第 40 卷 第 2 期
2020 年 2 月
中南林业科技大学学报
Journal of Central South University of Forestry & Technology
Vol. 40 No. 2
Feb. 2020
Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.02.007
http: //qks.csuft.edu.cn

马尾松两种林型土壤养分特征及其与凋落物质量的关系

潘嘉雯，李吉跃，何　茜，苏　艳，刘效东，邱　权，林　娜
（华南农业大学 林学与风景园林学院，广东 广州 510642）

摘　要：【目的】研究土壤养分和地被层凋落物养分含量的差异，为马尾松人工林营林措施及地力维持提供科学依据。【方法】以鼎湖山两种典型林型（马尾松纯林和马尾松 - 黧蒴混交林）为研究对象，对比分析 0 ～ 60 cm 土层的土壤养分含量及地被层凋落物养分含量的差异，探索凋落物质量如何影响土壤养分。【结果】1）林型对土壤有机质、全氮和硫酸根含量有显著影响（$P < 0.05$），对土壤全磷、交换性 K^+、Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 有极显著影响（$P < 0.01$），混交林土壤养分含量（除硝态氮含量和交换性 H^+ 含量以外）均高于纯林。2）相同林型不同土层间土壤养分含量差异极显著（$P < 0.01$），其中，土壤有机质和全氮含量随土层的加深而递减，且主要聚集在 0 ～ 10 cm 土层，表聚效应十分明显。3）纯林凋落物有机碳、全氮、C/N 和全磷等含量高于混交林；相同林型不同分解层凋落物有机碳、全钙和全镁含量有显著差异（$P < 0.05$），均表现为未分解层 > 半分解层 > 腐殖质层。4）土壤养分与地被层凋落物质量的 RDA 分析表明，0 ～ 10 cm 土层土壤养分与腐殖质层有机碳呈极显著负相关（$P < 0.01$），与腐殖质层 C/N 呈显著负相关（$P < 0.05$）；在 10 ～ 20 cm 土层，土壤养分与腐殖质层有机碳呈极显著负相关（$P < 0.05$）。【结论】纯林的土壤养分低于混交林的主要原因是纯林凋落物具有较高的 C/N 和有机碳含量。

关键词：马尾松；人工林；土壤养分；凋落物质量；鼎湖山
中图分类号：S714.8　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2020)02-0054-10

Study on the soil nutrient characteristics and their relationship with litter quality in two forest types of *Pinus massoniana*

PAN Jiawen, LI Jiyue, HE Qian, SU Yan, LIU Xiaodong, QIU Quan, LIN Na
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract:【Objective】Studying the differences in soil nutrient and ground cover litter nutrient content can provide a scientific basis for the forestry measures and soil fertility maintenance of *Pinus massoniana* plantations.【Method】Taking two typical forest types (*Pinus massoniana* and mixed forest of *Pinus massoniana* and *Castanopsis fissa*) in Dinghushan as the research object, the differences of soil nutrient content and litter nutrient content in 0-60 cm soil were compared and analyzed, and how the litter quality was affected soil nutrients.【Result】1) Forest type has significant effect on soil organic matter, total nitrogen and sulfate content ($P < 0.05$), and on soil total phosphorus, exchangeable K^+, Ca^{2+} and Mg^{2+}($P < 0.01$), the soil nutrient content of mixed forest (except nitrate nitrogen and exchangeable H^+ content) is higher than that of pure forest. 2) The difference of soil nutrient content between different soil layers of the same forest type is very significant ($P < 0.01$), among which, the content of soil organic matter and total nitrogen decrease with the deepening of soil layer, and mainly concentrated in the 0-10 cm soil layer, the surface accumulation effect is very obvious.3) The content of organic carbon, total nitrogen, C/N and total phosphorus in pure forest litter are higher than that in mixed forests; there are significant differences in litter organic carbon, total calcium and total magnesium in different decomposition layers ($P < 0.05$), all appear as fresh litter > fragmented litter > humified and amorphous litter.4)RDA analysis of soil nutrients and litter quality of ground cover show that,soil nutrients in 0-10 cm soil layer are significantly negatively correlated with organic carbon in humified and amorphous litter ($P < 0.01$), and negatively correlated with C/N in humified and amorphous litter($P < 0.05$); in 10-20 cm soil layer soil nutrients are significantly negatively correlated with organic carbon in humified and amorphous litter ($P < 0.05$).【Conclusion】The main reason for the low soil nutrient content of pure forests is that the pure forest litter has higher C/N and organic carbon content.

Keywords: *Pinus massoniana*; plantation; soil nutrient; litter quality; Dinghushan

收稿日期：2019-02-25
基金项目：国家重点研发计划（2016YFD0600201，2016YFD060020102）；国家自然科学基金（31600353）。
第一作者：潘嘉雯，硕士研究生。　　**通信作者：**林娜，讲师，博士。E-mail: nalin@scau.edu.cn
引文格式：潘嘉雯，李吉跃，何茜，等. 马尾松两种林型土壤养分特征及其与凋落物质量的关系 [J]. 中南林业科技大学学报，2020, 40(2):54-63.
PAN J W, LI J Y, HE Q, *et al*. Study on the soil nutrient characteristics and their relationship with litter quality in two forest types of *Pinus massoniana*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(2):54-63.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

森林土壤是森林生态系统的重要结构和功能组成部分之一，为植被的生长发育提供了必要的环境和营养物质[1]。森林植被从土壤中吸收的养分，最终以凋落物的形式归还给土壤[2]。凋落物在微生物的作用下分解释放可被植物吸收利用的养分元素，是土壤营养的重要来源[3, 4]。因此，凋落物作为森林生态系统植物体和土壤的一个联结点，参与了生态系统能量和养分转移的过程，在平衡与维持系统结构稳定和长期生产力中发挥着重要作用[5]。

马尾松 *Pinus massoniana* 是我国特有的速生丰产树种，也是我国亚热带湿润地区分布最广、资源最丰富的针叶树种[6]。近年来，随着马尾松造林面积的迅速扩大，单一针叶纯林的缺点逐渐暴露出来，马尾松纯林中凋落物积累与分解不协调，养分循环速率减慢，导致地力衰退日益明显，森林生产力下降，严重制约着林业的可持续发展[7,8]。为了更好地发挥森林的多功能效益，提高林分的抗逆性和稳定性，提倡多造混交林是当前国内外人工造林的共同趋势，许多学者研究认为合适的混交经营模式，能够促进凋落物分解和养分循环，有效改善土壤肥力状况，提高针叶林生态系统稳定性和维持较高的生产力[9-11]。秦娟等[12]研究表明3种林型土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量均表现为：马尾松 - 枫香混交林＞马尾松 - 麻栎混交林＞马尾松纯林。黄笑等[13]研究结果显示闽楠 - 木荷混交林土壤养分水平较生闽楠纯林高，杉木林下补植闽楠混交林分土壤速效元素含量比闽楠纯林多。樊后保等[11]在马尾松林下分别套种拉氏栲、青栲、闽粤栲、格氏栲和苦槠，形成针阔混交林，这5种混交林凋落物的矿质养分总量在174.22 ～ 367.00 kg·hm^{-2}之间，而马尾松纯林为130.05 kg·hm^{-2}。路翔等[14]研究结果显示森林地表凋落物总碳贮量和总氮贮量均以马尾松 - 石栎针混交林最高，杉木人工纯林最低，说明营造混交林可明显提高林地养分存储量，改善地表凋落物养分状况。目前，纯林和混交林土壤养分以及凋落物养分含量差异已有许多报道，而凋落物对土壤养分的影响机制尚待进一步研究。

