

不同密度飞播马尾松林凋落物及土壤持水性能比较分析

褚欣, 潘萍, 郭丽玲, 宁金魁, 欧阳勋志, 吴自荣

(江西农业大学 林学院, 江西 南昌 330045)

摘要: 根据飞播马尾松 *Pinus massoniana* 林的林木密度, 将林分分为 I 组(900~1 500 株·hm⁻²), II 组(1 500~2 100 株·hm⁻²), III 组(2 100~2 700 株·hm⁻²), IV 组(2 700~3 300 株·hm⁻²)等 4 个密度组, 并分别各密度组设立标准地调查和样品测定, 分析比较其凋落物和土壤的持水性能。结果表明: ①各密度组凋落物储存量都表现为半分解层大于未分解层, 凋落物总储存量、最大持水量和有效拦蓄量均为密度组 II > 密度组 III > 密度组 I > 密度组 IV, 最大值分别为 4.26, 11.55 和 9.79 t·hm⁻², 且密度组 II 的最大持水量和有效拦蓄量均显著高于其余密度组($P < 0.05$), 凋落物总储存量各密度组间无显著差异($P > 0.05$)。②土壤非毛管持水量、毛管持水量和最大持水量的范围分别是 332.62~628.93, 2 210.17~2 859.98 和 3 792.45~3 984.91 t·hm⁻², 均表现为密度组 II > 密度组 III > 密度组 I > 密度组 IV, 但各密度组间无显著差异($P > 0.05$)。综合分析表明: 飞播马尾松林密度为 1 500~2 100 株·hm⁻² 时, 凋落物和土壤的持水性能最好。图 2 表 3 参 24

关键词: 森林生态学; 马尾松林; 林分密度; 凋落物; 土壤; 持水性能

中图分类号: S715 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2017)05-0808-08

Comparing water-holding capacity in forest litter and soils for an aerially seeded *Pinus massoniana* plantation with different stand densities

CHU Xin, PAN Ping, GUO Liling, NING Jinkui, OUYANG Xunzhi, WU Zirong

(College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China)

Abstract: In order to provide guidelines for making effective measures to improve water-holding capacity for an aerially seeded *Pinus massoniana* plantation, this research was conducted to compare water-holding capacity of forest litter and soils with method of one-way ANOVA test in different stand densities. Four groups [Group I (900–1 500 culm·hm⁻²), Group II (1 500–2 100 culm·hm⁻²), Group III (2 100–2 700 culm·hm⁻²), and Group IV (2 700–3 300 culm·hm⁻²)], were set up according to aerially-seeded *Pinus massoniana* forest density. Sample-plot surveys and sample determination were carried out for a fixed 20 m × 20 m standard plot which selected with three replications in each group. Results showed that, (1) the litter storage capacity for each density group in the half-decomposed litter layer was higher than the undecomposed layer. Total storage capacity for litter, maximum water-holding capacity, and effective water-holding capacity of the Group II were the largest, respectively up to 4.26 t·hm⁻², 11.55 t·hm⁻², 9.79 t·hm⁻², and were in the order of density Group II > Group III > Group I > Group IV compared with other groups. The maximum water-holding capacity and effective water-holding capacity of density Group II were significantly higher than those of the other density groups ($P < 0.05$); however, the total storage capacity of litter in each density group was not significantly different ($P > 0.05$). (2) The non-capillary water-holding capacity, capillary water-holding capacity, and maximum water-holding capacity of soil in the four groups showed no significant differences between density groups ($P > 0.05$). In conclusion, by controlling stand density of an aerially seeded *Pinus massoniana* plantation at 1 500–2 100

收稿日期: 2016-10-18; 修回日期: 2016-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31360181, 31160159)

作者简介: 褚欣, 从事森林资源监测与管理研究。E-mail: chuxin8_2015@163.com。通信作者: 欧阳勋志, 教授, 博士生导师, 从事森林资源监测与管理研究。E-mail: oyxz_2003@hotmail.com

culm·hm⁻², the water-holding capacity of the litter and soil would be maximized. [Ch, 2 fig, 3 tab, 24 ref.]

