

阔叶树种引入后马尾松人工林土壤水文物理性质研究

杜姣姣, 周运超, 白云星, 张薰元

(贵州大学 贵州省森林资源与环境研究中心/林学院 贵州省高原山地林木培育重点实验室, 贵阳 550025)

摘 要:为探究阔叶树种引入后马尾松人工林土壤水文物理性质,选择贵州省龙里林场马尾松纯林及引入阔叶树种(伯乐、桂南木莲、连香、深山含笑、油茶)后的马尾松混交林地为研究对象,采用环刀法、烘干法与室内浸泡法对林地土壤的水文物理性质进行了研究。结果表明:(1)不同林型土壤容重随土层的加深而增大,以马尾松+深山含笑(1.29 g/cm^3)林分类型下土壤容重最小,马尾松+连香(1.54 g/cm^3)林分类型下土壤容重最大。(2)土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤最大持水量、毛管持水量与田间持水量均随着土层的增大而减小,这与土壤孔隙度和持水量呈显著正相关表现一致。(3)与纯林相比,土壤容重、孔隙度和持水量均以深根性树种改善效果最好,其中马尾松+深山含笑最优,马尾松+油茶其次,马尾松+连香最差。从土壤水文物理角度考虑,在今后马尾松水土保持林的建设过程中引入凋落物易分解的深根性树种有助于土壤结构的改良,使林分更好地发挥其土壤水文调节的能力,同时应尽量避免引入浅根性树种。

关键词:马尾松;阔叶树;土壤水文物理;坐标综合评价

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0105-08

Research of Soil Hydrophysical Properties of *Pinus Massoniana* Plantation After the Introduction of Broad-Leaved Tree Species

DU Jiaojiao, ZHOU Yunchao, BAI Yunxing, ZHANG Xunyuan

(Guizhou Key Laboratory of Plateau Mountain Forest Cultivation, Guizhou Provincial Forest

Resources and Environment Research Center/College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to explore the soil hydrophysical properties of *Pinus massoniana* plantation after the introduction of broad-leaved tree species, the *Pinus massoniana* pure forest and the mixed forest stands of *Pinus massoniana* after the introduction of broad-leaved tree species (*Bretschneidera sinensis*, *Manglietia guinanensis*, *Cercidiphyllum japonicum*, *Michelia maudiae*, *Camellia oleifera*) in Longli Forest Farm of Guizhou Province were selected as the research objects, and the forest soils characteristics and hydrological characteristics of the different stand types were studied quantitatively through by ring knife method, drying method and indoor soaking method. The results showed that: (1) the soil bulk density of different forest types increased with the depth of soil layer; the soil bulk density of *Pinus massoniana* and *Michelia maudiae* (1.29 g/cm^3) mixed forest was the smallest, and that of *Pinus massoniana* and *Cercidiphyllum japonicum* (1.54 g/cm^3) mixed forest was the largest; (2) soil total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity, soil maximum water holding capacity, capillary water holding capacity and field water holding capacity all decreased with the increase of soil layer, which was consistent with soil porosity and water holding capacity; (3) compared with the *Pinus massoniana* pure forest, the introduction of deep-rooted tree species had the positive influence on soil bulk density, porosity and water holding capacity; for example, *Pinus massoniana* and *Michelia maudiae* was the best, followed by *Pinus massoniana* and *Camellia oleifera* mixed forest, and the worst was *Pinus massoniana* and *Cercidiphyllum japonicum* mixed forest. From the perspective of soil hydrophysical characteristics, in the course of the future construction of *Pinus massoniana* soil and water

收稿日期:2020-08-13

修回日期:2020-09-29

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0600302;2017YFD0600304);贵州省一流学科建设项目(GNYL[2017]007);贵州省“百层次”培养计划项目(QKHRC[2015]4022);贵州省科技计划项目(QKHZC[2018]2305);贵州省人才团队项目(QKHPTRC20195614[2018]5261)

第一作者:杜姣姣(1997—),女,贵州铜仁人,硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:1135901007@qq.com

通信作者:周运超(1964—),男,贵州兴仁人,教授,博士研究生导师,主要从事森林土壤研究。E-mail:yc409@163.com

conservation forest, the introduction of deep root tree species with easy decomposition of litter can be preferred, which is helpful for the improvement of soil structure and the forest to better play its ability of soil hydrologic regulation, meanwhile, the introduction of shallow root tree species can be avoided as far as possible.

