

# 三峡库区不同类型马尾松林枯落物层持水特性比较

袁秀锦<sup>1</sup>, 王晓荣<sup>1,2</sup>, 潘磊<sup>2</sup>, 雷静品<sup>3</sup>, 崔鸿侠<sup>2</sup>, 肖文发<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;  
2. 湖北省林业科学研究院, 武汉 430075; 3. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

**摘要:** 为了研究三峡库区不同林分类型马尾松林的枯落物持水性能, 采用野外调查和室内浸泡法, 对马尾松纯林(I)、马尾松+香椿混交林(II)、马尾松+檫木混交林(III)、马尾松+盐肤木混交林(IV)、马尾松+榿栎+檫木混交林(V)、马尾松+光皮桦混交林(VI)、马尾松+木姜子混交林(VII) 7种马尾松林分类型枯落物持水特性进行了研究。结果表明: 三峡库区不同林分类型马尾松林枯落物储蓄量为 5.39~11.77 t/hm<sup>2</sup>, 枯落物总厚度变化范围为 2.14~3.73 cm, 枯落物总蓄积量排列顺序为 III>IV>VI>II>V>I>VII, 最大持水量变化范围为 11.94~23.42 t/hm<sup>2</sup>, 最大持水率变化范围为 198.53%~266.17%, 7种类型马尾松林枯落物有效拦蓄量范围为 8.34~15.90 t/hm<sup>2</sup>, 有效拦蓄率范围为 135.79%~195.81%, 不同类型马尾松林枯落物有效拦蓄量排序与最大持水量排序相一致, 均表现为 III>V>IV>I>II>VI>VII。而枯落物有效拦蓄率排序除了类型 VII 和类型 II, 其他类型大小顺序与最大持水率保持一致。7种类型马尾松林枯落物持水量随着浸泡时间延长呈对数形式增加, 浸泡 5 min 时, 不同林分类型枯落物吸水速率最大, 浸泡 1 h 后, 不同层次枯落物吸水速率均呈现缓慢下降。吸水速率  $V$  与浸泡时间  $t$  以幂函数拟合效果较好, 吸水速率随着浸泡时间延长以幂函数形式降低。

**关键词:** 三峡库区; 马尾松林; 林分类型; 枯落物; 持水性

**中图分类号:** Q948.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0160-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.025

## Comparison of Water Holding Capacities of Litter in Different Types of *Pinus massoniana* Plantation in the Three Gorges Reservoir Area

YUAN Xiujin<sup>1</sup>, WANG Xiaorong<sup>1,2</sup>, PAN Lei<sup>2</sup>, LEI Jingpin<sup>3</sup>, CUI Hongxia<sup>2</sup>, XIAO Wenfa<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Research Institute of Forest Ecological, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091; 2. Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430075; 3. Key Laboratory of Forest Silviculture, State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

**Abstract:** In order to study the water holding capacity of the litter of *Pinus massoniana* plantation in different forest types in the Three Gorges Reservoir Area, the methods of field survey and soaking extraction was applied to study the water holding capacity of *P. massoniana* plantation (I), *P. massoniana* + *Toona sinensis* mixed forest (II), *P. massoniana* + *Sassafras tzumu* mixed forest (III), *P. massoniana* + *Rhus chinensis* mixed forest (IV), *P. massoniana* + *Quercus aliena* + *Sassafras tzumu* mixed forest (V), *P. massoniana* + *Betula lumini fera* mixed forest (VI), *P. massoniana* + *Litsea pungens* mixed forest (VII). The result showed the litter amount in different types of *P. massoniana* forest in the Three Gorges Reservoir Area ranged from 5.39 t/hm<sup>2</sup> to 11.77 t/hm<sup>2</sup>, the litter thickness ranged from 2.14 cm to 3.73 cm, and the order of total litter amount was III>IV>VI>II>V>I>VII, the maximum water holding quantity ranged from 11.94 t/hm<sup>2</sup> to 23.42 t/hm<sup>2</sup>, the maximum water holding rate ranged from 198.53% to 266.17%. The effective interception of the seven types of *P. massoniana* forest litter ranged from 8.34 to 15.90 t/hm<sup>2</sup>, and the effective interception rate ranged from 135.79% to 195.81%, the effective interception of litter and the maximum water holding quantity, all showed III>V>IV>I>II>VI>VII. However, except for Type VII

收稿日期: 2017-12-03

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2015BAD07B0403)

第一作者: 袁秀锦(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事森林生态研究。E-mail: yuanxiujin93@163.com

通信作者: 肖文发(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事森林生态研究。E-mail: xiaowenf@caf.ac.cn

and Type II, the effective interception rate was consistent with the maximum water holding rate of other types. The water holding capacity of seven types of *P. massoniana* plantation increased logarithmically with the soaking time. After soaking for 5 minutes, the water absorption rate of litter in different forest types was the highest, and it showed slow decline after soaking for 1 hour. The water absorption rate  $V$  and soaking time  $t$  fit better with power function, and the water absorption rate decreased with the prolongation of the soaking time in power function form.

