

# 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

温林生<sup>1,2</sup>, 邓文平<sup>1,2</sup>, 彭云<sup>1</sup>, 白天军<sup>1,2</sup>, 郑希玲<sup>1,2</sup>, 丁翊东<sup>1</sup>, 刘苑秋<sup>1,2</sup>

(1.江西农业大学林学院,南昌 330045;2.鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复实验室,南昌 330045)

**摘要:**为探讨退化红壤区植被恢复对枯落物层及土壤层的水源涵养功能影响,进一步揭示退化生态系统植被恢复的功能效应,采用室内浸水法和环刀法分别测定了3种恢复模式(木荷纯林、马尾松纯林、马尾松间伐补木荷林)的枯落物层与0—20 cm土层的持水能力。结果表明:(1)马尾松纯林的枯落物层蓄积量最大(7.91 t/hm<sup>2</sup>),持水能力最强(15.39 t/hm<sup>2</sup>),但持水率不如木荷纯林(246.69%)。(2)马尾松纯林的枯落物层有效拦蓄量和最大拦蓄量均为最大(7.75, 10.02 t/hm<sup>2</sup>),木荷纯林的最小(3.83, 5.36 t/hm<sup>2</sup>)。(3)3种恢复模式的枯落物层持水量随浸水时间的变化均遵循对数函数 $Q=a\ln(t)+b$ ,  $R^2>0.90$ ,枯落物持水速率随浸水时间变化均符合幂函数 $V=at^b$ ,  $R^2>0.95$ ,拟合效果均较好。(4)马尾松间伐补木荷林、马尾松纯林、木荷纯林0—20 cm土层的水分最大滞留量分别为10.49, 9.83, 8.28 mm;木荷纯林土壤最大吸持贮水量(38.39 mm)高于马尾松间伐补木荷林(31.13 mm)和马尾松纯林(30.35 mm)。从枯落物最大持水量、有效拦蓄量及土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度多个因素的计算综合推断可知,3种恢复模式中马尾松纯林的枯落物和土壤表层的水源涵养能力最佳,马尾松间伐补木荷林次之,木荷纯林第三。在水土流失较为严重的退化红壤区,种植合适密度的马尾松林,可以通过地表枯落物层有效减缓水土流失。

**关键词:**红壤退化区;植被恢复模式;枯落物;土壤;水源涵养

**中图分类号:**S727.21; S155.2<sup>+</sup>5

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-2242(2020)04-0158-06

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.024

## The Hydrological Functions of Litter and Soil Surface of Three Forest Restoration Modes in Degraded Red Soil Area of Jiangxi Province

WEN Linsheng<sup>1,2</sup>, DENG Wenping<sup>1,2</sup>, PENG Yun<sup>1</sup>, BAI Tianjun<sup>1,2</sup>,

ZHENG Xiling<sup>1,2</sup>, DING Yidong<sup>1</sup>, LIU Yuanqiu<sup>1,2</sup>

(1.College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045;

2.Laboratory for Forest Ecosystem Protection and Restoration in Poyang Lake Basin, Nanchang 330045)

**Abstract:** In order to explore the impact of vegetation restoration on the water conservation function of litter layer and soil layer in degraded red soil region, and further reveal the functional effects of vegetation restoration in degraded ecosystems, water holding capacity of the litter layer and the 0—20 cm soil layer of three recovery modes (*Schima superba* Gardn. et Champ. pure forest, *Pinus massoniana* Lamb. pure forest, *Pinus massoniana* Lamb. replanted with *Schima superba* Gardn. et Champ) were measured by indoor flooding and cutting ring methods. The results showed that: (1) Pure *Pinus massoniana*. forest had the maximum litter accumulation (7.91 t/hm<sup>2</sup>) and water holding capacity (15.39 t/hm<sup>2</sup>), but lower maximum water holding rate than that of *Schima superba*. pure forest (246.69%). (2) The effective and the maximum storage capacity of litter layer in pure *Pinus massoniana* forest was the largest (7.75, and 10.02 t/hm<sup>2</sup>, respectively), while the smallest (3.83, 5.36 t/hm<sup>2</sup>, respectively) was found in *Schima superba* pure forest. (3) The relationship between water holding capacity of litter layer and the immersion time followed the logarithmic function  $Q=a\ln(t)+b$ ,  $R^2>0.90$ ; while the change of water holding rate of litter with the time of immersion fit the power function:  $V=at^b$ ,  $R^2>0.95$ , and the fitting is better. (4) The averaged maximum water retention of 0—20 cm soil layer in *Pinus massonian* are planted with *Schima superba*, *Pinus massoniana* pure forest

