

凋落物的树种多样性与杉木人工林土壤生态功能

汪思龙, 黄志群, 王清奎, 于小军

(中国科学院会同森林生态实验站, 沈阳 110016)

摘要:通过模拟试验和野外调查对凋落物的树种多样性与杉木人工林土壤生态功能之间关系进行了研究。林分取样调查的结果表明,有两个树种凋落物覆盖的几个杉阔混交林土壤脲酶和蔗糖酶活性均明显高于只有杉木凋落物覆盖的杉木纯林土壤,酸性磷酸酶活性也呈现相同的变化趋势,这 3 种土壤酶活性均以具有凋落物种类最多的次生常绿阔叶林土壤最高。除了土壤酶活性升高之外,杉阔混交林的土壤有机质和全氮含量也明显高于仅有一种杉木凋落物覆盖的杉木纯林土壤。采用杉木叶凋落物与不同阔叶树种凋落物处理土壤的模拟试验结果表明,在凋落物投放量和 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 施用量相同的控制条件下,随着投放的凋落物树种组成的增加,土壤中 ^{15}N 的残留量也随之增加,而其损失量却随之减少;土壤中杉木幼树对于 ^{15}N 的吸收量以及杉木幼树的单株鲜重也随着处理凋落物组成树种的增加而增加,具有不同树种数量的凋落物处理之间差异显著($p < 0.05$)。可见随着凋落物树种多样性的增加,不仅土壤有机质和全氮含量这两个基本的质量指标得到明显改善,而且土壤酶活性、土壤养分保蓄功能以及保证幼树良好生长等的生态功能明显改善。

关键词:杉木;凋落物树种多样性;土壤生态功能;纯林;混交林

Effects of species diversity of litter on the ecological functions of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. plantation soil

WANG Si-Long, HUANG Zhi-Qun, WANG Qing-Kui, YU Xiao-Jun (Huitong Experimental Station of Forest Ecology of Chinese Academy of Science, Shenyang 110016). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 474~480.

Abstract: Based on a field study and pot trial, the effects of species diversity of litter on the ecological functions of *Cunninghamia lanceolata* plantation forest soil were examined. In the field study, four plantation forest stands with similar site quality, one *C. lanceolata* pure stand and three of its mixed stands with *Alnus cremastogyne*, *Kalopanax septemlobus*, and *Michelia macclurei*, respectively, were investigated. Soil samples taken from each stand were analyzed for enzyme activity, total N, SOM, and total phenolics. A stand of nearby secondary evergreen broadleaved forest was also investigated and sampled as a control. A additional 7-mo pot trial was set up by incorporating the litter of several broadleaved tree species as well as *C. lanceolata* needle litter into potted soil planted with *C. lanceolata* saplings to compare the effects of litter species diversity on soil qualities. There were four different treatments with litter from four different species, given combinations of *C. lanceolata* litter with that of *M. macclurei*, *Castanopsis carlesii*, *K. septemlobus*. The soil of each pot was also treated with 200mg of $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-N}$ (with ^{15}N abundance of 20.97%) to track the fate of labeled ^{15}N under the effects of the mixed litter treatment. The results of the field study showed that the activity of urease and invertase in soil covered by *C. lanceolata* litter mixed with a broadleaved species within mixed plantations was significantly higher than the activities in soil covered by only *C. lanceolata* litter under its monoculture. The activity of acidic phosphatase in soil also changed in the same pattern among sampled forest stands. The activities of the three soil enzymes were greatest in the adjacent secondary evergreen broadleaved

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向课题资助项目(KZCX3-SW-418);国家自然科学基金资助项目(30270268)

收稿日期:2004-02-21; **修订日期:**2004-12-08

作者简介:汪思龙(1964~),男,安徽青阳人,博士,研究员,主要从事人工林土壤生态学,恢复生态学研究。E-mail: slwang21@iae.ac.cn

Foundation item: Chinese Academy of Science Program (No. KSCX3-SW-418) and National Natural Science Foundation of China (No. 30270268)

Received date: 2004-02-21; **Accepted date:** 2004-12-08

Biography: WANG Si-Long. Ph. D., Professor, mainly engaged in soil ecology of plantation, and restoration ecology. E-mail: slwang21@iae.ac.cn

forest. In addition, the concentration of soil organic matter and total nitrogen increased in the mixed-species *C. lanceolata* plantation compared with the *C. lanceolata* monoculture. The results of the pot trial showed that although the concentration of $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ in soil at the end of experiment increased, the loss of $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ from the soil decreased as the number of species of litter in the mixture increased. The fresh weight and uptake of ^{15}N by *C. lanceolata* saplings increased with the increase in the number of species of litter in the mixture ($p<0.05$). It is suggested that as the mixed-species litter was incorporated into the soil, there were significant improvements not only in the basic indices of soil quality such as soil organic matter and total nitrogen, but also in other soil quality indices such as the activity of soil enzyme, capacity of preserving soil nutrients and ensuring the growth of saplings in soil.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; species diversity of litter; soil ecological functions; monoculture

