

不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质的影响

李 鹏¹, 陈 璇², 杨章旗¹, 颜培栋¹, 陈 虎¹, 零天旺³, 陆绍浩³

(1.广西壮族自治区林业科学研究院国家林草局马尾松工程技术研究中心,
广西马尾松工程技术研究中心,广西优良用材林资源培育重点实验室,南宁 530002;
2.贵州省林业调查规划院,贵阳 550003;3.广西横州市镇龙林场,广西 横州 530327)

摘要: 为研究不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质和林分生长影响,选择适宜的人工林经营措施提供参考。以 2 500,3 300,4 500,6 000 株/hm² (分别记为 M1、M2、M3 和 M4) 4 种造林密度的马尾松人工林为研究对象,利用结构方程探究不同密度马尾松林枯落物输入对土壤性质的影响。结果表明:林分密度对枯落物和土壤理化性质均具有显著影响,其中枯落物总蓄积量和持水量表现为 M2 密度最大,显著高于其他密度;同时 M2 密度中枯落物碳、氮、磷、钾养分储量最大,以有机碳为主,占总储量的 96.98%。随土层深度的增加,土壤理化性质差异性减少,枯落物层对土壤表层理化性质影响较大,土壤持水性、孔隙度、pH、全磷、碱解氮和速效磷均在 M2 中最大,有机质和全氮呈现 M4>M2>M3>M1,渗透性、全钾和速效钾在 M1 中最大。枯落物蓄积量和养分储量与土壤粉粒、持水性、孔隙度、有机质、全磷和碱解氮呈显著正相关。结构方程显示,枯落物总蓄积量对土壤理化性质均具有显著正相关,而持水性对土壤化学性质具有显著负相关;土壤化学性质对林分蓄积量具有显著正相关,而枯落物养分储量对林分蓄积量具有显著负相关。综上,M2 密度下马尾松林枯落物总蓄积量和养分储量较多,能够起到减少地表径流,增加土壤持水性和孔隙度,并减少速效养分流失,促进根系伸展和延伸,是比较科学的马尾松营林措施。

关键词: 马尾松; 枯落物; 土壤理化性质; 结构方程

中图分类号:S714.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)02-0368-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.047

Effects of Litter Input on Soil Physical and Chemical Properties of *Pinus massoniana* Plantations with Different Densities

LI Peng¹, CHEN Xuan², YANG Zhangqi¹, YAN Peidong¹,

CHEN Hu¹, LING Tianwang³, LU Shaohao³

(1.Guangxi Academy of Forestry, National Forestry and Grass Administration, Masson Pine Engineering Technology Research Center, Guangxi Masson Pine Engineering Technology Research Center, Guangxi Key Laboratory of Fine Timber Forest Resources Cultivation, Nanning 530002; 2.Guizhou Provincial Forestry Investigation and Planning Institute, Guiyang 550003; 3.Zhenlong Forest Farm of Hengzhou City, Hengzhou, Guangxi 530327)

Abstract: The purpose of this study was to study the influence of *Pinus massoniana* litter input with different densities on the soil physical and chemical properties and stand growth, and to improve the theoretical basis for selecting appropriate plantation management measures. Four planting densities, 2 500 trees/hm² (M1), 3 300 trees/hm² (M2), 4 500 trees/hm² (M3) and 6 000 trees/hm² (M4) of *P. massoniana* forests, were set up as research subject. The structure equation was used to explore the influence of litter input of *P. massoniana* forest with different densities on soil properties. The result showed that forest density had a significant impact on litter and soil physical and chemical properties. The total storage and water holding capacity of litter were the highest under M2, which was significantly higher than others. The litter had the largest nutrient reserves of carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium in M2, amongh which the organic carbon is the major, accounting for 96.98% of the total. The differences in soil physical and chemical properties decreased with the

收稿日期:2021-09-01

资助项目:国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD060030202,2017YFD0601201);广西院士后备人才培养项目(桂科 AD19254004);八桂学者和八桂青年学者专项;广西创新驱动专项(桂 AA17204087-1,桂 AA17204087-4)

第一作者:李鹏(1993—),男,硕士,助理工程师,主要从事森林土壤研究。E-mail: 1055122499@qq.com

通信作者:杨章旗(1964—),男,博士,教授级高工,主要从事林木遗传育种研究。E-mail: Yangzhangqi@163.com

depth of the soil layer increased, and the litter layer had a greater impact on the physical and chemical properties in the surface soil. Soil water holding capacity, porosity, pH, total phosphorus, alkaline nitrogen and available phosphorus were all the highest in M2, whereas the organic matter and total nitrogen presented as $M4 > M2 > M3 > M1$, and total potassium and available potassium had highest contents in M1. Litter accumulation and nutrient reserves were significantly positively correlated with soil silt, water holding capacity, porosity, organic matter, total phosphorus, and available nitrogen, while significantly negatively correlated with soil bulk density and permeability. The structural equation showed that the total storage of litter had a significantly positive correlation with soil physical and chemical properties, whereas soil water holding capacity had a significantly negative correlation with soil physical and chemical properties. Soil chemical properties had a significant positive correlation with forest volume, and a significant negative correlation was found between the forest stock and litter nutrients contents. In summary, the *P. massoniana* forest with M2 density had the more litter accumulation and nutrients reserves, which could reduce surface runoff, increase soil water holding capacity and porosity, reduce the loss of available nutrients, and promote root extension and extension, which should be the more appropriate forestation measures.

Keywords: *Pinus massoniana*; litter; soil physical and chemical properties; structural equation