**Keywords:** the Three Gorges Reservoir Area; *Pinus massoniana* plantation; forest types; litter; water holding capacity

生态系统水源涵养的主体是森林,中国森林水源涵养量为 7 432.32 亿  $m^3$ , 约占全国水源涵养量的 60.08%<sup>[1]</sup>。森林生态系统中的枯落物层是水源涵养的第 2 功能层<sup>[2]</sup>, 其具有结构疏松、持水和透水性效果较好,对土壤的渗透性会产生一定的影响<sup>[3]</sup>。在防止土壤侵蚀方面,枯落物可以减少雨水对土壤表面的直接冲刷,防止雨水对土壤的侵蚀;在降低地表径流方面,枯落物层覆盖在地表,在一定程度上增加了土壤表面的粗糙程度,从而使地表径流流速减小<sup>[4-6]</sup>。因此,森林枯落物层在涵养水源和降低水土流失方面发挥着十分重要的作用,一直以来都是研究森林水源涵养功能学者关注的重点<sup>[7-8]</sup>。

长期以来,国内外已经有大量学者对其不同地区及不同林分类型枯落物特性进行研究,在枯落物储量、分解速率、枯落物持水特性、枯落物对降雨截留以及对土壤侵蚀机理和影响地表径流等方面取得了一定成果<sup>[6,9-11]</sup>。针对马尾松林研究,对其与其他树种枯落物持水差异研究较多,而由马尾松林组成的多种林分类型及针阔混交比例对比研究较少。马尾松(*Pinus massoniana*)为我国南方山地主要速生针叶树种,其面积占三峡库区主要森林类型面积的 37.1%,面积为 135.79 万  $km^2$ <sup>[12]</sup>,是三峡库区非常重要的防护林类型之一。然而,该区域马尾松防护林由于树种单一的缘故,总体上呈现分层不明显,林相稀疏,郁闭度低,林下植物种类组成单调,凋落物存量少,生态功能低下等情况<sup>[13]</sup>。如何利用科学经营或改造来不断提高马尾松林林分质量状况,改善水文涵养功能,成为三峡库区水源涵养地一直以来关心的重要问题。已有研究<sup>[14]</sup>表明,马尾松低效林经过皆伐和林窗改造后,改变了地表枯落物组成,提高了林地水源涵养和水土保持功能。混交林能充分利用环境条件、较好改良土壤以及抵抗自然灾害能力等优点<sup>[15]</sup>,混交林相比纯林具有更好的水源能力<sup>[16-17]</sup>。因此,在森林经营中提倡改纯林为混交林,以增强人工林的固土改土功能,提高森林的防御灾害能力及其对土地的可持续利用。

然而,何种混交类型更适合三峡库区马尾松林水

源涵养功能的提升,成为在现实林分经营改造过程中需要探索的问题。基于此,本研究选取三峡库区自然更新下形成的 7 种林分类型马尾松飞播林,即马尾松纯林、马尾松+香椿混交林、马尾松+檫木混交林、马尾松+盐肤木混交林、马尾松+槲栎+檫木混交林、马尾松+光皮桦混交林、马尾松+木姜子混交林,开展不同林分类型枯落物层水文生态功能研究,定量评价马尾松林枯落物涵养水源功能,旨为三峡库区防护林合理的经营与利用提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究地点位于湖北省秭归县三峡库区九岭头林场,地理位置  $110^{\circ}47' E, 30^{\circ}59' N$ , 最低海拔为 175 m, 最高海拔为 2 030.6 m, 年均气温  $16.9^{\circ}C$ , 年降水量 1 000~1 250 mm, 多集中在 4—9 月, 属于亚热带大陆性季风气候。林场属于大巴山山系荆山余脉, 位于山脉西坡, 山脉南北走向, 平均坡度为  $31^{\circ}$ , 土壤类型主要为黄壤和黄棕壤, 样地森林类型主要是 70 年代马尾松飞播林, 主要树种为马尾松(*Pinus massoniana*)、香椿(*Toona sinensis*)、槲栎(*Quercus aliena*)、檫木(*Sassafras tzumu*)、光皮桦(*Betula luminifera*)、木姜子(*Litsea pungens*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)等, 其中马尾松为主要优势树种。林下灌木主要有宜昌荚蒾(*Viburnum erosum* Thunb.)、木姜子(*Litsea pungens*)、高粱泡(*Rubus lambertianus*)、粉花绣线菊(*Spiraea japonica*)、美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)、白叶莓(*Rubus in-nominatus*)等, 林下草本植物主要有华东蹄盖蕨(*Athyrium niponicum*)、珠芽狗脊(*Woodwardia prolifera*)、紫花堇菜(*Viola grypoceras*)、鸡矢藤(*Paederia scandens*)、三脉紫菀(*Aster ageratoides*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)、野青茅(*Deyeuxia arundinacea*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 枯落物收集