文章编号:1000-0933(2005)03-0474-07 中图分类号:S718.5 文献标识码:A

随着生态系统生物多样性研究的不断深入,众多学者对于植物多样性如何或以何种方式影响生态系统功能越来越感兴趣^[1~4]。然而大量的研究几乎整个地集中在活体植物以及活体植物的地上部分的相互作用过程,实际上生物多样性的生态系统功能是通过种间相互作用产生的,而这种相互作用很大程度上发生在凋落物分解过程当中,因此植物凋落物被认为具有非常重要的死后效应,并决定了群落和系统水平的生态系统特征^[5,6]。因此植物凋落物的物种多样性对影响整个多样性-功能关系可能也是重要的^[7]。

在一个分解作用缓慢,凋落物相对积累的生态系统中,植物凋落物可能具有特殊重要的作用^[8]。杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)在我国是一个十分重要的用材树种,而在杉木人工纯林生态系统当中,凋落物分解缓慢并积累一厚层凋落物^[9~12]。林农面临的一个严重的问题就是杉木纯林在相同立地连栽 2 至 3 代以后导致立地质量明显下降^[9]。缓解立地下降问题的一个有效途径就是营造包括某种阔叶树种的混交林,这个阔叶树种一般具有地力养护效应,例如共生固氮作用^[13]。本研究旨在以杉木人工林为例,通过长期监测和模拟试验证明混交林当中凋落物树种多样性对于土壤生态功能的影响。

1 材料和方法

1.1 野外试验

试验调查林分位于中国科学院会同森林生态实验站试验林场(110°08'E, 27°09'N),该地海拔 200~500m,为低山丘陵地貌类型,属典型中亚热带湿润气候,年均温度 16.5℃,年均降雨量约 1200mm,年平均相对湿度 80%。土壤为山地红壤。在大致相似的立地上,选择了一组 4 个林分进行长期监测调查,其中包括 1 个杉木纯林和 3 个杉阔混交林,混交的阔叶树种分别是刺楸(*Kalopanax septemlobus*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)和火力楠(*Michelia macclurei*),另外对于邻近保留的次生常绿阔叶林也进行了对比试验,试验林分的基本情况见表 1。

于 1999 年 10 月从上述每一个林分当中以均匀布点法采取土壤样品,每个林分设 5 个采样点,用内径为 5cm 的取样器分别从 0~10cm 和 10~20cm 土层取样,然后对土样分析测定。

转化酶(蔗糖酶,实为 β-呋喃果糖甘酶)活性的测定是根据酶促反应过程中释放出的还原糖,通过硫代硫酸钠滴定,用碘量法测出还原糖的量,转化酶活性以还原糖量表示。脲酶活性的测定是以尿素为基质经酶促反应后测定生成的氨量;磷酸酶活性的测定是以苯磷酸二钠为基质经酶促反应后测定释放出的酚量。土壤全氮含量的测定采用半微量凯氏法,土壤有机质分析采用重铬酸钾和浓硫酸氧化外加热(170~180℃)法,活性土壤有机质分析采用重铬酸钾和浓硫酸氧化法。土壤总酚含量的测定采用福林(Folin-Ciocalteu)比色法^[14]。

1.2 模拟试验

取杉木、火力楠、红栲(*Castanopsis carlesii*)、刺楸凋落叶若干,在 45℃下烘干后粉碎备用。分别用上述几种凋落物组成 7 个组合,每一处理代表不同的凋落物组合或不同凋落物多样性,各处理的凋落物组成见表 2,另设一个对照(不加任何凋落

表 1 不同类型的调查林分及其特征
Table 1 Different types of stands investigated and their characteristics

林分类型* Stand type	林龄 Stand Age (a)	胸径 DBH (cm)	树高 Height (m)	林分密度 Density (trees/hm ²)	坡度 Slope	坡向 Aspect
90S	10	12.18	11.0	2700	26	SW
90SC	10	12.98	13.4	2700	23	SW
90SQ	10	13.39	13.4	2700	28	SE
84SN	16	9.7	10.5	2550	30	SE
K	35	22.11	13.99	1124	35	NE