土壤是植物生长和初级生产力发生的重要场所^[1-2],森林植被类型影响地球土壤生物化学过程^[3]。土壤质地作为土壤结构表征,直接影响土壤水力特性、生产力以及土壤侵蚀^[4];土壤持水特性、孔隙度和渗透性是森林生态系统土壤水源涵养功能的重要指标;土壤化学性质则是植物营养吸收和健康生长重要物质基础^[5],研究土壤理化性质变化对了解森林生态系统功能、养分循环机制和土壤肥力状况具有重要意义^[6-7]。枯落物层不仅是土壤有机质和养分元素的重要来源^[8],还是减小地表径流、增加森林水源涵养功能的重要界面。因此,了解和研究枯落物输入对土壤理化性质的影响,对明确森林生态系统水源涵养功能和养分循环利用能力具有重要作用。马尾松(*Pinus massoniana*)是我国亚热带地区最重要的先锋造林树种,具有速生、丰产、适生性强、用途广等优点。然而马尾松人工林经营过程中,为提高木材产量,采取粗放的经营模式,如密集种植、农药化肥滥用等^[9],忽视了森林生态系统地上、地下养分动态平衡和循环过程,以及土壤肥力质量的提升,导致人工林生态系统结构发生改变、稳定性降低、土壤地力衰退等,从而影响林木产量。目前,关于马尾松人工林土壤理化性质^[10]已有不少研究,但对于不同林分密度下,尤其是枯落物输入对土壤某些理化性质形成、养分循环和土壤质量的研究较少。本研究针对马尾松凋落物具有较高碳氮比、分解慢等特性,基于长期固定监测样地,分析 4 种林分密度马尾松人工林枯落物持水性和养分储量、土壤理化性质的演变及其相关性,阐明枯落物输入对土壤理化性质的影响规律,筛选出适宜的马尾松种植密度,为马尾松人工林高效培育提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西横州市镇龙林场(109°08'12"—109°19'22"E,23°02'32"—23°08'13"N),属南亚热带季风气候,气候温暖,雨量充沛,年均降水量 1 477.8 mm,年蒸发量 1 056.9 mm,年平均气温 21.5 °C,极端低温 -1 °C,极端高温 39.2 °C,年均日照时间 1 758.9 h,年降水量 1 477.8 mm,无霜期 336 天。试验林位于那歪分场 4 林班 10 小班,海拔 450 m,坡度 25°,坡向西南 216°,中上坡位,土壤为紫色砂页岩发育而成的赤红壤,平均土层厚 60 cm,林下灌草主要有山鸡椒(*Litsea cubeba*)、华南毛柃(*Eurya ciliata*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、山乌桕(*Sapium discolor*)、三叉苦(*Euodia lepta*)、鸭脚木(*Schefflera octophylla*)、黄毛榕(*Ficus esquiroliana*)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum*)、棕叶芦(*Thysanolaena maxima*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)和五节芒(*Miscanthus floridulu*)等。

1.2 样地设置与调查

试验林于 1997 年 5 月造林,苗木为广西壮族自治区林业科学研究院提供的马尾松优良家系半年生营养杯实生苗(平均苗高 25 cm,地径 0.26 cm),采用 4 个不同密度:2 500,3 300,4 500,6 000 株/hm²(株行距分别为 2 m×2 m,1.5 m×2 m,1.5 m×1.5 m,1 m×1.67 m)进行造林,造林后采用近自然经营模式。2006 年课题组^[11]在每种林分选择坡度、坡向、海拔、土壤等立地因子和植被状况基本一致的 3 个 20 m×20 m 的标准地(间隔>50 m),共布设 12 个

固定监测样地。2020 年 5 月进行样地调查和样品采集,样地基本概况见表 1。

表 1 样地基本概况

林分类型	种植密度/ (株·hm ⁻²)	海拔/m	平均 胸径/cm	平均 树高/m	单株 材积/m ³	蓄积量/ (m ³ ·hm ⁻²)
M1	2500	438	22.64±0.23	19.15±0.73	0.377±0.01	320.91±49.79
M2	3300	451	22.41±0.34	19.23±0.25	0.343±0.02	388.86±39.53
M3	4500	450	22.84±0.15	19.03±0.38	0.339±0.02	372.29±38.96
M4	6000	442	23.24±0.16	18.52±0.24	0.286±0.01	328.64±29.34

注:表中数据为平均值±标准差。

1.3 枯落物样品采集与测定

根据每木检尺结果,在每块样地内上、中、下选择 3 株平均木作为标准木,在标准木周围 1 m 处随机选择 3 个 1 m×1 m 小样方,每个小样方四角及对角线交点测量枯落物厚度,按分解程度划分未分解层(上层,具有完整的叶、枝等特征)、半分解层(中层,分解为半破碎化的凋落物)和分解层(为已分解成细碎片或细颗粒状的凋落物)分别取样。采用直接收获法分层次收集样方内所有枯落物,每株标准木周围 3 个样方枯落物分层混合,每个样地 9 份混合样品。

2020 年 6 月将收集样品分类装袋,各层样品称取鲜重后,在 80 ℃烘箱中烘干至恒重后称重,并计算各层次单位总蓄积量(即单位面积干物质量,计算方法:烘干后干物质量除以样方总面积)。每份样品取其中 50 g,粉碎过 100 目筛用于化学性质测定,其他用于持水特性测定。采用浸泡法对枯落物进行持水量测定,以浸水 24 h 为最大持水量,最大持水量与自然含水量的差值为有效持水量;根据林业行业标准(LY/T 1269/1270—1999),有机碳采用重铬酸钾—浓硫酸高温加热法测定;氮、磷和钾采用浓硫酸—过氧化氢消煮法测定。

1.4 土壤样品采集与测定

采用剖面法进行土壤样品采集,在枯落物采集完成后的样方内开挖土壤剖面,用环刀(容积为 100 cm³)采集 0—20,20—40,40—60 cm 环刀土,用于土壤物理性质的测定;采集相应剖面土分层混合,混合后采用四分法取其中 1 份,装入自封袋,实验室内放入专用土样风干盘中,摊成 2~3 cm 的薄层,室温下自然风干,避免阳光直射或暴晒。土样半干时,为避免完全风干后难以磨碎,用手将大块的土粒捏碎。土壤样品完全风干后,磨碎,过 2 mm 筛,装入自封袋,用于土壤化学性质的测定。

采用环刀法测定土壤含水量、容重、孔隙度、持水量和渗透性;根据林业行业标准(LY/T 1210—1275—2016),采用水土比 1:2.5 酸度计法测定 pH;采用重铬酸钾高温外热法测定有机质;采用凯氏定氮法测定全氮;采用氢氧化钠熔融法测定全磷和全钾;

采用碱解扩散法测定速效氮;采用 Mehlich 3 浸提测定有效磷和速效钾。

1.5 数据分析与处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析。对不同林分密度枯落物和土壤理化性质差异进行单、双因素方差分析(GLM—Univariate),差异显著性的多重比较采用 Tukey’s 检验,显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。图表数据均以平均值±标准差表示。采用 Smart PLS 软件对不同密度枯落物和土壤理化性质进行偏最小二乘法—结构方程的构建。