Key words: forest ecology; *Pinus massoniana* plantation; stand density; litter; soil; water-holding capacity

森林的持水性能是森林生态系统的重要功能之一, 其凋落物层与土壤层调控着 90% 以上的降雨, 是森林生态系统发挥水源涵养的主要作用层^[1]。很多学者对不同林分类型的凋落物层和土壤层的持水性能开展了研究^[2-4], 如殷沙等^[5]针对马尾松 *Pinus massoniana*-木荷 *Schima superba* 不同比例混交林分析得出对马尾松纯林补植阔叶树种, 有利于水源涵养功能的改善。吴迪等^[6]对北京九龙山 8 种林分研究结果得出华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 纯林和油松 *Pinus tabulaeformis*-华北落叶松混交林水源涵养能力较好, 樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 纯林则最差。石媛等^[7]对河北雾灵山不同密度油松人工林研究得出密度为 1 400 株·hm⁻² 的油松人工林水源涵养能力最强。陈莉莉等^[8]针对不同密度油松人工林探究结果为油松人工林密度在 2 617 株·hm⁻² 时水源涵养功能最好。高琛等^[9]对北京松山不同密度丁香 *Syzygium aromaticum* 天然林分析得出丁香天然林在密度为 1 210 株·hm⁻² 左右时水源涵养能力较好, 而赵磊等^[10]对江西大岗山不同密度杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林研究得出, 杉木林林分密度在 3 500 株·hm⁻² 左右其水源涵养功能较好等。可以看出, 不同学者研究的结论不尽相同, 这可能主要是由于研究对象所在区域及林分特征不同所造成的。马尾松为针叶树种, 具有抗旱、耐贫瘠、适应性强等特点, 主要分布在中国的南方地区。由于受诸多历史因素的影响, 至 20 世纪 60 年代, 赣南是中国水土流失较严重的地区之一, 尤其是该区的兴国县, 水土流失范围广强度大, 曾被称为“江南沙漠”。为改善生态环境, 减少水土流失, 20 世纪 60-90 年代初赣南开展了大面积的马尾松飞播造林工作, 飞播林占目前有林地面积的 21.4%, 而这些林分大部分以固土蓄水为主要经营目标。然而, 由于飞播林特殊的造林方式, 林分密度相差较大, 密度的差异对林分凋落物及土壤持水性能的影响目前尚不清楚。因此, 本研究以马尾松飞播造林具有代表性的兴国县为研究区, 旨在通过对不同密度飞播马尾松林的凋落物和土壤的持水性能进行比较分析, 为提高飞播马尾松林持水性能有效措施的制订提供科学依据。

1 研究区概况

兴国县(26°03'~26°42'N, 115°01'~115°51'E)位居江西省的南部, 赣州市的北部地区。海拔高为 130 ~ 1 200 m, 低山、丘陵为其主要地貌, 土壤类型主要为红壤。气候是亚热带东南季风气候, 年平均气温为 18.9 °C, 年平均降水量为 1 539.0 mm, 无霜期为 284 d。县域森林资源丰富, 森林覆盖率为 72.2%, 植被类型主要有针叶林、常绿阔叶林等, 其中飞播马尾松林面积达 6.4 万 hm², 共占现有有林地面积的 29.5%^[11]。

2 材料与方法

2.1 标准地设置

由于研究区保存的飞播马尾松林多为中龄林, 故以飞播马尾松中龄林为研究对象, 依据其林木密度情况, 分为 I 组(900~1 500 株·hm⁻²), II 组(1 500~2 100 株·hm⁻²), III 组(2 100~2 700 株·hm⁻²), IV 组(2 700~3 300 株·hm⁻²)等 4 种密度组, 设立标准地 3 个·密度组⁻¹, 共 12 个标准地, 标准地面积为 0.04 hm²(20 m × 20 m)。标准地土壤类型均为红壤, 成土母岩为花岗岩, 坡向为半阳坡, 坡位为中坡。草本植物主要是雀稗 *Paspalum thunbergii*, 铁芒萁 *Dicranopteris linearis* 和五节芒 *Miscanthus floridulus* 等, 林下灌木主要是檫木 *Loropetalum chinense* 和胡枝子 *Lespedeza bicolor* 等。各密度组标准地基本概况见表 1。

表 1 不同密度组标准地基本概况

Table 1 Basic situation of different density groups

密度组	平均林龄/a	平均胸径/cm	平均树高/m	林分平均密度/(株·hm ⁻²)	郁闭度	土层厚度/cm	腐殖质层厚度/cm	坡度/(°)
I	26	10.8	9.3	1 250	0.4	78.5	3.3	22
II	27	10.3	10.2	1 825	0.5	74.8	3.0	23
III	24	9.1	9.5	2 475	0.6	81.7	3.2	18
IV	24	7.8	7.8	2 958	0.7	76.3	4.3	17

