

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.026.

韩青池, 孙凯, 裴志永, 等. 干旱半干旱区典型林分持水性能比较研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 239-246.

Han Qingchi, Sun Kai, Pei Zhiyong, et al. Comparative Study on Water Holding Performance of Typical Stands in Arid and Semi-arid Areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 239-246.

# 干旱半干旱区典型林分持水性能比较研究

韩青池<sup>1</sup>, 孙凯<sup>1</sup>, 裴志永<sup>1</sup>, 陈宏伟<sup>2</sup>, 曹艳伟<sup>3</sup>, 孙小添<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 能源与交通工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 鄂尔多斯市林业和草原局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 3. 鄂尔多斯市科技事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:** [目的] 水分供给是制约干旱及半干旱区发展的决定因素, 科学评估干旱半干旱区典型林分的持水性能是规划防护林建设, 调控林分结构与进行树种选择的重要依据。[方法] 以库布齐沙漠鄂尔多斯造林总场内 5 种典型人工林为研究对象, 利用野外收获法与室内浸水法分析林冠层、林下植被层、枯落物层及土壤层持水性能, 引入模糊物元模型, 结合欧式贴近度对不同林分持水性能进行定量评价。[结果] (1) 不同树种间林冠持水能力差异显著, 表现为杨树旱柳混交林>榆树林>杨树林>沙柳林>樟子松林, 林分持水量介于 2.36~9.98 t/hm<sup>2</sup>。(2) 各林分林下植被的持水量介于 0.84~3.66 t/hm<sup>2</sup>, 生物量介于 1.33~3.92 t/hm<sup>2</sup>, 生物量表现出与持水量相同的变化趋势。(3) 枯落物持水量介于 1.96~29.25 t/hm<sup>2</sup>, 生物量介于 1.43~13.62 t/hm<sup>2</sup>, 对数函数和幂函数可较好表现枯落物的动态持水量和动态吸水率。(4) 各林分间土壤毛管持水量介于 543.80~645.71 t/hm<sup>2</sup>, 饱和持水量介于 562.87~694.78 t/hm<sup>2</sup>, 杨柳混交林土壤容重低于其他纯林, 同时孔隙度比其他林分高。(5) 欧式贴近度大小排序为杨柳混交林(0.805 6)>沙柳林(0.387 7)>榆树林(0.374 7)>杨树林(0.357 2)>樟子松林(0.163 2), 欧式贴近度越大, 林分持水性能越强, 5 种林型中杨柳混交林持水能力最强, 樟子松林最差。[结论] 建议未来经营干旱半干旱区人工防护林建设中, 适当提高混交林比例, 并尝试通过更多林分合理搭配进行防护林建设保护。

**关键词:** 干旱半干旱区; 林分持水性能; 模糊物元模型; 欧式贴近度

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0239-08

## Comparative Study on Water Holding Performance of Typical Stands in Arid and Semi-arid Areas

Han Qingchi<sup>1</sup>, Sun Kai<sup>1</sup>, Pei Zhiyong<sup>1</sup>, Chen Hongwei<sup>2</sup>, Cao Yanwei<sup>3</sup>, Sun Xiaotian<sup>1</sup>,

(1. College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot,

Inner Mongolia 010018, China; 2. Forestry and Grassland Administration, Ordos City, Inner Mongolia 017000,

China; 3. Inner Mongolia Ordos Science and Technology Development Center, Ordos City, Inner Mongolia 017000, China)

**Abstract:** [Objective] Water supply is the determinant factor restricting the development of arid and semi-arid areas. Therefore, scientific evaluation of the water-holding performance of typical stands in arid and semi-arid areas is an important basis for planning shelterbelt construction, regulating stand structure and selecting tree species. [Methods] Five typical plantation forests in Ordos Afforestation Field in Kubuqi Desert were taken as the research objects. The water-holding performance of canopy, understory vegetation, litter and soil layers were analyzed by field harvesting method and indoor immersion method. The fuzzy matter-element model was introduced to quantitatively evaluate the water-holding performance of different forest stands combining with European-style closeness. [Results] (1) The canopy water-holding capacity of

收稿日期: 2023-07-23

修回日期: 2023-08-08

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0009); 国家自然科学基金(52069018); 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0078); 内蒙古自治区自然科学基金(2023QN03029)

第一作者: 韩青池(1997—), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与环境。E-mail: hanqingchi@E-mails.imau.edu.cn

