

# 林分改造后的水土保持林地土壤的持水性能

邓慧华<sup>1</sup>, 林晗<sup>2</sup>, 郑义文<sup>1</sup>, 陈锐琼<sup>1</sup>, 欧阳玉莹<sup>1</sup>, 彭绍云<sup>3</sup>

(1.福建省水土保持试验站, 福建 福州 350003;

2.福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 3.长汀县水土保持站, 福建 长汀 366300)

**摘要:** [目的] 研究林分改造后的林地水文生态特征, 分析水土保持林的持水特性, 为南方红壤水土流失区的生态治理、植被恢复以及树种配置提供参考。[方法] 选择福建省长汀县红壤侵蚀区松林改造后营造的千年桐生态林作为研究对象, 以林外草坡作为对照, 比较千年桐生态林和草坡的枯落物持水性能指标之间的差异, 同时测定千年桐林分0—60 cm不同土层土壤物理性质, 并利用隶属函数对林地持水性能进行综合评价。[结果] 千年桐枯落物持水量始终高于对照, 浸水前为对照的1.15倍, 浸水24 h后为对照的2.10倍; 浸水0.25 h时, 千年桐和对照的枯落物吸水速率分别为1 723.64, 700.8 mm/h。千年桐林地的枯落物累积量、枯落物最大持水量、枯落物有效拦蓄量均显著高于对照。林地0—10 cm土层的土壤容重显著低于其他土层, 而最大持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度和总孔隙度均显著高于其他土层; 0—20 cm土层的土壤有效蓄水量和有效水储量显著低于20—60 cm土层。林地持水性能的综合评价结果表明土壤毛管孔隙度的综合评价值较高, 而土壤自然含水率的综合评价值较低。[结论] 千年桐生态林枯落物持水性能较好, 土壤通气、透水性较高。从林分综合评价来看, 与土壤孔隙度, 特别是毛管孔隙度相关的指标对于提高千年桐生态林持水性能具有重要影响。

**关键词:** 林分改造; 水土保持林; 持水性能; 千年桐; 福建省长汀县

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)03-0009-07

**中图分类号:** S714.7

**文献参数:** 邓慧华, 林晗, 郑义文, 等. 林分改造后的水土保持林地土壤的持水性能[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 9-15. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.002; Deng Huihua, Lin Han, Zheng Yiwen, et al. Soil water-holding capacity of soil and water conservation forest land after stand reconstruction [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 9-15.

## Soil Water-holding Capacity of Soil and Water Conservation Forest Land After Stand Reconstruction

Deng Huihua<sup>1</sup>, Lin Han<sup>2</sup>, Zheng Yiwen<sup>1</sup>, Chen Ruiqiong<sup>1</sup>, Ouyang Yuying<sup>1</sup>, Peng Shaoyun<sup>3</sup>

(1. Fujian Soil and Water Conservation Experimental Station, Fuzhou,

Fujian 350003, China; 2. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou,

Fujian 350002, China; 3. Soil and Water Conservation Station of Changting County, Changting, Fujian 366300, China)

**Abstract:** [Objective] The hydrological and ecological traits, and the water-holding characteristics of a forest after stand reconstruction were analyzed in order to provide a reference for ecological management, vegetation restoration, and tree species allocation in red soil erosion areas in Southern China. [Methods] This study was conducted at an *Aleurites montana* stand that was established after pine forest reconstruction in an erosion area of Changting County, Fujian Province. Differences in litterfall water retention indicators were compared between the *A. montana* stand and a grassy slope (CK). The soil physical properties of the 0—60 cm soil layer under the *A. montana* stand were measured, and the water retention performance of the stand was comprehensively evaluated by the subordinate function method. [Results] The water retention of the litter in the *A. montana* stand was always higher than that of CK, which was 1.15 times the value of CK before immersion and 2.10 times the value of CK after immersion for 24 hours. The water absorption rates of

收稿日期: 2023-10-12

修回日期: 2023-12-05

资助项目: 福建省水利科技项目“千年桐水土保持林对植被修复与涵养功能的效应机制”(MSK202209)

第一作者: 邓慧华(1982—), 女(汉族), 福建省龙岩市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持、森林培育、生态学等方面的研究。Email: denghuihua@163.com.

the litter in the *A. montana* stand and CK were 1 723.64 and 700.8 mm/h, respectively, after immersion for 0.25 h. The cumulative amount, maximum water-holding capacity, and effective storage amount of litter in the *A. montana* stand were significantly higher than those in CK. The soil bulk density of the 0—10 cm soil layer was significantly lower than that of other soil layers, while the maximum water-holding capacity, capillary water-holding capacity, field water-holding capacity, capillary porosity, and total porosity were significantly higher than those of other soil layers. The soil effective water storage and effective water reserve were significantly lower in the 0—20 cm layer than in the 20—60 cm layer. The comprehensive evaluation of the stand showed that the evaluation value of soil capillary porosity was higher, while that of soil natural moisture content was lower among all the indicators. [Conclusion] The *A. montana* stand had high water-holding capacity in the litter, as well as favorable aeration and water permeability characteristics in the soil. The comprehensive evaluation of the *A. montana* stand suggested that soil porosity, especially capillary porosity, played an important role in improving the water-holding performance of the stand.

