

# 亚热带2种针叶林土壤碳氮磷储量及化学计量比对混交的反应

徐芷君<sup>1</sup>, 刘苑秋<sup>1</sup>, 方向民<sup>1,2,3</sup>, 陈伏生<sup>1,2,3</sup>,

刘晓君<sup>1,2</sup>, 刘鹏溟<sup>1</sup>, 袁新月<sup>1</sup>, 吴高洋<sup>1</sup>

(1. 江西农业大学林学院, 江西省森林培育重点实验室, 南昌 330045;

2. 江西农业大学鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业局重点实验室, 南昌 330045;

3. 江西农业大学江西特色林木资源培育与利用2011协同创新中心, 南昌 330045)

**摘要:** 针叶林混交阔叶树是改善土壤肥力、增强林地养分循环的重要措施, 而混交效应受到针叶树种自身特性的影响, 马尾松(*Pinus massoniana*)和湿地松(*P. elliottii*)是亚热带地区广泛种植的针叶树种, 但目前2种针叶林对阔叶树混交的反应特征还不清楚。选取马尾松、湿地松纯林以及木荷(*Schima superba*)补植后形成的马尾松—木荷和湿地松—木荷混交林为研究对象, 采集剖面土壤样品, 测定土壤容重、有机碳(OC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量, 计算碳氮磷储量及化学计量特征, 比较不同森林类型间的异同。混交阔叶树显著增加了马尾松林0—60 cm各土层OC含量, 而湿地松纯林与其混交林间OC含量无显著差异。同时, 混交增加了2种针叶林土壤TN含量。马尾松林混交后0—60 cm土层碳储量显著增加95.8%, 而混交阔叶树对湿地松林土壤碳储量无显著影响。混交阔叶树后马尾松和湿地松林0—60 cm土壤总氮储量分别增加了15.8%和28.4%, 但混交对土壤磷储量无显著影响。混交显著增加了马尾松林0—40 cm各土层C/N, 而降低了湿地松林0—10 cm土层C/N。混交阔叶树后马尾松林0—20 cm土层C/P和0—10 cm土层N/P显著增加, 而混交仅增加湿地松林0—10 cm土层N/P。混交阔叶树增加了针叶林土壤氮储量, 但对磷储量无显著影响, 同时混交改变了土壤碳氮磷生态化学计量特征。与湿地松林相比, 马尾松林土壤养分含量、储量及其化学计量特征对混交的反应更敏感。

**关键词:** 树种混交; 马尾松林; 湿地松林; 碳氮磷储量; 生态化学计量比

**中图分类号:** S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)01-0165-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.027

## The Responses of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage and Their Stoichiometry in Two Coniferous Forests to Mixed Effect in Subtropical Area

XU Zhijun<sup>1</sup>, LIU Yuanqiu<sup>1</sup>, FANG Xiangmin<sup>1,2,3</sup>, CHEN Fusheng<sup>1,2,3</sup>,

LIU Xiaojun<sup>1,2</sup>, LIU Pengming<sup>1</sup>, YUAN Xinyue<sup>1</sup>, WU Gaoyang<sup>1</sup>

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Silviculture, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 2. Key Laboratory of State Forestry Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 3. 2011 Collaborative Innovation Center of Jiangxi Typical Trees Cultivation and Utilization, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045)

**Abstract:** Mixing broad-leaved tree species is an important measure to improve soil fertility and enhance nutrient cycling in coniferous forests, but their mixed effects vary with coniferous tree species. Masson pine (*Pinus massoniana*) and slash pine (*P. elliottii*) are widely planted in the subtropical China. However, the mixed effects of the two coniferous forests are still not clear. Soils with 60 cm depth were collected in four forest types: masson pine plantation (MP), slash pine plantation (SP) and two mixed forest of *Schima superba* with MP (MPM) and SP (SPM), to determine the bulk density, organic carbon (OC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations. The carbon, nitrogen and phosphorus storages and their stoichiometry were also calculated. The OC concentration of MP in 0—60 cm soil layer significantly increased by mixing with broad-leaved tree species, but there was no significant difference in OC concentrations be-