2 结果与分析

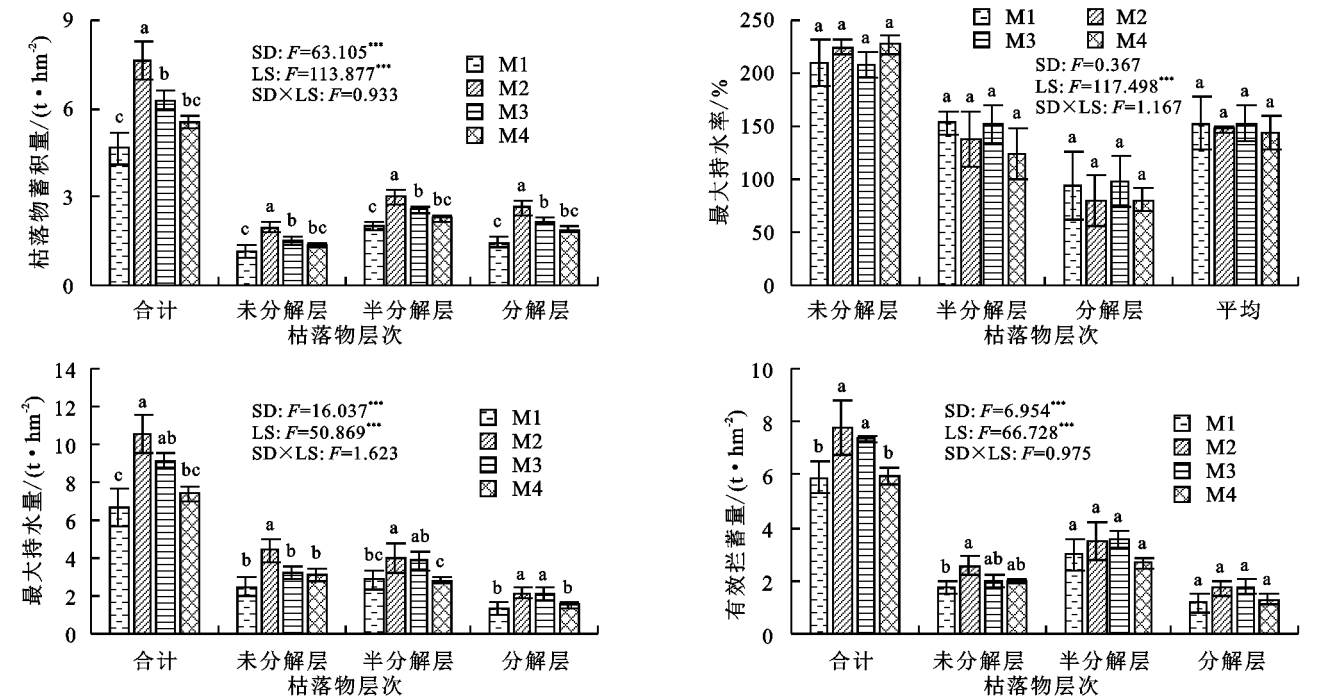
2.1 不同密度马尾松林枯落物持水性和养分储量

2.1.1 枯落物蓄积量和持水性 双因素方差分析(图 1)显示,马尾松林不同密度和枯落物分解程度均对枯落物蓄积量、最大持水量和有效持水量具有显著影响($p<0.05$),最大持水率仅在不同枯落物分解程度具有显著影响,林分密度与枯落物层次的交互作用对枯落物蓄积量、持水性均无显著差异。不同密度枯落物总蓄积量为 6.02 t/hm²,介于 4.15~8.35 t/hm²,M2 中最大为 7.60 t/hm²,显著高于其他密度,M1 中最小为 4.64 t/hm²,枯落物各层次与总蓄积量具有相似变化规律,其大小顺序为 M2>M3>M4>M1。各密度中枯落物蓄积量均以半分解层最多,平均占总体的 41.29%,其次是分解层占 33.86%,未分解层最小占总体的 24.85%。不同密度枯落物最大持水率无显著差异($p>0.05$),平均最大持水率为 149.21%,介于 79.49%~152.79%,未分解层最大持水率平均为 217.62%,其次是半分解层 141.82%,分解层最小为 88.19%。M2 中枯落物最大持水量和有效拦蓄量最大,分别为 10.54,7.76 t/hm²,其次是 M3,分别为 6.29,7.36 t/hm²,枯落物拦蓄有效持水能力大小为 M2>M3>M4>M1。

2.1.2 枯落物养分储量 双因素方差分析(图 2)显示,不同密度和枯落物分解程度均对枯落物碳、氮、磷、钾养分储量具有显著影响($p<0.05$),林分密度与枯落物层次的交互作用仅对钾元素储量具有显著影响($p<0.05$),而对碳、氮、磷元素养分储量无显著影响。不同密度马尾松林枯落物(碳、氮、磷、钾)4 种元

素总储量为 $M2(3.03\text{ t/hm}^2) > M3(2.47\text{ t/hm}^2) > M4(2.4\text{ t/hm}^2) > M1(1.85\text{ t/hm}^2)$, 主要以有机碳为主, 占总量的 96.98%。碳、氮、磷、钾元素养分总储量均呈现 $M2$ 显著高于其他密度, 分别为 2.94, 74.09, 6.00, 15.3 kg/hm^2 , $M1$ 中最小分别为 1.79, 45.59, 3.56, 8.24 kg/hm^2 , 枯落物各层次养分储量与总养分储量变化

规律相似, 其大小顺序均为 $M2 > M3 > M4 > M1$ 。各密度中碳、氮、磷元素养分总储量均以半分解层最多, 平均占总体的 41.18%, 其次是未分解层占 30.14%, 未分解层最小占总体的 28.68%; 钾元素养分储量为未分解层(占 61.48%) > 分解层(占 24.91%) > 半分解层(占 13.61%)。



注:SD 为林分密度;LS 为枯落物层次;图中不同字母表示不同密度间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 不同密度马尾松人工林枯落物蓄积量和持水性