**Keywords:** stand transformation; soil and water conservation forest; water-holding capacity; *Aleurites montana*; Changting County of Fujian Province

林分改造是以适地适树为基本原则,在自然条件下采取一定的人工措施对生产力低、生态功能差的低效林进行优化或更新造林,建立起结构稳定、功能良好、兼具经济效益和地带性景观特色的林分,充分发挥森林的社会、经济与生态效益<sup>[1]</sup>。大量研究表明,林分改造可通过改变枯落物的类型、组成和储量,影响林分的养分循环和周转以及通气、透水等土壤状况。对马尾松、柏木、相思等林分改造试验证实,合理的林分改造可促进林下更新,提高凋落物层的数量和质量,改善林分水土保持和水源涵养功能<sup>[2-4]</sup>。因此林分改造是优化森林群落结构、改善林分质量和提升森林经济产量和生态服务价值的有效手段<sup>[5]</sup>。

福建省长汀县是亚热带红壤山地丘陵区水土流失最严重的地区之一。从 20 世纪 80 年代开始,长汀县就一直被确立为全国水土保持重点试验区,开始长期的水土保持治理工作。马尾松因具有耐干旱、耐贫瘠、适应性强等特点,在长汀红壤区水土流失治理过程中被当作主要造林树种,形成了红壤侵蚀初步治理区大面积的马尾松纯林。虽然这些侵蚀区的水土流失得到了一定程度的抑制,但马尾松纯林存在的树种单一、物种多样性低、林下水土流失和林分抗逆性弱等系列生态问题也逐渐凸显<sup>[6-7]</sup>。为缓解针叶人工林生态环境恶化的现象,提高和改善林分质量,在对松林皆伐后,常采用乡土阔叶树种造林的方式进行林分改造,以此有效地维护、恢复和提高森林土壤功能,改善地力,提高林地生产力和生态服务功能,改善林地的整体养分供应状况<sup>[8]</sup>。

为了进一步考察林分改造后林地的水文生态特征,本研究选择松林改造后营造的千年桐生态林作为研究对象,并以林外草坡(CK)作为对照,比较千年桐林和林外草坡的枯落物最大持水率、自然含水率、累

积量、最大持水量、有效拦蓄量等持水性能指标之间的差异。同时结合千年桐生态林 0—60 cm 不同土层土壤物理性质,对林地持水性能进行综合评价。研究结果有利于了解松林阔叶改造对林地水土保持功能的影响,为长汀县红壤山地丘陵区水土流失严重地区的生态治理、植被恢复以及树种配置提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于福建省长汀县东坑林场,地处福建省龙岩市西北部,地理位置在 25° 18′—26° 02′ N, 116° 00′—116° 39′ E 之间。区域属亚热带季风湿润气候,年平均温度 18.3 °C,年平均降水量 1 700 mm。土壤类型以红壤为主,有机质含量较少,易受侵蚀,使之成为水土流失时间长,覆盖广,受灾重的地区之一。从 20 世纪 80 年代开始,有关部门对长汀县各红壤侵蚀区进行了阶段性的连续治理<sup>[9]</sup>。为提高林分质量,减少水土流失,林业及水保部门于 2020 年在长汀县东坑林场对马尾松低产低效林皆伐后,改植千年桐等阔叶树种。千年桐采用 2 a 生实生苗造林,栽植密度为 2 500 株/hm<sup>2</sup>。

### 1.2 样地设置

2023 年 6 月在千年桐林地内设置 3 块面积为 20 m×20 m 的样地,以相同面积林外裸地作为对照(CK)。样地均位于同一丘陵坡地,海拔为 300~400 m,坡度在 25°~30°。水土保持林中千年桐平均胸径为 6.41 cm,树高 8.16 m,冠幅(东西×南北)为 2.54 m×2.77 m。林下植被包括山矾、石斑木、小叶赤楠、黄瑞木、铁芒萁等,林外裸地的植被主要为天然更新的铁芒萁构成。

在各标准样地内依照对角线分别在四角及中心区

域设置5个1 m×1 m的样方,收集样方中的植物枯落物,其中千年桐林分收集的枯落物主要为尚未分解和部分分解的叶凋落物,对照裸地的枯落物为铁芒萁。将收集的枯落物装入密封袋中贴上标签,带回实验室用于枯落物蓄积量、持水量和吸水速率等指标的测定。