收稿日期:2019-12-29

资助项目:江西省林业厅科技创新专项(201808);国家自然科学基金项目(31860236)

第一作者:温林生(1996—),男,硕士研究生,主要从事生态水文及同位素水文研究。E-mail:825906052@qq.com

通信作者:刘苑秋(1963—),女,教授,主要从事森林生态及退化生态系统植被恢复研究。E-mail:liuyq404@163.com

and *Schima superba* pure forest were 10.49 mm, 9.83 mm, and 8.28 mm, respectively. The mean value of soil maximum water absorption and storage capacity was higher in *Schima superba* (38.39 mm) than those in *Pinus massoniana* replanted with *Schima superba* (31.13 mm) and *Pinus massoniana* (30.35 mm). Therefore, it could be inferred that *Pinus massoniana* pure forest had the largest water conservation capacity, followed by *Pinus massoniana* replanted with *Schima superb* and then *Schima superba* pure forest. In the degraded red soil area where soil erosion is more serious, *Pinus massoniana* can provide a compromise solution for reducing soil erosion through the surface litter layer.

**Keywords:** red soil degradation area; vegetation restoration mode; litter; soil; water conservation

红壤在我国分布广泛,涉及 14 个省区,总面积达 203 万 km<sup>2</sup>,占全国土地面积的 21%<sup>[1]</sup>。江西省地处亚热带中部,红壤占全省土壤面积的 71%<sup>[1-2]</sup>。南方红壤水、热充足,是中国林业重要的生产区域,其人工林面积与蓄积量分别占全国的 63.3%,62.3%<sup>[3]</sup>,但早期的过度采伐、毁林垦地、放牧过度等人为活动导致红壤肥力下降、水土流失等问题严重<sup>[4]</sup>。于此,上世纪八十年代开始,我国南方红壤区大力开展以恢复植被、控制水土流失为目标的荒山绿化、水土流失综合治理并取得显著成效<sup>[5]</sup>,如江西兴国湓水流域以植被恢复为主要手段的小流域治理产沙量 2015 年较 2002 减少 56.6%<sup>[6]</sup>。

森林水源涵养效应评价是水文学、生态学等学科的重点研究内容<sup>[7-8]</sup>。森林通过林冠层、枯落物层及土壤层达到消减洪峰、调节径流、拦蓄降水等水源涵养效应<sup>[7-9]</sup>。林地土壤自身的物理性质及有效滞留、蓄水能力反映了土壤对水文过程调节的能力,土壤中毛管水被植物常吸收利用,重力水贮存于非毛管孔隙能有效的减少地面径流,具有较高的水文涵养效应<sup>[10]</sup>。已有研究<sup>[11-12]</sup>表明,枯落物层和土壤层的持水量可占森林总持水量的 85%。森林水源涵养效应在枯落物分解阶段、林龄及林分结构等方面已取得较多研究成果<sup>[13-15]</sup>。但对于严重退化红壤区人工植被恢复枯落物及土壤水文功能效应研究不足,为进一步阐明退化红壤植被恢复的生态过程和效应,本研究以江西泰和严重退化红壤区 1991 年实施植被恢复的长期试验基地为研究区,选择马尾松纯林、木荷纯林、马尾松间伐补木荷林 3 种恢复模式为对象,通过枯落物层的储量、持水能力、拦蓄能力以及土壤的持水特性研究,探讨不同植被恢复模式的枯落物及土壤水文功能效应,为退化红壤区森林植被的水源涵养效益提升与管理提供科学依据。

# 1 研究区概况

试验地位于江西省泰和县(26°43′—27°03′N, 114°27′—115°26′E),属亚热带季风气候,全年均温 18.5℃,年均降水量 1 726 mm。试验区属典型的红壤低丘岗地,最高海拔 131.3 m,最低海拔 74.7 m,地势平坦。土壤为第四季红黏土发育的红壤,由于长期

砍伐、高强度樵采、割茅和过牧,植被破坏,水土流失严重,几乎没有腐殖质层,土层石砾含量较多,区内遍布侵蚀沟,为典型退化裸草地,主要植物种类为丝茅(*Imperata koenigii*)、橘草(*Cymbopogon goeringii*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、野古草(*Arunfinella anomala*)、黄茅(*Heteropogon contortus*)、狗芽根(*Cynodon dactylon*)等草本植物。1991 年为绿化荒山、恢复植被,选用湿地松(*Pinus elliottii*)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、枫香(*Liquidambar formosana* Hance)和木荷(*Schima superba* Gardn.et Champ.)等树种,采取针叶纯林、针阔混交林、阔叶纯林以及针叶林间伐补阔等模式恢复森林植被。