因此，本研究以鼎湖山典型林型马尾松人工纯林和马尾松 - 黧蒴 *Castanopsis fissa* 混交林为研究对象，通过测定两种林型0 ～ 60 cm土层的土壤养分含量以及地被层凋落物养分含量，比较分析两种林型土壤养分与凋落物养分元素含量的差异，探讨两者之间的关系，有助于了解森林与土壤之间的关系和维持土壤肥力，以期为指导马尾松人工林可持续经营提供一定的参考价值。

1 研究区概况

鼎湖山国家级自然保护区地处我国南亚热带，位于广东省肇庆地区境内，地理坐标为23°09′21″ ～ 23°11′30″N，112°30′39″ ～ 112°33′41″E。本区大部分为丘陵和低山，海拔在100 ～ 700 m。气候属南亚热带季风湿润型气候，年平均气温21.4 ℃，最冷月（1月）和最热月（7月）的平均气温分别为12.6 ℃和28.0 ℃。多年平均年降水量为1 678 mm，4—9月为湿季，10月至翌年3月为旱季，其中80%的降水分布在湿季，干湿季分明。年平均蒸发量为1 115 mm，年平均相对湿度为82%，灾害性天气主要是寒潮和台风。土壤类型主要为赤红壤和黄壤，平均土层厚度约50 ～ 80 cm[15, 16]。鼎湖山森林覆盖率为78%，主要植被类型为马尾松林、针阔叶混交林和季风常绿阔叶林。马尾松林为人工种植，在自然条件下发展，是演替的初期阶段。针阔叶混交林属于演替阶段的过渡期，原为人工栽植的马尾松林，后因一些阔叶树种逐渐入侵而自然形成针阔叶混交林[17]。

本研究主要在鼎湖山马尾松纯林（*Pinus massoniana* forest, PF）和马尾松 - 黧蒴混交林（Mixed forest of *Pinus massoniana* and *Castanopsis fissa*, MF）中进行。2017年1月对这两种典型林型进行充分踏查，每种林型设置3个20 m × 20 m固定样方。马尾松纯林乔木层是马尾松 *Pinus massoniana*；灌木层优势种有白楸 *Mallotus paniculatus*、红背山麻杆 *Alchornea trewioides*、三叉苦 *Melicope pteleifolia* 等；草本层优势种有芒萁 *Dicranopteris pedata*、玉叶金花 *Mussaenda pubescens*、鬼灯笼 *Clerodendrum fortunatum* 等。马尾松 - 黧蒴混交林结构较马尾松林复杂，乔木层主要有马尾松、黧蒴 *Castanopsis fissa*、白楸等；灌木层优势种有黧蒴、九节 *Psychotria asiatica*、龙船花 *Ixora chinensis* 等；草本层优势种有芒萁、玉叶金花、乌毛蕨 *Blechnum orientale* 等，样地概况见表1。

2 材料与方法

2.1 土壤样品的采集与测定

2017年1月，去除表土上覆盖的枯枝落叶，用内径为8 cm的土钻在每个样地取5层土壤：0 ～ 5 cm、5 ～ 10 cm、10 ～ 20 cm、20 ～ 40 cm和40 ～ 60 cm，随机取24个土柱，每6个土柱的同一层组成一个土壤混合样，剔除土壤中的细根与动物[18]。土壤样品采集后带回实验室，自然风干后，用滚轴磨碎风干土，过2 mm筛，测定土

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

壤的有机质、全氮、全磷、交换性阳离子（K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）、硫酸根、铵态氮、硝态氮、交换性酸（H^+ 和 Al^{3+}）的含量。

表 1 两种林型基本情况 †
Table 1 Basic situation of two forest types

因子 Factor	PF	MF
林龄 Stand age /a	50 ～ 60	70 ～ 80
海拔 Altitude /m	58	51
坡度 Slope /(°)	22	23
坡向 Slope aspect	东南	东南
平均密度 Average density / 株·hm^{-2}	475.00±25.00	712.50±12.5
平均胸径 Average DBH /cm	24.86±1.21	17.54±1.38
平均树高 Average tree height /m	10.09±0.18	8.81±0.23
郁闭度 Canopy density /%	0.77	0.91
土壤类型 Soil type	赤红壤	赤红壤
土壤 pH Soil pH	3.15	3.02
土壤容重 Soil bulk density /(g·cm^{-3})	1.48±0.03	1.42±0.03
土壤自然含水量 Soil natural water content /%	26.13±1.07	26.77±1.03

† PF 为马尾松纯林，MF 为马尾松 - 黧蒴混交林，下同。
PF is pure forest of *Pinus massoniana*, and MF is mixed forest of *Pinus massoniana* and *Castanopsis fissa*, the same below.

土壤有机质采用高温外热重铬酸钾氧化 - 容量法；土壤全氮采用开氏 - 蒸馏滴定法；土壤全磷用氢氧化钠熔融 - 钼锑抗比色法（分光光度计，型号：UV-754）；交换性阳离子（K^+、Ca^{2+} 和 Mg^{2+}）用乙酸铵提取 - 火焰原子吸收分光光度法；硫酸根用磷酸盐 - 醋酸提取 - 硫酸钡比浊法；铵态氮和硝态氮用氯化钾提取 - 氧化镁 - 代氏合净金蒸馏法；交换性酸（H^+ 和 Al^{3+}）采用氯化钾交换 - 中和滴定法[19]。

2.2 凋落物样品的采集与测定

2018 年 1 月，用金属框架（24 cm × 24 cm）在每种林型取地被层凋落物，分为未分解层 OL（凋落物叶、枝等保持原状，颜色变化不明显，外表无分解的痕迹）、半分解层 OF（叶无完整外观轮廓，多数凋落物已粉碎，但仍能辨别其种类，颜色为黑褐色）和腐殖质层 OH（多数凋落物已被分解成碎屑，质地细腻）3 层，随机取 12 个点，每 3 个点组成一个混合样，每个样方 12 个样品，共计 72 个样品。样品采集后带回实验室 40 ℃烘干至恒质量，用粉碎机磨碎通过 0.2 mm 筛后装入自封袋，测定有机碳、全氮、全磷、全钾、全钙、全镁含量。

凋落物有机碳采用高温外热重铬酸钾氧化 - 容量法；全氮用硫酸 - 双氧水消煮 - 蒸馏滴定法；全磷用硫酸 - 双氧水消煮 - 钒钼黄比色法（分光光度计，型号：UV-754）；全钾用硫酸 - 双氧水消煮 - 火焰原子吸收分光光度法（火焰原子吸收分光光度计，型号：Z-2300，日本日立公司）；全钙和全镁用干灰化 - 稀盐酸溶解 - 火焰原子吸收分光光度法[19]。