Keywords: *Pinus massoniana*; broadleaf tree; soil hydro-physics; coordinate comprehensive evaluation

森林土壤作为森林涵养水源的主体,其持水量可占总体涵养水量的 85% 以上,在调节水分循环方面发挥着重要作用^[1-2]。森林土壤的水文物理性质是森林水源涵养功能的重要评价指标,其主要体现在涵蓄降雨、阻延径流和防洪减灾等方面^[3]。森林土壤的水文物理性质普遍存在时空异质性和环境异质性^[4],其影响因素主要包括地形地貌、土壤特征、降雨差异和植被类型。对于人工林生态系统而言,营林措施会改变林分空间结构和环境因子,造成土壤涵养水源能力发生改变^[5]。因此,探究人工林土壤的水文物理效应对于森林涵养水源功能的提升与调控手段具有重要意义。

土壤容重与孔隙度是土壤物理特性的重要指标,容重大小是土壤质地、结构和孔隙等物理性状的综合表现,而孔隙度能够反映土壤通透程度,其中毛管孔隙和非毛管孔隙分别使土壤具有储水性能和透水性能^[6]。植被是土壤物理—水文效应的主要调节者^[7],通常混交林比单一树种林分具有更高的土壤生态功能^[8]。阔叶林地表枯落物含量分解速率通常大于针叶林,针阔混交林有利于凋落物的分解和养分释放,能够改善针叶林地力衰退并提高土壤水源涵养能力^[9-10]。例如,针阔混交林能降低土壤容重并提高土壤孔隙度,从而直接影响土壤最大持水量,有效持水量和土壤渗透速率,其土壤拒水性显著低于纯林^[11-13]。然而,不同树种间存在生物特性和林分结构差异^[14-15],物质周转和养分归还能力对不同植被响应也有所不同,导致营造针—阔混交林对于土壤水文物理性质可能存在正效应或负效应^[16]。因此,充分认知和定量评价不同类型针—阔林分的水文物理性质,对针叶林阔叶化经营和水资源的科学管理与应用具有重要意义。

马尾松(*Pinus massoniana*)是中国特有乡土树种,其适应能力强,耐干旱,是南方荒山绿化造林的主要树种,面积高达 $1.13 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[17]。经过十多年的退耕还林治理,我国南方已形成以马尾松人工林为主的水土流失初步治理区,但马尾松纯林林分结构单一且生物多样性较差,其林下水土流失仍较为严重^[18]。马尾松人工纯林所引起的土壤退化已成为中国南方最严重的退化生态问题之一^[19-20]。如何通过林分改造提高马尾松人工林水源涵养功能成为当前亟需解决的问题。据报道,针叶人工林补植阔叶树种能显著改善土壤衰退现象^[21],但其机理尚未得到充分认知,且不

同阔叶树种间所带来的土壤水文物理效应差异尚未得到评估,因此,筛选适宜林分补植的阔叶树种显得尤为重要。基于此,本研究拟解决以下科学问题:(1) 马尾松人工林土壤物理及水文效应如何响应不同阔叶树种的引入;(2) 在马尾松人工林阔叶化改造中,如何选择树种以达到提升土壤蓄水保墒的目的。

1 研究区概况

研究区位于贵州省龙里林场,地理位置为北纬 $26^{\circ}22' - 26^{\circ}45'$,东经 $106^{\circ}45' - 107^{\circ}11'$,处于苗岭山脉中段,长江流域乌江水系与珠江流域红水河水系的分水岭,乌江三级支流三元河从林区流过,地势西北高、东南低,属中亚热带季风湿润气候,年均气温 14.8°C ,极端最高气温 33.2°C ,最低气温 -8.5°C ,降水量 $1\,089.3 \text{ mm}$,相对湿度 77%。龙里林场成土母岩主要为砂页岩。土壤以黄壤为主,另有少量黄棕壤。pH 值为 5.5~6.5,呈微酸性。

供试马尾松林分为 1957 年造林,于 2004 年对马尾林进行带状采伐后采用随机套种模式引入伯乐(*Bretschneidera sinensis*)、桂南木莲(*Manglietia chin-gii*)、连香(*Cercidiphyllum japonicum*)、深山含笑(*Mich-elia maudiae*)和油茶(*Camellia oleifera*)5 种树种形成针阔混交林,同时以未改造的马尾松纯林为对照,在所有林分生长期均未进行施肥和抚育措施。2019 年 11 月在上述 5 种混交林和马尾松纯林样地内各设置 3 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 标准样地,样地基本情况见表 1。

2 材料与方法

2.1 样地设置与样品采集

于 2019 年 11 月在各林分的标准样地内采集凋落物和土壤样品。在每个样地顺坡上、中、下各设置 1 个 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 小样方,先收集地表凋落物,再选取代表性样点,采用剖面法在每个样地挖取 3 个土壤剖面,剖面点位于马尾松与补植树种 1.2 m 的相交处,用环刀法采集 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm 土壤样品。另在各采样点分层采集土壤样品,同一样方的同一土层充分混匀后取 1 000 g 作混合样,带回实验室内测定土壤理化性质,凋落物带回实验室 65°C 烘干至恒重并称重,计算凋落物储量。