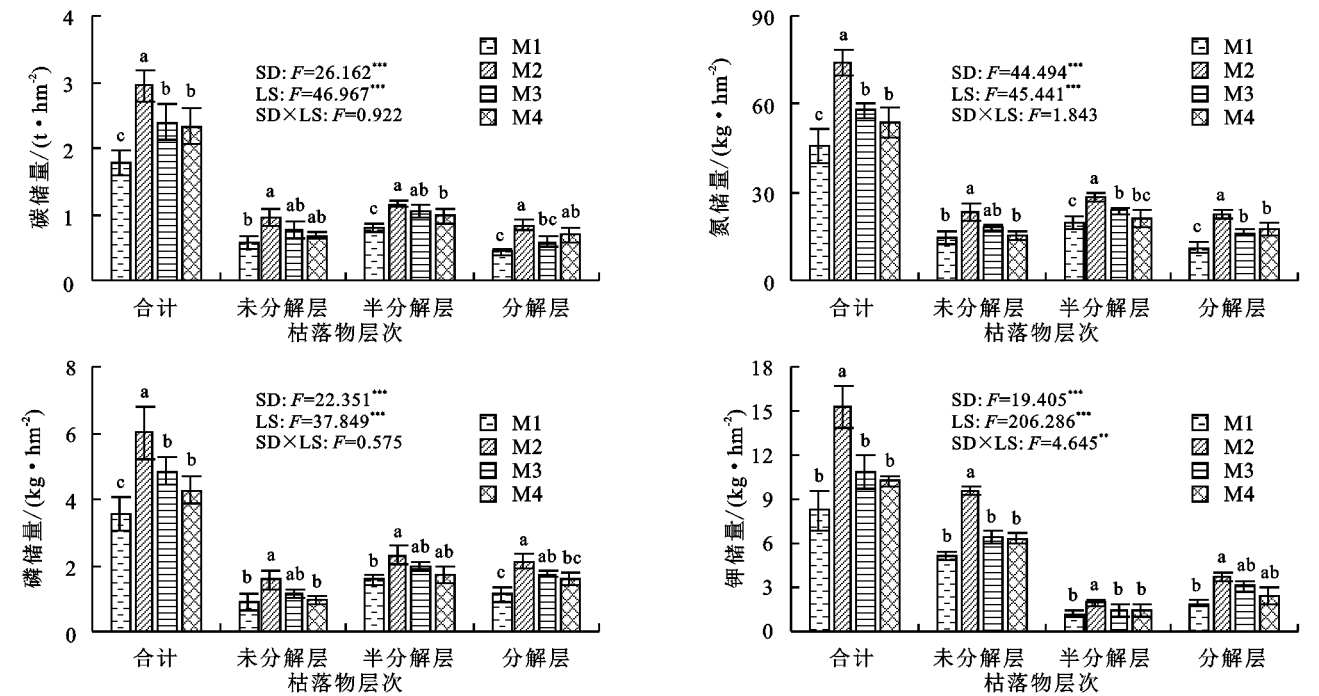


图 2 不同密度马尾松人工林枯落物养分储量

2.2 不同密度林分土壤理化性质

2.2.1 土壤物理性质 双因素方差分析(表 2)显示, 马尾松林不同林分密度和土层均对土壤质地、持水

性、孔隙度、容重和渗透性具有显著影响($p<0.05$), 林分密度与土层的交互作用对土壤质地、持水量和渗透性具有显著影响($p<0.05$), 而对孔隙度和容重无

显著影响。

不同密度土壤砂粒、粉粒和黏粒占比具有显著差异($p<0.05$),4 种密度均以砂粒和黏粒为主(图 3)。不同土层呈现不同变化趋势,0—20 cm 土层 M2 砂粒、粉粒比重较低,黏粒比重最高,M3 黏粒比重最低,M1 粉粒含量最低;20—40 cm 土层 M3 砂粒、粉粒比重较低,黏粒比重最高,M2 黏粒比重最低,M4

粉粒含量最低;40—60 cm 土层 M3 砂粒、粉粒比重较低,M2 黏粒和粉粒比重最低,砂粒比重最高。总体上,M1 粉粒比重最低,黏粒比重最高,M2 黏粒比重最低,砂粒比重最高,M3 砂粒比重最低,粉粒比重最高。随土层深度的增加,M4 砂粒比重显著降低,M1 黏粒比重显著降低,而 M3 和 M4 黏粒比重显著增加,M1 粉粒比重显著增加。

表 2 土壤物理性质双因素方差分析 F 值和显著性

自变量	砂粒	黏粒	粉粒	最大持水率	毛管持水率	毛管孔隙度	总孔隙度	容重	初渗速率	稳渗速率
林分密度(SD)	811.746***	887.985***	577.299***	20.771***	20.015***	6.157**	13.245***	27.556***	106.973***	110.142***
土层(SL)	154.888***	353.274***	874.241***	93.811***	94.956***	33.139***	48.937***	109.169***	75.912***	20.874***
SD×SL	1400.438***	2013.187***	876.844***	4.725**	3.214*	1.288	2.288	2.348	24.098***	12.858***

注:*表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$; ***表示 $p<0.001$ 。下同。

不同密度马尾松人工林土壤持水性、孔隙度、容重和渗透性具有显著性差异($p<0.05$,表 3),持水性、孔隙度均随土层深度增加显著降低,各层中均是 M2 最高,M1 最低;而容重与之相反,随土层深度增加显著增加,M2 最低,M1 最高;初渗和稳渗速率随土层深度增加变化趋势并不一致,但均在 M1 中最高。

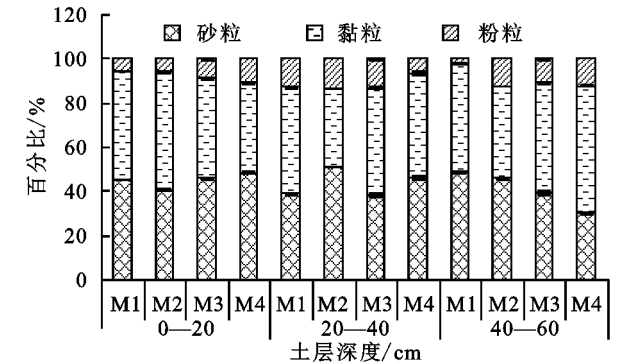


图 3 不同密度马尾松人工林土壤质地占比

表 3 不同密度马尾松人工林土壤物理性质

林分密度	土层深度/cm	最大持水率/%	毛管持水率/%	毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	容重/(g·cm ⁻³)	初渗速率/(mm·min ⁻¹)	稳渗速率/(mm·min ⁻¹)
M1	0—20	42.79±2.43cA	34.71±1.08cA	43.49±2.02aA	53.00±1.60bA	1.26±0.06aB	3.88±0.29aA	0.85±0.05aA
	20—40	34.41±1.03cB	29.55±1.21bB	40.67±1.45aB	47.65±1.09bB	1.38±0.02aA	4.32±0.38aA	0.85±0.07aA
	40—60	31.37±1.08bB	27.37±0.46aB	39.47±1.12aB	44.93±1.08bC	1.44±0.02aA	4.19±0.57aA	1.03±0.09aA
M2	0—20	59.09±3.04aA	46.95±2.83aA	48.55±3.81aA	61.23±1.21aA	1.05±0.04cC	3.69±0.13aA	0.68±0.05bA
	20—40	44.10±1.50aA	35.31±1.27aB	42.63±0.61aB	53.22±1.59aA	1.22±0.05cB	2.61±0.23bB	0.36±0.06bB
	40—60	34.51±0.53abB	31.20±0.26aC	42.98±1.79aB	47.43±0.69abB	1.35±0.03aA	0.77±0.14cC	0.09±0.05bC
M3	0—20	51.07±5.96bA	39.88±1.57bA	45.41±2.82aA	55.49±2.42bA	1.12±0.02bcB	3.11±0.06bA	0.55±0.05bA
	20—40	39.14±0.83bB	32.41±1.84abB	42.26±1.35aB	51.23±3.39abB	1.31±0.01bA	1.66±0.17cB	0.23±0.04bC
	40—60	37.84±1.20aB	29.80±1.40aB	39.46±1.18aB	50.24±0.50aB	1.35±0.06aA	1.84±0.1bB	0.32±0.06bB
M4	0—20	45.78±3.55bcA	40.50±1.06bA	47.49±1.51aA	52.76±2.95bA	1.18±0.03abB	3.24±0.07bA	0.38±0.06cA
	20—40	36.70±1.66bcB	30.63±1.52bB	40.53±0.53aB	48.69±1.95bB	1.34±0.01abA	1.57±0.4cB	0.25±0.06bB
	40—60	36.09±4.18abB	31.45±5.00aB	41.28±1.13aB	48.15±3.34abB	1.38±0.04aA	1.76±0.23bB	0.31±0.14bB

注:数据后不同小写字母表示同一土层不同林分密度差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示同一林分密度不同土层差异显著($p<0.05$)。