* 90S 1990 年造杉木二代纯林 pure *Cunninghamia lanceolata* plantation planted in 1990; 90SC 1990 年造杉木(8)刺楸(2)混交林 mixed plantation of 80% of *C. lanceolata* with 20% of *Kalopanax septemlobus* planted in 1990; 90SQ 1990 年造杉木(8)桤木(2)混交林 mixed plantation of 80% of Chinese fir with 20% of *Alnus cremastogyne*; 84SN 1984 年造杉木(8)火力楠(2)混交林 mixed plantation of 80% of *C. lanceolata* with 20% of *Michelia macclurei*; K 次生常绿阔叶林 Secondary evergreen broad-leaved forest; 下同 the same as below

物处理),每个处理重复 4 次。将上述凋落叶与土壤充分拌和后装入口径为 25cm 的花盆,每盆移植大小基本相同的杉木 1 年生幼苗 1 株。然后将标记¹⁵N 的硫酸铵(丰度 20.97%)溶液深施于每一处理的土表下 5cm,施用剂量为 200mg/盆。盆栽试验从 2001 年 2 月 1 日开始至同年 9 月 1 日结束。实验在温室大棚中进行,各苗木在每天早晨定时浇水 1 次。实验结束时将各苗木分成根、茎和叶 3 部分分别称取鲜重,并取样,然后在 45℃下烘干后供分析全氮和¹⁵N;盆内土壤全部倒出充分混匀后,取样风干供室内分析。上述植物样品和土壤样品均测定全氮和¹⁵N。相关数据用 *t* 检验比较其差异显著性。全 N 分析方法同上,¹⁵N 分析用 VG602 型质谱仪测定。

表 2 各处理凋落物组成
Table 2 Foliar litter composition of different treatment

处理 Treatments	硫酸铵施用量 (¹⁵ NH ₄) ₂ SO ₄ -N applied (mg/pot)	杉木凋落叶 Litter of <i>C. lanceolata</i> (g)	火力楠凋落叶 Litter of <i>M. macclurei</i> (g)	红栲凋落叶 Litter of <i>C. carlesii</i> (g)	刺楸凋落叶 Litter of <i>K. septemlobus</i> (g)	凋落叶总量 Total amount of litter added(g)
H	200	0	0	0	0	0
A	200	30	0	0	0	30
B	200	15	15	0	0	30
C	200	15	0	15	0	30
D	200	15	0	0	15	30
E	200	10	10	10	0	30
F	200	10	10	0	10	30
G	200	7.5	7.5	7.5	7.5	30

2 结果

2.1 土壤酶活性

作为对于凋落物树种组成改变的一个响应,所调查的土壤酶活性发生明显的变化。0~10cm 土层土壤脲酶和蔗糖酶活性都以有 2 种凋落物覆盖的杉阔混交林土壤较高,明显高于只有 1 种凋落物覆盖的杉木纯林土壤,土壤酸性磷酸酶活性也呈现相同的变化格局。所调查这 3 种土壤酶活性均以树种多样性最高的次生常绿阔叶林最高,尤其是土壤脲酶和蔗糖酶差别则更明显。10~20cm 土层的土壤酶活性的变化趋势与 0~10cm 土层相似(表 3)。

2.2 土壤有机质

混交林产生的来自不同树种的凋落物对土壤有机质也有显著的影响。在所调查的林分当中土壤有机质变化在 16.96 和 34.05g/kg 之间,以只有 1 种凋落物覆盖的杉木纯林土壤最低,有多树种凋落物覆盖的次生常绿阔叶林土壤最高。相比杉木纯林,杉木与任何一个阔叶树种混交土壤有机质都相对提高(表 4)。土壤活性有机质与土壤有机质有相似的变化格局(表 4)。

土壤当中大多数有机酚类物质被认为具有化感效应。表 5 的分析结果表明,所有调查的林分表层 0~10cm 土壤总酚浓度相比变化不规则,各林分之间差异不显著。而 10~20cm 土层土壤总酚浓度与表层 0~10cm 土壤的变化格局相似。然而,如果比较总酚浓度占有机质的比例,则可以看出在表层 0~10cm 土层土壤总酚的相对含量以仅有 1 种凋落物覆盖的杉木纯林土壤最高,而在有 2 种凋落物覆盖的相同林龄或不同林龄的混交林土壤当中,总酚相对含量则明显降低,特别是杉木桉木混交林和杉木火力楠混交林,只及杉木纯林土壤的 62.5%,而在次生常绿阔叶林土壤当中,仅占杉木纯林土壤的 44.8%,在 10~20cm 土层土壤总酚相对含量的变化也呈现相同的趋势,以杉木纯林土壤总酚相对含量最高。