通信作者: 裴志永(1979—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 教授, 主要从事灌木林资源开发与环境方面的研究。E-mail: peizhiyong@imau.edu.cn

http://stbcyj.paperonce.org

different tree species was significantly different, showing as the order: dry willow and poplar mixed forest > elm forest > poplar forest > salix forest > *Pinus sylvestris* forest, and the stand water holding capacity was between 2.36~9.98 t/hm<sup>2</sup>. (2) The water holding capacity of understory vegetation in each stand was between 0.84~3.66 t/hm<sup>2</sup>, and the biomass was between 1.33~3.92 t/hm<sup>2</sup>. The biomass showed the same trend as the water holding capacity. (3) The water holding capacity of litter was between 1.96~29.25 t/hm<sup>2</sup>, and the biomass was between 1.43~13.62 t/hm<sup>2</sup>. The logarithmic function and power function could better describe the dynamic water holding capacity and dynamic water absorption rate of litter. (4) The soil capillary water holding capacity of each stand was between 543.80~645.71 t/hm<sup>2</sup>, and the saturated water holding capacity was between 562.87~694.78 t/hm<sup>2</sup>. (5) The European-style closeness decreased in the order: willow mixed forest (0.805 6) > salix forest (0.387 7) > elm forest (0.374 7) > poplar forest (0.357 2) > sylvestris pine forest (0.163 2). The greater the European-style closeness, the stronger the water-holding capacity of the stand. Among the five forest types, the water-holding capacity of the mixed willow forest was the strongest, and that of the sylvestris forest was the worst. [Conclusion] It is suggested that the proportion of mixed forests should be appropriately increased, and more forest stands should be rationally matched to construct and protect shelterbelts in the construction of artificial shelterbelts in arid and semi-arid areas in the future.

**Keywords:** arid and semi-arid region; stand water holding capacity; fuzzy matter-element model; European-style closeness

干旱是区域范围内因长期无降水或降水异常偏少而造成空气干燥土壤缺水甚至干涸的现象,是气候灾害中最主要的灾害之一<sup>[1]</sup>。干旱的发生和持续不但给国民经济带来巨大损失,还会造成水资源短缺、沙尘暴增加、荒漠化加剧等诸多生态影响<sup>[2]</sup>。库布齐沙漠位于内蒙古西南部,昼夜温差大,风化作用强,生态环境脆弱,属于典型干旱半干旱地区。随着“三北”防护林工程逐年扩展,防护林体系建设直接保护了生态环境,减少了干旱、风沙危害和水土流失等自然灾害<sup>[3]</sup>。但伴随林草化过程的快速扩展,生态问题也日益凸显,人工林由于储水能力较差,调节水源能力较弱,时间一长就出现成片衰退甚至死亡的现象<sup>[4]</sup>。对此,为保证防护林长期稳定地发挥生态作用,科学量化库布齐沙漠各人工林的持水能力,对调控经营干旱区人工防护林建设,合理规划与保护林区发展具有重要意义。

人工林在形成或演变过程中,群落具有多层次结构性,其林冠层、林下植物层和凋落物层的结构、数量、性质等因演替或生长阶段的不同而各有差异,凋落物和根系生长过程对土壤结构和孔隙状况的影响也各不相同,进而导致不同人工林在持水性能及水土保持能力上存在一定差异<sup>[5]</sup>。当前国内学者对林分持水性能研究主要集中于对林冠层、土壤层、枯落物层中某一特定层的研究,在整体林分持水能力研究和评价方法选用上显得片面<sup>[6]</sup>。王先棒等<sup>[7]</sup>通过主观层次分析法对不同林型进行水源涵养评价,艾彪<sup>[8]</sup>、张佳楠等<sup>[9]</sup>利用熵权法探究了不同林分持水差异,和

丽萍等<sup>[10]</sup>直接对比分析了不同林分持水规律。本研究在前人研究基础上,以库布齐沙漠东段护林站内5种不同林型的人工林为研究对象,结合模糊物元模型建立林冠层持水特性、林下植被层持水特性、枯落物持水特性、土壤持水特性等9个指标构成的评价体系,运用欧式贴近度进一步评价不同林分权重,科学评估各人工林持水能力,以期为当地林分结构调控及造林树种选择提供理论指导,为世界干旱半干旱区防护林建设与保护提供科学依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区库布齐沙漠鄂尔多斯造林总场沟心召分场曹四滩护林站。地理坐标为40°14′24″N, 110°39′14″E。地属温带大陆性季风气候,年均气温约6.1℃,昼热夜冷,年均降水量约280 mm。全年盛行西风及北偏西风,平均风速约3.6 m/s,气候类型属于中温带干旱半干旱区。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、榆树、樟子松及早柳杨树混交林等,林下草本植被以沙生植物为主。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查 试验于2021年7月开展,充分调查的基础上,选择造林总场中典型人工林,包括速生杨纯林、榆树纯林、樟子松纯林、沙柳纯林及杨树旱柳混交林5种典型林分作为研究对象,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、冠幅及林下植被覆盖度等信息,样地人工林资源分布见图 1。

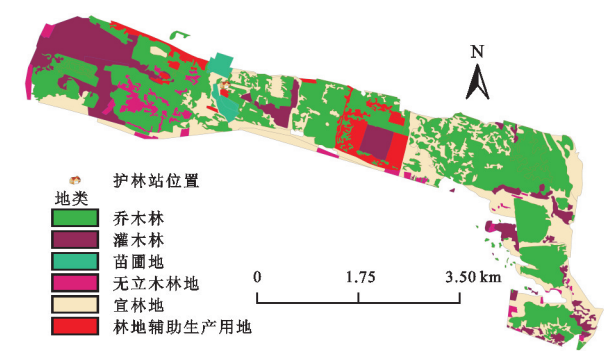


图 1 样地人工林资源分布  
Fig. 1 Distribution map of plantation forest resources in sample plots