2.2 凋落物储存量及其水分含量测定

在各标准地的上部、中部、下部分别选取3个1 m × 1 m具有代表性的凋落物小样方,用收获法按未分解层(枯枝落叶保持原状,叶形完整,外表没有分解痕迹的凋落物层)、半分解层(大部分枯枝落叶已经粉碎,叶形不完整,分解成碎屑的凋落物层)分别收获凋落物并称鲜质量;将样品带回实验室内,置于80℃的烘箱内烘干测定干质量,计算其含水率,推算出1 hm²林地凋落物的储存量。选用室内浸泡的方法把烘干后的凋落物放入尼龙网袋中并搁置水中浸泡24 h,取出后称量,分别测定未分解层、半分解层的最大持水率、有效拦蓄率、最大持水量和有效拦蓄量等。计算公式为^[5] $M=k \times m \times 10^{-2}$, $k_r = [(m_1 - m_0) / m_0] \times 100$, $k_m = [(m_2 - m_0) / m_0] \times 100$, $k_{rs} = 0.85k_m - k_r$, $W_1 = M \times k_m$, $W_2 = M \times k_{rs}$ 。其中: M 为凋落物储存量(t·hm⁻²); k 为换算系数, $k = \text{凋落物干质量(g)} / \text{凋落物鲜质量(g)}$; m , m_1 , m_0 , m_2 为取样样方凋落物鲜质量、凋落物取样鲜质量、烘干质量、凋落物浸水24 h后的质量(g); k_r , k_m , k_{rs} 为凋落物自然持水率、最大持水率、有效拦蓄率(%); W_1 , W_2 为凋落物最大持水量、有效拦蓄量(t·hm⁻²)。

2.3 土壤物理性质测定及其持水量计算

在各标准地的上部、中部、下部各挖取1个典型土壤剖面,记录坡面的形态特征后,分别在0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm, 40~80 cm土层中的5 cm, 15 cm, 30 cm, 60 cm处用环刀采集取样,取3次·层⁻¹。将样品带回实验室内,测定其土壤含水率、容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度等物理性质,并由此分层计算得出土壤的最大持水量、毛管持水量和有效持水量,计算公式分别为^[5] $W_l = 10\ 000P_h h$, $W_c = 10\ 000P_c h$, $W_o = 10\ 000P_o h$ 。其中: W_l 为土壤最大持水量(t·hm⁻²); W_c 为土壤毛管持水量(t·hm⁻²); W_o 为土壤非毛管持水量(t·hm⁻²); P_l 为土壤总孔隙度(%); P_o 为土壤毛管孔隙度(%); P_c 为土壤非毛管孔隙度(%); h 为土层厚度(m)。

2.4 数据分析

运用Excel 2003进行数据处理及绘图,运用SPSS 17.0软件进行单因素方差分析。

3 结果与分析

3.1 凋落物储存量及持水性能

3.1.1 凋落物储存量 由图1可知:所有标准地林分凋落物未分解层、半分解层及总储存量(未分解层+半分解层)的范围分别为0.47~1.34 t·hm⁻², 0.93~2.92 t·hm⁻², 1.40~4.26 t·hm⁻²。半分解层及总储存量表现为密度组II > 密度组III > 密度组I > 密度组IV, 未分解层储存量表现为密度组II > 密度组I > 密度组III > 密度组IV, 各密度组半分解层储存量均大于未分解层。方差分析表明:未分解层和总凋落物储存量不同密度组间无显著差异($P > 0.05$),但密度组II的总凋落物储存量明显高于其他密度组;半分解层除密度组II与IV表现出显著差异外($P < 0.05$),其他各密度组间均无显著差异($P > 0.05$)。

3.1.2 凋落物持水性能 由表2可知:4种密度组凋落物的平均最大持水率为116.22%~267.21%,总最大持水量为1.80~11.55 t·hm⁻²,均为密度组II > 密度组III > 密度组I > 密度组IV;最大持水率、最大持水量均为半分解层大于未分解层,且都表现为密度组II > 密度组III > 密度组I > 密度组IV。方差分析发现,未分解层中,密度组II和密度组III的最大持水率显著高于其他密度组($P < 0.05$),密度组II与密度组III之间最大持水率无显著差异($P > 0.05$),而最大持水量则是密度组II显著高于其他密度组($P < 0.05$);半分解层中,密度组II除与密度组III最大持水率无显著差异外($P > 0.05$),与其他各密度组均有显著差异($P < 0.05$),最大持水量也是密度组II显著高于其他密度组($P < 0.05$);就整体凋落物层而言,平均最大持水率、总最大持水量均表现出密度组II显著高于其他密度组($P < 0.05$)。