2.3 数据分析

运用 Microsoft Office Excel 2007、SPSS 19.0 和 Origin 8.1 进行数据整理、分析和作图，文中的数值均用均值 ± 标准误来表示。采用双因素方差分析（Two-way ANOVA）比较两种林型土壤养分及地被层凋落物养分含量的差异性，显著性水平设定为 α=0.05；通过 Canoco 4.5 的冗余分析（RDA）对土壤养分与凋落物质量之间的关系进行分析。

3 结果与分析

3.1 两种林型土壤养分含量差异

对两种林型不同土层间的土壤养分含量进行双因素分析，结果见表 2。林型对土壤有机质、全氮和硫酸根含量有显著影响（$P < 0.05$），对土壤全磷、交换性 K^+、Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 有极显著影响（$P < 0.01$）。如图 1 和 2 所示，马尾松 - 黧蒴混交林土壤养分含量（除硝态氮含量和交换性 H^+ 含量以外）均高于马尾松纯林，其中，混交林土壤有机质、全氮、全磷、铵态氮、硫酸根、交换性 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 和交换性酸、交换性 Al^{3+} 含量分别是纯林的 1.31、1.25、1.22、1.23、1.33、1.63、1.98、1.75、1.05 和 1.06 倍；混交林土壤硝态氮和交换性 H^+ 含量低于纯林，分别是纯林的 0.85 和 0.95 倍。

同一林型不同土层之间土壤养分含量差异极显著（$P < 0.01$）。其中，土壤有机质和全氮含量随土层深度的增加而降低（图 1、图 2），且主要聚集在 0-20 cm 土层中，表聚效应明显，土壤交换性 K^+、交换性 Ca^{2+}、交换性酸（H^+ 和 Al^{3+}）含量变化总体上随土层深度的增加而降低，而土壤硫酸根含量总体上随土层深度的增加而增加。

3.2 地被层凋落物养分元素含量

马尾松纯林和马尾松 - 黧蒴混交林凋落物全磷和全钙含量有显著（$P < 0.05$）或极显著差异（$P < 0.01$），而有机碳、全氮、全钾和全镁含量差异不显著（表 3、图 3）。其中，纯林凋落物有机碳、全氮、全磷、全钙和全镁含量高于混交林，分别增加了 4.67%、2.45%、12.89%、27.08% 和 20.28%，全钾含量表现为混交林高于纯林，分别为 3.18 g·kg^{-1} 和 1.59 g·kg^{-1}。同一林型不同分解层凋落物有机碳、全钙和全镁含量有显著差异（$P < 0.05$），均表现为未分解层＞半分解层＞腐殖质层，即凋落物分解程度越高含量逐渐降低，凋落物全氮和全磷含量随分解层变化规律不一致，全钾含量随凋落物分解程度的加深而逐渐累积。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

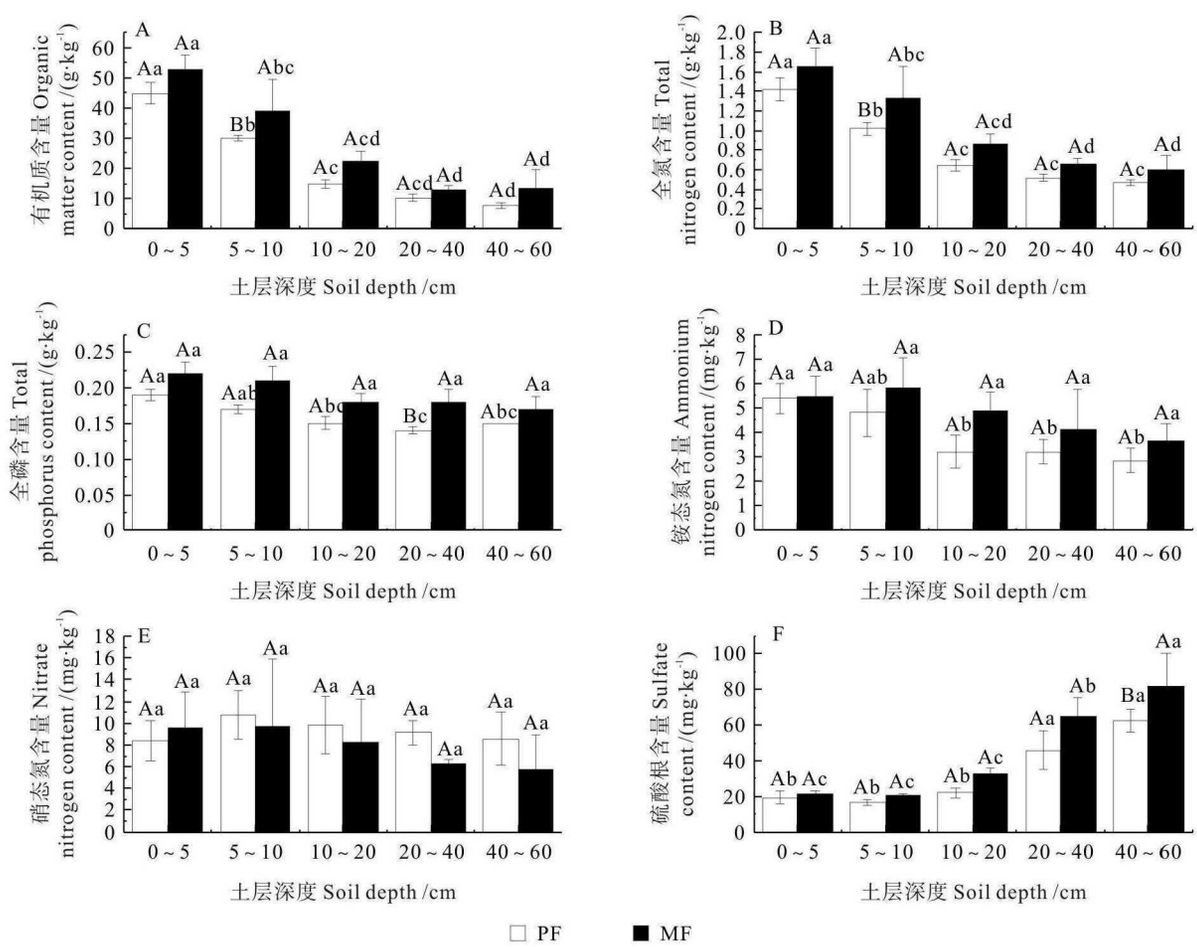
表 2　林型和土层深度对土壤养分含量影响的方差分析 †

Table 2　Analysis of variance of forest type and soil depth on soil nutrient content