2017 年 5 月,在秭归县九岭头林场选择立地条件相对一致,且长期未经过人类干扰的马尾松林分类

型,按照林分混交类型和混交程度,选取马尾松纯林、马尾松+香椿混交林、马尾松+檫木混交林、马尾松+盐肤木混交林、马尾松+榿栎+檫木混交林、马尾松+光皮桦混交林、马尾松+木姜子混交林 7 种林分类型,各设置一个 20 m×20 m 的标准样地。2017 年 8 月中旬,测定各样地内树木的胸径、树高、冠幅、林分郁闭度等指标(表 1),同时将每个样地划分成 4 个 10 m×10 m

的小样方,在每个 10 m×10 m 的小样方内设置 1 个 0.5 m×0.5 m 的小样方,采用梅花形选取 5 个点,按照枯落物未分解和半分解状态划分层,并分别测定不同层次的分厚度及总厚度。随后,按半分解层和未分解层保持原样收集枯落物,随即带回室内称其自然重量,在 65 ℃ 烘箱中烘制 48 h 至恒重,并称其重量,以计算单位面积枯落物蓄积量。

表 1 样地基本概况

林分类型	林龄/ a	海拔/ m	坡向	土壤类型	土壤厚度/cm	郁闭度	平均树高/m	平均胸径/cm	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )
I	47	1232	西北	黄壤	120	0.6	13.4	19.20	950
II	47	1206	西北	黄壤	120	0.7	11.1	14.08	1300
III	47	1189	西北	黄壤	120	0.7	11.5	13.25	1775
IV	47	1172	西北	黄壤	120	0.6	9.5	12.70	1750
V	47	1170	西北	黄壤	120	0.6	9.8	12.71	1175
VI	47	1262	西北	黄壤	120	0.7	8.7	11.40	1700
VII	47	1217	西北	黄壤	120	0.7	10.4	13.14	1225

注: I 为马尾松纯林; II 为马尾松+香椿混交林; III 为马尾松+檫木混交林; IV 为马尾松+盐肤木混交林; V 为马尾松+榿栎+檫木混交林; VI 为马尾松+光皮桦混交林; VII 为马尾松+木姜子混交林。下同。

## 2.2 枯落物持水能力的测定

枯落物持水量、吸水速率和持水过程一般采用室内浸泡法<sup>[11]</sup>。将烘干至恒重的未分解层和半分解层的枯落物分别原状装入自制尼龙袋(100 目尼龙材质),浸入盛有清水的容器中,分别浸泡 0.08, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24 h 后取出,静置 5 min,直至不滴水为止,迅速称其湿重。每次称取的枯落物湿重差值  $\Delta W_{ij}$ ,即为第  $i$  种枯落物在  $(j+1)-j$  浸泡时间段内的储水量,计算公式为:

$$\Delta W_{ij} = W_{i(j+1)} - W_{ij} \quad (1)$$

式中: $\Delta W_{ij}$  为第  $i$  种枯落物在  $(j+1)-j$  浸泡时间段内的储水量(g/kg); $W_{i(j+1)}$  为第  $i$  种枯落物  $j+1$  时间段的湿重(g); $W_{ij}$  为第  $i$  种枯落物  $j$  时间段的湿重(g)。

用  $W_{ij}$  再除以第  $i$  种枯落物相应时间段内的浸泡时间  $\Delta t_{ij}$ ,即为该枯落物此时间段吸水速率  $\Delta S_{ij}$ ,计算公式为:

$$\Delta S_{ij} = \Delta W_{ij} / \Delta t_{ij} \quad (2)$$

式中: $\Delta S_{ij}$  为第  $i$  种枯落物在  $(j+1)-j$  浸泡时间段内的吸水速率(g/(kg·h)); $\Delta t_{ij}$  为第  $i$  种枯落物  $(j+1)$  时段与  $j$  时段的时间差(h)<sup>[18]</sup>。

一般采用有效拦蓄量来估算枯落物对降雨的实际拦蓄量,计算公式为<sup>[19-20]</sup>:

$$P = 0.85R_m - R_o \quad (3)$$

$$M = (0.85R_m - R_o) \times W$$

式中: $P$  为有效拦蓄率(%); $R_m$  为最大持水率(%); $R_o$  为自然含水率(%); $M$  为有效拦蓄量(t/hm<sup>2</sup>); $W$

为枯落物储量(t/hm<sup>2</sup>)。

枯落物最大持水率=(浸泡后的枯落物质量-干质量)/干质量×100%

## 2.3 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 17.0 软件进行数据分析。用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著法(LSD)检验其差异显著性,对拟合的多元回归关系经统计学检验得到拟合度参数  $R^2$ ,并在  $P < 0.05$  水平上检验相关系数的显著性。

## 3 结果与分析

### 3.1 枯落物储量

由表 2 可知,不同林分类型马尾松林枯落物厚度排列顺序为 I > III > II > VI = V > IV > VII,枯落物总厚度变化范围为 2.14~3.73 cm,马尾松纯林枯落物厚度最大,为 3.73 cm,马尾松+木姜子混交林最小,为 2.14 cm。不同林分类型马尾松林未分解层厚度、半分解层厚度、总厚度均存在显著差异( $P < 0.05$ ),各类型马尾松林枯落物储量从大到小为 III > IV > VI > II > V > I > VII,最大值出现在马尾松+檫木混交林(11.77 t/hm<sup>2</sup>),最小值为马尾松+木姜子混交林(5.39 t/hm<sup>2</sup>),其他林分类型枯落物储量则相差不大。枯落物半分解层和未分解层储量占总储量的比例不同,未分解层占总储量百分比的变化范围为 25.0%~49.0%,半分解层占总储量百分比的变化范围为 51.0%~75.0%,各类型均表现出半分解层储量 > 未分解层储量,说明马尾松飞播林以半分解层为主。不同林分类型的马尾