### 1.3 指标测定

枯落物的持水量及其吸水速率采用浸泡法<sup>[10]</sup>测定:将各林分枯落物烘干后装入孔径为0.15 mm的尼龙网内浸入水中,分别在15和30 min以及1,2,4,8,10,24 h时取出,沥水至没有水滴滴落为止,测量其重量变化。并将样本80℃下烘干至恒重,测定其干重。每次取样测定的枯落物湿重与干重差值即为枯落物各浸水时间的持水量;该值与浸水时间的比值即为枯落物的吸水速率。采用烘干法对枯落物蓄积量进行测定,每个样地5块样方的枯落物干重的平均值为该样地的枯落物蓄积量。采用枯落物浸水24 h后的持水量和持水率作为其最大持水量和最大持水率。凋落物各持水能力指标计算公式为<sup>[11]</sup>:

枯落物自然含水率:

$$R_0 = (m_1 - W_2) \div W_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中: $R_0$ 为自然含水率(%); $m_1$ 为自然状态下枯落物重量(g); $W_2$ 为枯落物干重(g)。

枯落物持水量:

$$W_t = W_{t_{tw}} - W_2 \quad (2)$$

式中: $W_t$ 为 $t$ 时刻枯落物持水量(g); $W_{t_{tw}}$ 为 $t$ 时刻枯落物的湿重(g)。

枯落物吸水速率:

$$V = W_t \div t \quad (3)$$

式中: $V$ 为枯落物某时间段的吸水速率(g/h); $W_t$ 为 $t$ 时刻枯落物持水量(g); $t$ 为枯落物浸泡时间(h)。

枯落物最大持水率:

$$R_{\max} = (W_1 - W_2) \div W_2 \times 100\% \quad (4)$$

式中: $W_1$ 为浸水24 h后枯落物重量(g)。

枯落物最大持水量:

$$W_{\max} = M \times R_{\max} \quad (5)$$

式中: $M$ 为枯落物蓄积量( $t/\text{hm}^2$ ); $R_{\max}$ 为枯落物最大持水率。

枯落物有效拦蓄量:

$$W_{sv} = (0.85R_{\max} - R_0) \times M \quad (6)$$

土壤容重和孔隙度采用环刀法,测定不同土层的土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度等指标<sup>[12]</sup>。土壤持水能力指标有土壤有效蓄水量和土壤有效水储量,计算公式分别为:

$$\begin{aligned} \text{土壤有效蓄水量}(t/\text{hm}^2) = \\ 10\,000 \times \text{每层土壤非毛管孔隙度} \times \\ \text{土层深度}(m) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{土壤有效水储量}(t/\text{hm}^2) = \\ 10\,000 \times \text{每层土壤孔隙度} \times \\ \text{土层深度}(m) \end{aligned} \quad (8)$$

### 1.4 数据处理与分析

利用SPSS 25.0在单因素方差基础上进行LSD显著差异性检验,采用Origin 2021软件进行作图。用主成分分析法确定各指标的权重,采用隶属函数的方法计算水土保持林各持水指标的隶属函数值,最终得到千年桐保持林的综合评价<sup>[13]</sup>。

若第 $j$ 个指标与持水能力呈正相关关系,计算公式为:

$$X_\mu = (X_j - X_{\max}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (9)$$

若第 $j$ 个指标与持水能力呈负相关关系,计算公式为:

$$X_\mu = 1 - (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (10)$$

式中: $X_\mu$ 为隶属函数值; $X_j$ 为某一指标的测定值; $X_{\max}$ 为某一指标测定中的最大值; $X_{\min}$ 为某一指标测定中的最小值。

各指标的权重( $W_j$ ):

$$W_j = P_j / \sum P_j \quad (11)$$

式中: $P_j$ 表示第 $j$ 个指标的贡献率。

综合评价 $(D)$ :

$$D = \sum (X_\mu \times W_j) \quad (12)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 千年桐生态林枯落物持水量

千年桐林地和草坡(CK)的枯落物持水量变化趋势基本一致(图1),均随着浸水时间的增长而增加。千年桐枯落物持水量始终高于对照,浸水前为对照的1.15倍,浸水24 h时为对照的2.10倍。千年桐和对照的枯落物持水量在浸水0—0.25 h期间急剧增加,其后增加速度变缓,而千年桐枯落物持水量在10—24 h期间显著提高。两者枯落物持水量均在浸水24 h达到峰值。从枯落物持水量与浸水时间( $t$ )的拟合方程结果可以看出,千年桐和对照的枯落物持水量与浸水时间呈显著的对数关系。

