

库布齐沙漠人工林的水源涵养能力

韩青池¹, 王海超¹, 孙凯¹, 裴志永¹, 王涵¹, 苏晓明², 杨建军³, 陈宏伟⁴

(1.内蒙古农业大学 能源与交通工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.内蒙古工业大学 数据科学与应用学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 3.内蒙古鄂尔多斯市造林总场, 内蒙古 树林召 014300; 4.鄂尔多斯市林业和草原局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: [目的] 针对库布齐沙漠东段护林站内人工林进行林下枯落物与土壤水文功能研究, 科学计算该区人工林的各项指标综合权重值, 确定人工林枯落物及土壤的水文效应与水源涵养能力, 为该区和相关沙区退沙还林的定向抚育提供理论指导。[方法] 以库布齐沙漠鄂尔多斯造林总场内5种常见人工林为研究对象, 利用野外实测与室内浸泡进行枯落物及土壤持水性能研究, 采用层次分析法(AHP)与熵权法(EWM)相结合对林分水源涵养能力综合评估。[结果] ①各林分枯落物厚度介于6.56~22.2 mm, 蓄积量介于1.44~13.62 t/hm², 拦蓄能力表现为: 杨树旱柳混交林>杨树林>樟子松林>3 a沙柳林>8 a沙柳林。②枯落物的最大持水深与其干质量呈线性关系, 各林分最大储存约1.36~2.04 L降水, 表明枯落物最大持水能力主要取决于枯落物干重量, 而树种、树龄、气象等相关因素通过影响枯落物干重量间接影响持水能力。③对数函数和幂函数可较好地表现枯落物的动态持水量和动态吸水率。④随着土层深度增加, 各林分土壤饱和持水率、毛管持水率与总孔隙度基本呈现下降趋势, 土壤容重基本呈现上升趋势。⑤林分水源涵养能力杨柳混交林高于其他林分, 杨树林与樟子松林水源涵养能力相近, 沙柳林最低。[结论] 未来在沙漠地区人工防护林建设中, 优先培育混交林, 并通过考虑树种间水源涵养差异开展更科学的退沙还林规划。

关键词: 枯落物持水; 土壤持水; 层次分析法; 熵权法; 水源涵养; 库布齐沙漠

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0133-09

中图分类号: S727.21

文献参数: 韩青池, 王海超, 孙凯, 等. 库布齐沙漠人工林的水源涵养能力[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 133-141. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.017; Han Qingchi, Wang Haichao, Sun Kai, et al. Water conservation function of artificial forests in Kubuqi Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 133-141.

Water Conservation Function of Artificial Forests in Kubuqi Desert

Han Qingchi¹, Wang Haichao¹, Sun Kai¹, Pei Zhiyong¹,

Wang Han¹, Su Xiaoming², Yang Jianjun³, Chen Hongwei⁴

(1.College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2.College of Data Science and Applications, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China; 3.Ordos Afforestation General Plant, Inner Mongolia, Shulinzhao, Inner Mongolia 014300, China; 4.Forestry and Grassland Administration, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: [Objective] Research was conducted on understory litter and soil hydrological function for artificial forests in the forest protection station in the eastern section of the Kubuqi Desert. The comprehensive weight value of various indicators of the artificial forests in this area were scientifically calculated, and the hydrological effect and water conservation function of artificial forest litter and soil were determined in order to provide theoretical guidance for the directional tending of returning sand to forest in this area and related sandy areas. [Methods] Five common types of artificial shelterbelts were used in the Ordos afforestation station in the Kubuqi Desert. The water-holding capacity of litter and soil were determined using field

收稿日期: 2023-03-22

修回日期: 2023-05-30

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目“基于功能分区—抚育定向的沙柳灌木林精准平茬技术研究及示范”(2020GG0078); 内蒙古自治区自然科学基金项目“毛乌素沙地柳湾林群落水分利用机制及传输过程模拟”(2020MS03009); 国家自然科学基金项目“柳湾林应对干旱胁迫的群落结构效应及种间水分竞争共存机制”(52069018)

第一作者: 韩青池(1997—), 女(汉族), 辽宁省沈阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与环境。Email: hanqingchi@emails.imau.edu.cn.

通信作者: 裴志永(1979—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 教授, 主要从事灌木林资源开发与环境方面研究。Email: peizhiyong@imau.edu.cn.

measurements and the indoor immersion method, and the water conservation function of each forest was assessed using a combination of the analytic hierarchy process (AHP) and the entropy-weight method (EWM). [Results] ① The litter thickness in each stand ranged from 6.56 to 22.20 mm, and the litter accumulation ranged from 1.44 to 13.62 t/hm². Interception capacity for the different forest stands followed the order of *Salix matsudana*-*Populus × euramericana* mixed forest > *Populus × euramericana* forest > *Pinus sylvestris* forest > 3-year *S. matsudana* forest > 8-year *S. matsudana* forest. ② The maximum water-holding depth of litter was linearly related to the dry mass, and the maximum storage was about 1.36~2.04 L of precipitation in each stand. These results showed that the maximum water-holding capacity of the litter depended mainly on the dry weight of the litter, while related factors such as tree species, age, and meteorology indirectly affected the water-holding capacity by influencing the dry weight of the litter. ③ Logarithmic and power functions provided good representations of the dynamic water-holding capacity and dynamic water uptake of litter, respectively. ④ The saturated water-holding rate, capillary water-holding rate, and total porosity basically showed decreasing trends as soil depth increased, and soil bulk density showed an increasing trend. ⑤ The *S. matsudana*-*Populus × euramericana* mixed forest exhibited a higher water conservation function than the other forests, the *Populus × euramericana* and *Pinus sylvestris* forests had similar water conservation functions, and the *S. matsudana* forests had the lowest water conservation functions. [Conclusion] Construction of future artificial shelterbelts in desert regions should prioritize the cultivation of mixed forests, and a more scientific plan for the return of sand to forests should be developed by considering differences in the water conservation function between tree species.