收稿日期: 2018-08-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0600202-2); 国家自然科学基金项目(31730014, 31760200); 江西省林业厅科技创新专项(201806); 江西农业大学大学生创新创业训练计划项目(201710410111)

第一作者: 徐芷君(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林土壤碳储量及稳定性研究。E-mail: 13767077849@163.com

通信作者: 方向民(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事森林生态系统碳氮磷循环研究。E-mail: xmfang2013@126.com

tween SP and SPM. Meanwhile, the TN concentrations of MP and SP increased in response to mixed effects. The OC storage of 0–60 cm soil depth in MPM increased by 95.8% compared with MP, while mixing with broad-leaved species had no effect on soil OC storage in SP. The total N storage of 0–60 cm soil depth in MP and SP significantly increased by 15.8% and 28.4% respectively after mixing with broad-leaved tree species. The soil C/N of MP in 0–40 cm soil layer increased and soil C/N of SP in 0–10 cm soil layer decreased after mixing with broad-leaved tree species. The soil C/P in 0–20 cm and soil N/P in 0–10 cm of MP while significantly increased induced by mixed effect, whereas there was only significant difference in soil N/P in 0–10 cm layer between SP and SPM. Soil nitrogen storages increased after the two coniferous forests mixed with broad-leaved tree species, while no significant influence of mixed effects was observed on the phosphorus storage. Moreover, the characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry were influenced by mixing effects. And, the soil nutrients concentrations, storages and their stoichiometry characteristics of MP were more sensitive to mixed effects compared with those of SP.

**Keywords:** coniferous and broad-leaved mixed forest; masson pine forest; slash pine forest; carbon, nitrogen and phosphorus storage; stoichiometry

氮(N)和磷(P)是树木生长所需的重要营养元素,同时也是森林生态系统的 2 个关键限制元素<sup>[1]</sup>,土壤中氮和磷的含量及储量显著影响森林生产力<sup>[2]</sup>。同样,土壤有机碳是全球碳循环的重要组成部分,森林土壤 C 含量和储量的变化是全球气候变暖的重要影响因素,而森林碳库大小与碳固持能力受林分类型<sup>[3]</sup>、树种组成及经营管理方式<sup>[4]</sup>等因素制约。普遍认为造林是影响土壤生态系统氮磷积累和碳固持的重要手段<sup>[3]</sup>,但大规模、高密度种植单一人工针叶林,如马尾松(*Pinus massoniana*)和湿地松(*P. elliottii*)等纯林易造成土壤肥力衰退、生物多样性下降及生态系统养分周转缓慢等问题<sup>[5]</sup>,最终影响土壤碳氮磷的积累及林地生产力。

针叶林中混交阔叶树形成针阔混交林是增加生态系统稳定性、改善土壤肥力及增强林地养分循环的重要经营措施<sup>[5-6]</sup>。如在北美云杉(*Picea sitchensis*)和花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)纯林中引入红枝桉木(*Alnus rubra*)能显著提高林地 N 水平<sup>[7]</sup>,而将红枝桉木引入花旗松纯林后林地 P 水平也显著提高<sup>[8]</sup>。而混交对森林土壤—植物养分循环的影响不仅要研究元素含量的改变,还要关注元素组成间的平衡。生态化学计量学的发展和完善为研究养分供应平衡和植物体元素组成平衡提供了新的思路和研究手段<sup>[9]</sup>。自 Reiners 生态化学计量学思想提出以来,许多科学家<sup>[10-11]</sup>对此开展了研究,生态化学计量学理论得到不断丰富和验证,应用领域不断拓展,但目前混交阔叶树对针叶林的影响研究主要集中在碳氮磷养分含量变化方面<sup>[12]</sup>,对土壤碳氮磷储量及其生态化学计量特征的影响方面还需加强。

此外,针叶林对混交阔叶树的响应可能具有树种异质性<sup>[13]</sup>。马尾松和湿地松是我国南方分布面积较大的 2 个针叶树种,其中马尾松是该区常用的开荒树种和森林演替中的先锋树种,其面积占全国针叶林总面积的

