# 和林格尔县4种人工林枯落物水文效应研究*

田 菊[1,2] 李国婧[1] 刘 洋[2]
（1. 内蒙古农业大学 / 植物逆境生理与分子生物学自治区重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；
2. 内蒙古和盛生态科技研究院有限公司，内蒙古 呼和浩特 011517）

**摘要** 以呼和浩特市和林格尔县盛乐经济园区4种林分类型（油松 *Pinus tabulaeformis*、樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 分别与沙棘 *Hippophae rhamnoides* 和山杏 *Armeniaca sibirica* 针灌混交）为研究对象，采用样地调查和室内浸泡法，研究枯落物的水文效应。结果表明：（1）4种人工林枯落物储量范围为10.69~10.87 t/hm$^2$，其中枯落物储量最大的是樟子松、山杏针灌4:1带行状混交林（1.5 m×5 m），为10.87 t/hm$^2$，油松、沙棘针灌4:1带行状混交林（1.5 m×5 m）最小，为10.69 t/hm$^2$。（2）4种林分类型下的半分解层枯落物储量均大于未分解层；最大持水量方面油松、沙棘针灌4:1带行状混交林（1.5 m×5 m）（10.05 t/hm$^2$）＞油松、沙棘针灌4:1带行状混交林（2 m×4 m）（9.99 t/hm$^2$）＝樟子松、山杏针灌4:1带行状混交林（1.5 m×5 m）（9.99 t/hm$^2$）＞樟子松、沙棘针灌4:1带行状混交林（2 m×4 m）（9.96 t/hm$^2$）。（3）平均最大持水率在4个林分类型之间呈现规律是油松、沙棘针灌4:1带行状混交林（1.5 m×5 m）（187.63%）＞油松、沙棘针灌4:1带行状混交林（2 m×4 m）（186.9%）＞樟子松、沙棘针灌4:1带行状混交林（2 m×4 m）（185.63%）＞樟子松、山杏针灌4:1带行状混交林（1.5 m×5 m）（183.82%）。（4）有效拦蓄量规律为油松、沙棘针灌4:1带行状混交林（1.5 m×5 m）（6.32 t/hm$^2$）＞油松、沙棘针灌4:1带行状混交林（2 m×4 m）（6.25 t/hm$^2$）＞樟子松、沙棘针灌4:1带行状混交林（2 m×4 m）（6.23 t/hm$^2$）＞樟子松、山杏针灌4:1带行状混交林（1.5 m×5 m）（6.17 t/hm$^2$）。（5）枯落物持水量（率）随浸泡时间呈现指数关系式，吸水速率随时间呈现指数关系式。综合结果表明樟子松的枯落物层持水能力最好，该地区樟子松防护林的枯落物层涵养水源功能优于其他类型的林分。

**关键词** 人工林；枯落物；水文效应
**中图分类号**：S714.7 **文献标志码**：A **文章编号**：2096-2053（2020）06-0001-08

# Research on Water Conservation Function of Litter by Four Plantation in HeLinGeEr

TIAN Ju[1,2] LI Guojing[1] LIU Yang[2]
(1. Inner Mongolia Agricultural University/Key Laboratory of Plant Stress Physiology and Molecular Biology, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China； 2. Inner Mongolia Hesheng Ecological Technology Research Co., Ltd, Hohhot, Inner Mongolia 011517, China)

**Abstract** Four forests types (*Pinus tabulaeformis* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* mixed with *Hippophae rhamnoides* and *Armeniaca sibirica*) were researched in Shengle Economic Park, HelinGeEr county, Hohhot city. The hydrological effects of litter were studied by sample plot investigation and indoor soaking. The results showed that: (1) the storage of litter in four plantation ranged from 10.69 to 10.87 t/hm$^2$, the largest was

* **基金项目**：内蒙古自治区科技成果转化项目（CGZH2018030）；呼和浩特市科技计划项目（产学研-2018-11）；内蒙古自治区科技创新引导项目（KCBJ2018012）。
**第一作者**：田菊（1990— ），女，工程师，研究方向为林学、森林培育学、生物化学与分子生物学，E-mail:1215813245@qq.com 。
**通信作者**：李国婧（1972— ），女，教授，主要从事植物逆境生理和分子生物学研究，E-mail：liguojing@imau.edu.cn。