Keywords: water-holding capacity of litter; water-holding capacity of soil; analytic hierarchy process (AHP); entropy-weight method (EWM); water conservation; Kubuqi Desert

土地荒漠化是全球性生态问题之一,对全世界的生态安全与经济稳定发展都造成了严重的影响。库布齐沙漠是中国第 7 大沙漠,生态环境脆弱,土壤风蚀严重,是中国北方主要的沙源地^[1]。经近 40 a 各方面的努力,库布齐沙漠治理取得了巨大的成就,人工防护林的建设极大改善了当地生态环境。但伴随林草化过程的快速扩展,生态问题也日益凸显^[2],部分人工林由于储水能力较差,调节土壤持水性能较弱,后期容易出现成片衰退,甚至死亡的现象。对此综合评估库布齐沙漠各人工林的水源涵养功能,对科学认识、保护和调控沙区防护林水源涵养,制定沙区还林计划及人工林建设与保护决策具有重要意义。

当前关于水源涵养能力的研究大多针对于森林生态系统,关于沙地生态系统中乔木、灌木等枯落物的水文效应研究仍较缺乏^[3]。已有研究^[4]表明,在水源涵养方面发挥主导作用的为枯枝落叶层和土壤层。枯落物是由林地植被落下的枝叶、果实、树皮等枯死植物残体组成,是林地与大气间水汽交换的重要界面,不仅可以促进土壤水分有效利用和维持水分的动态平衡^[5],还可以为土壤—植被系统物质交换建立界面,促进流沙的成土过程^[6],对抑制土壤水分蒸发、防止土壤冲蚀和溅蚀等方面都具有积极影响^[7]。土壤层作为水源涵养的第三活动层,通过利用孔隙的贮

藏功能将水分进行储存,从而起到保持水土和涵养水源的功能。国内外学者针对枯落物层与土壤层水文功能研究成果丰富,党毅^[8]、马佳明等^[9]通过对不同地区的不同林分枯落物进行对比,发现枯落物的浸水时间与浸水量呈对数关系,与吸水速率呈幂函数关系。国外学者 Sato^[10]研究表明枯落物的最大持水量与枯落物质量(kg/m²)成正比关系,与层厚无关。Zagyvai-Kissa^[11]研究表明阿尔卑斯山的 3 种不同纯林枯落物的最大持水能力几乎相同。在土壤层面,孙艳红^[12]对缙云山 4 种林地土壤进行持水研究,认为灌木林和针阔混交林具有更好的涵养水源功能。袁杰^[13]针对祁连山土壤进行分析,发现各土壤理化指标不同程度地影响着植被持水性能。陈波等^[14]通过分析不同海拔土壤水文功能,发现土壤容重随海拔升高而减小,总孔隙度随海拔升高先增大后减小。当前利用数学方式对林地水源涵养进行综合评估的研究较多。王先棒^[15]、汪永英等^[16]学者利用主观层次分析法对不同林型进行水源涵养评价。艾彪^[17]、王盛琦等^[4]学者利用客观熵权法探究了枯落物及土壤对林地水源涵养功能的影响。但主观评价与客观评价都各自有局限性。为此在上述研究基础上,本研究采用主观和客观相结合的评价方式,将层次分析法和熵权法相结合,针对库布齐沙漠东段护林站内人工林进行林下枯落物与土壤水文功能研究,科学计算库布齐

沙漠人工林的各项指标综合权重值,确定人工林枯落物及土壤的水文效应与水源涵养能力,为库布齐沙漠退沙还林的定向抚育提供理论指导,为世界其他沙漠化地区防护林建设提供科学依据。

1 研究区概况

试验地位于内蒙古自治区库布齐沙漠东段的鄂尔多斯造林总场沟心召分场曹四滩护林站,年均气温约 6.1 °C,昼热夜冷,年均降水量约 283 mm,主要集中在 7—9 月,约占全年降水的 70%。地属典型温带大陆性季风气候,全年盛行西风及北偏西风,平均风速约 3.6 m/s,土壤以草甸风沙土为主。人工林的主

要树种包括:沙柳、速生杨、樟子松及杨树旱柳混交林等,林下草本植被以沙生植物为主。

2 研究方法

2.1 样地设置与样地信息调查

试验于 2021 年 7 月开展,选择造林总场中典型人工林,包括 3 a 生沙柳林(I),8 a 生沙柳林(II)、速生杨纯林(III)、樟子松纯林(IV)及杨树旱柳混交林(V),每种林分中随机划取 30 m×30 m 的试验样地,统计样地内树种的株高、胸径、最大冠幅、最小冠幅及林下植被覆盖度等信息,样地调查的基本信息详见表 1。

表 1 调查样地基本情况
Table 1 Basic situation of the survey plot

树种	树龄/a	平均株高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/m	林下植被覆盖度/%
I	3	2.74	2.13	2.99	67.58
II	8	3.11	1.93	3.83	41.92
III	35	9.92	25.57	7.40	45.20
IV	8	3.23	4.91	1.56	21.25
V	35	7.54	30.70	7.35	62.20

注: I 为 3 a 生沙柳林; II 为 8 a 生沙柳林; III 为速生杨纯林; IV 为樟子松纯林; V 为杨树旱柳混交林。下同。

2.2 厚度与蓄积量测定计算

采用五点交叉取样法在每个试验样地中选取 5 个 0.3 m×0.3 m 的枯落物样方,测定枯落物半分解层与未分解层厚度,称量各自鲜重后密封带回实验室,在实验室烘箱 80 °C 下烘干至恒重,称量干重量,计算各林分自然含水率与蓄积量(t/hm²)。

