

靳云铎,白彦锋,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.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.05.010

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

靳云铎¹,白彦锋²,沈杨阳¹,厉月桥³,刘儒³,姜春前²,张卓文¹,王永健¹

1.华中农业大学园艺林学学院/湖北省林业信息工程技术研究中心,武汉 430070;

2.中国林业科学研究院林业研究所,北京 100091;

3.中国林业科学研究院亚热带林业实验中心,分宜 336600

摘要 为解决杉木人工林土壤质量下降、地力衰退问题,以赣中南杉木人工林为研究对象,采用分解袋法,设置不同施肥处理与树种凋落物组合添加处理,研究其对土壤养分与土壤微生物特性的影响。结果显示,与不施肥对照处理相比,施用氮磷混合肥后杉木林土壤碱解氮和速效磷含量分别增加了10.7%和36.7%,且显著高于施加单一肥料处理。与不添加凋落物对照处理相比,添加杉木+闽楠混合凋落物和单独添加闽楠凋落物后,土壤微生物生物量均显著提高。结果表明,在杉木林生产中,提倡营造杉×阔混交林以及对现有杉木中幼龄纯林进行近自然化改造以改变其凋落物的组成、质量和数量,能充分利用多树种混合凋落物分解的加合效应,并配合施用氮磷复合肥料来改善杉木林土壤养分状况。

关键词 杉木;林地管理;混合凋落物;近自然化改造;微生物生物量;人工林;土壤养分;地力衰退

中图分类号 S 756.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)05-0072-09

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)是我国南方特有速生用材树种,具有很高的经济价值,在我国的林业中占据重要地位^[1-2]。由于杉木生长需要从土壤中吸收大量的养分,而其凋落物较少且分解较慢,致使杉木林地生物地球化学循环功能降低,养分平衡遭到破坏,加之不合理的营林措施加剧了林地生产力的下降。目前,杉木人工林立地质量下降的问题已经严重地影响林地生产力,这个问题日益得到相关学者的重视,并开展了大量研究^[3]。

凋落物分解是森林生态系统中养分归还的关键环节,通过微生物的分解逐步把自身养分归还土壤,因此,凋落物分解对森林土壤肥力有重要影响^[4-5]。在微生物作用下,凋落物分解出矿物质养分元素返还土壤。这是影响森林土壤有机质的形成、土壤氮循环和碳循环等的关键过程之一,是森林生态系统物质循环和能量流动过程中至关重要的一环^[6]。土壤微生物生物量代表了土壤中参与养分循环和有机质的分解转化的微生物数量,是监测森林立地质量

变化的一个重要指标,所以研究土壤养分的变化必须要分析凋落物和微生物在其中所起的作用^[7]。

土壤有机碳(SOC)数量大小是土壤生产力的关键,SOC可以良好地指示土壤健康状况和质量好坏,对土壤理化性质有重要影响,在全球碳循环中也起着重要作用^[8-9]。施肥和凋落物添加会改变土壤养分含量和微生物活性^[10],对土壤有机碳的含量产生影响^[11]。土壤氮磷养分的有效性是调节植物凋落物分解速率和生态系统碳平衡的一个主要因素^[12]。森林土壤碳氮磷含量之间有密切的联系,土壤C:N与C:P是有机质或其他成分中的碳素与氮素以及碳素与磷素总质量的比值,是土壤有机质组成和质量的一个重要指标,土壤C:N、C:P和N:P可以指示土壤有机质分解与土壤养分供给情况。因此,分析土壤C:N与C:P的平衡关系对于探究生态系统碳汇潜力,认识森林生态系统的元素响应机制具有重要意义^[13]。

添加外源矿质营养元素可以补充土壤矿物质养分,改善土壤条件,提高森林生态系统的生产力^[14]。

收稿日期:2021-03-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505605)

靳云铎,E-mail:552059863@qq.com

通信作者:王永健,E-mail:yongjianwang@126.com

添加外源矿质营养元素还能改变土壤的碳氮磷彼此之间的比例,并对凋落物的分解产生一定的影响^[15]。因此,本研究通过杉木林施肥与凋落物添加处理,探讨不同施肥以及不同凋落物添加处理对杉木林土壤养分和微生物生物量特征的影响,对改善杉木人工林土壤质量、解决地力衰退问题具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于江西省新余市分宜县山下实验林场(27°33′~27°45′N,114°30′~114°51′E),为赣中南丘陵山地杉木人工林典型分布区。气候类型属于亚热带季风气候,气候湿润,干湿季节明显,气候温和,降水丰沛。年平均气温 16~18℃,年平均降水量 1 400~1 600 mm,降雨主要集中在每年 3—7 月。光照充足,年日照时间为 1 400~1 700 h。无霜期较长,全年无霜期约 270 d。主要地貌类型是低山丘陵,地势南北部较高,中部较低平。土壤类型以红壤和黄壤为主。分宜县地带性植被为亚热带常绿阔叶林与针叶林。主要树种有杉木和马尾松,兼有木荷(*Schima superba*)、闽楠(*Phoebe bournei*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)、红豆杉(*Taxus chinensis*)、柏木(*Cupressus funebris*)等。林下灌木以杜茎山(*Maesa japonica*)、枇杷叶紫株(*Callicarpa kochiana* Makino)等为主,草本以双盖蕨(*Diplazium donianum*)为主。

1.2 样地设置

在对该区域林分实地调查分析后,于 2018 年 4 月进行样地设置。在立地相似有代表性且土壤条件一致的 5 年生杉木纯林内设置样地,面积 20 m×20 m,共 12 块样地。每块样地周围留有间距大于 10

m 的缓冲区。并记录下样地所在位置的地名、林班号、小班号、海拔、坡度、坡向等。测定样地土壤基本理化性质结果分别为:容重 1.31 g/cm³、pH 4.45、有机碳 23.81 g/kg、全氮(total nitrogen, TN)0.89 g/kg、全磷(total phosphorus, TP)0.39 g/kg、碱解氮(alkaline nitrogen, AN)143.5 mg/kg、速效磷(available phosphorus, AP)9.32 mg/kg。