1.2.2 林冠层持水能力测定 采用收获法<sup>[11]</sup>分别测定计算各群落类型林冠层生物量。选取各林分标准木中标准枝,为降低误差,每种林分取 3 枝标准枝,称量各自鲜重后密封带回实验室,采用浸水称重法测定最大持水量<sup>[10]</sup>,之后在烘箱烘干至恒重,称量干重量,计算自然含水率。同时在标准木中随机抽取枝条,将叶与茎进行分离,为降低误差,每种林分随机取 3 枝枝条,测定各自鲜重后采用浸水称重法分别测定各自最大持水量。

1.2.3 林下植被层持水能力测定 在各林分标准木下随机选取 5 个 0.2 m×0.2 m 的林下植被小样方,收集样方内全部林下植被,称量各自鲜重后密封带回实验室,采用收获法分别计算林下植被生物量,采用浸水法测定持水量和持水率,之后在烘箱烘干至恒重,称量干重量。

1.2.4 枯落物持水能力测定 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,称量各自鲜重后密封带回,烘干后测定计算枯落物生物量,随后装入尼龙袋中扎紧,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<sup>[12]</sup>,由此计算枯落物的最大持水值。枯落物相关指标计算公式为:

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

式中: $W_{24h}$ 为最大持水量( $t/hm^2$ ); $W_{24}$ 为 24 h 枯落物重量( $t/hm^2$ ); $W_0$ 为枯落物干质量( $t/hm^2$ ); $R_{24h}$ 为最大持水率(%)。

1.2.5 土壤持水能力测定计算 在各林分枯落物基

底取 0—20 cm 表层土壤,用环刀随机取 3 个土样,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:

$$W_a=10000\times P_a\times h$$
$$W_b=10000\times P_b\times h$$
$$W_c=10000\times P_c\times h$$

式中: $W_a$ 为土壤饱和持水量( $t/hm^2$ ); $W_b$ 为土壤毛管持水量( $t/hm^2$ ); $W_c$ 为土壤非毛管持水量( $t/hm^2$ ); $P_a$ 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)。

1.2.6 林分持水能力评价 运用物元分析理论<sup>[13]</sup>,通过欧式贴近度模糊物元模型,对不同林分持水能力进行综合评价,评价指标包括:林冠持水量、林冠持水率、林下植被持水量、林下植被持水率、枯落物持水量、土壤容重、土壤非毛管持水量、土壤毛管持水量、土壤饱和持水量,最后通过评分综合评价各林分持水能力。

(1) 模糊物元概念,即描述事物的基本元  $R$ :

$$R=(M,C,x)$$
$$R=\begin{pmatrix} 0 & M_1 & \cdots & M_m \\ C_1 & x_{11} & \cdots & x_{m1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & x_{1n} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}$$

式中: $R$ 为研究区人工林的复合模糊元; $M_i$ 为第  $i$  种林分类型, $i=1,2,3,\cdots,m$ , $m=5$ ;  $C_j$ 为第  $j$  个评价指标, $j=1,2,3,\cdots,n$ , $n=9$ ;  $x_{ij}$ 为第  $i$  种林分类型第  $j$  个指标对应的指标值。

(2) 从优隶度属原则,描述各指标的模糊量值从属于最优指标模糊量值的隶属程度,其中服从越小越优的指标仅有土壤容重,其余指标均为越大越优型指标

越大越优型:

$$u_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_{ij})}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})}$$

越小越优型:

$$u_{ij}=\frac{\max(x_{ij})-x_{ij}}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})}$$

式中: $u_{ij}$ 为从优隶属度; $\max\{x_{ij}\}$ , $\min\{x_{ij}\}$ 分别代表其中最大值与最小值。

由此可以建立从优隶属矩阵  $R_1$

$$R_1=\begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{m1} & u_{n2} & \cdots & u_{mn} \end{pmatrix}$$

(3) 差平方模糊物元理论。差平方模糊物元  $R_3$

为标准模糊物元  $R_2$  ( $u_{0j}=1.0$ ) 与  $R_1$  各项差的平方, 其中  $\Delta_{ij}=(u_{0j}u_{ij})^2$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & M_1 & \cdots & M_m \\ C_1 & \Delta_{11} & \cdots & \Delta_{m1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & \Delta_{1n} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix}$$

(4) 欧式贴近度。表示各评价指标与最优指标之间的贴近程度, 欧式贴近度越大, 该林分持水能力越强。由公式依次得到评价指标权重模糊物元  $R_4$  及欧式贴近度模糊物元  $R_5$ :

$$D_j = \frac{1}{x_j} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\bar{x}_j - x_j)^2}$$

$$R_4 = \frac{D_j}{\sum_{i=1}^m D_j}$$

$$R_5 = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^n R_4 \Delta_{ij}}$$

式中:  $\bar{x}_j$  为第  $j$  个指标量值平均值;  $D_j$  为第  $j$  个评价指标下的变异系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 林冠层持水能力

