黄土高原子午岭油松林枯落物的水源涵养功能评价

孙于卜[1,2,3], 欧晓彬[1,2,3], 陈轲林[1], 马文昌[1], 林 飞[1], 王智威[1,2,3], 龚 磊[1,2,3]

(1.陇东学院 生命科学与技术学院, 甘肃 庆阳 745000; 2.甘肃省陇东生物资源保护利用与生态修复重点实验室, 甘肃 庆阳 745000; 3.甘肃省子午岭生态系统野外科学观测研究站, 甘肃 庆阳 745000)

摘　要: [目的] 探究黄土高原子午岭林区不同密度人工油松林枯落物的水源涵养功能,为该区功能导向型林分改造提供理论依据。[方法] 于 2021 年 8 月在甘肃省合水县子午岭连家砭林场选取 6 种不同林分密度(2 222,3 200,4 802,6 250,7 503,9 286 株/hm^2)的油松人工林为研究对象,采用坐标综合评价法对不同密度油松林枯落物的水源涵养功能进行评价。[结果] ①油松林枯落物的厚度和蓄积量分别介于 2.78～7.30 cm 和 14.97～52.41 t/hm^2,两者变化趋势均呈"单峰型",峰值出现在林分密度 4 802 株/hm^2; ②林分密度 3 200 株/hm^2 的枯落物最大持水率(192.98%)和有效拦蓄率(152.04%)较高,而林分密度 4 802 株/hm^2 的枯落物的最大持水量(101.46 t/hm^2)和有效拦蓄量(67.92 t/hm^2)表现优良,且半分解层在枯落物降水拦蓄过程中起主要作用; ③枯落物持水率(量)、吸水速率与浸水时间分别呈对数函数〔R^2>0.956(0.962)〕和幂函数(R^2>0.998)关系; ④油松林枯落物水源涵养功能发挥较好的林分密度为 4 802 株/hm^2。[结论] 仅考虑油松林枯落物的水源涵养功能,油松林密度应调控至 4 800 株/hm^2。后续应加强对油松林林冠层及土壤层的研究,并综合考虑土壤水分植被承载力及油松林水分利用规律等,最终确定油松林水源涵养功能发挥最优的林分密度。

关键词: 子午岭; 密度梯度; 枯落物; 水源涵养功能; 综合评价

文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2022)03-0008-08　　**中图分类号:** S715.7

文献参数: 孙于卜, 欧晓彬, 陈轲林, 等.黄土高原子午岭油松林枯落物的水源涵养功能评价[J].水土保持通报,2022,42(3):8-15.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.002; Sun Yubo, Ou Xiaobin, Chen Kelin, et al. Evaluation of water conservation function of litters of *Pinus tabuliformis* forest in Ziwuling forest region of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):8-15.

Evaluation of Water Conservation Function of Litters of *Pinus Tabuliformis* Forest in Ziwuling Forest Region of Loess Plateau

Sun Yubo[1,2,3], Ou Xiaobin[1,2,3], Chen Kelin[1], Ma Wenchang[1], Lin Fei[1], Wang Zhiwei[1,2,3], Gong Lei[1,2,3]

(1.*College of Life Sciences and Technology*, *Longdong University*, *Qingyang*, *Gansu* 745000, *China*; 2.*Gansu Key Laboratory of Protection and Utilization for Biological Resources and Ecological Restoration*, *Qingyang*, *Gansu* 745000, *China*; 3.*Gansu Ziwuling Ecological System Observation and Research Station*, *Qingyang*, *Gansu* 745000, *China*)

Abstract: [Objective] The water conservation function of litters of artificial *Pinus tabuliformis* forests in the Ziwuling forest region of the Loess Plateau was determined in order to provide a theoretical basis for function-oriented stand improvement. [Methods] In August 2021, artificial *Pinus tabuliformis* forests with six stand densities (2 222, 3 200, 4 802, 6 250, 7 503, 9 286 plants/hm^2) were selected in the Lianjiabian Forest Farm in Ziwuling, Heshui County, Gansu Province. The coordinate comprehensive evaluation method was used to evaluate the water conservation function of *P. tabuliformis* forests. [Results] ① The thickness and volume of litters ranged from 2.78 to 7.30 cm and from 14.97 to 52.41 t/hm^2, respectively. With the increase of stand density, the thickness and volume of litters showed a "single peak" change, with the peak appeared at 4 802 plants/hm^2. ② The maximum water-holding rate (192.98%) and effective interception rate

收稿日期: 2021-11-16　　**修回日期:** 2022-01-03

资助项目: 陇东学院博士资助项目"增温对陇东黄土高原人工草地水土保持效应的影响机制"(XYBY202002); 甘肃省自然科学资助项目(21JR11RM042); 甘肃省高等学校创新资助项目(2021B-273)

第一作者: 孙于卜(1988—),男(汉族),甘肃省庆阳市人,博士,副教授,主要从事水土保持与林业生态工程研究。Email:sunyubo1108@163.com。

(152.04%) of litter for the 3 200 plants/hm^2 stand were higher, while the maximum water-holding capacity (101.46 t/hm^2) and effective interception amount (67.92 t/hm^2) of litter for the 4 802 plants/hm^2 stand were excellent. The semi-decomposed layer played a major role in the precipitation interception process of litters. ③ The water-holding rate/amount, water absorption rate, and soaking time of litters showed logarithmic responses (R^2>0.956, 0.962) and a power function response (R^2>0.998), respectively. ④ The water conservation function of litters was better when the density of the *P. tabuliformis* forest was 4 802 plants/hm^2. [Conclusion] When only considering the water conservation function of litters of an artificial *P. tabuliformis* forest, the density of the forest should be 4 800 plants/hm^2. In the future, research on the canopy and soil layer of the *P. tabuliformis* forest should be strengthened. The soil moisture vegetation bearing capacity and the water utilization law of the forest should be comprehensively considered to determine the stand density of the forest that provides the best water conservation function.