2.3 枯落物持水能力测定计算

烘干后的枯落物装入尼龙袋中扎紧,浸泡在清水盆中,清水需完全浸泡尼龙袋,浸泡时长为 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 10 h, 12 h 和 24 h, 浸泡后悬空至排水停止,迅速称重记录,前后两次重量差值为当次持水量。根据已有研究,枯落物浸泡 24 h 后已达到饱和^[18],由此计算枯落物的最大持水值。当场次降雨量达到大雨量级即 20~30 mm 时,85% 的枯落物最大持水率与有效拦蓄率基本一致^[19],由此进行有效拦蓄率与有效拦蓄量计算,枯落物相关指标计算公式为:

$$W_{24h} = W_{24} - W_0$$

式中: W_{24h} 为最大持水量(t/hm²); W_{24} 为 24 h 枯落物重量(t/hm²); W_0 为枯落物干质量(t/hm²)。

$$R_{24h} = \frac{W_{24} - W_0}{W_0} \times 100\%$$

$$R_{24a} = 0.85 \times R_{24h} - R_0$$

$$W_{24a} = R_{24a} \times W_0$$

$$R_{24b} = R_{24h} - R_0$$

$$W_{24b} = R_{24b} \times P_0 / (100\%)$$

式中: R_{24h} 为最大持水率(%); R_{24a} 为 24 h 时的有效拦蓄率(%); R_0 为自然含水率(%); W_{24a} 为 24 h 时的有效拦蓄量(t/hm²); R_{24b} 为 24 h 时的最大拦蓄率(%); W_{24b} 为 24 h 时的最大拦蓄量(t/hm²); P_0 为枯落物蓄积量(t/hm²)。

2.4 土壤持水能力测定计算

在各林分枯落物基底挖取土壤剖面,深度为 80 cm,每 20 cm 为 1 层,共 4 层,为降低误差,每层用环刀随机取 3 个土样,分层取土后带回实验室,利用环刀浸泡法测定土壤容重、土壤孔隙度及土壤各持水率指标,采用以下公式再进行土壤持水性能计算:

$$W_a = 10\ 000 \times P_a \times h$$

$$W_b = 10\ 000 \times P_b \times h$$

$$W_c = 10\ 000 \times P_c \times h$$

式中: W_a 为土壤饱和持水量(t/hm²); W_b 为土壤毛管持水量(t/hm²); W_c 为土壤非毛管持水量(t/hm²); P_a 为土壤总孔隙度(%); P_b 为土壤毛管孔隙度(%); P_c 为土壤非毛管孔隙度(%); h 为土层厚度(m)。

2.5 水源涵养能力评价

为保证各林分水源涵养评价指标权重更具科学性、准确性,采用主观层次分析法(AHP)与客观熵权

法(EWM)相结合方式,对林分各因子进行量化,将计算的两种权重结果综合值作为各指标综合权重。选用指标包括:厚度、蓄积量、最大持水量、有效拦蓄量、最大拦蓄量、土壤容重、土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度、土壤非毛管孔隙度、土壤饱和持水率、土壤毛管持水率和土壤田间持水率,最后通过评分综合评价各林分水源涵养能力。

(1) 利用 AHP 计算各指标权重。根据 AHP 的建立原则,构建库布齐沙漠人工林水源涵养能力评价层次分析模型。通过征求从事 3 a 以上相关领域专家意见,结合近年相关文献及实际调查与野外观测数据,对 12 项指标进行打分,采用 9 分制,构建相关判断矩阵,进行一致性检验后确定权重:

$$C_i = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

$$C_R = \frac{C_i}{R_i}$$

式中: λ_{\max} 为最大特征根; C_i 为一致性指标; n 为 AHP 模型中构建的判断矩阵阶数; R_i 为对应的平均随机一致性指标; C_R 为一致性比例(当 $C_R < 0.1$ 时,说明判断矩阵符合一致性要求)。

(2) 利用 EWM 计算各指标权重,计算公式为:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}}$$

$$(i=1, 2 \dots m; j=1, 2 \dots n)$$

$$H_j = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}$$

$$f_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{j=1}^n p_{ij}}, k = \frac{1}{\ln n}, \text{当 } f_{ij} = 0 \text{ 时,令 } f_{ij} \ln f_{ij} = 0$$

$$g_j = 1 - H_j$$

$$W_{j2} = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j}$$

式中: i 表示不同防护林类型; j 表示不同指标; x_{ij}

是第 i 个样地在第 j 个指标上的值; $\max\{x_{ij}\}$, $\min\{x_{ij}\}$ 分别代表其中最大值与最小值; p_{ij} 为标准化后矩阵; f_{ij} 为贡献度; k 为常数; H_j 为各指标熵权; g_j 为各指标差异系数; W_{j2} 为熵权法下各指标权重。

(3) 利用 AHP 与 EWM 相结合进行综合赋权,并计算各林分水源涵养能力,计算公式为:

$$W_j = \frac{W_{j1} W_{j2}}{\sum_{j=1}^n W_{j1} W_{j2}}$$

$$V_j = \sum_{j=1}^n W_j x_{ij}$$

式中: W_j 表示指标综合权重值; W_{j1} 表示层次分析法下各指标权重; V_j 为各林分最终得分。

2.6 数据处理

用 Excel 和 SPSS 26.0 对枯落物水文数据进行统计分析,用 Origin 2017 进行绘图。

3 结果与分析

3.1 枯落物厚度及蓄积量

对枯落物厚度及蓄积量分析结果如图 1 所示。可以发现人工林枯落物厚度介于 6.56~22.2 mm,沙柳林枯落物厚度显著小于其他人工林($p < 0.05$),3 a 沙柳林厚度略小于 8 a 沙柳林,杨柳混交林和樟子松林厚度最大。枯落物蓄积量介于 1.44~13.62 t/hm²,表现为:杨柳混交林 > 杨树林 > 樟子松林 > 8 a 沙柳林 > 3 a 沙柳林,杨柳混交林平均蓄积量是杨树纯林的 1.26 倍,是樟子松纯林的 2.39 倍,不同人工林枯落物蓄积量差异较大,考虑形成差异主要原因在于混交林由于林分结构更合理,生长更为茂盛,从而形成的凋落物厚度及蓄积量均大于纯林,而杨树为阔叶树种,因此形成的蓄积量也较大。研究区不同人工林枯落物半分解层厚度与蓄积量均显著大于未分解层($p < 0.05$),这可能由于气温较高及风沙因素而导致未分解枯落物不易保存。