# 2 材料与方法

## 2.1 样地设置

2019 年选取 1991 年栽种的马尾松纯林、木荷纯林和 1991 年栽植马尾松 2006 年间伐补植木荷的混交林 3 种植被恢复模式,各设置 3 个 20 m×20 m 的样地进行调查(表 1)。

## 2.2 枯落物层的蓄积量与自然含水率测定

2019 年 6 月,收集不同恢复模式的枯落物。在样地内沿对角线取 4 个 50 cm×50 cm 的样方,取样、整好后装袋、称其鲜重,然后带至实验室用烘箱(75℃)将不同恢复模式的枯落物烘干至恒重,用于计算枯落物的蓄积量、自然含水率等指标,计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$R_0 = (M_0 - M_F) / M_F \times 100\%$$

式中: $R_0$ 为枯落物的自然含水率(%); $M_0$ 为枯落物的鲜重(g); $M_F$ 为枯落物干重(g)。

## 2.3 枯落物持水过程试验

将烘干后的枯落物装入已吸水饱和的尼龙袋中,以室内浸水法<sup>[13]</sup>测枯落物在 0.25,0.5,1,2,4,6,8,10,12,24 h 时的持水质量,并据此计算最大持水量和最大持水率和分析持水过程。当枯落物吸水到重量不变时,达到上限,此时持水达到饱和(一般在浸水 24 h 后),所吸持水量为枯落物最大持水量;枯落物所持水的重量与枯落物干重的比值,则为最大持水率。

## 2.4 枯落物层的持水、拦蓄能力测定

在林分中,所有枯落物完全发挥作用,最大持水

率与自然含水率的差值再和枯落物重量的乘积为最枯落物最大拦蓄量,枯落物的实际拦蓄量并不能达到理想状态(并不能达到全部枯落物持水最大的状态),实际降雨时,枯落物拦蓄的水量称有效拦蓄量,最大(有效)拦蓄量与枯落物干重的比值为最大(有效)拦蓄率,常以此评价枯落物的水源涵养能力,计算公式为<sup>[16-17]</sup>:

$$M_{\max}=R_{\max}\times M$$
$$W_e=(0.85R_{\max}-R_0)\times M$$
$$Q=W_e/M\times 100\%$$

式中: $M_{\max}$ 为枯落物最大持水量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ); $R_{\max}$ 为枯落物最大持水率(%); $M$ 为枯落物蓄积量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ); $W_e$ 为枯落物有效拦蓄量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ); $R_0$ 为枯落物自然含水率(%); $Q$ 为枯落物有效拦蓄率(%)。

表 1 样地基本情况

| 恢复类型<br>样地 | 编号 | 林龄/<br>a | 密度/<br>(株·hm <sup>-2</sup> ) | 胸径/<br>cm | 树高/<br>m | 土壤<br>类型 | 郁闭度  | 林下植被<br>盖度/% |
|------------|----|----------|------------------------------|-----------|----------|----------|------|--------------|
| 木荷纯林       | H1 | 28       | 2225                         | 11.8      | 8.9      | 红壤       | 0.85 | 5            |
| 木荷纯林       | H2 | 28       | 2150                         | 11.5      | 8.5      | 红壤       | 0.90 | 5            |
| 木荷纯林       | H3 | 28       | 2400                         | 11.0      | 9.2      | 红壤       | 0.90 | 5            |
| 马尾松纯林      | M1 | 28       | 1725                         | 10.2      | 6.8      | 红壤       | 0.60 | 20           |
| 马尾松纯林      | M2 | 28       | 1825                         | 12.5      | 7.9      | 红壤       | 0.80 | 25           |
| 马尾松纯林      | M3 | 28       | 1575                         | 12.9      | 7.8      | 红壤       | 0.75 | 20           |
| 马补阔混交林     | K1 | 28/13    | 975/525                      | 10.8/8.7  | 7.2/6.5  | 红壤       | 0.85 | 10           |
| 马补阔混交林     | K2 | 28/13    | 1000/300                     | 15.7/5.8  | 8.7/6.3  | 红壤       | 0.90 | 5            |
| 马补阔混交林     | K3 | 28/13    | 1025/450                     | 14.1/9.7  | 8.3/7.6  | 红壤       | 0.90 | 20           |

2.5 土壤的水源涵养能力测定

土壤的水源涵养能力的测定采用环刀法。由于土层较为瘠薄,土壤深层石砾较多,在选定样地内,对角线上选取 3 点(坡上、坡中、坡下),分 0—10,10—20 cm 2 个土层深度取土,将其带回实验室测定土壤的物理性质及计算土壤水源涵养能力。土壤的最大吸持贮水量、最大滞留贮水量和饱和贮水量的计算公式<sup>[18]</sup>为:

$$W_1=1000\times P_1\times h$$
$$W_2=1000\times P_2\times h$$
$$W_3=1000\times P_3\times h$$