2.1.1 林冠层不同部分持水差异 对林冠层不同部分持水分析如图 2 所示, 可以发现不同树种之间叶片的持水能力差异显著, 表现为榆树林 > 杨树林 > 杨柳混交林 > 沙柳林 > 樟子松林, 叶片持水率介于 22.65% ~ 110.02%, 其中榆树叶片的持水率显著大于其他人工林 ( $p < 0.05$ ), 这是由于榆树叶片上通常具有微弱的绒毛, 叶脉也由主脉和次生脉组成明显的网状纹理, 从而相对于其他树种表现出更好的持水性能。而杨树为阔叶树种, 叶片又相对柔软, 因此持水率也较大。

茎干持水率介于 12.93% ~ 47.29%, 其中樟子松叶片的持水能力较弱, 但茎干持水能力较强。这是由于樟子松叶片主要为密度较高的针状叶片, 在减少水分蒸发的同时也直接降低了持水能力, 而去除叶片后, 樟子松的茎干由于具有丰富的树脂, 又表现出较强的持水性能。

2.1.2 林冠层持水量与生物量 由图 3 可知, 不同树种间林冠持水能力差异显著, 持水量介于 2.36 ~ 9.98 t/hm<sup>2</sup>, 其中杨柳混交林与榆树林持水能力最强, 樟子松持水量最小; 除樟子松外, 各树种生物量基本表现出与持水量相同的变化趋势, 生物量介于 13.92 ~ 42.58 t/hm<sup>2</sup>, 杨柳混交林生物量显著高于其他林分, 这是由于混交林林分结构更合理, 生长更为茂盛, 因此生物量比其他纯林高。

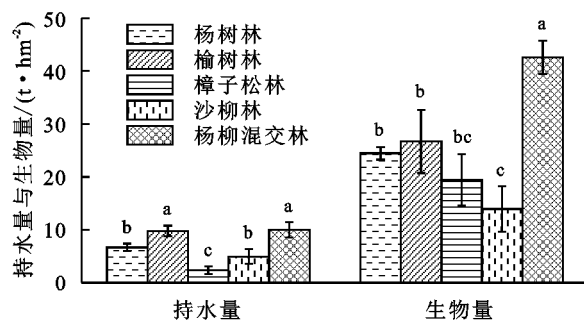


图 2 不同树种茎、叶最大持水量

Fig. 2 maximum water holding capacity of stems and leaves of different tree species

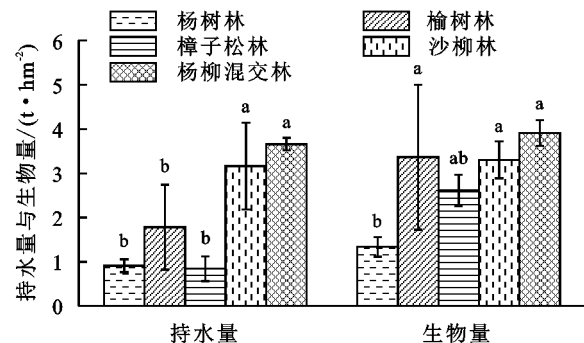


图 3 林冠层持水量与生物量

Fig. 3 Canopy water holding capacity and biomass

### 2.2 林下植被层持水能力

2.2.1 林冠层持水量与生物量 林下植被层是指分布在森林或林地中树木下方的植物群落。它位于森林的地面层和乔木层之间, 通常包括灌木、草本植物、藤蔓和苔藓等。由图 4 可看出, 不同树种林下植被的持水量介于 0.84 ~ 3.66 t/hm<sup>2</sup>, 生物量介于 1.33 ~ 3.92 t/hm<sup>2</sup>, 生物量基本表现出与持水量相同的变化趋势。其中, 杨柳混交林的林下植被层在持水量与生物量中均优于其他树种, 这是由于混交林具有多种树种, 可以提供更多的生境和生态位, 从而增加了林下植被的多样性, 从而在生物量与持水能力中表现出更强的优越性。

2.2.2 最大持水率与自然含水率 植被最大持水率是指植物在饱和状态下所能容纳的最大水分量, 最大持水率越高, 植被越易在较长时间内保持水分, 在干旱条件下的生存能力越强。由图 5 可知, 不同植被的最大持水率差异显著 ( $p < 0.05$ ), 林冠层植被中以沙柳林持水率较高, 因此沙柳林在面对极端条件下水分自维持能力高于其他林分, 林下植被以杨柳混交林持水率较高, 这是由于混交林增强了林下植被的多样性, 进而增强了林下植被水分维持。

植被自然含水率代表植物体内自然状态下所含的水分量。由图可知, 不同植被的自然含水率差异显著 ( $p < 0.05$ ), 林冠层植被中以杨树林含水率较高, 林下植