表 1 研究区基本特征

林分 类型	树高/m		胸径/cm		密度/ (棵·hm ⁻²)	混交 比例	坡度/ (°)	坡向	凋落物总储量/ (t·hm ⁻²)	有机碳含量/ (g·kg ⁻¹)	混交树种 叶材质
	马尾松	混交树种	马尾松	混交树种							
马尾松纯林	28.68		32.98		750		19	西北	7.73	14.34	
马尾松+伯乐	29.22	8.93	36.45	9.62	733	7:3	23	西北	8.03	14.07	革质
马尾松+桂南木莲	28.07	13.53	47.27	15.24	708	7:3	26	东北	8.62	11	革质
马尾松+连香	30.66	9.88	44.84	10.89	710	7:3	15	东	6.94	13.42	纸质
马尾松+深山含笑	29.04	6.59	44.73	13.74	750	7:3	27	东南	7.17	27.38	革质
马尾松+油茶	30.82	2.49	39.79	4.97	775	7:3	18	西南	6.34	17.58	革质

注:表中有有机碳数据表示 0—100 cm 土层有机碳均值。

2.2 土壤理化性质和持水性能测定

土壤有机碳测定采用重铬酸钾消解—硫酸亚铁铵滴定法;土壤容重、土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量和田间持水量采用环刀法(环刀体积为 100 cm³)和浸水法测定;先通过浸水法测定出土壤持水量,再利用持水量值通过相关公式计算出土壤孔隙度值^[22]。水文物理公式如下:

$$W_t = \frac{m_1 - m}{m} \tag{1}$$

$$W_c = \frac{m_2 - m}{m} \tag{2}$$

$$W_o = \frac{m_3 - m}{m} \tag{3}$$

$$P_2 = 0.1 \times (W_t - W_c) \times \rho_2 / \rho_1 \times 100\% \tag{4}$$

$$P_3 = 0.1 \times W_c \times \rho_2 / \rho_1 \times 100\% \tag{5}$$

$$P_1 = P_2 + P_3 \tag{6}$$

$$\rho_2 = m / V \tag{7}$$

式中:W_t为最大持水量(g/kg);W_c为毛管持水量(g/kg);W_o为田间持水量(g/kg);P₁为总孔隙度(%);P₂为非毛管孔隙度(%);P₃为毛管孔隙度(%);m 为环刀内干土质量(g);m₁为浸润 12 h 后环刀内湿土质量(g);m₂为在干砂上搁置 2 h 后环刀内湿土质量(g);m₃为在干砂上放置 3 天后环刀内湿土质量(g);V 为环刀体积(cm³);ρ₁为水的密度(1.0 g/cm³);ρ₂为土壤密度(g/cm³)。

2.3 土壤水文物理能力综合评价

本文采用坐标综合评定法基于多维空间理论,将评定对象看作由多向量所决定的空间点,以各点与最佳点的距离对各点进行比较,对多个不同量纲指标进行综合评价^[23]。采用此方法评价土壤水文物理性质基本步骤为:(1) 列出原始数据表,以 s_{ij} 表示,其中 i 表示不同植被类型,j 表示不同指标;(2) 采用公式(8)将其与每一指标中的最优者 m_j 作比较,组成相对值 d_{ij} 矩阵坐标;(3) 采用公式(9)计算第 i 个处理到标准点的距离;(4) 采用公式(10)求各处理到标准点距离之和 M;最后按 M 值由小到大进行排序,以综合值小者为最优。

$$d_{ij} = s_{ij} / m_j \tag{8}$$

$$P_i = \sqrt{(1 - d_{ij})^2} \tag{9}$$

$$M = \sum_{i=1}^n P_i \tag{10}$$

式中:d_{ij}为原始数据的相对值;s_{ij}为原始数据;m_j为每个指标中的最优值;P_i为第 i 个处理到标准点的距离。

2.4 数据处理

采用单因素方差(One-way ANOVA)分析其土壤容重、孔隙度、持水性能的变化,并进行 LSD 多重差异性检验,土壤物理及持水指标的相关分析采用相关性分析法。图表制作采用 Excel 2019 和 SPSS 22.0 统计软件完成。

3 结果与分析

3.1 不同阔叶树种引入后土壤物理性质变化

3.1.1 土壤容重的变化 土壤容重大小是土壤质地、结构、孔隙等物理性状的综合反映。从图 1 可以看出,6 种林分类型下土壤容重均随土层深度的加深呈增加趋势,从表层土壤容重来看,土壤容重大小为马尾松+连香(1.40 g/cm³)>马尾松纯林(1.36 g/cm³)>马尾松+木莲(1.27 g/cm³)>马尾松+伯乐(1.23 g/cm³)>马尾松+油茶(1.21 g/cm³)=马尾松+深山含笑(1.21 g/cm³)。各林分表层土壤容重均小于其余土层,以连香林分下土壤容重最大,土壤较为紧实。0—100 cm 土层容重依次为马尾松+连香(1.54/g/cm³)>马尾松纯林(1.52 g/cm³)>马尾松+木莲(1.51 g/cm³)>马尾松+伯乐(1.50 g/cm³)>马尾松+油茶(1.38 g/cm³)>马尾松+深山含笑(1.29 g/cm³),以深山含笑林分下土壤容重最小,土壤较为松散。

