

# 御道口牧场不同类型防护林的枯落物水文效应

郝弯弯, 赵鹏, 李思维, 谷建才

(河北农业大学林学院, 河北保定 071000)

**摘要:** 以承德市围场县御道口牧场 4 种不同类型(落叶松、樟子松、落叶松和樟子松混交林、樟子松和榆树混交林)防护林为研究对象, 采用样地调查和室内浸泡法, 对其枯落物的水文效应进行研究。结果表明: 各种类型防护林的枯落物蓄积量的范围为 5.42~24.59 t/hm<sup>2</sup>, 其中落叶松蓄积量最大, 为 24.59 t/hm<sup>2</sup>, 樟子松和榆树混交林蓄积量最小, 为 5.42 t/hm<sup>2</sup>, 且 4 种林分类型的半分解层蓄积量均大于未分解层; 平均最大持水量规律为落叶松(16.61 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松和落叶松混交林(14.80 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松(10.22 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松和榆树混交林(9.99 t/hm<sup>2</sup>); 平均最大持水率大小依次为落叶松(427.02%)>樟子松和榆树混交林(396.30%)>樟子松和落叶松混交林(360.88%)>樟子松(303.13%); 有效拦蓄量规律为樟子松和落叶松混交林(74.65 t/hm<sup>2</sup>)>落叶松(71.21 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松(48.82 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松和榆树混交林(17.66 t/hm<sup>2</sup>); 有效拦蓄率规律为落叶松(344.99%)>樟子松和榆树混交林(326.66%)>樟子松和落叶松混交林(286.27%)>樟子松(215.49%)。综合结果表明落叶松的枯落物层持水能力最好, 该地区落叶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:** 御道口牧场; 不同林分; 防护林; 枯落物; 水文效应

**中图分类号:** S715      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2019)06-0197-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.028

## Hydrologic Effects of Different Forest Types Shelterbelt Litter in Yudaokou Ranch

HAO Wanwan, ZHAO Peng, LI Siwei, GU Jiancai

(College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000)

**Abstract:** In this paper, four different forest stands (larch pine forest, camphor pine forest, mixed forest of larch pine and camphor pine, and mixed forest of camphor pine and elm) of yudaokou pasture in weichang County, Chengde city were chosen as objects and their hydrologic effect of litter was studied by sample survey and indoor soaking method. The results showed that the amount of litter in various forest stands was 5.42~24.59 t/hm<sup>2</sup>, of which larch pine forest had the largest amount, 24.59 t/hm<sup>2</sup>, and the amount of mixed forests of camphor pine and elm was the smallest, 5.42 t/hm<sup>2</sup>. The contents of the semi-partition layer of the four stands of forest were all larger than the undecomposed layer. The average maximum water holding capacity was larch pine forest (16.61 t/hm<sup>2</sup>)>mixed forest of larch pine and camphor pine (14.80 t/hm<sup>2</sup>)>camphor pine forest (10.22 t/hm<sup>2</sup>)>mixed forest of camphor pine and elm (9.99 t/hm<sup>2</sup>). The average maximum water holding rate was larch pine forest (427.02%)>mixed forest of camphor pine and elm (396.30%)>mixed forest of larch pine and camphor pine (360.88%)>camphor pine forest (303.13%). The effective retaining content was mixed forest of larch pine and camphor pine (74.65 t/hm<sup>2</sup>)>larch pine forest (71.21 t/hm<sup>2</sup>)>camphor pine forest (48.82 t/hm<sup>2</sup>)>mixed forest of camphor pine and elm (17.66 t/hm<sup>2</sup>). The effective retaining rate was larch pine forest (344.99%)>mixed forest of camphor pine and elm (326.66%)>mixed forest of larch pine and camphor pine (286.27%)>camphor pine forest (215.49%). The comprehensive results showed that larch pine forest has the best water holding capacity in litter layer, and the function of retaining water in litter layer of larch shelter forest in this area is better than other types of forest stand.

**Keywords:** Yudaokou ranch; different forest stands; shelterbelt; litter; hydrological effects

森林生态系统功能多样<sup>[1]</sup>, 且结构复杂, 森林的水文效应用于涵养水源、保持水土、科学规划林分结构等水文效应仅为生态系统的其中一项功能, 森林的水文具有重要意义。森林水文效应(hydrological effect)

收稿日期: 2019-05-31

资助项目: 国家重点研发计划项目“坝上高原及华北北部山地沙化土地治理与沙产业技术研发及示范”(2016YFC0500802); 基于 CFERN 基础上的不同人工针叶林生物量和碳储量研究(LY201515)

第一作者: 郝弯弯(1992—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事森林可持续经营研究。E-mail: 623325910@qq.com

通信作者: 谷建才(1963—), 男, 河北藁城人, 博士, 教授, 主要从事森林可持续经营、森林资源资产评估研究。E-mail: gujiancai@126.com

即森林对蒸发、降水、径流等水平衡要素及河流、地下水、泥沙等水文情势的影响,又称流域森林影响。森林的水文效应在拦蓄降水、改善水环境、调节地表径流及水分再分配等方面起到关键作用。在整个森林生态系统中,枯落物层的水文功能占有极其重要的地位<sup>[2]</sup>。有研究<sup>[3]</sup>指出,枯落物和土壤持水量占全部森林生态系统水源涵养功能总量的 80.04% 以上。枯落物层主要是由树木掉落的叶、花、枝等堆叠而成,以枯枝落叶为主,具备很多重要功能,如拦蓄降水、维持土壤结构、减小表层土壤的水分蒸发等<sup>[4-5]</sup>;此外,枯落物因其蓬松、吸水透水力强等特点,还具有增强林地持水性能的作用<sup>[6]</sup>。枯落物层作为森林涵养水源功能的第二作用层,能有效地降低雨滴击溅能力、拦蓄和过滤地表径流、加强土壤入渗能力、减少土壤水分蒸发、改善土壤理化性质等<sup>[7]</sup>。因此,研究枯落物的水文效应在保持水土、涵养水源中起重要作用。