式中: $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 分别土壤最大吸持贮水量、土壤最大滞留贮水量和土壤饱和贮水量( $\text{g}/\text{kg}$ );土壤  $P_1$ 、 $P_2$ 和  $P_3$ 为土壤的毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度(%); $h$ 为计算土层深度(m)。

2.6 数据分析处理

处理数据,用 Excel 对所有数据的初步整理,SPSS 17.0 分析数据,得出结果后用 Origin 2017 软件作图。

3 结果与分析

3.1 不同恢复模式枯落物水文效应

3.1.1 枯落物层的最大持水量及最大持水率 从表 2 可以看出,马尾松纯林的枯落物自然含水率(60.38%)显著低于木荷纯林和马尾松间伐补木荷林,说明在自然的条件下,马尾松纯林的枯落物较为干燥;枯落物层的最大持水量表现为马尾松纯林( $15.11\text{ t}/\text{hm}^2$ )大于木荷纯林( $10.19\text{ t}/\text{hm}^2$ ),马尾松间伐补木荷林介于二者之间,但无显著差异;在枯落物的最大持水率方面,木荷纯林(246.69%)极显著高于马尾松纯林和马尾松间伐补木荷林。

表 2 不同恢复模式的枯落物层最大持水量及最大持水率

| 恢复模式      | 自然含水率/%       | 最大持水量/( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | 最大持水率/%       |
|-----------|---------------|-----------------------------------------|---------------|
| 木荷纯林      | 104.93±17.10a | 10.19±0.71b                             | 246.69±12.76A |
| 马尾松纯林     | 60.38±6374b   | 15.11±1.48a                             | 195.36±7.80B  |
| 马尾松间伐补木荷林 | 97.75±7.17a   | 12.15±1.10ab                            | 216.12±4.55B  |

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示各恢复类型间差异极显著( $P<0.01$ );不同小写字母表示各恢复类型间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

3.1.2 枯落物蓄积量和拦蓄能力 因该试验区枯落物的分解状态的层次区别并不明显,所以未对枯落物进行分层处理。由表 3 可知,马尾松纯林的枯落物蓄积量为最大值( $7.91\text{ t}/\text{hm}^2$ ),与木荷纯林、马尾松间伐补阔林呈极显著差异,木荷纯林与马尾松间伐补阔林无显著差异。当实际降雨量 $>25\text{ mm}/24\text{ h}$

时,枯落物实际的持水率约为最大持水率的 85%,因而最大拦蓄量和最大持水量并不能够说明枯落物在降雨时的拦蓄效果<sup>[13]</sup>。因此,通常用有效拦蓄率和有效拦蓄量来进一步衡量枯落物对降水的拦蓄效果。由表 3 可知,最大拦蓄率与有效拦蓄率在不同恢复类型下无显著差异;最大拦蓄量与有效拦蓄量表

现为相同规律,即马尾松纯林模式极显著高于其他 2 种恢复模式。

表 3 不同恢复模式的枯落物蓄积量及拦蓄能力

| 恢复模式      | 枯落物蓄积量/<br>(t·hm <sup>-2</sup> ) | 最大<br>拦蓄率/%   | 有效<br>拦蓄率/%   | 最大拦蓄量/<br>(t·hm <sup>-2</sup> ) | 有效拦蓄量/<br>(t·hm <sup>-2</sup> ) |
|-----------|----------------------------------|---------------|---------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 木荷纯林      | 4.79±0.29B                       | 141.76±23.01a | 104.76±21.75a | 5.36±0.70B                      | 3.83±0.69B                      |
| 马尾松纯林     | 7.91±0.85A                       | 134.97±11.50a | 105.66±10.56a | 10.02±0.93A                     | 7.75±0.78A                      |
| 马尾松间伐补木荷林 | 5.68±0.56B                       | 118.36±9.36a  | 85.94±8.93a   | 6.64±0.79B                      | 4.81±0.67B                      |

3.1.3 不同恢复模式枯落物持水过程比较 不同凋落物因其质地不同导致其持水、吸水过程不同,体现在枯落物持水与浸水时间动态关系有差别。

由图 1 可知,3 种恢复模式的枯落物随着浸水时间的增加持水量呈对数增长的趋势,遵循对数方程  $Q=a\ln(t)+b$ 。式中:Q 为枯落物持水量(g/kg);a、b 分别为方程的回归系数、回归方程常数项;t 为浸水时间(h);相关系数  $R^2$  均大于 0.9,即枯落物吸持水量随时间的变化规律为:前期(0~2 h)急剧增大,在 2~12 h 时段,枯落物所吸持水量增加缓慢,在末期(12~24 h)枯落物持水量趋于稳定接近饱和(图 1、表 4)。单位质量枯落物持水量表现为木荷纯林>马尾松间伐补木荷林>马尾松纯林的规律。

