丹霞山不同林分类型枯落物与土壤的水文特性

张 翔[1], 田 菊[2], 朱嘉磊[1,2], 陈晓远[1], 陈 昉[3]
(1.韶关学院 生物与农业学院, 广东 韶关 512005; 2.保山学院 资源环境学院, 云南 保山 678000; 3.广东韶关丹霞山国家级自然保护区管理局, 广东 韶关 512399)

摘 要: [目的]研究丹霞山不同林分类型的水文调节能力,筛选水土保持功能优良的林分类型,为该地区森林经营管理提供科学依据。[方法]采用室内浸泡法,对丹霞山5种林分类型(黄樟、木荷、马尾松、乌冈栎、新木姜子)枯落物和林下土壤持水特性进行研究。[结果]① 5种林分类型枯落物储量介于13.62~42.86 t/hm^{2}之间,木荷林最大;最大持水率范围为59.76%~87.93%,黄樟林最大;最大持水量介于11.83~26.22 t/hm^{2}之间,木荷林最大;最大拦蓄率和有效拦蓄率范围分别为38.21%~65.79%和29.25%~52.61%,均为黄樟林最大;最大拦蓄量和有效拦蓄量分别介于8.71~17.04 t/hm^{2}和6.74~13.11 t/hm^{2}之间,均为木荷林最大。② 各林分类型枯落物持水量与浸泡时间之间变化趋势一致,均呈正相关,符合对数函数关系,持水速率与浸泡时间之间均呈负相关,符合幂函数关系,同一时间下,木荷林枯落物持水量与吸水速率均为最大。③ 各林分类型土壤容重介于1.22~1.49 g/cm^{3}之间,木荷林最大,黄樟林最小;孔隙度范围为43.89%~53.82%,与容重呈负相关;饱和持水量和最大持水量分别介于877.74~1 076.30 t/hm^{2}和591.27~849.80 t/hm^{2}之间,均为黄樟林最大。[结论]综合评估表明,在丹霞山地区,木荷林在枯落物与土壤持水性能方面优势显著,是该区域水土保持功能优良的林分类型。

关键词: 丹霞山; 林分类型; 枯落物; 土壤; 持水能力
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0040-09 **中图分类号:** S714, S715

文献参数: 张翔, 田菊, 朱嘉磊, 等.丹霞山不同林分类型枯落物与土壤的水文特性[J].水土保持通报,2026,46(4):40-48. Zhang Xiang, Tian Ju, Zhu Jialei, et al. Hydrological characteristics of litters and soil across different forest stand types in Danxia Mountain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):40-48.
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.038 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.038**

Hydrological characteristics of litters and soil across different forest stand types in Danxia Mountain

Zhang Xiang[1], Tian Ju[2], Zhu Jialei[1,2], Chen Xiaoyuan[1], Chen Fang[3]
(1.*School of Biology and Agriculture, Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong* 512005, *China*; 2.*College of Resources and Environment, Baoshan University, Baoshan, Yunnan* 678000, *China*; 3.*Guangdong Shaoguan Danxia Mountain National Nature Reserve Administration, Shaoguan, Guangdong* 512399, *China*)

Abstract: [Objective] The hydrological regulation capacities of different forest stand types in Danxia Mountain were investigated, and the forest stand types with superior soil and water conservation functions were selected, in order to provide a scientific basis for forest management in this region. [Methods] The indoor immersion method was used to investigate the water-holding characteristics of litters and understory soil of five forest stand types in Danxia Mountain: *Camphora parthenoxylon*, *Schima superba*, *Pinus massoniana*, *Quercus phillyreoides*, and *Neolitsea aurata*. [Results] ① The litter reserves of the five forest stand types ranged from 13.62 t/hm^2 to 42.86 t/hm^2, with the highest value in *S. superba* forest. The maximum water-holding rate ranged from 59.76% to 87.93%, with the highest value in *C. parthenoxylon* forest. The maximum water-holding capacity ranged from 11.83 t/hm^2 to 26.22 t/hm^2, with the highest value in *S. superba* forest. The maximum and effective interception