1.3 试验设计

1)施肥设计。在样地内进行 4 种施肥处理设计:不施肥对照、氮肥(每年 200 kg/hm²)、磷肥(每年 50 kg/hm²)和氮肥(每年 200 kg/hm²)+磷肥(每年 50 kg/hm²),编号分别为 CK₁、N、P 和 NP。氮肥为尿素,磷肥为磷酸二氢钠。于 2018 年 10 月进行杉木林地内人工撒播施肥,每种施肥处理 3 块样地。

2)凋落物添加设计。闽楠(*P. bournei*)和木荷(*S. superba*)为该区域顶极植物群落建群树种,引入闽楠、木荷和杉木(*C. lanceolata*)凋落物进行凋落物添加试验。试验用凋落物为未分解状态,包括叶、小枝等各个部分,收集的凋落物自然风干后备用。本研究所有的凋落叶样品均采集于山下实验林场实验林内。于 2018 年 8—10 月,收集本研究需要的 3 个树种的凋落物,每个树种采集的凋落物至少来自 8 棵树,仅收集新鲜的自然凋落物,且无昆虫取食、病菌侵染等痕迹,自然风干至质量稳定后备用。闽楠、木荷和杉木凋落物物理与化学性状见表 1。

8 种凋落物添加类型:对照(不添加凋落物)、添加杉木凋落物、添加木荷凋落物、添加闽楠凋落物、等量添加杉木+木荷凋落物、等量添加杉木+闽楠凋落物、等量添加木荷+闽楠凋落物、等量添加杉木+木荷+闽楠凋落物,编号分别为:CK₂、Cl、Ss、Pb、Cl+Ss、Cl+Pb、Ss+Pb、Cl+Ss+Pb。

表 1 不同树种凋落物的理化性状

Table 1 Physical and chemical characteristics of litters of different tree species

物种 Species	叶片厚度/ μm Blade thickness	碳/(g/kg) Crabon	全氮/(g/kg) TN	全磷/(g/kg) TP	碳氮比 C/N	<i>n</i>
杉木 <i>C. lanceolata</i>	528.5±10.8	424.1±15.8	7.78±0.37	0.39±0.02	55.14±1.96	10
木荷 <i>S. superba</i>	335.9±6.1	429.7±15.9	11.03±0.43	0.28±0.02	40.06±1.23	10
闽楠 <i>P. bournei</i>	251.3±5.7	480.8±16.2	10.99±0.38	0.38±0.03	42.43±1.08	10

将自然风干凋落物装入分解网袋,每袋装入 10 g,单种种种凋落物处理装入 10 g,2 种种种混合凋落物,各装入 5.00 g,3 种种种混合凋落物则各装入 3.33 g,利用订书机封口。每种处理类型重复 4 次,12 个样地内共计放置分解袋 384 个。凋落物分

解网袋尺寸为 20 cm×20 cm,下层孔径为 0.5 mm,上层孔径为 2.0 mm。

2018 年 10 月,在每个样地中采用完全随机区组设计方法设置凋落物添加样方,为防止凋落物网袋被雨水冲刷或森林动物等其他因素使网袋移位或

丢失,除去样地表面原有凋落物后,在每个凋落物网袋的四周使用钢钉将其固定在样方中,并保证网袋底部紧贴表层土壤。

1.4 土壤样品采集

1)土壤样品采集。分别于 2019 年 1 月和 2019 年 7 月取凋落物网袋下面 0~10 cm 层土壤样品。各样方内随机取 5 个点的土样,将同一样方内相同处理的土样混合后装袋。利用冰盒将装袋土壤样本带回实验室。

2)土壤样品处理与测定。在实验室内,将土壤样本筛去碎石与植物残体后分为 2 份,1 份常温下保存,用于测量土壤基本理化性质,另 1 份置于 -20 ℃ 保存,用于测量土壤微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)及微生物生物量磷(MBP)。

参考文献[16-21]方法进行以下指标的测定。土壤含水率(soil water content,SWC)采用烘干法测定;土壤有机碳(soil organic carbon,SOC)含量采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮(total nitrogen,TN)含量采用凯氏定氮仪法测定;土壤碱解氮(alkaline nitrogen,AN)采用碱解扩散法测定;土壤全磷(total phosphorus,TP)含量采用钼锑抗比色法测定;土壤速效磷(alkaline phosphorus,AP)含量采用氢氧化钠-草酸钠提取法测定;土壤微生物生物量碳(microbial biomass of carbon,MBC)和土壤微生物生物量氮(microbial biomass of nitrogen,MBN)含量采用氯仿熏蒸浸提法测定,使用氯仿熏蒸会杀死微生物,分别以熏蒸和不熏蒸所浸提出的有机碳和全氮之差分别除以 0.38 和 0.45(氯仿熏蒸浸提法的微生物生物量碳、氮转换系数)得到微生物生物量碳与微生物生物量氮;土壤微生物生物量磷(microbial biomass of phosphorus,MBP)含量采用氯仿熏蒸-钼锑抗比色法测定,原理与测定微生物生物量碳

与微生物生物量氮类似,转换系数为 0.4。

1.5 数据处理

通过 SPSS20.0 中一般线性模型对不同施肥处理和不同凋落物处理的土壤养分与微生物生物量指标进行差异性检验;用 R 软件 psych 包的 Pearson 分析土壤养分、微生物生物量与土壤化学计量特征的相关性。差异性检验结果用 Origin Pro 软件绘图,相关性系数图用 R 软件 corrplot 包绘制。