3.1.2 土壤孔隙特征 林地土壤的孔隙状况是评价土壤通透性的重要指标,土壤孔隙的大小直接影响到土壤中的水分状况。由表 2 可知,在 0—100 cm 土层中,各林型土壤总孔隙度均值为 41.57%~54.09%,依次为马尾松+深山含笑>马尾松+油茶>马尾松纯林>马尾松+木莲>马尾松+伯乐>马尾松+连香。平均土壤毛管孔隙度随土层深度变化趋势及各林型大小状况与总孔隙度表现一致,总均值大小为 38.56%~49.05%。与

纯林相比较,马尾松+深山含笑林分类型表现最为突出。平均土壤毛管孔隙度随土层深度变化趋势及各林型大小状况与总孔隙度表现一致,总均值大小为38.56%~49.05%。非毛管孔隙主要是通气孔隙,可反映土壤通气状况。不同林分类型非毛管孔隙表现出随土

层深度的增加而减小的规律,其大小表现为马尾松+深山含笑>马尾松纯林>马尾松+油茶>马尾松+木莲>马尾松+伯乐>马尾松+连香,说明深山含笑引入后土壤较其他几种林地土壤具有较高的通气性能,有利于植被的生长和土壤内气体的交换。

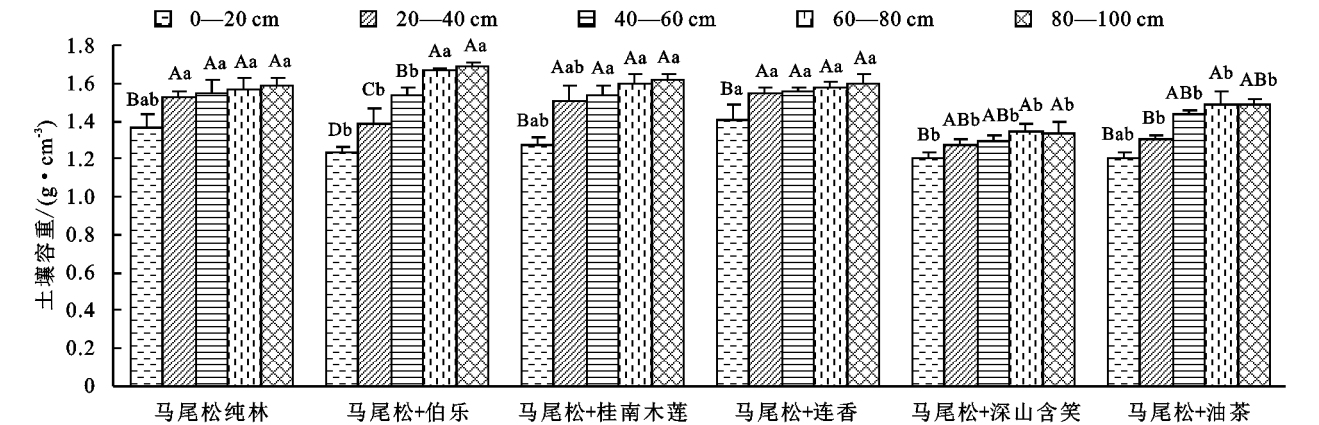


图 1 不同林分下土壤容重的变化

表 2 不同阔叶树种引入后土壤孔隙特征

林分类型	土层深度/cm	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	总孔隙度/%
马尾松纯林	0—20	5.55±1.49Ab	44.98±0.93Abc	50.53±1.49Abc
	20—40	3.23±0.55Bb	39.94±1.40Bb	43.17±1.28Bc
	40—60	3.33±0.57Bb	39.51±0.38Bb	42.84±0.73Bc
	60—80	2.90±0.51Bb	41.81±2.14ABb	44.71±2.55Bb
	80—100	2.69±0.32Bab	42.42±5.28ABa	45.10±4.69Bab
	均值	3.54±0.69	41.73±2.01	45.27±2.20
	0—20	4.47±0.32Ab	49.57±1.07Ad	54.04±1.08Ab
马尾松+伯乐	20—40	2.92±0.55Bb	45.04±3.38Ac	47.96±3.82Bbc
	40—60	3.25±1.10Bb	36.30±1.58Bb	39.55±0.94Cc
	60—80	2.38±0.11Bb	34.26±1.32Bc	36.64±1.23Cc
	80—100	2.57±0.39Bb	36.71±1.69Bb	39.29±1.77Cb
	均值	3.12±0.50	40.38±1.90	43.49±1.77
	0—20	5.74±0.84Ab	49.34±0.83Ab	55.08±1.04Ab
	20—40	3.51±1.06Bb	40.42±1.88Bb	43.93±2.94Bc
马尾松+木莲	40—60	3.18±1.21BCb	38.90±1.36Bd	42.08±2.32BCb
	60—80	2.01±0.70Cb	38.15±1.65Bc	40.16±2.27Cc
	80—100	2.25±0.72Cb	38.14±0.16Bb	40.39±0.79Cb
	均值	3.34±0.90	40.99±1.17	44.33±1.87
	0—20	4.49±0.56Ab	42.70±3.66Ac	47.19±4.18ABc
	20—40	2.75±0.69Bb	39.33±1.81ABd	42.08±1.12Bc
	40—60	2.75±0.18Cb	37.72±1.08Bd	40.47±1.08Bb
马尾松+连香	60—80	2.59±0.23Cb	36.99±1.01Bc	39.58±0.95Cc
	80—100	2.45±0.09Cb	36.07±1.83Bb	38.52±1.83Db
	均值	3.01±0.35	38.56±1.88	41.57±1.83
	0—20	7.42±1.16Aab	55.19±1.28Aa	62.61±0.79Aa
	20—40	5.69±0.92Aa	51.51±1.59ABa	57.19±1.37Ba
	40—60	4.81±1.06Ba	48.89±1.45Ba	53.71±1.77BCa
	60—80	3.95±0.79Bab	46.38±1.97Ba	50.33±1.72Ca
马尾松+深山含笑	80—100	3.31±0.18Ba	43.29±1.62Ca	46.60±1.61Ca
	均值	5.04±0.80	49.05±1.58	54.09±1.45
	0—20	5.02±0.32Ab	53.14±1.09Ab	58.16±0.77Aab
	20—40	3.58±0.44Bb	47.78±2.19Ba	51.37±2.06Bb
	40—60	3.22±0.42BCb	44.61±0.76Cb	47.84±0.36Cc
	60—80	2.91±0.43BCab	42.32±0.43Cb	45.23±0.83Cb
	80—100	2.38±0.13Cb	39.67±0.90Db	42.05±0.78Cb
马尾松+油茶	均值	3.42±0.35	45.51±1.07	48.93±0.96