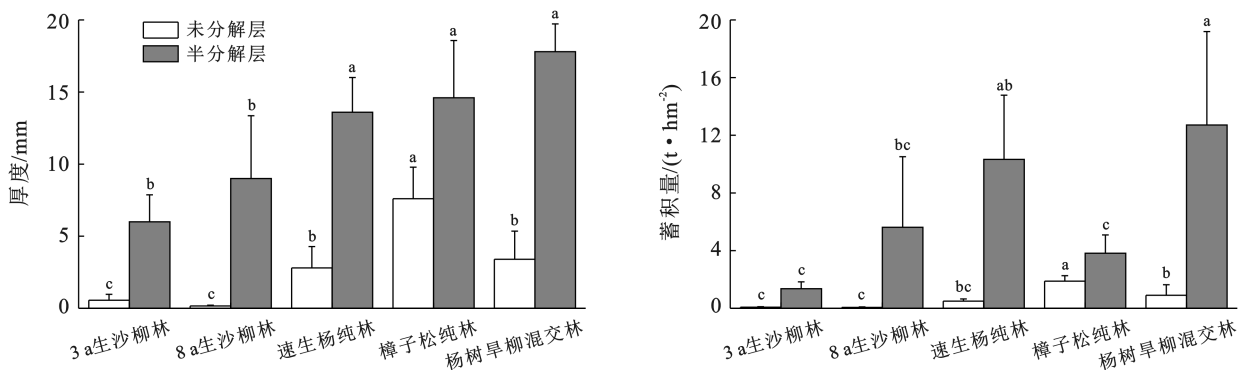


图 1 不同人工林的枯落物厚度和蓄积量

Fig.1 Litter thickness and accumulation in different artificial forest

3.2 枯落物的持水能力

3.2.1 枯落物拦蓄能力 表 2 为库布齐沙漠不同人工林枯落物持水能力状况。由表 2 可知,各枯落物间自然含水率差异不明显,3 a 沙柳林的自然含水率高于 8 a 沙柳林,可能由于林龄大的沙柳需要部分平茬,新生叶片较薄加快枯落物蒸发进程。枯落物拦蓄能力表现为:杨柳混交林>杨树林>樟子松林>3 a

沙柳林>8 a 沙柳林,半分解层与枯落物层的拦蓄能力总体小于未分解层,杨柳混交林的拦蓄能力显著高于其他纯林($p < 0.05$),各纯林的有效拦蓄率与最大拦蓄率均介于 100%~200%间,其中沙柳林的拦蓄能力最低,各树种间拦蓄能力差异明显,可能由于枯落物叶片差异较大所致,有效拦蓄量的变化顺序与最大拦蓄量相一致。

表 2 不同人工林枯落物持水能力

Table 2 Water-holding capacity of litter in different artificial forest

树种	自然含水率/%			有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)			有效拦蓄率/%			最大拦蓄量/(t·hm ⁻²)			最大拦蓄率/%		
	未分解层	半分解层	枯落物	未分解层	半分解层	枯落物	未分解层	半分解层	枯落物	未分解层	半分解层	枯落物	未分解层	半分解层	枯落物
I	36.4	14.26	15.24	0.09	1.3	1.39	172.02	109.06	111.85	0.16	1.78	1.92	208.8	130.83	134.28
II	31.63	5.38	5.61	0.08	5.55	5.63	168.81	104.1	104.67	0.13	6.93	7.05	204.19	123.42	124.13
III	26.95	7.03	7.8	0.76	15.03	15.79	195.54	155.76	157.31	1.16	19.05	20.17	234.8	184.49	186.44
IV	18.36	6.54	10.17	2.17	5.75	7.92	136.23	160.29	152.9	3.08	7.25	10.36	163.51	189.73	181.67
V	25.18	7.31	8.33	1.45	22.64	24.09	201.57	191.08	191.68	2.18	28.74	30.9	241.59	226.08	226.97

3.2.2 枯落物最大持水能力 由图 2 可知,各树种枯落物最大持水深与其干质量呈线性关系,其中杨柳混交林的最大持水能力最强,储存约 2.04 升降水,约为自身重量的 200%。枯落物最大持水能力表现为:杨柳混交林>樟子松林>杨树林>3 a 沙柳林>8 a 沙柳林,树种间持水能力有所差异,枯落物持水能力主要取决于枯落物干重量,而干重量差异又与树种、树龄、气象条件等相关,从而间接影响了持水能力。同时各

林分方程显示(非零截距值),枯落物干质量为零的情况下,仍能保持较低水分,这与 Kim^[20]研究结果相似。经计算各树种半分解层与未分解层的最大持水深与干质量也均各自呈线性关系, R^2 大于 0.746,其中未分解层储存 2.09~2.67 L 降水,约为自重的 210%~270%,半分解层储存 1.12~1.88 L 降水,约为自身重的 110%~190%,未分解层最大持水能力显著高于半分解层。