40%,而湿地松因生长快、适应能力强,已在南方 11 个省市市区栽种,造林面积达  $1.9 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[14-15]</sup>。目前,关于马尾松和湿地松林在土壤养分含量、循环和生物量等方面的差异已有报道,如湿地松林对表层土壤的养分利用率低于马尾松林,在深层土壤湿地松林土壤有机质和全氮含量却高于马尾松林<sup>[14]</sup>,且在林分发育早期,湿地松生长速度快于马尾松,而后期湿地松生长则慢,马尾松较快<sup>[13]</sup>。因此,推测补植阔叶树对马尾松和湿地松林的影响不同,但具体响应特征还不清楚。

为此,本研究选取马尾松、湿地松纯林以及木荷补植后形成的马尾松—木荷混交林、湿地松—木荷混交林为对象,研究混交阔叶树对土壤碳氮磷含量、储量及化学计量比的影响以及 2 种针叶树种对混交响应的异同,研究结果可为我国南方针叶林的科学经营提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江西省泰和县螺溪乡( $26^{\circ}44' \text{ N}$ ,  $115^{\circ}04' \text{ E}$ )。气候为亚热带湿润季风气候,夏季高温多雨,冬季温和湿润。年均降水量约 1 750 mm,主要集中于 4—6 月,年均气温  $18.5^{\circ} \text{ C}$ 。该区大部分土壤为典型红壤,海拔为 70~130 m,平均坡度为  $15^{\circ}$ 。

研究区地带性植被为常绿阔叶林,但由于长期受到人为干扰(如樵采、挖笋等)的影响,上世纪 60 年代之前已退化为灌草丛群落。1991 年,以绿化荒山、重建森林、恢复退化生态系统为目的,选择马尾松、湿地松、木荷、枫香等针阔叶树种进行植被恢复试验示范,植被恢复总面积为  $133 \text{ hm}^2$ ,随机布设不同树种、混交形式、种植密度等模式 40 余种,近百个小班,造林前土壤理化性质基本相同<sup>[16-17]</sup>。20 多年来,已形成了南方丘陵山区典型的森林景观,成为江西农业大学红壤退化区森林植被

恢复与重建长期动态监测研究试验基地。

## 1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及样品采集 2017 年 7 月,选取 1991 年营造的分别种植于 4 个不同山头的 27 年生马尾松纯林和 27 年生湿地松纯林,以及 2006 年在以上 2 种针叶林中补植木荷的马尾松—木荷混交林(马尾松混交林)及湿地松—木荷混交林(湿地松混交林)(补阔 11 年)为对象开展研究。本研究选取的马尾松林和湿地松纯林初始栽植株行距分别为 2 m×3 m

和 3 m×3 m;为了解和评价针叶纯林混交阔叶树对森林生态过程和功能的影响,于 2006 年 9 月,选择种植于 4 个不同山头的马尾松和湿地松纯林部分小区开展阔叶树补植试验,中度择伐之后(约保留 500~650 株/hm<sup>2</sup>),补植 2 年生木荷苗木,补植后马尾松:木荷及湿地松:木荷的混交比例约为 1:1,木荷成活率 90%以上。在以上分布于不同山头的 4 种林分类型各布设 1 个 20 m×20 m 样地,即 4 种处理 4 次重复,共 16 块样地。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本特征

林分类型	郁闭度/ %	断面积/ (m <sup>2</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	胸径/ cm	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	树高/ m	林下植被 盖度/%
马尾松纯林(MP)	0.50±0.16	17.16±2.56	11.40±0.75b	1650±77	7.39±0.26	51±13
马尾松混交林(MPM)	0.73±0.08	20.70±3.24	14.08±0.36a	1312±169	8.39±0.33	71±7
湿地松纯林(SP)	0.56±0.04	18.45±2.83	17.32±2.05	825±159	8.98±0.74	38±5b
湿地松混交林(SPM)	0.59±0.07	15.33±1.55	13.64±0.47	1068±146	8.33±0.63	68±6a