4:1 of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Armeniaca sibirica* (1.5 m × 5 m), which was 10.87 t/hm$^2$, and the smallest was 10.69 t/hm$^2$ of *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* (1.5 m × 5 m); (2)the amount of litter in the semi decomposed layer is larger than that in the nondecomposed layer; in the aspect of the maximum water holding capacity, the amount of litter in the 4:1 mixed forest with row (1.5 m × 5 m) (10.05 t/hm$^2$) of *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* ＞ 4:1 mixed forest with row (2 m × 4 m) (9.99 t/hm$^2$) of *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* ＝ 4:1 mixed forest with row (1.5 m × 5 m) (9.99 t/hm$^2$) of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Armeniaca sibirica* ＞ 4:1 mixed forest (2 m × 4 m) (9.96 t/hm$^2$) of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Hippophae rhamnoides*; (3) the maximum water holding rate between the four forest types is 4:1 mixed forest of *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* (1.5 m × 5 m) (187.63%) > 4:1 mixed forest of *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* (2 m × 4 m) (186.9%) > 4:1 mixed forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Hippophae rhamnoides* (2 m × 4 m) (185.63%) ＞ 4:1 mixed forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Armeniaca sibirica* (1.5 m × 5 m) (183.82%); (4) the effective storage capacity was that *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* were 4:1 mixed forest with row (1.5 m × 5 m) (6.32 t/hm$^2$) > *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* were 4:1 mixed forest with row (2 m × 4 m) (6.25 t/hm$^2$) > *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Hippophae rhamnoides* were 4:1 mixed forest with row (2 m × 4 m) (6.23 t/hm$^2$) > *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Armeniaca sibirica* were 4:1 mixed forest with row (1.5 m × 5 m) (6.17 t/hm$^2$); (5) the water holding capacity (rate) of litter showed an exponential relationship with soaking time, and the water absorption rate showed an exponential relationship with time. The comprehensive results showed that the water holding capacity of litter layer of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* was the best, and the water conservation function of litter layer of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest in this area was better than that of other types of forests.

Key words plantation; litter; hydrological effects

森林生态系统从上而下的结构分为植被层、枯枝落叶层、土壤三个层次[1-2]，其中枯枝落叶层称为森林植物群落水文效应的第二活动过程，因结构疏松[3]而具有保持水土[4]、水源涵养、提高林地生产力的作用[5-7]，被称为大气降水的“蓄存库”和“调节器”[8]。研究枯落物层对于森林生态系统水文循环和平衡具有重要的意义[9]。国内许多学者对不同地域不同林分类型下的枯落物森林水文特性作了研究，主要有凋落物储量[10]、枯落物持水能力[11-16]、枯落物积累与分解[17-20]等。不同森林植被，由于各自不同的生物学和生态学特性，构成了森林枯落物水文效应的差异[21-22]。郭汉清等[23]对关帝山林区腹地的文峪河流域3种主要森林类型枯落物的水文效应研究表明，不同森林类型下的枯落物量、林分的枯落物持水量与林分类型存在较大差异。张东[24]等晋西黄土丘陵沟壑区白榆 *Ulmus pumila*、侧柏 *Platycladus orientalis*、油松 *Pinus tabuliformis* 3个主要树种人工林林下枯落物的水文特性研究发现，白榆林枯落物森林水文作用在增加土壤水分、涵养水源、防止水土流失等方面都有很好的生态效应。吴昌应[25]发现随着林龄的增加，尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 枯落物持水能力逐年增加。黄土丘陵沟壑区分布广，涉及7省（区），面积21.18万km$^2$，主要特点是地形破碎，千沟万壑，15°以上的坡面面积占50%~70%。随着国家实施退耕还林工程，很多该区域的人工林在水土保持、防风固沙方面发挥了巨大的作用。和林格尔县位于内蒙古自治区中部，在2015年以油松、樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 为主要树种，混交少量山杏 *Armeniaca sibirica*、沙棘 *Hippophae rhamnoides*，通过精心抚育管理，建成以碳汇林为主的高标准防护林，设计造林面积2 196.09 hm$^2$。本次研究通过分析4种人工林林下枯落物的森林水文作用，为黄土沟壑区人工林造林和经营提供科学及实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

内蒙古呼市和林格尔县位于内蒙古中部偏西南地区，处在土默川平原与西北黄土高原及阴

表 1 样地基本概况

Tab.1 Basic information for plots

| 林分类型 Forests type | 海拔 /m Elevation | 坡度 / ° Slope | 平均树高 /m Average tree height | 平均胸径 /cm DBH | 林龄 /a Age | 密度 / ( 株 · $hm^{-2}$) Density |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 油松、沙棘针灌 4:1（1.5 m × 5 m） | 1 288 | 11 | 3.7 | 4.5 | 4 | 1 333 |
| 油松、沙棘针灌 4:1（2 m × 4 m） | 1 345 | 6 | 4.2 | 3.8 | 4 | 1 250 |
| 樟子松、山杏针灌 4:1（1.5 m × 5 m） | 1 398 | 9 | 3.8 | 4.2 | 4 | 1 333 |
| 樟子松、沙棘针灌 4:1（2 m × 4 m） | 1 576 | 13 | 4.6 | 3.9 | 4 | 1 250 |

山山脉向南延伸的蛮汉山支脉的结合部，气候属于中温带大陆性季风气候，并兼有山地气候的特点，年平均气温 5.6℃，≥ 10℃积温 2 769℃，无霜期 118 d，光能资源丰富，热量充足，年降水量 417.57 mm，6—8 月份的降水量占全年降水量的 59.3%。和林格尔地区属草原荒漠地带，土壤以栗钙土和黄绵土为主，pH 值为 8.6 左右，属碱性土壤。本次研究区域地理坐标为 111°50′57″ E，40°31′08″ N，土壤类型为丘陵沟壑黄土。植被主要有：山杏、沙棘、柠条 *Caragana korshinskii* 等。