Keywords: Ziwuling forest; density gradient; litters; water conservation function; comprehensive evaluation

森林生态系统是中国陆地生态系统的重要组成部分,具有调节气候、净化环境、水土保持、水源涵养等多种生态功能[1],其中水源涵养是森林生态系统最主要的生态功能之一,涵养着陆地 90 %以上的淡水资源[2]。森林通过林冠、枯落物及土壤的垂直结构实现对降雨的调蓄和再分配,发挥其水源涵养功能[3-4]。枯落物层作为森林发挥水源涵养功能的第二作用层,具有较强的截流和蓄水的性能,其截持水量是自身干重的 2～5 倍[5],还可降低土壤蒸发、改善土壤理化性质,增大土壤孔隙率,提高土壤入渗,防止土壤严重板结,增加土壤有机质[6],在森林生态系统水文过程中起着极其重要的作用。

枯落物包括乔灌草的枯枝、枯叶、落皮等及动物的残骸及代谢产物[7],其水源涵养功能与人为干扰、水热条件、枯落物蓄积量、分解状况及自然含水量等多种因子有关[8-10]。目前,对枯落物的降雨截持及持水性能等水文特性的研究已较为成熟[11-13],而对森林枯落物水源涵养功能的综合评价亦成为森林水文研究的热点内容之一[14-15]。

子午岭林区分布有大面积的人工油松林,但在森林管理上存在密度偏大及地力衰退等问题,此类问题在黄土高原普遍存在[16-17],亟待对此类林分进行调控和改造,提升生态服务功能。许多学者对不同密度油松林枯落物水源涵养功能进行研究,林分密度的选取集中在 338～3 683 株/hm^2,不同地区油松枯落物发挥水源涵养功能较好的林分密度各不相同[18-23],而油松林密度大于 3 683 株/hm^2 的枯落物水源涵养功能的变化规律尚不明确,且子午岭林区油松林枯落物的水源涵养功能对林分密度变化的响应缺乏研究。因此,本研究在子午岭林区选取密度为 2 222～9 286 株/hm^2 的人工油松林,基于枯落物持水能力指标定量分析,通过坐标综合评价法探究枯落物水源涵养功能发挥较好的林分密度,以期为子午岭林区人工油松林枯落物水源涵养功能提升及功能导向型林分改造提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

子午岭位于黄土高原的腹地,跨陕西、甘肃两省(33°50′—36°50′ N,107°30′—109°40′ E),是泾河和洛河水系的发源地和补给区。甘肃省子午岭林区位于庆阳市境内,被誉为黄土高原的“天然水库”,陇东大地的“生态安全屏障”[24]。研究区位于甘肃省合水县连家砭林场(35°03′—36°37′N,108°10′—109°18′E),属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,海拔 1 100～1 756 m,年均降水量 587.6 mm,降雨集中于 6—9 月,约占全年降水量的 70.4%,年均相对湿度 64%,年均日照时数 2 510 h,年均气温 7.4 ℃,≥10 ℃积温为 2 671.0 ℃,年无霜期 135 d,属于大陆性季风气候,土壤类型为黄绵土和灰褐土。主要乔木有油松(*Pinus tabuliformis*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、小叶杨(*Populus simonii*)、山杨(*Populus davidiana*)、茶条槭(*Acer ginnala*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、白桦(*Betula platyphylla*)等 200 余种;灌木主要有虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、西北栒子(*Cotoneaster zabelii*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、荆条(*Vitex negundo*)、黄蔷薇(*Rosa hugonis*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、胡颓子(*Elaeagnus pungens*)、连翘(*Forsythia suspensa*)等;草本主要有大披针苔草(*Carex lanceolata*)、大车前(*Plantago major*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、紫花地丁(*Viola philippica*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 甘肃省子午岭林区现有人工林面积 1.16×10^5 hm^2，油松林占造林总面积的70%以上，占森林总面积的23.4%，是该区最主要林分类型之一[17]。本研究于2021年8月在甘肃省合水县连家砭林场对人工油松林密度勘察后，选择20×20 m的2 222，3 200，4 802，6 250，7 503，9 286株/hm^2的6种密度的油松林为研究样地，6种林分密度分别用 $YS_{2\,222}$，$YS_{3\,200}$，$YS_{4\,802}$，$YS_{6\,250}$，$YS_{7\,503}$，$YS_{9\,286}$ 表示，样地基本情况见表1。

表1 样地基本情况

样地编号	林分密度/(株·hm^{-2})	海拔/m	坡度/(°)	坡向	林龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	冠幅/m	郁闭度/%
$YS_{2\,222}$	2 222	1 595	26	半阳坡	30	16.73	18.13	3.35	53
$YS_{3\,200}$	3 200	1 624	31			16.12	16.07	2.91	60
$YS_{4\,802}$	4 802	1 550	22			15.60	13.11	1.96	70
$YS_{6\,250}$	6 250	1 570	27			15.24	11.25	1.56	75
$YS_{7\,503}$	7 503	1 590	24			14.75	10.82	1.47	79
$YS_{9\,286}$	9 286	1 558	25			13.76	8.96	1.36	80