2.2.3 土壤理化性质相关性 从表 4 可以看出,不同密度土壤理化性质间关系密切,其中土壤 pH 与容

重呈显著正相关,与持水性和毛管孔隙度呈显著负相关;有机质、全磷和有效磷均与持水性、孔隙度和初渗速率呈显著正相关,与容重呈极显著负相关;全氮和碱解氮均与持水性和孔隙度呈极显著正相关,

与容重呈极显著负相关;速效钾与持水性、总孔隙度和渗透性呈显著正相关,与容重和砂粒呈极显著负相关;全钾与渗透性呈显著正相关,与砂粒呈极显著负相关。

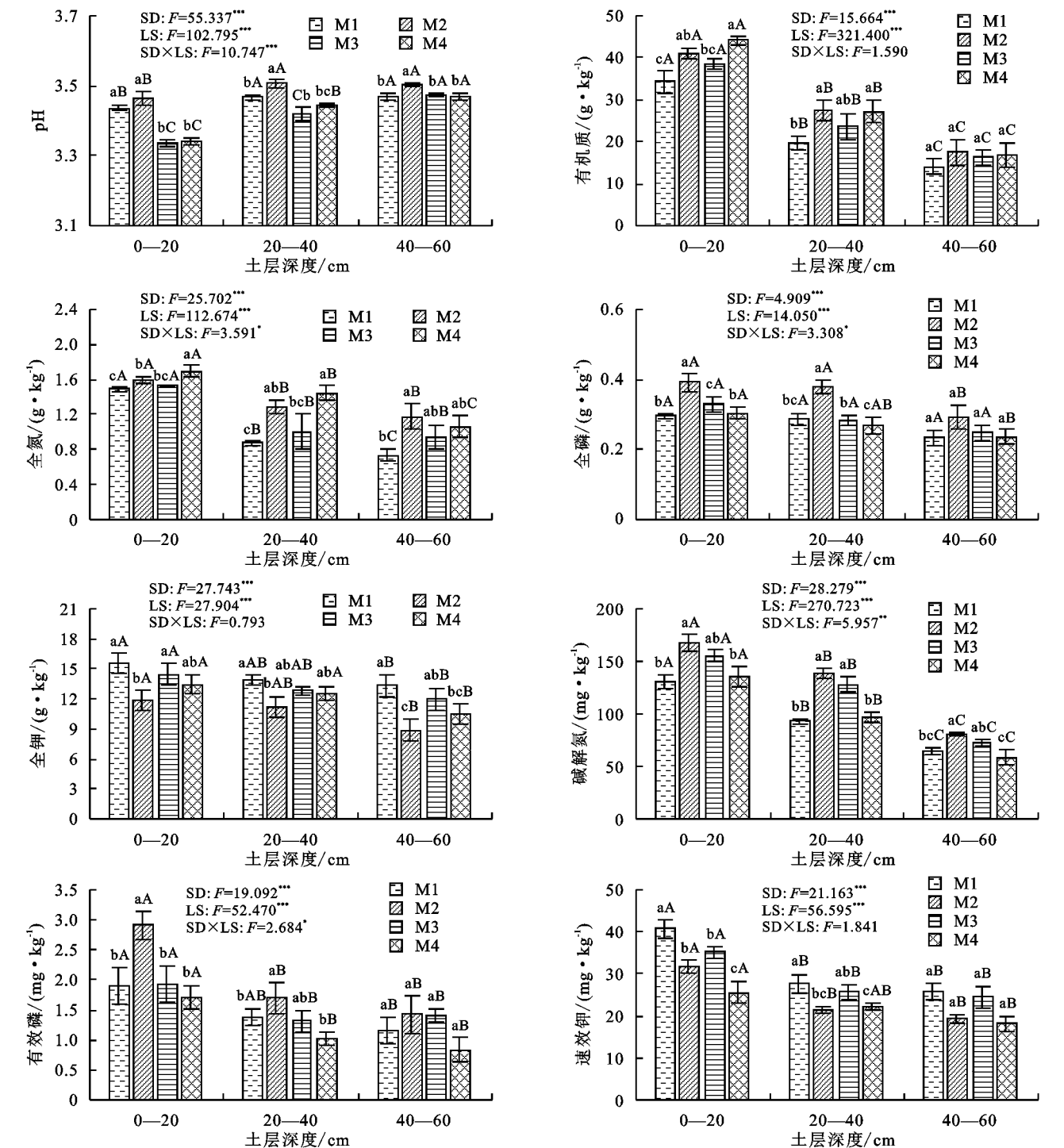


图 4 不同密度马尾松人工林土壤化学性质

土壤物理性质间关系密切,土壤容重与持水性和孔隙度均呈极显著负相关;砂粒与粉粒呈显著正相关,与粉粒和渗透性呈极显著负相关;黏粒与总孔隙度呈显著正相关,与粉粒和稳渗速率呈显著负相关;粉粒与渗透性呈显著正相关;持水性和孔隙度间均呈极显著正相关。

土壤化学性质间关系密切,土壤 pH 与有机质、全氮、全钾、碱解氮和速效钾呈显著负相关;有机质与氮、磷、钾全量和速效养分均呈显著正相关;全氮与全磷和氮、磷、钾速效养分呈显著正相关;全磷与碱解氮和速效磷呈显著正相关;全钾与速效钾呈显著正相关;氮、磷、钾速效养分间均呈显著正相关。

表 4 土壤理化性质的相关性系数

土壤理化性质	BD	Sand	Clay	Silt	MWHR	CWHR	CPS	TPS	IIR	IR	pH	OM	TN	TP	TK	AN	AP
Sand	0.080	1															
Clay	-0.256	0.374 *	1														
Silt	0.190	-0.626 **	-0.957 **	1													
MWHR	-0.941 **	-0.142	0.303	-0.211	1												
CWHR	-0.915 **	-0.105	0.273	-0.197	0.915 **	1											
CPS	-0.766 **	-0.049	0.196	-0.149	0.731 **	0.835 **	1										
TPS	-0.885 **	-0.093	0.360 *	-0.274	0.955 **	0.878 **	0.702 **	1									
IIR	-0.214	-0.496 **	-0.284	0.393 *	0.240	0.234	0.211	0.194	1								
IR	-0.011	-0.629 **	-0.334 *	0.477 **	0.077	0.033	0.017	0.050	0.887 **	1							
pH	0.375 *	0.122	-0.081	0.030	-0.393 *	-0.443 **	-0.414 *	-0.306	-0.210	-0.033	1						
OM	-0.849 **	-0.191	0.186	-0.097	0.813 **	0.821 **	0.766 **	0.750 **	0.334 *	0.074	-0.652 **	1					
TN	-0.790 **	-0.143	0.267	-0.180	0.727 **	0.754 **	0.692 **	0.672 **	0.062	-0.146	-0.513 **	0.895 **	1				
TP	-0.650 **	-0.205	-0.157	0.196	0.613 **	0.546 **	0.517 **	0.571 **	0.471 **	0.277	-0.077	0.552 **	0.450 **	1			
TK	-0.153	-0.421 *	-0.066	0.186	0.186	0.088	0.120	0.133	0.655 **	0.590 **	-0.516 **	0.384 *	0.181	0.266	1		
AN	-0.841 **	-0.045	0.169	-0.128	0.815 **	0.835 **	0.742 **	0.793 **	0.303	0.075	-0.477 **	0.862 **	0.746 **	0.643 **	0.291	1	
AP	-0.798 **	-0.257	0.188	-0.078	0.791 **	0.827 **	0.746 **	0.746 **	0.371 *	0.238	-0.171	0.716 **	0.668 **	0.591 **	0.102	0.706 **	1.000
AK	-0.425 **	-0.473 **	0.099	0.065	0.497 **	0.391 *	0.297	0.500 **	0.584 **	0.565 **	-0.417 *	0.560 **	0.384 *	0.195	0.665 **	0.518 **	0.422 *