### 2.2 千年桐生态林枯落物吸水速率

图2显示了千年桐林地和草坡(CK)枯落物吸水速率的变化,两者均随着浸水时间的增加而降低。浸水0.25 h时,千年桐和对照的枯落物吸水速率分别为1 723.64, 700.80 mm/h,均处于最高水平。浸水0.25~8.00 h,两者枯落物吸水速率呈明显下降趋势;浸水10 h后,两者枯落物持水接近饱和;至24 h,两者枯落物吸水速率达到最低水平。浸水试验期间,千年桐枯落物吸水速率始终高于对照,但随着浸水时间

的增加,两者的差异逐渐减小,到浸水 24 h 时无显著性差异。对枯落物吸水速率与浸水时间进行拟合,两者之间呈显著的幂函数关系( $R^2=0.939$ )。

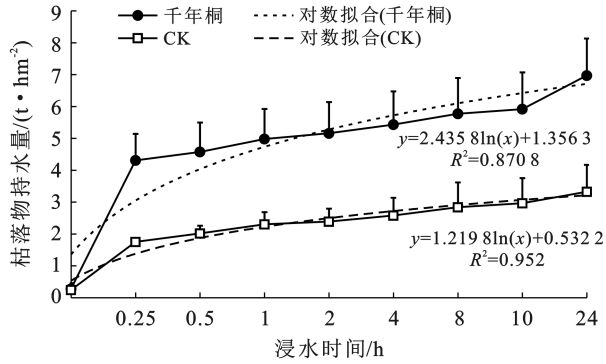


图 1 枯落物持水量与浸水时间的关系

Fig.1 Relation between water holding capacity of litters and soaking time

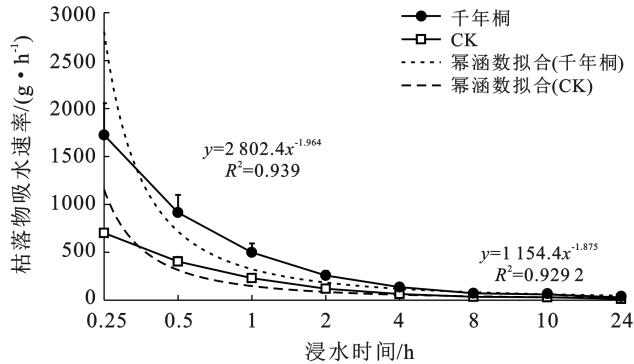


图 2 枯落物吸水速率与浸水时间的关系

Fig.2 Relation between water absorption rate of litters and soaking time

### 2.3 千年桐生态林枯落物持水能力指标

比较千年桐林和草坡(CK)枯落物的不同持水能力指标可知(表 1),两者的最大持水率、自然含水率无

显著差异。千年桐林地的枯落物累积量( $2.60 \text{ t/hm}^2$ ),最大持水量( $6.97 \text{ t/hm}^2$ ),有效拦蓄量( $5.65 \text{ t/hm}^2$ )均显著高于对照( $p < 0.05$ )。

表 1 枯落物持水能力指标

Table 1 Water-holding capacity indicators of litters

| 参数   | 持水指标                 |                      |
|--|----------------------|----------------------|
|  | 千年桐                  | 草坡                   |
| 最大持水率/%                                      | $272.29 \pm 30.79^a$ | $279.60 \pm 10.58^a$ |
| 自然含水率/%                                      | $11.05 \pm 6.90^a$   | $23.55 \pm 13.74^a$  |
| 枯落物累积量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^2$ )      | $2.60 \pm 0.61^a$    | $1.18 \pm 0.26^b$    |
| 枯落物最大持水量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) | $6.97 \pm 1.16^a$    | $3.32 \pm 0.85^b$    |
| 枯落物有效拦蓄量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) | $5.65 \pm 0.99^a$    | $2.58 \pm 0.82^b$    |

注:不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

### 2.4 千年桐生态林土壤物理性质

研究结果表明(表 2),千年桐生态林土壤最大持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度的变化规律一致,均表现为随土层的加深而减小。其中 0—10 cm 土层的土壤容重( $1.15 \text{ g/cm}^3$ )最低,显著低于其他土层,而最大持水量( $197.86 \text{ g/kg}$ )、毛管持水量( $141.95 \text{ g/kg}$ )、田间持水量( $117.26 \text{ g/kg}$ )、毛管孔隙度( $41.21\%$ )和总孔隙度( $48.62\%$ )均显著高于其他土层。10—20 cm 土层的毛管持水量是 20—40 cm 土层的 1.76 倍,40—60 cm 土层的 2.42 倍;其田间持水量是 20—40 cm 土层的 2.04 倍,40—60 cm 土层的 2.19 倍。