土壤养分 Soil nutrient	林分 Forest type			土层深度 Soil depth			林分 × 土层深度 Forest type×Soil depth		
	自由度 *df*	*F*	*P*	自由度 *df*	*F*	*P*	自由度 *df*	*F*	*P*
有机质 Organic matter	1	7.087	0.013*	4	35.913	0.000**	4	0.213	0.929
全氮 Total nitrogen	1	6.658	0.016*	4	23.596	0.000**	4	0.194	0.939
全磷 Total phosphorus	1	21.214	0.000**	4	4.314	0.009**	4	0.244	0.911
铵态氮 Ammonium nitrogen	1	2.805	0.106	4	2.659	0.056	4	0.215	0.927
硝态氮 Nitrate nitrogen	1	0.595	0.448	4	0.355	0.838	4	0.173	0.950
硫酸根 Sulfate radical	1	4.821	0.038*	4	18.435	0.000**	4	0.534	0.712
交换性 K^+ Exchangeable K^+	1	52.909	0.000**	4	2.670	0.056	4	0.197	0.938
交换性 Ca^{2+} Exchangeable Ca^{2+}	1	10.268	0.000**	4	8.976	0.000**	4	0.722	0.585
交换性 Mg^{2+} Exchangeable Mg^{2+}	1	13.811	0.004**	4	2.747	0.051	4	0.702	0.598
交换性酸 Exchangeable acid	1	1.822	0.189	4	50.310	0.000**	4	1.896	0.142
交换性 H^+ Exchangeable H^+	1	1.036	0.318	4	102.282	0.000**	4	0.577	0.682
交换性 Al^{3+} Exchangeable Al^{3+}	1	2.631	0.117	4	33.464	0.000**	4	2.330	0.084

† ** 表示在 $P < 0.01$ 水平下差异显著，* 表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著。

** indicates that the difference is significant at the $P < 0.01$ level, and * indicates that the difference is significant at the $P < 0.05$ level.



不同大写字母表示不同林型相同土层在 $P < 0.05$ 水平下差异显著。不同小写字母表示同一林型不同土层在 $P < 0.05$ 水平下差异显著，下同。

Different lowercase letters indicate that the different soil layers of the same forest type have significant differences at $P < 0.05$ level, the same below.

图 1　两种林型土壤有机质、氮、磷、钾和硫酸根含量

Fig. 1　Soil organic matter, nitrogen, phosphorus, potassium and sulfate content of two forest types

由表 4 可知，马尾松纯林 C/N 和 C/P 分别为 42.82 和 1 137.10，马尾松 - 黧蒴混交林 C/N 和 C/P 分别为 40.54 和 1 328.94。纯林各分解层的 C/N 大于混交林，未分解层和半分解层的 C/P 小于混交林，

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

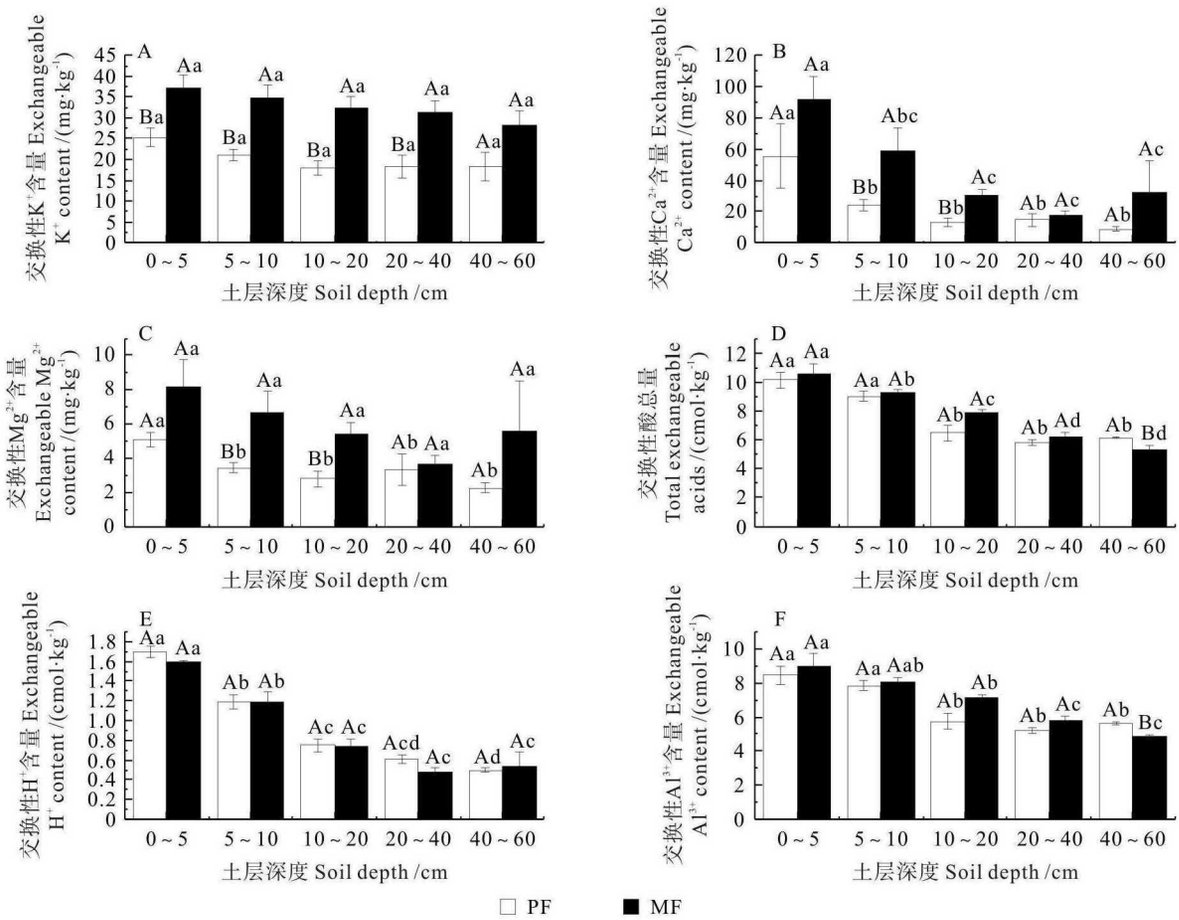


图 2 两种林型土壤交换性阳离子和交换性酸含量

Fig.2 Exchange cations and exchangeable acid content of two forest types

表 3 林型和凋落物分解层对养分元素含量影响的方差分析

Table 3 Analysis of variance of the influence of forest type and litter decomposition layer on nutrient element content

因子 Factor	自由度 *df*	有机碳 Organic carbon		全氮 Total nitrogen		全磷 Total phosphorus		全钾 Total potassium		全钙 Total calcium		全镁 Total magnesium	
		F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
林型 Forest type	1	1.553	0.236	0.255	0.623	20.434	0.001**	3.080	0.105	9.326	0.010*	4.464	0.056
凋落物层 Litter layer	2	11.549	0.002**	1.456	0.271	5.403	0.021**	2.597	0.116	31.569	0.000**	28.332	0.000**
林型 × 凋落物层 Forest type×Litter layer	2	1.214	0.331	1.254	0.320	0.057	0.945	0.256	0.778	0.593	0.568	0.386	0.688

而腐殖质层的 C/P 大于混交林。同一林型下各分解层 C/N 和 C/P 均表现为半分解层＞未分解层＞腐殖质层，且各分解层之间差异显著（$P < 0.05$）。

3.3 土壤养分与地被层凋落物质量的关系

RDA 排序图从整体上反映了两种林型 0 ～ 20 cm 土层的土壤养分和地被层凋落物质量关系显著（图 4 和图 5）。RDA 分析显示，在 0 ～ 10 cm 土层中，腐殖质层有机碳、腐殖质层 C/N 和半分解层有机碳是影响土壤养分变化的关键因子。如图 4 所示，RDA 第 1 轴和第 2 轴分别解释了变量的 66.0% 和 22.4%。腐殖质层有机碳对土壤养分的影响最大，呈极显著负相关，其解释了土壤养分变化的 58.0%（P=0.002），其次为腐殖质层 C/N，与土壤养分呈显著负相关，解释了土壤养分变化的 24.0%（P=0.042）。