### 1.2　研究方法

于 2019 年 9 月对和林格尔地区 4 种人工林进行踏查，4 种人工林类型见表 1，均为中低山地斜缓坡造林。踏查以后选择 4 种典型的人工林进行标准地调查和每木检尺工作，每种人工林设立 8 个 20 m × 20 m 标准样地，在每个样地内选择 3 个 30 cm × 30 cm 的小样方进行枯落物厚度调查、枯落物储量数据、枯落物鲜质量调查。

采用样方法和浸泡—烘干法对林地枯落物层持水性能进行定量化研究，测量枯落物的半分解层和未分解层厚度、采集枯落物半分解层和未分解层样品，然后分别装入档案袋称取鲜质量并标记，带回实验室以后放入烘箱调制温度至 85℃，连续烘干至恒重，记录烘干质量、计算单位面积枯落物储量。采用连续浸泡法测定枯落物持水能力，将档案袋内枯落物转移到小规格网兜，放入装满水的盆中，分别在 15 min、30 min、1、2、4、8、16、24 h 提起网兜，等水滴不再流下的时候称重记录。枯落物持水量数据测定公式为：

枯落物持水量 = 枯落物鲜质量 — 枯落物烘干质量

枯落物持水率 = 枯落物持水量 / 枯落物干质量 × 100%

枯落物吸水速率 = 枯落物持水量 / 时间

$W_{持水量}=W_{24}-W_0$

$R_m=W_{持水量}/W_0$

$W_1=M_2-W_0$

$R_0=W_1/W_0\times 100\%$

$W_m=(R_m-R_0)\times M$

$W=(0.85R_m-R_0)\times M$

$W_{持水量}$为枯落物最大持水量（g）；$W_{24}$ 为枯落物浸泡 24 h 后的枯落物质量（g）；$W_0$ 为烘干质量（g）；$R_m$ 为最大持水率（%）；$W_1$ 为枯落物自然含水量（g）；$R_0$ 为自然含水率（%）；$W_m$ 为最大拦蓄量（t/$hm^2$）；$W$ 为有效拦蓄量（t/$hm^2$）；$M_2$ 为枯落物鲜重（g）；$M$ 为枯落物储量（t/$hm^2$）；0.85 为有效拦蓄系数。

### 1.3　数据处理方法

采用 SPSS13.0 对 4 种不同林分类型枯落物储量、最大持水量（率）、有效拦蓄量和最大拦蓄量、吸水量、吸水速率等结果进行方差分析，并采用 DUNCAN 法检验。

## 2　结果与分析

### 2.1　枯落物储量

4 种人工林枯落物储量数据都比较接近，都在 10.69 ~ 10.87 t/$hm^2$ 之间变化（表 2），变化规律是樟子松、山杏针灌 4:1（1.5 m × 5 m）＞樟子松、沙棘针灌 4:1（2 m × 4 m）＞油松、沙棘针灌 4:1（2 m × 4 m）＞油松、沙棘针灌 4:1（1.5 m × 5 m）。各人工林下枯落物的未分解层和半分解层比例基本相同，半分解的稍微大一些，这可能与林龄有关系，幼龄人工林枯落物少，每年只有部分枯枝落叶进入地表当中，而且松针类的主要成分是油脂之类的，正常情况下分解比较慢，因此半分解层和未分解层的厚度和储量区别不大，方差

分析结果也表明4个人工林的未分解和半分解枯落物之间无显著差异（$P < 0.05$）。

### 2.2 枯落物最大持水率（量）

从表3可以看出4种林分类型下枯落物持水率变化范围在183.82%~187.63%之间，其中最大持水率的人工林为油松、沙棘针灌4:1（1.5 m×5 m），其次是油松、沙棘针灌4:1（2 m×4 m）、樟子松、沙棘针灌4:1（2 m×4 m），最小的是樟子松、山杏针灌4:1（1.5 m×5 m）。方差分析结果表明4种人工林最大持水率没有显著性差异（$P < 0.05$）。4种人工林最大持水量变化趋势为油松、沙棘针灌4:1（1.5 m×5 m）＞油松、沙棘针灌4:1（2 m×4 m）=樟子松、山杏针灌4:1（1.5 m×5 m）＞樟子松、沙棘针灌4:1（2 m×4 m），可能与林分的林龄有关系，作为幼林，枯落物储量不是很多，而且人工林基本都是松类为主，组成结构相接近，因此没有显著性差异。

### 2.3 枯落物有效拦蓄率（量）

从表4可以看出4种林分类型下枯落物最大拦蓄量变化范围在7.67 ~ 7.83 t/hm$^2$之间，其中最大的人工林为油松、沙棘针灌4:1（1.5 m×5 m），其次是油松、沙棘针灌4:1（2 m×4 m）、樟子松、沙棘针灌4:1（2 m×4 m），最小的是樟子松、山杏针灌4:1（1.5 m×5 m）。方差分析结果表明4种人工林最大拦蓄量没有显著性差异。4种人工林有效拦蓄量变化趋势为油松、沙棘针灌4:1（1.5 m×5 m）＞油松、沙棘针灌4:1（2 m×4 m）＞樟子松、山杏针灌4:1（1.5 m×5 m）＞樟子松、沙棘针灌4:1（2 m×4 m），方差分析结果表明4种人工林有效拦蓄量没有显著性差异。4种人工林之间的最大拦蓄量和有效拦蓄量没有显著性差异，可