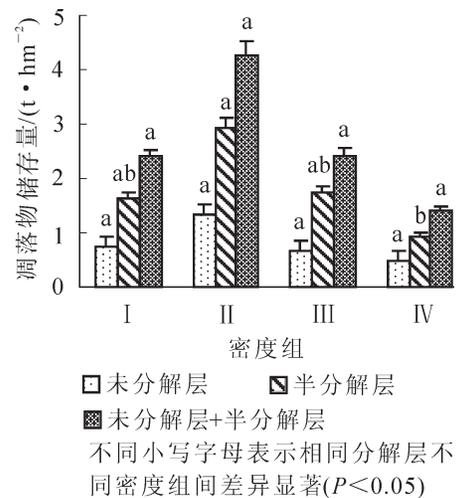


图1 不同密度组凋落物储存量

Figure 1 Litter storage capacity in different density groups

表 2 不同密度组凋落物持水特性

Table 2 Water holding characteristics of litter in different density groups

密度组	凋落物层	最大持水率/%	最大持水量/(t·hm ⁻²)	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)
I	未分解层	141.53 ± 21.13 b	1.10 ± 0.58 b	120.06 ± 17.96 b	0.94 ± 0.49 b
	半分解层	166.21 ± 29.52 bc	2.39 ± 0.58 bc	141.00 ± 25.08 bc	2.02 ± 0.49 bc
	平均或合计	153.87 ± 25.84 b	3.49 ± 1.09 b	130.53 ± 22.28 b	2.96 ± 0.93 b
II	未分解层	259.16 ± 20.92 a	3.53 ± 0.76 a	219.79 ± 17.87 a	2.99 ± 0.65 a
	半分解层	275.26 ± 8.92 a	8.02 ± 0.53 a	233.42 ± 7.55 a	6.80 ± 0.45 a
	平均或合计	267.21 ± 12.27 a	11.55 ± 1.13 a	226.61 ± 13.27 a	9.79 ± 0.96 a
III	未分解层	220.35 ± 25.28 a	1.64 ± 0.79 ab	186.94 ± 31.72 a	1.40 ± 0.67 ab
	半分解层	241.26 ± 37.32 ab	3.94 ± 0.88 b	204.78 ± 21.53 ab	3.34 ± 0.75 b
	平均或合计	230.81 ± 30.16 b	5.58 ± 1.55 b	195.86 ± 25.16 b	4.74 ± 1.32 b
IV	未分解层	98.77 ± 6.55 b	0.47 ± 0.18 b	83.80 ± 5.55 b	0.40 ± 0.15 b
	半分解层	133.66 ± 19.90 c	1.33 ± 0.45 c	113.41 ± 16.89 c	1.13 ± 0.38 c
	平均或合计	116.22 ± 13.36 b	1.80 ± 0.43 b	98.61 ± 13.35 b	1.53 ± 0.37 b

说明: 平均值±标准误, “平均或合计”中最大持水率、有效拦蓄率为平均值, 最大持水量、有效拦蓄量为合计; 纵向不同小写字母表示相同分解层不同密度组均值间差异显著($P < 0.05$)。

由表 2 可知: 4 种密度组凋落物平均有效拦蓄率、有效拦蓄量均以密度组 II 最高, 分别为 226.21% 和 9.79 t·hm⁻²。经多重比较发现, 凋落物有效拦蓄率和有效拦蓄量无论是不同分解层还是就整个凋落物层而言, 其结果均与相应层次的凋落物最大持水率和最大持水量分析结果相一致。

综上所述, 4 种密度组的凋落物储存量、持水与蓄水功能均表现为密度组 II (1 500~2 100 株·hm⁻²) 优于其他密度组。这可能是由于密度过低其凋落物储存量较少不利于持水与蓄水, 而密度过高, 林分郁闭度增加, 光照不足, 温度降低, 影响了凋落物的分解速度, 使凋落物层的持水性能降低, 不利于飞播马尾松林的水源涵养和水土保持。

3.2 土壤物理性质及持水性能

3.2.1 土壤容重及孔隙度 由表 3 可知: 0~80 cm 土壤容重平均值范围是 1.29~1.41 g·cm⁻³, 表现为密度组 IV > 密度组 I > 密度组 III > 密度组 II, 土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度平均值范围分别是 29.45%~35.87%, 4.57%~8.55% 和 47.92%~51.32%, 表现为密度组 II > 密度组 III > 密度组 I > 密度组 IV。方差分析发现, 不同密度组间相同土层的土壤容重、毛管孔隙度、总孔隙度均无显著差异($P > 0.05$), 非毛管孔隙度除 40~80 cm 土层密度组 II 与密度组 IV 有显著差异外($P < 0.05$), 其他相同土层不同密度组间无显著差异($P > 0.05$), 0~80 cm 土层土壤容重、毛管孔隙度均值无显著差异($P > 0.05$), 非毛管孔隙度均值表现为密度组 II 除与密度组 III 无显著差异外($P > 0.05$), 与其他各密度组均有显著差异($P < 0.05$), 总孔隙度均值则表现为密度组 II 与密度组 IV 有显著差异($P < 0.05$)。

3.2.2 土壤持水性能 由图 2 可知: 不同密度组 0~80 cm 土壤非毛管持水量、毛管持水量、最大持水量的范围分别是 332.62~628.93, 2 210.17~2 859.98, 3 792.45~3 984.91 t·hm⁻², 均表现为密度组 II > 密度组 III > 密度组 I > 密度组 IV。分析土壤不同密度组的非毛管持水量、毛管持水量和最大持水量发现, 各密度组之间无显著差异($P > 0.05$)。