2 结果与分析

2.1 施肥和凋落物添加对土壤养分的影响

由表 2、表 3 可见,施用氮磷混合肥显著增加了土壤中的全氮与碱解氮的含量($P<0.05$)。与对照处理相比,施用氮磷混合肥土壤全氮含量增加了 14.7%,土壤碱解氮含量增加了 10.7%($P<0.05$);施用氮肥后,土壤碱解氮含量显著增加了 5%($P<0.05$);施用磷肥后,土壤碱解氮含量显著降低了 15.3%($P<0.05$)。施用氮磷混合肥增加了土壤中碱解氮的含量,且碱解氮的增加量比添加单一元素氮肥多 5.7%($P<0.05$),这说明磷肥的加入对土壤中碱解氮的释放有促进作用。施用磷肥和施用氮磷混合肥后,土壤全磷和速效磷含量相较于对照组显著提高 34.6%和 44.0%($P<0.05$),速效磷含量分别提高 34.8%和 36.7%($P<0.05$)。与对照组相比,施用单一氮肥和单一磷肥对土壤有机碳含量影响不显著,而施用氮磷混合肥则使土壤有机碳含量增加 16.8%($P<0.05$),表明磷肥的施入使氮肥对有机碳含量的提高作用达到显著性水平。

相较于对照组而言,添加杉木凋落物、添加闽楠凋落物及添加杉木+闽楠凋落物的杉木林土壤全氮含量分别增加 3.2%、10.6%及 12.4%($P<0.05$) (表 2,表 3)。

表 2 施肥和凋落物添加对土壤养分影响的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of the effects of fertilization and litter addition on soil nutrients

试验组 Test groups	自由度 DF	碱解氮 AN		全氮 TN		速效磷 AP		全磷 TP		土壤有机碳 SOC	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
施肥 Fertilizer	3	159.216	<0.001	137.172	<0.001	44.617	<0.001	6.930	<0.001	3.921	0.013
凋落物 Litter	7	223.372	<0.001	128.554	<0.001	0.355	<0.001	0.620	<0.001	3.958	0.001
施肥×凋落物 Fertilizer×Litter	21	1.147	0.339	1.019	0.416	1.281	0.237	0.938	0.549	1.204	0.315

表3 不同施肥和凋落物添加处理下的杉木人工林土壤特性

Table 3 Soil characteristics of Chinese fir plantation under different fertilization and litter addition treatments

处理 Treatment	全氮/ (g/kg) TN	碱解氮/ (mg/kg) AN	全磷/ (g/kg) TP	速效磷/ (mg/kg) AP	土壤有机碳/ (g/kg) SOC	微生物 生物量碳/ (mg/kg) MBC	微生物 生物量氮/ (mg/kg) MBN	微生物 生物量磷/ (mg/kg) MBP
CK ₁	0.90±0.01B	176.61±6.66C	0.39±0.02C	9.48±0.32B	21.70±0.76b	321.16±14.55AB	48.63±1.60C	12.51±0.45B
N	1.01±0.01AB	155.70±6.69B	0.45±0.05BC	9.32±0.23B	23.89±1.37ab	310.54±5.64B	52.03±0.89C	12.74±0.29B
P	0.95±0.02B	148.71±8.15D	0.54±0.02A	12.78±0.30A	21.61±1.49b	378.47±6.13A	61.75±1.01A	15.35±0.27A
NP	1.02±0.01A	157.54±6.66A	0.58±0.03A	12.96±0.40A	24.41±1.06a	371.27±5.19A	58.13±1.08B	15.35±0.21A
CK ₂	0.91±0.02E	149.43±1.56D	0.44±0.02A	8.43±0.32C	22.92±0.65B	279.61±11.92D	46.94±2.13D	11.58±0.45C
Cl	1.00±0.02D	155.94±1.24C	0.32±0.02B	7.94±0.23C	26.86±1.72AB	270.20±0.63D	44.47±0.48D	11.03±0.17C
Ss	0.94±0.02E	138.69±1.54F	0.36±0.02B	8.69±0.30BC	30.08±1.77A	306.66±6.12C	50.32±0.23C	12.88±0.40B
Pb	1.04±0.01B	169.80±1.39A	0.40±0.03AB	9.80±0.40B	30.85±2.03A	427.34±7.24A	53.30±0.46B	14.86±0.12A
Ss+Pb	0.94±0.02C	162.03±1.15B	0.42±0.00A	10.03±0.32AB	23.94±1.93B	411.98±2.54B	51.12±0.48BC	14.36±0.45A
Cl+Pb	1.06±0.01A	173.67±1.38A	0.44±0.01A	10.67±0.23AB	30.58±1.21A	434.05±3.43A	57.65±0.15A	15.01±0.14A
Cl+Ss	0.89±0.02DE	145.16±1.33E	0.40±0.02AB	9.16±0.30BC	25.31±1.52B	314.24±3.49C	52.06±0.37BC	12.33±0.31BC
Cl+Pb+Ss	0.99±0.01F	168.14±1.35A	0.44±0.02A	11.14±0.40A	29.08±1.30AB	428.32±5.55AB	55.70±0.57A	14.42±0.46A

注:不同大写字母(A-D)表示处理间存在极显著差异($P<0.001$),不同小写字母(a,b)表示处理间存在显著差异($P<0.05$),下同。

Note: Different capital letters (A-D) indicate significant differences between treatments ($P<0.001$), different lowercase letters (a, b) indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same as below.