敖特根其木格等<sup>[8]</sup>调查了内蒙古自治区多伦县不同林地枯落物持水性能,发现在调查的几种林分中赤杨林枯落物持水能力最好;邢晓光等<sup>[9]</sup>调查了冀西北山地华北落叶松和白桦林枯落物水文特征,发现白桦林持水能力大于华北落叶松纯林;郭宇嘉等<sup>[10]</sup>对承德市第三乡林场的 3 种不同林分类型的枯落物和土壤的持水性能进行研究,发现白桦—山杨阔叶混交林的持水能力较好;柳晓娜等<sup>[11]</sup>对丰宁县小坝子的 5 种不同密度杨树人工林的林地涵养水源功能进行研究,得出林分密度为 1 375 株/hm<sup>2</sup> 的杨树人工林的林地涵养水源效果好。

河北坝上地区牧场地区,这里冬季受北部低气压气流的影响,风天多,且降水少,蒸发量大,气候干燥,草原沙化等环境问题较为严重,影响了当地畜牧业的发展。为解决这一问题,于 2002 年营造了牧场防护林,主要种植樟子松 (*Pinus sylvestris*) 和落叶松 (*Larix gmelinii*)。在对枯落物的研究中,对于牧场

防护林的枯落物水文效应的研究相对较少,因此,本研究针对牧场不同类型防护林枯落物的水文效应进行研究,旨在揭示牧场防护林枯落物层的水文效应,为牧场防护林的建设提供部分理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于河北省承德市围场县北部御道口牧场地区,东起坝梁,北至塞罕坝国家森林公园,西与内蒙古自治区接壤,南至御道口乡,全场东西长 50 km,南北宽 33 km,其地理坐标为北纬 42°07′—42°25′,东经 116°46′—117°26′,总面积 1.0×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>,其中天然林 1.46 万 hm<sup>2</sup>,天然草场 9 万 hm<sup>2</sup>,耕地 0.33 万 hm<sup>2</sup>。该地区地势平坦,地貌属典型的波状高原。该区海拔 1 230~1 280 m,属寒温带大陆季风性气候,常年气温偏低,年均气温为 5℃,极端最低温度达 -43.2℃,极端最高温度有 33.4℃;无霜期短,每年无霜期平均 80 d,降水量小,年降水量为 460 mm,干燥度为 1.5~2.2。冬季受北部低气压气流的影响,风天多,风力大,平均风速为 3.6 m/s,每年风日数(3 级以上)180 d。土壤类型有灰色森林土、草甸土、沼泽土、风沙土 4 个类型,土层厚度 10~150 cm。研究地的植被类型主要为草甸草原,植物种类多种多样,有 50 多个科,400 多种。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地调查 在 2018 年 8 月上旬,选择御道口牧场不同类型防护林,通过实地考察和勘察,根据御道口乡的自然地理和地形地貌特征,选择与主害风方向垂直的典型牧场防护林带,选取樟子松防护林带、落叶松防护林带、樟子松和落叶松混交林带、樟子松和榆树混交林带 4 种典型的防护林类型。设置 20 m×20 m 的标准样地,每种防护林设置 3 块样地,共 12 块。调查样地中树木的树高、胸径、年龄、郁闭度等基本信息见表 1。

表 1 林分基本信息

林分类型	混交比	林龄/ a	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	平均 胸径/cm	平均 树高/m	郁闭度	海拔/ m	土壤 类别
落叶松纯林	—	16	1494	12.30	8.12	0.50	1402	栗钙
樟子松纯林	—	15	1767	11.48	7.14	0.40	1366	栗钙
樟子松和落叶松混交林	1:2	32	1386	16.20	1.15	0.58	1362	栗钙
樟子松和榆树混交林	1:5	12	875	7.59	3.95	0.10	1226	栗钙

1.2.2 样品采集 在 4 种类型防护林的 12 块样地内分别布设 3 个 30 cm×30 cm 的样方,按照不同分解层(未分解层、半分解层)进行枯落物的采集,将采集的枯落物装入密封袋带回实验室。(由于完全分解的腐殖质层较少或没有,难以采集,故本文没有涉及到腐殖质层。)

1.2.3 枯落物蓄积量测定 将采集的枯落物带回实验室用精度为 0.1 g 的电子天平称其鲜重,取部分样品,称其重量,然后放入烘箱内在 85℃ 下烘干,称其干重以计算单位面积枯落物蓄积量。

1.2.4 枯落物持水性测定 枯落物持水量及吸水速度采用室内浸泡法进行<sup>[12]</sup>测定。将烘干后的枯落物

样品浸入水中,分别测定浸水 0.25,0.5,1,2,4,6,8,24 h 后枯落物的重量变化,以每次无水滴下为标志,进行称重,研究其吸水速度及吸水过程。利用每次取出称重后枯落物湿重与干重的差值,根据枯落物的重量变化,测定分析枯落物的持水量、吸水速率、持水率及拦蓄量等。

枯落物的含水指标采用的计算公式<sup>[13]</sup>为:

$$M_h = \frac{(M_t - M_o)}{M_o} \times 1000$$

式中: $M_h$ 为枯落物持水量(g/Kg); $M_t$ 为  $t$  时刻浸水后枯落物的重量(g); $M_o$ 为枯落物的干重(g)。

$$V = \frac{M_h}{h}$$

式中: $V$ 为吸水速率(g/(Kg/h)); $M_h$ 为  $h$  时刻的枯落物持水量(g/kg); $h$ 为枯落物的浸水时间(h)。

$$R_m = \frac{G_{24} - G_d}{G_d} \times 100\%$$

式中: $R_m$ 为枯落物最大持水率(%); $G_{24}$ 为枯落物浸

水 24 h 后的重量(g); $G_d$ 为枯落物干重(g)。

$$R_o = \frac{G_o - G_d}{G_d} \times 100\%$$

式中: $G_o$ 为枯落物自然状态下重量(g); $G_d$ 为枯落物干重(g)

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

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

式中: $R_o$ 为枯落物自然含水率(%); $R_m$ 为枯落物最大持水率(%); $W_m$ 为最大拦蓄量(t/hm<sup>2</sup>); $W$ 为有效拦蓄量(t/hm<sup>2</sup>); $M$ 为蓄积量(t/hm<sup>2</sup>)