1.2.2 枯落物取样及持水能力测定 在各样地内随机选取3个0.3 m×0.3 m的枯落物样方，用钢尺测量样方内枯落物未分解层及半分解层的厚度，用档案袋分层收集称量鲜重，后将36个样品放入烘箱烘(85 ℃)至恒重，称量干重。

采用室内浸水法测定枯落物的持水能力。将烘干的枯落物转移至0.075 mm的尼龙网袋[25]封口后浸入水中，分别在浸水10 min，20 min，30 min，40 min，50 min，1 h，1.5 h，2 h，4 h，6 h，12 h，24 h时取出网袋，沥干至不再滴水后迅速称重。枯落物各持水能力指标如下：

$$M=M_d/S\times100 \tag{1}$$

$$R_0=(M_0-M_d)/M_d\times100\% \tag{2}$$

$$R_{h\max}=(M_{24}-M_d)/M_d\times100\% \tag{3}$$

$$R_{sv}=0.85R_{h\max}-R_0 \tag{4}$$

$$W_{h\max}=R_{h\max}\times M \tag{5}$$

$$W_{sv}=R_{sv}\times M \tag{6}$$

$$R_i=(M_i-M_d)/M_d\times100\% \tag{7}$$

$$W_i=R_i\times M \tag{8}$$

$$V_i=W_i/t \tag{9}$$

式中：M 为蓄积量(t/hm^2)；M_d 为干重(g)；S 为单个样方面积(cm^2)；R_0 为自然含水率(%)；M_0 为鲜重(g)；$R_{h\max}$ 为最大持水率(%)；M_{24} 为枯落物浸泡24 h的质量(g)；R_{sv} 为有效拦蓄率(%)；$W_{h\max}$ 为最大持水量(t/hm^2)；W_{sv} 为有效拦蓄量(t/hm^2)；R_i 为持续浸水 i 时间的持水率(%)；M_i 为持续浸水 i 时间的质量(g)；W_i 为持续浸水 i 时间的持水量(t/hm^2)；V_i 为持续浸水 i 时间的吸水速率〔t/(hm^2·h)〕；t 为持续浸水时间(h)；0.85为有效拦蓄系数。

1.2.3 枯落物水源涵养功能评价 本文采用坐标综合评价法对6种密度油松林枯落物的水源涵养功能进行评价，坐标综合评价法是基于多维空间理论，将不同类型下不同属性评价指标看作共存于相同空间单元的对象，以各评价指标到标准点的距离对不同类型进行评价和比较，可对多个不同量纲的指标进行综合评价[14,26-27]。评价指标为以下6项($n=6$)：枯落物厚度、最大持水率、有效拦蓄率、蓄积量、最大持水量、有效拦蓄量。首先将各指标进行无量纲化，i 表示不同密度油松林，j 表示不同指标，列出原始数据 X_{ij}，X_j 为每一指标最大值，根据公式(10)获得相对值 d_{ij} 的矩阵坐标。然后根据公式(11)计算 i 密度油松林的第 j 个指标到标准点的距离 P_{ij}。最后根据公式(12)获得 i 密度油松林的各指标到标准点的距离之和 S_i，评价值小者表明水源涵养功能相对较高。

$$d_{ij}=X_{ij}/X_j \tag{10}$$

$$P_{ij}=\sqrt{\sum_i(1-d_{ij})^2} \tag{11}$$

$$S_i=\sum_{j=1}^{n}P_{ij} \tag{12}$$

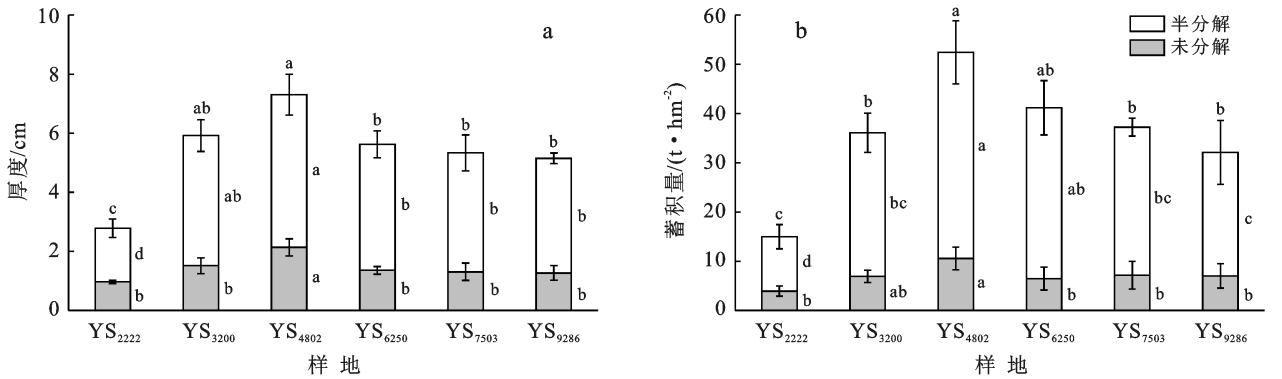
1.2.4 数据处理 采用Microsoft Excel 2010进行数据处理，利用SPSS 26.0的单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同密度油松林枯落物各指标的差异，采用Origin 2021作图。

2 结果与分析

2.1 枯落物厚度及蓄积量

6种密度油松林枯落物厚度和蓄积量见图1a和图1b，枯落物总厚度介于2.78～7.30 cm，总蓄积量介于14.97～52.41 t/hm^2，枯落物厚度和蓄积量随林分密度的增高，其变化趋势一致，未分解层和半分解层的厚度和蓄积量均呈“单峰型”，其顶点和最低点对应的林分密度分别为4 802，2 222株/hm^2。枯落物半