2.3 土壤全氮

杉木与任一阔叶树种混交之后,土壤全氮含量都有不同程度的增加。土壤表层(0~10cm)全氮含量以杉木纯林最低,次生常绿阔叶林最高,变化在 1.35 和 2.49 g/kg 之间。杉木与刺楸、桉木或火力楠混交土壤全氮增加了 5.9%~51.1%

表 3 杉木纯林和杉阔混交林 3 种土壤酶活性的比较

Table 3 Soil enzyme activity in pure and mixed Chinese fir plantations

土层深 Depth (cm)	土壤* Soil type	脲酶 Urease (mg NH ₄ /kg)	蔗糖酶 Invertase (g glucose/kg)	酸性磷酸酶 Acidic phosphatase (g phenolics/kg)
0~10	90S	318.17±80.88a	9.78±0.37a	2.18±0.14a
	90SC	373.54±16.68a	33.63±1.11b	2.31±0.10a
	90SQ	373.54±16.68a	15.83±.22a	2.23±0.02a
	84SN	491.08±17.47b	43.32±0.37c	2.36±0.48a
	K	731.50±13.88c	117.16±10.74c	2.44±0.12b
10~20	90S	181.20±96.03ab	10.96±0.47a	2.15±0.06a
	90SC	290.73±16.03ab	15.088±0.89a	2.29±0.22a
	90SQ	362.85±6.94ab	11.68±0.34a	2.30±0.05a
	84SN	394.91±50.05ab	32.55±6.73b	2.38±0.01a
	K	438.99±72.13c	60.69±4.52c	2.26±0.26a

表中数据是 5 个重复的平均数据和标准偏差,同一栏内标有不同字母处理之间差异显著(*p*<0.05) The data are the mean value of enzyme activity and S. D. Different letter in the same column indicates significance at *p*<0.05

(表 6)。10~20cm 土层土壤全氮也相应增加,在所有调查的混交组合当中这一土层的土壤全氮均高于杉木纯林。

2.4 土壤氮的吸收与存留

采用同位素示踪技术进行的模拟实验结果见表 7 和表 8。表 7 的结果表明,当硫酸氮用量恒定时,有凋落物的处理普遍降低了杉木幼树对硫酸氮的吸收,增加了土壤中硫酸氮的残留量,因而减少了硫酸氮从土壤中的损失量。对比用不同凋落物处理的杉木幼苗,结果表明相对于纯杉木凋落叶的处理,凋落物多样性的增加既有利于提高杉木幼苗对硫酸氮的吸收,也能增加硫酸氮在土壤中的残留量。

2.5 幼树生长

从模拟试验结果还可看出,不同凋落物组合对杉木幼苗生长有显著影响(表 8)。其中 4 种凋落物处理(G)的杉木幼苗单株鲜重最大,平均为 26.3g/株,其次为 3 种凋落物的处理(E 和 F),杉木幼树的平均鲜重为 25.7 g/株,但 E 和 F 处理之间没有显著差异;再次为 2 种凋落物的处理(B、C 和 D),杉木幼树单株鲜重平均为 21.4 g/株;最小为 1 种杉木凋落叶的处理(A),杉木幼树的单株鲜重为 16.9 g/株。总的趋势表现为 4 种凋落物处理>3 种凋落物处理>2 种凋落物处理>1 种凋落物处理。经过检验发现,仅 3 种和 4 种凋落物处理间没有显著差异,其余 1、2 及 3 种凋落物处理之间均有显著差异。即对于凋落物处理后的杉木幼苗,随着凋落物多样性的增加,杉木幼苗的生物量增大,可见这种凋落物多样性的增加有利于杉木幼苗的生长。出乎意料的是不施加凋落物处理的杉木幼树鲜重竟显著高于 1 种杉木凋落物的处理。