注:表中数据为平均值±标准差;大写字母表示同一林分不同土层土壤指标的均值差异显著性;小写字母表示不同林分类型间同一土层土壤指标的均值差异显著性($p=0.05$),下同。

3.2 不同阔叶树种引入后土壤持水量变化

土壤持水性能是评价不同植被土壤涵养水源、调节水循环的重要指标,它反映了土壤持水、供水与调蓄能力,可用来评价土壤层的水文功能,包括最大持水量、毛管持水量和田间持水量。由表 3 可见,阔叶树种引入后对最大持水量存在显著差异($p<0.05$),各林型最大持水量表现为随土层加深呈大致递减趋势,0—100 cm 最大持水量大小依次为马尾松+深山含笑

笑>马尾松+油茶>马尾松+木莲>马尾松+伯乐>马尾松纯林>马尾松+连香。除连香树种外,其余林分表层最大持水量均大于纯林,深山含笑树种下各个土层最大持水量均大于其余林分各土层。土壤毛管持水量均值在 26.44%~42.33%,其变化趋势与最大持水量一致。田间持水量均值在 25.54%~40.59%,大小依次为马尾松+深山含笑>马尾松+油茶>马尾松+伯乐>马尾松+木莲>马尾松纯林>马尾松+连香。

表 3 不同阔叶树种引入后土壤持水量的变化

林分类型	土层深度/cm	最大持水量/%	毛管持水量/%	田间持水量/%
马尾松纯林	0—20	39.00±4.50Abc	35.02±3.70Abc	33.52±3.24Ac
	20—40	29.00±1.68Cb	27.04±1.44Cb	25.97±1.56Dc
	40—60	28.96±2.38Cbc	26.74±1.94Cc	25.47±1.31Dc
	60—80	29.87±3.33Bbc	27.99±2.82Cbc	27.07±2.67Cb
	80—100	30.74±4.37Bbc	28.30±4.32Bbc	27.72±4.33Bb
	均值	31.51±3.25	29.02±2.84	27.94±2.62
马尾松+伯乐	0—20	46.98±2.54Ab	43.08±2.28Ab	41.84±2.19ABb
	20—40	37.01±6.37Bab	34.90±5.99ABab	33.65±5.94ABb
	40—60	27.41±2.40Bbc	24.86±1.85ABc	23.44±1.63Ac
	60—80	22.66±0.82Cc	21.17±0.89Bc	20.57±1.05Bc
	80—100	24.46±1.54Cc	22.85±1.51Ac	22.34±1.58Cc
	均值	31.70±2.74	29.37±2.51	28.37±2.48
马尾松+木莲	0—20	45.16±4.42Ab	40.31±2.90Aab	39.25±2.04Abc
	20—40	29.30±4.77Bb	27.30±4.90Ab	26.37±3.82Ac
	40—60	28.95±3.87Bbc	26.25±1.92Ac	25.25±1.82Ac
	60—80	27.14±3.59Bc	25.31±2.45Bc	24.43±2.64Bbc
	80—100	28.30±2.18Bbc	26.44±1.72Abc	25.45±1.72Abc
	均值	31.77±3.76	29.12±2.62	28.15±2.41
马尾松+连香	0—20	33.52±5.58Ac	30.13±5.21ACc	29.78±4.96Ac
	20—40	26.27±2.54Bb	24.81±2.61Cb	23.97±2.50Cc
	40—60	25.92±1.62Bc	24.20±1.59Cc	23.76±2.01Cc
	60—80	28.20±0.85Bbc	26.16±0.95bBc	25.10±0.67Bbc
	80—100	28.59±2.98ABbc	26.92±2.90Bbc	25.13±0.26Bbc
	均值	28.50±2.77	26.44±2.65	25.55±1.98
马尾松+深山含笑	0—20	56.89±6.31Aa	50.77±4.95Aa	49.44±0.75Aa
	20—40	44.48±7.32ABa	39.36±7.50Aa	39.23±1.87ABa
	40—60	47.43±12.67ABa	41.19±9.55Aa	38.04±5.47ABa
	60—80	41.43±3.11Ba	38.42±3.36Ba	36.91±2.68Ba
	80—100	44.68±1.50ABa	41.92±1.23ABa	37.58±5.87Ba
	均值	46.98±6.18	42.33±5.32	40.28±2.21
马尾松+油茶	0—20	46.94±4.77Ab	43.45±4.93Aab	42.71±4.84Ab
	20—40	41.50±2.01ABa	39.10±1.28Aa	37.89±1.36ABab
	40—60	35.94±1.20Bb	33.89±0.99Ab	33.39±0.70Ab
	60—80	34.05±7.42Bb	31.78±7.04ABb	31.19±6.75Ba
	80—100	34.53±2.54Bb	30.74±1.67ABb	29.22±1.30Bab
	均值	38.59±3.59	35.79±3.22	34.88±3.01