收稿日期:2025-12-16 **修回日期:**2026-03-16 **采用日期:**2026-03-16
资助项目:广东省普通高校重点科研平台和项目"粤北水土资源高效利用与耕地保育研究创新团队"(2020KCXTD037); 保山学院博士科研启动资助项目"森林土壤有机碳组分及其影响因素研究"(BSKY202509)
第一作者:张翔(1999—),男(汉族),山东省济宁市人,硕士研究生,研究方向为森林土壤学。Email:13173458536@163.com。
通信作者:朱嘉磊(1989—),男(汉族),江西省萍乡市人,博士,讲师,主要从事森林土壤学研究。Email:zhujialei@bsc.edu.cn。

rates ranged from 38.21% to 65.79% and from 29.25% to 52.61%, respectively, both with the highest values in *C. parthenoxylon* forest. The maximum and effective interception capacities ranged from 8.71 t/hm^2 to 17.04 t/hm^2 and from 6.74 t/hm^2 to 13.11 t/hm^2, respectively, both with the highest values in *S. superba* forest. ② The water-holding capacity of litters across all forest stand types showed a consistent trend with immersion time, being positively correlated with immersion time and following a logarithmic function. The water-holding rate was negatively correlated with immersion time and followed a power function. At the same immersion time, the *S. superba* forest exhibited the highest litter water-holding capacity and water absorption rate. ③ The soil bulk densities of the different forest stand types ranged from 1.22 g/cm^3 to 1.49 g/cm^3, with the highest value in *S. superba* forest and the lowest in *C. parthenoxylon* forest. The soil porosity ranged from 43.89% to 53.82%, and was negatively correlated with soil bulk density. The saturated and maximum water-holding capacities ranged from 877.74 t/hm^2 to 1 076.30 t/hm^2 and from 591.27 t/hm^2 to 849.80 t/hm^2, respectively, both with the highest values in *C. parthenoxylon* forest. [Conclusion] The comprehensive evaluation shows that *S. superba* forest in Danxia Mountain has significant advantages in litters and soil water-holding properties, making it a forest stand type with superior soil and water conservation functions in this region.

Keywords: Danxia Mountain; forest stand type; litters; soil; water-holding capacity

森林生态系统在全球物质循环中起到了巨大作用,作为地球生态系统的重要组成部分,承载着丰富的生物多样性并具备多样化的生态服务功能,在气候调节、水源涵养、水土保持等方面发挥着重要作用[1]。在森林生态系统中,土壤、地上植被及枯落物构成了一个复杂的物质循环系统[2]。森林水文功能作为其核心生态服务之一,具体表现为森林对降水的重新分配与调蓄能力。森林通过林冠层、枯落物层、土壤层等结构,调控水循环过程,为环境带来显著效益。森林生态系统水文作用可归纳为林冠截留、树干径流、枯落物层截留、林地水分涵养、蒸腾蒸发作用。这些过程相互关联,协同作用,构成了完整的水文调节机制[3]。其中,枯落物层和土壤层作为森林水文的第二、第三活动层,在拦蓄降雨,涵养水源,减少地表径流等方面作用显著,是森林蓄水保水的关键作用层[4-5]。一方面,枯落物层可以截留雨水,减缓水土流失[6];另一方面,雨水可以将枯落物的养分淋溶到土壤中[7],改善土壤物理性质,提升保水性和透气性,减缓水分蒸发速率,降低地表温度[8-9]。土壤层对大气降水调节能力达到整个森林系统的90%[10],其权重高于枯落物层,是影响林地蓄水能力的关键因子[11]。

国内外学者已对森林枯落物层和土壤层的涵养水源能力开展了大量研究。孟广涛等[12]认为枯落物层既是森林涵养水源的关键区域,又是土壤层的保护屏障和水分调节的核心,Burrows等[13]认为枯落物层能在一定程度上影响土壤层的持水能力。张甜等[14]认为土壤层对降水的调节能力显著高于植被冠层和枯落物层,并且与枯落物层共同构成了森林水文功能的关键组分。Wu Xi等[15]研究发现,土壤层蓄水能力对森林水源涵养能力贡献约为60%~85%,占据主导地位。研究表明,森林水源涵养能力会因区域、结构、林分类型等因素产生较大差异[16-17]。因此,针对不同区域和林分类型开展枯落物层与土壤层水文特性研究,可为水土保持与水源涵养提供更具针对性的理论依据与实践指导。

