



孙沉沉,王自强,潘畅,等.杉木木荷混交对土壤养分和酶活性的影响[J].江西农业大学学报,2023,45(3):517-525.
SUN C C,WANG Z Q,PAN C,et al.Effects of *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* mixed forest on soil nutrients and enzyme activities[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2023,45(3):517-525.

杉木木荷混交对土壤养分和酶活性的影响

孙沉沉,王自强,潘 畅,宋雅琦,俞元春*

(南京林业大学 生物与环境学院/南方现代林业协同创新中心,江苏 南京 210037)

摘要:【目的】研究杉木木荷混交对土壤肥力的影响。【方法】以23年生杉木(*Cunninghamia lanceolata*)-木荷(*Schima superba*)混交林、杉木纯林和木荷纯林3种林分类型为研究对象,分析了不同土层(表层:0~20 cm、下层:20~50 cm)土壤pH、土壤养分(有机碳、全氮、速效氮、有效磷、速效钾)和土壤酶活性(蛋白酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶、脲酶)的变化及其之间的关系。【结果】(1)3种林分类型土壤养分因子和酶活性含量基本呈现明显的“表聚”现象。0~20 cm土层,混交林的土壤全氮、速效氮、速效钾含量均显著高于杉木纯林($P<0.05$),分别比纯林提高66.67%、44.32%和8.25%;混交林土壤中脲酶活性较杉木纯林显著提高1.99%。(2)20~50 cm土层,混交林的土壤全氮含量显著高于杉木纯林,比纯林提高64.86%;混交林土壤脲酶活性相比杉木纯林显著提高18.58%($P<0.05$),蛋白酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性分别增加了50%、14.42%和4.92%。(3)相关分析显示,土壤蛋白酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶活性与土壤有机碳、全氮和有效磷均呈极显著正相关($P<0.01$)。【结论】整体来看,杉木木荷混交林不仅能显著提高表层土壤养分还能显著提升下层土壤全氮的含量,说明杉木木荷混交林营林模式是缓解杉木人工林土壤肥力衰退的有效措施,且土壤酶活性与土壤养分之间关系密切,在提升土壤肥力方面发挥重要作用。研究加深了对杉阔混交林造林缓解土壤退化机理的认识,为杉阔混交林营造和杉木可持续经营提供了科学依据。

关键词:杉木;木荷;混交林;土壤养分;土壤酶活性

中图分类号:S714.3 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2023)03-0517-09



Effects of *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* Mixed Forest on Soil Nutrients and Enzyme Activities

SUN Chenchen, WANG Ziqiang, PAN Chang, SONG Yaqi, YU Yuanchun*

(College of Biology and the Environment, Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* on soil fertility. [Method] The changes and relationship between soil pH, soil nutrients (organic carbon, total nitrogen, available nitrogen, available phosphorus, available potassium) and soil

收稿日期:2022-12-26 修回日期:2023-01-26

基金项目:国家“十四五”重点研发计划项目(2021YFD2201303)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

Project supported by the National “14th Five-Year” Key R&D Plan (2021YFD2201303) and Jiangsu University Superior Discipline Construction Project (PAPD)

作者简介:孙沉沉,硕士生, orcid.org /0000-0003-1593-6074, 2631397400@qq.com; *通信作者:俞元春,教授,博士生导师,主要从事森林土壤研究, orcid.org /0000-0002-4625-4490, ycyu@njfu.edu.cn。

enzyme activities (protease, sucrase, catalase, acid phosphatase, urease) in different soil layers (surface layer: 0–20 cm, subsurface layer: 20–50 cm) of 23-year *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* mixed forest, pure *Cunninghamia lanceolata* plantation, and pure *Schima superba* plantation were explored. [Result] The results showed that: (1) Soil nutrient properties and enzyme activities of three types of forests showed obvious “surface aggregation” trend. In the 0–20 cm soil layer, the contents of soil TN, AN, and AK in the mixed plantation were significantly higher than in pure *Cunninghamia lanceolata* plantation ($P < 0.05$), and were 66.67%, 44.32%, and 8.25% higher than that in pure forest respectively. Moreover, soil urease activities in the surface soil layer of mixed plantation increased by 1.99% respectively as compared with pure *Cunninghamia lanceolata* plantation; (2) In the 20–50 cm soil layer, soil TN content in the mixed forest was significantly higher than that of the pure *Cunninghamia lanceolata* plantation and 64.86% higher than that of the pure plantation ($P < 0.05$). Additionally, soil sucrase and acid phosphatase activities in the mixed plantation increased by 50%, 14.42%, and 4.92% in the pure *Cunninghamia lanceolata* plantation. (3) Correlation analysis showed that soil protease, sucrase and acid phosphatase activities were significantly positively correlated with soil SOC, AN and AP respectively ($P < 0.01$). [Conclusion] Overall, the mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* can effectively improve soil fertility not only in the surface soil but also the TN content in the subsoil. The results demonstrated that the mixed forest afforestation is an effective measure to alleviate the soil fertility decline of pure *Cunninghamia lanceolata* plantation. Moreover, there is a close relationship between soil enzyme activity and soil nutrients, and it plays an important role in improving soil fertility. This study deepens the understanding of the mechanism of soil degradation mitigation by afforestation of mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and broadleaf trees, and provides scientific basis for the construction of mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and broadleaf trees and the sustainable management of *Cunninghamia lanceolata* plantation.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; *Schima superba*; mixed forest; soil nutrients; soil enzyme activity