3.3 不同阔叶树种引入后土壤水文物理指标相关性分析

从表 4 可以看出,不同林分下土壤持水量、孔隙度均

与土壤容重呈极显著负相关($p<0.01$),土壤最大持水量、毛管持水量和田间持水量与土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度的相关关系达到极显著水平($p<0.01$)。

表 4 阔叶树种引入后土壤水文物理指标相关性

项目	非毛管孔隙度	毛管孔隙度	总孔隙度	最大持水量	毛管持水量	田间持水量
容重	1					
非毛管孔隙度	−0.767**	1				
毛管孔隙度	−0.873**	0.654**	1			
总孔隙度	−0.901**	0.759**	0.989**	1		
最大持水量	−0.958**	0.821**	0.936**	0.967**	1	
毛管持水量	−0.950**	0.773**	0.954**	0.972**	0.996**	1
田间持水量	−0.945**	0.750**	0.958**	0.972**	0.987**	0.991**

注:**表示在 $p<0.01$ 水平达到显著差异。

3.4 不同阔叶树种引入后土壤水文物理能力综合评价

由表 5 可知,根据坐标综合评定法(p 值表示综合评定值), p 值越小,说明土壤物理性质和持水性能越好,选择土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤持水量等,总计 7 项指标,对土壤水文物理性质进行综合评价。土壤物理性质大小排序为马尾松+深山含笑>马尾松+油茶>马尾松纯林>马尾松+木

莲>马尾松+伯乐>马尾松+连香;不同林型土壤持水能力表现为马尾松+深山含笑>马尾松+油茶>马尾松+木莲>马尾松+伯乐>马尾松纯林>马尾松+连香。综合评价大小排序为马尾松+深山含笑>马尾松+油茶>马尾松纯林>马尾松+木莲>马尾松+伯乐>马尾松+连香。

表 5 不同阔叶树种引入后土壤水文物理性质综合评价

林分类型	土壤物理性能		土壤持水能力		综合评价	
	M ₁	排序	M ₁	排序	M ₁	排序
马尾松纯林	0.791	3	0.955	5	1.746	3
马尾松+伯乐	0.917	5	0.933	3	1.849	5
马尾松+木莲	0.856	4	0.942	4	1.798	4
马尾松+连香	1.045	6	1.139	6	2.185	6
马尾松+深山含笑	0	1	0	1	0	1
马尾松+油茶	0.560	2	0.473	2	1.034	2

注:M₁代表所测土壤物理指标的综合评价,M₂代表所测土壤持水量指标的综合评价,M₃代表土壤水文物理调节功能的评价结果。

4 讨论

4.1 不同阔叶树种的引入后对马尾松人工林土壤水文物理性质的响应

不同造林树种间生物学特性差异影响着林木根系生长与凋落物分解,造成不同林分间土壤有机质输入的差异,最终影响土壤水文物理性质^[24]。土壤毛管孔隙中的水分是土壤水分的主要贮存场所,可近似认为土壤在枯水季节的贮水量,田间持水量则反映土壤保水能力,其大小与土壤孔隙数量和组成有密切关系^[25]。

本研究表明,不同树种引入后 0—100 cm 深度的土壤容重随土层加深而增大,孔隙度则随土壤加深而减小,这与孙艳红等^[26]对森林土壤物理性质的研究一致,其中土壤总孔隙度变化范围与鲁绍伟等^[27]对森林生态系统土壤总孔隙度范围为 40%~60%的研究结果相一致。引入深山含笑、油茶、木莲和伯乐树