## 2 结果与分析

### 2.1 枯落物的蓄积量差异分析

枯落物的蓄积量受林分类型、气候条件、枯落物的分解速率、枯落物的厚度以及林内的物种组成等多种因素的影响。枯落物的积累影响林分的生长发育,同时,林分的生长发育也会影响枯落物的积累(表 2)。

表 2 各林分枯落物厚度和蓄积量

林分类型	未分解层			半分解层			枯落物层	
	厚度/ cm	蓄积量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	比例/ %	厚度/ cm	蓄积量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	比例/ %	厚度/ cm	蓄积量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
落叶松纯林	1.53	10.27a	41.75	1.60	14.32a	58.25	3.13	24.59
樟子松纯林	1.43	7.38ab	32.52	1.00	15.31a	67.48	2.43	22.68
樟子松和落叶松混交林	1.65	9.56a	40.73	1.33	13.9a	59.27	2.98	23.46
樟子松和榆树混交林	0.53	2.22b	40.92	0.63	3.2b	59.08	1.17	5.42

注:表中数字后不同字母表示差异达显著水平( $P < 0.05$ )。

由表 2 可知,各种林分类型的枯落物厚度大小依次为落叶松>樟子松和落叶松混交林>樟子松>樟子松和榆树混交林,其中落叶松的枯落物厚度最大,为 3.13 cm;樟子松和榆树混交林枯落物厚度最小,为 1.17 cm。不同森林类型的枯落物蓄积量大小依次为落叶松>樟子松和落叶松混交林>樟子松>樟子松和榆树混交林,蓄积量的范围为 5.42~24.59 t/hm<sup>2</sup>,落叶松蓄积量最大,为 24.59 t/hm<sup>2</sup>,其中未分解层有 10.27 t/hm<sup>2</sup>,占总蓄积量的 41.75%,半分解层有 14.32 t/hm<sup>2</sup>,占总蓄积量的 58.25%;樟子松和落叶松混交林蓄积量次之,总蓄积量为 23.46 t/hm<sup>2</sup>,其中未分解层有 9.56 t/hm<sup>2</sup>,占总蓄积量的 40.73%,半分解层有 13.90 t/hm<sup>2</sup>,占总蓄积量的 59.27%;樟子松蓄积量次之,总蓄积量为 22.68 t/hm<sup>2</sup>,其中未分解层有 7.38 t/hm<sup>2</sup>,占总蓄积量的 32.52%,半分解层有 15.31 t/hm<sup>2</sup>,占总蓄积量的 67.48%;樟子松和榆树混交林蓄积量最小,总蓄积量为 5.42 t/hm<sup>2</sup>,其中未分解层有 2.22 t/hm<sup>2</sup>,占总蓄积量的 40.92%,半分解层有 3.2 t/hm<sup>2</sup>,占总蓄积量的 59.08%,这 4 种林分类型的半分解层蓄积量均大于未分解层。未分解层的蓄积量之间,樟子松和榆树混交林与樟子松和落

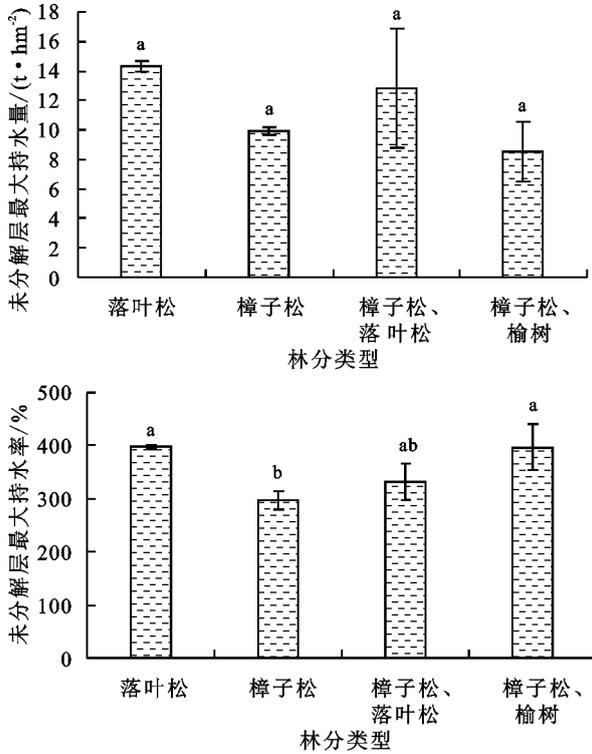
叶松混交林以及落叶松之间有显著差异,落叶松与樟子松和落叶松混交林以及樟子松之间没有显著差异;半分解层的蓄积量之间,樟子松和榆树混交林与其他 3 种林分之间存在显著差异,落叶松与樟子松以及樟子松和落叶松混交林之间没有显著差异。

### 2.2 枯落物层特征分析

2.2.1 枯落物的持水性能分析 枯枝落叶层的持水性能取决于枯落物的组成、数量和分解程度<sup>[14]</sup>。由图 1 可知,在最大持水量中,未分解层呈现的规律为落叶松(14.32 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松和落叶松混交林(12.80 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松(9.91 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松和榆树混交林(8.50 t/hm<sup>2</sup>),4 种林分之间无显著差异;半分解层呈现的规律为落叶松(18.90 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松和落叶松混交林(16.80 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松和榆树混交林(11.48 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松(10.53 t/hm<sup>2</sup>),落叶松与樟子松以及樟子松和榆树混交林之间差异显著,樟子松与樟子松和落叶松混交林之间差异显著,落叶松与樟子松和落叶松混交林之间无显著差异,樟子松和落叶松混交林与樟子松和榆树混交林之间无显著差异,樟子松与樟子松和榆树混交林之间无显著差异。在最大持水

率中,未分解层的最大持水率之间呈现一定的规律,即落叶松(398.10%)>樟子松和榆树混交林(396.62%)>樟子松和落叶松混交林(332.04%)>樟子松(297.49%),樟子松与落叶松以及樟子松和榆树混交林之间差异显著,落叶松与樟子松和落叶松混交林以及樟子松和榆树混交林之间无显著差异,樟子松与樟子松和落叶松混交林之间无显著差异;半分解层的最大持水率表现为落叶