表2 不同林分类型下枯落物层特征参数

Tab.2 Characteristic of litter layer under different stand types

| 林分类型 Forests type | 枯落物 /cm Litter | | | 枯落物储量 /（t · hm$^{-2}$）Litter reserves | | | | 总储量 /(t · hm$^{-2}$) Total reserves |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 未分解层 Undifferentiated | 半分解层 semi decomposed | 总厚度 Total | 未分解层 Undifferentiated | 比例 /% Percentage | 半分解层 Semi decomposed | 比例 /% Percentage | |
| 油松、沙棘针灌 4:1 (1.5 m × 5 m) | 1.30 ± 0.16 a | 1.30 ± 0.10 a | 2.60 ± 0.15 a | 5.26 ± 0.34 a | 49.20 | 5.43 ± 0.23 a | 50.80 | 10.69 ± 0.45 a |
| 油松、沙棘针灌 4:1 (2 m × 4 m) | 1.40 ± 0.11 a | 1.50 ± 0.11 a | 2.90 ± 0.12 a | 5.28 ± 0.36 a | 49.30 | 5.43 ± 0.21 a | 50.70 | 10.71 ± 0.56 a |
| 樟子松、山杏针灌 4:1 (1.5 m × 5 m) | 1.40 ± 0.12 a | 1.70 ± 0.10 a | 3.10 ± 0.12 a | 5.37 ± 0.37 a | 49.40 | 5.50 ± 0.25 a | 50.60 | 10.87 ± 0.52 a |
| 樟子松、沙棘针灌 4:1 (2 m × 4 m) | 1.50 ± 0.11 a | 1.90 ± 0.08 a | 3.40 ± 0.11 a | 5.36 ± 0.35 a | 49.68 | 5.43 ± 0.21 a | 50.32 | 10.79 ± 0.49 a |

注：数字形式表示平均值 ± 标准差，字母表示不同林分类型之间的差异性结果（α = 0.05）。

Note: the numerical form indicates the mean value ± standard deviation, and the letter indicates the difference significant among different forest types (α = 0.05).

表3 不同林分类型下枯落物最大持水率（量）

Tab.3 Water capacity of litter under different stand types

| 林分类型 Forests type | 最大持水率 /% Maximum water holding rate | | | 最大持水量 /（t · hm$^{-2}$）Maximum water holding capacity | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 未分解层 Undifferentiated | 半分解层 Semi decomposed | 平均 Average | 未分解层 Undifferentiated | 半分解层 Semi decomposed | 平均 Average |
| 油松、沙棘针灌 4:1 (1.5 m × 5 m) | 191.78 ± 5.61 a | 183.48 ± 0.24 a | 187.63 a | 10.07 ± 0.18 a | 10.02 ± 0.24 a | 10.05 a |
| 油松、沙棘针灌 4:1 (2 m × 4 m) | 191.84 ± 8.15 a | 181.96 ± 0.25 a | 186.90 a | 10.05 ± 0.24 a | 9.93 ± 0.25 a | 9.99 a |
| 樟子松、山杏针灌 4:1 (1.5 m × 5 m) | 185.19 ± 5.86 a | 182.44 ± 0.21 a | 183.82 a | 9.97 ± 0.25 a | 10.00 ± 0.21 a | 9.99 a |
| 樟子松、沙棘针灌 4:1 (2 m × 4 m) | 186.35 ± 6.88 a | 184.9 ± 0.21 a | 185.63 a | 9.97 ± 0.22 a | 9.95 ± 0.21 a | 9.96 a |

注：数字形式表示平均值 ± 标准差，字母表示不同林分类型之间的差异性结果（α = 0.05）。

Note: the numerical form indicates the mean value ± standard deviation, and the letter indicates the difference significant among different forest types (α = 0.05).

能与林分的林龄有关系，作为幼林，枯落物储量不是很多，枯落物的组成都比较接近，且枯落物的厚度也接近，因此没有显著性差异。

4 种人工林枯落物（持水量和吸水量、吸水速率随时间的变化见图 1。可以看出枯落物持水率（量）随时间的变化快速上升，到了 8~16 h 的时候上升速度小了些，到了 24 h 以后，上升速度趋于平缓，说明枯落物吸水达到了饱和状态。通过对表 3 和表 4 的数据采用回归分析方法分析出 4 种人工林地枯落物持水量（率）与浸泡时间呈