综上所述, 4 种不同密度组中, 土壤物理性质和土壤蓄水能力均表现为在密度组 II 时处于最大值, 表明飞播马尾松林林木密度为 1 500~2 100 株·hm⁻² 能较好地改善土壤结构, 提高土壤持水能力。

4 结论与讨论

4.1 凋落物储存量与持水性能

4 种密度组凋落物总储存量为 1.40~4.26 t·hm⁻², 表现为密度组 II > 密度组 III > 密度组 I > 密度组 IV, 以中等密度 1 500~2 100 株·hm⁻² 的最大, 且各密度组凋落物储存量均表现为半分解层大于未分解层。赵芳等^[12]对飞播马尾松林不同林下植被类型凋落物及土壤水文效应研究以及张伟等^[13]对冀北山地不

表3 不同密度组土壤容重及孔隙度

Table 3 Soil bulk density and porosity of different density groups

密度组	土层厚度/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%
I	0~10	1.32 ± 0.02 a	34.54 ± 4.73 a	6.53 ± 1.42 a	50.19 ± 5.52 a
	10~20	1.35 ± 0.05 a	33.81 ± 5.06 a	6.06 ± 0.94 a	49.06 ± 5.45 a
	20~40	1.38 ± 0.01 a	32.27 ± 5.23 a	5.00 ± 0.76 a	47.92 ± 5.05 a
	40~80	1.41 ± 0.03 a	32.05 ± 3.73 a	4.17 ± 1.39 ab	46.79 ± 4.85 a
	平均	1.36 ± 0.02 a	33.17 ± 2.04 a	5.44 ± 0.57 bc	48.49 ± 2.36 ab
II	0~10	1.21 ± 0.02 a	36.08 ± 2.33 a	9.82 ± 3.81 a	54.34 ± 4.13 a
	10~20	1.25 ± 0.04 a	35.98 ± 0.49 a	9.67 ± 2.69 a	52.83 ± 3.08 a
	20~40	1.31 ± 0.08 a	35.85 ± 0.96 a	7.68 ± 1.95 a	50.57 ± 2.85 a
	40~80	1.39 ± 0.10 a	35.56 ± 2.72 a	7.01 ± 0.60 a	47.55 ± 2.36 a
	平均	1.29 ± 0.03 a	35.87 ± 0.80 a	8.55 ± 1.15 a	51.32 ± 2.12 a
III	0~10	1.28 ± 0.09 a	36.57 ± 5.34 a	11.38 ± 1.58 a	51.70 ± 3.84 a
	10~20	1.29 ± 0.06 a	35.76 ± 6.32 a	7.09 ± 2.65 a	51.32 ± 4.24 a
	20~40	1.33 ± 0.10 a	33.80 ± 6.66 a	6.37 ± 1.29 a	49.81 ± 5.72 a
	40~80	1.39 ± 0.02 a	32.32 ± 3.96 a	6.06 ± 1.19 ab	47.55 ± 3.47 a
	平均	1.32 ± 0.03 a	34.61 ± 2.47 a	7.72 ± 0.99 ab	50.09 ± 2.55 ab
IV	0~10	1.32 ± 0.09 a	32.27 ± 1.49 a	5.34 ± 0.93 a	50.19 ± 2.32 a
	10~20	1.39 ± 0.04 a	31.97 ± 4.66 a	4.93 ± 0.53 a	47.55 ± 3.62 a
	20~40	1.40 ± 0.09 a	28.71 ± 3.13 a	4.49 ± 0.30 a	47.17 ± 2.83 a
	40~80	1.41 ± 0.08 a	24.84 ± 10.87 a	3.50 ± 0.54 b	46.79 ± 2.84 a
	平均	1.41 ± 0.08 a	29.45 ± 2.78 a	4.57 ± 0.33 c	47.92 ± 2.65 b

说明：平均值±标准误，“平均或合计”中最大持水率、有效拦蓄率为平均值，最大持水量、有效拦蓄量为合计；纵向不同小写字母表示相同分解层不同密度组均值间差异显著($P < 0.05$)。

同林分凋落物蓄积量研究等也表明：凋落物中半分解层大于未分解层，而刘宇等^[14]对不同密度华北落叶松人工林研究结果也得出，中等密度林分的凋落物储存量最多。本研究得出凋落物总储存量随林分密度的增加表现为先增大后减小的趋势。究其原因，可能是凋落物最终的储存量是由凋落物总量的和它分解的速度来决定的^[12]，由于林木密度的大小会对林木、林下植被的凋落物量产生影响，而且通过影响光照、温湿度等因子也会对凋落物的分解速度等产生影响^[15-17]，因此凋落物储存量并不是随着密度的增大而增大。

