm 1.01\text{a}$
	观光木纯林	$25.88 \pm 2.32\text{c}$	$23.97 \pm 1.87\text{c}$
	杉木纯林	$29.92 \pm 1.92\text{b}$	$26.62 \pm 1.27\text{b}$
田间持水量 / %	异龄复层林	$23.97 \pm 2.01\text{a}$	$22.53 \pm 2.38\text{a}$
	观光木纯林	$18.02 \pm 3.01\text{c}$	$17.41 \pm 2.12\text{c}$
	杉木纯林	$21.38 \pm 2.32\text{b}$	$19.42 \pm 1.74\text{b}$
毛管孔隙度 / %	异龄复层林	$38.25 \pm 1.65\text{a}$	$36.04 \pm 1.12\text{a}$
	观光木纯林	$34.68 \pm 1.22\text{c}$	$34.04 \pm 1.35\text{b}$
	杉木纯林	$37.10 \pm 2.02\text{b}$	$35.94 \pm 1.28\text{a}$
非毛管孔隙度 / %	异龄复层林	$13.89 \pm 1.17\text{a}$	$11.62 \pm 1.22\text{a}$
	观光木纯林	$11.36 \pm 0.96\text{c}$	$10.53 \pm 0.86\text{c}$
	杉木纯林	$12.76 \pm 0.79\text{b}$	$11.01 \pm 0.82\text{b}$
总孔隙度 / %	异龄复层林	$52.14 \pm 2.89\text{a}$	$47.66 \pm 1.35\text{a}$
	观光木纯林	$46.04 \pm 1.29\text{c}$	$44.57 \pm 1.17\text{c}$
	杉木纯林	$49.86 \pm 2.04\text{b}$	$46.95 \pm 1.21\text{b}$

注: 同列数据不同小写字母表示在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著。下同。

3 结论与讨论

刘金炽等^[13]研究发现, 观光木幼树耐荫, 生长需要一定的荫蔽条件, 适度遮阴有利于观光木的生长。聂颖^[14]开展杉木林冠下套种 4 个树种试验结果显示, 观光木对 II 立地级、郁闭度 0.6 的杉木林下条件适应能力最强。本研究结果与上述研究结果基本一致, 异龄复层林中观光木胸径、树高、单株生物量分别比纯林增加 3.21% 、 8.73% 、 18.52% , 并且复层林中杉木胸径、树高分别比杉木纯林提高

表 3 不同林分土壤有机质和养分含量比较

Table 3 Comparison of soil organic matter and nutrient contents in different stands

土层	林分	pH 值	有机质 /(mg· g ⁻¹)	全 N /(mg· g ⁻¹)	全 P /(mg· g ⁻¹)	全 K /(mg· g ⁻¹)	水解 N /(mg· kg ⁻¹)	速效 P /(mg· kg ⁻¹)	速效 K /(mg· kg ⁻¹)	C : N	C : P
A	异龄复层林	4.80	40.74±1.94a	2.39±0.02a	0.62±4.14a	22.41±0.12a	80.23±2.31a	3.79±0.12a	278.64±4.62a	17.05a	65.71a
	观光木纯林	4.68	30.26±1.37b	1.42±0.02c	0.39±0.03b	18.37±0.09b	50.18±1.73c	2.22±0.04b	216.45±3.46c	21.31b	77.59b
	杉木纯林	4.45	33.74±1.01b	1.56±0.03b	0.37±0.04b	18.54±0.12b	63.24±3.01b	2.35±0.06b	234.26±2.79b	21.63b	91.19c
B	异龄复层林	4.63	24.60±1.25a	1.52±0.05a	0.43±0.03a	18.97±0.10a	68.23±1.15a	3.01±0.07a	144.68±4.04a	16.18a	57.21a
	观光木纯林	4.52	18.35±1.58b	1.05±0.09b	0.30±0.02b	14.32±0.15c	44.55±1.14c	1.96±0.10b	126.56±3.81c	16.09a	61.17b
	杉木纯林	4.30	19.07±1.39b	1.16±0.05b	0.33±0.03b	16.17±0.17b	52.07±1.74b	2.13±0.07b	134.12±3.20b	16.44a	57.79a

注:土层 A 表示 0~20 cm,B 表示 20~40 cm。

25.15%、9.79%。在杉木×观光木异龄复层林中,杉木形成上层林分结构,为观光木生长提供良好的遮阴环境,2 种树种形成生态位互补,提高空间和资源的利用率,促进树种生长。