种后土壤毛管持水量和田间持水量分别为 29.12%~42.33%和 28.15%~40.28%,其持水能力均大于纯林,说明林分改造后土壤的透气透水性能有所改善,利于土壤蓄水保墒和植被良好发育,有效发挥植被的水文生态效益。一方面这可能是由于凋落物的硬度和形态等属性通过影响土壤微生物活动、淋溶作用等制约着凋落物分解形成有机碳^[28],有机碳又结合土壤颗粒促进了土壤团粒结构的形成^[29-30],影响土壤孔隙状况(表 1)。由于革质叶分解速率大于针叶^[31],凋落物混合后促进其分解,使得凋落物周转速度快,促进养分释放,适宜更多土壤动物或微生物生活,促进了土壤孔隙的产生,加上根系分布的表聚性,使得表层土壤水文调节能力强^[32-34];另一方面由于深山含笑和油茶属于深根性树种^[35],根系通过穿插、挤压改善深层土壤结构,深层根系分泌物及根系周转产生的碎屑为土壤提供了丰富的有机质来源,有利于土壤孔隙

的形成^[36]。而连香属于浅根性树种^[37],其粗根大量位于土壤表层,而能够改善土壤理化性质并提高抵抗水分侵入和降水击溅能力的主要为细根^[38-39],粗根对土壤的固持作用不及细根,因此,导致表层土壤结构改善反而不及其余树种,其次由于凋落物储量低,在降雨时表层土壤缺乏地被物保护,造成其凋落物层未能有效地减低雨水溅蚀土壤^[40],造成土壤结构破坏使得土壤水文调节性能大大降低。

4.2 马尾松人工林阔叶化改造中树种的选择

马尾松人工林是我国南方地区分布最广的森林类型,在20世纪80年代初马尾松分布面积就已占全国森林面积的14.9%^[41]。然而,随着马尾松造林面积的迅速扩大,单一纯林经营模式的弊端逐渐显露,有近1/4马尾松群落存在严重的林下水土流失和不同程度的退化^[42],而阔叶树种的引入被逐渐用于改善人工林土壤水文的生产实践中^[21]。不同树种由于凋落物储量及其构成、树木根系生长发育和凋落物分解速率等差异,造成土壤持水能力等物理性质会有所变化^[24],本研究针对马尾松人工林引入了5种阔叶树种进行改造,其研究结果表明了树种差异会影响土壤水文物理性质,但并非所有阔叶树种都适合引入改造。从土壤物理及水文效应而言,连香凋落物松软易分解导致表层有机碳含量高,但由于其浅根性导致土壤表层物理性质改善并不明显,而深山含笑树种由于其深根性能够从整体改善土壤物理性质,更适合作为马尾松人工林的引种对象,油茶次之。本文通过坐标评价法(表5)对不同阔叶树种下的土壤水文物理性质进行分析,也更好地印证了引入此树种后更利于改善土壤物理性质及持水能力,同时说明了并不是所有针阔混交都能较好地改善土壤水文物理性质。因此,对于南方地区以马尾松人工林为主的水源涵养林来说,引入深根性且凋落物松软易分解的树种能够更好地改善林地土壤的物理结构,增加土壤孔隙度,提高土壤的持水能力,在造林时可作为优选配置,促进马尾松林水土保持效益的发挥。

5 结论

(1) 马尾松人工林不同阔叶树种引入后0—100 cm土层土壤物理性质表现为深山含笑树种下最好,连香树种下最差;土壤容重随着土层加深逐渐减小,其规律与土壤孔隙及有机碳规律相反。

(2) 在持水能力方面,土壤最大持水量、毛管持水量和田间持水量均随土层的增大而呈逐渐降低趋势,这与土壤孔隙度呈显著正相关表现一致。就表层土壤而言,土壤各持水量表现为马尾松+深山含笑>

马尾松+油茶>马尾松+伯乐>马尾松+木莲>马尾松纯林>马尾松+连香;0—100 cm土层最大持水量表现为马尾松+深山含笑>马尾松+油茶>马尾松+木莲>马尾松+伯乐>马尾松纯林>马尾松+连香,土壤毛管持水量与田间持水量与表层土壤持水量表现一致。

(3) 马尾松人工林不同阔叶树改造后经坐标综合评定结果排序为:马尾松+深山含笑(0)>马尾松+油茶(1.034)>马尾松纯林(1.746)>马尾松+木莲(1.798)>马尾松+伯乐(1.849)>马尾松+连香(2.185),由此可见不同阔叶引入对马尾松人工林对土壤水文物理性质影响有所不同,在今后以蓄水保墒为目的的马尾松人工林阔叶化改造树种建议选择凋落物周转速度快且深根性的树种。

参考文献:

- [1] Andréassian V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 291(1/2): 1-27.
- [2] Jin M, Zhang R, Sun L, et al. Temporal and spatial soil water management: a case study in the Heilonggang region, PR China[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 42(2): 173-187.
- [3] 陈东立, 余新晓, 廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析[J]. *世界林业研究*, 2005, 18(1): 49-54.
- [4] 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.
- [5] Poirier V, Coyea M R, Angers D A, et al. Silvicultural treatments and subsequent vegetation impact long-term mineral soil biogeochemistry in mixedwood plantations[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 368, 140-150.
- [6] 田大伦, 陈书军. 樟树人工林土壤水文—物理性质特征分析[J]. *中南林业学院学报*, 2005, 25(2): 1-6.
- [7] Jia Y H, Shao M A. Temporal stability of soil water storage under four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117, 33-42.
- [8] Mina M, Huber M O, Forrester D I, et al. Multiple factors modulate tree growth complementarity in central European mixed forests[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 106(3): 1106-1119.
- [9] 李贵祥, 孟广涛, 方向京, 等. 珠江源头区几种主要林分类型下土壤的水分涵养功能研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 34-36.
- [10] 公博, 师忱, 何会宾, 等. 冀北山区6种人工林的林地水源涵养能力[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(3): 167-172.
- [11] Rivero R G, Grunwald S, Osborne T Z, et al. Charac-

- terization of the spatial distribution of soil properties in water conservation area 2A, everglades, florida [J]. Soil Science, 2007, 172(2): 149-166.
- [12] Alanís N, Hernández-Madriral V M, Cerda A, et al. Spatial gradients of intensity and persistence of soil water repellency under different forest types in central Mexico[J]. Land Degrad, 2016, 28(1): 317-327.
- [13] 杨良辰, 张春茹. 沿坝地区 3 种典型林分类型枯落物层与土壤层水源涵养能力综合评价[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 177-182.
- [14] Dietz J, Hlscher D, Leuschner C, et al. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 237(1): 170-178.
- [15] 刘凯, 贺康宁, 田赞, 等. 青海高寒山区 5 种林分的土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 141-146.
- [16] 陈文静, 祁凯斌, 黄俊胜, 等. 川西不同树种人工林对土壤涵水能力的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 4998-5006.
- [17] 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.
- [18] 颜耀. 套种阔叶树种对红壤侵蚀区马尾松林生态功能的提升效果[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [19] Chen F, Zheng H, Zhang K, et al. Changes in soil microbial community structure and metabolic activity following conversion from native *Pinus massoniana* plantations to exotic *Eucalyptus* plantations [J]. Forest Ecology & Management, 2013, 291: 65-72.
- [20] Wang H, Liu S, Wang J, et al. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China[J]. Forest Ecology & Management, 2013, 300: 4-13.
- [21] 罗达, 唐敬超, 刘世荣, 等. 南亚热带乡土树种人工纯林及混交林土壤微生物群落结构[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2543-2550.
- [22] 中国林业科学研究院. 森林土壤水分—物理性质的测定 LY/T1215—1999[S]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [23] 王正安, 邸利, 王彦辉, 等. 六盘山叠叠沟小流域 4 种植被土壤层水文调节功能的综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(11): 184-190.
- [24] 朱万泽, 盛哲良, 舒树森. 川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 205-212.
- [25] 韩路, 王海珍, 于军. 塔里木河上游不同植被类型土壤水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 124-129.
- [26] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 106-109.
- [27] 鲁绍伟, 毛富玲, 靳芳, 等. 中国森林生态系统水源涵养功能[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 223-226.
- [28] 何帆, 王得祥, 雷瑞德, 等. 秦岭林区主要树种叶片凋落物性质的研究[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(4): 35-38.
- [29] 庞学勇, 刘世全, 刘庆, 等. 川西亚高山人工云杉林地有机物和养分库的退化与调控[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 126-133.
- [30] 程欢, 程一伦, 宫渊波, 等. 川西北高山/亚高山区 6 种典型土壤类型水文效应[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(2): 225-231.
- [31] 杨曾奖, 曾杰, 徐大平, 等. 森林枯枝落叶分解及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2007, 16(2): 649-654.
- [32] 袁军, 谭晓风, 袁德义, 等. 油茶根系分布规律调查研究[J]. 浙江林业科技, 2009, 29(4): 33-35.
- [33] 乔琦, 秦新生, 邢福武, 等. 珍稀植物伯乐树一年生更新幼苗的死亡原因和保育策略[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 224-231.
- [34] 廖乐平. 亚热带木兰科、樟科 10 个树种细根形态与功能特性研究及其亲缘关系分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- [35] 周东雄. 杉木深山含笑混交林土壤肥力的研究[J]. 福建林学院学报, 1994, 14(3): 220-224.
- [36] 王大力, 尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 869-874.
- [37] 王小平, 肖肖, 王新悦, 等. 连香树人工林细根生物量分布及根系分泌速率季节变化研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(12): 152-156.
- [38] 邢会文. 4 种植物根—土界面摩阻特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [39] 白云星, 周运超. 马尾松人工林根系对近自然经营措施的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(11): 1-6.
- [40] 张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2005, 26(11): 3685-3695.
- [41] 何圣嘉, 谢锦升, 杨智杰, 等. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 65-70.
- [42] 莫江明, 彭少麟, Brown S, 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.