枯落物层吸水速率随浸水时间的变化规律满足方程  $V=at^b$ (图 2)。式中:V 为枯落物持水速率(g/(kg·h));a、b 为回归方程常数项;t 为浸水时间(h)。拟合方程见表 5。3 种恢复模式  $R^2$  均大于 0.95,即枯落物层吸水速率与浸水时间的变化表现为初期(0~2 h)急剧下降,中期(2~12 h)缓慢的下降,末期(12~24 h)趋于稳定状态并接近为 0 g/(kg·h),

表明此时枯落物持水近乎于饱和状态,而且 3 种恢复模式之间几乎没有差异。

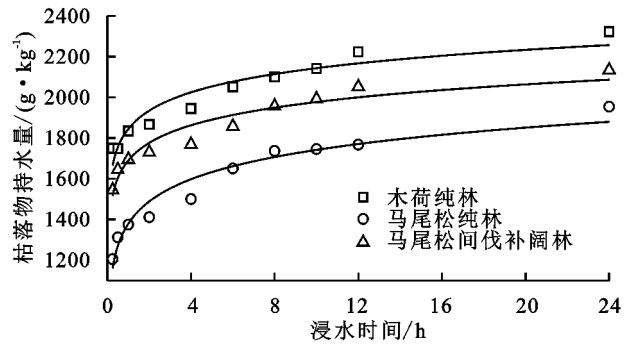


图 1 枯落物持水量与浸水时间的关系

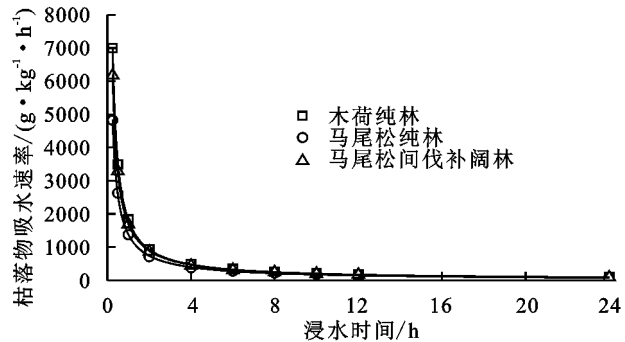


图 2 枯落物层吸水速率与浸水时间的关系

表 4 不同恢复模式的枯落物持水量过程 单位:g/kg

| 恢复模式      | 0.25 h  | 0.5 h   | 1 h     | 2 h     | 4 h     | 6 h     | 8 h     | 10 h    | 12 h    | 24 h    |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 木荷纯林      | 1749.54 | 1747.47 | 1833.99 | 1866.05 | 1944.30 | 2051.35 | 2098.68 | 2141.21 | 2222.59 | 2321.93 |
| 马尾松纯林     | 1205.65 | 1311.76 | 1374.46 | 1411.10 | 1499.73 | 1650.15 | 1735.86 | 1745.32 | 1767.31 | 1953.59 |
| 马尾松间伐补木荷林 | 1544.11 | 1644.74 | 1694.67 | 1729.38 | 1768.06 | 1856.97 | 1956.04 | 1990.97 | 2051.60 | 2133.15 |

表 5 不同恢复模式的枯落物持水量、吸水速率与时间的回归方程

| 恢复模式      | 持水量与浸水时间                 |            | 吸水速率与浸水时间            |            |
|-----------|--------------------------|------------|----------------------|------------|
|           | 回归方程                     | 相关系数 $R^2$ | 回归方程                 | 相关系数 $R^2$ |
| 木荷纯林      | $y=1844.41+129.51\ln(t)$ | 0.92       | $y=1814.97t^{-0.97}$ | 0.98       |
| 马尾松纯林     | $y=1379.28+157.32\ln(t)$ | 0.94       | $y=1380.37t^{-0.90}$ | 0.97       |
| 马尾松间伐补木荷林 | $y=1689.39+124.68\ln(t)$ | 0.93       | $y=1700.06t^{-0.93}$ | 0.98       |