松林的半分解层枯落物储量和总储量相差并不显著 ( $P>0.05$ ),而未分解层则差异性显著 ( $P<0.05$ ),这

可能与不同林分类型的密度、林分结构、混交树种枯落物种类不同有关。

表2 不同林分类型枯落物储量

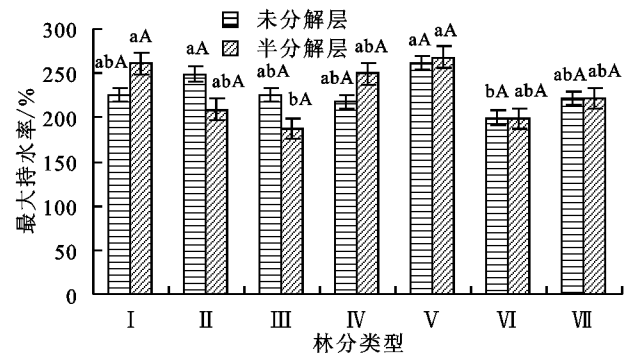
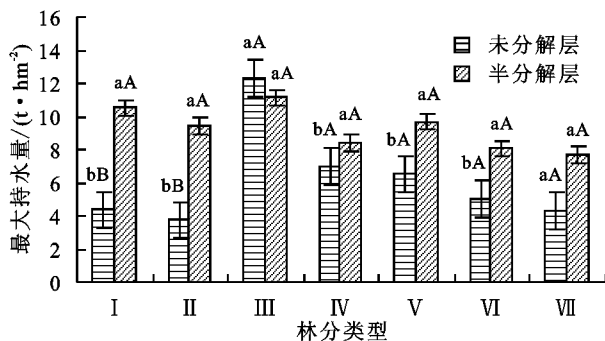
林分类型	未分解层		半分解层		总厚度/cm	总储量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )
	厚度/cm	储量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	厚度/cm	储量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )		
I	1.30±0.55abc	1.99±0.73b	2.43±0.82a	4.04±1.53a	3.73±1.21a	6.04±2.23a
II	1.45±0.63ab	1.59±0.82b	1.88±0.78ab	4.76±1.77a	3.33±1.04ab	6.35±2.50a
III	1.65±0.83a	5.54±1.65a	1.93±1.1ab	6.23±3.29a	3.58±1.81a	11.77±4.93a
IV	0.95±0.56bc	3.29±1.74b	1.25±0.99b	3.42±1.59a	2.20±1.48b	6.71±3.29a
V	1.05±0.63bc	2.48±1.34b	1.15±0.83b	3.64±1.17a	2.20±1.36b	6.12±2.50a
VI	1.06±0.48bc	2.47±0.42b	1.82±0.85ab	3.93±1.45a	2.88±1.18ab	6.40±1.84a
VII	0.77±0.38c	1.93±0.44b	1.37±0.64b	3.46±1.08a	2.14±0.99b	5.38±1.32b

注:表中数据为平均值±标准误差;同列数据不同小写字母表示林分间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

### 3.2 枯落物持水性能及有效拦蓄量

3.2.1 枯落物层持水能力 由图1可知,不同林分类型马尾松林总的最大持水量、最大持水率均存在差异,最大持水量变化范围为11.94~23.42  $t/hm^2$ ,马尾松+檫木混交林的最大持水量最大(23.42  $t/hm^2$ ),最小为马尾松+木姜子(11.94  $t/hm^2$ );最大持水率为198.53%~266.17%,马尾松+榿栎+檫木混交林的最大持水率最大(266.17%),马尾松+光皮桦混交林最大持水率最小(198.53%)。各类型马尾松林枯落物最大持水量大小排列为III>V>IV>I>II>VI>VII,最大持水率的大小排列顺序为V>

I>IV>VII>II>III>VI,可见枯落物最大持水量与枯落物储量以及枯落物最大持水率排列均不相同。不同林分类型马尾松林枯落物未分解层最大持水量差异显著 ( $P<0.05$ ),半分解层最大持水量差异不显著 ( $P>0.05$ ),而半分解层和未分解层的最大持水率差异均不显著,同时,除马尾松+檫木混交林外,其余林分半分解层的最大持水量均高于未分解层最大持水量,这与枯落物的蓄积量规律一致,不同层次的最大持水率没有表现出明显的规律性。总之,枯落物持水能力与枯落物的分解层程度和蓄积量有关,分解程度越大,蓄积量越多,枯落物的持水能力越强。