注:BD 为容重;Sand 为砂粒;Clay 为黏粒;Silt 为粉粒;MWHR 为最大持水率;CWHR 为毛管持水率;CPS 为毛管孔隙度;TPS 为总孔隙度;IIR 为初渗速率;IR 为稳渗速率;OM 为有机质;TN 为全氮;TP 为全磷;TK 为全钾;AN 为碱解氮;AP 为有效磷;AK 为速效钾。

2.3 相关性分析

马尾松人工林枯落物持水性和养分储量与土壤理化性质间关系密切(表 5),其中枯落物总蓄积量和碳、氮储量均与土壤粉粒、持水性、孔隙度、有机质、全磷和碱解氮呈显著正相关,与土壤容重、渗透性和全钾呈显著负相关;枯落物最大持水量和磷、钾储量均与土壤粉粒、持水性、孔隙度、初渗速率、全磷和碱解氮呈显著正相关,与土壤容重、稳渗速率和全钾呈显著负相关;枯落物有效持水量与土壤粉粒、最大持水率、总孔隙度和碱解氮呈显著正相关,与土壤容重呈显著负相关。

2.4 结构方程模型

林分密度对枯落物蓄积量和养分储量均产生正向影响(路径系数分别为 0.106 和 0.086,图 5),而对枯落物持水性产生负向影响(路径系数为-0.005),其路径系数较小,表明除林分密度对枯落物蓄积量、持水性和养分储量具有一定的影响外,还与林下植物多样性及其灌草残体的影响有关。枯落物总蓄积量对土壤理化性质均具有显著正相关(路径系数分别为 1.223和 2.018);持水性对土壤化学性质具有显著负相关(路径系数为-0.804),与土壤物理性质也具有负相关(路径系数为-0.242);养分储量对土壤理化性质均具有负影响(路径系数分别为-0.161 和-0.433)。土壤化学性质对林分蓄积量具有显著正相关(路径系数为 1.072),而枯落物养分储量对对林分蓄积量具有显著负

相关(路径系数为-1.439),枯落物蓄积量、持水性和土壤物理性质对林分蓄积量也具有正向影响(路径系数分别为 0.478,0.021 和 0.241)。枯落物最大和有效持水量对持水性具有显著正相关(路径系数分别为 0.966和 0.981),而持水率无显著影响(路径系数为 0.209);碳、氮、磷和钾养分储量对枯落物养分储量均具有显著正相关(路径系数分别为 0.975,0.981,0.991 和 0.991);土壤黏粒、粉粒、持水性和孔隙度对土壤物理性质呈显著正相关,而容重、砂粒含量、渗透性对土壤物理性质呈显著负相关;有机质、全氮、碱解氮和全钾对土壤化学性质呈显著正相关,全钾和速效钾对土壤化学性质呈显著负相关,而 pH 和有效磷对土壤化学性质的荷载值较小,分别为-0.207 和 0.222。

3 讨论

枯落物是森林生态系统生物量的重要组成部分,反映森林初级生产力的大小,不同林分密度下其郁闭度存在差异,林分光热条件及其林下植被多样性存在差异,导致枯落物的现存量存在差异,不同林分密度马尾松枯落物总蓄积量存在差异。林分枯落物储存与林分结构和林下植物群落有关,林分密度越大,郁闭度和林下灌草数量越小,林分枯落物数量越低^[12],本研究中枯落物蓄积量在 M2 中最大,之后随密度增大而减小。而 M1 低密度下枯落物储量也低于 M2,这可能是由于 M1 林分密度较大,马尾松针叶较少,而针叶具有较高碳氮比、分解慢等特性^[13],造成 M1

密度下枯落物蓄积量低于 M2。

不同层次枯落物蓄积量以半分解层为主,占总蓄积量的 75.15%,这与邓艳等^[14]研究结果相一致。枯落物层最大和有效持水量以及(碳、氮、磷、钾)4 种元素养分总储存量均呈现为 M2>M3>M4>M1,表明 M2 密度下马尾松人工林枯落物层拦蓄能力、养分储存和归还能力较强,具有更优的水源涵养能力和养分储量。

表 5 枯落物持水性和养分储量与土壤理化性质的相关性系数

项目	LA	LMWHR	LMWHC	LLWH	LCR	LNR	LPR	LKR
BD	-0.883**	0.122	-0.793**	-0.659*	-0.877**	-0.870**	-0.852**	-0.836**
Sand	-0.344	0.130	-0.296	-0.231	-0.413	-0.255	-0.305	-0.215
Clay	0.072	-0.102	0.044	0.027	0.162	-0.021	0.044	-0.048
Silt	0.871**	-0.146	0.793**	0.635*	0.862**	0.827**	0.821**	0.771**
MWHR	0.875**	-0.105	0.807**	0.771**	0.871**	0.839**	0.882**	0.781**
CWHR	0.686*	-0.109	0.605*	0.429	0.749**	0.724**	0.655*	0.591*
CPS	0.693*	-0.142	0.584*	0.404	0.765**	0.671*	0.681*	0.757**
TPS	0.805**	-0.034	0.775**	0.710**	0.808**	0.750**	0.780**	0.705*
IIR	-0.701*	0.199	-0.614*	-0.467	-0.721**	-0.641*	-0.646*	-0.593*
IR	-0.634*	0.119	-0.575	-0.394	-0.665*	-0.584*	-0.569	-0.542
pH	-0.036	0.067	-0.016	-0.018	-0.121	0.050	-0.017	0.087
OM	0.629*	-0.115	0.445	0.299	0.597*	0.640*	0.502	0.527
TN	0.417	-0.170	0.304	0.114	0.519	0.473	0.372	0.442
TP	0.714**	-0.290	0.582*	0.364	0.693*	0.701*	0.646*	0.701*
TK	-0.762**	0.081	-0.685*	-0.456	-0.809**	-0.791**	-0.728**	-0.777**
AN	0.758**	0.078	0.786**	0.604*	0.611*	0.714**	0.671*	0.654*
AP	0.509	-0.235	0.456	0.494	0.365	0.459	0.606*	0.414
AK	-0.318	0.446	-0.114	0.082	-0.498	-0.331	-0.278	-0.322