3.2 不同恢复模式土壤水文效应

从表 6 可以看出,同一恢复模式不同土层中马尾松间伐补木荷林的容重表现 0—10 cm<10—20 cm 土层。土壤的最大持水量表现为相同土层不同恢复模式无显著差异;木荷纯林土壤最大持水量为 0—10 cm 土层(179.13 g/kg)>10—20 cm(156.60 g/kg)。木荷纯林 0—10 cm 土层的最小持水量(133.08 g/kg)显著高于其他 2 种恢复模式,10—20 cm 则表现为木荷纯林(120.19 g/kg)>马尾松纯林(101.17 g/

kg)>马尾松间伐补木荷林(87.76 g/kg);木荷纯林 0—10 cm 土层的最小持水量>10—20 cm 土层。木荷纯林的毛管持水量(147.55 g/kg)>马尾松纯林和马尾松间伐补阔林,且 10—20 cm 土层<0—10 cm 土层。10—20 cm 土层的总孔隙度表现为木荷纯林(23.66%)>马尾松纯林(19.51%)。

在不同恢复模式中,表层土壤最大吸持贮水量表现为木荷(38.39 mm)>马尾松间伐补木荷林(31.13 mm)>马尾松纯林(30.35 mm);土壤水分最大滞留

量为马尾松间伐补木荷林(10.49 mm)＞马尾松纯林 (9.83 mm)＞木荷纯林(8.28 mm)(表 7)。

表 6 不同恢复模式下土壤物理性质

| 土层深度/cm | 恢复类型 | 容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 最大持水量/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 最小持水量/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 毛管持水量/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 毛管孔隙度/%      | 非毛管孔隙度/%    | 总孔隙度/%        |
|---------|------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------------|
| 0—10    | H    | 1.30±0.04Aa              | 179.13±5.03Aa               | 133.08±3.35Aa               | 147.55±3.49Aa               | 19.36±0.96Aa | 3.65±0.44Aa | 23.01±1.04Aa  |
|         | M    | 1.34±0.05Aa              | 152.63±5.59Aa               | 101.69±6.60Ba               | 108.18±5.87Ba               | 15.73±1.34Ba | 4.95±0.84Aa | 20.68±1.10Aa  |
|         | K    | 1.36±0.05Ab              | 162.75±12.94Aa              | 98.22±8.74Ba                | 102.49±8.57Ba               | 16.23±1.28Ba | 4.41±0.59Aa | 20.64±1.22Aa  |
| 10—20   | H    | 1.41±0.04Aa              | 156.60±4.92Ab               | 120.19±2.16Ab               | 128.08±3.10Ab               | 19.02±0.36Aa | 4.63±0.84Aa | 23.66±0.82Aa  |
|         | M    | 1.34±0.06Aa              | 148.14±10.30Aa              | 101.17±10.67Ba              | 105.73±9.15Ba               | 14.62±1.41Ba | 4.89±0.59Aa | 19.51±1.22Ca  |
|         | K    | 1.49±0.04Aa              | 143.09±6.99Aa               | 87.76±7.75Ca                | 97.64±7.57Ba                | 14.91±1.58Ba | 6.08±0.82Aa | 20.98±1.20BCa |

注:表内数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示同一土层不同林分间差异显著( $P<0.05$ );不同小写字母表示同林分类型不同土层间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

表 7 不同恢复模式 0—20 cm 土层贮水能力比较

| 恢复类型      | 土壤最大吸持贮水量/mm | 土壤水分最大滞留贮存量/mm | 土壤水分饱和贮水量/mm |
|-----------|--------------|----------------|--------------|
| 木荷纯林      | 38.37±1.31a  | 8.28±0.97a     | 46.67±1.40a  |
| 马尾松纯林     | 30.35±2.72b  | 9.83±1.17a     | 40.19±2.15a  |
| 马尾松间伐补木荷林 | 31.14±2.73b  | 10.49±1.18a    | 41.63±2.25a  |

## 4 讨论

### 4.1 枯落物的蓄积量

森林生态系统中的枯落物蓄积量主要受到输入与输出的制约。本研究的 3 种恢复模式的枯落物蓄积量大小顺序为马尾松林、马尾松间伐补木荷林、木荷纯林(分别为 5.68,7.91,4.79 t/hm<sup>2</sup>),与陈琦等<sup>[19]</sup>、张亚庆等<sup>[20]</sup>研究发现的针叶纯林的枯落物蓄积量大于常绿阔叶林一致。这与针叶林产量大、分解慢密切相关;徐定兰<sup>[21]</sup>研究表明,针叶林年产量(6 518.11 kg/(hm<sup>2</sup>·a))>阔叶林(5 745.34 kg/(hm<sup>2</sup>·a));周林涛等<sup>[22]</sup>、蒲嘉霖等<sup>[23]</sup>研究表明,马尾松的分解速率显著小于阔叶树种的分解速率;且阔叶林具有更短的分解周期是由于凋落物叶片特质直接影响其与环境接触面,进而制约分解界面<sup>[24-25]</sup>。