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示针叶林与其混交林间差异显著( $p<0.05$ )。

由于树种及混交作用对土壤理化的影响主要集中在 0—60 cm,且当地 60 cm 以下土壤石砾含量较高,因此本研究主要采集 60 cm 以上土壤样品。每个样地挖取 3 个土壤剖面,按 0—10,10—20,20—40,40—60 cm 分层用环刀采集土壤样品,样品采集前去除地表的枯落物及腐殖质层,采集的土样带回实验室自然风干,测定土壤容重。完全风干的土样磨细过 100 目,用于测定土壤有机碳(OC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量。

1.2.2 样品测定 土壤 OC 采用重铬酸钾—硫酸容量法测定;土壤 TN 和 TP 采用浓硫酸—双氧水消化法提取,TN 采用半自动流式分析仪测定,TP 用磷钼蓝比色法测定<sup>[1]</sup>。

1.2.3 数据处理 土壤 C(N 或 P)储量计算公式为:

$$ST = \sum_{i=1}^n \frac{c_i \times \rho_b \times d_i}{100}$$

式中:ST 为研究区域 0—60 cm 土层土壤 C(N 或 P)储量(kg/m<sup>2</sup>); $i$  为土层深度(cm); $C_i$  为第  $i$  层土壤有机 C(N 或 P)含量(g/kg); $\rho_b$  为第  $i$  层土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $d_i$  为第  $i$  层土壤厚度(cm)。

采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析。采用双因素(混交效应和树种类型)和最小显著差异法(LSD)进行不同深度土壤 OC、TN、TP、CNP 储量及化学计量比的多重比较( $\alpha=0.05$ )。利用 Origin 8.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 混交对土壤碳氮磷含量的影响

混交阔叶树显著增加了马尾松林 0—60 cm 各层土壤 OC 含量,其中 0—10 cm 土层 OC 含量增加最多,为 157.5%。与马尾林不同,湿地松纯林与其混交林间土壤 OC 含量无显著差异(表 2)。方差分析

显示,混交效应和树种类型显著影响 0—10 cm 土壤 OC 含量,且混交作用和树种类型共同影响 0—10,10—20 cm 土壤 OC 含量(表 3)。

表 2 针叶纯林和针阔混交林土壤剖面碳氮磷含量

土层深度/cm	林分类型	有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )
0—10	MP	14.54±0.43b	1.60±0.14b	0.20±0.01
	MPM	37.42±3.91a	2.43±0.36a	0.24±0.03
	SP	17.99±1.06	1.67±0.10b	0.25±0.02
	SPM	16.60±2.09	2.31±0.25a	0.25±0.04
10—20	MP	5.92±0.63b	1.31±0.06b	0.20±0.02
	MPM	11.98±2.89a	1.72±0.15a	0.23±0.02
	SP	6.91±0.77	1.44±0.19	0.25±0.01
20—40	SPM	6.16±0.68	1.46±0.10	0.25±0.04
	MP	3.59±0.31b	1.25±0.11	0.21±0.04
	MPM	5.90±1.48a	1.16±0.13	0.22±0.01
40—60	SP	5.25±0.8	1.26±0.08	0.25±0.02
	SPM	4.93±0.7	1.43±0.05	0.26±0.04
	MP	2.63±0.28	0.90±0.06b	0.20±0.02
	MPM	3.84±0.74	1.17±0.05a	0.23±0.03
	SP	3.77±0.26	1.09±0.04	0.27±0.03
	SPM	4.20±0.37	1.26±0.17	0.26±0.05

注:表中不同小写字母表示同一土层深度针叶林与其混交林间差异显著( $p<0.05$ )。下同。

同样,混交阔叶树也显著影响马尾松和湿地松土壤 TN 含量。与纯林相比,马尾松混交林 0—10,10—20,40—60 cm 土层 TN 含量分别增加了 52.0%,31.0%和 28.1%。湿地松林混交后显著增加了 0—10 cm 土层 TN 含量(表 2)。方差分析表明混交效应主要影响 0—10 cm 土层 TN 含量,但土壤 TN 不受树种类型的影响(表 3)。与土壤 OC 和 TN 的变化不同,混交阔叶树对 2 个针叶纯林土壤 TP 均无显著影响(表 2)。方差分析显示,马尾松在 10—20 cm 土层 TP 含量显著低于湿地松林(表 2、表 3)。

表 3 混交效应和树种类型对土壤剖面碳氮磷含量影响的方差分析(F值)