松(455.93%)>樟子松和榆树混交林(395.97%)>樟子松和落叶松混交林(389.72%)>樟子松(308.77%),落叶松与樟子松之间差异显著,落叶松与樟子松和落叶松混交林以及樟子松和榆树混交林之间无显著差异,樟子松与樟子松和落叶松混交林以及樟子松和榆树混交林之间无显著差异,樟子松和落叶松混交林以及樟子松和榆树混交林之间无显著差异。



注:图中不同字母表示各林分类型间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

图 1 各林分不同枯落物层的持水能力

由图 2 可知,平均最大持水量呈现一定的规律,即落叶松(16.61 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松和落叶松混交林(14.80 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松(10.22 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松和榆树混交林(9.99 t/hm<sup>2</sup>),其中落叶松与樟子松和落叶松混交林的平均最大持水量与其他 2 种林分之间差异显著,樟子松与樟子松和榆树混交林之间无显著差异,落叶松与樟子松和落叶松混交林之间无显著差异

异。平均最大持水率大小依次为落叶松(427.02%)>樟子松和榆树混交林(396.3%)>樟子松和落叶松混交林(360.88%)>樟子松(303.13%),樟子松与落叶松以及樟子松和榆树混交林之间差异显著,落叶松与樟子松和落叶松混交林以及樟子松和榆树混交林之间无显著差异,樟子松与樟子松和落叶松混交林之间无显著差异。

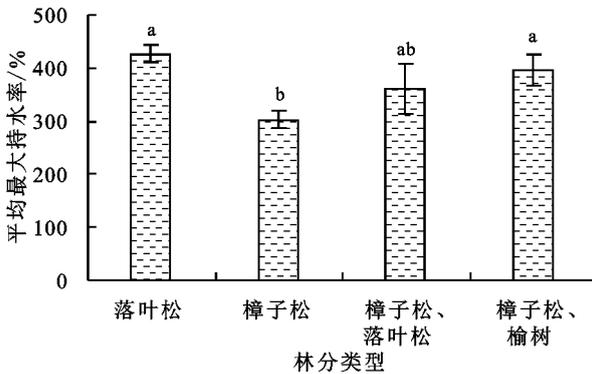


图 2 各林分枯落物层的平均持水能力

### 2.2.2 枯落物的持水过程分析

#### (1) 枯落物持水量分析 枯落物的持水能力多用

干燥物质的最大持水量和最大持水率表示,枯落物越干燥,吸水的速度越快;枯落物越多,短时间内吸持的水

量越大<sup>[15]</sup>。不同林分类型,不同枯落物层,不同时间点均对应枯落物不同的持水量,随浸水时间的变化,

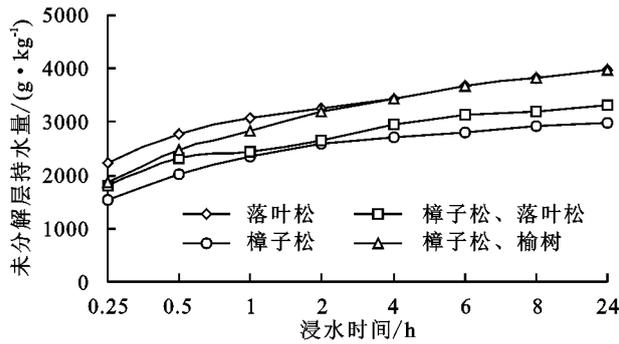


图 3 各林分不同枯落物层的持水量与浸水时间的关系

从图 3 可以看出,未分解层的持水量整体呈现上升趋势,在前 2 h 出现急剧上升,之后增长速率减缓,直至 24 h 后,开始处于稳定状态,基本不再变化,在初始持水量显示落叶松(2 216.05 g/kg) > 樟子松和榆树混交林(1 877.07 g/kg) > 樟子松和落叶松混交林(1 793.69 g/kg) > 樟子松(1 525.97 g/kg);半分解层的持水量呈现上升趋势,在前 2 h 出现急剧上升,之后增长速率减缓,直至 24 h 后,开始处于稳定状态,基本不再变化,初始持水量显示落叶松(2 612.02 g/kg) > 樟子松和榆树混交林(2 383.03 g/kg) > 樟子松和落叶松混交林(2 183.66 g/kg) > 樟子松(1 690.50 g/kg)。

根据未分解层和半分解层在 0~24 h 时间段持水量的增长,对其增长曲线进行方程拟合,得到关系式(1),分别对不同林分类型的枯落物的不同分解层拟合方程,得到不同林分类型的枯落物持水量与浸水时间的关系表(表 3)。

$$M = a \ln t + b \quad (1)$$

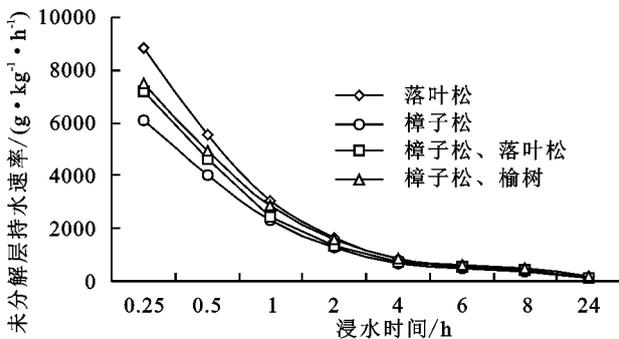
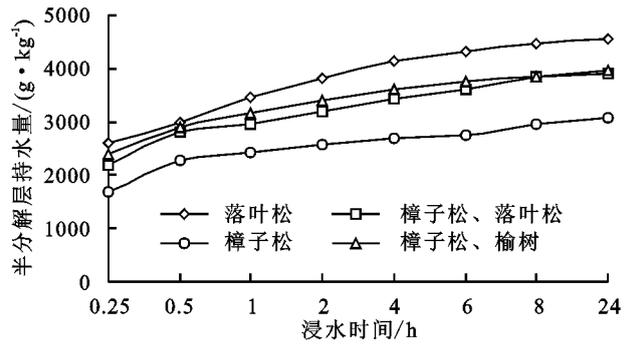