添加闽楠凋落物、杉木+闽楠凋落物及杉木+闽楠+木荷凋落物显著提高土壤碱解氮达16.5%、18.4%和16.8% ($P<0.05$) (表3)。尽管添加杉木凋落物与添加木荷+闽楠凋落物后土壤碱解氮的含量分别增加了2.8%和10.1%,但是添加木荷凋落物与添加木荷+杉木凋落物后却降低了土壤中碱解氮的含量($P<0.05$)。试验表明,木荷凋落物的加入对土壤碱解氮含量有抑制作用。与仅添加闽楠凋落物相比,添加杉木+闽楠凋落物处理后土壤碱解氮含量增加9.5% ($P>0.05$)。

与对照组相比,添加闽楠凋落物与添加木荷+闽楠凋落物、杉木+闽楠凋落物及杉木+木荷+闽楠凋落物对土壤速效磷的含量分别显著增加16.2%、19.0%、26.6%及32.1% ($P<0.05$) (表2、表3)。3种混合凋落物添加与单一杉木凋落物添加相比,土壤速效磷含量均显著提高了40.4%以上($P<0.05$)。

与对照组相比,添加木荷凋落物、闽楠凋落物与杉木+闽楠混合凋落物时土壤有机碳含量显著增加了31.3%、34.6%和33.4% ($P<0.05$) (表2、表3)。

施肥与凋落物添加的交互作用对土壤中的碱解氮、全氮、速效磷、全磷、有机碳含量无显著影响(表2)。

2.2 施肥和凋落物添加对土壤微生物特性的影响

与对照组相比,施用磷肥和氮磷混合肥后杉木林土壤微生物生物量氮与微生物生物量磷含量分别增加27.0%与22.8%,及19.5%和22.7% ($P<0.05$) (表4)。相较于对照组,施用氮肥后杉木林土壤中微生物生物量碳的含量降低了3.3% ($P<0.05$),而对微生物生物量氮和微生物生物量磷无显著影响。施用磷肥和氮磷混合肥后,微生物生物量磷的含量分别提升了23.6%和29.3% ($P<0.05$)。

表4 施肥和凋落物添加对土壤微生物特性影响的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA of the effects of fertilization and litter addition on soil microbial characteristics

试验组 Test groups	自由度 DF	微生物生物量碳 MBC		微生物生物量氮 MBN		微生物生物量磷 MBP	
		F	P	F	P	F	P
施肥 Fertilizer	7	1.257	<0.001	0.467	<0.001	0.626	<0.001
凋落物 Litter	3	9.112	<0.001	31.507	<0.001	26.375	<0.001
施肥×凋落物 Fertilizer×Litter	21	5.899	<0.001	1.936	0.037	1.562	0.027

添加杉木+闽楠凋落物后,各项土壤微生物生物量含量均为最高($P<0.01$)。与对照组相比,添加闽楠凋落物后土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮与微生物生物量磷含量分别提高52.8%、13.6%、28.3% ($P<0.05$),添加杉木+木荷+闽楠

三树种混合凋落物后分别提高了51.2%、18.7%及24.5% ($P<0.05$),添加杉木+闽楠混合凋落物后分别提高55.2%、22.8%及29.6% ($P<0.05$) (表4)。而添加杉木凋落物对土壤微生物特性无显著影响。

施肥与凋落物添加交互作用对土壤微生物生物量碳、氮和磷具有显著影响,表现为施用氮磷混合肥与添加杉木+木荷+闽楠混合凋落物(CI+Ss+Pb)显著高于其他施肥与凋落物添加组合。与对照处理(CK₂)相比,在施用氮肥的样地中添加木荷凋落物(Ss)、闽楠凋落物(Pb)、杉木+木荷混合凋落

物(CI+Ss)、杉木+闽楠混合凋落物(CI+Pb)、木荷+闽楠凋落物(Ss+Pb)对土壤微生物生物量碳含量表现出抑制效果,降低了土壤微生物碳含量。就微生物生物量磷而言,施加氮肥与添加闽楠以及 4 种混合凋落物降低了土壤微生物磷的含量(表 4, 图 1)。

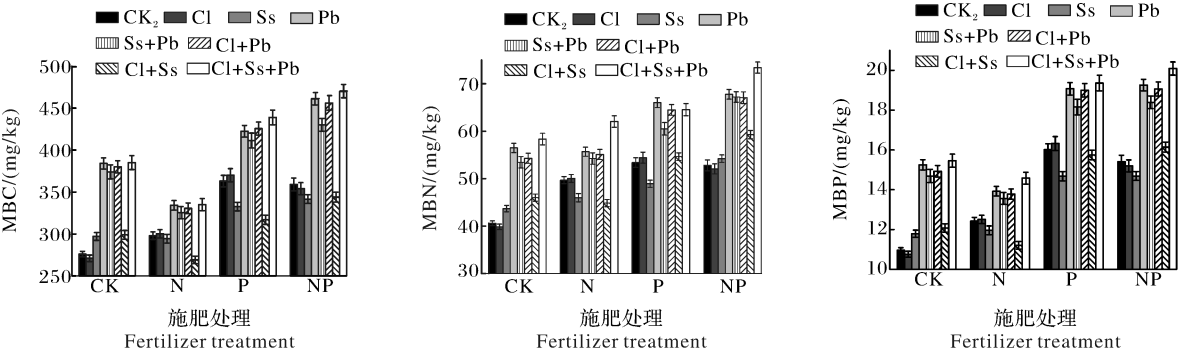


图 1 施肥与凋落物添加交互作用与土壤微生物特性

Fig.1 Soil microbial characteristics under fertilization and litter addition

2.3 施肥和凋落物添加对土壤化学计量特征的影响

从表 5 可以看出,与对照组相比,施用磷肥与氮磷肥混合后分别使杉木林土壤 C : N 分别增加 30.7%和 37.2%,C : P 分别减少 19.5%和 16.6%,N : P 分别减少 38.3%和 39.0%;施用氮肥后虽然使杉木林土壤 N : P 减少了 19%($P<0.05$),但对土壤 C : N 和 C : P 没有显著影响。与施用氮肥相比,施用氮磷混合肥显著提高了土壤 C : N,磷肥的加入使得土壤 C : N 有了显著的提升(图 2)。