RDA 分析显示，在 10 ～ 20 cm 土层中，腐殖质层有机碳、半分解层有机碳和半分解层 C/N 是影响土壤养分变化的关键因子。如图 5 所示，RDA 第 1 轴和第 2 轴分别解释了变量的 62.9% 和 21.0%。腐殖质层有机碳对土壤养分的影响最大，呈极显著负相关，其解释了土壤养分变化的 51.0%（P=0.002），其次为半分解层有机碳和半分解层 C/N。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

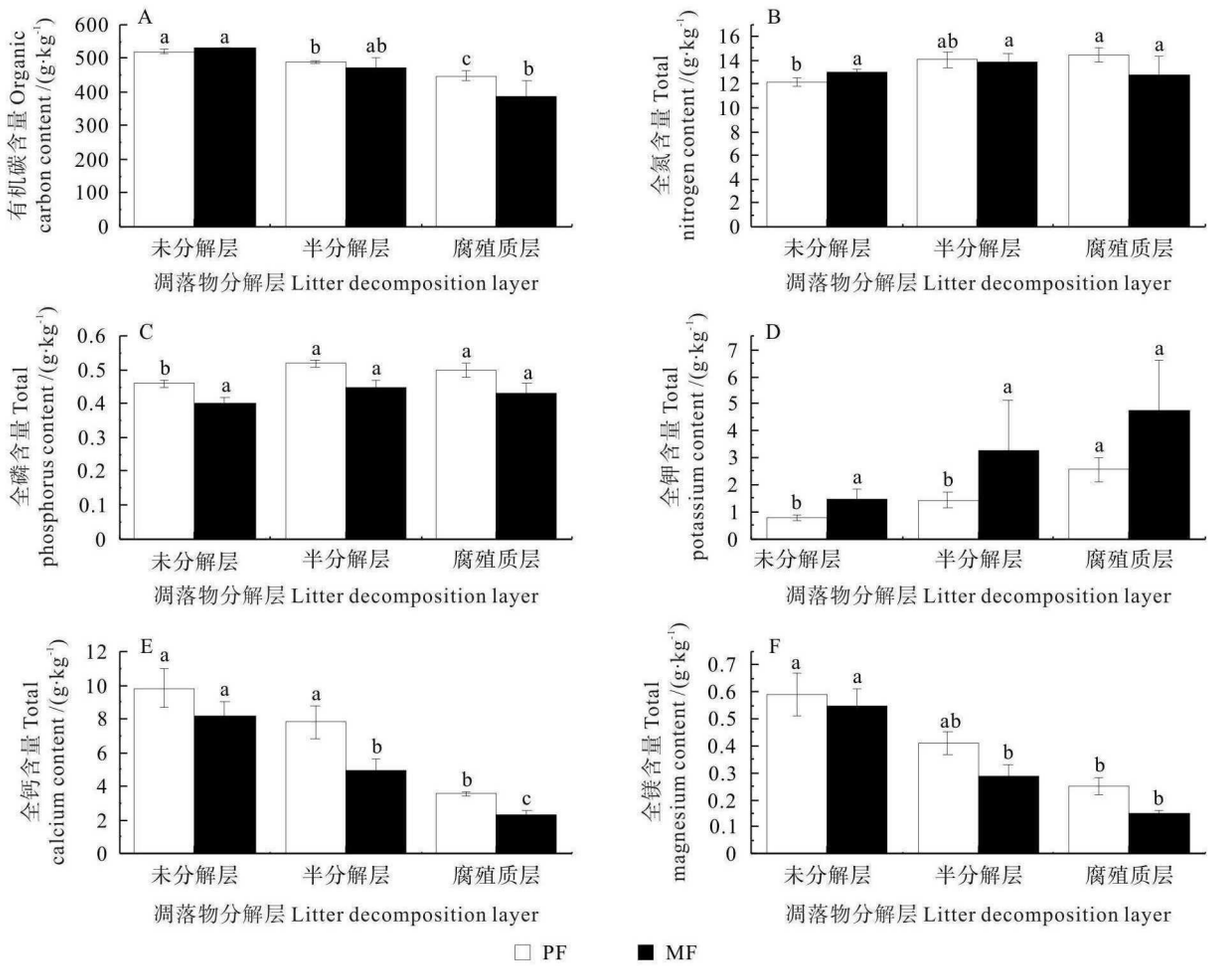


图 3　两种林型各分解层凋落物养分元素含量

Fig. 3　Nutrient content of litter in each decomposition layer of two forest types

表 4　两种林型不同分解层 C/N 和 C/P†

Table 4　Different decomposition layers C/N and C/P of two forest types

分解层 Decomposition layer	PF		MF	
	C/N	C/P	C/N	C/P
未分解层 Fresh litter	42.82±1.18 a	1137.10±19.58 a	40.54±0.68 a	1328.94±60.34 a
半分解层 Fragmented litter	34.91±1.59 b	942.74±13.51 b	34.11±0.73 b	1050.61±43.82 b
腐殖质层 Humified and amorphous litter	31.12±0.51 b	895.92±23.30 b	30.53±1.13 c	891.97±65.88 b

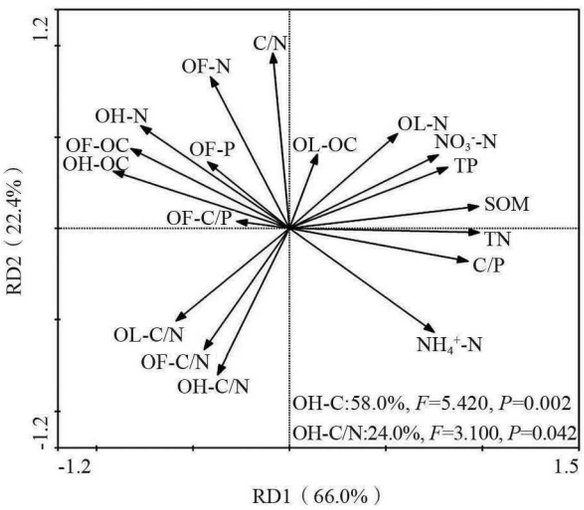
† 不同字母表示同一林型不同分解层 C/N 和 C/P 含量在 $P < 0.05$ 下差异显著。
Values are represented different letters indicated significant differences of C/N and C/P contents of the same forest type between different decomposed layers ($P < 0.05$).