### 4.2 枯落物持水与拦蓄能力

从枯落物持水过程可以看出,枯落物最大持水率表现为木荷纯林大于马尾松间伐补木荷林大与马尾松纯林。枯落物的主要成分是叶片,叶片吸水能力的差异主要与叶片绒毛、叶片表面蜡质、叶面积相关<sup>[26]</sup>,由于马尾松和木荷的叶片并无绒毛与蜡质,是因为叶片面积的大小导致单位质量的枯落物吸持水量表现木荷纯林大于马尾松间伐补木荷林大于马尾松纯林的结果。但最大持水量却是马尾松纯林(15.11 t/hm<sup>2</sup>)大于木荷纯林、马尾松间伐补木荷林。这与贾剑波等<sup>[17]</sup>、陈琦等<sup>[19]</sup>得到阔叶林的最大持水量、最大持水率都大于针叶林的结论不完全一致。从最大持水量计算公式可以知道最大持水量由最大持水率与蓄积量决定,本研究结果马尾松纯林的蓄积量是 3 种恢复模式中最大的。

雨水在落到林地表面时,一部分降雨会被枯落物层吸持、拦蓄,一部分水分蒸发,剩余部分则渗入到土壤中,枯落物长期浸水的条件不会存在<sup>[19]</sup>,因而拦蓄能力主要是由有效拦蓄量和最大拦蓄量来量化。本研究表明,针叶林马尾纯林的有效拦蓄量(7.75 t/hm<sup>2</sup>)、最大拦蓄量(10.02 t/hm<sup>2</sup>)都显著大于其他 2 种恢复模式,与孙欧文等<sup>[27]</sup>得出针阔混交林>阔叶林>马尾松林的结论不一致。这是由于有效拦蓄量受枯落物蓄积量、自然含水率、最大持水率影响,本研究表明自然状态下,马尾松纯林的枯落物自然含水率较小、蓄积量较大,因而得到与陈琦等<sup>[19]</sup>的研究结果一致,针叶林枯落物的有效拦蓄量大于阔叶林。

### 4.3 土壤水源涵养能力

不同树种以及林分结构会改变土壤的理化性质,从而森林的水源涵养能力会随之改变<sup>[28]</sup>。土壤水分最大吸持贮水量、土壤水分最大滞留贮存量以及土壤水分饱和和贮水量等指标来判别土壤的水源涵养能力<sup>[13-19]</sup>。土壤毛管孔隙以贮存毛管水供植被的生长用水需求<sup>[29]</sup>,对于植物的生长具有重要的意义。本研究表明,木荷纯林的土壤水分最大吸持贮水量(38.39 mm)是 3 种模式中最大的,说明木荷纯林下的土壤毛管水相对充足更利于植被的生长。这与张亚庆等<sup>[20]</sup>得出阔叶林林下土壤的毛管孔隙度大于针叶林的结论一致。土壤非毛管孔隙度能贮存重力水,用土壤最大滞留贮存量来代表土壤减少地表径流的能力,评价水源涵养效果<sup>[30]</sup>。马尾松间伐补木荷林、马尾松纯林、木荷纯林 0—20 cm 土层的水分最大滞留量分别为 10.49,9.83,8.28 mm,说明马尾松纯林在进行间伐补阔后土壤水源涵养效应有改善的趋势。补阔措施改变了马尾松林的土壤物理结构,与“栽针保阔”的透光伐、抚育间伐后的森林水源涵养能力有一定的改善相似<sup>[31-32]</sup>。土壤非毛管孔隙与土壤颗粒直径存在相关,即土壤水分滞留贮存孔隙会随土壤颗粒直径的增大而增大<sup>[19,32]</sup>。

## 5 结论

(1)马尾松纯林的枯落物蓄积量、最大持水量均

最大,但持水率较木荷纯林小;

(2)马尾松纯林的有效拦蓄量、最大拦蓄量均最大,木荷纯林最小;

(3)3 种恢复模式的枯落物层持水量与浸水时间的规律符合对数函数  $Q=a\ln(t)+b, R^2>0.9$ ; 枯落物持水速率与浸水时间遵循  $V=at^b, R^2>0.95$ ;

(4)3 种恢复模式中,土壤最大吸持贮水量均值表现为木荷纯林高于马尾松间伐补木荷林和马尾松纯林;3 种恢复模式的 0—20 cm 表层土壤水分最大滞留量无显著差异。

从枯落物最大持水量、有效拦蓄量以及土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度多个因素的计算综合可知,3 种恢复模式中马尾松纯林的枯落物和土壤表层水源涵养能力最佳,马尾松间伐补木荷林次之,木荷纯林第 3。对于水土流失较为严重的地区,种植合适密度的人工针叶林,可以通过地表枯落物层有效减缓水土流失,提高土壤的水源涵养能力。

参考文献:

[1] 李庆远.中国红壤[M].北京:科学出版社,1983.