3 讨论

3.1 凋落物组成与土壤有机质

林分的凋落物组成与现实林分树种组成直接相关,如对杉木火力楠混交林 10a 的观测资料显示,13 年生杉木纯林、杉木火力楠(5:5)混交林(株间混交)和杉木火力楠(8:2)混交林(星状混交)10a 间的总凋落量分别为 20567kg/hm²,29352 kg/hm² 和 24340 kg/hm² 中;不仅凋落物总量不同,更主要是凋落物组成不同,在杉木纯林当中来自乔木层的凋落量无疑均为杉木凋落物,而在杉木火力楠(5:5)混交林当中,早期来自火力楠的凋落物远远超过杉木,随着时间的推移,差距渐小,在杉木火力楠(8:2)混交林当中,早期来自火力楠的凋落物也远超过杉木,但到 9 年生以后来自火力楠的凋落物则少于杉木^[12]。由于凋落物数量与组成的不同,分解后转化形成的土壤有机质也会明显不同。调查数据显示,混交林中土壤有机质含量明显高于杉木纯林,次生常绿阔叶林土壤有机质含量最高(表 4)。林分调查的数据还表明,杉木与阔叶树混交之后,由于凋落物组成的改变,土壤有机质当中总酚的相对含量明显减少。由于大部分酚类物质具有化感效应,总酚含量的相对减少,将有利于土壤中微生物活动,甚至包括根系的活动。

林下凋落物组成的改变还将在某种程度上促进凋落物的分解过程。Ferrari 在研究凋落物混合分解对养分释放的影响时指出,这种影响与阔叶树凋落物的量成显著正相关^[15]。但大多数有关凋落物混合分解的研究得出的结论是相互矛盾的,或者两两凋落物之间的影响是非线性的,亦或相互促进,亦或相互抑制^[17]。廖利平等人的研究表明,杉木与火力楠、桉木叶凋落物混合分解时分解速率明显加快,杉木除与木荷叶凋落物混合分解时没有发现相互作用外,与其它阔叶树种叶凋落物混合分解时或强或弱表现出促进作用,而且这种促进作用的强弱与阔叶树叶凋落物初始 N 含量有一定的相关关系^[11]。但是,有关凋落物混合分解效应的研究还是缺乏长期而严密的实验观察。

表 4 不同林分土壤有机质含量

林分类型 Stand type	有机质 Organic matter	活性有机质 Active organic matter	
		浓度 concentration (g/kg)	占总有机质的 百分比 percent of total OM(%)
90S	16.96±2.03a	12.37±0.31a	72.94
90SC	22.31±6.70b	19.04±5.22b	85.36
90SQ	20.20±7.29b	14.78±4.76a	73.18
84SN	33.64±1.25c	24.98±1.00c	74.24
K	34.05±4.02d	27.72±2.29d	81.39

* 表中数据为 5 个重复的平均数和标准偏差,同一列内字母不同者为差异显著($p<0.05$) The results are the mean values of 5 replicates and S.D. Different letter in the same column indicates significance at $p<0.05$

表 5 不同林分土壤总酚含量(mg/g)及所占有机质的比例

林分类型 Stand type	总酚浓度 Total phenol		占有机质比例(%) Percent of SOM	
	0~10cm	10~20cm	0~10cm	10~20cm
90S	10.18±2.84	6.97±2.16	59.8	47.3
90SC	11.13±0.31	7.57±2.23	53.3	43.8
90SQ	8.35±1.16	9.38±2.05	37.4	43.8
84SN	13.24±2.16	11.07±2.67	37.9	41.0
K	11.81±0.87	10.37±1.04	26.8	44.6

* 表中数据为 5 个重复的平均数和标准偏差 The results are the mean values of 5 replicates and S.D.

表 6 不同林分的土壤全氮含量比较

林分类型 Stand type	土层深度 Soil depth	
	0~10cm	10~20cm
90S	1.35±0.05a	1.25±0.06a
90SC	1.43±0.0a	1.40±0.02b
90SQ	1.67±0.06b	1.65±0.04c
84SN	2.04±0.04c	1.68±0.11c
K	2.49±0.08d	1.56±0.08c

* 表中数据为 5 个重复的平均数和标准偏差,同一列内字母不同者为差异显著($p<0.05$) The results are the mean values of 5 replicates and S.D. Different letter in the same column indicates significance at 95% level

表 7 不同凋落物处理对硫铵氮量的回收和损失的影响

Table 7 Balance of (¹⁵NH₄)₂SO₄ in soil treated with different litters

凋落物组成 Number of species	处理 Treat- ment	杉木幼苗 吸收量 Recovery by seedling (mg/盆)	土壤残留量 Recovery by soil (mg/盆)	总回收量 total recovery (mg/盆)	损失量 Loss (mg/盆)
0	H	16.04	90.25	106.29	93.71
1	A	5.58	131.30	136.88	63.12
2	B	9.30	136.10	145.40	54.60
	C	10.81	139.00	149.81	50.19
	D	11.00	142.90	153.90	46.10
3	E	12.13	153.70	165.83	34.17
	F	12.14	144.90	157.04	42.96
4	G	12.86	160.80	173.66	26.34

* 表中数据为各处理混合样的测定结果,而非平均值 The data are the results from the analysis of mixed sample of all replicates of the treatment