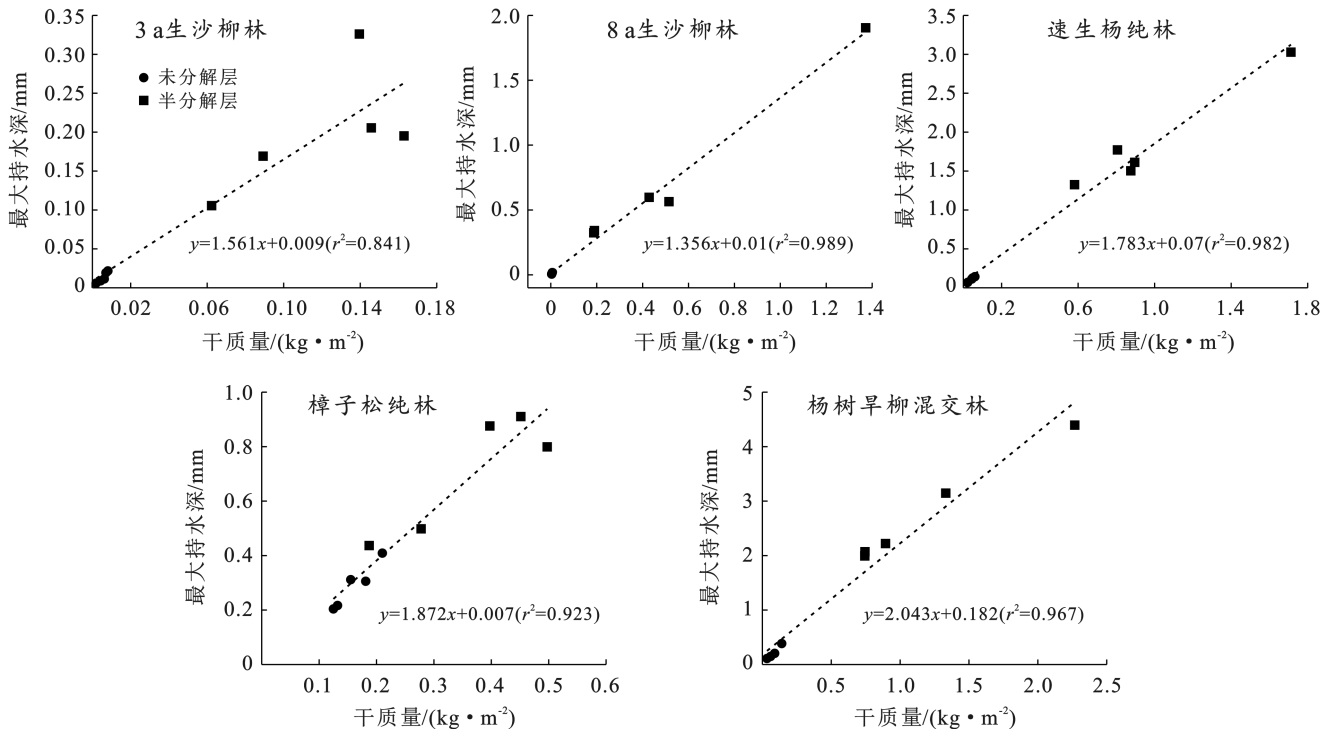


图 2 不同人工林枯落物干质量与最大持水深关系

Fig.2 Relationship between dry mass and maximum water-holding depth in different artificial forest

3.3 枯落物持水过程

3.3.1 枯落物持水动态分析 由图 3 可知,各树种枯落物分解层、半分解层持水量与浸泡时间均满足 $y = a \ln t + b$ 对数关系(y 为枯落物持水量(t/hm^2), t 为浸泡时间(h), R^2 均大于 0.945 5,拟合较好。浸泡的前 2 h 枯落物持水量迅速增大,浸泡 10 h 后基本接近饱和状态,半分解层持水量高于未分解层,杨柳混交林持水量最大,其次是杨树林。樟子松林与 8 a 沙柳

林持水量接近,3 a 沙柳林最低。

3.3.2 枯落物吸水速率 由图 4 可知,各树种枯落物分解层、半分解层吸水速率与浸泡时间均满足 $y = ax^{-b}$ 幂函数关系[y 为枯落物吸水速率($t/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$), t 为浸泡时间(h), R^2 均大于 0.933 7,拟合较好。浸泡的前 2 h 枯落物吸水速率迅速降低,之后吸水速率逐渐减缓,10 h 后基本接近饱和状态,24 h 后基本停止吸水。

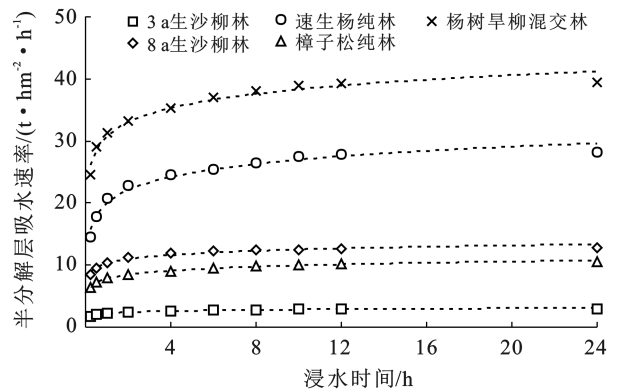
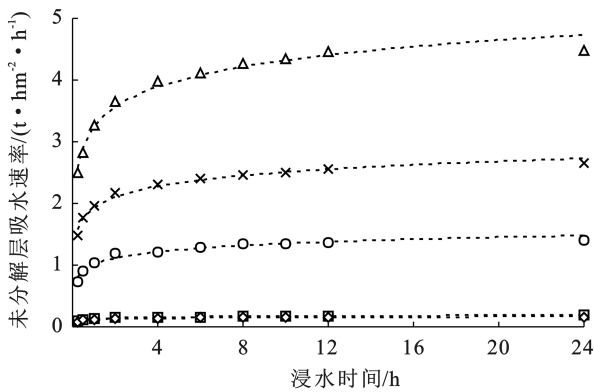


图 3 人工林枯落物未分解层和半分解层持水过程

Fig.3 Water-holding process of litter undecomposed layer and halfdecomposed layer in different artificial forest