随着土层深度增加,土壤有效蓄水量和有效水储量均表现为深土层>表土层。其中 10—20 cm 土层土壤有效蓄水量和有效水储量较 0—10 cm 土层略有下降,但两个土层间无显著性差异。而 20—60 cm 土层的土壤有效蓄水量和有效水储量显著高于 0—20 cm 土层。

表 2 千年桐林分不同土层土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties at different soil layers in *A. montana* stand

| 土壤层次  | 0—10 cm              | 10—20 cm             | 20—40 cm             | 40—60 cm             |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 土壤容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )    | $1.15 \pm 0.14^a$    | $1.37 \pm 0.12^b$    | $1.48 \pm 0.09^b$    | $1.46 \pm 0.07^b$    |
| 最大持水量/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )   | $197.86 \pm 43.56^a$ | $102.32 \pm 32.24^b$ | $67.13 \pm 22.47^b$  | $65.27 \pm 35.80^b$  |
| 毛管持水量/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )   | $141.95 \pm 19.77^a$ | $65.38 \pm 23.12^b$  | $37.13 \pm 12.24^c$  | $27.04 \pm 14.86^c$  |
| 田间持水量/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )   | $117.26 \pm 19.65^a$ | $54.07 \pm 22.53^b$  | $26.56 \pm 11.53^c$  | $16.93 \pm 13.51^c$  |
| 毛管孔隙度/%                                     | $41.21 \pm 2.85^a$   | $37.39 \pm 2.42^b$   | $35.60 \pm 1.89^b$   | $34.32 \pm 3.45^b$   |
| 非毛管孔隙度/%                                    | $7.41 \pm 3.71^b$    | $5.96 \pm 2.02^b$    | $5.24 \pm 1.99^b$    | $6.50 \pm 3.77^b$    |
| 总孔隙度/%                                      | $48.62 \pm 5.22^a$   | $43.35 \pm 3.83^b$   | $40.84 \pm 2.26^b$   | $40.82 \pm 2.24^b$   |
| 土壤有效蓄水量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) | $74.10 \pm 37.16^a$  | $59.60 \pm 20.18^a$  | $104.88 \pm 39.80^b$ | $130.01 \pm 75.48^b$ |
| 土壤有效水储量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) | $412.11 \pm 28.53^a$ | $373.94 \pm 24.17^a$ | $712.01 \pm 37.79^b$ | $686.36 \pm 69.01^b$ |

注:不同小写字母代表不同土壤层次下土壤物理性质存在显著差异( $p < 0.05$ )。



## 2.5 千年桐生态林持水能力综合评价

利用隶属函数法并结合各指标的权重对千年桐生态林的枯落物持水量和土壤物理指标进行综合评价。结果表明,土壤毛管孔隙度的综合评价价值较高,而土壤自然含水率的综合评价价值较低。综合评价价值从大到小依次为:毛管孔隙度>土壤有效水储量>总孔隙度>最大持水量>毛管持水量>田间持水量>枯落物最大持水量>枯落物有效拦蓄量>非毛管孔隙度>最大持水率>土壤有效蓄水量>枯落物累积量>自然含水率(表3)。

表3 千年桐林分隶属函数值和综合评价值

Table 3 Subordinate function values and comprehensive evaluation values of *A. montana* stand

| 类型          | 指标                             | $D$   | $W_j$ | $X_\mu$ |
|-------------|--------------------------------|-------|-------|---------|
| 土<br>壤      | 最大持水量/(g·kg <sup>-1</sup> )    | 0.035 | 0.103 | 0.345   |
|             | 毛管持水量/(g·kg <sup>-1</sup> )    | 0.034 | 0.093 | 0.366   |
|             | 田间持水量/(g·kg <sup>-1</sup> )    | 0.031 | 0.086 | 0.355   |
|             | 毛管孔隙度/%                        | 0.068 | 0.141 | 0.477   |
|             | 非毛管孔隙度/%                       | 0.021 | 0.067 | 0.315   |
|             | 总孔隙度/%                         | 0.046 | 0.133 | 0.350   |
|             | 土壤有效蓄水量/(t·hm <sup>-2</sup> )  | 0.017 | 0.067 | 0.259   |
|             | 土壤有效水储量/(t·hm <sup>-2</sup> )  | 0.066 | 0.141 | 0.470   |
| 枯<br>落<br>物 | 枯落物最大持水率/%                     | 0.019 | 0.045 | 0.427   |
|             | 枯落物自然含水率/%                     | 0.002 | 0.006 | 0.335   |
|             | 枯落物累积量/(t·hm <sup>-2</sup> )   | 0.013 | 0.027 | 0.477   |
|             | 枯落物最大持水量/(t·hm <sup>-2</sup> ) | 0.030 | 0.049 | 0.624   |
|             | 枯落物有效拦蓄量/(t·hm <sup>-2</sup> ) | 0.026 | 0.042 | 0.617   |
| 综合评价值       |                                | 0.409 |       |         |