分解层的厚度和蓄积量均大于未分解层,且半分解层厚度为未分解层的 1.88 倍以上,半分解层蓄积量占枯落物总蓄积量的 73.92 %以上。密度 4 802 株/hm^2 的枯落物总厚度及半分解层厚度均与 3 200 株/hm^2 差异不显著($p>0.05$),与其余林分差异显著($p<0.05$)。密度 4 802 株/hm^2 的枯落物未分解层厚度与其余林分均差异显著($p<0.05$)。密度 4 802 株/hm^2 的枯落物总蓄积量及半分解层蓄积量均与6 250株/hm^2 差异不显著($p>0.05$),与其余林分差异显著($p<0.05$)。密度 4 802 株/hm^2 的枯落物未分解层蓄积量与 3 200 株/hm^{2}差异不显著($p>0.05$),与其余林分差异显著($p<0.05$)。



注:同一列中不同字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1　黄土高原子午岭油松林枯落物厚度和蓄积量

2.2　枯落物最大持水率(量)

6 种密度油松林枯落物最大持水率见图 2a。枯落物的最大持水率在 3 200 株/hm^2 达到最大(192.98%),9 286 株/hm^2 最小(167.91 %),且 6 种密度枯落物最大持水率间差异均不显著($p>0.05$)。枯落物未分解层最大持水率在 4 802 株/hm^2 最大(171.13%),2 222 株/hm^2 最小(146.60%),密度 4 802 株/hm^{2}与 2 222 株/hm^2,9 286 株/hm^2 差异显著($p<0.05$),与其余林分差异不显著($p>0.05$)。枯落物半分解层的最大持水率在 3 200 株/hm^2 最大(232.74%),6 250 株/hm^2 最小(181.41%),且两者差异显著($p<0.05$)。枯落物半分解层最大持水率的值比未分解层的值大 25.94%～81.63%。

6 种密度油松林枯落物最大持水量见图 2b,油松林枯落物最大持水量为 29.23～101.46 t/hm^2,枯落物未分解层与半分解层的最大持水量均呈“单峰型”,峰值均在 4 802 株/hm^2,为 17.78 t/hm^2 和 83.68 t/hm^2,最小值在 2 222 株/hm^2,为 5.80 t/hm^2 和 23.44 t/hm^2。密度4 802株/hm^2 的枯落物总最大持水量与 3 200 株/hm^2,6 250 株/hm^2 差异不显著($p>0.05$),与其余林分差异显著($p<0.05$)。枯落物半分解层最大持水量是未分解层的 4 倍以上。密度 4 802 株/hm^2 的枯落物未分解层最大持水量与其余林分差异显著($p<0.05$)。密度4 802株/hm^2 的枯落物半分解层最大持水量与3 200株/hm^2 差异不显著($p>0.05$),与其余林分差异显著($p<0.05$)。

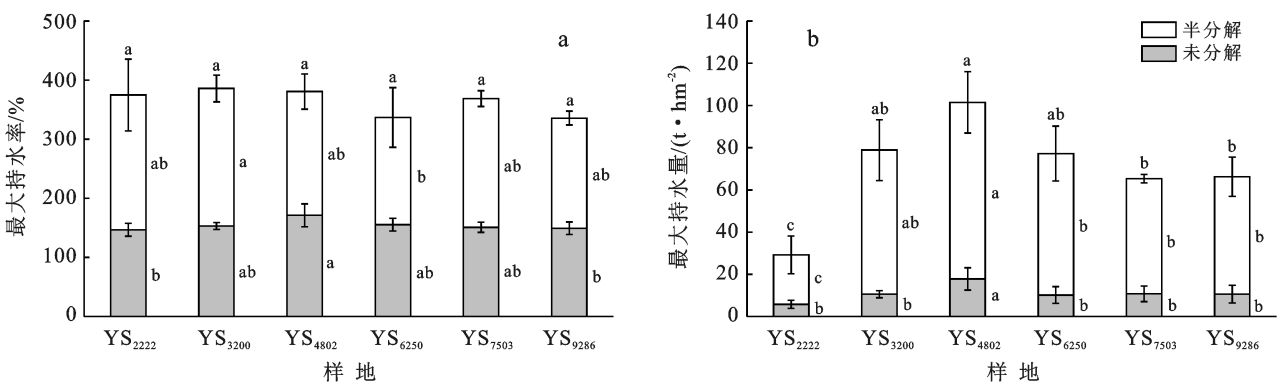


图 2　黄土高原子午岭油松林枯落物最大持水率(量)

2.3　枯落物有效拦蓄率(量)

6 种密度油松林枯落物有效拦蓄率见图 3a。枯落物有效拦蓄率在林分密度为 3 200 株/hm^2 时最大(152.04%),9 286 株/hm^2 时最小(127.06%),6 种密度枯落物的有效拦蓄率间差异均不显著($p>0.05$)。枯落物未分解层的有效拦蓄率为:4 802 株/hm^2>

3 200 株/hm^2 > 6 250 株/hm^2 > 7 503 株/hm^2 > 9 286 株/hm^2 > 2 222 株/hm^2，且 4 802 株/hm^2 与 3 200 株/hm^2，6 250 株/hm^2 差异不显著($p>0.05$)，与其余林分差异显著($p<0.05$)。枯落物半分解层有效拦蓄率为：3 200 株/hm^2 > 2 222 株/hm^2 > 7 503 株/hm^2 > 9 286 株/hm^2 > 6 250 株/hm^2 > 4 802 株/hm^2，且 3 200 株/hm^2 与 4 802 株/hm^2，6 250 株/hm^2 差异显著($p<0.05$)，与其余林分差异不显著($p>0.05$)。