注:LA 为枯落物蓄积量;LMWHR 为最大持水率;LMWHC 为最大持水量;LLWH 为有效拦蓄量;LCR 为碳储量;LNR 为氮储量;LPR 为磷储量;LKR 为钾储量。

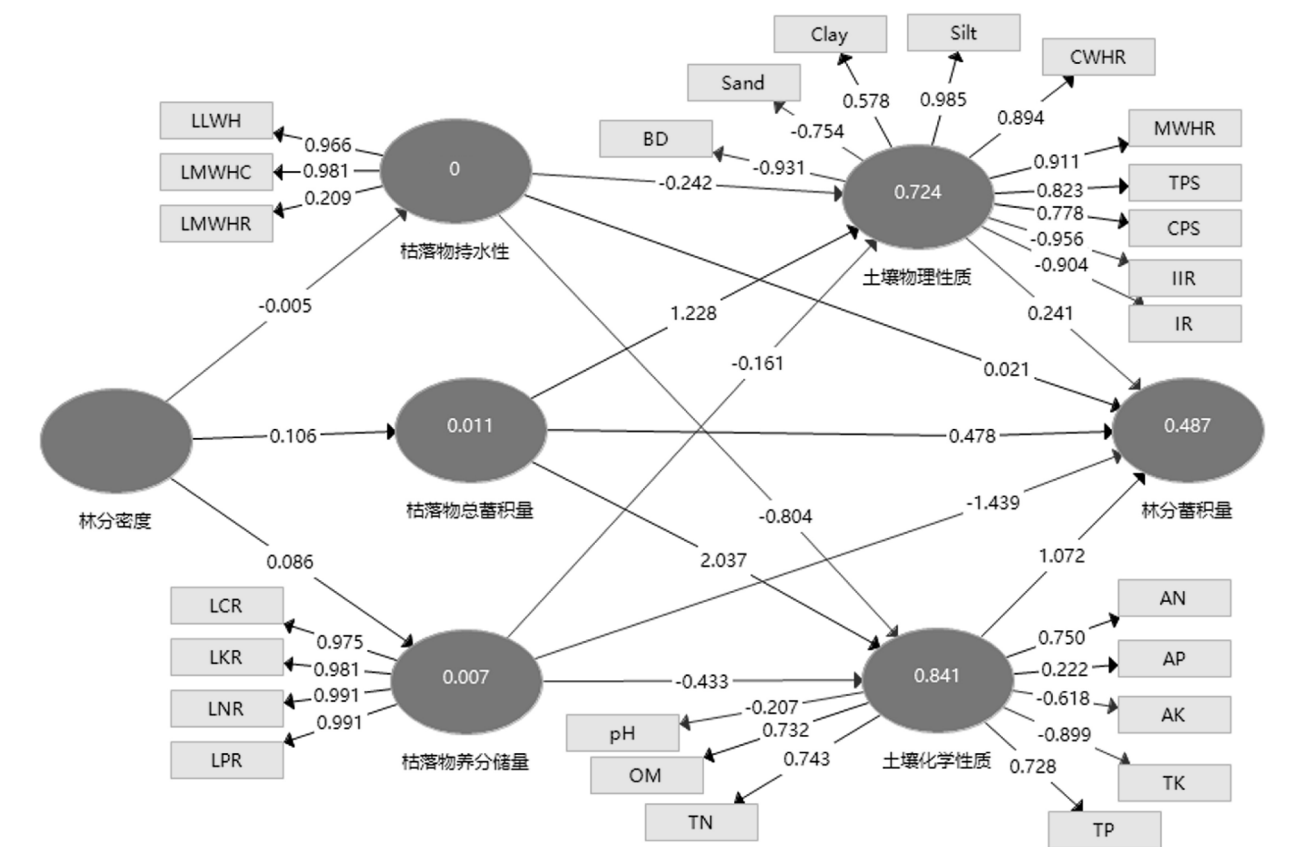


图 5 林分密度对枯落物持水性和养分储量及土壤理化性质的影响

土壤质地不仅反映土壤颗粒的大小与形状的分布特征,更能定量描述土壤颗粒的几何形态,在一定程度上表征土壤质量状况^[15]。不同土壤颗粒中微生物差异大,其中黏粒中土壤微生物丰富,通过减少土壤动物捕食的机会,增加土壤环境多样性,一般来说,黏粒含量高的土壤物理性质较好^[16],这与本研究中 M2 中土壤黏粒比重、持水性、孔隙度较高、容重较低的结果相一致。土壤容重和持水特性是决定土壤涵养水源能力的重要指标,两者直接影响土壤蓄水和通气性能^[17]。本研究中, M2 土壤容重最低,持水性、孔隙度最高,显著高于 M1 和 M4,表明 M2 密度较其他密度类型具有更好的水源涵养能力。其原因可能是由于 M2 密度下枯落物储量和类型较多,具有更加复杂的枯落物特征,从而促进枯落物分解改善土壤环境,使土壤毛管孔隙度增大,土壤有效涵养水源能力增加^[18]。枯落物的增加破坏土壤碳的稳定性,促进微生物的分解,增加 CO₂ 的排放,同时减少土壤碳储量^[19],这与本研究中 M2 中枯落物层蓄积量最大,但土壤有机质含量并非最大的结果相一致。潘复静等^[11]前期研究表明,高密度马尾松林土壤有机碳和铵态氮含量显著高于低密度,而中密度类型下磷含量较高,受磷限制较弱,这与本研究中高密度下 M4 中有机质和全氮的含量最高,而中密度 M2 中土壤 pH、全磷、碱解氮和速效磷含量最高的结果相似。

枯落物依靠其自身孔隙大、表面粗糙程度大等特点,起到减小降雨对土壤表面溅蚀,减少地面径流和水土流失的作用,并减小地表水分的蒸发等,土壤通过土壤结构的调节,以及土壤孔隙度、持水性和土壤肥力的作用,土壤层与枯落物层相互影响,并受枯落物输入的调控^[20]。本研究中,枯落物蓄积量和养分储量与土壤粉粒、持水性、孔隙度、有机质、全磷和碱解氮呈显著正相关,与土壤容重和渗透性呈显著负相关,表明枯落物的输入对土壤结构的改善和肥力质量提升具有显著影响。葛晓改等^[21]研究表明,凋落物和根系输入能够显著改善土壤理化性质,这与本研究结果相一致。通过构建结构方程模型探讨枯落物输入对土壤理化性质及其对林分蓄积量的直接或间接影响,为进一步进行马尾松人工林养分循环和土壤肥力的提升提供理论依据^[22]。结构方程模型显示,林分密度与枯落物和土壤的理化性质间相关性并不显著,大量研究^[23-24]表明,林分枯落物和土壤理化性质及林分蓄积量随林分密度呈先增后减的趋势,森林通过密度调控措施达到林分对于光、热和土壤肥力等综