【研究意义】杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国特有的优良速生用材树种,广泛栽培于我国南方地区。杉木具有出材率高,适应性广和经济效益高等优点,占我国人工林总面积的26.5%^[1]。近些年来,由于大面积的杉木纯林造林模式以及长期连栽造成了土壤肥力退化、林分生产力降低等问题^[2–3],严重影响了杉木人工林的生产力和可持续经营。为了缓解纯林造林模式的不利影响,杉木与阔叶树种的混交造林模式近年来被广泛采用,并且已经证明对缓解土壤肥力退化有着较好的效果。【前人研究进展】研究表明,营造杉阔混交林不仅可以缓解杉木人工林土壤退化、林分生产力降低等问题,还可以提高森林生态系统的稳定性^[4],如杉木木荷混交林的林分生长量相比于杉木纯林高,且土壤肥力显著提高^[5]。此外,还有研究发现杉木与木荷混交可以显著提高林分蓄积量和碳储量^[6]。杉阔混交提升土壤肥力主要与凋落物的变化及土壤微生物活性的改变有关^[7–8]。阔叶树凋落物相比于针叶树具有低碳氮比的特点,因此易于被微生物分解利用^[9],郭佳欢等^[10]发现混交复合造林,尤其与阔叶树混交是杉木人工林土壤肥力质量维持的有效手段。此外,混交可以增加凋落物量,凋落物数量的增加刺激表层土壤微生物的生长进而促进微生物分泌胞外酶的含量,土壤胞外酶与土壤养分及质量的提升密切相关^[11],在土壤生态系统的物质能量循环中发挥着关键性作用^[12]。潘云龙等^[13]发现杉桐混交林内凋落物种类变多,土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶活性显著高于杉木纯林。不仅如此,杉阔混交可以改变根系分泌物的种类与数量,进而影响表层和深层土壤肥力^[14]。

【本研究切入点】然而,目前有关杉木木荷混交林的研究多集中在林分生物量、表层土壤养分等方面^[15–16],针对杉木木荷混交土壤养分与酶活性特征及其之间关系的相关研究较少。【拟解决的关键问题】为了研究杉木木荷混交对不同土层的养分和酶活性的影响以及明确土壤酶活性和土壤养分之间的联系,本试验以23年生杉木纯林、木荷纯林以及杉木木荷混交林3种林分类型为研究对象,研究了杉木木

荷混交林不同土层(0~20、20~50 cm)土壤养分和土壤酶活性的变化特征,以及土壤养分与土壤酶活性之间的关系,为深入了解杉阔混交林提高土壤肥力的机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况

试验样地位于福建省南平市小桥镇长源采育场(N27°01'44.40"、E118°24'48.97")。样地于1999年造林,包含杉木人工纯林、木荷人工纯林和杉木木荷混交林3种不同林分类型,每种林分类型包含3个20 m×20 m的重复样地,3种林分类型立地条件相对一致,基本概况见表1。实验样地属于亚热带海洋性季风型气候,年平均气温为20℃,年均降雨量为1 665.7 mm,年均相对湿度为81%。林地土壤类型为山地暗红壤,土层厚度在100 cm以上。林下植被种类主要有苔草(*Carex* spp)、苦竹(*Pleioblastus amarus*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、观音座莲(*Angiopteris evecta*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、黄瑞木(*Adinandra millettii*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)等。

表1 试验样地基本概况

Tab.1 Basic overview of forest land survey and test plots

林地类型 Forest land types	林龄/ (yr) Age	坡度/(°) Slope	海拔/m Elevation	现有密度/ (株·hm ⁻²) Current density	郁闭度 Canopy density	平均树高/m Average tree height	平均胸径/cm Average DBH	平均冠幅/m Average crown
杉木纯林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> pure forest	23	19.5	209	2 254	0.8	13.1	14.4	5.4
木荷纯林 <i>Schima superba</i> pure forest		20	210	1 904	0.8	11.6	13.6	6.8
混交林 Mixed forest		20.5	239	1 978	0.9	15.6	18.2	6.5

1.2 研究方法

采样时,在每块样地内按照“S”型随机设定5个取样点。去除表面落叶凋落物后,采用土钻分别采集0~20 cm和20~50 cm土壤样品,然后将同一个样地内同一土层的5个土壤样本均匀混合后得到一个样本。所有土样均采用低温保鲜运回实验室进行分析。将土样分为两部分:一部分自然风干标记保存用于土壤酶活性的测定,另一部分用于土壤理化性质的测定,每个样重复3次。