土层 深度/cm	有机碳			全氮			全磷		
	ME	TS	ME×TS	ME	TS	ME×TS	ME	TS	ME×TS
0—10	22.0***	14.4***	28.1***	9.6**	0.0	0.2	0.6	1.2	0.2
10—20	2.9	2.4	4.7*	1.0	0.1	0.8	1.4	4.9*	0.1
20—40	1.2	0.1	2.0	0.2	2.0	1.9	0.1	0.6	0.5
40—60	2.9	2.8	0.7	2.1	0.2	0.1	0.1	2.2	0.3

注:ME为混交效应;TS为树种类型;\*表示 $p<0.05$ ;\*\*表示 $p<0.01$ \*\*\*表示 $p<0.001$ 。下同。

## 2.2 混交对土壤碳氮磷储量的影响

混交阔叶树显著增加了马尾松林0—60 cm各层土壤C储量,而混交对湿地松林土壤C储量无显著影响(表4)。混交效应对土壤C储量的影响主要在0—10 cm,而树种类型影响0—10,10—20 cm土壤C储量(表5)。马尾松混交林总C储量最高(9.4 kg/m<sup>2</sup>),显著高于其纯林(4.8 kg/m<sup>2</sup>),且土壤总C储量受混交效应和树种类型交互作用的影响(表6)。马尾松林混交显著增加了0—10 cm土层N储量,而湿地松混交林N储量在0—10,20—40,40—60 cm土层分别显著增加了45.9%,21.4%,33.8%(表4)。马尾松和湿地松混交林0—60 cm土壤总N储量分别增加了15.8%和28.4%(表6)。阔叶树混交对土壤各层P储量无显著影响,混交效应和树种类型对土壤各层P储量的影响无交互作用(表5),且马尾松林土壤总P储量显著低于湿地松林(表6)。

表 4 针叶纯林和针阔混交林土壤剖面碳氮磷储量

土层 深度/cm	林分 类型	碳储量/ (kg·m <sup>-2</sup> )	氮储量/ (kg·m <sup>-2</sup> )	磷储量/ (kg·m <sup>-2</sup> )
0—10	MP	2.08±0.04b	0.23±0.01b	0.03±0.01
	MPM	4.77±0.19a	0.31±0.04a	0.03±0.01
	SP	2.65±0.14	0.25±0.02b	0.04±0.01
	SPM	2.51±0.31	0.36±0.06a	0.04±0.01
10—20	MP	0.88±0.09b	0.19±0.02	0.03±0.01
	MPM	1.68±0.40a	0.24±0.05	0.03±0.01
	SP	0.95±0.07	0.20±0.03	0.04±0.01
	SPM	0.91±0.08	0.22±0.02	0.04±0.01
20—40	MP	1.07±0.03b	0.38±0.01	0.08±0.02
	MPM	1.79±0.40a	0.36±0.03	0.07±0.01
	SP	1.49±0.28	0.35±0.03b	0.07±0.01
	SPM	1.45±0.20	0.43±0.02a	0.08±0.01
40—60	MP	0.81±0.06b	0.33±0.04	0.06±0.01
	MPM	1.11±0.20a	0.40±0.04	0.07±0.01
	SP	1.15±0.12	0.33±0.03b	0.08±0.01
	SPM	1.29±0.08	0.45±0.05a	0.08±0.02

表 5 混交效应和树种类型对土壤剖面碳氮磷储量影响的方差分析(F值)

土层 深度/cm	碳储量			氮储量			磷储量		
	ME	TS	ME×TS	ME	TS	ME×TS	ME	TS	ME×TS
0—10	42.9***	18.7*	52.6***	7.5*	0.8	0.2	0.1	2.9	0.1
10—20	3.3	4.2*	3.9*	1.1	0.1	0.2	0.8	4.5*	0.1
20—40	1.7	0	2.1	1.4	0.9	4.1*	0	0	0.3
40—60	3.1	2.7	0.4	1.8	0.4	0.4	0.2	2.4	0.2