表 8 不同凋落物组成对杉木幼苗生物量生长的影响

Table 8 Fresh weight of Chinese fir seedlings grown in differently treated soil

凋落物组成 Number of species	处理 Treat- ment	总鲜重 (g) Total	根鲜重 (g) Root	叶鲜重 (g) Leaf	茎鲜重 (g) Stem
0	H	21.1±1.3bc	7.0±0.5	9.9±0.4	4.2±0.5
1	A	16.9±1.1a	5.8±0.5	7.8±0.3	3.3±0.4
2	B	19.9±1.3b	7.2±0.6	8.8±0.5	3.9±0.6
	C	22.1±2.0bc	6.7±0.5	11.2±0.5	4.2±0.5
	D	22.3±1.9c	7.2±0.6	10.3±0.4	4.8±0.5
3	E	25.2±1.9d	8.1±0.5	12.2±0.7	4.9±0.5
	F	26.2±1.9d	8.2±0.5	12.9±0.7	5.1±0.5
4	G	26.3±1.5d	8.2±0.3	12.9±0.6	5.2±0.6

* 表中数据为 4 个重复的平均数和标准偏差,同一列内有相同字母者为差异不显著 ($p < 0.05$) The data are the mean value of 4 replicates and S.D. Different letter in the same column means significance at $p < 0.05$

林分调查结果表明,混交林中土壤全 N 含量明显高于杉木纯林,次生常绿阔叶林土壤全 N 最高(表 6),而且远远高于所调查的杉阔混交林,在这样的次生常绿阔叶林当中,凋落物的树种多样性显然要比杉木纯林高的多。可见凋落物的树种多样性与土壤养分含量成正相关关系。这种相关关系的本质联系是杉木凋落物 N 含量相对较低,而与之混交的几个阔叶树种凋落物 N 含量较高。杉木与桉木、火力楠、红栲和刺楸凋落叶混合分解时,或多或少会促进凋落物中养分的释放,这一点已为以往的研究所证实^[11]。因此在模拟试验中用杉木与火力楠、红栲和刺楸凋落叶混合处理土壤后,凋落物通过分解释放到土壤中的养分也较纯杉木凋落叶的处理多。由于 N 含量相对较高因而能够改善土壤养分的特例就是豆科或非豆科的固 N 树种凋落物^[18,19]。当然土壤养分含量不仅与凋落物的树种组成有关,而且还与凋落量有关,此外,土壤的养分及有机质含量还与细根周转有关。这方面的研究还有待更进一步的试验观测。

硫铵氮进入土壤后将经历生物固持、矿物胶体和有机胶体的吸附和解吸附等过程。这些硫铵氮还会因硝化、反硝化、氨的挥发以及硝态氮淋洗等作用从土壤中损失掉,上述各种过程相互密切相关,其强度视条件而异^[20]。这些过程决定了硫铵氮或土壤中其它养分被淋失或残留在土壤中的程度。由于凋落叶的加入,凋落叶在分解过程中分解者微生物将固持一部分硫铵氮,因此用凋落物处理后,土壤中硫铵氮的残留量比不作凋落物处理的土壤多,并且降低杉木幼苗对施加硫铵的吸收量,但是凋落物加入后硫铵氮的损失量大大减少。由于杉木凋落叶相比其它阔叶树凋落叶 N 含量较低,杉木凋落叶的单独处理在分解过程中分解者微生物会固持较多的 N,包括施入的¹⁵N,以及土壤中原有的无机 N。这种微生物固持过程与杉木幼树根系吸收产生竞争,