丹霞地貌是由巨厚红色砂砾岩层沿垂直节理发育,经长期风化剥离和流水侵蚀形成的特殊地貌,以孤立山峰、陡峭奇岩为典型特征。丹霞山是该地貌的命名地与研究的核心区。目前,丹霞山研究多集中于地貌成因、植物群落生态及旅游发展等,针对不同林分枯落物与土壤水文特性的系统性探究尚显不足,尤其是丹霞山地区老龄林条件下不同森林类型的正向演替引起枯落物和土壤的变化,对研究该地区森林经营管理具有重要指导作用。因此,本文以丹霞山为研究对象,通过野外调查与室内模拟试验相结合的方法,深入探究不同林分类型枯落物与土壤的持水性能差异。该研究能揭示枯落物层与土壤层的“绿色水库”功能机制及其在调节水源,保持水土,维持生物多样性和应对气候变化中的生态效益,同时弥补国内特殊地貌区百年天然林土壤水文特性的研究缺口,为世界自然遗产地科学保护,生态恢复及适应性管理提供重要的理论依据与实践指导。

1　研究区概况及研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于广东省韶关市仁化县的丹霞山(113°36′25″—113°47′53″E, 24°51′48″—25°04′12″N),以赤红壤、山地红壤和山地黄棕壤为主。研究区属亚热带季风性湿润气候,雨热同期,干湿季节分明,年均气温19.7 ℃,年均日照总数1 721 h,年均降水量

1 715 mm。区内植被类型丰富、生物多样性显著、地表覆盖完整，为研究林分类型对枯落物持水性能影响提供了良好的自然条件。该地区特有的地形和植被组合既具有重要生态价值，也为探讨不同林分类型在水文功能方面的差异提供了典型的研究样地。

1.2 样地选择

于2022年10—11月对丹霞山进行全面踏查，并结合不同林分所处生态环境因子进行比较。选取黄樟（*Camphora parthenoxylon*）、木荷（*Schima superba*）、马尾松（*Pinus massoniana*）、乌冈栎（*Quercus phillyreoides*）、新木姜子（*Neolitsea aurata*）5种不同林型作为研究对象，分别设置3个30 m×30 m的标准样地进行每木检尺。根据标准木所处土壤区域结合地形因子挖掘标准土壤剖面1个。共布设15块样地和挖掘15个土壤剖面并采集土壤A层样品带回实验室测定。样地基本信息见表1。

表1 样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of sample plots

林分类型	林龄/年	海拔/m	坡度/(°)	坡向	枯落物厚度/cm	密度/(株·hm^{-2})	郁闭度	林分组成
黄樟	100	353±2.9	35	东北	4～8	900	0.9	7黄樟＋2阿丁枫＋1木荷-黄杞
木荷	160	339±2.5	33	西南	3～9	800	0.7	8木荷＋2马尾松
马尾松	120	330±2.5	37	东南	2～5	1 200	0.8	8马尾松＋2丹霞梧桐
乌冈栎	165	312±2.4	29	东南	5～9	1 000	0.7	7乌冈栎＋3马尾松
新木姜子	100	353±2.9	35	东北	4～8	900	0.9	7新木姜子＋2阿丁枫＋1木荷-黄杞

1.3 指标测定

1.3.1 枯落物储量及持水拦蓄能力测定

采用室内浸泡法，对各林地内枯落物储量和持水拦蓄能力展开测量。采集单位面积（20 cm×20 cm=0.04 m^2）内的枯落物样本置于信封中，称取鲜重并记录，带回实验室后放入烘箱。设定温度为85 ℃，持续烘干至恒重，记录烘干后的质量。根据单位面积内收集到的枯落物干重计算枯落物储量。将枯落物样品置于尼龙网兜中浸水，分别在0.25，0.5，1，2，4，8，12，24 h时提起网兜，待无水滴流下时称重记录，计算枯落物持水能力相关指标[18]，枯落物各指标的计算公式为