6 种密度的油松林枯落物的有效拦蓄量如图 3b 所示。枯落物未分解层和半分解层的有效拦蓄量均呈现“单峰型”，峰值在 4 802 株/hm^2，最小值在 2 222 株/hm^2。林分密度为 4 802 株/hm^2 的枯落物未分解层和半分解层的有效拦蓄量均与 2 222 株/hm^2 差异显著($p<0.05$)，与其余林分差异不显著($p>0.05$)。枯落物半分解层的有效拦蓄量是未分解层的 4 倍以上。

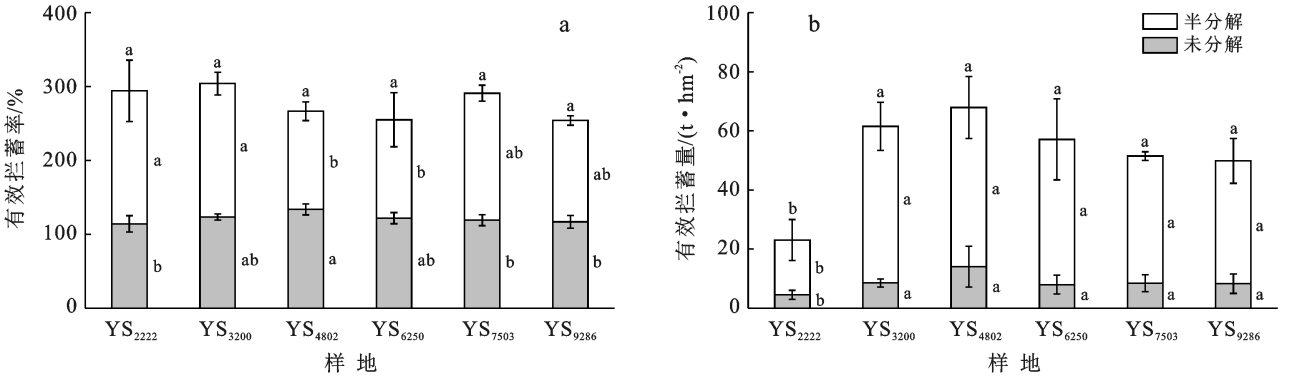


图 3 黄土高原子午岭油松林枯落物有效拦蓄率(量)

2.4 枯落物持水过程

6 种密度油松林枯落物持水过程见图 4。枯落物在浸水初始 2 h，吸水速率急剧降低，持水率(量)迅速升高。浸水 2～12 h，枯落物吸水速率逐渐降低，持水率(量)增加缓慢。浸水 12～24 h，枯落物吸水速率逐渐趋近于零，持水率(量)逐渐达到饱和。相同密度下，枯落物半分解层的持水率(量)及吸水速率均高于未分解层。对 6 种密度油松林枯落物未分解层和半分解层的持水率(量)与浸水时间进行拟合，油松林枯落物持水率(量)与浸水时间均呈明显的对数函数关系〔公式(13)〕。持水率与浸水时间函数的决定系数 $R^2>0.956$，持水量与浸水时间函数的 $R^2>0.962$(表 2)。

$$y=a\ln x+b \tag{13}$$

式中：y 为枯落物持水率(%)或持水量(t/hm^2)；x 为浸水时间(h)；a 为系数；b 为常数项。

对 6 种密度油松林枯落物未分解层和半分解层的吸水速率与浸水时间进行拟合，油松林枯落物吸水速率与浸水时间均呈明显的幂函数关系(公式 14)，且 $R^2>0.998$(表 2)。

$$y=kx^n \tag{14}$$

式中：y 为枯落物吸水速率(t/(hm^2·h))；x 为浸水时间(h)；k 为系数；n 为指数。

表 2 黄土高原子午岭不同密度油松林枯落物持水率、持水量、吸水速率与时间关系

样地编号	枯落物层	持水率		持水量		吸水速率	
		关系式	R^2	关系式	R^2	关系式	R^2
$YS_{2\,222}$	未分解	$y=0.163\ln x+0.891$	0.987	$y=0.641\ln x+3.542$	0.988	$y=3.465x^{-0.839}$	0.998
	半分解	$y=0.142\ln x+1.813$	0.985	$y=1.451\ln x+18.677$	0.983	$y=18.613x^{-0.927}$	0.999
$YS_{3\,200}$	未分解	$y=0.162\ln x+0.922$	0.970	$y=1.110\ln x+6.404$	0.971	$y=6.283x^{-0.845}$	0.999
	半分解	$y=0.181\ln x+1.833$	0.972	$y=5.363\ln x+53.713$	0.973	$y=53.307x^{-0.905}$	0.999
$YS_{4\,802}$	未分解	$y=0.146\ln x+1.228$	0.979	$y=1.497\ln x+13.023$	0.976	$y=12.896x^{-0.892}$	0.999
	半分解	$y=0.123\ln x+1.748$	0.956	$y=4.468\ln x+70.971$	0.962	$y=70.805x^{-0.940}$	0.999
$YS_{6\,250}$	未分解	$y=0.183\ln x+0.915$	0.973	$y=1.173\ln x+6.051$	0.975	$y=5.923x^{-0.831}$	0.999
	半分解	$y=0.158\ln x+1.361$	0.980	$y=5.537\ln x+51.200$	0.980	$y=50.741x^{-0.897}$	0.999
$YS_{7\,503}$	未分解	$y=0.165\ln x+0.959$	0.983	$y=1.154\ln x+6.850$	0.981	$y=6.734x^{-0.850}$	0.999
	半分解	$y=0.127\ln x+1.795$	0.993	$y=3.191\ln x+44.987$	0.992	$y=44.873x^{-0.933}$	0.999
$YS_{9\,286}$	未分解	$y=0.155\ln x+1.034$	0.986	$y=1.074\ln x+7.385$	0.987	$y=7.268x^{-0.865}$	0.999
	半分解	$y=0.177\ln x+1.354$	0.973	$y=5.201\ln x+40.507$	0.970	$y=39.935x^{-0.878}$	0.999