被以榆树林含水率较高,这可能由于杨树和榆树都属于阔叶乔木,因而相比较其他林分具有更高的含水率。

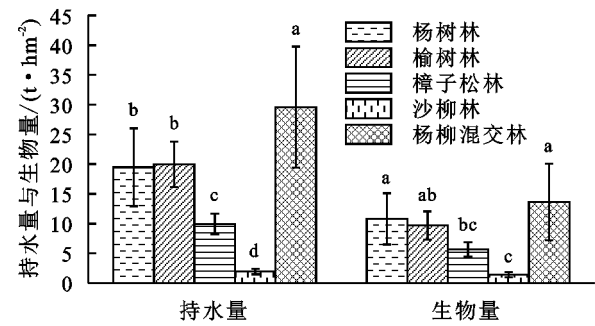


图 4 林下植被层持水量与生物量  
Fig. 4 Water holding capacity and biomass of understory vegetation layer

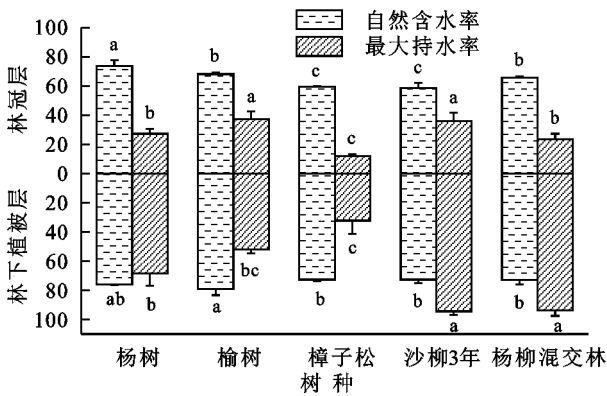
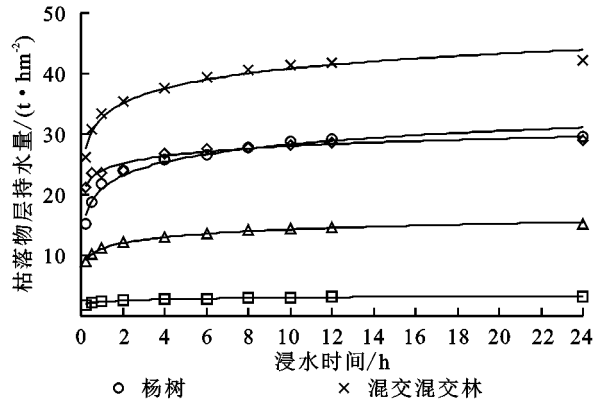


图 5 不同林分自然含水率与最大持水率  
Fig. 5 Natural water content and maximum water holding rate of different stands

2.3 枯落物层持水能力

2.3.1 枯落物层持水量与生物量 由图 6 可知,不



同林分枯落物持水量介于 1.96~29.25 t/hm<sup>2</sup>,表现为杨柳混交林>榆树林>杨树林>樟子松林>沙柳林,各林分枯落物间持水能力差异显著( $p<0.05$ ),其中杨柳混交林持水能力显著高于其他林分。各林分枯落物生物量介于1.43~13.62t/hm<sup>2</sup>,基本表现出与持水量相同的变化趋势,杨柳混交林与杨树林生物量较高,沙柳可能由于叶片较薄较小较容易分解,因而生物量较低。

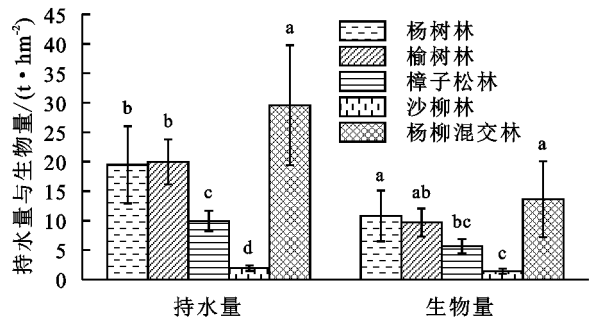


图 6 枯落物层持水量与生物量  
Fig. 6 Litter layer water holding capacity and biomass

2.3.2 枯落物持水动态与吸水速率 由图 7 可知,各林分枯落物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( $h$ )],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  $t/(hm^2 \cdot h)$ ],由表 1 可知,各  $R^2$  均大于 0.929,拟合较好。浸泡的前 2 h 各林分枯落物持水量迅速增大,吸水速率迅速降低,浸泡 10 h 后基本接近饱和状态。其中杨柳混交林持水量最大,杨树林与榆树林持水能力相近,沙柳林最低。

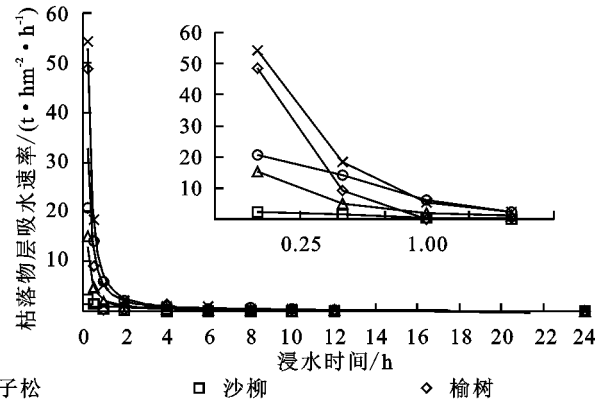


图 7 不同林分枯落物持水量与吸水速率

Fig. 7 Water holding capacity and water absorption rate of litter in different stands