表 6 针叶纯林和针阔混交林 0—60 cm 土层碳氮磷储量

单位:kg/m<sup>2</sup>

林分类型	总碳储量	总氮储量	总磷储量
MP	4.83±0.11b	1.03±0.06b	0.20±0.01
MPM	9.35±0.77a	1.30±0.07a	0.20±0.01
SP	6.23±0.52	1.13±0.08b	0.22±0.02
SPM	6.16±0.60	1.45±0.05a	0.24±0.03
F值			
ME	15.85**	7.70*	0.15
TS	2.55	0.63	7.28*
ME×TS	16.86***	0.63	0.15

## 2.3 混交对土壤碳氮磷化学计量比的影响

除40—60 cm土层外,马尾松混交林土壤C/N显著高于纯林,而混交显著降低了湿地松林0—10 cm土层C/N(表7)。方差分析表明,树种类型显著影响0—10 cm土层C/N,除40—60 cm土层外,混交效应和树种类型共同影响其他土层C/N(表8)。混交阔叶树后马尾松林0—10,10—20 cm土壤C/P显著增加,而各土层C/P在湿地纯林和湿地松混交林间无显著差异(表7)。与纯林相比,马尾松和湿地松

混交后0—10 cm土层N/P分别增加了28.7%和36.2%,但树种类型和混交效应对土壤N/P影响无交互作用(表7、表8)。

表 7 针叶纯林和针阔混交林土壤剖面碳氮磷化学计量比

土层深度/cm	林分类型	C/N	C/P	N/P
0—10	MP	9.24±0.54b	73.57±6.39b	8.11±0.80b
	MPM	16.38±2.53a	167.75±27.50a	10.44±0.81a
	SP	10.85±0.64a	75.85±10.83	7.04±0.81b
	SPM	7.44±1.17b	68.12±8.41	9.58±0.55a
10—20	MP	4.54±0.14b	29.90±1.61b	6.61±0.48
	MPM	7.12±1.24a	52.23±12.3a	7.53±1.40
	SP	4.88±0.41	26.93±2.75	5.57±0.57
	SPM	4.33±0.62	23.41±2.99	5.83±1.12
20—40	MP	2.88±0.10b	15.67±2.46	5.48±0.89
	MPM	4.87±0.70a	27.44±7.79	5.40±0.79
	SP	4.24±0.65	21.19±2.08	5.26±0.59
	SPM	3.48±0.57	19.29±2.07	5.86±0.78
40—60	MP	2.53±0.36	13.91±2.59	5.60±0.76
	MPM	2.80±0.55	17.08±2.93	6.36±1.07
	SP	3.44±0.13	15.07±2.97	4.31±0.66
	SPM	3.00±0.37	18.25±3.74	5.86±1.01

表 8 混交效应和树种类型对土壤剖面碳氮磷化学计量比影响的方差分析 ( $F$  值)

土层 深度/cm	C/N			C/P			N/P		
	ME	TS	ME×TS	ME	TS	ME×TS	ME	TS	ME×TS
0—10	1.6	6.4*	13.2***	7.6*	9.6**	10.5**	4.5*	0.7	0
10—20	2.0	2.9	4.6*	2.1	5.9*	3.9*	0.4	2.0	0.1
20—40	1.2	0	6.1*	1.3	0.1	2.5	0.1	0	0.2
40—60	0.1	2.1	0.9	1.1	0.1	0	2.2	0.7	0.4

### 3 讨论

混交阔叶树整体上改变了针叶纯林表层土壤碳含量及储量(表 3、表 5)。然而由于树种特性的差异,马尾松和湿地松对混交的响应特征并不完全相同。混交木荷后显著增加了马尾松纯林 0—40 cm 各层土壤 OC 含量及储量,但湿地松纯林与其混交林间土壤 OC 含量及储量无显著差异。由于土壤碳元素主要来源于凋落物和根系的输入,因此不同树种的凋落量差异会在一定程度上影响土壤 OC 含量及储量。已有研究<sup>[15]</sup>表明,5 年生马尾松与湿地松幼林年凋落物生物量差异显著。马尾松年凋落物生物量为 1 526.9 kg/hm<sup>2</sup>,比湿地松多 30.6%。其次,土壤中 OC 的输入源于微生物对凋落物的分解过程。陈法霖等<sup>[18]</sup>通过模拟凋落物分解试验研究表明,经湿地松凋落物分解处理后土壤细菌和放线菌的磷脂脂肪酸含量均低于马尾松凋落物处理,且由于湿地松凋落物的影响使土壤微生物群落功能多样性显著低于马尾松凋落物处理。因此,推测尽管混交阔叶树有利于增加针叶林凋落物总量,但湿地松凋落物可以抑制微生物活性,进而抑制凋落物的分解过程,导致其土壤 OC 含量及储量在混交后并无显著提高。