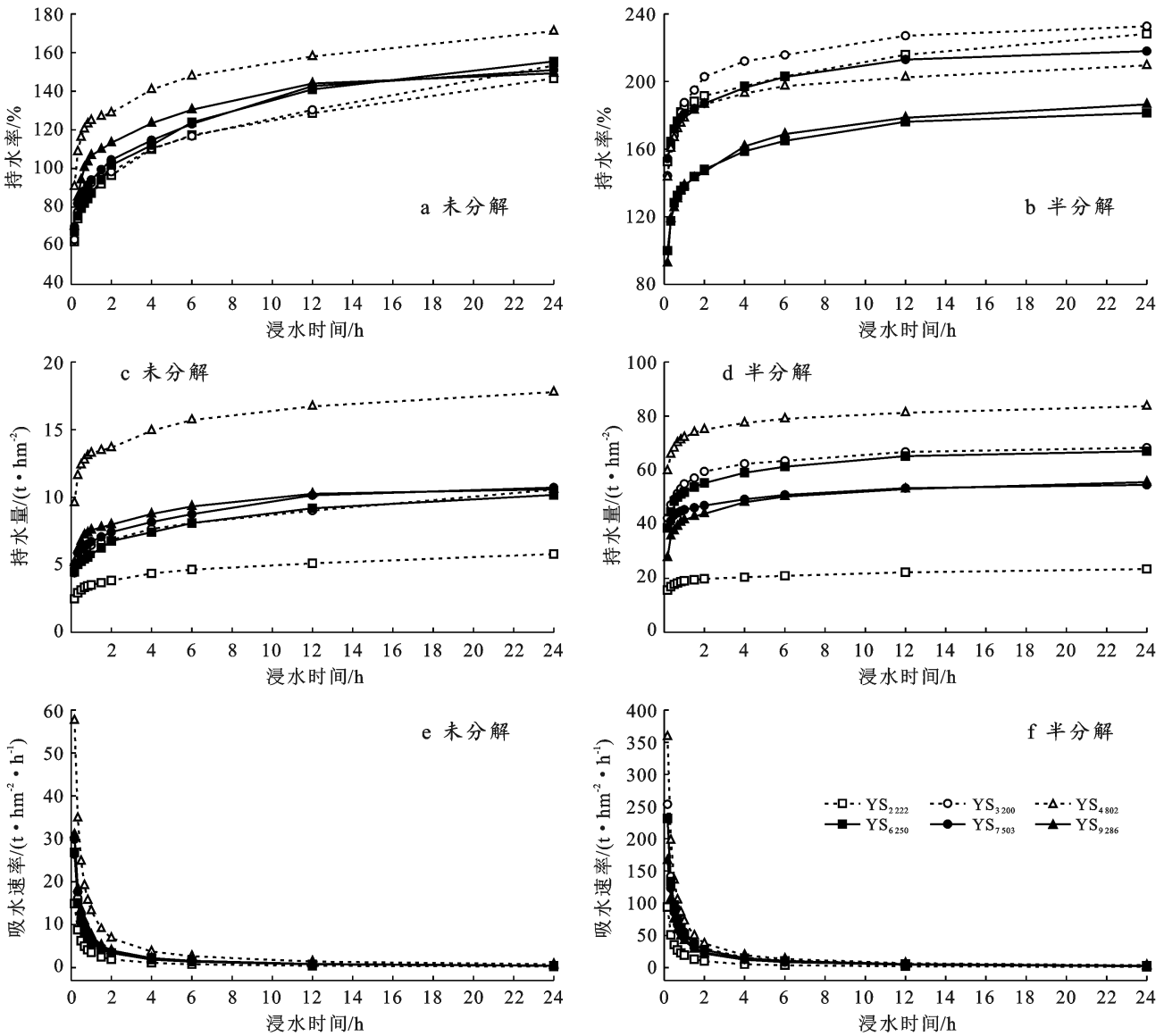


图 4　黄土高原子午岭油松林枯落物持水率、持水量和吸水速率时间变化

2.5　枯落物水源涵养功能评价

前文对不同密度油松林枯落物的持水能力指标分析表明,不同油松林密度在各持水能力指标出现不同的变化规律,这为最终评价不同密度油松林枯落物的水源涵养功能造成困难,本文采用的坐标综合评价法可以有效地解决此问题。6 种密度油松林枯落物水源涵养功能评价结果见表 3。油松林枯落物的水源涵养功能表现为:4 802 株/hm^2 > 3 200 株/hm^2 > 6 250 株/hm^2 > 7 503 株/hm^2 > 9 286 株/hm^2 > 2 222 株/hm^2,林分密度 4 802 株/hm^2 的枯落物水源涵养功能明显优于其他密度,林分密度 2 222 株/hm^2 的枯落物水源涵养功能相对较差。