注: $X_\mu$ 为隶属函数值, $W_j$ 为指数权重, $D$ 为综合评价值。

## 3 讨论

千年桐生态林的枯落物持水量和吸水速率与浸水时间的关系符合对数函数和幂函数模型,这与Cheng Xiaoqin等<sup>[14]</sup>的研究结论一致。枯落物持水量说明枯落物潜在的持水能力,而吸水速度则是衡量其持水效率的重要指标,吸水速率反映枯落物在单位时间内可吸持水量大小,吸持量大,表示在短降雨过程中水源涵养功能更强<sup>[15]</sup>。本研究中,千年桐枯落物持水量在浸水0~2 h期间急剧增加,这是由于浸水前期枯落物处于较为干燥的状态,枯落物的枝叶表面或死亡细胞间的水势差较大,外界输入的水分易被枯落物所吸收<sup>[16]</sup>。枯落物持水量在浸水5~24 h增加速度变缓,在浸水24 h达到最大。这说明,随着枯落物浸水时间的增长,枯落物含水率增加,其吸水能力逐渐降低,吸水速率减缓,持水量增加的幅度也减缓,直至持水量达到饱和状态,这与梁晓娇等<sup>[17]</sup>、杨霞等<sup>[18]</sup>

的研究结果一致。研究结果显示,千年桐枯落物持水量始终高于对照,在浸水前中期尤为明显。原因在于:千年桐枯落物内部疏松多孔、表面积大、并伴随少量腐殖质形成,使其能吸纳更多水分,而且其枯落物中的叶枯落物在分解过程中油脂逐渐降低,使其持水率逐渐增大<sup>[14]</sup>。千年桐枯落物质量远高于对照,枯落物储量的不同会使其持水能力存在较大差异。千年桐林内物种多样性更高,枯落物—土壤界面形成多样的微生态环境<sup>[13]</sup>,也会进一步加强枯落物层的持水能力。

枯落物层作为森林水文效应的第二活动层,直接覆盖地表,其疏松的结构具有良好的透水性和持水能力,能够削弱雨滴对土壤的直接冲刷,吸持部分降水,减少入渗到土壤中的水量,减少地表径流,对森林保持水土和涵养水源具有重要作用<sup>[19]</sup>。本研究发现,千年桐林枯落物累积量、枯落物最大持水量、枯落物有效拦蓄量均显著高于CK( $p < 0.05$ ),与樊登星等<sup>[16]</sup>对比有枯落物林分与无枯落物林分差异的结果一致,说明千年桐林枯落物量大,从而能够拦截更多的降水,使得千年桐枯落物层的最大持水量明显大于CK,表明千年桐林对防治林地的水土流失起着重要作用。大气降水在进入林地表层时,一部分降水会被存在于地表的凋落物所吸收、拦蓄,一部分的降水会被蒸发,剩余的部分会下渗进土壤中<sup>[20]</sup>,凋落物长时间浸水的情况并不会存在。因此,凋落物的拦蓄能力主要由有效拦蓄量进行量化<sup>[21]</sup>。千年桐林地枯落物有效拦蓄量(5.65 t/hm<sup>2</sup>)显著高于对照,说明千年桐林对雨水的截流能力较强。随着时间的推移,分解程度高的枯落物通常含有更多的有机质,部分有机质能够吸附和保持水分,使其持水速率逐渐增大。有机质含量增加导致千年桐枯落物层的化学性质发生变化,存在于千年桐枯落物层的这些化学物质有时会与水分发生化学反应,从而增加水分的保持能力,进而增加林分的最大持水量<sup>[22-23]</sup>。

从千年桐生态林的综合评价来看,与土壤孔隙度,特别是毛管孔隙度相关的指标对于提高林分持水性能具有重要影响。土壤孔隙度是森林土壤物理结构的评价指标,其主要由造林树种生物学特性及外界环境共同决定,可较好地反映土壤透气性、入渗性能、持水能力和溶质迁移潜力等<sup>[24-25]</sup>。本文仅对基于枯落物和土壤物理性质的千年桐林分水源涵养能力进行了分析研究。在后续研究中,可考虑将千年桐树冠形态及林冠截留量纳入评价体系,分析改造后的林分综合水文效应。

## 4 结论

(1) 对枯落物持水性能的研究结果表明:在浸水试验的不同时段,千年桐枯落物持水量和吸水速率始终高于对照草坡,枯落物持水量与浸水时间呈显著的对数关系,吸水速率与浸水时间呈显著的幂函数关系。千年桐枯落物累积量、最大持水量以及有效拦蓄量均显著高于对照。