由表 5 可见,凋落物添加对土壤化学计量特征的显著影响均没有达到显著性水平。

施肥与凋落物添加交互作用对土壤 N : P 具有显著影响,表现为施用氮磷混合肥与添加闽楠、杉木+木荷+闽楠混合凋落物显著低于其他施肥与凋落物添加组合。在对照处理的样地中添加杉木凋落物的土壤 N : P 高于添加木荷凋落物与添加杉木+木荷混合凋落物处理,而在施肥的样地中添加杉木凋落物土壤 N : P 低于木荷凋落物与添加杉木+木荷混合凋落物处理(表 5,图 3)。

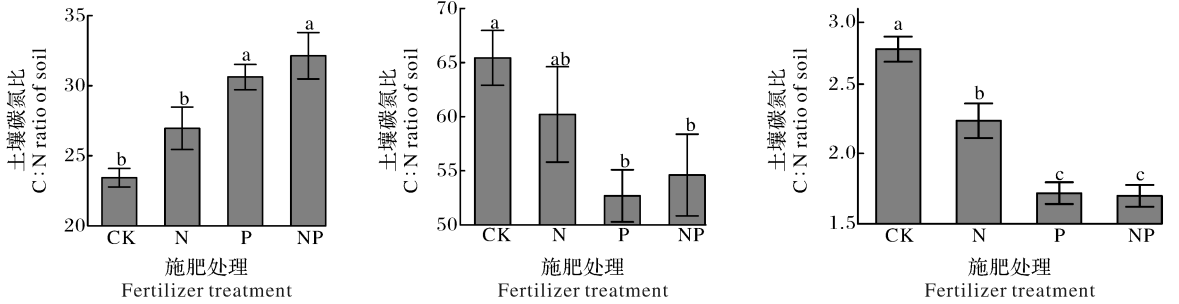


图 2 不同施肥处理下土壤化学计量特征

Fig.2 Soil stoichiometry under different fertilization

表 5 施肥和凋落物添加对土壤化学计量特征影响的显著性分析

Table 5 The significance analysis of the effects of fertilization and litter on soil stoichiometric characteristics

试验组 Test groups	自由度 DF	碳氮比 C : N		碳磷比 C : P		氮磷比 N : P	
		F	P	F	P	F	P
施肥 Fertilizer	7	1.611	0.151	1.671	0.135	0.442	0.872
凋落物 Litter	3	9.654	<0.001	2.900	0.042	27.938	<0.001
施肥×凋落物 Fertilizer×Litter	21	1.687	0.118	0.922	0.514	3.331	0.003

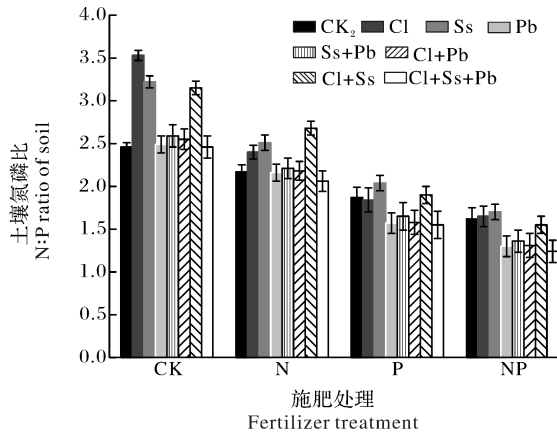


图3 不同凋落物添加下土壤化学计量特征

Fig.3 Soil stoichiometric characteristics under different litter addition

2.4 杉木林土壤养分与土壤化学计量特征的关系

由图4可知,杉木林土壤AN与TN呈正相关;土壤AP与TP、MBP呈正相关,与N:P呈负相关。土壤TP与C:P、N:P呈负相关。土壤MBC与MBP、MBC:MBN呈正相关。土壤MBN与MBP呈正相关。土壤MBC:MBN与MBC:MBP呈正相关,与MBN:MBP呈负相关。土壤MBC:MBP与C:N呈负相关。土壤SOC与C:N呈正相关。土壤C:P与N:P呈正相关。

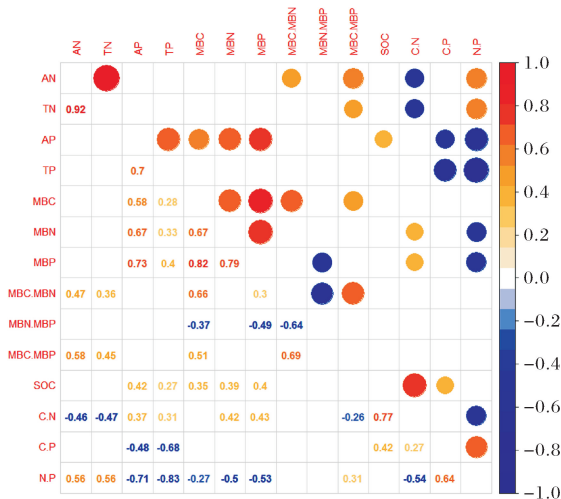


图4 土壤养分与土壤化学计量特征的相关性

Fig.4 Pearson correlation analysis of soil nutrient and soil stoichiometric properties

3 讨论

在全球氮沉降加剧和南方土壤普遍缺磷的背景下,研究外源性氮磷输入对杉木人工林土壤特性的

影响,以及在杉木林生长过程中凋落物的作用,对寻找杉木人工纯林地力衰退的解决方法与实施措施确定具有重要意义。本研究结果显示,当杉木土壤施用外源性磷后,土壤的碱解氮含量显著降低。施磷肥对于土壤碳氮元素含量的这种负面影响曾被 Po-eplau 等^[22]观测到。当林地施用磷肥后,森林的初级净生产力增加,但同时也使得土壤氮显得更为缺乏,并导致了微生物进行更强的氮矿化作用。