$$M=\frac{M_d}{S}\times\frac{1}{100} \tag{1}$$

$$R_0=\frac{M_0-M_d}{M_d}\times 100\% \tag{2}$$

$$R_{h\max}=\frac{M_{24}-M_d}{M_d}\times 100\% \tag{3}$$

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

$$R_{sv}=0.85\times R_{h\max}-R_0 \tag{5}$$

$$W_{h\max}=R_{h\max}\times M \tag{6}$$

$$W_{\max}=R_{\max}\times M \tag{7}$$

$$W_{sv}=R_{sv}\times M \tag{8}$$

$$R_i=\frac{M_i-M_d}{M_d}\times 100\% \tag{9}$$

$$W_i=R_i\times M \tag{10}$$

$$V_i=\frac{W_i}{t} \tag{11}$$

式中：M为枯落物储量（t/hm^2）；M_d为干重（g）；S为单个样方面积（m^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}为浸泡24 h的质量（g）；$R_{\max}$为最大拦蓄率（%）；R_{sv}为有效拦蓄率（%）；0.85为有效持水系数；$W_{h\max}$为最大持水量（t/hm^2）；$W_{\max}$为最大拦蓄量（t/hm^2）；W_{sv}为有效拦蓄量（t/hm^2）；R_i为浸泡时间i时的持水率（%）；M_i为浸泡时间i时的重量（g）；W_i为浸泡时间i时的持水量（g/kg）；V_i为浸泡时间i时的吸水速率〔g/(kg·h)〕；t为持续浸泡时间（h）。

1.3.2 土壤物理性质和持水能力测定

在样地内选取对角线上3个采样点，去除地表枯落物后，采集深度0—20 cm的表层土。将土样带回实验室后，采用环刀法和浸水法测定土壤的物理性质和持水性能。土壤各指标的计算公式为

$$\rho_b=\frac{M_s}{V} \tag{12}$$

$$P=\left(1-\frac{\rho_b}{\rho_s}\right)\times 100\% \tag{13}$$

$$\theta_s=1.00\times 10^4\times P\times H \tag{14}$$

$$W=0.1\times H\times\rho_b\times\frac{M_{\text{wet}}-M_s}{M_s} \tag{15}$$

式中：ρ_b为土壤容重（g/cm^3）；M_s为烘干土质量（g）；V为土壤体积（cm^3）；P为土壤孔隙度（%）；ρ_s为土壤

比重(g/cm^3);θ_s为土壤饱和持水量(t/hm^2);H为土层厚度(m);W为土壤最大持水量(t/hm^2);M_{wet}为浸润24 h后土壤质量(g)。

1.4　数据分析

采用 Microsoft Excel 2021 处理数据,采用 SPSS 27 进行回归分析、方差分析及 Duncan 法多重比较,采用 Origin 2022 绘图。

2　结果与分析

2.1　不同林分类型枯落物的持水能力

2.1.1　不同林分类型的枯落物储量

由表2可知,5种林分类型枯落物储量介于13.62～42.86 t/hm^{2}之间,其大小排序为:木荷林>新木姜子林>马尾松林>乌冈栎林>黄樟林。显著性分析结果表明,不同林分类型枯落物储量存在显著差异。其中,木荷林与新木姜子林之间无显著差异,但二者均显著高于其余林分。木荷林枯落物储量分别是马尾松林、乌冈栎林和黄樟林的2.10倍、2.49倍和3.15倍;新木姜子林则分别是后三者的1.72倍、2.03倍和2.57倍。其余林分之间的枯落物储量均无显著差异。

表2　丹霞山不同林分类型的枯落物储量
Table 2　Litter volume across forest stand types in Danxia Mountain

林分类型	代码	储量
黄樟	Ⅰ	13.62±3.49^b
木荷	Ⅱ	42.86±10.60^a
马尾松	Ⅲ	20.38±5.87^b
乌冈栎	Ⅳ	17.24±5.54^b
新木姜子	Ⅴ	35.06±6.76^a

注:同列指标不同字母表示不同林分类型存在显著差异(p<0.05)。

2.1.2　不同林分类型枯落物持水能力

由表3可知,5种林分类型枯落物自然含水率在21.35%～22.13%之间,无显著差异。而枯落物最大持水率(59.76%～87.93%)差异显著,其大小排序为:黄樟林>乌冈栎林>马尾松林>木荷林>新木姜子林。其中,黄樟林与乌冈栎林之间无显著差异,但二者均显著高于其余林分。黄樟林的最大持水率分别是马尾松林、木荷林和新木姜子林的1.36倍、1.43倍和1.47倍;乌冈栎林则分别是后三者的1.26倍、1.32倍和1.36倍。其余林分之间的枯落物最大持水率均无显著差异。枯落物最大持水量(11.83～26.22 t/hm^2)也存在显著差异,其大小排序为:木荷林>新木姜子林>乌冈栎林>马尾松林>黄樟林。其中,木荷林的持水量显著大于除新木姜子林之外的其余林分,分别是乌冈栎林、马尾松林和黄樟林的1.89倍、2.00倍和2.22倍;新木姜子林则分别是马尾松林和黄樟林的1.58倍和1.75倍,显著大于后两者。其余林分之间的枯落物最大持水量均无显著差异。