3.2 凋落物组成与土壤生物活性

林分的凋落物组成与现实林分树种组成直接相关,如对杉木火力楠混交林 10a 的观测资料显示,13 年生杉木纯林、杉木火力楠(5:5)混交林(株间混交)和杉木火力楠(8:2)混交林(星状混交)10 年间的总凋落量分别为 20567kg/hm²,29352 kg/hm²和 24340 kg/hm² 中,不仅凋落物总量不同,更重要的是凋落物组成不同,在杉木纯林当中来自乔木层的凋落量无疑均为杉木凋落物,而在杉木火力楠(5:5)混交林当中,早期来自火力楠的凋落物远远超过杉木,但随着时间的推移,差距渐小,而在杉木火力楠(8:2)混交林当中,早期来自火力楠的凋落物也远超过杉木,但到 9 年生以后来自火力楠的凋落物则少于杉木^[12]。杉木纯林和杉木火力楠混交林林下植被的发育和昆虫群落的发育也明显不同,因而来自林下植被和昆虫群落的凋落量差异显著,8 年生杉木(5)火力楠(5)混交林和杉木(8)火力楠(2)混交林下植被的凋落量明显大于同龄杉木纯林^[16]。林下凋落物组成的改变还将在某种程度上促进凋落物的分解过程。在研究杉木与主要阔叶树种叶凋落物的混合分解时发现,杉木除与木荷叶凋落物混合分解时没有发现相互作用外,而与其它阔叶树种叶凋落物混合分解时或强或弱表现出促进作用,而且这种促进作用的强弱与阔叶树叶凋落物初始 N 含量有一定的相关关系^[11]。这种较高的初始 N 含量与微生物活动密切相关。对于土壤微生物的调查结果则发现,杉木火力楠混交林土壤微生物总量相对杉木纯林增加了 53.4%,其中细菌增加了 54.6%,但是土壤真菌和放线菌却在某种程度上降低了;与此同时在杉木火力楠混交林中,蛋白酶和过氧化氢酶活性较高,转化酶和葡萄糖苷酶活性较低^[9]。本研究着重调查的土壤脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶也是混交林高于纯林,但又普遍低于凋落物树种组成最复杂的次生常绿阔叶林,可见随着林地凋落物组成的增加,土壤有机 N、有机 C 以及有机 P 的转化能力也随之增强,可见土壤中这在类功能类群微生物活性随着凋落物多样性增加而增强。

3.3 凋落物组成与土壤养分

这可能是为什么施入凋落物处理后杉木幼树吸收 ^{15}N 的量明显降低的原因。而土壤 ^{15}N 残留量随凋落物种类的增加而增加则可能主要是因为凋落物组成的改变促进了微生物的活动,大量的N为微生物所固持,或被分解后形成的土壤有机质保蓄在土壤当中,即增强了土壤固持养分的能力,减少了养分的淋溶损失。据相关研究,化学氮肥中残留氮的有效性要高于其它来源的残留氮^[20],因此凋落叶在分解过程固持的那部分硫酸氮将被逐渐释放出来,供植物生长所用。模拟试验结果证实了这一点。在模拟试验当中,杉木幼树吸收 ^{15}N 的量以及土壤 ^{15}N 的残留量均随着凋落物树种多样性增加而增加,而土壤中 ^{15}N 的损失量则相反,随着凋落物树种多样性的增加而减少,这说明凋落物树种多样性的增加增强了土壤固持养分的能力。 ^{15}N 在土壤中的残留量增加亦或是因为土壤微生物种群的发育,亦或是因为凋落物分解产生的有机胶体有助于吸附 $\text{NH}_4^+-^{15}\text{N}$ 。过程有待于深入地研究。

3.4 凋落物组成与幼树生长

凋落物树种多样性的增加改善土壤生态功能的最综合指标就是树木的生长。模拟试验证明了随着凋落物多样性的增加,杉木幼树单株鲜重明显增加,这种促进作用归结于凋落物多样性的提高增加了施入的 ^{15}N 在土壤中的残留量,同时也减少了 ^{15}N 从土壤中的损失量,相应地增加了杉木幼树对养分的吸收,说明了随着凋落物多样性的增加,土壤中养分的可利用性增加了。

值得注意的是杉木凋落物单独处理后杉木幼树的单株鲜重显著小于不作任何处理的杉木幼苗,其原因可能与杉木的自毒作用有关^[21],另一方面可能是由于施加的杉木凋落叶C/N比较高,随后的分解过程导致氮素的大量固持,分解者微生物与杉木幼树竞争N营养,减少了土壤中有效N的含量,这也将导致杉木幼苗生长受影响^[22]。

References:

- [1] Chapin F S III, et al. Ecosystem consequences of changing biodiversity -experimental evidence and a research agenda for the future. *BioSciences*, 1998, **48**:45~52.
- [2] Huston M A. Hidden treatments in ecological experiments; evaluating the ecological function of biodiversity. *Oecologia*, 1997, **110**:449~460.
- [3] Schulze E D, Mooney H A. *Biodiversity and ecosystem function*. Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- [4] Tilman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability. *Ecology*, 1996, **77**:350~363.
- [5] Findlay S, Carreiro M, Krischic V, et al. Effects of damage to living plants on leaf litter quality. *Ecol. Applic.*, 1996, **6**:269~275.
- [6] Nilsson M C, Wardle D A, Dahlberg A. Effects of plant litter species composition and diversity on the boreal forest plant-soil system. *Oikos*, 1999, **86**:16~26.
- [7] Wardle D A, Bonner K I, Nicholson K S. Biodiversity and plant litter: experimental evidence which does not support the view that enhanced species richness improves ecosystem function. *Oikos*, 1997, **79**:247~258.
- [8] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Univ. of California Press, Berkeley, CA, 1979.
- [9] Chen C Y, Zhang J W, Zhou C L, et al. Research on improving the quality of forest land and the productivity of artificial *Cunninghamia lanceolata* stands. *Journal of Applied Ecology*, 1990, **1**(2): 97~106.
- [10] Liao L P, Lindley D K, Yang Y J. Decomposition of mixed foliar litter I. A microcosm study. *Journal of Applied Ecology*, 1997, **10**(8): 459~464.
- [11] Liao L P, Ma Y Q, Wang S L, et al. Decomposition of leaf litter of Chinese fir in mixture with major associated broad-leaved plantation species. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(1):27~33.
- [12] Liao L P, Wang S L, Chen C Y. Dynamics of litterfall in the mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei*; a ten-year's observation. *Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(supp.): 131~136.
- [13] Feng Z W, Chen C Y, Zhang J W, et al. A coniferous broad-leaved mixed forest with higher productivity and ecological harmony in subtropics——study on mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei*. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1988, **12**(3):165~180.
- [14] Xu G H, Zheng H Y. *Analytical methods of Soil Microorganisms*. Beijing. Agriculture Press, 1986. 133.
- [15] Ferrari J B. Fine-scale patterns of leaf litterfall and nitrogen cycling in an old-growth forest. *Can. J. For. Res.*, 1999, **29**:291~302.
- [16] Chen C Y, Wang K P, Zhang J W, et al. Nutrient accumulation, distribution and cycling in Chinese fir-Homana mixed forest ecosystem. *Journal of Ecology*, 1988, **7**(4):7~13.
- [17] Rother A, Binkeley D. Nutritional interactions in mixed species forests: a synthesis. *Can. J. For. Res.*, 2001, **31**:1855~1870.
- [18] DeBell D S, Cole T G, Whitesell C D. Growth, development, and yield of pure and mixed stands of *Eucalyptus* and *Albizia*. *For. Sci.*, 1997, **43**:286~298.
- [19] Kaye J P, Resh S C, Kaye M W, et al. Nutrient and carbon dynamics in a replacement series of *Eucalyptus* and *Albizia* trees. *Ecology*, 2000, **81**:3267~3273.

- [20] Cheng L L, Wen Q X, Li H. Transformation of ^{15}N labeled fertilizer N in soils under greenhouse and field conditions. *Acta Pedologica Sinica*, 1989, **26**(2):124~130.
- [21] Huang Z Q, Terry Haig, Wang SL, *et al.* Autotoxicity of Chinese fir on seed germination and seedling growth. *Allelopathy J.*, 2002, **9**(2):51~59.
- [22] Huang Z W. Effect of "rice straw + $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ " application on availability of $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-N}$ and production of rice. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, **30**(2): 224~228.

参考文献:

- [9] 陈楚莹, 张家武, 周崇莲, 等. 改善杉木人工林的林地质量和提高生产力的研究. 应用生态学报, 1990, **1**(2):97~106.
- [10] 廖利平, Lindley D L, 杨永辉. 森林叶凋落物混合分解的研究 I. 缩微(Microcosm)实验. 应用生态学报, 1997, **10**(8):459~464.
- [11] 廖利平, 马越强, 汪思龙, 等. 杉木与主要阔叶树种叶凋落物的混合分解. 植物生态学报, 2000a, **24**(1):27~33.
- [12] 廖利平, 汪思龙, 陈楚莹. 杉木火力楠混交林凋落物的动态变化:10年的观测. 应用生态学报, 2000, **11**(suppl.):131~136.
- [13] 冯宗炜, 陈楚莹, 张家武, 等. 一种高生产力和生态协调的亚热带针阔混交林——杉木火力楠混交林的研究. 植物生态学与地植物学学报, 1988, **12**(3):165~180.
- [14] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京:农业出版社, 1986. 204~206.
- [16] 陈楚莹, 王开平, 张家武, 等. 杉木火力楠混交林生态系统中营养元素的积累、分配和循环的研究. 生态学杂志, 1988, **7**(4):7~13.
- [20] 程励励, 文启孝, 李洪. 盆栽和田间条件下 ^{15}N 标记肥料氮的转化. 土壤学报, 1989, **26**(2):124~130.
- [22] 黄志武. 稻草和 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的施用对硫酸铵 ^{15}N 有效性及水稻产量的影响, 土壤学报, 1993, **30**(2): 224~228.