同时,阔叶树混交显著影响了土壤总氮储量,但 2 个针叶林与其混交林间土壤磷含量及储量无显著差异。普遍认为,磷是亚热带地区植物生长的限制元素<sup>[1]</sup>,混交后凋落量的增加促进了凋落物中磷向土壤的输入,但由于凋落物分解产生的有效磷迅速被植物吸收<sup>[2]</sup>,因此,本研究中土壤 TP 含量及储量在混交后无显著增加。范静<sup>[19]</sup>通过对土壤磷分级研究发现,在亚热带地区,尽管杉木混交林土壤速效磷和缓效磷含量显著高于杉木纯林,但两者土壤 TP 含量间无显著差异。从 2 个树种间来看,马尾松林土壤 TP 含量及储量低于湿地松林,且在 10—20 cm 间差异显著(表 3、表 5),这与 2 个树种自身的养分含量和周转等生长特性有关,田大伦等<sup>[13]</sup>研究表明,湿地松总的养分积累高于马尾松,是马尾松的 2 倍多,且树干高达 5 倍多;同样,倪晓薇等<sup>[14]</sup>也发现,湿地松林土壤 TN 和 TP 储量高于马尾松林。此外,湿地松根系垂直分布较马尾松深,通过细根周转可为下层土壤提供养分,这可能是导致土壤下层 TP 含量在湿地松林下

相对较高的原因之一。

土壤化学计量比是有机质组成和养分有效性的重要指标,可用于碳氮磷矿化、固持作用的表征<sup>[1,9]</sup>,其数值受多种因素影响,包括植被类型、土层深度、植被演替等,且不同比值对环境变化的敏感程度不同。本研究中混交木荷显著增加了马尾松林土壤 C/N,且可以影响到 40 cm 深度,但混交对湿地松林的影响仅表现在 0—10 cm 深度,说明马尾松林对混交的响应更为敏感,且混交后降低了马尾松林土壤有机质的分解能力,原因在于高 C/N 下微生物无法得到足够的氮素来构成其躯体,导致其繁殖速度减慢。同时,较高的土壤 C/N 引起的有机质分解作用的减缓将会导致有机层有效氮含量减少。可见,混交对马尾松林的影响程度大于湿地松林。

同样,土壤 C/P 和 N/P 也是衡量微生物矿化土壤有机物质释放磷或从环境中吸收固持磷素潜力的一种指标,可在一定程度上反映土壤养分的供应能力<sup>[11]</sup>。C/P 比值小,说明微生物在矿化土壤有机质中释放磷的潜力较大,土壤微生物量磷对土壤有效磷库有补充作用;C/P 比值高,则说明土壤微生物对土壤有效磷有同化趋势,易出现微生物与植物竞争性吸收土壤有效磷的现象,具有较强的固磷潜力<sup>[10-11]</sup>。本研究中混交木荷显著增加了马尾松林表层土壤 C/P 和 N/P 及湿地松林表层土壤 N/P。C/P 和 N/P 的增加说明混交增加了土壤 OC 和 TN 的含量,但相对增加了土壤磷对植物生长的限制。这是因为土壤碳、氮的变异主要受枯落物分解的影响,磷受土壤母质和枯落物腐解双重影响,而混交并未增加土壤中磷的积累,最终可导致磷对植物生长的限制增加。然而,由于湿地松凋落物对微生物活性的抑制作用<sup>[18]</sup>,降低了凋落物中碳向土壤的输入,因此,湿地松林土壤 C/P 在混交后变化不显著。总体来看,相对于马尾松林,湿地松林土壤,尤其是深层土壤生态化学计量比相对稳定,对混交阔叶树不敏感,这可能是由于同马尾松林相比,湿地松林养分循环速率低,周转时间慢<sup>[13]</sup>。