杉木等一般针叶树凋落物凋落物紧密、含单宁物质较多,不利于养分分解和归还^[15]。刘涛等^[16]研究表明,在杉木林下套种华盖木、亮叶木莲、红豆后,整体上改善原杉木纯林的土壤理化性质,木兰科树种与杉木异龄混交表现为相互促进的种间关系。乐兴钊^[17]在杉木林下套种闽粤栲,林分土壤肥力提高 19.05%。本研究在杉木林下套种观光木后,增加不同土壤层次中根系的分布,根系分布空间更加复杂,凋落物种类和数量增多,分解速率和养分归还加快,土壤密度变小,利于土壤孔隙和持水状况改善,土壤结构变得更加疏松,土壤养分含量增加,促进杉木和观光木林木生长。观光木纯林是在原杉木林皆伐后种植的,受到人工整地、抚育等管理活动影响,土壤结构被破坏,且林分处于幼林期,凋落物减少,腐化程度降低,导致在 3 种林分理化性质表现中观光木纯林表现最差。

土壤中有有机碳和营养元素主要来源于林分的凋落物分解,后随着雨水向下淋溶,因此本研究中土壤有机碳和营养元素随着土层加深而递减,出现表聚效应,这与苟丽晖等^[18]的研究结果一致。C、N、P 是植物生长必须的大量元素,土壤中有有机碳、N、P 直接影响植物生长、群落的结构和功能^[19-21]。杉木×观光木异龄复层林土壤有机质、全 N、全 P、全 K、水解 N、速效 P、速效 K 含量均高于杉木、观光木纯林,说明异龄混交能显著提高土壤有机碳和养分含量。本研究中 3 种林分土壤有机碳、全 N、全 P 平均含量分别为 27.79、1.52、0.41 mg·g⁻¹,有机碳、全 N 高于全国水平(11.12、1.06 mg·g⁻¹),全 P 含量低于全国水平(0.65 mg·g⁻¹)^[22],说明本研究试验地中土壤 P 元素严重缺乏。可能是因为本研究区域属于亚热带季风气候,处于低纬度地区,雨热同期,土壤淋溶作用强烈,导致土壤移动性较强的有效

P 含量减少;另外,研究区域土壤为典型的酸性赤红壤,土壤中铁、铝活性较强,与有效 P 形成固定态铁磷和铝磷,难以被植物吸收。

土壤化学计量比是反映土壤有机质和养分有效性的重要指标,比如土壤中 C : N、C : P 是判断土壤 C、N、P 矿化和固持作用的重要表征,一般认为 C : N、C : P 比值越小,微生物转化速率越快,土壤矿化和固持作用越好^[23-24]。本研究中异龄复层林中 C : N、C : P 平均值分别为 16.62、61.46,均低于杉木和观光木纯林,说明在杉木林中套种观光木能加快土壤微生物的转化和矿化作用,更有利于土壤有机质分解速率和 N、P 有效释放。

参考文献:

[1] 徐海东,苑海静,熊静,等.杉阔异龄复层林对土壤团聚体稳定性和有机碳及养分储量的影响[J].林业科学研究,2020,33(3):107-115.
XU H D, YUAN H J, XIONG J, et al. Effects of uneven-aged *Cunninghamia lanceolata* and evergreen broadleaved mixed plantations on soil aggregate stability and soil organic carbon and nutrients stocks[J]. Forest Research, 2020, 33(3): 107-115. (in Chinese)

[2] 洪宜聪.杉木林套种闽粤栲林分特性及其涵养水源功能[J].西北林学院学报,2017,32(3):71-77.
HONG Y C. Stand characteristics and water conservation function of *Cunninghamia lanceolata* plantation mixed with *Castanopsis fissa* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(3): 71-77. (in Chinese)

[3] 盛炜彤.关于我国人工林长期生产力的保持[J].林业科学研究,2018,31(1):1-14.

[4] FORRESTER D I, PARES A, HARA C O, et al. Soil organic carbon is increased in mixed-species plantations of eucalyptus and nitrogen-fixing *Acacia* [J]. Ecosystems, 2013, 16(1): 123-132.