合利用,以此增加林分单株材积,维持生态系统中养分平衡和循环能力。土壤化学性质是影响各类物质在土壤中的转换、迁移、分解和富集、土壤肥力质量的重要因素^[5],土壤肥力质量的大小直接影响林木养分吸收和利用的多少^[25],而枯落物作为森林生态系统养分的重要来源,其养分储量越多所分解和释放的养分越少^[13],这与本研究中土壤化学性质对林分蓄积量具有显著正相关,枯落物养分储量对林分蓄积量具有显著负相关的结果相一致。此外,本研究仅对不同林分密度马尾松人工林凋落物输入对土壤理化性质的影响进行研究,而未涉及根系输入、凋落物养分的分解和释放过程,在接下来的研究中应该将凋落物—根系—土壤作为有机整体,探讨凋落物和根系输入后养分分解和利用的作用机理,并与土壤微生物相结合探讨土壤碳氮循环功能,以期更加深入了解马尾松人工林养分循环和利用过程,同时本研究结果为马尾松人工林营林措施的制定提供参考。

4 结论

(1)不同密度马尾松林枯落物层平均总蓄积量为 6.02 t/hm²,其中 M2 密度中总蓄积量、持水量和有效拦蓄量均处于最大水平,分别为 7.60, 10.54, 7.76 t/hm²,枯落物各层次均具有相似变化规律,呈现为 M2>M3>M4>M1。

(2)马尾松林枯落物(碳、氮、磷、钾)4 种元素总储存量均呈现 M2 显著高于其他密度, M1 中最小,且主要以有机碳为主,占总量的 96.98%。各密度中碳、氮、磷元素养分总储量均以半分解层最多平均占总体的 41.18%,钾元素养分储量以未分解层最多平均占总体的 61.48%。

(3)不同密度马尾松林土壤理化性质均具有显著差异($p<0.05$),其中土壤持水性、孔隙度、pH、全磷、碱解氮和速效磷均在 M2 中最大,有机质和全氮呈现 M4>M2>M3>M1,渗透性、全钾和速效钾在 M1 中最大,且随土层深度的增加土壤理化性质差异性减少,表明枯落物层对土壤表层理化性质影响较大,随土层深度增加其影响程度逐渐减弱。

(4)马尾松林枯落物总蓄积量对土壤理化性质均具有显著正相关,而持水性对土壤化学性质具有显著负相关,其中枯落物蓄积量和养分储量与土壤粉粒、持水性、孔隙度、有机质、全磷和碱解氮呈显著正相关。土壤化学性质对林分蓄积量具有显著正相关,而枯落物养分储量对林分蓄积量具有显著负相关。表明枯落物的输入对土壤理化性质的变化具有显著影

响,尤其在 M2 密度中通过枯落物大量输入,减少地表径流,增加土壤持水性和孔隙度,改善土壤质量,以此提高林分生产力。

参考文献:

- [1] Sileshi G W. The magnitude and spatial extent of influence of trees on soil properties and primary productivity in drylands[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 132 (9):1-14.
- [2] Chen H, Zhao X R, Lin Q M, et al. Spring watering interactively improves aboveground net primary productivity and soil microbial biomass in a semi-arid grassland of China[J]. *Catena*, 2020, 189(6):e104478.
- [3] Chen X L, Chen H Y H, Chen C, et al. Effects of plant diversity on soil carbon in diverse ecosystems: A global meta-analysis[J]. *Biological Reviews*, 2020, 95 (1): 167-183.
- [4] Bach E M, Baer S G, Meyer C K, et al. Soil texture affects soil microbial and structural recovery during grassland restoration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12):2182-2191.
- [5] Deiss L, Kleina G B, Moraes A, et al. Soil chemical properties under no-tillage as affected by agricultural trophic complexity[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(6):1090-1105.
- [6] Lyu M K, Li X J, Xie J S, et al. Root-microbial interaction accelerates soil nitrogen depletion but not soil carbon after increasing litter inputs to a coniferous forest [J]. *Plant and Soil*, 2019, 444(1):153-164.
- [7] Wu J J, Zhang D D, Chen Q, et al. Shifts in soil organic carbon dynamics under detritus input manipulations in a coniferous forest ecosystem in subtropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 126:1-10.
- [8] 赵晶晶,牛晓燕,程宇琪,等.我国森林凋落物分解研究进展[J]. *内蒙古林业科技*, 2017, 43(3):43-46.
- [9] 李婷婷,陆元昌,姜俊,等.马尾松人工林森林经营模式评价[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(1):164-171.
- [10] 吕倩,尹海锋,何朋俊,等.马尾松人工林目标树经营初期对土壤理化性质与植物多样性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(3):500-507.
- [11] 潘复静,陈英倩.种植密度对马尾松人工林土壤磷转化功能微生物与细菌群落结构的影响[J]. *生态学杂志* 2021, 40(5):1233-1243.
- [12] Tang J W, Cao R, Zhang R H, et al. Litterfall production, decomposition and nutrient use efficiency varies with tropical forest types in Xishuangbanna, SW China: A 10-year study[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2010, 212(14):271-288.
- [13] 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.
- [14] 邓艳,蒋忠诚,覃星铭,等.岩溶生态系统中不同植被枯落物对土壤理化性质的影响及岩溶效应[J]. *生态学报*, 2009, 29(6):3307-3315.
- [15] 蔡新民,丁新新,潘健,等.分形理论在土壤科学研究中的应用[J]. *防护林科技*, 2011(6):8-13.
- [16] Yavitt J B, Fahey T J, Sherman R E, et al. Lumbricid earthworm effects on incorporation of root and leaf litter into aggregates in a forest soil, New York State[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 125(2):261-273.
- [17] 聂泽旭,齐实,马曦瑶,等.华蓥市山区侧柏人工林土壤特性及水源涵养能力对林分密度的响应[J]. *地球与环境*, 2020, 48(3):318-326.
- [18] 袁亚玲.马尾松与阔叶树种混合凋落叶分解的酶活性特征[D].成都:四川农业大学,2018.
- [19] Fang Y T, Koba K, Makabe A, et al. Microbial denitrification dominates nitrate losses from forest ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(5): 1470-1474.
- [20] 王晓学,沈会涛,李叙勇,等.森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. *生态学报*, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [21] 葛晓改,黄志霖,程瑞梅,等.三峡库区马尾松人工林凋落物和根系输入对土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(12):3301-3308.
- [22] Zhu L Y, Wang X H, Chen F F, et al. Effects of the successive planting of *Eucalyptus urophylla* on the soil bacterial and fungal community structure, diversity, microbial biomass, and enzyme activity[J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(6):636-646.
- [23] 孙千惠,吴霞,王媚臻,等.林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(3):732-738.
- [24] 陈旋,颜培栋,零天旺,等.造林密度对马尾松优良家系人工林生长及直径分布的影响[J]. *广西林业科学*, 2020, 49(2):161-167.
- [25] Mccavour M J, Paré D, Messier C, et al. The role of aggregated forest harvest residue in soil fertility, plant growth, and pollination services[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(1):196-207.