1.3 测试指标与方法

(1)土壤理化性质^[17]:pH:电极法;有机碳:重铬酸钾外加热法;全氮(TN):半微量凯氏定氮法;速效氮(AN):碱解-扩散法;有效磷(AP):钼锑抗比色法;速效钾(AK):火焰光度法。

(2)土壤酶:参照土壤酶试剂盒(solarbio)使用说明测定土壤蛋白酶(protease,PRO)、蔗糖酶(invertase,INV)、过氧化氢酶(catalase,CAT)、酸性磷酸酶(acid phosphatase,ACP)、脲酶(urease,URE)活性。每天每克土样中产生1 μmol 酪氨酸为一个土壤蛋白酶活力单位;在37℃条件下,每天每克土样中产生1 mg还原糖定义为一个土壤蔗糖酶活力单位;每天每克风干土样催化1 μmol H₂O₂降解定义为一个土壤过氧化氢酶活力单位;在37℃条件下,每克土壤每天释放1 nmol 酚为一个土壤酸性磷酸酶活力单位;每天每克土样中产生1 μg NH₃⁻-N为一个土壤脲酶活力单位。

1.4 统计分析

试验数据先采用Excel(2017)进行预处理。使用SPSS23.0统计软件进行双因素方差分析(two-way ANOVA)分析林地与土层之间是否存在交互作用,然后使用单因素方差分析(one-Way ANOVA,Duncan多重比较,*P*<0.05),检验3种林地各项指标的差异显著性;运用Pearson相关系数分析土壤养分和酶活性之间的相关性。表2和图1中数据均为平均值±标准偏差。所有图形均使用Origin Pro 8.5进行绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量变化

如表 2 所示,0~20 cm 土层,混交林土壤 pH、TN、AN、AK 含量与杉木纯林有显著差异($P<0.05$),且土壤 TN、AN、AK 含量与杉木纯林相比分别提高了 66.67%、44.32% 和 8.25%;与木荷纯林相比,混交林土壤 AK 含量显著提高 40.01%。此外,木荷纯林土壤 pH、AP、AN 均显著高于混交林($P<0.05$)。20~50 cm 土层,混交林土壤 pH、TN、AK 含量与杉木纯林有显著差异($P<0.05$),混交林土壤 TN 含量与杉木纯林相比提高了 64.86%,AK 含量则显著降低了 25.02%;除土壤 AK,木荷纯林土壤 pH、AP、AN、AK 含量均显著高于混交林($P<0.05$)。同一林地不同土层相比,3 种林地土壤养分含量随着土层变化趋势相似。pH、SOC、TN、AP、AN、AK 的含量均随着土壤深度的增加而降低。其中杉木纯林土壤 pH、AN,木荷纯林土壤 SOC、AN、AK,以及混交林土壤 SOC、TN、AK 均表现出上层土壤显著高于深层土壤的趋势($P<0.05$)。

表 2 3 种林地土壤的化学性质
Tab.2 Chemical properties of soils in the three forest lands

林地类型 Forest type	土层/cm Soil layer	pH 值 pH value	有机碳/ (g·kg ⁻¹) SOC	全氮/ (g·kg ⁻¹) TN	有效磷/ (g·kg ⁻¹) AP	速效氮/ (g·kg ⁻¹) AN	速效钾/ (g·kg ⁻¹) AK
杉木纯林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> pure forest	0~20	4.51±0.025 ^{Aa}	23.85±6.17 ^{Aa}	0.57±0.14 ^{Aa}	1.05±0.07 ^{Ba}	58.94±4.49 ^{Ba}	33.33±1.57 ^{Aa}
	20~50	4.43±0.04 ^{Ab}	19.96±6.43 ^{Aa}	0.37±0.32 ^{Aa}	0.09±0.40 ^{Ba}	43.35±1.68 ^{Bb}	30.93±3.71 ^{Aa}
木荷纯林 <i>Schima superba</i> pure forest	0~20	4.45±0.10 ^{Aa}	23.97±1.80 ^{Aa}	1.52±0.28 ^{Ba}	2.35±0.37 ^{Aa}	160.97±8.61 ^{Aa}	25.77±1.78 ^{Aa}
	20~50	4.37±0.06 ^{Aa}	17.26±1.49 ^{Ab}	1.13±0.21 ^{Ba}	1.88±0.24 ^{Aa}	93.02±13.81 ^{Ab}	15.46±1.78 ^{Ab}
混交林 Mixed forest	0~20	3.47±0.05 ^{Ba}	19.14±2.19 ^{Aa}	0.95±0.16 ^{Ba}	1.42±0.25 ^{Ba}	85.06±4.33 ^{Ca}	36.08±4.49 ^{Ba}
	20~50	3.53±0.05 ^{Ba}	12.24±0.81 ^{Ab}	0.61±0.10 ^{Bb}	0.98±0.40 ^{Ba}	53.36±1.02 ^{Bb}	24.74±6.44 ^{Ba}

不同大写字母代表同一土层不同林地之间的差异显著($P<0.05$),不同小写字母代表同一林地不同土层之间的差异显著($P<0.05$)。

Different uppercase letters represent significant differences between different woodlands in the same soil layer($P<0.05$), and different lowercase letters represent significant differences between different soil layers in the same woodland($P<0.05$).