2.4 土壤层持水能力

由图 8 可知,各林分间土壤非毛管持水量差异显著,介于 19.07~87.33 t/hm<sup>2</sup>,以杨柳混交林最大,这是由于树种的多样性形成了不同树种根系的交错网状结构,因此能够增加土壤的孔隙度和稳定性,有利于土壤保水。各林地土壤的饱和持水量范围在 562.87~694.78

t/hm<sup>2</sup>,以杨柳混交林最大,榆树最小,土壤毛管持水量介于 543.80~645.71 t/hm<sup>2</sup>,以樟子松最大,榆树林最小。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。由表 2 可知,各林分土壤容重差异不明显,其中杨柳混交林最低,说明其表层土相比于其他树种

较为松弛。各树种孔隙度表现为:杨柳混交林>樟子松林>沙柳林>杨树林>榆树林,与土壤持水基本表现出相同的变化趋势。

表1 不同林分持水量及吸水速率与浸泡时间拟合方程

Table 1 Fitting equations of water holding capacity, water absorption rate and soaking time of different stands

林型	持水量与浸泡时间		吸水速率与浸泡时间	
	拟合函数	$R^2$	拟合函数	$R^2$
杨树林	$y=3.1967\ln(x)+20.955$	0.9719	$y=5.2488x^{-1.32}$	0.9392
榆树林	$y=1.7828\ln(x)+23.927$	0.9499	$y=2.3191x^{-1.237}$	0.929
樟子松林	$y=1.3867\ln(x)+11.076$	0.9934	$y=2.3861x^{-1.214}$	0.9866
沙柳林	$y=0.2955\ln(x)+2.3445$	0.984	$y=0.4943x^{-1.19}$	0.9782
杨柳混交林	$y=3.56\ln(x)+32.619$	0.9714	$y=7.1604x^{-1.441}$	0.9976

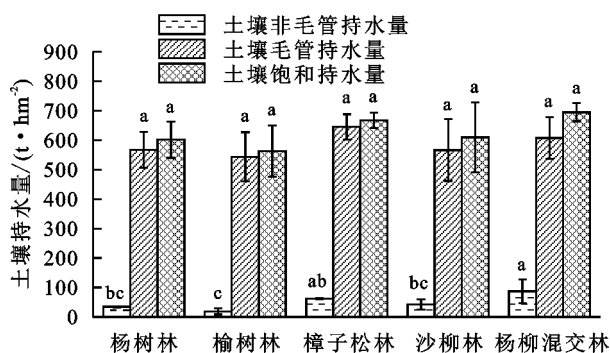


图8 不同林分土壤持水率

Fig. 8 Soil water holding rate of different stands

表2 不同林分土壤容重及孔隙度

Table 2 Soil bulk density and porosity of different stands

林分	土壤容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	毛管 孔隙度/%	非毛管孔 隙度/%	总孔 隙度/%
杨树林	1.649	28.359	1.740	30.099
榆树林	1.664	27.190	0.953	28.143
樟子松林	1.538	32.286	3.100	33.386
沙柳林	1.633	28.334	2.147	30.481
杨柳混交林	1.462	30.372	4.367	34.739

## 2.5 不同林分持水能力综合评价

根据试验情况,对不同层次评价指标编号  $C_1$ — $C_9$ ,其中  $C_1, C_2$  为林冠层持水量与林冠层持水率;  $C_3, C_4$  为林下植被层持水量与林下植被层持水率;  $C_5$  为枯落物持水量;  $C_6$ — $C_9$  为土壤持水指标,分别代表土壤容重、土壤非毛管持水量、土壤毛管持水量和土壤饱和持水量。  $M_1$ — $M_6$  分别代表杨树林、榆树林、樟子松林、沙柳林以及杨柳混交林。将数据带入表达式  $R$  中,得到5种林型的复合模糊元  $R$ ,并依次求得  $R_1$ — $R_5$ 。5种林分的欧式贴近度的大小顺序为:杨柳混交林(0.805 6)>沙柳林(0.387 7)>榆树

林(0.374 7)>杨树林(0.357 2)>樟子松林(0.163 2)。欧式贴近度越大,代表该评价方案越接近最优方案,即林分类型持水能力越强。通过结果可知,杨柳混交林的持水能力最强,沙柳林持水能力略高于榆树林和杨树林,樟子松林持水能力最差。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

3.1.1 林冠层及林下植被层持水特征 林分的总持水量由林分地上部分即林冠层、林下植被层、凋落物层和地下部分即土壤层的涵养水分能力所决定<sup>[5]</sup>,林冠层是大气降雨进入森林生态系统水文传输的第一道屏障。本研究中不同树种间林冠持水能力差异显著,林冠持水量介于  $2.36 \sim 9.98 \text{ t/hm}^2$ ,表现为杨柳混交林>榆树林>杨树林>沙柳林>樟子松林,生物量介于  $13.92 \sim 42.58 \text{ t/hm}^2$ ,基本表现出与持水量相同的变化趋势,由此说明林冠层枝叶量越多,枝叶越密集,其持水量也越大<sup>[10]</sup>。