注:不同小写字母代表不同林分间差异显著 ( $P<0.05$ );不同大写字母代表同一林分不同分解层差异显著 ( $P<0.05$ )。

图1 不同类型马尾松林不同层次枯落物的持水能力

3.2.2 枯落物层有效拦蓄能力 一般而言,浸泡法是最常用的模拟降雨的方法,所得最大持水量和最大持水率并不能代表自然降水条件下枯落物的蓄水能力,因此常用有效拦蓄量表示枯落物的降水拦蓄能力<sup>[21-23]</sup>。由图2可知,7种类型马尾松人工林的枯落物有效拦蓄量范围为8.34~15.90  $t/hm^2$ ,马尾松+檫木混交林的有效持水量最大(15.90  $t/hm^2$ ),马尾松+木姜子混交林则最小(8.34  $t/hm^2$ );马尾松人工林的有效拦蓄率范围为135.79%~195.81%。马尾松+榿栎+檫木混交林的有效拦蓄率最大(195.81%),马尾松+光皮桦混交林有效拦蓄率最小(135.79%)。马尾松有效拦蓄量的从

大到小顺序为III>V>IV>I>II>VI>VII,其与最大持水量变化一致,有效拦蓄率的从大到小顺序为V>I>IV>II>VII>III>VI,除了类型VII和类型II,其他类型大小顺序与最大持水率保持一致。除了类型III之外,其他林分类型枯落物半分解层的有效拦蓄量均大于未分解层的有效拦蓄量,不同类型马尾松林的未分解层有效拦蓄量差异显著 ( $P<0.05$ ),半分解层有效拦蓄量差异不显著 ( $P>0.05$ ),除了类型I和类型IV之外,其他林分类型未分解层的有效拦蓄率均大于半分解层有效拦蓄率,但未分解层的有效拦蓄率和半分解层的有效拦蓄率差异均不显著 ( $P>0.05$ )。

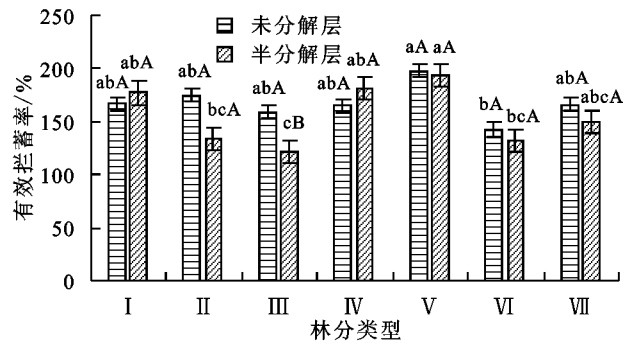
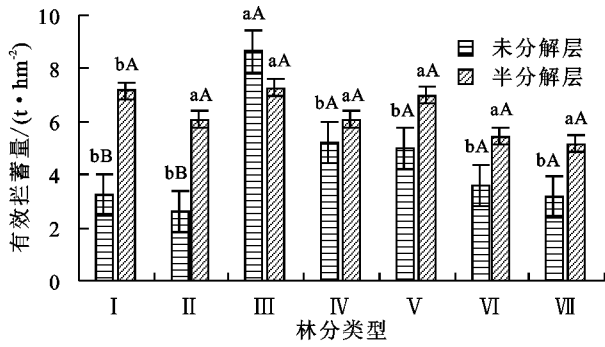


图 2 不同类型马尾松林不同枯落物层的有效拦蓄能力

3.3 枯落物持水过程

由图 3 可知,所有不同林分类型不同层次马尾松林持水量随着浸泡时间延长而增加,浸泡初期,枯落物比较干燥,枯落物持水量迅速增加,0~4 h 枯落物持水量增加最快,浸泡 4~12 h 持水量增加逐渐减慢,浸泡 12 h 后,虽然吸水没有达到动态平衡,但是枯枝落叶中的空隙被静水占据,增加浸泡时间,吸水仍在进行,但是速率显著减小<sup>[24]</sup>,24 h 已经达到饱和。0~4 h 内,不同林分类型马尾松林的未分解层和半分解层排列顺序不同,未分解层持水量的排列顺序为 V>II>III>I>IV>VI>VII,半分解层持水量的排列顺序为 I>V>IV>VII>II>VI>III。在浸泡 24 h 后,除了未分解层的 VII 和半分解层的 I 之外,其余各林分在浸泡 24 h 后,未分解层和半分解层持水量排列顺序与 0~4 h

浸水期间持水量的排列方式一致。

同时,7 种林分类型马尾松林未分解层和半分解层的吸水速率均随着浸泡时间延长而减小,均呈现反“J”形。浸泡 5 min 时,不同林分类型枯落物的未分解层和半分解层吸水速率最大,在 0~1 h 内,枯落物的吸水速率呈现直线下降,浸泡 1 h 后,枯落物的吸水速率下降缓慢,在浸泡 12 h 后,枯落物的吸水速率基本趋于 0,这与吕刚等<sup>[8]</sup>、张卫强等<sup>[10]</sup>研究结果一致。不同类型未分解层平均吸水速率排列为 V>II>III>I>IV>VI>VII,最大值为 1 772.33 g/(kg·h),最小值为 1 287.02 g/(kg·h),半分解层平均吸水速率排列为 I>V>IV>VII>II>VI>III,最大值为 2 087.25 g/(kg·h),最小值为 1 363.99 g/(kg·h)。