凋落物的持水能力与凋落物储存量有密切关系，储存量越大，其持水能力越强。本研究表明：凋落物总最大持水量、平均最大持水率的变化与凋落物储存量表现出同样的规律，即随林分密度的增加呈现先增大后减少的趋势，以密度组 II 最大，而未分解层与半分解层的最大持水量和最大持水率也表现出相同的规律，且半分解层均大于未分解层。曾建军等^[18]

研究城市水源 5 种森林凋落物水文效应也得出类似的结果。一般情况下，凋落物的实际拦蓄能力是通过有效拦蓄量的大小来衡量的，飞播马尾松林凋落物的有效拦蓄量随密度的增加出现先增大后减小的变化趋势。鲁邵伟等^[19]对北京山地不同密度侧柏 *Platycladus orientalis* 人工林凋落物变化以及杜阿朋等^[20]对不同林分密度邓恩桉 *Eucalyptus dunnii* 凋落物持水特性的研究结果均得出同样的规律，但余林等^[21]对不同密度毛竹 *Phyllostachys edulis* 林凋落物层水文特性研究结果则表明：最大密度林分(3 000 株·hm⁻²)的凋落物持水特性最大。由此可见，虽然凋落物的持水功能与凋落物的储存量有密切关系，但随林分密度的

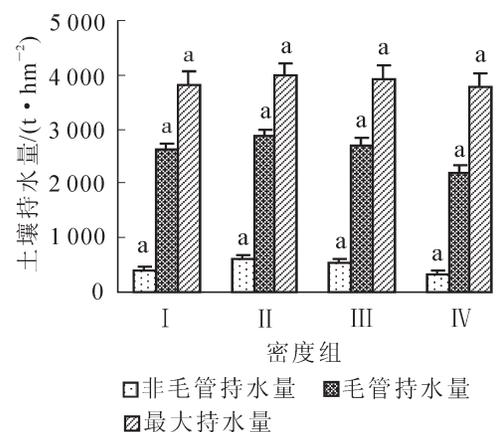


图2 不同密度组 0~80 cm 土壤持水量

Figure 2 Soil water holding capacity of 0~80 cm in different density groups

变化规律不尽相同。这可能是由于林分类型、地形环境等因素差异所造成。

4.2 土壤物理性质与持水性能

本研究中 0~80 cm 土壤容重平均值范围是 1.29~1.41 g·cm⁻³, 表现为密度组Ⅳ>密度组Ⅰ>密度组Ⅲ>密度组Ⅱ, 且同一密度组的土壤容重随着土壤深度的增加而增加, 而土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度变化则与土壤容重的变化相反, 这与 LI 等^[22]对滇池流域 4 种森林生态系统水土保持能力、石媛等^[7]对河北雾灵山油松 *Pinus tabulaeformis* 人工林土壤物理性质以及殷沙等^[5]对马尾松-木荷的不同比例混交林等研究所得出的结果类似, 主要是因为随着土层深度的增加, 土壤的有机物质含量、土壤团聚性降低, 导致土壤的紧实性增加, 也有可能是由于土壤表面层凋落物合成成分、凋落物储存量及其分解速率、土壤地下根系成长发育情况等差异造成的^[23]。

土壤持水性能的大小主要是由土壤的非毛管孔隙度来决定, 而孔隙度与土壤本身的透气性关系密切。本研究得出土壤非毛管持水量、毛管持水量以及最大持水量均表现为密度组Ⅱ>密度组Ⅲ>密度组Ⅰ>密度组Ⅳ, 与土壤容重的变化规律相反, 这也说明了土壤容重越小, 土壤疏松多孔, 其结构性就越好, 从而增强土壤持水能力。土壤非毛管持水量、毛管持水量以及最大持水量各密度组间虽无显著差异 ($P>0.05$), 但均表现为密度组Ⅱ最大, 这一结果与肖欣等^[24]研究的同等密度下飞播马尾松土壤持水性能的结论相一致。

综上所述, 飞播马尾松林密度为 1 500~2 100 株·hm⁻² 的林分, 枯枝落叶的储存量大, 能够较好地改善土壤结构, 使得其凋落物层和土壤层的持水性能都明显优于其他密度组。因此, 在今后的飞播马尾松林的经营管理和水源涵养林建设中, 可考虑对飞播马尾松林的密度进行控制, 以改善林地土壤结构, 提高其持水性能。由于条件所限, 本研究没有对林冠层和林下植被层的水源涵养功能进行调查分析。在今后研究中有待将林冠层、林下植被层、凋落物层、土壤层等 4 方面结合起来, 以较全面了解其水源涵养功能。