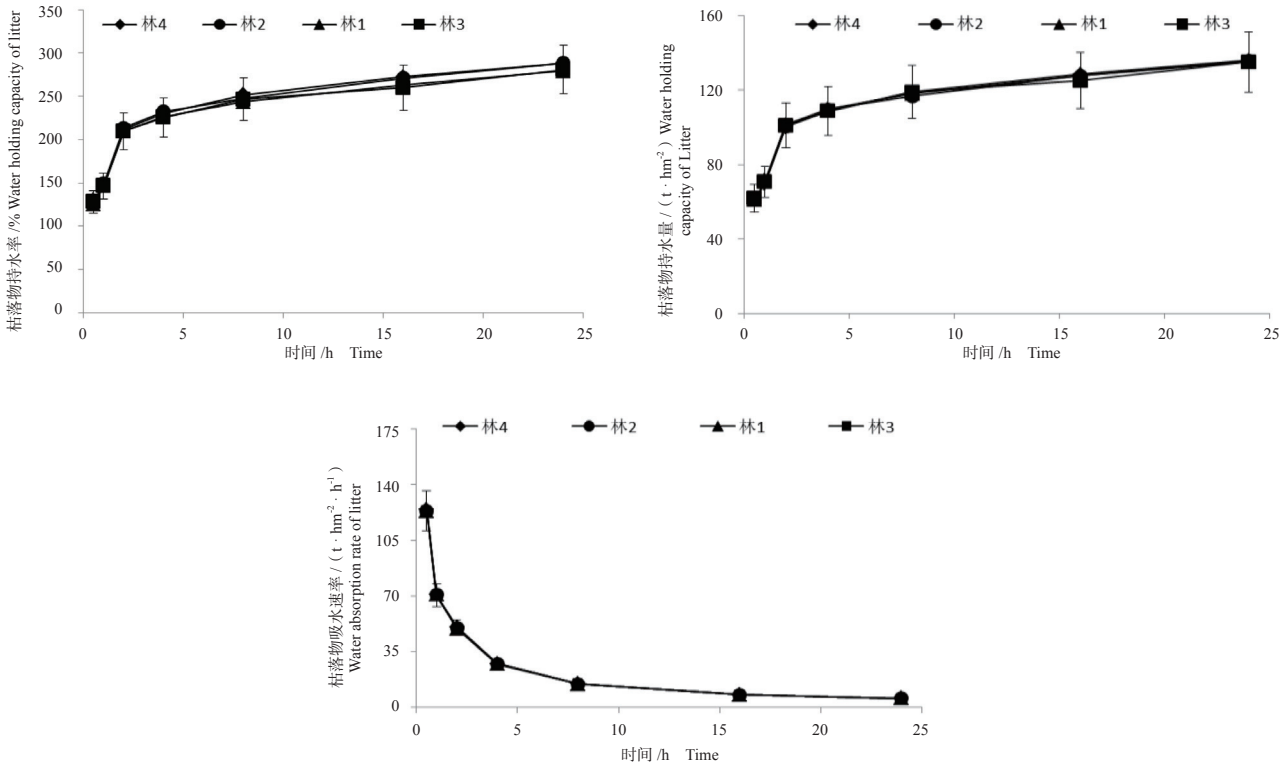
**表 4　4 种人工林有效拦蓄量和最大拦蓄量**

Tab.4 Effective and maximum retention of four types of plantation　　$t \cdot hm^{-2}$

| 林分类型 Forests type | 最大拦蓄量 Maximum storage capacity | | | 有效拦蓄量 Effective storage capacity | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 未分解层 Undifferentiated | 半分解层 Semi decomposed | 平均 Average | 未分解层 Undifferentiated | 半分解层 Semi decomposed | 平均 Average |
| 油松、沙棘针灌 4:1（1.5 m × 5 m） | 7.81 ± 0.24 a | 7.84 ± 0.37 a | 7.83 a | 6.30 ± 0.25 a | 6.33 ± 0.35 a | 6.32 a |
| 油松、沙棘针灌 4:1（2 m × 4 m） | 7.84 ± 0.35 a | 7.67 ± 0.31 a | 7.76 a | 6.33 ± 0.33 a | 6.17 ± 0.29 a | 6.25 a |
| 樟子松、山杏针灌 4:1（1.5 m × 5 m） | 7.51 ± 0.34 a | 7.82 ± 0.37 a | 7.67 a | 6.02 ± 0.32 a | 6.32 ± 0.36 a | 6.17 a |
| 樟子松、沙棘针灌 4:1（2 m × 4 m） | 7.64 ± 0.40 a | 7.81 ± 0.30 a | 7.73 a | 6.15 ± 0.38 a | 6.31 ± 0.28 a | 6.23 a |

注：数字形式表示平均值 ± 标准差，字母表示不同林分类型之间的差异性结果。

Note: the numerical form indicates the mean value ± standard deviation, and the letter indicates the difference significant among different forest types.




注：林 1：油松、沙棘针灌 4:1（1.5 m × 5 m）；林 2：油松、沙棘针灌 4:1（2 m × 4 m）；林 3：樟子松、山杏针灌 4:1（1.5 m × 5 m）；林 4：樟子松、沙棘针灌 4:1（2 m × 4 m）。

Note: forest 1: *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* 4:1 (1.5 m × 5 m); forest 2: *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* 4:1 (2 m × 4 m); forest 3: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Armeniaca sibirica* 4:1 (1.5 m × 5 m); forest 4: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Hippophae rhamnoides* 4:1 (2 m × 4 m).