表 3　黄土高原子午岭不同密度油松林枯落物水源涵养功能评价

样地	厚度	最大持水率	有效拦蓄率	蓄积量	最大持水量	有效拦蓄量	评价结果	排序
$YS_{2\ 222}$	0.62	0.03	0.03	0.71	0.71	0.66	2.76	6
$YS_{3\ 200}$	0.19	0.00	0.00	0.31	0.22	0.09	0.81	2
$YS_{4\ 802}$	0.00	0.01	0.12	0.00	0.00	0.00	0.13	1
$YS_{6\ 250}$	0.23	0.13	0.16	0.21	0.24	0.16	1.13	3
$YS_{7\ 503}$	0.27	0.04	0.04	0.29	0.36	0.24	1.24	4
$YS_{9\ 286}$	0.30	0.13	0.16	0.39	0.35	0.27	1.60	5

3 讨论

样地调查结果显示，随着油松林密度的增大，平均树高、胸径及冠幅降低，而郁闭度增大，这与晋西黄土区[19]和北京八达岭林场[21]的研究结果一致。本研究中，子午岭林区油松林枯落物厚度介于2.78～7.30 cm，有研究认为，油松林枯落物层厚度介于1.94～3.85 cm，这是由于其选取的油松林密度相对较低（1 478～3 189 株/hm^2）[23]。植物生长状况、水热条件、物种组成及枯落物特性等多种因素决定了枯落物蓄积量[28]。本研究中，枯落物蓄积量介于14.97～52.41 t/hm^2，与北京八达岭林场[21]、冀北山区[22]、土石山区[23]的研究结果不同，这是由于本研究选取的油松林密度相对较大，而甘肃小陇山不同密度（1 367～3 683株/hm^2）油松林枯落物蓄积量介于6.85～15.63 t/hm^2[18]，相同密度区间枯落物蓄积量的值与本研究结果相近。本研究中，随着油松林密度的增高，油松林枯落物的厚度和蓄积量均呈“单峰型”，峰值出现在4 802 株/hm^2。一些研究发现，随着油松林密度（388～3 683 株/hm^2）的增高，枯落物厚度和蓄积量逐渐增大[18,20]，这和本研究的结论一致。产生这种“单峰型”变化的原因一方面可能是林分密度过低，枯落物来源减少[20]，且光照过强，致使枯落物分解加速[19]，而林分密度过大，林木个体间对资源的竞争加剧，林下水肥气热等条件变差[29]，影响林木正常生长，并导致枝条出现“自疏”[14]，致使枯落物蓄积量降低；另一方面可能与坡度的影响有关，本研究中，坡度变化区间为22°～31°，其中林分密度4 802 株/hm^2 的坡度最小，有研究表明，坡度在20°～40°，枯落物蓄积量随坡度的增大而降低[30]。枯落物厚度和蓄积量变化趋势相同，存在一定的正相关性[30-31]。本研究中，油松林枯落物半分解层厚度为未分解层的1.88倍以上，有研究表明，半分解层的厚度2倍于未分解层[5]，这可能是由于其选取的油松林龄较大（35 a）。半分解层蓄积量占枯落物总蓄积量的68%以上[21-22]，与本文结论相近。

枯落物既可防止降雨和地表径流对土壤的冲刷，又具有较高的持水率和持水量，最大持水率（量）可反映枯落物水容量及吸收地表径流的作用[32]，而有效拦蓄率（量）可反映枯落物对降雨的拦蓄能力。本研究中，枯落物最大持水率和有效拦蓄率均在3 200 株/hm^2表现优良，9 286 株/hm^2 表现较差；枯落物的最大持水量和有效拦蓄量均在4 802 株/hm^2 较高，2 222 株/hm^2 较小；两者变化规律不一致，可能是由于最大持水量和有效拦蓄量受枯落物蓄积量、结构及分解状况等的综合影响[33]。枯落物半分解层的最大持水率（量）和有效拦蓄率（量）均大于未分解层，表明油松枯落物半分解层的持水能力和拦蓄能力均强于未分解层，半分解层在枯落物降水拦蓄过程中起主要作用，这与许多研究结论一致[21-22]。

枯落物的持水过程一定程度上可以反映其对雨强较大降雨的拦蓄能力，枯落物吸水速率越高，则短时持水率（量）越大，截水效果就越好[21,33]。本研究中，枯落物浸水2 h内，枯落物相对干燥，水势低，吸水速率大[23]，随着浸水时间延长，枯落物逐渐湿润，水势差降低[23]，其吸持能力随之降低，至24 h，持水趋于饱和，吸水速率逐渐趋近零。枯落物短时快速吸水有助于森林生态系统水源涵养功能的发挥[33]。相同密度下，枯落物未分解层的持水率（量）和吸水速率均小于半分解层，一些研究得出相同的结论[5,21]。油松林枯落物持水率（量）与浸水时间均呈明显的对数函数关系，吸水速率与浸水时间均呈明显的幂函数关系，这已成为共识[5,20,21-23]。

通过对不同密度油松林枯落物的水源涵养功能的综合评价，当林分密度在4 802 株/hm^2 时，枯落物水源涵养功能发挥较好，密度过高或过低均会限制其水源涵养功能的发挥。为进一步确定油松林水源涵养功能发挥最优的林分密度，后续研究应加强对油松林林冠层及土壤层的研究，并综合考虑土壤水分植被承载力及油松林水分利用规律等，系统科学地评价子午岭林区油松林的水源涵养功能，为区域水源涵养功能提升及低效林改造提供有力依据。