2.2 土壤酶活性变化

从图 1 和表 3 可以看出,林地类型显著影响了土壤蔗糖酶、酸性磷酸酶和脲酶活性,而土层则显著影响了蛋白酶、蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性。但林地类型与土层对 5 种酶的活性不存在显著的交互影响作用。总体上,5 种酶活性在木荷纯林中最高,而在混交林和杉木纯林表现出不同的变化规律。0~20 cm 土层中,混交林土壤蛋白酶和脲酶活性含量均高于杉木纯林,其中混交林中脲酶活性较杉木纯林显著提高 1.99%($P<0.05$)。与之不同,杉木纯林土壤蔗糖酶活性高于混交林。20~50 cm 土层中混交林土壤蛋白酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和脲酶的活性均高于杉木纯林。其中,混交林土壤脲酶活性相比杉木

表 3 林地、土层及其交互作用对土壤酶活性影响的双因素方差分析

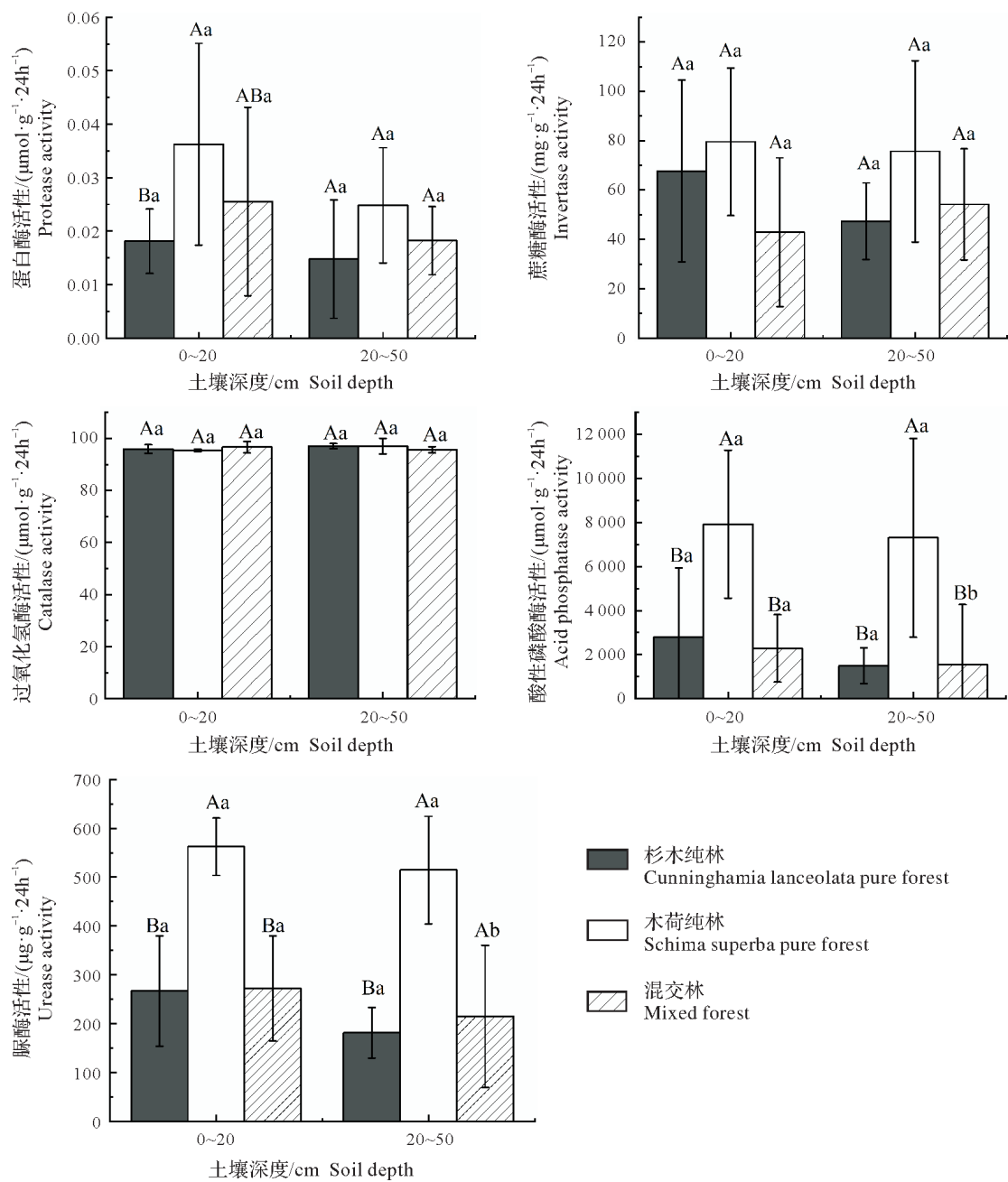
Tab.3 Two-way ANOVA table of effect of forestand,soil layer and their interaction on soil enzyme activity

因子 Factor	蛋白酶 PRO			蔗糖酶 INV			过氧化氢酶 CAT			酸性磷酸酶 ACP			脲酶 URE		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P	df	F	P	df	F	P
A	2	3.423	0.067	2	5.768	0.018	2	0.062	0.940	2	19.309	0.000	2	84.250	0.000
B	1	10.955	0.006	1	36.142	0.000	1	2.188	0.165	1	16.829	0.001	1	50.328	0.000
A×B	2	1.265	0.317	2	0.541	0.596	2	0.371	0.698	2	1.633	0.236	2	2.012	0.176

A、B 分别代表林地类型、土层深度,A×B 则表示两者之间的交互作用。

The A,B represent forest type and soil depth,the A×B represent interactions of forest type and soil depth.