5 参考文献

- [1] 潘春翔, 李裕元, 彭亿, 等. 湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能[J]. 生态学报, 2012, **32**(2): 538 - 547.
PAN Chunxiang, LI Yuyuan, PENG Yi, et al. Soil water holding capacity under four typical ecosystems in Wuyunjie Nature Reserve of Hunan Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(2): 538 - 547.
- [2] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山主要森林类型枯落物的水文功能[J]. 北京林业大学学报, 2009, **31**(1): 91 - 99.
SHI Zhongjie, WANG Yanhui, XU Lihong, et al. Hydrological functions of litter layer of typical forest types in the Liupan Mountains of Ningxia, northwestern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2009, **31**(1): 91 - 99.
- [3] ALWYN W, HUNTER M C, MELANIE K, et al. Soil water holding capacity mitigates downside risk and volatility in US rainfed maize: time to invest in soil organic matter? [J]. *PLoS One*, 2016, **11**(8): e0160974. doi:10.1371/journal.pone.0160974.
- [4] 王斌, 杨校生, 李正才, 等. 不同气候区 4 种典型地带性植被土壤水文功能比较[J]. 林业资源管理, 2009(6): 84 - 90.
WANG Bin, YANG Xiaosheng, LI Zhengcai, et al. Comparison of hydrological functions of four typical zonal vegetations in different climatic zones [J]. *For Resour Manage*, 2009(6): 84 - 90.
- [5] 殷沙, 赵芳, 欧阳勋志. 马尾松木荷不同比例混交林凋落物和土壤持水性能比较分析[J]. 江西农业大学学报, 2015, **37**(3): 454 - 460.
YIN Sha, ZHAO Fang, OUYANG Xunzhi. A comparison on water-holding capacity of forest litter and soil of mixed forests of *Pinus massoniana* and *Schima superba* in different proportions [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2015, **37**(3): 454 - 460.
- [6] 吴迪, 辛学兵, 裴顺祥, 等. 北京九龙山 8 种林分的凋落物及土壤水源涵养功能[J]. 中国水土保持科学, 2014, **12**(3): 78 - 86.
WU Di, XIN Xuebing, PEI Shunxiang, et al. Water conservation function of litters and soil of eight kinds of forest

- stands in Jiulong Mountain in Beijing City [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2014, **12**(3): 78 – 86.
- [7] 石媛, 鲁绍伟, 陈波, 等. 河北雾灵山不同密度油松人工林凋落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(3): 92 – 97.
- SHI Yuan, LU Shaowei, CHEN Bo, *et al.* Soil hydrological effects and forest litter of *Pinus tabulaeformis* plantation under different densities in Wuling Mountain of Hebei [J]. *J Soil Water Conserv*, 2014, **28**(3): 92 – 97.
- [8] 陈莉莉, 王得祥, 张宋智, 等. 不同密度油松人工林土壤特性及水源涵养功能研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, **41**(7): 141 – 149.
- CHEN Lili, WANG Dexiang, ZHANG Songzhi, *et al.* Soil properties and water conservation function of *Pinus tabulaeformis* plantation with different stand densities [J]. *J Northwest A & F Univ Nat Sci Ed*, 2013, **41**(7): 141 – 149.
- [9] 高琛, 鲁绍伟, 杨新兵, 等. 北京松山不同密度丁香天然林凋落物及土壤水文效应[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(6): 59 – 65.
- GAO Chen, LU Shaowei, YANG Xinbing, *et al.* Hydrological effects and forest litters and soil of natural *Syzygium aromaticum* forests with different densities in Songshan Mountain of Beijing [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2013, **20**(6): 59 – 65.
- [10] 赵磊, 王兵, 蔡体久, 等. 江西大岗山不同密度杉木林凋落物持水与土壤储水能力研究[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(1): 203 – 208.
- ZHAO Lei, WANG Bing, CAI Tijiu, *et al.* Water-holding capacity of litter and soil under Chinese fir forest with different densities in Dagangshan Mountain of Jiangxi Province [J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, **27**(1): 203 – 208.
- [11] 丁松, 应学亮, 吕丹, 等. 赣南飞播马尾松林下植被盖度对土壤质量的影响[J]. 水土保持研究, 2014, **21**(3): 31 – 36.
- DING Song, YING Xueliang, LÜ Dan, *et al.* Effects of understory vegetation coverage on soil quality of aerial seeding *Pinus massoniana* stands in south of Jiangxi Province [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2014, **21**(3): 31 – 36.
- [12] 赵芳, 李雪云, 赖国桢, 等. 飞播马尾松林不同林下植被类型凋落物及土壤水文效应[J]. 中国水土保持科学, 2016, **14**(4): 26 – 33.
- ZHAO Fang, LI Xueyun, LAI Guozhen, *et al.* Hydrological effects of forest litters and soil in different types of understory vegetation in aerially-seeded *Pinus massoniana* plantation [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2016, **14**(4): 26 – 33.
- [13] 张伟, 杨新兵, 张汝松, 等. 冀北山地不同林分凋落物及土壤的水源涵养功能评价[J]. 水土保持通报, 2011, **31**(3): 208 – 212.
- ZHANG Wei, YANG Xinbing, ZHANG Rusong, *et al.* Evaluation on water conservation functions of litter and soils under different forests in Mountainous Area of Northern Hebei Province [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2011, **31**(3): 208 – 212.
- [14] 刘宇, 郭建斌, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山不同密度华北落叶松人工林枯落物水文效应[J]. 北京林业大学学报, 2016, **38**(8): 36 – 44.
- LIU Yu, GUO Jianbin, WANG Yanhui, *et al.* Hydrological effects of forest litter of *Larix principis-rupprechtii* plantations with varying densities in Liupan Mountains of Ningxia, China [J]. *J Beijing For Univ*, 2016, **38**(8): 36 – 44.
- [15] 冯楷斌, 张暘暘, 郭敬丽, 等. 冀北山地不同类型白桦林枯落物及土壤持水性能研究[J]. 林业资源管理, 2016(2): 74 – 80.
- FENG Kaibin, ZHANG Yangyang, GUO Jingli, *et al.* Water conservation capacity of litter and soil different *Betula platyphylla* forests in Mountainous Area of Northern Hebei Province [J]. *For Resour Manage*, 2016(2): 74 – 80.
- [16] XIAO Wenfa, GE Xiaogai, ZENG Lixiong, *et al.* Rates of litter decomposition and soil respiration in relation to soil temperature and water in different-aged *Pinus massoniana* forests in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(7): e101890. doi: 10.1371/journal.pone.0101890.
- [17] STRICKLAND M S, KEISER A D, BRADFORD M A. Climate history shapes contemporary leaf litter decomposition [J]. *Biogeochemistry*, 2015, **122**(2): 165 – 174.
- [18] 曾建军, 史正涛. 城市水源地5种森林枯落物水文效应特征[J]. 水土保持通报, 2016, **36**(1): 38 – 43.
- ZENG Jianjun, SHI Zhengtao. Water-holding capacity of litters in five different typical forest types in urban water