(2) 对千年桐林分 0—60 cm 土层土壤物理性质的分析表明:相比 20—60 cm 土层,0—20 cm 土层具有相对较好的土壤通气和透水性。土壤有效蓄水量和有效水储量则表现为深土层>表土层,20—60 cm 土层的土壤有效蓄水量和有效水储量显著高于 0—20 cm 土层。

(3) 利用隶属函数法并结合各指标的权重对千年桐生态林的枯落物持水量和土壤物理指标进行综合评价,评价值排序为:毛管孔隙度>土壤有效水储量>总孔隙度>最大持水量>毛管持水量>田间持水量>枯落物最大持水量>枯落物有效拦蓄量>非毛管孔隙度>最大持水率>土壤有效蓄水量>枯落物累积量>自然含水率。

## 参考文献 (References)

- [1] 储双双,张兵,莫罗坚,等.林分改造对马占相思林水土和养分保持效能的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):72-77.  
Chu Shuangshuang, Zhang Bing, Mo Luojian, et al. Effects of forest stand treatments on water, soil and nutrient reservation by *Acacia mangium* plantations in South China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(3):72-77.
- [2] 刘政,许文斌,田地,等.南方红壤严重侵蚀地不同恢复年限马尾松人工林生态系统碳储量特征[J].水土保持通报,2019,39(1):37-42.  
Liu Zheng, Xu Wenbin, Tian Di, et al. Characteristics of ecosystem carbon stocks in *Pinus massoniana* plantations with different restoration age on severely eroded red soils in southern China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(1):37-42.
- [3] 韩东苗,张林成,冯茂松,等.柏木低效林不同改造模式中土壤微生物及酶活性的研究[J].华南农业大学学报,2016,37(1):96-103.  
Han Dongmiao, Zhang Lincheng, Feng Maosong, et al. Studies on soil microorganisms and enzyme activities of cypress funebris forest in different transforming patterns [J]. Journal of South China Agricultural University, 2016,37(1):96-103.
- [4] 曾伟,雷江丽,史正军,等.林分改造模式对马占相思森林

群落木本植物更新的影响[J].生态科学,2023,42(1):164-171.

Zeng Wei, Lei Jiangli, Shi Zhengjun, et al. Effects of transformation mode on woody plant regeneration in *Acacia mangium* plantations [J]. Ecological Science, 2023,42(1):164-171.

- [5] 吕远辉,孙同高,黄映荷,等.东江水源林林分改造对林木生长和林地植物多样性的影响[J].现代农业科技,2015(14):140-142.

Lu Yuanhui, Sun Tonggao, Huang Yinghe, et al. Effects on the growth of tree species and undergrowth plant biodiversity by transformation of water-resource forests in Dongjiang Area [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015(14):140-142.

- [6] Wang Bangwen, Wang Yunqiang. Relationships between the characteristics of soil and understory in a *Pinus massoniana* forest in Southern China [J]. Catena, 2019,176:352-361.

- [7] 黄智军,刘青青,颜耀,等.不同郁闭度马尾松林土壤元素生态化学计量特征[J].森林与环境学报,2021,41(5):456-463.

Huang Zhijun, Liu Qingqing, Yan Yao, et al. Soil carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium ecological stoichiometry in *Pinus massoniana* plantations with various canopy densities [J]. Journal of Forest and Environment, 2021,41(5):456-463.

- [8] 王磊.尾巨桉与红锥混交对林下植被及生态系统碳储量和生产力的影响[D].广西南宁:广西大学,2022.

Wang Lei. Effects of mixing *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* and *Castanopsis hystrix* trees on understory vegetation, ecosystem carbon storage and productivity [D]. Nanning, Guangxi: Guangxi University, 2022.

- [9] 胡康,岳辉,梁裕宁,等.南方红壤区自然灾害刚弹性社会评估:以福建省长汀县为例[J].水土保持通报,2023,43(1):272-280.

Hu Kang, Yue Hui, Liang Yuning, et al. Assessment of rigid-elastic-resilient society responses to natural disasters in red soil area of South China: A case study at Changting County, Fujian province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(1):272-280.

- [10] 吕宗晋,卢立国,谢伟东,等.南亚热带滨海沙地天然常绿阔叶林凋落物持水特性[J].广西林业科学,2021,50(4):367-372.

Lyu Zongjin, Lu Liguang, Xie Weidong, et al. Water-holding characteristics of litters in natural evergreen broad-leaved forests on coastal sandy land in south subtropical area [J]. Guangxi Forestry Science, 2021, 50(4):367-372.

- [11] 张缓,穆兴民,高鹏,黄土高原不同立地条件下枯落物蓄积量及持水特征[J].水土保持研究,2021,28(3):45-52.