纯林显著提高了 18.58% ($P<0.05$), 蛋白酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性分别增加了 50%、14.42%、4.92%。而过氧化氢酶的活性与表层变化规律较为一致, 在 3 种林型中无显著差异。



不同大写字母代表同一土层不同林地之间的差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母代表同一林地不同土层之间的差异显著 ($P<0.05$); PRO: Protease, 蛋白酶; INV: Invertase, 蔗糖酶; URE: Urease, 脲酶; ACP: Acid phosphatase, 酸性磷酸酶; CAT: Catalase, 过氧化氢酶。

Different uppercase letters represent significant differences between different woodlands in the same soil layer ($P<0.05$), and different lowercase letters represent significant differences between different soil layers in the same woodland ($P<0.05$).

图 1 3 种林地土壤酶活性的变化

Fig.1 Changes in enzyme activities in soil ages in three forest stands

2.3 土壤养分与酶活性相关分析

相关分析结果表明, 土壤蛋白酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和脲酶活性与土壤 SOC、AN 和 AP 均有极显著正相关, 蛋白酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和脲酶活性两两之间表现出显著或极显著的正相关 ($P<0.01$), 如表 4 所示。酶活性与土壤养分之间有着密切的关系。

表 4 3 种林地土壤养分和酶活性的相关性分析

Tab.4 Correlation analysis of soil nutrient and enzyme in three foest stands

相关系数 Correlation coefficient	pH	有机碳 SOC	全氮 TN	速效钾 AK	速效磷 AP	速效氮 AN	蛋白酶 PRO	蔗糖酶 INV	过氧化氢酶 CAT	酸性磷酸酶 ACP	脲酶 URE
pH	1										
有机碳 SOC	0.503*	1									
全氮 TN	0.116	0.357	1								
速效钾 AK	-0.204	0.255	-0.355	1							
速效磷 AP	0.209	0.365	0.923**	-0.346	1						
速效氮 AN	0.206	0.346	0.894**	-0.262	0.883**	1					
蛋白酶 PRO	0.021	0.468*	0.759**	0.077	0.748**	0.736**	1				
蔗糖酶 INV	0.338	0.617**	0.549*	0.138	0.494*	0.713**	0.506*	1			
过氧化氢酶 CAT	-0.016	-0.290	-0.271	-0.082	-0.112	-0.210	-0.333	-0.312	1		
酸性磷酸酶 ACP	0.316	0.591**	0.889**	-0.188	0.855**	0.890**	0.674**	0.774**	-0.320	1	
脲酶 URE	0.342	0.380	0.886**	-0.312	0.880**	0.893**	0.626**	0.701**	-0.278	0.885**	1

**表示 $P < 0.01$ 水平上极显著相关, *在表示 $P < 0.05$ 水平上显著相关。

** and * indicate significant at $P < 0.01$ and $P < 0.05$ level, respectively.

3 讨论与结论

营造针叶树与阔叶树混交林可有效缓解针叶林单一树种造林模式对土壤的不利影响^[18],不仅可以缓解土壤肥力退化,还能维持森林可持续生产力^[19],已经广泛地应用于杉木人工林造林中。但对于混交林中土壤酶活性与土壤肥力之间关系的研究还不清晰,且不同土层之间的影响还未考虑到。研究选取杉木混交阔叶树种木荷,综合考虑了杉木木荷混交对表层(0~20 cm)和深层(20~50 cm)土壤养分和酶活性的影响,并剖析了胞外酶和土壤养分之间的联系。研究发现,0~20 cm 土层中,混交林土壤 TN、AN 和 AK 含量均高于杉木纯林,显著提高了 66.67%、44.32% 和 8.25%;20~50 cm 土层中,混交林土壤 TN 含量相比杉木纯林显著增加 64.86% ($P < 0.05$),说明杉木木荷混交可以有效提升表层和深层土壤养分指标含量。混交林中表层和深层土壤蛋白酶、脲酶和酸性磷酸酶活性均增加,其中深层土壤脲酶活性显著增加 ($P < 0.05$),说明杉木木荷混交可以提升表层和深层土壤部分酶活性。这与陈永川等^[20]、葛晓改等^[21]和潘云龙等^[13]的研究结论一致。此外,相比于纯林,混交林中 pH 含量显著低于纯林,这与陈欣凡等^[22]的研究结果不同,这些不同的结果一方面与混交树种有关,本实验中营造的是杉木与木荷混交,且混交林龄为 23 a,此外林分类型和气候特点差异也是导致不同结果的重要因素。