施用化肥对土壤微生物量影响的研究结果不尽相同^[23-24],这可能与土地利用方式、施肥方式或年限有关。林地施用氮肥后显著降低了土壤微生物生物量碳含量。这可能是在南方土壤普遍缺磷背景下,林地施用尿素后使土壤酸化与板结^[25],土壤通气性降低,改变了土壤物理性状,抑制了土壤微生物的生命活动,从而显著降低了土壤微生物生物量碳含量^[26]。林地施用氮磷混合肥料能显著提高土壤微生物生物量氮和微生物生物量磷的含量。这可能是由于适量施用氮肥与磷肥能够增加植物光合作用产物积累,增加其向地下部分配量,增加根系生物量和根系分泌物,使得供给土壤微生物同化和利用的氮源与磷源充足^[27]。

森林凋落物的分解对于土壤营养产生重要的影响。就土壤氮元素而言,林地添加闽楠凋落物或木荷凋落物带来了相反的作用,林地添加杉木+闽楠混合凋落物后土壤氮磷含量表现出显著提升,而林地添加杉木+木荷混合凋落物后土壤氮磷含量则表现出降低的现象,这与林开敏等^[28-29]研究结果一致。林开敏等^[28-29]研究认为就木荷+杉木混合凋落物分解状况来说,分解前期表现出木荷凋落物对土壤氮磷含量有微弱的促进作用,而后表现出抑制作用,且木荷的比例越高,抑制作用越显著。这可能是由于木荷的叶片相对较厚且是革质叶(表1),叶表的蜡质层和角质层也更厚,限制了菌丝的侵入,且木荷凋落物淋溶液较其他2种凋落物淋溶液呈现出更强的酸性,进而影响到凋落物的分解;而闽楠+杉木混合凋落物会对混合凋落物分解起到促进作用,并且随着闽楠叶添加增多其促进作用越明显。

杉木林地添加单一杉木凋落物后,虽然能显著增加土壤中碱解氮的含量,并对全氮含量表现出一定的促进作用^[30],但显著降低了土壤中全磷的含量,并且对土壤微生物生物量含量起到了消极作用。在退化的杉木纯林中,林下植被较差,凋落物较少,添加外源凋落物能促进养分的归还,从而对土壤中的氮含量提升起到了促进作用。当林地添加单一木

荷凋落物、单一闽楠凋落物以及混合凋落物时,凋落物对杉木林土壤微生物生物总量、微生物生物量碳、微生物生物量氮及微生物生物量磷含量均有明显的提升作用。这可能时因为加入的阔叶树种凋落物比叶面积较大,在单位质量凋落物上能承载更多的微生物。当添加的混合凋落物覆盖在土壤表层后,土壤微生物量增加,土壤微生物活性改善,从而改善土壤化学性状。多树种混合凋落物比单一树种凋落物含有类型更丰富多样的碳源和其他养分物质,更利于微生物繁殖及其多样性的增加。

土壤 C:N 不仅是衡量土壤碳、氮营养平衡状况的指标^[14],还会影响土壤中有有机碳和氮的循环。土壤 C:N 可表示土壤有机质的矿化速率,其比值越低则土壤矿化速率越快。在本研究中,林地施用磷肥和施用氮磷混合肥后土壤 C:N 增大,土壤微生物矿化作用速度降低,可供杉木吸收利用的 C 与 N 元素随之减少,说明施用磷肥和施用氮磷混合肥增加了土壤中的 C 与 N 储量,降低了 N 的有效性,增强了土壤固氮潜力。相关分析表明,杉木林地土壤 C:N 与有机碳的相关性大于与全氮的相关性,说明土壤的 C:N 主要受土壤有机碳的影响。

土壤中磷元素的有效性是通过有机质的分解速率确定的,较低的土壤 C:P 是土壤磷元素有效性高的一个标志^[14]。施用磷肥和施用氮磷混合肥后土壤 C:P 下降,施肥提高了土壤的有效磷含量,说明施用磷肥和施用氮磷混合肥可以有效地改善杉木林土壤缺磷素状况。此外,C:P 与全磷的相关性大于与有机碳的相关性,说明土壤 C:P 主要受土壤全磷的影响。

土壤 N:P 是作为土壤养分限制、土壤碳氮磷饱和度的诊断和有效预测的重要指标。一般来说,当土壤 N:P 较低时,说明其生态系统主要受氮限制,而较高的 N:P 则主要受磷限制。在本研究中,林地施肥后土壤 N:P 明显下降。对照组土壤的 N:P 低于全国土壤 N:P(5:1),这可能是凋落物的 C:N 通常高于土壤微生物,微生物在进行分解活动必须从外部环境中获取足够的磷源以满足自身代谢的需要,对磷素有较高的需求,当土壤中磷素的含量较高时,微生物群落生长代谢更快,分解活动也就更快,会从土壤中摄取更多的氮素,从而导致土壤 N:P 下降。此外,相关分析表明,土壤 N:P 与土壤磷元素的相关性要比与氮元素的相关性大,说明土壤 N:P 主要受土壤磷元素的影响。

总体来讲,施用氮磷混合肥后显著增加了杉木

林土壤碱解氮、速效磷、土壤微生物生物量氮、微生物生物量磷含量;添加杉木+闽楠和添加杉木+木荷+闽楠凋落物显著提高了杉木林土壤碱解氮、速效磷含量以及土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物生物量磷含量。且该混合施肥与混合凋落物处理的交互效应更显著提高了土壤养分和土壤微生物生物量。因此,在杉木林生产中,应该充分利用多树种混合凋落物分解后所产生的正向效应,提倡营造杉×阔混交林以及对现有杉木纯林进行近自然化改造以改变其凋落物的组成、质量和数量,并配合施用氮磷复合肥料来改善杉木林土壤养分状况,这对于维护杉木人工林生态系统的养分循环和促进地力恢复具有重要的意义。