**图 1　枯落物持水率、持水量和吸水速率随时间变化**

Fig.1 Water absorption rate, water holding rate and water holding capacity of litter by time

表5 4种人工林枯落物持水量和吸水速率随时间变化

Tab.5 Changes of water capacity and water absorption rate of litter in four plantations by time

| 林分类型 Forests type | 枯落物层 Litter | 持水量 Water holding capacity | | 持水率 Water holding rate | | 吸水速率 Water absorption rate | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 拟合方程 Fitting equation | $R^2$ | 拟合方程 Fitting equation | $R^2$ | 拟合方程 Fitting equation | $R^2$ |
| 油松、沙棘针灌 4:1 (1.5 m × 5 m) | 未分解 | $y$=19.528ln($x$)+77.18 | 0.961 3 | $y$=0.413 2ln($x$)+1.63 | 0.955 7 | $y$=76.078$x$–0.80 | 0.994 2 |
| | 半分解 | $y$=19.029ln($x$)+77.99 | 0.955 7 | $y$=0.386 9ln($x$)+1.59 | 0.963 9 | $y$=76.370$x$–0.80 | 0.994 4 |
| 油松、沙棘针灌 4:1 (2 m × 4 m) | 未分解 | $y$=19.238ln($x$)+77.27 | 0.957 4 | $y$=0.408 1ln($x$)+1.64 | 0.961 2 | $y$=75.624$x$–0.80 | 0.994 3 |
| | 半分解 | $y$=19.062ln($x$)+77.42 | 0.963 9 | $y$=0.388 1ln($x$)+1.58 | 0.954 4 | $y$=75.883$x$–0.80 | 0.995 1 |
| 樟子松、山杏针灌 4:1 (1.5 m × 5 m) | 未分解 | $y$=19.077ln($x$)+77.82 | 0.954 2 | $y$=0.393 9ln($x$)+1.61 | 0.961 2 | $y$=76.071$x$–0.80 | 0.994 0 |
| | 半分解 | $y$=18.954ln($x$)+77.35 | 0.961 2 | $y$=0.384 0ln($x$)+1.57 | 0.957 4 | $y$=75.817$x$–0.80 | 0.995 0 |
| 樟子松、沙棘针灌 4:1 (2 m × 4 m) | 未分解 | $y$=18.824ln($x$)+77.73 | 0.951 7 | $y$=0.390 7ln($x$)+1.61 | 0.954 2 | $y$=75.569$x$–0.79 | 0.994 5 |
| | 半分解 | $y$=18.951ln($x$)+77.65 | 0.954 4 | $y$=0.391 3ln($x$)+1.60 | 0.951 6 | $y$=76.007$x$–0.80 | 0.994 3 |

对数函数关系：$y$=Mln$t$+N，$y$ 表示枯落物持水量（率）；$t$ 是枯落物浸泡时间；M、N 是参数。

对4种人工林枯落物吸水速率的分析可以看出，枯落物吸水速率和时间呈现反比例函数的关系，结合图1看出4种林分吸水速率一开始很大，然后逐渐减小直到无限接近于0，从表5可以看出4种人工林枯落物吸水速率的关系满足幂函数关系和反比例函数关系，进一步研究集合程度来看，幂函数的拟合程度达到了0.99以上，因此采用幂函数关系式：

$y$=M · $t^N$，$R^2 > 0.99$

$y$ 表示枯落物吸水速率 t/(hm$^2$ · h)；$t$ 是枯落物浸泡时间；M、N 是参数。

## 3 讨论与结论

枯落物的持水能力常用干物质的最大持水量和最大持水率表示，持水能力受枯落物组成、林木种类、分解状况、积累量[26]等因素影响，因此对枯落物的森林水文研究在保持水土、水源涵养、改良土壤理化性质方面具有重要的作用。

本次研究发现4种人工林枯落物储量范围为10.69~10.87 t/hm$^2$，4种人工林枯落物储量明显低于侯贵荣等[27]（105.49~148.38 t/hm$^2$）人，高于叶海英[28]（2.35~3.32 t/hm$^2$）、低于刘宇等[29]（6.81~56.64 t/hm$^2$）人研究结果。枯落物储量偏低的原因是本次实验林地林龄为4年，属于幼龄林，因此枯落物储量较少。相比较叶海英研究，本次枯落物数据偏高，主要原因是林龄，中龄林松针的分解速度明显快于幼龄林，因此进一步说明林龄是影响枯落物储量的因子。本次研究当中枯落物储量最大的是樟子松、山杏针灌4:1（1.5 m × 5 m），为10.87 t/hm$^2$，油松、沙棘针灌4:1（1.5 m × 5 m）最小，为10.69 t/hm$^2$，4种林分类型下的半分解层枯落物储量均大于未分解层，樟子松在当地的枯落物储量比油松多，说明樟子松比油松更适合当地的森林水文，建议当地造林树种优先选择樟子松。