[2] 江西土地资源管理局.江西土壤[M].北京:中国农业科技出版社,1991.

[3] 吴卓,戴尔阜,林媚珍.气候变化和人类活动对南方红壤丘陵区森林生态系统影响模拟研究:以江西泰和县为例[J].地理研究,2018,37(11):2141-2152.

[4] 赵其国,黄国勤,王礼献.中国南方森林生态系统的功能、问题及对策[J].森林与环境学报,2015,35(4):289-296.

[5] 黄小春,宋小妹.江西低丘红壤水土流失区植被恢复策略及理论探讨[J].江西林业科技,2008(6):42-47.

[6] 乔雪,李硕,陈伊郴.侵蚀环境下植被恢复的水文效应分析:以江西兴国潦水流域为例[J].水土保持研究,2018,25(5):136-142.

[7] 龚诗涵,肖洋,郑华等.中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J].生态学报,2017,37(7):2455-2462.

[8] 周佳雯,高吉喜,高志球,等.森林生态系统水源涵养服务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.

[9] 王正安,邸利,王彦辉,等.白桦纯林和华北落叶松纯林枯落物层的水文效应:以六盘山叠叠沟小流域为例[J].甘肃农业大学学报,2019,54(3):93-98,107.

[10] 李阳,万福绪.黄浦江中游 5 种典型林分枯落物和土壤水源涵养能力研究[J].水土保持学报,2019,33(2):264-271.

[11] Neris J, Tejedor M, Rodriguez J M, et al. Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain)[J].Catena,2013,108(9):50-57.

[12] 庞梦丽,朱辰光,翟博超,等.河北省太行山区 3 种人工水土保持林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持通

报,2017,37(1):51-56.

[13] 宣立辉,康凡,谷建才等.冀北地区典型林分枯落物层与土壤层的水文效应[J].水土保持研究,2018,25(4):86-91.

[14] 邢亮.辽东山区水源涵养林枯落物持水特性的研究[J].防护林科技,2019(2):11-15.

[15] 韦小茶,周秋文,崔兴芬,等.喀斯特针叶林枯落物层水文效应[J].生态科学,2017,36(4):120-127.

[16] 刘凯,贺康宁,田赟,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.

[17] 贾剑波,刘文娜,余新晓,等.半城子流域 3 种林地枯落物的持水能力[J].中国水土保持科学,2015,13(6):26-32.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 张亚庆,胡慧蓉.滇中磨盘山几种典型林分枯落物及土壤的持水特性[J].江苏农业科学,2019,47(15):296-301.

[21] 徐定兰.官山森林大样地凋落物产量、储量及分解动态[D].南昌:江西农业大学,2019.

[22] 周林涛,黄欣,宋曰钦.不同形态外源氮对马尾松与广玉兰落叶分解的影响[J].湖南林业科技,2017,44(2):34-37.

[23] 蒲嘉霖,刘亮.亚热带森林凋落物分解特征及水文效应[J].水土保持研究,2019,26(6):165-170.

[24] 崔鸿侠,潘磊,黄志霖,等.神农架巴山冷杉林凋落物量养分归还及分解特征[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(1):194-198.

[25] 徐胜,付伟,平琴,等.气候变化对树木凋落物分解的影响研究进展[J].生态学杂志,2017,36(11):3266-3272.

[26] 李晶晶,白岗栓,张蕊.陕北丘陵沟壑区常见树种叶片的吸水性能[J].中国水土保持科学,2013,11(1):99-102.

[27] 孙欧文,蔡建国,吴家森,等.浙江省典型森林类型枯落物及林下土壤水文特性[J].水土保持研究,2019,26(1):118-123.

[28] 王伟平,李绍才,孙海龙,等.杉木和柳杉人工林的土壤理化性质对比[J].四川林业科技,2018,39(5):68-73.

[29] 孙艳红,张洪江,杜士才,等.四面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,2009,23(5):109-112.

[30] 田超,杨新兵,李军,等.冀北山地不同海拔蒙古栎林枯落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2011,25(4):221-226.

[31] 董莉莉.透光抚育对辽东山区“栽针保阔”红松林水文效应的影响[J].辽宁林业科技,2019(5):1-4.

[32] 王磊.抚育间伐对华北落叶松枯落物与土壤持水量的影响研究[J].安徽农学通报,2018,24(16):105-108.