参考文献 References

- [1] 郑万钧.中国树木志[M].北京:中国林业出版社,1983.ZHENG W J. Chinese silva [M]. Beijing: China Forestry Press, 1983 (in Chinese).
- [2] FAROOQ T, WU W, TIGABU M, et al. Growth, biomass production and root development of Chinese fir in relation to initial planting density[J/OL]. Forests, 2019, 10(3): 236 [2021-03-11]. <http://dx.doi.org/10.3390/f10030236>.
- [3] 田甜,白彦锋,张旭东,等.杉木人工林地力衰退的原因及对策研究[J].林业科技通讯,2019(4):6-10. TIAN T, BAI Y F, ZHANG X D, et al. Reasons and countermeasures of soil fertility decline of Chinese fir plantation[J]. Forestry science and technology newsletter, 2019(4): 6-10 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李宜浓,周晓梅,张乃莉,等.陆地生态系统混合凋落物分解研究进展[J].生态学报,2016,36(16):4977-4987. LI Y N, ZHOU X M, ZHANG N L, et al. Research progress of mixed litter decomposition in terrestrial ecosystems[J]. Acta ecologica sinica, 2016, 36(16): 4977-4987 (in Chinese with English abstract).
- [5] LU W J, LIU N, ZHANG Y J, et al. Impact of vegetation community on litter decomposition: evidence from a reciprocal transplant study with ¹³C labeled plant litter[J]. Soil biology & biochemistry, 2017, 112: 248-257.
- [6] 王相娥,薛立,谢腾芳.凋落物分解研究综述[J].土壤通报,2009,40(6):1473-1478. WANG X E, XUE L, XIE T F, et al. A review on litter decomposition[J]. Chinese journal of soil science, 2009, 40(6): 1473-1478 (in Chinese with English abstract).
- [7] 徐阳春,沈其荣,冉炜.长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J].土壤学报,2002,39(1):83-90. XU Y C, SHEN Q R, RAN W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping[J]. Acta pedologica sinica, 2002, 39(1): 83-90 (in Chinese with English abstract).
- [8] HOSSAIN M S, HOSSAIN A, SARKAR M A R, et al. Pro-

- ductivity and soil fertility of the rice-wheat system in the High Ganges River Floodplain of Bangladesh is influenced by the inclusion of legumes and manure[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2016, 218: 40-52.
- [9] ZHANG J, WANG S L, FENG Z W, et al. Stability of soil organic carbon changes in successive rotations of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) plantations[J]. Journal of environmental sciences, 2009, 21(3): 352-359.
- [10] WANG H, CHU H, DOU Q, et al. Phosphorus and nitrogen drive the seasonal dynamics of bacterial communities in *Pinus* forest rhizospheric soil of the Qinling Mountains[J/OL]. Frontiers in microbiology, 2018, 9: 1930[2021-03-11]. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01930.
- [11] WANG Q K, ZHANG W D, 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: 66-73.
- [12] GÜSEWELL S, FREEMAN C. Enzyme activity during N-and P-limited decomposition of wetland plant litter[J]. Bulletin of the Geobotanical Institute ETH, 2003, 69: 95-106.
- [13] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947. WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta ecologica sinica, 2008, 28(8): 3937-3947(in Chinese with English abstract).
- [14] 张雪梅, 王永东, 徐新文, 等. 塔里木沙漠公路防护林地表凋落物分解对施肥的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1506-1514. ZHANG X M, WANG Y D, XU X W, et al. Effects of fertilizer addition on surface litter decomposition in the Tarim Desert Highway shelterbelt[J]. Acta ecologica sinica, 2017, 37(5): 1506-1514(in Chinese with English abstract).
- [15] 郑欣颖, 余汉基, 薛立, 等. 外源性氮和磷添加对马尾松凋落叶分解及土壤特性的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1710-1718. ZHENG X Y, SHE H J, XUE L, et al. Effects of N and P additions on decomposition of needle litter and soil characteristics in *Pinus massoniana* woodland[J]. Ecology and environmental sciences, 2017, 26(10): 1710-1718(in Chinese with English abstract).
- [16] 黎冬容, 张世庆, 甘世端, 等. 全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮含量[J]. 南方国土资源, 2015(8): 38-39. LI D R, ZHANG S Q, GAN S D, et al. The soil total nitrogen content was determined by automatic Kjeldahl nitrogen determination apparatus[J]. Nanfang Guotu Ziyuan, 2015(8): 38-39(in Chinese).
- [17] 吴秀玲, 陈惠娟, 孙媛. 氢氧化钠熔融法测定土壤中全磷、全钾及氟化物实验[J]. 宁夏农林科技, 2017, 58(7): 44-45. WU X L, CHEN H J, SUN Y. Study on the determination of total phosphorus, total potassium and fluoride in soil through sodium hydroxide fusion method[J]. Ningxia journal of agriculture and forestry science and technology, 2017, 58(7): 44-45(in Chinese with English abstract).
- [18] 施畅, 万秋月, 秦冲, 等. 塑料密封盒-滴定法测定土壤中碱解氮[J]. 中国无机分析化学, 2017, 7(3): 33-37. SHI C, WAN Q Y, QIN C, et al. Determination of alkali-hydrolyzable nitrogen in soil by titration with a sealed plastic box[J]. Chinese journal of inorganic analytical chemistry, 2017, 7(3): 33-37(in Chinese with English abstract).
- [19] 张国辉, 王莹, 武巍, 等. 土壤有效磷测定方法概述[J]. 黑龙江农业科学, 2017(1): 160-162. ZHANG G H, WANG Y, WU W, et al. Overview of determination methods of available phosphorus in soil[J]. Heilongjiang agricultural sciences, 2017(1): 160-162(in Chinese with English abstract).
- [20] 刘新. 土壤有机质的测定方法研究[J]. 河南农业, 2019(7): 19. LIU X. Study on the determination method of soil organic matter[J]. Agriculture of Henan, 2019(7): 19(in Chinese).
- [21] 吴金水, 肖和艾, 陈桂秋, 等. 旱地土壤微生物磷测定方法研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 70-78. WU J S, XIAO H A, CHEN G Q, et al. Measurement of microbial biomass-P in upland soils in China[J]. Acta pedologica sinica, 2003, 40(1): 70-78(in Chinese with English abstract).
- [22] POEPLAU C, BOLINDER M A, KIRCHMANN H, et al. Phosphorus fertilisation under nitrogen limitation can deplete soil carbon stocks: evidence from Swedish meta-replicated long-term field experiments[J]. Biogeosciences, 2016, 13(4): 1119-1127.
- [23] 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2792-2798. SUN F X, ZHANG W H, XU M G, et al. Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon and nitrogen and on carbon source utilization of microbes in a red soil[J]. Chinese journal of applied ecology, 2010, 21(11): 2792-2798(in Chinese with English abstract).
- [24] 郭振, 王小利, 徐虎, 等. 长期施用有机肥增加黄壤稻田土壤微生物量碳氮[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1168-1174. GUO Z, WANG X L, XU H, et al. A large number of long-term application of organic fertilizer can effectively increase microbial biomass carbon and nitrogen in yellow paddy soil[J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2017, 23(5): 1168-1174(in Chinese with English abstract).
- [25] MAO Q G, LU X K, ZHOU K J, et al. Effects of long-term nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in an N-rich tropical forest[J]. Geoderma, 2017, 285: 57-63.
- [26] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 有机肥氮投入比例对双季稻田根际土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1335-1343. TANG H M, LI C, XIAO X P, et al. Effects of different manure nitrogen input ratio on rhizosphere soil microbial biomass carbon, nitrogen and microbial quotient in double-cropping rice field[J]. Chinese journal of applied ecology, 2019, 30(4): 1335-1343(in Chinese with English abstract).
- [27] 齐莎, 赵小蓉, 郑海霞, 等. 内蒙古典型草原连续5年施用氮磷肥土壤生物多样性的变化[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5518-5526. QI S, ZHAO X R, ZHENG H X, et al. Changes of soil biodiversity in Inner Mongolia steppe after 5 years of N and P fertilizer applications[J]. Acta ecologica sinica, 2010, 30(20):