图 4 各林分不同枯落物层的持水速率与浸水时间的关系

由图 4 可知,未分解层的持水速率在前 2 h 出现急剧下降,从 4 h 后持水速率开始出现减缓,直至 24 h,持水速率逐渐趋于稳定,在初始持水速率时,4 种林分有较大的差异,表现为落叶松(8 864.20 g/(kg·h)) > 樟子松和榆树混交林(7 508.29 g/(kg·h)) > 樟子松和落叶松混交林(7 174.77 g/(kg·h)) > 樟子松(6 103.87 g/(kg·h));半分解层的持水速率在前 2 h 出现急剧下降,从 4 h 后持水速率开始出现减缓,直至 24 h,持水速率逐

渐趋于稳定,在初始持水速率时,4 种林分有较大的差异,表现为落叶松(10 448.07 g/(kg·h)) > 樟子松和榆树混交林(9 532.10 g/(kg·h)) > 樟子松和落叶松混交林(8 734.65 g/(kg·h)) > 樟子松(6 762.02 g/(kg·h))。对不同林分类型的 0~24 h 时间段内的持水速率进行曲线拟合,得到模型(2),对图 4 的各曲线拟合,得到持水速率与浸水时间的关系表 4。

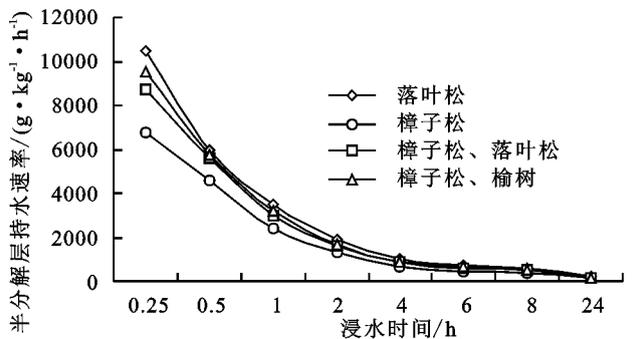


渐趋于稳定,在初始持水速率时,4 种林分有较大的差异,表现为落叶松(10 448.07 g/(kg·h)) > 樟子松和榆树混交林(9 532.10 g/(kg·h)) > 樟子松和落叶松混交林(8 734.65 g/(kg·h)) > 樟子松(6 762.02 g/(kg·h))。对不同林分类型的 0~24 h 时间段内的持水速率进行曲线拟合,得到模型(2),对图 4 的各曲线拟合,得到持水速率与浸水时间的关系表 4。

表 3 枯落物持水量与浸水时间的关系

枯落物层	林分类型	关系式	相关系数
未分解层	落叶松纯林	$M = 828.98 \ln t + 2181.2$	$R^2 = 0.9920$
	樟子松纯林	$M = 708.54 \ln t + 1544.5$	$R^2 = 0.9957$
	樟子松和落叶松混交林	$M = 737.52 \ln t + 1748.2$	$R^2 = 0.9816$
	樟子松和榆树混交林	$M = 1022.11 \ln t + 1804.6$	$R^2 = 0.9948$
半分解层纯林	落叶松纯林	$M = 1009.6 \ln t + 2461.6$	$R^2 = 0.9799$
	樟子松	$M = 617.29 \ln t + 1742.1$	$R^2 = 0.9786$
	樟子松和落叶松混交林	$M = 815.09 \ln t + 2161.9$	$R^2 = 0.9842$
	樟子松和榆树混交林	$M = 766.44 \ln t + 2365.5$	$R^2 = 0.9990$

(2) 枯落物吸水速率分析 持水速率是体现持水性能的重要指标,其值越大该林分对于水源涵养的效果越好,进而减少径流和泥沙的产生,对保持水土作用显著<sup>[16]</sup>。在研究预定的时间点,称量浸泡的枯落物,并计算出各林分样地枯落物分解层和未分解层的持水速率,观察其变化规律见图 4。



渐趋于稳定,在初始持水速率时,4 种林分有较大的差异,表现为落叶松(10 448.07 g/(kg·h)) > 樟子松和榆树混交林(9 532.10 g/(kg·h)) > 樟子松和落叶松混交林(8 734.65 g/(kg·h)) > 樟子松(6 762.02 g/(kg·h))。对不同林分类型的 0~24 h 时间段内的持水速率进行曲线拟合,得到模型(2),对图 4 的各曲线拟合,得到持水速率与浸水时间的关系表 4。

$$V = kt^n \quad (2)$$

式中:  $V$  为枯落物吸水速率( $g/(kg \cdot h)$ );  $t$  为浸泡时间( $h$ );  $k$  为方程系数;  $n$  为指数。

表 4 枯落物持水速率与浸水时间的关系

枯落物层	林分类型	关系式	相关系数
未分解层	落叶松纯林	$V=14833t^{-1.815}$	$R^2=0.9086$
	樟子松纯林	$V=10498t^{-1.768}$	$R^2=0.8935$
	樟子松和落叶松混交林	$V=11968t^{-1.794}$	$R^2=0.9076$
	樟子松和榆树混交林	$V=12582t^{-1.727}$	$R^2=0.8973$
半分解层	落叶松纯林	$V=16862t^{-1.802}$	$R^2=0.9102$
	樟子松纯林	$V=11726t^{-1.824}$	$R^2=0.9038$
	樟子松和落叶松混交林	$V=14691t^{-1.816}$	$R^2=0.9079$
	樟子松和榆树混交林	$V=15944t^{-1.844}$	$R^2=0.9094$

### 2.3 枯落物层拦蓄分析

最大拦蓄率和最大拦蓄量一般只能反映枯落物层的持水能力大小,但不能反映其对实际降雨的拦蓄效果。当降雨达到 20~30 mm 以后,不论枯落物层含水量高低,实际拦蓄量和拦蓄率约为最大拦蓄量和最大拦蓄率的 85%。因此,在实际应用中,多以有效拦蓄水量来估算枯落物对降雨的实际拦蓄效果和能力<sup>[7]</sup>。

由图 5 可知,在最大拦蓄量中,未分解层的最大拦蓄量表现为樟子松和落叶松混交林( $37.49 t/hm^2$ ) > 落叶松( $31.36 t/hm^2$ ) > 樟子松( $19.12 t/hm^2$ ) > 樟子