在 0~20 cm 土层中,混交林土壤 TN、AN、AK 含量与杉木纯林相比显著提升 ($P < 0.05$),分别提高了 66.67%、44.32% 和 8.25%,说明混交能显著提高杉木纯林表层土壤肥力,这与陈欣凡等^[22]的研究结果一致。与杉木纯林相比,混交林土壤脲酶活性得到显著提高。在森林生态系统中,表层土壤养分回归由凋落物主导,凋落物的数量及质量显著影响着养分回归的强度和速度^[23]。针叶树的凋落物中由于含有较大比例难分解、疏水性强的芳香族化合物,造成凋落物分解速度较慢,而阔叶树的凋落物种则含有较大比例易变性、亲水性小分子化合物,易于被微生物分解^[24-25]。因此,混交后凋落物性质的变化可能有利于养分的释放,从而导致土壤肥力的提升。在本实验中,木荷纯林土壤 AP、AN、AK 均显著高于混交林 ($P < 0.05$),说明木荷能显著提高土壤 AP、AN、AK 含量。因此,混交林土壤中养分的提升与木荷的引入关系密切。

在 20~50 cm 土层中,混交林土壤 TN、AK 含量与杉木纯林有显著差异 ($P < 0.05$),土壤 AK 含量比杉木纯林降低了 25.02%,混交林土壤 TN 含量与杉木纯林相比提高了 64.86%,说明混交不仅能提高表层杉木林土壤肥力,而且能显著提高深层土壤 TN 含量。与表层土壤相似,混交林土壤蛋白酶、蔗糖酶、酸性磷

酸酶和脲酶的活性均得到提高。其中,混交林土壤脲酶活性显著高于杉木纯林($P<0.05$),且土壤脲酶与TN相关关系显著^[26],说明土壤脲酶能显著提高深层土壤中TN含量。混交对表层和深层土壤养分和酶活性的不同影响可能与其影响途径及土壤的异质性有关。与表层土壤不同,深层土壤受凋落物的影响相对较小,而受根系分泌物及表层养分的淋溶及迁移影响较大^[22]。混交林中,深层土壤中根系分泌物可通过分泌氨基酸、酶等含氮物质提升土壤氮库。根系分泌物和表层养分的淋溶还可改善深层土壤养分匮乏状况。

相关分析中,土壤蛋白酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和脲酶活性与土壤SOC、AN和AP均显著正相关。研究发现,土壤酶活性之间存在显著或极显著相关性,这与李东坡等^[27]的研究结论相似。李东坡研究指出土壤酶相互制约、相互促进,共同参与土壤生化反应及合成有机化合物的水解与转化。土壤蛋白酶和脲酶活性与土壤氮元素密切相关,活性越大,土壤中可直接吸收利用的氮元素就越多,酶活性与土壤微生物的数量相关^[28]。土壤蔗糖酶将土壤中大分子蔗糖降解成可以直接供植物和微生物利用的小分子葡萄糖和果糖,对维持土壤的碳素循环起着不可替代的作用,进而改善与提高土壤肥力^[29]。研究结果发现,相比于杉木纯林,混交林中表层和深层土壤蛋白酶、脲酶和酸性磷酸酶活性均得到改善,且土壤TN、AN含量也有较大提高,可见胞外酶与土壤养分关系密切,说明混交引起的土壤酶活性提升是提高土壤养分的机理之一。过氧化氢酶作为土壤中氧化还原酶的一种,催化生物在呼吸、代谢过程中产生的 H_2O_2 ,增加土壤的代谢能力,并促进有机质的分解^[30]。本实验中,过氧化氢酶活性在不同土层不同林型中无显著差异。因研究取样时间是8月份,较高的气温促进了微生物的活动,但此时并非凋落物存量高峰期,杨智杰等^[31]研究认为,杉木人工林以4—5月的凋落量最大,而木荷纯林、杉木木荷混交林整年中的波动较大,在3月达到最高,且杉木纯林的凋落物少于混交林。在这些因素的综合作用下,不论是纯林还是混交林,过氧化氢酶活性变化较为不明显。

通过对杉木木荷混交林土壤养分及酶活性的研究发现,杉木木荷混交能显著影响杉木林表层和深层的土壤养分因子及酶活性的含量,且酶活性与土壤养分因子之间关系密切。在表层土壤中,混交显著提升了土壤TN、AN、AK;在深层土壤中混交则显著提升了土壤TN含量,两土层中均显著提升了土壤脲酶活性。此外,相关性分析表明,土壤蛋白酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和脲酶活性与土壤TN、AN、AK等含量显著正相关,说明酶活性的提升可能促进土壤养分的提高。因此,杉木木荷混交模式相比于杉木纯林更有利于土壤养分的维持,从而缓解纯林造林模式对土壤肥力的不利影响。

参考文献 References:

- [1] 耿丹,夏朝宗,张国斌,等.杉木人工林灌木层生物量模型构建[J].北京林业大学学报,2018,40(3):34-41.
GENG D, XIA C Z, ZHANG G B, et al. Biomass model construction of shrub layer of Chinese fir plantation[J]. Journal of Beijing forestry university, 2018, 40(3): 34-41.
- [2] WANG L, ZHANG Y, BERNINGER F, et al. Net primary production of Chinese fir plantation ecosystems and its relationship to climate[J]. Biogeosciences, 2014, 11(19): 5595-5606.
- [3] 孙思怡,卢胜旭,陆宇明,等.杉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.
- [4] PRETZSCH H, RÍO M D, SCHÜTZE G, et al. Mixing of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) enhances structural heterogeneity, and the effect increases with water availability[J]. Forest ecology and management, 2016, 373.
- [5] 陈志洪. 秃杉木荷混交造林林木生长效果探究[J]. 绿色科技, 2021, 23(5): 97-100.
CHENG Z H. A study on the growth effect of mixed forest of *Taiwania flousiana* and *Schima superba* [J]. Journal of green science and technology, 2021, 23(5): 97-100.

- [6] 李勇.混交比例对杉木木荷混交林生物量及碳储量的影响[J].林业勘察设计,2016,36(3):37-40.
LI Y.Effects of mixed ratio on biomass and carbon storage of Chinese fir and Schima Schima mixed forest[J].Forestry prospect and design,2016,36(3):37-40.
- [7] 李勋,张艳,宋思梦,等.马尾松与乡土阔叶树种凋落叶分解氮磷释放的混合效应[J].应用与环境生物学报,2022,28(2):1-19.
LI X,ZHANG Y,SONG S M,et al.Mixed leaf litter effects on nitrogen and phosphorus release of Pinus massoniana and native broad-leaved tree species[J].Chinese journal of applied and environmental biology,2022,28(2):1-19.
- [8] 林开敏,章志琴,曹光球,等.杉木与楠木叶凋落物混合分解及其养分动态[J].生态学报,2006,26(8):2732-2738.
LIN K M,ZHANG Z Q,CAO G Q,et al.Decomposition characteristics and its nutrient dynamics of leaf litter mixtures of both Chinese fir and *Phoebe bournei*[J].Acta ecologica Sinica,2006,26(8):2732-2738.
- [9] 郭家新.杉木火力楠混交林与杉木纯林土壤碳氮库研究[J].福建林业科技,2008(2):5-9.
GUO J X.Comparison of soil organic carbon and nitrogen pool between mixed and pure forests of Chinese fir[J].Jour of Fujian forestry science and technology,2008(2):5-9.
- [10] 郭佳欢,孙杰杰,冯会丽,等.杉木人工林土壤肥力质量的演变趋势及维持措施的研究进展[J].浙江农林大学学报,2020,37(4):801-809.
GUO J H,SUN J J,FENG H L,et al.Research progress on evolution trends and maintenance measures of soil fertility quality in *Cunninghamia lanceolata* plantations[J].Journal of Zhejiang A&F university,2020,37(4):801-809.
- [11] 曹升,潘菲,林根根,等.不同林龄杉木林土壤细菌群落结构与土壤酶活性变化研究[J].生态学报,2021,41(5):1846-1856.
CAO S,PAN F,LIN G G,et al.Changes of soil bacterial structure and soil enzyme activity in Chinese fir forest of different ages[J].Acta ecologica Sinica,2021,41(5):1846-1856.
- [12] 江森华,倪梦颖,周嘉聪,等.增温和降雨减少对杉木幼林土壤酶活性的影响[J].生态学杂志,2018,37(11):3210-3219.
JIANG M H,NI M Y,ZHOU J C,et al.Effects of warming and precipitation reduction on soil enzyme activity in a young *Cunninghamia lanceolata* plantation[J].Chinese journal of ecology,2018,37(11):3210-3219.
- [13] 潘云龙,林国伟,陈志为,等.杉木纯林及杉桐混交林土壤酶活性研究[J].热带作物学报,2018,39(5):846-851.
PAN Y L,LIN G W,CHEN Z W,et al.Effect of *Cunninghamia lanceolata*-*aleurites montana* mixed forests on soil enzyme activity[J].Chinese journal of tropical crops,2018,39(5):846-851.
- [14] 李文卿.混交阔叶树对亚热带针叶林根际土壤碳氮磷动态及微生物特性的影响[D].南昌:江西农业大学,2021.
LI W Q.Effects of mixing with broad-leaved trees on dynamics of carbon,nitrogen,and phosphorus and microbial characteristics in rhizosphere soil in subtropical coniferous forests[D].Nanchang:Jiangxi Agricultural University,2021.
- [15] WANG Q,ZHANG W,SUN T,et al.N and P fertilization reduced soil autotrophic and heterotrophic respiration in a young *Cunninghamia lanceolata* forest[J].Agricultural and forest meteorology,2017:232.
- [16] 曹小玉,李际平.林分空间结构指标研究进展[J].林业资源管理,2016(4):65-73.
CAO X Y,LI J P.Research progress on indicators of the stand spatial structure[J].Forest resources management,2016(4):65-73.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所编.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1977.
Nanjing Institute of Soil Science,Chinese Academy of Sciences.Soil physical and chemical analysis[M].Shanghai:Shanghai Science and Technology Press,1977.
- [18] 林晗,洪陈洁,洪滔,等.不同内生真菌对千年桐幼苗生长及主要矿质元素的影响[J].热带作物学,2016,37(9):1799-1804.
LIN H,HONG C J,HONG T,et al.The effect of various endophytic fungi on the growth and main element contents of *Aleurites montana* seedlings[J].Chinese journal of tropical crops,2016,37(9):1799-1804.
- [19] 陆湘云,刘奎,陈凯,等.3个木兰科树种对杉木人工林土壤肥力改良效果的初步评价[J].西部林业科学,2020,49(3):29-35.
LU X Y,LIU K,CHEN K,et al.Preliminary evaluation of soil fertility improvement of *Cunninghamia lanceolata* plantation by three magnoliaceae species[J].Journal of west China forestry science[J].2020,49(3):29-35.
- [20] 陈永川,杨春霞,黎小清,等.管理模式对胶园土壤酸性磷酸酶活性动态的影响[J].热带作物学报,2013,34(7):1213-1217.
CHEN Y C,YANG C X,LI X Q,et al.Effect of management patterns on variations of soil acid phosphatase activity in rubber