4　结论与讨论

4.1　林型和土层深度对土壤养分的影响

植被类型对土壤养分的影响十分显著[20]，且大量研究表明，混交林土壤养分含量较纯林高，在改善土壤养分状况方面具有明显的优势。莫江明等[21]研究结果显示马尾松针阔叶混交林土壤硝态氮和铵态氮的量高于同一地区的马尾松纯林。欧阳学军等[22]比较研究了鼎湖山马尾松林、针阔混交林和季风常绿阔叶林土壤表层（0 ～ 20 cm）有机质、全氮、速效钾等营养元素的含量，发现随着群落的进展演替，养分在土壤中的累积（钙除外）呈不断增加的趋势，即马尾松林＜针阔叶混交林＜季风常绿阔叶林。江远清等[23]发现阔叶林土壤所有的交换性阳离子含量均明显高于马尾松林和混交林。本研究中，混交林土壤有机质、全氮、全磷、交换性阳离子（K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）和硫酸根含量均高于或显著高于纯林，一方面可能是由于混交林植被茂密，郁闭度高，产生了大量的凋落物，更有利于土壤养分的积累[24]；另一方面可能是由于马尾松针叶中含有许多较难分解的物质，使得马尾松凋落物中的养分释放率比混交

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



SOM：土壤有机质 Soil organic matter；TN：土壤全氮 Soil total nitrogen；TP：土壤全磷 Soil total phosphorus；C/N：土壤碳氮比 Soil carbon to nitrogen ratio；C/P：土壤碳磷比 Soil carbon to phosphorus ratio；NH_4^+-N：土壤铵态氮 Soil ammonium nitrogen；NO3--N 土壤硝态氮 soil nitrate State nitrogen；OL-OC：未分解层有机碳 organic carbon of fresh litter；OF-OC：半分解层有机碳 Organic carbon of fragmented litter；OH-OC：腐殖质层有机碳 Organic carbon of humified and amorphous litter；OL-N：未分解层氮 Nitrogen of fresh litter；OF-N 半分解层氮 Nitrogen of fragmented litter；OH-N：腐殖质层氮 Nitrogen of humified and amorphous litter；OL-P：未分解层磷 Phosphorus fresh litter；OF-P：半分解层磷 phosphorus fragmented litter；OH-P：腐殖质层磷 Phosphorus humified and amorphous litter；OL-C/N：未分解层碳氮比 Carbon to nitrogen ratio fresh litter；OF-C/N：半分解层碳氮比 Carbon to nitrogen ratio fragmented litter；OH-C/N：腐殖质层碳氮比 Carbon to nitrogen ratio humified and amorphous litter；OL-C/P：未分解层碳磷比 Carbon to phosphorus ratio fresh litter；OF-C/P：半分解层碳磷比 Carbon to phosphorus ratio fragmented litter；OH-C/P：腐殖质层碳磷比 Carbon to phosphorus ratio humified and amorphous litter.

图 4 0～10 cm 土层各土壤养分与地被层凋落物质量的 RDA 排序图

Fig. 4 RDA ranking of soil nutrients and existing litter nutrients in 0-10 cm soil layer

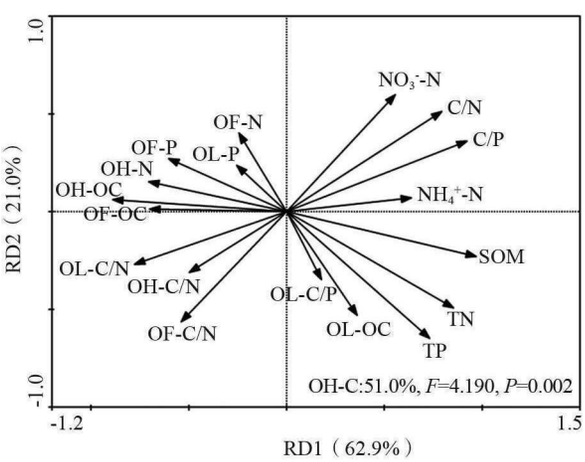


图 5 10～20 cm 土层各土壤养分与地被层凋落物质量的 RDA 排序图

Fig. 5 RDA ranking of soil nutrients and existing litter nutrients in 10-20 cm soil layer

林的慢，而阔叶树种凋落物分解较快，能不断补充土壤养分。而土壤交换性 H^+ 含量表现为纯林高于混交林，说明马尾松和黧蒴混交能缓解纯林导致的土壤酸化效应。在两种林型中，土壤硝态氮的含量高于铵态氮的含量，这可能是因为两种林型中土壤微生物活性较高，有利于土壤的硝化作用，导致土壤中更多的铵态氮转化为硝态氮 [25]，但纯林的土壤硝态氮含量高于混交林，这与前人的马尾松林土壤以铵态氮为主的研究结果不一致，这有可能是因为混交林的土壤交换性 Al^{3+} 含量高，抑制了硝化细菌的生长，从而使得硝态氮含量比较低。两种林型的土壤全磷含量均较低，有研究表明鼎湖山森林土壤磷的有效性相对低，说明鼎湖山森林有可能存在磷限制的问题 [25]，而刘兴诏等 [26] 研究得出磷已经成为南亚热带森林生态系统生物生长和重要生态过程的限制因子。

土壤养分含量在不同土层间差异显著，主要集中在 0～20 cm 土层，表现出明显的表聚性和垂直分布特征 [27]。本研究中，两种林型 0～10 cm 土层中的土壤有机质和全氮含量表聚效应十分显著（$P < 0.05$），其他养分含量也呈现这种表聚现象，这与刘兴诏等 [26]、冯天骄等 [28] 的研究结果一致。这是因为植物的根系主要分布于土壤表层，且森林凋落物分解释放的养分也首先进入土壤表层，导致土壤表层养分含量较多，随着土层深度的增加，植物根系分布减少，养分来源减少，故而呈现出大多数土壤养分含量在土壤表层呈现出聚集效应，随土层深度的增加而递减的趋势 [12]。土壤全磷、交换性 K^+、交换性 Ca^{2+} 和交换性酸（H^+ 和 Al^{3+}）含量总体上呈现随土层深度的增加而减少的趋势，但土壤硫酸根含量表现出相反的趋势，即随土层深度的增加而增加，可能是因为硫酸根易从土壤表层被淋洗掉，因此土壤底层富集了大量的硫酸根。

4.2 林型和分解层对凋落物养分的影响

本研究表明，地被层凋落物养分元素的含量以有机碳最高，其次为全氮和全钙，这与郑路等 [29] 研究结果一致。马尾松纯林凋落物有机碳、全氮、全磷、全钙和全镁含量和 C/N 高于马尾松 - 黧蒴混交林，全钾含量低于混交林，纯林的有机碳和 C/N 高表明了其凋落物分解较混交林慢，养分释放速率慢，影响了土壤养分含量，这也解释了纯林中土壤养分低于混交林的现象。相同林型下，不同分解层凋落物有机碳、全钙和全镁含量有显著差异（$P < 0.05$），均表现为未分解层＞半分解层＞腐殖质层，这与张德强等 [30] 的研究结果类似，有机碳、全钙和全镁含量随着凋落物分解而逐渐减少，即随凋落物的分解和雨水的淋溶进入土壤，为林木所利用。凋落物全钾含量随凋落物分解程度的加深含量逐渐累积，而全氮和全磷含量随分

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

解层呈先增后减的趋势，这与赵畅等[31]研究结果不一致，即全钾含量随分解加剧而逐渐降低，全氮、全磷含量则随凋落物的分解而累积，这可能存在其他因素如环境条件、生物条件等的影响而导致研究结果不同。