本次研究发现4种人工林枯落物枯落物最大持水量数据明显低于侯贵荣等[27]的研究结果、接近叶海英等[28]研究结果、低于刘宇等[29]研究结果。主要原因是本次实验林龄比上述研究林龄偏低，且枯落物主要以油松松针为主，因此在吸持水方面明显低于中龄油松和刺槐等树，结合其他人研究数据说明枯落物持水量与林龄和林分组成有密切关系。本次研究发现最大持水量方面油松、沙棘针灌4:1带行状混交林（1.5 m × 5 m）（10.05 t/hm$^2$）＞油松、沙棘针灌4:1带行状混交林（2 m × 4 m）（9.99 t/hm$^2$）＝樟子松、山杏针灌4:1带行状混交林（9.99 t/hm$^2$）＞樟子松、沙棘针灌4:1带行状混交林（9.96 t/hm$^2$）。平均最大持水率在4个林分类型之间呈现规律是油松、沙棘针灌4:1带行状混交林（1.5 m × 5 m）（187.63%）＞

油松、沙棘针灌 4:1 带行状混交林（2 m×4 m）（186.9%）＞樟子松、沙棘针灌 4:1 带行状混交林（2 m×4 m）（185.63%）＞樟子松、山杏针灌 4:1 带行状混交林（1.5 m×5 m）（183.82%）；最大持水量和持水率在 4 种人工林之间差异不显著，数据也比较接近，说明油松和樟子松枯落物吸持水分能力区别不大。侯贵荣等[27]研究发现油松、刺槐混交林最大持水量比刺槐林大，刺槐林比油松林大，说明混交林比纯林的持水能力强。说明本次实验采用针灌混交林是合理的。

本次研究发现 4 种人工林枯落物有效拦蓄量和最大拦蓄量数据结果明显低于侯贵荣等[27]、低于刘宇等[29]人研究结果。不同林分类型拦蓄量不同，说明枯落物组成对水分的拦蓄有一定的影响。本次实验有效拦蓄量规律为油松、沙棘针灌 4:1 带行状混交林（1.5 m×5 m）（6.32 t/hm$^2$）＞油松、沙棘针灌 4:1 带行状混交林（2 m×4 m）（6.25 t/hm$^2$）＞樟子松、沙棘针灌 4:1 带行状混交林（2 m×4 m）（6.23 t · hm$^{-2}$）＞樟子松、山杏针灌 4:1 带行状混交林（1.5 m×5 m）（6.17 t/hm$^2$），有效拦蓄量的数据也是这样的趋势，说明油松、沙棘针灌 4:1 带行状混交林（6.32 t/hm$^2$）对降雨的拦蓄能力最强。

本次研究以黄土丘陵沟壑区 4 种人工造林模式下林下枯落物持水能力为对象，对不同林下枯落物持水数据做回归分析，结果表明枯落物持水量、持水率、拦蓄量与浸泡时间符合指数函数关系式、持水速率和浸泡水符合幂指数函数关系式，这与国内大多研究结果相类似[30-38]。

本次研究发现 4 种人工林林下枯落物储量接近，枯落物森林水文参数结果接近，方差分析结果显示差异不显著，这可能与枯落物的组成和林龄有关系，作为造林 4 年左右的幼龄人工林，还没有达到郁闭，因此枯落物薄且少，体现不出枯落物之间储量的差异，其次 4 种林分类型下枯落物的组成都是以松针之类为主，松针内因含有油脂类物质，持水能力差别不大，这也符合国内大多数研究，即枯落物的持水能力和持水速率与枯落物的组成、结构有关[36-44]。

4 种人工林枯落物储量、持水量、持水率、最大拦蓄量、有效拦蓄量之间差异不显著，与林分组成和林龄有密切关系，建议未来人工林枯落物水文调查考虑林龄因素。综合结果表明樟子松的枯落物层持水能力最好，该地区樟子松防护林的枯落物层涵养水源功能优于其他类型的林分。

本文对和林格尔地区 4 种人工林枯落物蓄积量和持水特性进行试验，丰富了黄土半干旱区人工林枯落物水文研究。结果表明幼龄人工林的水文生态功能相对较弱，如果需要提高枯落物森林水文作用，可以通过适当的森林经营措施促进林分生长，加快林分郁闭来促进枯落物森林水文作用。

## 参考文献


[1] EDWARDS D P , TOBIAS J A , SHEIL D , et al. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2014, 29(9): 511-520.

[2] BRANTLEY S , FORD C R , VOSE J M . Future species composition will affect forest water use after loss of eastern hemlock from southern Appalachian forests[J]. Ecological Applications, 2013, 23(4): 777-778.

[3] 祁生林, 张洪江, 何凡, 等.长江三峡花岗岩林地坡面降雨渗流与水土流失关系研究[J].工程地质学报, 2006, 14(3): 35-369.

[4] 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;123.

[5] 刘玉国, 刘长成, 李国庆, 等.贵州喀斯特山地5种森林群落的枯落物储量及水文作用[J]. 林业科学, 2011, 47(3): 82-88.

[6] 王绍忠. 森林凋落物涵养水源生态功能研究进展[J]. 中南林业调查规划, 2014(3): 43-46.

[7] 林波, 刘庆, 吴彦, 等.川西亚高山人工针叶林枯枝落叶及苔藓层的持水性能[J].应用与环境生物学报, 2002, 8(3): 234-238.

[8] 刘斌, 鲁绍伟, 李少宁, 等.北京西山6种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报, 2015, 29(4): 73-78.

[9] 姜海燕, 赵雨森, 陈祥伟, 等.大兴安岭岭南几种主要森林类型土壤水文功能研究[J].水土保持学报, 2007, 21(3): 149-153;187.