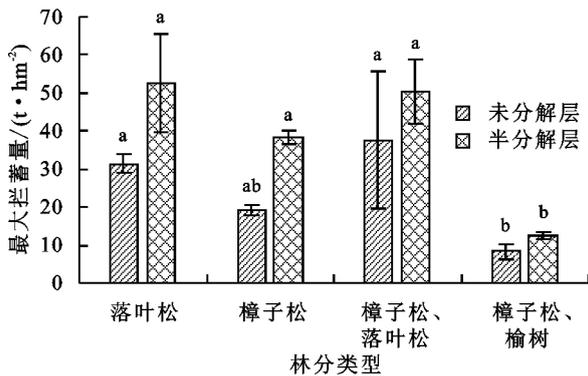
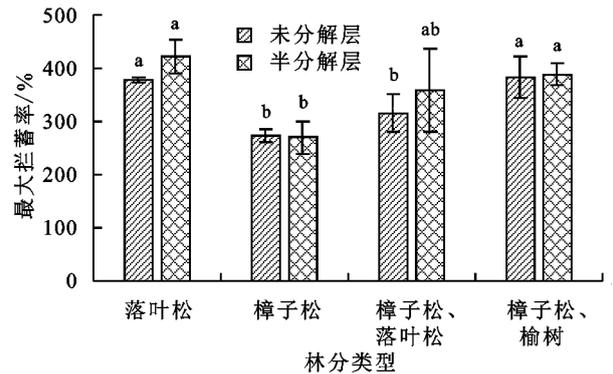


图 5 各林分不同枯落物层的最大拦蓄量与最大拦蓄率

由图 6 可知,在有效拦蓄量中,未分解层的规律为樟子松和落叶松混交林( $31.87 t/hm^2$ ) > 落叶松( $26.65 t/hm^2$ ) > 樟子松( $16.25 t/hm^2$ ) > 樟子松和榆树混交林( $7.08 t/hm^2$ ),樟子松与落叶松以及樟子松和落叶松混交林之间差异显著,落叶松与樟子松和榆树混交林以及樟子松和落叶松混交林之间无显著差异,樟子松与樟子松和榆树混交林之间无显著差异;半分解层中呈现出落叶松( $44.56 t/hm^2$ ) > 樟子松和落叶松混交林( $42.79 t/hm^2$ ) > 樟子松( $32.56 t/hm^2$ ) > 樟子松和榆树混交林( $10.58 t/hm^2$ ),差异性与半分解层的最大拦蓄量一致;在有效拦蓄率中,未分解层的规律为樟子松和榆树混交林( $325.93\%$ ) > 落叶松( $321.58\%$ ) > 樟子松和落叶松混交林( $268.47\%$ ) >

松和落叶松混交林( $8.33 t/hm^2$ ),樟子松和榆树混交林与落叶松以及樟子松和榆树混交林之间差异显著,落叶松与樟子松以及樟子松和落叶松混交林之间无显著差异,樟子松与樟子松和榆树之间无显著差异;半分解层的最大拦蓄量规律呈现为落叶松( $52.42 t/hm^2$ ) > 樟子松和落叶松混交林( $50.33 t/hm^2$ ) > 樟子松( $38.31 t/hm^2$ ) > 樟子松和榆树混交林( $12.45 t/hm^2$ ),樟子松和榆树混交林与其他 3 种林分之间差异显著,落叶松与樟子松以及樟子松和落叶松混交林之间无显著差异。最大拦蓄率中,未分解层大小依次为樟子松和榆树混交林( $383.45\%$ ) > 落叶松( $378.33\%$ ) > 樟子松和落叶松混交林( $315.84\%$ ) > 樟子松( $272.81\%$ ),樟子松以及樟子松和落叶松混交林与落叶松以及樟子松和榆树混交林之间差异显著,落叶松与樟子松和榆树混交林之间无显著差异,樟子松与樟子松和落叶松混交林之间无显著差异;半分解层中,落叶松( $422.28\%$ ) > 樟子松和榆树混交林( $388.12\%$ ) > 樟子松和落叶松混交林( $357.44\%$ ) > 樟子松( $269.76\%$ ),樟子松与落叶松以及樟子松和榆树混交林之间差异显著,落叶松与樟子松和落叶松混交林以及樟子松和榆树混交林之间无显著差异,樟子松和落叶松混交林与其他 3 种林分之间无显著差异。



樟子松( $231.89\%$ ),差异性与最大拦蓄率的未分解层一致;半分解层中表现为落叶松( $358.94\%$ ) > 樟子松和榆树混交林( $329.90\%$ ) > 樟子松和落叶松混交林( $303.82\%$ ) > 樟子松( $229.29\%$ ),差异性与半分解层的最大拦蓄率一致。

由图 7 可知,在枯落物的拦蓄中,有效拦蓄量规律为樟子松和落叶松混交林( $74.65 t/hm^2$ ) > 落叶松( $71.21 t/hm^2$ ) > 樟子松( $48.82 t/hm^2$ ) > 樟子松和榆树混交林( $17.66 t/hm^2$ ),樟子松和榆树混交林与落叶松以及樟子松和落叶松混交林有显著差异,樟子松与其他 3 种林分均没有差异;最大拦蓄量的大小规律以及差异性均与有效拦蓄量结果一致。有效拦蓄率的大小规律为落叶松( $344.99\%$ ) > 樟子松和榆树混交林