降雨穿过林冠层后通过林下植被层,又一次被截留下来,进一步减弱雨水击打土壤。由于林分形成时间不同,林下植被的种类和数量存在一定的差异,导致不同林分林下植被的持水性能存在一定差异<sup>[14]</sup>。研究中不同树种林下植被的持水量介于  $0.84 \sim 3.66 \text{ t/hm}^2$ ,生物量介于  $1.33 \sim 3.92 \text{ t/hm}^2$ 。杨柳混交林的林下植被层在持水量与生物量中均优于其他树种,这可能由于混交林较纯林相比,林内结构更加复杂、林冠层次较厚,有效降低了风速,减小了气温和地温的温差,有效提高了林内的空气湿度,形成良好的森林小气候,使其林下植被的持水量与生物量均表现出较强的优越性<sup>[15]</sup>。

3.1.2 枯落物层及土壤层持水特征 在不同作用层中,枯落物发挥着独特的生态水文功能。研究中不同林分枯落物持水量介于  $1.96 \sim 29.25 \text{ t/hm}^2$ ,生物量介于  $1.43 \sim 13.62 \text{ t/hm}^2$ ,各林分枯落物持水量与浸泡时间均满足  $y=a\ln t+b$  对数关系,吸水速率与浸泡时间满足  $y=ax^{-b}$  幂函数关系,  $R^2$  均大于 0.929,这与杨晓霞<sup>[16]</sup>、张淑兰<sup>[17]</sup>、刘忠玲<sup>[18]</sup>等的结论相同。这是由于枯枝落叶本身由于有机物的存在,表面具有亲水性,从风干状态浸入静水中后,水分迅速在枯落物的表面形成薄膜,并在其中的细小孔隙中渗透,使枯枝落叶在浸入水中的初期持水量剧增,同时枯落物中的细微孔隙和细小管道能够引起毛细现象,水分在这些微观结构内形成水链,水势差大,导致初期吸水速率较高。

树种或林分的不同使得林下植被种类组成和多样性发生改变,必然导致生境条件的变化,进而引起土壤理化性质的差异<sup>[19]</sup>。研究表明,各林分间土壤非毛管持水量介于 19.07~87.33 t/hm<sup>2</sup>,饱和持水量介于 562.87~694.78 t/hm<sup>2</sup>,土壤毛管持水量介于 543.80~645.71 t/hm<sup>2</sup>,各林分土壤容重差异不明显,其中杨柳混交林土壤容重低于其他纯林,同时孔隙度比其他林分高,这与程唱等<sup>[6]</sup>研究结论一致,说明混交林土壤结构相比于其他树种更为疏松,土壤通气性和透水性更好。

**3.1.3 不同林分持水性能比较研究** 通过分析不同林分的欧式贴近度,结合模糊物元模型,建立林冠层持水特性、林下植被层持水特性、枯落物持水特性、土壤持水特性等 9 个指标构成的评价体系,对各林地持水能力进行综合评价。研究结果表现为:杨柳混交林>沙柳林>榆树林>杨树林>樟子松林,其中沙柳林持水能力略高于榆树林和杨树林,这可能由于沙柳相比较其他树种,叶片表面积更小,对干燥和贫瘠的土壤条件具有更强的适应能力,持水能力相对更强。杨柳混交林持水能力明显高于其他纯林,这表明在采用植被混交的模式可以容纳更大水分量,在干旱条件下将具备更强的生存能力,未来人工林培育可优先考虑进行混交人工林培育。

### 3.2 结论

通过对不同人工林持水能力进行研究,结果表明杨柳混交林持水能力明显高于其他林分,其次为沙柳林,杨树林和榆树林持水能力相近,樟子松林最低。建议未来经营干旱半干旱区人工防护林建设中,适当提高混交林比例,并尝试通过更多林分合理搭配以应对极端生态环境。

#### 参考文献(References):

- [1] 胡子瑛,周俊菊,张利利,等.中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J].生态学报,2018,38(6):1908-1919.  
Hu Z Y, Zhou J J, Zhang L L, et al. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(6):1908-1919.
- [2] 张利利,周俊菊,张恒玮,等.基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J].生态学报,2017,37(3):996-1007.  
Zhang L L, Zhou J J, Zhang H W, et al. Temporal and spatial patterns of climate drought-wet and drought event based on Standard Precipitation Index in Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 996-1007.