[10] 薛建辉, 郝奇林, 何常清, 等.岷江上游两种亚高山林分枯落物层水文特征研究[J].水土保持学报, 2009, 23(3): 168-172.

[11] 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性[J].水土保持学报, 2010, 24(5): 130-134.

[12] 王波, 张洪江, 徐丽君, 等.四面山不同人工林枯落物储量及其持水特性研究[J].水土保持学报, 2008, 22(4):

90-94;99.

[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] 韩友志, 邢兆凯, 顾宇书, 等.浑河上游白桦冷杉等4种林分枯落物储量及持水特性[J].东北林业大学学报, 2011, 39(11): 15-18.

[15] 刘冲. 川滇高山栎林降水再分配及枯落物持水能力研究[D]. 南京:南京林业大学,2008.

[16] 曹云生, 赵艳玲.不同灌木林分枯落物层与土壤层水源涵养能力研究[J].水土保持研究, 2019, 26(6): 179-183.

[17] KAVVADIAS V A , ALIFRAGIS D , TSIONTSIS A , et al. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece[J]. Forest Ecology and Management, 2001(144): 113-127.

[18] BAKER T T, I, OCKABYBG, CONNERW H, et al. Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in four southern forested floodplain communities [J]. Soil Science Society of American Journal, 2001(65): 1334-1347.

[19] 施妍, 陈芳清.大老岭自然保护区日本落叶松林凋落物分解及养分释放研究[J].林业科学研究, 2016, 29(3): 430-435.

[20] 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.

[21] 韩恩贤, 韩刚.黄土高原沟壑区沙棘人工混交林改土效应研究[J].自然资源学报, 2005(6):879-884.

[22] 尹光彩, 周国逸, 刘景时, 等.鼎湖山针阔叶混交林生态系统水文效应研究[J].热带亚热带植物学报, 2004(3):195-201.

[23] 郭汉清, 白秀梅.三种主要森林类型枯落物水文效应研究[J].山西水土保持科技, 2006(6): 13-15

[24] 张东, 邵社刚, 赵辉. 晋西黄土丘陵沟壑区主要人工林枯落物水文特性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(5): 97-101,

[25] 吴昌应. 退耕还林尾叶桉模式生物量及枯落物持水特性研究[J]. 安徽农业科学, 2008,36(3):1003-1004.

[26] 饶良懿, 朱金兆, 毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(1): 33-37.

[27] 侯贵荣, 毕华兴, 魏曦, 等.黄土残塬沟壑区3种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J].水土保持学报, 2018, 32(2): 357~363

[28] 叶海英, 赵廷宁, 赵陟峰. 半干旱黄土丘陵沟壑区几种不同人工水土保持林枯落物储量及持水特性研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 121-125.

[29] 刘宇, 张洪江, 张友焱, 等. 晋西黄土丘陵区不同人工林枯落物持水特性研究[J].水土保持通报, 2013, 33(6): 69-74.

[30] 王高敏, 杨宗儒, 查同刚, 等.晋西黄土区退耕还林20年后典型林地的持水能力[J].北京林业大学学报, 2015, 37(5): 88-95.

[31] 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.

[32] 石亮, 舒洋, 张波, 等.不同龄组兴安落叶松林枯落物的水文效应[J].水土保持通报, 2016, 36(5): 91-95.

[33] 陈波, 孟成生, 赵耀新, 等.冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J].水土保持学报, 2012, 26(3): 216-221.

[34] 宋小帅, 康峰峰, 韩海荣, 等.太岳山不同郁闭度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持通报, 2014, 34(3): 102-108.

[35] 涂志华, 范志平, 孙学凯, 等.大伙房水库流域不同植被类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报, 2019, 33(1): 127-133.

[36] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 等.重庆缙云山林地枯落物及土壤水文效应研究[J].中国水土保持科学, 2006, 4(3): 31-35.

[37] 吴永波, 郝奇林, 薛建辉, 等.岷江上游主要森林群落枯落物量及其持水特性[J].中国水土保持科学, 2009, 7(3): 67-72.

[38] 周娟, 陈丽华, 郭文体, 等.大辽河流域水源涵养林枯落物持水特性研究[J].水土保持通报, 2013(4): 136-141.

[39] 邴塬皓, 刘增文, Luc Nhu Trung, 等.渭北残塬沟壑区牧草枯落物对油松和侧柏纯林土壤极化的修复效应[J]. 草地学报, 2014, 22(3): 511-517.

[40] 郭雨华.黄河上游退耕还林地枯落物层持水特性研究[J].水土保持通报, 2009, 29(5): 105-108.

[41] 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.

[42] 张峰, 彭祚登, 安永兴, 等.北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J].林业科学, 2010, 46 (10): 6-14.

[43] 李召青, 张卫强, 殷祚云, 等. 4种人工林枯落物持水特性[J]. 林业与环境科学, 2012, 28(4): 5-10.

[44] 杨俊生, 陈应彪, 王俊林, 等. 马尾松林4种林分改造树种枯落物持水特性[J]. 林业与环境科学, 2014, 30(4): 37-41.