[5] 孙思怡,卢胜旭,陆宇明,等.木林下套种阔叶树对土壤生态酶活性及其化学计量比的影响[J].林业科学研究,2021,34(1): 106-113.
SUN S Y, LU S X, LU Y M, et al. Effects of Chinese fir interplanted with broadleaved trees on soil ecological enzyme activity and stoichiometry [J]. Forest Research, 2021, 34(1): 106-

113. (in Chinese)
- [6] 黄钰辉,张卫强,甘先华,等. 南亚热带杉木林改造不同树种配置模式的土壤质量评价[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(3): 123-130.
GUANG Y H, ZHANG W Q, GAN X H, *et al.* Soil quality assessment on different tree species composition patterns in *Cunninghamia lanceolata* stand conversion in south subtropics[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(3): 123-130. (in Chinese)
- [7] 曾冀,朱雪萍,唐继新,等. 杉木人工林间伐后套种阔叶树种的生长动态[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 97-103.
ZENG Y, ZHU X P, TANG J X, *et al.* Growth dynamics of hardwood species interplanted under intensively thinned *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 97-103. (in Chinese)
- [8] 康希睿,李晓刚,张涵丹,等. 不同混交措施下杉木人工林群落稳定性特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 2912-2920.
KANG R X, LI X G, ZHANG H D, *et al.* Community stability characteristics of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different mixing measures [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 2912-2920. (in Chinese)
- [9] 傅立国,金鉴明. 中国植物红皮书-稀有濒危植物: 第一册[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 454-455.
- [10] 陈凯,杨梅,刘世男. 不同光照对观光木幼苗生长及光合生理特性的影响[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2019, 20(4): 536-541.
CHEN K, YANG M, LIU S N. Effects of different lights on growth and photosynthetic physiological characteristics of *Tsoongiodendron odorum* seedlings[J]. Journal of Beihua University: Natural Science, 2019, 20(4): 536-541. (in Chinese)
- [11] 农东红,韦海航,潘尚慧,等. 高峰林场界牌分场森林经营类型划分[J]. 广西林业科学, 2020, 49(2): 229-236.
- [12] 黄振格,何斌,谢敏洋,等. 连栽桉树人工林土壤氮素季节动态特征[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(9): 88-94.
HUANG Z G, HE B, XIE M Y, *et al.* Seasonal dynamic characteristic of soil nitrogen in *Eucalyptus* plantations under successive rotation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(9): 88-94. (in Chinese)
- [13] 刘金炽,招礼军,朱栗琼. 遮阴对 3 种木兰科幼苗生长和光合特性的影响[J]. 广西植物, 2020, 40(8): 1159-1168.
- [14] 聂颖. 杉木林冠下套种黑壳楠等 4 个树种试验[J]. 福建林业科技, 2014, 41(3): 54-56, 144.
- [15] HUANG G B, ZHOU H, DING X, *et al.* Extreme learning machine for regression and multiclass classification. [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B, 2012, 42(2): 513-529.
- [16] 刘涛,左秋玉,杨梅. 套种华盖木、亮叶木莲、红豆杉对杉木生长和土壤理化性质的初期影响[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2020, 21(4): 532-536.
- [17] 乐兴钊. 杉木闽粤栲异龄复层林林木生长状况及土壤理化性质研究[J]. 林业勘察设计, 2017(2): 34-39.
- [18] 苟丽晖,孙兆地,聂立水,等. 北京松山自然保护区不同母质油松林土壤氮、磷、钾含量垂直分布[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 961-966.
- [19] 王凯,雷虹,石亮,等. 沙地樟子松带状混交林土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 2883-2891.
WANG K, LEI H, SHI L, *et al.* Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* belt-mixed forests[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 2883-2891. (in Chinese)
- [20] 李金享,春雪,辛颖,等. 火烧迹地在不同恢复方式下土壤氮素含量研究[J]. 森林工程, 2020, 36(4): 12-20.
LI J X, CHUN X, XIN Y, *et al.* Research on characteristics of soil nitrogen content of burned area after different restorations[J]. Forest Engineering, 2020, 36(4): 12-20. (in Chinese)
- [21] 苏妮尔,沈海龙,丁佩军,等. 不同坡位红皮云杉林木生长与土壤理化性质比较[J]. 森林工程, 2020, 36(2): 6-11.
SU N E, SHEN H L, DING P J, *et al.* Comparison of tree growth and soil physical and chemical properties of *Picea koraiensis* plantation at different slope positions[J]. Forest Engineering, 2020, 36(2): 6-11. (in Chinese)
- [22] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, *et al.* Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98: 139-151.
- [23] CHEN F S, NIKLAS K L, LIU Y, *et al.* Nitrogen and phosphorus additions alter nutrient dynamics but not resorption efficiencies of Chinese fir leaves and twigs differing in age[J]. Tree Physiology, 2015, 35(10): 1106-1117.
- [24] 陈永康,谭许脉,李萌,等. 珍贵固氮树种降香黄檀与二代巨尾桉混交种植对土壤微生物群落结构和功能的影响[J]. 广西植物, 2021, 41(9): 1476-1485.