4 结论

（1）油松林枯落物厚度介于2.78～7.30 cm，蓄积量介于14.97～52.41 t/hm^2，枯落物厚度和蓄积量均呈“单峰型”，林分密度4 802 株/hm^2 的枯落物厚度和蓄积量较高，且半分解层厚度为未分解层的1.88倍以上，半分解层蓄积量占总蓄积量的73.92%以上。

（2）油松林枯落物最大持水率和有效拦蓄率均在3 200 株/hm^2 较大，而最大持水量和有效拦蓄量在4 802 株/hm^2 时表现优良，半分解层在枯落物降水拦蓄过程中起主要作用。

（3）油松林枯落物的水源涵养功能发挥较好林分密度为4 802 株/hm^2，林分过密或过疏均会限制枯落物水源涵养功能的发挥。仅考虑油松林枯落物的水源涵养功能，油松林密度应调控至4 800 株/hm^2。后续应加强对油松林林冠层及土壤层的研究，并综合考虑土壤水分植被承载力及油松林水分利用规律等，最终确定油松林水源涵养功能发挥最优的林分密度。

[参 考 文 献]

[1] 韩皓爽,万荣荣.森林生态质量评估方法研究进展[J].生态科学,2021,40(4):212-222.

[2] 王根绪,邓伟,杨燕,等.山地生态学的研究进展、重点领域与趋势[J].山地学报,2011,29(2):129-140.

[3] 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):777-790.

[4] 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.

[5] 梁文俊,丁国栋,周美思,等.冀北山地油松和落叶松林下枯落物的水文效应[J].水土保持通报,2012,32(4):71-74.

[6] 赵禹宁,陆莹,王晓静,等.森林枯落物水文效应研究进展与趋势[J].中国林副特产,2021(1):113-114.

[7] 姜博涵.我国不同气候带森林生态系统中凋落物和林下植被去除对土壤氮矿化的影响[D].河南 开封:河南大学,2019.

[8] Wohl E, Barros A, Brunsell N, et al. The hydrology of the humid tropics [J]. Nature Climate Change, 2012,2(9):655-662.

[9] Zhang Haicheng, Yuan Wenping, Dong Wenjie, et al. Seasonal patterns of litterfall in forest ecosystem worldwide [J]. Ecological Complexity, 2014,20:240-247.

[10] De Long J R, Dorrepaal E, Kardol P, et al. Understory plant functional groups and litter species identity are stronger drivers of litter decomposition than warming along a boreal forest post-fire successional gradient [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016,98:159-170.

[11] Saura-Mas S, Estiarte M, Peñuelas J, et al. Effects of climate change on leaf litter decomposition across post-fire plant regenerative groups [J]. Environmental and Experimental Botany, 2012,77:274-282.

[12] He Xingbing, Lin Yonghui, Han Guomin, et al. Litterfall interception by understorey vegetation delayed litter decomposition in *Cinnamomum camphora* plantation forest [J]. Plant and Soil, 2013,372(1/2):207-219.

[13] 韩春,陈宁,孙杉,等.森林生态系统水文调节功能及机制研究进展[J].生态学杂志,2019,38(7):2191-2199.

[14] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区刺槐林枯落物水源涵养功能综合评价[J].水土保持学报,2019,33(2):251-257.

[15] 艾彪,黄云,朱元皓,等.赣南丘陵区典型林分水源涵养功能评价[J].水土保持通报,2021,41(1):197-205.

[16] 江萍.不同林龄油松人工林抚育间伐效应研究[D].北京:北京林业大学,2015.

[17] 马德辉,冯家祥.子午岭林区油松人工林全周期抚育管理对策措施[J].农业与技术,2019,39(14):73-74.

[18] 陈莉莉,王得祥,张宋智,等.不同密度油松人工林土壤特性及水源涵养功能研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(7):141-149.

[19] 李民义,张建军,郭宝妮,等.晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应[J].生态学杂志,2013,32(5):1083-1090.

[20] 张栓堂,石丽丽,曲世伟,等.冀北山地人工油松林水文效应研究[J].南水北调与水利科技,2016,14(4):117-122.

[21] 王玲,赵广亮,周红娟,等.八达岭林场不同密度油松人工林枯落物水文效应[J].生态环境学报,2019,28(9):1767-1775.

[22] 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.

[23] 莎仁图雅,齐容镰,郗雯,等.内蒙古土石山区油松林枯落物层水文生态功能研究[J].内蒙古林业科技,2020,46(1):8-11.

[24] 魏宏征,肖战峰,何小军,等.甘肃子午岭林区不同林分水源涵养能力研究[J].林业资源管理,2020(4):87-94.

[25] 耿琦.云冷杉针阔混交林枯落物持水特性研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[26] 刘贤德,张学龙,赵维俊,等.祁连山西水林区亚高山灌丛水文功能的综合评价[J].干旱区地理,2016,39(1):86-94.

[27] 侯贵荣.晋西黄土区低效刺槐林林分结构优化研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[28] 塔莉,张丽茹.冀北山地天然次生林枯落物层水文生态功能对不同林分密度的响应[J].水土保持研究,2020,27(6):46-51.

[29] 张勇强,李智超,厚凌宇,等.林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J].土壤学报,2020,57(1):239-250.

[30] 高迪.六盘山华北落叶松林枯落物时空特征变化及其水文效应[D].北京:北京林业大学,2019.

[31] 张缓.黄土高原不同植被带土壤理化性质及枯落物持水特征研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.

[32] 李奕,满秀玲,蔡体久,等.大兴安岭山地樟子松天然林土壤水分物理性质及水源涵养功能研究[J].水土保持学报,2011,25(2):87-91.

[33] 周巧稚,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J].水土保持学报,2018,32(4):115-121.