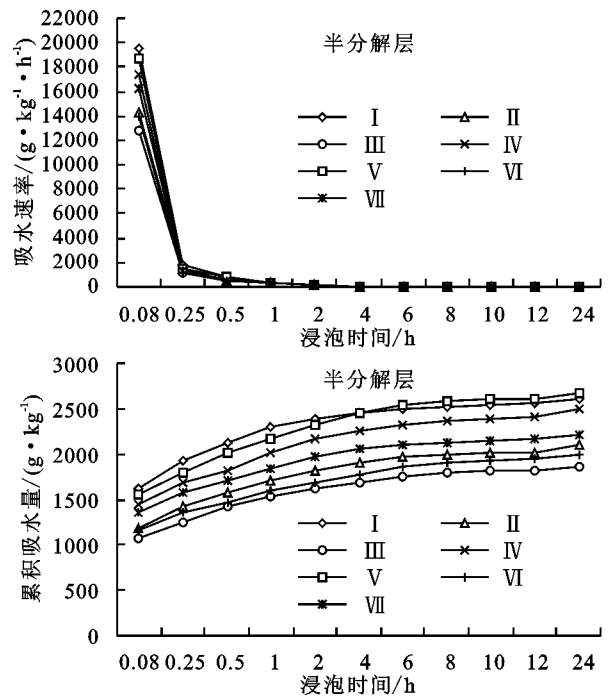
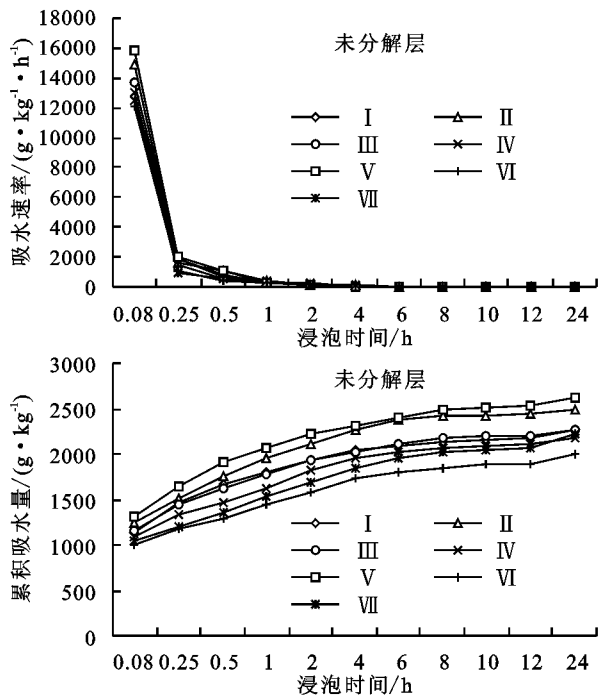


图 3 不同类型马尾松林不同枯落物层的持水过程

对 7 种不同林分类型马尾松林的持水量  $Q$  与浸泡时间  $t$  进行回归分析,7 种林分类型的马尾松林的半分解层和未分解层的持水量与浸泡时间  $t$  用对数函数模拟效果较好,持水量随着浸泡时间的增加以对数方式进行增加(表 3),拟合的关系式为: $Q =$

$a \ln t + b$ 。式中: $Q$  为枯落物持水量(g/kg); $t$  为浸泡时间(h); $a$  为方程系数, $b$  为方程常数项。对 7 种林分类型不同层次马尾松林的吸水速率  $V$  与浸泡时间  $t$  以幂函数拟合效果较好,吸水速率  $V$  随着浸泡时间  $t$  延长以幂函数减小,关系式为: $V = at^b$ 。式中: $V$

为枯落物吸水速率( $\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ );  $t$  为浸泡时间( $\text{h}$ );  $a$  为方程系数;  $b$  为指数。