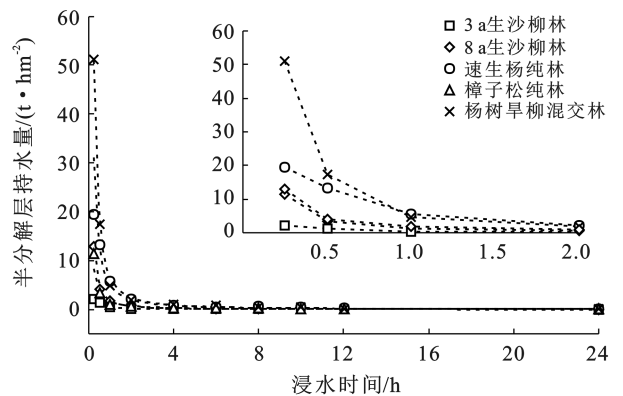
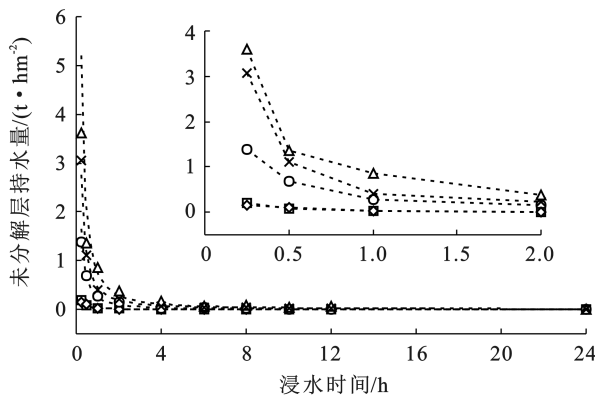


图 4 人工防护林枯落物未分解层和半分解层吸水速率

Fig.4 Water-absorbing rate of litter undecomposed layer and halfdecomposed layer in different artificial forest

3.4 土壤层水文效应

3.4.1 土壤持水分析 由表 3 可知,除 3 a 沙柳林外,随土层深度增加,各林分土壤饱和持水率与毛管持水率大体呈现下降趋势,其中杨柳混交林最大,8 a 沙柳林最小,土壤田间持水能力表现为:杨柳混交林>3 a 沙柳林>樟子松林>杨树林>8 a 沙柳林。5 种林地土壤的饱和持水量范围在 504.47~657.86 t/hm^2 间,以杨柳混交林最大,8 a 沙柳林最小,土壤非毛管持水量范围在 34.22~74.35 t/hm^2 间,以樟子松林最大,8 a 沙柳林最小。

3.4.2 土壤物理性质研究 土壤容重与孔隙度是土

壤基本特性之一,可以通过上述指标间接性分析各林分土壤持水性能差异原因。由图 5 可以看出,除 3 a 沙柳林容重表现为先增大后减少外,各林分土壤容重随着土层深度增加基本呈现上升趋势,说明随土层加深土壤变得越来越紧实,土壤空隙越来越少,发育越来越好。

除 8 a 沙柳林外,各树种间土壤总孔隙度与毛管孔隙度差异不显著,其中杨柳混交林最高,8 a 沙柳林最低,各林分非毛管孔隙度差异显著($p < 0.05$),表现为:樟子松林>杨柳混交林>3 a 沙柳林>杨树林>8 a 沙柳林。

表 3 不同人工防护林土壤持水特性
Table 3 Soil water-holding capacity in different artificial forest

林分	土深/cm	土壤饱和持水率/%	土壤毛管持水率/%	土壤田间持水率/%	土壤饱和持水量/ (t·hm ⁻²)	土壤毛管持水量/ (t·hm ⁻²)	土壤非毛管持水量/ (t·hm ⁻²)
沙柳 3 a 林	0—20	18.73	17.42	13.21	609.61	566.68	42.93
	20—40	17.66	16.11	14.22	609.84	556.44	53.40
	40—60	19.74	17.06	13.59	639.36	552.96	86.40
	60—80	18.73	21.07	15.43	675.81	604.41	71.40
	均值	18.71	17.91	14.11	633.66	570.12	63.53
沙柳 8 a 林	0—20	19.24	18.36	13.96	644.83	615.43	29.40
	20—40	13.77	12.78	6.97	482.18	447.52	34.67
	40—60	12.97	12.09	6.58	450.74	420.14	30.60
	60—80	12.32	11.14	6.86	440.10	397.90	42.20
	均值	14.58	13.60	8.59	504.47	470.25	34.22
杨树林	0—20	19.24	18.17	6.59	636.57	601.17	35.40
	20—40	19.13	18.05	8.17	647.54	610.74	36.80
	40—60	17.79	16.76	11.48	617.77	581.64	36.13
	60—80	16.55	15.40	10.30	569.28	529.78	39.50
	均值	18.18	17.09	9.13	617.79	580.83	36.96
杨柳混交林	0—20	23.77	20.74	15.72	694.78	607.45	87.33
	20—40	19.67	18.48	14.37	644.14	604.34	39.80
	40—60	18.77	17.56	13.55	617.15	577.25	39.90
	60—80	20.18	19.30	15.50	675.38	646.05	29.33
	均值	20.60	19.02	14.78	657.86	608.77	49.09
樟子松林	0—20	23.25	21.01	15.82	714.38	645.71	68.67
	20—40	21.20	20.24	13.95	675.29	643.83	31.47
	40—60	19.38	16.24	11.90	623.57	521.30	102.27
	60—80	17.95	15.09	11.52	601.00	506.00	95.00
	均值	20.45	18.14	13.30	653.56	579.21	74.35