### 4 结论

马尾松林土壤有机碳含量及储量在补植阔叶树后显著增加,但湿地松林与其混交林间有机碳含量及

储量变化不显著。补阔显著增加了 2 个针叶林表层土壤氮含量及储量,但其对土壤磷含量及储量影响不显著。补阔后马尾松林 0—40 cm 土层 C/N 显著增加,但补阔对湿地松林的影响仅表现在 0—10 cm,补阔显著增加了马尾松林 0—20 cm 的 C/P 和 0—10 cm 的 N/P,而其仅显著增加湿地松林 0—10 cm 的 N/P。总体来看,混交阔叶树显著增加了针叶林土壤氮含量及储量,但对磷储量影响不显著;相较于湿地松,马尾松林对补阔响应更为敏感,因此在进行混交作用评价时,不仅要关注混交的整体效应,更应注意树种响应的差异。

致谢:感谢曹雯和薛显龙在样地调查中提供的帮助。

#### 参考文献:

- [1] Chen F S, Niklas K J, 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.
- [2] Fang X M, Zhang X L, Zong Y Y, et al. Soil phosphorus functional fractions and tree tissue nutrient concentrations influenced by stand density in subtropical Chinese fir plantation forests [J]. *PLoS One*, 2017, 12(10): e0186905.
- [3] Fang X M, Chen F S, Wan S Z, et al. Topsoil and deep soil organic carbon concentration and stability vary with aggregate size and vegetation type in subtropical China [J]. *PLoS One*, 2015, 10(9): e0139380.
- [4] Fahey T J, Woodbury P B, Battles J J, et al. Forest carbon storage: Ecology, management, and policy [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2010, 8(5): 245-252.
- [5] 林德喜,樊后保. 马尾松林下补植阔叶树后森林凋落物量、养分含量及周转时间的变化[J]. *林业科学*, 2005, 41(6): 7-15.
- [6] 杨玉盛,陈光水,何宗明,等. 杉木观光木混交林群落细根净生产力及周转[J]. *林业科学*, 2001, 37(增刊 1): 35-41.
- [7] Hart S C, Dan B, Perry D A. Influence of red alder on soil nitrogen transformations in two conifer forests of contrasting productivity [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29(7): 1111-1123.
- [8] Giardina C P, Huffman S, Dan B, et al. Alders increase soil phosphorus availability in a Douglas-fir plantation [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1995, 25(10): 1652-1657.
- [9] Sterner R W, Elser J J. *Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002, 225-226.
- [10] Chen F S, Feng X, Liang C. Endogenous versus exogenous nutrient affects C, N, and P dynamics in decomposing litters in mid-subtropical forests of China [J]. *Ecological Research*, 2012, 27(5): 923-932.
- [11] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [12] 尹维彬. 马尾松阔叶混交林生物量及矿质养分特征 [D]. 合肥:安徽农业大学, 2012.
- [13] 田大伦,项文化,闫文德. 马尾松与湿地松人工林生物量动态及养分循环特征 [J]. *生态学报*, 2004, 24(10): 2207-2210.
- [14] 倪晓薇,宁晨,闫文德,等. 贵州龙里林场马尾松湿地松人工林土壤养分分布特征 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(9): 49-56.
- [15] 陈智勇,郑兆飞,叶功富,等. 同林龄马尾松与湿地松幼树凋落物养分及能量动态 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(7): 72-75.
- [16] 刘苑秋,杜天真,郭晓敏,等. 退化第四纪红黏土重建森林模式及其土壤恢复研究 [J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 34-37.
- [17] 杜志勇,刘苑秋,郑诗樟,等. 退化红壤区不同模式重建森林土壤水分空间变异性 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 101-105.
- [18] 陈法霖,郑华,阳柏苏,等. 外来种湿地松凋落物对土壤微生物群落结构和功能的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(12): 3543-3550.
- [19] 范静. 林分结构对杉木人工林土壤磷功能组分与营养器官氮磷化学计量比的影响 [D]. 南昌:江西农业大学, 2015.