表3 不同类型马尾松林持水量、吸水速率与浸泡时间的关系

层次	林分类型	持水量 $Q$ 与浸泡时间 $t$ 关系		吸水速率 $V$ 与浸泡时间 $t$ 的关系	
		关系式	相关系数	关系式	相关系数
未分解层	I	$Q=191.35 \ln t + 1735.10$	0.9714	$V=200.21x^{-1.6758}$	0.9996
	II	$Q=233.20 \ln t + 1895.21$	0.9730	$V=17.79x^{-2.6634}$	0.9988
	III	$Q=200.31 \ln t + 1729.98$	0.9796	$V=175.96x^{-1.7253}$	0.9997
	IV	$Q=202.77 \ln t + 1623.77$	0.9890	$V=177.82x^{-1.8644}$	0.9994
	V	$Q=227.02 \ln t + 1993.07$	0.9771	$V=196.16x^{-1.7388}$	0.9991
	VI	$Q=184.87 \ln t + 1449.44$	0.9946	$V=66.97x^{-2.0562}$	0.9992
	VII	$Q=218.56 \ln t + 1537.51$	0.9959	$V=58.96x^{-2.1207}$	0.9981
半分解层	I	$Q=167.41 \ln t + 2181.01$	0.9370	$V=111.44x^{-2.0639}$	0.9995
	II	$Q=159.10 \ln t + 1657.95$	0.9769	$V=100.39x^{-1.9902}$	0.9996
	III	$Q=144.37 \ln t + 1481.91$	0.9778	$V=69.54x^{-2.0955}$	0.9987
	IV	$Q=187.96 \ln t + 1964.30$	0.9851	$V=68.68x^{-2.2241}$	0.9993
	V	$Q=205.49 \ln t + 2129.60$	0.9818	$V=78.28x^{-2.2006}$	0.9987
	VI	$Q=150.81 \ln t + 1569.87$	0.9914	$V=57.05x^{-2.2102}$	0.9994
	VII	$Q=154.94 \ln t + 1800.36$	0.9771	$V=59.82x^{-2.2528}$	0.9994

## 4 讨论

枯落物储存量受到枯落物类型、微生物和在地表的时间影响外,枯落物储量还受自身特性、外界环境和林分结构以及人类活动的影响<sup>[25]</sup>。三峡库区不同林分类型的马尾松林枯落物厚度和储存量存在差异( $P < 0.05$ ),马尾松纯林枯落物厚度最大,为 3.73 cm,马尾松+木姜子混交林枯落物厚度最小为 2.14 cm,原因可能是针叶树含有油脂较多,分解较慢<sup>[26]</sup>;储存量以马尾松+檫木混交林(针阔混交比为 1:1)最大,以马尾松+木姜子混交林(针阔混交比为 3:2)最小,混交比类似,但其枯落物储存量差异显著( $P < 0.05$ ),可能与树种有关,也可能与林分密度密切相关,马尾松+檫木混交林林分密度为 1 775 株/ $\text{hm}^2$ ,而马尾松+木姜子混交林林分密度为 1 225 株/ $\text{hm}^2$ ;马尾松+檫木(混交比 1:1)和马尾松+盐肤木(7:3)林分密度分别为 1 775,1 750 株/ $\text{hm}^2$ ,相差不大,且平均胸径分别为 13.25,12.70 cm 基本相等,但其储量相差较大,这可能由于檫木林枯落物丰富,枯枝落叶分解快有关<sup>[27]</sup>。各个类型马尾松林枯落物的半分解层和未分解层的储量占总储量的比例不同,未分解层占总储量比例范围为 25.0%~49.0%,半分解层占总储量比例范围为 51.0%~75.0%,且各类型马尾松林不同层次枯落物储量均为半分解层储量>未分解层储量,这与前人<sup>[3,8,11]</sup>研究结果一致,说明马尾松飞播林以半分解层为主。

持水量可以反映林分单位面积内枯落物总量的持水特性,7 种类型马尾松人工林,除了林分类型 III 之外,半分解层最大持水量均高于未分解层最大持水量,与枯落物的储量规律一致,说明枯落物持水量与

储量有关,受枯落物储量影响,枯落物有效拦蓄量从大到小顺序与其最大持水量一致,这与梁晓娇等<sup>[3]</sup>研究一致,大小顺序为 III>V>IV>I>II>VI>VII;持水率体现不同类型马尾松人工林枯落物持水能力的差异,除了类型 VII 和类型 II,马尾松有效拦蓄率大小顺序与最大持水率保持一致,其中以马尾松+榿栎+檫木混交林(针阔混交比 2:7)最大,已有研究<sup>[28-29]</sup>表明,物种多样性对枯落物分解有正的“非加性效应”,可能由于类型 V 物种较多或阔叶树所占比例较大,导致分解能力强,结构比较疏松,持水能力较强。在本次研究的针阔混交林中,以马尾松+檫木(针阔混交比 1:1)枯落物持水性能最好,已有研究<sup>[30-32]</sup>表明,檫木与巨桉、柏木、杉木等树种混交,能有效的增进土壤肥力,能改善土壤容重、持水量、孔隙状况,在对马尾松科学经营或改造中,可以考虑马尾松和檫木混交,进而提高马尾松生态水文功能。

## 5 结论

(1)三峡库区不同林分类型的马尾松林枯落物储量为 5.39~11.77 t/ $\text{hm}^2$ ,枯落物总厚度变化范围为 2.14~3.73 cm;枯落物总储量大小排列为 III>IV>VI>II>V>I>VII,各个类型马尾松林枯落物的半分解层和未分解层的储量占总储量的比例不同,所有林分类型的半分解层储量>未分解层储量。

(2)除林分类型 III 外,半分解层的最大持水量均高于未分解层最大持水量,与枯落物的储量规律一致,说明枯落物持水量与蓄积量有关。7 种类型马尾松人工林的枯落物有效拦蓄量范围为 8.34~15.90 t/ $\text{hm}^2$ ,马尾松人工林的有效拦蓄率范围为 135.79%~195.81%,马尾松有效拦蓄量从大到小顺序与其最大