(326.66%) > 樟子松和落叶松混交林(286.27%) > 樟子松(215.49%), 樟子松与其他 3 种林分均存在显著

差异;最大拦蓄率的大小规律以及差异性均与有效拦蓄率结果一致。

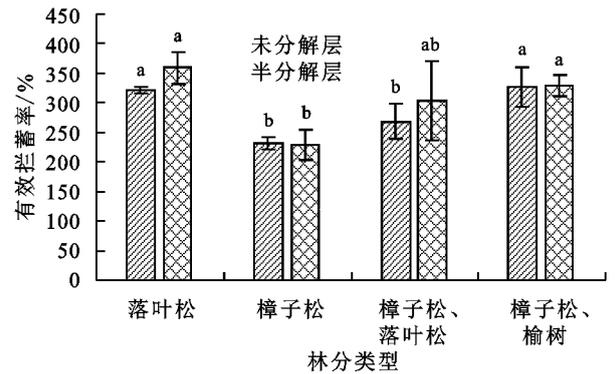
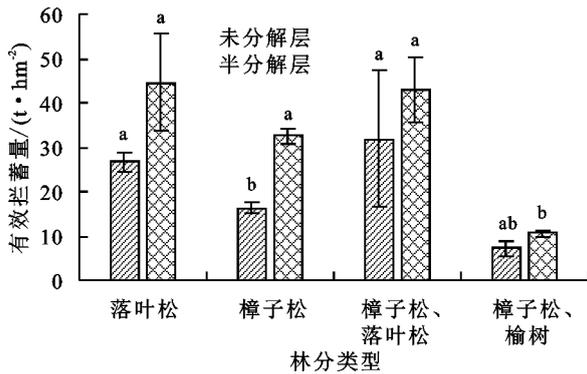


图 6 各林分不同枯落物层的有效拦蓄量与有效拦蓄率

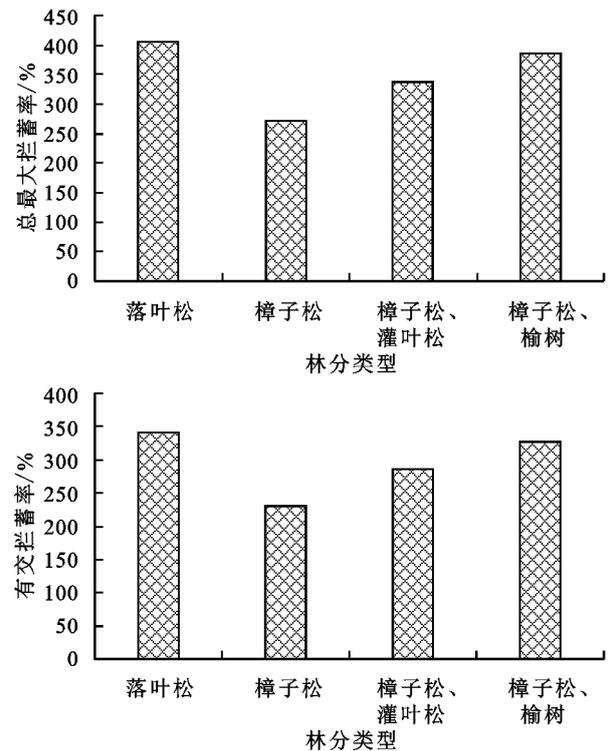
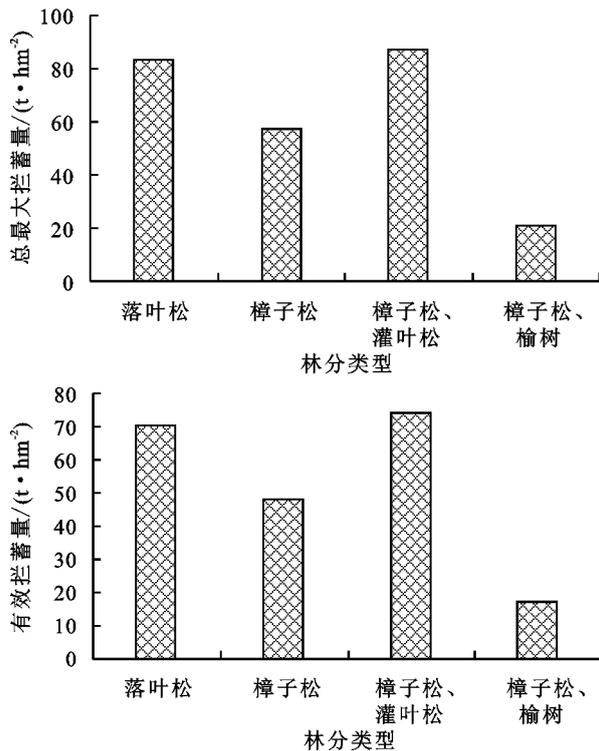


图 7 各林分不同枯落物层的总拦蓄量和拦蓄率

### 3 讨论

各种林分类型的枯落物厚度和蓄积量大小规律一致,依次为落叶松>樟子松和落叶松混交林>樟子松>樟子松和榆树混交林,这 4 种林分类型的半分解层蓄积量均大于未分解层。这与徐洪亮等<sup>[17]</sup>调查的大兴安岭不同类型落叶松天然林水源涵养功能研究结果不一致,这可能是由于样地所处地理位置不一致;与刘艳等<sup>[18]</sup>对辽宁省森林枯落物现存量及其持水性能的研究中所得的结果一致,一般情况下枯落物厚度越大其蓄积量越大,但由于枯落物厚度还受枯落物成分及其堆积状态的影响,枯落物现存量与厚度的相关性也可能不显著相关<sup>[19]</sup>。由于枯落物的厚度受林分类型、生长状况等的影响,落叶松由于自身特性的影响,相对樟子松凋落要多,而樟子松和榆树混交林由于榆树所占比例、榆树的分解速率以及密度等问

题,导致樟子松和榆树混交林的枯落物厚度较小,蓄积量较少,因此落叶松的厚度最大,蓄积量也最大。

平均最大持水量大小依次为落叶松>樟子松和落叶松混交林>樟子松>樟子松和榆树混交林;平均最大持水率大小依次为落叶松>樟子松和榆树混交林>樟子松和落叶松混交林>樟子松。这与徐洪亮等<sup>[17]</sup>对枯落物现存量及其持水性能的研究中所得的结果一致。造成各林分枯落物持水量大小差异的原因是多样的,主要是因为枯落物最大持水量主要取决于枯落物现存量大小和其持水特性<sup>[20]</sup>,另外还包括当地气候,枯落物厚度,枯落物的分解程度以及林分类型等。

未分解层和半分解层的初始持水量均为落叶松>樟子松和榆树混交林>樟子松和落叶松混交林>樟子松,这与肖洋等<sup>[21]</sup>在公别拉河流域对主要的森林类型的水源涵养功能研究中的持水量规律