- source [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2016, **36**(1): 38 – 43.
- [19] 鲁绍伟, 陈波, 潘青华, 等. 北京山地不同密度侧柏人工林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(1): 224 – 229.
- LU Shaowei, CHEN Bo, PAN Qinghua, *et al.* Soil hydrological effects and forest litter of *Platycladus orientalis* plantation in the different densities in mountain of Beijing [J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, **27**(1): 224 – 229.
- [20] 杜阿朋, 赵知渊, 邓玉华, 等. 不同林分密度邓恩桉凋落物及土壤持水特性[J]. 桉树科技, 2016, **33**(2): 19 – 24.
- DU Apeng, ZHAO Zhiyuan, DENG Yuhua, *et al.* Effect of stand density differences on litterfall and soil water holding capacity of *Eucalypt usdunnii* plantations [J]. *Eucalypt Sci Technol*, 2016, **33**(2): 19 – 24.
- [21] 余林, 范少辉, 苏文会, 等. 不同密度毛竹林凋落物层水文特性研究[J]. 林业科学研究, 2012, **25**(3): 355 – 359.
- YU Lin, FAN Shaohui, SU Wenhui, *et al.* Study on litter water interception capacity of *Phyllostachys edulis* plantations with different densities [J]. *For Res*, 2012, **25**(3): 355 – 359.
- [22] LI Yan, LI Baikun, ZHANG Xiang, *et al.* Differential water and soil conservation capacity and associated processes in four forest ecosystems in Dianchi Watershed, Yunnan Province, China [J]. *J Soil Water Conserv*, 2015, **70**(3): 198 – 206.
- [23] 王丽艳, 刘光正, 林小凡, 等. 赣江源不同密度湿地松林土壤物理性质及水源涵养功能[J]. 南方林业科学, 2015, **43**(6): 49 – 52.
- WANG Liyan, LIU Guangzheng, LIN Xiaofan, *et al.* Physical properties of soil and water conservation of *Pinus elliotii* plantation with different densities in the source area of Ganjiang River [J]. *South China For Sci*, 2015, **43**(6): 49 – 52.
- [24] 肖欣, 郭孝玉, 欧阳勋志, 等. 不同密度飞播马尾松林林下植被特征及土壤质量评价[J]. 东北林业大学学报, 2015, **43**(9): 62 – 66.
- XIAO Xin, GUO Xiaoyu, OUYANG Xunzhi, *et al.* Characteristics of understory vegetation and evaluation of soil quality of aerially seeded *Pinus massoniana* plantation under different stand densities [J]. *J Northeast For Univ*, 2015, **43**(9): 62 – 66.