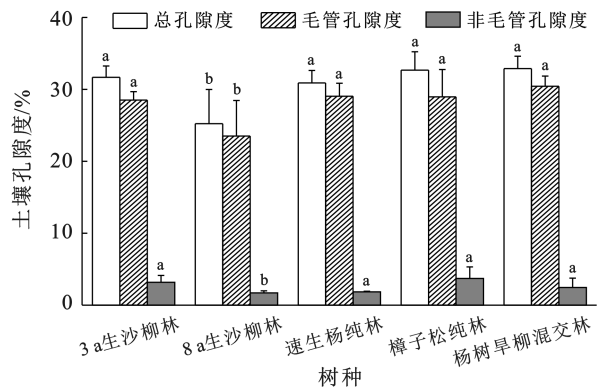
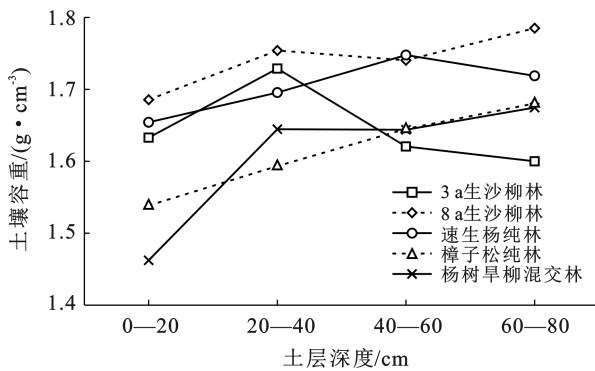


图 5 不同人工防护林土壤容重与土壤孔隙度

Fig.5 Soil bulk density and soil porosity in different artificial forest

3.5 水源涵养能力评价

根据试验情况,选择枯落物与土壤层内 12 个指标,其中 AHP 计算的一致性检验结果满足一致性要求,各项因子中土壤非毛管孔隙度和土壤容重影响权重最高,与 EWM 计算结果一致。通过 AHP 与 EWM 综合赋权,各指标权重分别为:厚度占 2.11%;蓄积量占 10.29%;最大持水量占 4.99%;有效拦蓄量占

11.48%;最大拦蓄量占 5.01%,土壤容重占 16.89%,土壤总孔隙度占 9.47%,土壤毛管孔隙度占 4.76%,土壤非毛管孔隙度占 17.68%,土壤饱和持水率占 8.12%,土壤毛管持水率占 4.32%,土壤田间持水率占 5.18%。如表 4 所示,从评分结果看,杨柳混交林涵养水源能力明显高于其他林分,其次是杨树纯林,因此在人工防护林培育中,应首选混交林进行水源涵养。

表 4 不同人工林水源涵养评价

Table 4 Evaluation of water conservation in different artificial forest

林分类型	3 a 沙柳林	8 a 沙柳林	樟子松林	杨树林	杨柳混交林
厚度/mm	0.138	0.193	0.468	0.345	0.447
蓄积量/(t·hm ⁻²)	0.147	0.585	0.587	1.114	1.402
最大持水量/(t·hm ⁻²)	0.083	0.333	0.470	0.934	1.424
有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)	0.160	0.646	0.909	1.813	2.766
最大拦蓄量/(t·hm ⁻²)	0.096	0.353	1.010	0.519	1.548
土壤容重/(g·cm ⁻³)	0.273	0.289	0.268	0.283	0.266
土壤总孔隙率/%	3.000	2.389	3.095	2.925	3.115
土壤毛管孔隙度/%	1.358	1.120	1.379	1.383	1.450
土壤非毛管孔隙度/%	0.561	0.302	0.657	0.327	0.434
土壤饱和持水率/%	1.520	1.184	1.661	1.477	1.673
土壤毛管持水率/%	0.774	0.587	0.784	0.739	0.822
土壤田间持水率/%	0.730	0.445	0.688	0.473	0.765
水源涵养综合得分	8.842	8.427	11.976	12.331	16.112

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 枯落物水文特征 库布齐沙漠不同人工林间枯落物厚度与蓄积量有所差异,厚度介于 6.56~22.2 mm,蓄积量介于 1.44~13.62 t/hm²,其中杨柳混交林均大于各纯林,这是由于混交林由多树种合理搭配,能够充分利用外界环境条件,发挥树种间的相互促进作用,因此总蓄积量较纯林高^[21]。纯林中杨树枯落物的蓄积量与厚度基本大于其他树种,这与王涛等^[22]在沙漠区的研究结果相同。枯落物拦蓄能力表现为:杨柳混交林>杨树纯林>樟子松纯林>3 a沙柳纯林>8 a沙柳纯林,以杨柳混交林力最强,这与不同树种枯落物的自身吸水能力、蓄积量等特性的差异有关。最大持水能力能够反映枯落物层的持水潜力,研究测得各树种枯落物最大持水深与其干质量呈线性关系,这与 Sato^[10]的研究结论一致。最大持水能力表现为:杨柳混交林>樟子松林>杨树林>3 a沙柳林>8 a沙柳林,各林分储存约 1.36~2.04 L 降水,约为自重的 140%~200%,这与 Kim^[20]所估计的针叶枯落物最大持水范围为其干重量的 116%~220%,Zagyvai-Kiss^[11]所研究枯落物最大持水深约为干重的 200%~210%相近。这表明最大持水能力主要由枯落物干质量决定,可通过将最大持水能力描述成干质量的百分比,进而可采用数学模型对林地持水能力进行预测估算。各树种半分解层与未分解层的最大持水深与干质量均各自呈线性关系,其中未分解层储存 2.09~2.67 L 降水,约为自重的 210%~270%,半分解层储存 1.12~1.88 L 降水,约为自身重的 110%~190%,未分解层最大持水能力大于半分解层,这与

张峰^[7]研究结论相符,与侍柳彤^[23]结论不同,可能是由于受叶片横向吸水、附着水以及不同分解层枯落物储量差异造成的。枯落物未分解层、半分解层持水量与浸泡时间满足 $y = a \ln t + b$ 对数关系, R^2 均大于 0.945 5,吸水速率与浸泡时间满足 $y = ax^{-b}$ 幂函数关系, R^2 均大于 0.933 7,这与党毅^[11]、马佳明^[12]、张缓^[13]的结论相同。这是由于枯枝落叶从风干状态浸入静水中后,枯枝落叶的死细胞间或者枝叶表面,水势差大,导致吸水速率高,同时枯枝落叶细胞间连接物质为细胞间水分存贮提供了场所,使枯枝落叶在浸入水中的初期持水量剧增。