- plantations[J].Chinese journal of tropical crops, 2013, 34(7): 1213-1217.
- [21] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 445-451.
- GE X G, XIAO W F, ZENG L X, et al. Relationships between soil nutrient contents and soil enzyme activities in *Pinus massoniana* stands with different ages in three gorges reservoir area [J]. Chinese journal of applied ecology, 2012, 23(2): 445-451.
- [22] 陈欣凡, 林国伟, 洪滔, 等. 不同林龄杉木千年桐混交林与纯林土壤理化性质特征比较[J]. 热带作物学报, 2017, 38(9): 1660-1665.
- CHEN X F, LIN G W, HONG T, et al. Soil physical and chemical properties of *Cunninghamia lanceolata*-*aleurites montana* mixed forestland *Cunninghamia lanceolata* pure forest with different age [J]. Chinese journal of tropical crops, 2017, 38(9): 1660-1665.
- [23] 靳云铎, 白彦铎, 沈杨阳, 等. 施肥和凋落物添加对杉木人工林土壤养分和土壤微生物特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 72-80.
- JIN Y D, BAI Y F, SHEN Y Y, et al. Effects of fertilization and litter addition on soil nutrient and soil microbial properties of Chinese fir plantation [J]. Journal of Huazhong agricultural university, 2021, 40(5): 72-80.
- [24] KALBITZ K, SCHWESIG D, SCHMERWITZ J, et al. Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation [J]. Soil biology and biochemistry, 2003, 35(8): 1129-1142.
- [25] 万晓华, 黄志群, 何宗明, 等. 改变碳输入对亚热带人工林土壤微生物生物量和群落组成的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3582-3590.
- WAN X H, HUANG Z Q, HE Z M, et al. Changes of above-and belowground carbon input affected soil microbial biomass and community composition in two tree species plantations in subtropical China [J]. Acta ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3582-3590.
- [26] 刘淑英. 不同施肥对西北半干旱区土壤脲酶和土壤氮素的影响及其相关性[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 219-223.
- LIU S Y. Effects of different fertilization on soil urease nitrogen and their correlation in semiarid area of northwest China [J]. Journal of soil and water conservation, 2010, 24(1): 219-223.
- [27] 李东坡, 武志杰, 陈利军. 有机农业施肥方式对土壤微生物活性的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 99-101.
- LI D P, WU Z J, CHEN L J. Influence of fertilizing modes of organic agriculture on the soil microbial activities [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2005, 13(2): 99-101.
- [28] 陈彩虹, 叶道碧. 4种人工林土壤酶活性与养分的相关性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(6): 64-68.
- CHEN C H, YE D B. Study on the relationship between soil enzymes and nutrient of four artificial forests in Changsha urban-rural fringe [J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2010, 30(6): 64-68.
- [29] 杜伟文, 欧阳中万. 土壤酶研究进展[J]. 湖南林业科技, 2005(5): 80-83.
- DU W W, OUYANG Z W. Advances in soil enzymes [J]. Hunan forestry science, 2005(5): 80-83.
- [30] 万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(6): 87-92.
- WAN Z M, WU J G. Study progress on factors affecting soil enzyme activity [J]. Journal of Northwest A&F University, 2005, 33(6): 87-92.
- [31] 杨智杰, 陈光水, 谢锦升, 等. 杉木、木荷纯林及其混交林凋落物量和碳归还量[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2235-2240.
- YANG Z J, CHEN G S, XIE J S, et al. Litter fall production and carbon return in *Cunninghamia lanceolata*, *Schima superba*, and their mixed plantations [J]. Chinese journal of applied ecology, 2010, 21(9): 2235-2240.