4.3　土壤养分与地被层凋落物质量的关系

凋落物是森林土壤养分的主要来源之一，是土壤养分循环的重要组成部分，凋落物的分解和养分释放的快慢影响着土壤养分元素归还以及腐殖质的形成，间接影响着森林生产力[32]。当外界环境条件一致时，以含碳化合物（木质素、纤维素和单宁等）、各养分元素（N、P 和 K 等）的含量、C/N、C/P、木质素 /N 和酚类物质等来表示的凋落物基质质量对凋落物分解起着关键作用，从而影响土壤养分含量[33]。本研究表明，在 0 ～ 10 cm 土层中，土壤养分与腐殖质层有机碳呈极显著负相关（$P < 0.01$），与腐殖质层 C/N 呈显著负相关（$P < 0.05$）；而在 10 ～ 20 cm 土层中，土壤养分与腐殖质层有机碳产生极显著负相关（$P < 0.05$）。这与其他研究结果一致，如葛晓改等[34]研究表明，马尾松凋落物基质质量和土壤养分之间关系紧密，凋落物中 C/N 与土壤有机质呈显著负相关，其含量越高越不利于土壤有机质的形成，土壤养分积累的越慢。肖欣等[35]以马尾松人工林为研究对象探讨土壤有机碳与凋落物质量的相关关系，结果显示凋落物未分解层 C 含量及 C/N 值与土壤有机碳密度呈负相关，即凋落物未分解层 C 含量及 C/N 值越小，分解速率越快时，土壤有机碳密度增加也越快。潘萍等[36]通过研究马尾松林两种林下植被土壤碳氮与凋落物质量的关系，发现在 0 ～ 10 cm 土层，两种类型凋落物的半分解层 C/N 值、C 含量及未分解层 C 含量均与土壤碳氮各指标呈极显著负相关（$P < 0.01$），未分解层 C/N 值与土壤碳氮各指标呈显著负相关（$P < 0.05$）。因此，地被层凋落物 C/N 和有机碳的值越高，越不利于土壤养分积累。

4.4　结论与展望

土壤养分与地被层凋落物质量关系密切，其中，凋落物 C/N 和有机碳的值越高，越不利于土壤养分的积累；马尾松纯林地被层凋落物有机碳和 C/N 高于马尾松 - 黧蒴混交林，说明凋落物分解速率及养分释放率低于混交林，导致了土壤养分含量不如混交林高。因此，在马尾松人工林经营中，混交林比纯林更有利于土壤养分的积累，能更好地满足植物生长的养分需求。今后在鼎湖山马尾松人工纯林的经营管理过程中，适当补植恰当的阔叶树种，可促进马尾松凋落物分解，加快土壤养分的周转，从而提高马尾松生态系统养分循环效率及林分生产力。本研究只分析了地被层凋落物养分与土壤养分之间关系，然而土壤微生物、温度和湿度等都会通过影响地被层凋落物的分解过程而间接影响土壤养分含量，因此，下一步研究可从土壤微生物数量及土壤环境因子对凋落物分解过程的影响等方面进行。

参考文献：

[1] SCHOENHOLTZ S H, MIEGROET H V, BURGER J A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunities[J]. Forest Ecology & Management, 2000,138(1):335-356.

[2] 莫江明 , 孔国辉 ,SANDRA B 等 . 鼎湖山马尾松林凋落物及其对人类干扰的响应研究 [J]. 植物生态学报 ,2001,25(6):656-664.
MO J M, KONG G H, SANDRA B, *et al*. Litterfall response to human impacts in a Dinghushan pine forest[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2001,25(6):656-664.

[3] KEENAN R J, PRESCOTT C E, KIMMINS J P, *et al*. Litter decomposition in western red cedar and western hemlock forests[J]. Revue Canadienne De Botanique, 1996,74(10):1626-1634.

[4] GARTNER T B, CARDON Z G. Site of leaf origin affects how mixed litter decomposes[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006,38(8):2307-2317.

[5] 葛晓改 , 肖文发 , 曾立雄 , 等 . 三峡库区马尾松林土壤 - 凋落物层酶活性对凋落物分解的影响 [J]. 生态学报 ,2014,34(9):2228-2237.
GE X G, XIAO W F, ZENG L X, *et al*. Effect of soil-litter layer enzyme activities on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation in three gorges reservoir area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(9):2228-2237.

[6] 莫江明 , 彭少麟 ,SANDRA B, 等 . 鼎湖山马尾松林群落生物量生产对人为干扰的响应 [J]. 生态学报 , 2004,24(2):193-200.
MO J M, PENG S L, SANDRA B, *et al*. Response of biomass production to human impacts in a pine forest in subtropical China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004,24(2):193-200.

[7] FELTON A, LINDBLADH M, BRUNET J, *et al*. Replacing coniferous monocultures with mixed-species production stands: An assessment of the potential benefits for forest biodiversity in northern Europe[J]. Forest Ecology & Management, 2010,260(6):939-947.

[8] 洪宜聪 . 马尾松闽粤栲异龄复层混交林的林分特征及涵养水

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

源能力 [J]. 东北林业大学学报 ,2017,45(4):53-59.
HONG Y C. Stand characteristics and water conservation capacity of *Pinus massoniana* and *Castanopsis fissa* mixed plantation[J]. Journal of northeast forestry university, 2017,45(4):53-59.

[9] MENG J, LU Y, ZENG J. Transformation of a degraded *Pinus massoniana* plantation into a mixed-species irregular forest: Impacts on stand structure and growth in Southern China[J]. Forests, 2014,5(12):3199-3221.

[10] SANTOS F M, CHAER G M, DINIZ A R, *et al*. Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a sandy tropical soil[J]. Forest Ecology and Management, 2017,384:110-121.

[11] 樊后保 , 苏素霞 , 卢小兰 , 等 . 林下套种阔叶树的马尾松林凋落物生态学研究Ⅲ . 凋落物现存量及其养分含量 [J]. 福建林学院学报 ,2003,23(3):193-197.
FAN H B, SU S X, LU X L, *et al*. Forest litter ecology in masson's pine stand and its mixed forests formed by inter-planting with hardwood tree species[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2003,23(3):193-197.

[12] 秦娟 , 唐心红 , 杨雪梅 . 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响 [J]. 生态环境学报 , 2013, 22(4): 598-604.
QIN J, TANG X H, YANG X M, *et al*. Effects of soil physical and chemical properties on different forest types of *Pinus massoniana*[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013,22(4):598-604.

[13] 黄笑 , 李际平 , 赵春燕 , 等 . 不同林分类型闽楠人工林土壤养分对比分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2017,37(7):36-42.
HUANG X, LI J P, ZHAO C Y, *et al*. Contrastive analysis of soil nutrients of *Phoebe bournei* plantation with different forest types[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017,37(7):36-42.

[14] 路翔 , 项文化 , 任辉 , 等 . 中亚热带四种森林凋落物及碳氮贮量比较 [J]. 生态学杂志 ,2012,31(9):2234-2240.
LU X, XIANG W H, REN H, *et al*. Litter biomass and its carbon and nitrogen storage in four subtropical forests in central Southern China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012,31(9):2234-2240.

[15] 刘效东 , 乔玉娜 , 周国逸 , 等 . 鼎湖山 3 种不同演替阶段森林凋落物的持水特性 [J]. 林业科学 ,2013,49(9):8-15.
LIU X D, QIAO Y N, ZHOU G Y, *et al*. Water-holding characteristics of litters in three forests at different successional stages in Dinghushan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013,49(9):8-15.