4.1.2 土壤层水文特征 树种或林分不同影响了林下植被种类组成和多样性,导致生境条件的变化,进而引起土壤性质的差异。研究表明,除 3 a 沙柳林外,随土层深度增加,各林分土壤容重总体表现为上升趋势,这与陈波^[14]的研究结论相同。各林分土壤饱和持水率、毛管持水率与总孔隙度随土深增加基本呈现下降趋势,其中土壤饱和持水量范围在 504.47~657.86 t/hm² 间,以杨柳混交林能力最强,这可能由于混交林的不同树种根系在地下空间分布深度有所差异,各根系穿插生长增强了土壤空隙,从而增大了土壤持水能力。除 8 a 沙柳林外,各树种间土壤总孔隙度与毛管孔隙度差异不显著,非毛管孔隙度差异显著($p < 0.05$),表现为:樟子松林>杨柳混交林>3 a沙柳林>杨树林>8 a沙柳林,这表明不同人工林土壤保持水分能力的差异不明显,但通气性、透水性及涵养水源能力的大小有所差异。

4.1.3 人工林水源涵养能力评价 研究使用主观层次分析法与客观熵权法相结合进行综合赋权,对各林地枯落物水源涵养能力进行综合评价,其中土壤容

重、土壤非毛管孔隙度、蓄积量、有效拦蓄量、土壤总孔隙度指标对水源涵养能力影响较大,研究结果表现为:杨柳混交林>杨树纯林>樟子松纯林>3 a 沙柳生纯林>8 a 沙柳生纯林,其中3 a 沙柳林略高于8 a 沙柳林,这主要是受到平茬期的生长状态与根系活动影响。杨柳混交林水源涵养能力明显高于其他林分,这表明在采用植被混交的模式能够更好地进行水源涵养,这与刘小娥等^[24]结论相同,未来人工林可优先考虑进行混交人工林培育。

4.2 结论

通过对库布齐沙漠人工林水源涵养能力进行研究,结果表明杨柳混交林水源涵养能力明显高于其他林分,杨树林与樟子松林相近,沙柳林最低。未来在人工林扩建与培育中,应适当提高混交林种植比例,并通过考虑树种间水源涵养差异进行更科学的人工林建设与保护规划。

[参 考 文 献]

[1] 刘源,李晓晶,段玉玺,等.库布齐沙漠东部植被恢复对土壤生态化学计量的影响[J].干旱区研究,2022,39(3):924-932.

[2] 马启民,龙银平,汤世宇,等.库布齐沙漠典型沙地人工林蒸散对比分析[J].遥感技术与应用,2022,37(4):854-864.

[3] 王盛琦,傅文慧,寇建村,等.黄土高原水蚀风蚀交错区沙地枯落物的水源涵养功能[J].水土保持通报,2021,41(5):30-37.

[4] 赵阳,王飞,齐瑞,等.白龙江、洮河林区5种典型森林枯落物与土壤层水源涵养效应[J].水土保持研究,2021,28(3):118-125.

[5] 许小明,易海杰,何亮,等.黄土高原地区林地枯枝落叶层水土保持效应研究进展[J].水土保持研究,2022,29(4):415-421.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 党毅,王维,余新晓,等.北京西山典型人工林分枯落物层生态水文效应[J].北京林业大学学报,2022,44(12):72-87.

[9] 马佳明,赵鹏,刘雪莹,等.崇陵流域不同林分类型枯落物水文效应研究[J].生态环境学报,2021,30(4):691-699.

[10] Sato Y, Kumagai T, Kume A, et al. Experimental

analysis of moisture dynamics of litter layers: the effects of rainfall conditions and leaf shapes [J]. Hydrological Processes, 2004,18(16):3007-3018.

[11] Zagyvai-Kiss K A, Kalicz P, Szilágyi J, et al. On the specific water holding capacity of litter for three forest ecosystems in the eastern foothills of the Alps [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 278: 107656.

[12] 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.

[13] 袁杰,曹广超,曹生奎,等.祁连山南坡不同植被类型枯落物及其土壤持水特性分析[J].生态科学,2018,37(5):180-190.

[14] 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.

[15] 王先棒,贺康宁,董喆,等.北川河流域典型林型水源涵养能力评价[J].中国水土保持科学,2017,15(5):94-102.

[16] 汪永英,段文标.小兴安岭南坡3种林型林地水源涵养功能评价[J].中国水土保持科学,2011,9(5):31-36.

[17] 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.

[18] 杜捷.北京山区森林枯落物层水文过程模拟研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.

[19] 许小明,邹亚东,孙景梅,等.黄土高原北洛河流域林地枯落物特征及水分吸持效应[J].生态学报,2021,41(13):5153-5165.

[20] Kim J K, Onda Y, Kim M S, et al. Plot-scale study of surface runoff on well-covered forest floors under different canopy species [J]. Quaternary International, 2014,344:75-85.

[21] 张艳华.浅谈混交林在植树造林应用中的重要意义:混交原则及营造技术要点[J].农业与技术,2019,39(24):83-84.

[22] 王涛,蒙仲举,党晓宏,等.库布齐沙漠人工防护林林下枯落物及土壤水文效应研究[J].生态环境学报,2021,30(4):700-707.

[23] 侍柳彤,史常青,杜晨曦,等.小五台山地区主要林分枯落物分布特征及水源涵养能力[J].水土保持学报,2022,36(5):195-203.

[24] 刘小娥,苏世平.兰州市南北两山5种典型人工林凋落物的水文功能[J].应用生态学报,2020,31(8):2574-2582.