中的落叶松大于樟子松一致,但与其中的针阔混交与落叶松的关系相反,这可能是由于针阔混交的比例以及造林密度有关,本次样地的榆树比例较小,且密度较小;4种林分类型的持水量与浸水时间的关系符合  $M = a \ln t + b$ ,持水速率和浸水时间的关系符合  $V = kt^n$  模型。这与大多数学者<sup>[14,22-23]</sup>对枯落物层水文特征的研究所得模型一致。

综合各项因子得出,落叶松的持水效果均最好,林地的涵养水源功能优于其他类型的林分。落叶松的持水能力最好,可能是由于蓄积量、树种等原因造成的,不同树种、凋落物的凋落程度以及分解速率,所处环境都可能造成蓄积量的差异。

## 4 结论

(1)各种林分类型的枯落物蓄积量的范围为 5.42~24.59 t/hm<sup>2</sup>,其中落叶松蓄积量最大,为 24.59 t/hm<sup>2</sup>,樟子松和榆树混交林蓄积量最小,为 5.42 t/hm<sup>2</sup>,且 4 种林分类型的半分解层蓄积量均大于未分解层。

(2)枯落物层特征为平均最大持水量为 16.61~9.99 t/hm<sup>2</sup>,大小规律为落叶松>樟子松和落叶松混交林>樟子松>樟子松和榆树混交林,落叶松的平均持水量最大,为 16.61 t/hm<sup>2</sup>,樟子松和榆树混交林的平均持水量最小,为 9.99 t/hm<sup>2</sup>;平均最大持水率范围为 427.02%~303.13%,平均最大持水率大小依次为落叶松>樟子松和榆树混交林>樟子松和落叶松混交林>樟子松;4种林分类型的持水量与浸水时间的关系符合  $M = a \ln t + b$ ,持水速率和浸水时间的关系符合  $V = kt^n$  模型。

(3)在枯落物的拦蓄中,有效拦蓄量规律大小为樟子松和落叶松混交林(74.65 t/hm<sup>2</sup>)>落叶松(71.21 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松(48.82 t/hm<sup>2</sup>)>樟子松和榆树混交林(17.66 t/hm<sup>2</sup>);最大拦蓄量的大小规律与有效拦蓄量一致。有效拦蓄率的大小规律为落叶松(344.99%)>樟子松和榆树混交林(326.66%)>樟子松和落叶松混交林(286.27%)>樟子松(215.49%);最大拦蓄率的大小规律与有效拦蓄率一致。

(4)通过综合对比分析得出,落叶松的综合最大持水量最大。因此,在此次研究的 4 种类型的林分中落叶松的持水能力最好。所以在森林经营中可以适当地多经营落叶松林来增强牧场防护林枯落物层的持水能力,以此涵养水源,改善人类赖以生存的生态环境。

### 参考文献:

[1] 杜金鸿,刘方正,周越,等.自然保护地生态系统服务价值评估研究进展[J].环境科学研究,2019,32(9):1475-1482.

[2] 曹恒.青海高寒区不同人工林地土壤和枯落物的水文功能研究[D].北京:北京林业大学,2014.

[3] 张更权.大通县退耕还白桦林枯枝落物和土壤持水效应

[J].安徽农业科学,2018,46(31):107-110.

[4] 景贵阳.陇东黄土高原人工刺槐林枯落物层和土壤层生态水文功能研究[D].兰州:甘肃农业大学,2017.

[5] 常红娟,张治昊.华北地区不同林分类型枯落物层持水性能研究[J].河北林业科技,2016(5):25-28.

[6] 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.

[7] 彭云莲,金光梁,吕刚,等.浑河源头水源涵养林枯落物持水能力研究[J].沈阳农业大学学报,2018,49(5):613-620.

[8] 敖特根其木格,秦富仓,周佳宁,等.内蒙古自治区多伦县不同林地枯落物持水性能研究[J].水土保持通报,2017,37(4):114-118.

[9] 邢晓光,沈会涛,马文才,等.冀西北山地华北落叶松和白桦林下枯落物水文特征[J].水土保持通报,2016,36(5):126-130.

[10] 郭宇嘉,牛庆花,陆贵巧,等.承德市第三乡林场不同林分类型枯落物和土壤的持水特性[J].水土保持通报,2018,38(3):38-44.

[11] 柳晓娜,贾国栋,余新晓.不同密度杨树人工林的林地涵养水源功能研究[J].环境科学与技术,2017,40(10):8-13.

[12] 杨龙.梵净山黔稠林的结构与动态[J].植物生态学与地植物学丛刊,1983(3):204-214.

[13] 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.

[14] 宣立辉,佟彦国,张军,等.冀北山区油松人工林林分密度对枯落物层和土壤层水文特征的影响[J].林业与生态科学,2019,34(1):15-23.

[15] 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.

[16] 周福成.塞罕坝 3 种林分类型枯落物持水特性研究[J].林业与生态科学,2018,33(4):381-386.

[17] 徐洪亮,满秀玲,盛后财.大兴安岭不同类型落叶松天然林水源涵养功能研究[J].水土保持研究,2011,18(4):92-96.

[18] 刘艳,孙向阳,范俊岗,等.辽宁省森林枯落物现存量及其持水性能[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(4):689-699.

[19] 何斌,黄承标,秦武明,等.不同植被恢复类型对土壤性质和涵养水源功能的影响[J].水土保持学报,2009,23(2):71-74.

[20] 马正锐,程积民,班松涛,等.宁夏森林枯落物储量与持水性能分析[J].水土保持学报,2012,26(4):199-203.

[21] 肖洋,满秀玲,范金凤.公别拉河流域主要森林类型的土壤肥力与涵养水源功能[J].东北林业大学学报,2006,34(1):28-30.

[22] 杨良辰,张楠.沿坝地区 3 种混交林枯落物层与土壤层水源涵养能力[J].水土保持研究,2019,26(3):253-258.

[23] 孙立博,余新晓,陈丽华,等.坝上高原杨树人工林的枯落物及土壤水源涵养功能退化[J].水土保持学报,2019,33(1):104-110.