- Zhang Huan, Mu Xingmin, Gao Peng. Variation of litter accumulation and water holding capacity at different site conditions in the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 45-52.
- [12] 黄旭东, 杨永红, 曹秀文, 等. 白龙江高山林线木本植物组成与地被物和土壤持水特性 [J]. *贵州林业科技*, 2023, 51(2): 60-64.
- Huang Xudong, Yang Yonghong, Cao Xiuwen, et al. Woody plants composition and water-holding characteristics of ground cover and soil in the alpine timberline of Bailong River [J]. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 2023, 51(2): 60-64.
- [13] 张婵, 洪希群, 吴承祯, 等. 干旱胁迫对闽北乡土树种耗水及光合特性的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(1): 212-219.
- Zhang Chan, Hong Xiqun, Wu Chengzhen, et al. Effects of drought stress on water consumption and photosynthetic characteristics of native tree species in northern Fujian [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(1): 212-219.
- [14] Cheng Xiaojin, Bai Yingchen, Zhu Jiang, et al. Effects of forest thinning on interception and surface runoff in *Larix principis-rupprechtii* plantation during the growing season [J]. *Journal of Arid Environments*, 2020, 181: 104222.
- [15] 周长亮, 李惠丽. 接坝地区 3 种典型林分类型枯落物层和土壤层水文效应综合分析 [J]. *林业与生态科学*, 2022, 37(3): 238-245.
- Zhou Changliang, Li Huili. Comprehensive analysis of hydrological effects of litter layer and soil layer of three typical forest types in Dam area [J]. *Forestry and Ecological sciences*, 2022, 37(3): 238-245.
- [16] 樊登星, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京西山不同林分枯落物层持水特性研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(增刊 2): 177-181.
- Fan Dengxing, Yu Xinxiao, Yue Yongjie, et al. Water-holding characteristics of litter layer of different stands in Xishan Mountain in Beijing [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(Suppl.2): 177-181.
- [17] 梁晓娇, 王树力. 阿什河源不同类型红松人工林枯落物及其土壤水文特性 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 140-145, 152.
- Liang Xiaojiao, Wang Shuli. Litter and soil hydrological properties of *Pinus koraiensis* plantations in Ashi River's headstream [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 140-145, 152.
- [18] 杨霞, 陈丽华, 康影丽, 等. 辽东低山区 5 种典型水源涵养林枯落物持水特性 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(9): 2662-2670.
- Yang Xia, Chen Lihua, Kang Yingli, et al. Water-holding characteristics of litter in five typical water conservation forests in low mountainous areas of eastern Liaoning [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(9): 2662-2670.
- [19] 许小明, 易海杰, 何亮, 等. 黄土高原地区林地枯枝落叶层水土保持效应研究进展 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 415-421.
- Xu Xiaoming, Yi Haijie, He Liang, et al. Research advances on water and soil conservation effects of forest litter layer on the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 415-421.
- [20] 陈琦, 刘苑秋, 刘士余, 等. 杉木取代阔叶林后林下水源涵养功能差异评价 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 244-250.
- Chen Qi, Liu Yuanqiu, Liu Shiyu, et al. Evaluation on the difference of understory water conservation function after chinese fir replacing broad-leaved forest [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 244-250.
- [21] 温林生, 邓文平, 彭云, 等. 江西退化红壤区 3 种森林恢复模式的枯落物和土壤表层水文功能研究 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 158-163.
- Wen Linsheng, Deng Wenping, Peng Yun, et al. The hydrological functions of litter and soil surface of three forest restoration modes in degraded red soil area of Jiangxi province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 158-163.
- [22] 刘琳, 熊东红, 张宝军, 等. 拉萨河谷杨树人工林枯落物蓄积特征及持水性能 [J]. *干旱区研究*, 2021, 38(6): 1674-1682.
- Liu Lin, Xiong Donghong, Zhang Baojun, et al. Litter storage and its water-holding capacity of *Populus plantations* in Lhasa River valley [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(6): 1674-1682.
- [23] Bai Yunxing, Zhou Yunchao, An Zhengfeng, et al. Tree species identity and mixing ratio affected the release of several metallic elements from mixed litter in coniferous-broadleaf plantations in Subtropical China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 156143.
- [24] Zhang Yongwang, Wang Kaibo, Wang Jun, et al. Changes in soil water holding capacity and water availability following vegetation restoration on the Chinese Loess Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 9692.
- [25] 娄淑兰, 刘目兴, 易军, 等. 三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响 [J]. *生态学报*, 2019, 39(13): 4844-4854.
- Lou Shulan, Liu Muxing, Yi Jun, et al. Influence of vegetation coverage and topographic position on soil hydrological function in the hillslope of the Three Gorges Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(13): 4844-4854.