持水量一致,均为 III > V > IV > I > II > VI > VII, 马尾松有效拦蓄率从大到小顺序除类型 VII 和类型 II, 其他类型大小顺序与最大持水率保持一致。

(3) 所有不同林分类型不同层次马尾松林的持水量随着浸泡时间的增加而增加, 用对数函数拟合效果较好, 拟合的关系式为  $Q = a \ln t + b$ , 未分解层和半分解层的吸水速率均随着浸泡时间延长而减小, 均呈现反“J”形, 以幂函数模拟效果较好, 关系式为  $V = at^b$ 。

(4) 7 种林分类型马尾松林以马尾松 + 檫木 (针阔混交比 1 : 1) 枯落物持水性能最好。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 韩路, 王海珍, 吕瑞恒, 等. 塔里木河上游不同森林类型枯落物的持水特性[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 96-101.
- [3] 梁晓娇, 王树力. 阿什河源头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.
- [4] Vitale M, Savi F, Daniela B, et al. Modeling of early stage litter decomposition in Mediterranean mixed forests: Functional aspects affected by local climate [J]. Journal of Biogeosciences and Forestry, 2014, 8(4): 517-525.
- [5] 魏强, 张广忠, 凌雷, 等. 甘肃兴隆山主要森林类型凋落物及土壤层的蓄水功能[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(2): 78-84.
- [6] 常雅军, 曹靖, 马建伟, 等. 秦岭西部山地针叶林凋落物持水特性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2346-2351.
- [7] Beasley R S, Granillo A B. Soil protection by natural vegetation on clearcut forest land in Arkansas [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1985, 40(4): 379-382.
- [8] 吕刚, 傅昕阳, 李叶鑫, 等. 露天煤矿排土场复垦区不同植被类型枯落物持水特性研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 146-152.
- [9] 张洪江, 程金花, 史玉虎, 等. 三峡库区 3 种林下枯落物储量及其持水特性[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 55-58.
- [10] 张卫强, 李召青, 周平, 等. 东江中上游主要森林类型枯落物的持水特性[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 130-134.
- [11] 王晓荣, 唐万鹏, 刘学全, 等. 丹江口湖北库区不同林分类型枯落物储量及持水性能[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 244-248.
- [12] 雷静品. 三峡库区马尾松、柏木林木生长及健康经营研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [13] 唐万鹏, 潘磊, 崔鸿侠, 等. 三峡库区马尾松天然林林分结构特征分析[J]. 林业科学研究, 2015, 28(5): 681-685.
- [14] 张海涛, 宫渊波, 付万权, 等. 川南马尾松低效人工林不同改造模式后枯落物持水特性分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 136-141.
- [15] 赵素美. 混交林的优势与营造技术[J]. 现代农村科技, 2017(6): 50.
- [16] 鲁绍伟, 高琛, 李少宁, 等. 北京市松山不同海拔油松林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 1-6.
- [17] 王威, 郑小贤, 宁杨翠. 北京山区水源涵养林典型森林类型结构特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(1): 60-63.
- [18] 张洪江, 程金花, 史玉虎, 等. 三峡库区 3 种林下枯落物储量及其持水特性[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 55-58.
- [19] 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.
- [20] 胡晓聪, 黄乾亮, 金亮. 西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 55-63.
- [21] 胡淑萍, 余新晓, 岳永杰. 北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 146-150.
- [22] 徐娟, 余新晓, 席彩云. 北京十三陵不同林分枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 189-193.
- [23] 胡晓聪, 黄乾亮, 金亮. 西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 55-63.
- [24] Pyle C, Brown M M. Heterogeneity of wood decay classes within hardwood logs [J]. Forest Ecology & Management, 1999, 114(2/3): 253-259.
- [25] 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.
- [26] 孙浩, 杨民益, 余杨春, 等. 宁夏六盘山几种典型水源涵养林林分结构与水文功能的关系[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(1): 10-18.
- [27] 王景燕, 龚伟, 胡庭兴, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后的土壤水源涵养功能[J]. 浙江农林大学学报, 2007, 24(5): 569-574.
- [28] Liu P, Huang J, Sun O J, et al. Litter decomposition and nutrient release as affected, by soil nitrogen availability and litter quality in a semiarid, grassland ecosystem [J]. Oecologia, 2010, 162(3): 771-780.
- [29] Liu P, Sun O J, Huang J, et al. Nonadditive effects of litter mixtures on decomposition and correlation with initial litter N and P concentrations in grassland plant species of northern China [J]. Biology & Fertility of Soils, 2007, 44(1): 211-216.
- [30] 赵燕波, 纪托未, 张丹桔, 等. 3 个树种与巨桉混交土壤理化性质、凋落物量和养分含量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(5): 948-953.
- [31] 张焕朝, 俞元春. 杉木、檫木、柏木等林分下土壤微量元素状况[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1995, 19(2): 6-12.
- [32] 姜培坤, 钱新标. 杉木檫木根际土壤生化特性比较分析[J]. 浙江农林大学学报, 1995, 12(1): 1-5.