- [3] 陶军礼.对“三北”防护林体系工程的思考与展望[J].林业科技情报,2020,52(3):95-96.  
Tao J L. Thinking and prospect of “Three-North” shelterbelt system project[J]. Forestry Science and Technology Information, 2020,52(3):95-96.
- [4] 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.  
Ma Q M, Long Y P, Tang S Y, et al. Comparative analysis of evapotranspiration of typical sandy plantations in the Hobq Desert[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022,37(4):854-864.
- [5] 张日施,黄光友,南雅薇,等.桂西北不同年龄阶段秃杉人工林的水源涵养功能[J].水土保持学报,2021,35(5):130-136,143.  
Zhang R S, Hang G Y, Nan Y W, et al. Water conservation function of Taiwan flousiana plantations at different ages in northwest Guangxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):130-136,143.
- [6] 程唱,贺康宁,俞国峰,等.干旱半干旱区不同林型人工林水源涵养能力比较研究[J].生态学报,2021,41(5):1979-1990.  
Cheng C, He K N, Yu G F, et al. Comparative study on water conservation capacity of different forest types of artificial forest in arid and semi-arid area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(5):1979-1990.
- [7] 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.  
Wang X B, He K N, Dong Z, et al. Evaluation on water conservation capacity of typical forest types in Beichuan River basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017,15(5):94-102.
- [8] 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.  
Ai B, Huang Y, Zhu Y H, et al. Evaluation of water conservation capacity of litter and soil layer in typical forest stands in hilly region of southern Jiangxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(1):197-205.
- [9] 张佳楠,张建军,张海博,等.晋西黄土区典型林分水源涵养能力评价[J].北京林业大学学报,2019,41(8):105-114.  
Zhang J N, Zhang J J, Zhang H B, et al. Water conservation capacity of typical forestlands in the Loess Plateau of Western Shanxi Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(8): 105-114.
- [10] 和丽萍,李贵祥,柴勇,等.滇西北高山典型退化次生林水源涵养能力分析[J].水土保持研究,2020,27(2):233-237,245.  
He L P, Li G X, Chai Y, et al. Analysis of water con-

- servation capacity of typical degraded secondary forests in Sub-Alpine Areas of Northwest Yunnan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 233-237, 245.
- [11] 贾彦龙, 许晴, 许中旗, 等. 燕山北部山地典型植物群落水源涵养能力研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 16-21.
- Jia Y L, Xu Q, Xu Z Q, et al. Water conservation capacity of typical plant communities in north region of Yanshan mountain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 16-21.
- [12] 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.
- Du J. Simulated study on hydrological process of forest litter layer in Beijing mountainous area[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [13] 冯星, 孙东永, 胡维登, 等. 模糊物元理论在干旱分析中的应用研究[J]. 水文, 2018, 38(6): 18-23.
- Feng X, Sun D Y, Hu W D, et al. Application of fuzzy matter-element theory in drought analysis of weihe river basin[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(6): 18-23.
- [14] 何斌, 秦武明, 戴军, 等. 马占相思人工林不同年龄阶段水源涵养功能及其价值研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 5-8, 27.
- He B, Qin W M, Dai J, et al. Study on function and value of water conservation in different age classes of *Acacia mangium* plantations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 5-8, 27.
- [15] 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.
- Zhang Y H. Discussion on the significance of mixed forest in afforestation application: principles of mixed forest and key points of construction techniques[J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(24): 83-84.
- [16] 杨晓霞, 赵锦梅, 张雪, 等. 祁连山东段山地典型灌丛枯落物及土壤水源涵养功能研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 197-207.
- Yang X X, Zhao J M, Zhang X, et al. Litter and soil water conservation function of typical shrubs in eastern Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 197-207.
- [17] 张淑兰, 韩勇, 杨盼, 等. 汉江上游不同林龄麻栎林枯落物的水文功能评价[J]. 生态环境学报, 2022, 31(1): 44-51.
- Zhang S L, Han Y, Yang P, et al. Evaluation of hydrological function of litter of *Quercus Acuvarius* at different ages in the upper reaches of Han River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(1): 44-51.
- [18] 刘忠玲, 刘建明, 胡伟, 等. 不同密度胡桃楸次生林枯落物和土壤持水特性的研究[J]. 森林工程, 2021, 37(3): 52-59, 66.
- Liu Z L, Liu J M, Hu W, et al. Water-holding characteristics of litter and soil of *Juglans mandshurica* natural secondary forest with different densities[J]. Forest Engineering, 2021, 37(3): 52-59, 66.
- [19] 王磊, 温远光, 周晓果, 等. 尾巨桉与红锥混交对林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1340-1349.
- Wang L, Wen Y G, Zhou X G, et al. Effects of mixing *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* with *Castanopsis hystrix* on understory vegetation and soil properties[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(7): 1340-1349.

(上接第 238 页)

- [23] Xu C L, Zhang Q B, Yu Q, et al. Effects of land use/cover change on carbon storage between 2000 and 2040 in the Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 151: 110345.
- [24] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [25] 韩楚翘, 郑江华, 王哲, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型吐哈盆地陆地生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J]. 干旱区地理, 2023: 1-15.
- Han C Q, Zheng J H, Wang Z, et al. Spatio-temporal variation and multi-scenario simulation of carbon storage in terrestrial[J]. Arid Land Geography, 2023: 1-15.
- [26] 古丽娜尔·索尔达汗. 吉林省中部城市用地扩张对耕层土壤有机碳分布的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- Suoerdahan · Gulinaer. Effects of Urban Land Expansion on the Distribution of Soil Organic Carbon of Arable Layers in Central Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [27] Qiu Z X, Feng Z K, Song Y N, et al. Carbon sequestration potential of forest vegetation in China from 2003 to 2050: Predicting forest vegetation growth based on climate and the environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119715.