- 5518-5526(in Chinese with English abstract).
- [28] 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(in Chinese with English abstract).
- [29] 林开敏,洪伟,俞新妥,等.杉木与伴生植物凋落物混合分解的相互作用研究[J].应用生态学报,2001,12(3):321-325.LIN K M, HONG W, YU X T, et al. Decomposition interaction of mixed litter between Chinese fir and various accompanying plant species[J]. Chinese journal of applied ecology, 2001, 12(3):321-325(in Chinese with English abstract).
- [30] 魏强.亚热带典型森林凋落物输入对土壤有机碳累积和稳定性影响[D].福州:福建农林大学,2018.WEI Q. The effect of litter input on soil organic carbon accumulation and stability in typical subtropical forests[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018(in Chinese with English abstract).

Effects of fertilization and litter addition on soil nutrient and soil microbial properties of Chinese fir plantation

JIN Yunduo¹, BAI Yanfeng², SHEN Yangyang¹, LI Yueqiao³, LIU Ru³,
JIANG Chunqian², ZHANG Zhuowen¹, WANG Yongjian¹

1. College of Horticulture and Forestry Sciences/Hubei Engineering Technology
Research Center for Forestry Information, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China
2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, China
3. Experimental Center of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fenyi, 336600, China

Abstract Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) belongs to the light-tolerant coniferous species of *Cunninghamia* family, which is widely distributed in China and Vietnam. It has a series of characteristics including fast growth, high yield, beautiful wood grain, insect resistance (such as termites), corrosion resistance, and adaptability to arid and arid habitats. It is one of the important endemic fast-growing timber species in China. In order to solve the decline of soil quality in Chinese fir plantations and the problem of soil fertility decline, effects of fertilization and litter addition on soil nutrient and soil microbial properties of Chinese fir plantation in Central South Jiangxi Province were studied by using the bag method to set up different fertilization treatments and litters of multiple tree species combined treatments. The results showed that compared with the control (without fertilization) treatment, the content of soil alkline nitrogen and available phosphorus of mixed N + P fertilizers treatment in the Chinese fir plantation soil increased by 10.7% and 36.7%, respectively, which was significantly higher than that of the single fertilizer treatment. Compared with the control (without addition of litters) treatment, mixed addition of litters of *C. lanceolata* + *P. bournei* and single addition of *P. bournei* litter promoted soil microbial biomass significantly, indicating that the litter of *P. bournei* played a key role in decomposing the mixed litter of Chinese fir plantation. In practice, the mixed forest of *C. lanceolata* × broad-leaved is recommended, and the current young to mid age pure *C. lanceolata* stand should be reformed by means of close-to-nature transformation in order to change the composition, quality and quantity of litter. In this way, the additive effect of decomposing mixed litter of multiple tree species can be fully used and the soil nutrient status of the Chinese fir plantation can be improved by combining with the application of mixed N+P fertilizers.

Keywords Chinese fir; woodland management; mixed litters; close-to-nature transformation; microbial biomass; plantation; soil nutrients; ground power decline

(责任编辑:赵琳琳)