[16] 闫俊华 , 周国逸 , 唐旭利 , 等 . 鼎湖山 3 种演替群落凋落物及其水分特征对比研究 [J]. 应用生态学报 ,2001,12(4):509-512.
YAN J H, ZHOU G Y, TANG X L, *et al*. Characteristics of litter and its contained water in three succession communities in Dinghushan Mountain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001,12(4):509-512.

[17] 关共凑 , 魏兴琥 . 鼎湖山三种森林类型土壤养分特征及其相关性分析研究 [J]. 环境科学与管理 , 2017, 42(3): 139-144.
GUAN G C, WEI X H. Analysis on soil nutrient characteristics and their correlation in three kinds of forest in Dinghushan[J]. Environmental Science and Management, 2017,42(3):139-144.

[18] LIN N, BARTSCH N, ANNIGHÖFER P, *et al*. Long-term effects of canopy opening and liming on soil nutrient dynamics in a European beech (*Fagus sylvatica L.*) forest[J]. Soil Science, 2014,179(9):409-416.

[19] 鲁如坤 . 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京 : 中国农业科技出版社 ,2000.
LU R K. Analytical method of soil agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 2000.

[20] RUTIGLIANO F A, D' ASCOLI R, VIRZO DE SANTO A. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004,36(11):1719-1729.

[21] 莫江明 , 彭少麟 , 方运霆 , 等 . 鼎湖山马尾松针阔叶混交林土壤有效氮动态的初步研究 [J]. 生态学报 ,2001,21(3):492-497.
MO J M, PENG S L, FANG Y T, *et al*. A preliminary study on the dynamics of bio-available nitrogen in soils of pine-broadleaf mixed forest in Dinghuashan Biosphere Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001,21(3):492-497.

[22] 欧阳学军 , 黄忠良 , 周国逸 , 等 . 鼎湖山南亚热带森林群落演替对土壤化学性质影响的累积效应研究 [J]. 水土保持学报 , 2003,17(4):51-54.
OUYANG X J, HUANG Z L, ZHOU G Y, *et al*. Accumulative effects of forest community succession on soil chemical properties in Dinghushan of tropical China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,17(4):51-54.

[23] 江远清 , 莫江明 , 方运霆 , 等 . 鼎湖山主要森林类型土壤交换性阳离子含量及其季节动态特征 [J]. 广西植物 ,2007,27(1): 106-113.
JIANG Y Q, MO J M, FANG Y T, *et al*. Concentrations of exchangeable cations of soil and their seasonal dynamics in three representative forests of Dinghushan Biosphere Reserve[J]. Guihaia, 2007,27(1):106-113.

[24] 常超 , 谢宗强 , 熊高明 , 等 . 三峡库区不同植被类型土壤养分特征 [J]. 生态学报 ,2009,29(11):5978-5985.
CHANG C, XIE Z Q, XIONG G M, *et al*. Characteristics of soil nutrients of different vegetation types in the Three Gorges reservoir area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(11):5978-5985.

[25] 黄文娟 , 刘菊秀 , 唐旭利 , 等 . 鼎湖山 5 种森林土壤的无机氮

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和有效磷含量 [J]. 应用与环境生物学报 ,2009,15(4):441-447.
HUANG W J, LIU J X, TANG X L, *et al*. Inorganic nitrogen and available phosphorus concentrations in the soils of five forests at Dinghushan, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2009,15(4):441-447.

[26] 刘兴诏 , 周国逸 , 张德强 , 等 . 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征 [J]. 植物生态学报 ,2010, 34(1):64-71.
LIU X Z, ZHOU G Y, ZHANG D Q, *et al*. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010,34(1):64-71.

[27] 郑姗姗 , 吴鹏飞 , 马祥庆 . 森林土壤养分空间异质性研究进展 [J]. 世界林业研究 ,2014,27(4):13-17.
ZHENG S S, WU P F, MA X Q, *et al*. Research progress in nutrient heterogeneity in forest soil[J]. World Forestry Research, 2014,27(4):13-17.

[28] 冯天骄 , 卫伟 , 陈利顶 , 等 . 陇中黄土区坡面整地和植被类型对土壤化学性状的影响 [J]. 生态学报 ,2016,36(11):3216-3225.
FENG T J, WEI W, CHEN L D, *et al*. Effects of land preparations and vegetation types on soil chemical features in a loess hilly region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(11):3216-3225.

[29] 郑路 , 卢立华 . 我国森林地表凋落物现存量及养分特征 [J]. 西北林学院学报 ,2012,27(1):63-69.
ZHENG L, LU L H. Standing crop and nutrient characteristics of forest floor litter in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012,27(1):63-69.

[30] 张德强 , 余清发 , 孔国辉 , 等 . 鼎湖山季风常绿阔叶林凋落物层化学性质的研究 [J]. 生态学报 ,1998,18(1):98-102.
ZHANG D Q, YU Q F, KONG G H, *et al*. Chemical properties of forest floor litter in Dinghushan monsoon evergreen broadleaved forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998,18(1):98-102.

[31] 赵畅 , 龙健 , 李娟 , 等 . 茂兰喀斯特原生林不同坡向及分解层的凋落物现存量和养分特征 [J]. 生态学杂志 ,2018,37(2): 295-303.
ZHAO C, LONG J, LI J, *et al*. Litter stock and nutrient characteristics of decomposing litter layers in Maolan Karst primary forest in different slope directions[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018,37(2):295-303.

[32] 倪惠菁 , 苏文会 , 范少辉 , 等 . 养分输入方式对森林生态系统土壤养分循环的影响研究进展 [J]. 生态学杂志 ,2019,38(3): 863-872.
NI H J. SU W H, FAN S H, *et al*. Advances in research for responses of soil nutrient cycling to the changes of soil nutrient input processes in forest ecosystems[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(3):863-872.

[33] HOBBIE S E, CHAPIN F S. The response of tundra plant biomass, aboveground production, nitrogen, and CO_2 flux to experimental warming[J]. Ecology, 1998,79(5):1526-1544.

[34] 葛晓改 , 肖文发 , 曾立雄 , 等 . 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系 [J]. 生态学报 ,2012,32(3):852-862.
GE X G, XIAO W F, ZENG L X, *et al*. Relationships between litter substrate quality and soil nutrients in different-aged *Pinus massoniana* stands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(3):852-862.

[35] 肖欣 , 王雄涛 , 欧阳勋志 . 马尾松人工林土壤有机碳特征及其与凋落物质量的关系 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2015,39(6):105-111.
XIAO X, WANG X T, OUYANG X Z. The characteristic of soil organic carbon and relationship with litter quality in *Pinus massoniana* plantation[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015,39(6):105-111.

[36] 潘萍 , 赵芳 , 欧阳勋志 , 等 . 马尾松林两种林下植被土壤碳氮特征及其与凋落物质量的关系 [J]. 生态学报 ,2018, 38(11):3988-3997.
PAN P, ZHAO F, OUYANG X Z, *et al*. Characteristics of soil carbon and nitrogen and relationship with litter quality under different understory vegetation in *Pinus massoniana* plantations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(11): 3988-3997.

[本文编校：吴　彬]

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net