表3　丹霞山不同林分类型枯落物的持水能力
Table 3　Water-holding capacity of litter across different forest stand types in Danxia Mountain

林分类型	自然含水率/%	最大持水率/%	最大持水量/(t·hm^{-2})
Ⅰ	22.13±2.02^a	87.93±7.60^a	11.83±2.14^c
Ⅱ	21.35±1.35^a	61.54±2.42^b	26.22±5.61^a
Ⅲ	21.84±1.48^a	64.54±4.64^b	13.12±3.82^c
Ⅳ	21.87±1.92^a	81.54±6.98^a	13.88±4.00^{bc}
Ⅴ	21.55±0.80^a	59.76±4.54^b	20.76±2.54^{ab}

注:表中林分类型代码含义见表2。下同。

2.1.3　不同林分类型的枯落物拦蓄能力

由表4可知,5种林分类型枯落物最大拦蓄率和有效拦蓄率分别为38.21%～65.79%和29.25%～52.61%,排序均为:黄樟林>乌冈栎林>马尾松林>木荷林>新木姜子林,且存在显著差异。其中,黄樟林与乌冈栎林之间均无显著差异,但二者均显著高于其余林分。黄樟林的最大拦蓄率分别是马尾松林、木荷林和新木姜子林的1.54倍、1.64倍和1.72倍,有效拦蓄率分别是其1.59倍、1.70倍和1.80倍;乌冈栎林的最大拦蓄率分别是后三者的1.40倍、1.48倍和1.56倍,有效拦蓄率分别是其1.44倍、1.53倍和1.62倍。其余林分之间的枯落物拦蓄率均无显著差异。枯落物最大拦蓄量和有效拦蓄量分别介于8.71～17.04 t/hm^{2}和6.74～13.11 t/hm^{2}之间,排序均为:木荷林>新木姜子林>乌冈栎林>黄樟林>马尾松林,且存在显著差异。其中,木荷林的拦蓄量显著大于除新木姜子林之外的其余林分,其最大拦蓄量分别是乌冈栎林、黄樟林和马尾松林的1.68倍、1.92倍和1.96倍,有效拦蓄量则分别是其1.62倍、1.85倍和1.95倍。其余林分之间的枯落物拦蓄量均无显著差异。

2.2　不同林分类型枯落物持水动态

2.2.1　不同林分类型枯落物持水量动态过程

如图1所示,5种林分类型枯落物持水量随时间变化规律一致。在浸泡初始的0.5 h内,持水量呈现快速增长的趋势;随着浸泡时间的延长,持水量增长速率逐渐减缓;当浸泡时间为12 h时,持水量已接近最大值;12 h后,随着浸泡时间进一步延长,持水量增长极为缓慢,基本趋于平缓。对同一浸泡时间下不

同林分类型枯落物持水量对比可知,整个浸泡周期,木荷林枯落物持水量始终处于最大值,新木姜子林次之,其余林分差异不大。对枯落物持水量与浸泡时间进行回归分析拟合,相关系数均大于0.93。这表明枯落物持水量与浸泡时间具有较强的相关性,且呈对数函数关系(见表5)。拟合方程为 $W_i=a\times\ln(t)+b$。式中:W_i为持水量(g/kg);t为浸泡时间(h)。

表4 丹霞山不同林分类型枯落物拦蓄能力

Table 4 Litter interception capacity of different forest stand types in Danxia Mountain

林分类型代码	最大拦蓄率/%	有效拦蓄率/%	最大拦蓄量/(t·hm^{-2})	有效拦蓄量/(t·hm^{-2})
Ⅰ	65.79±5.89^{a}	52.61±4.77^{a}	8.86±1.69^{b}	7.09±1.37^{b}
Ⅱ	40.19±2.55^{b}	30.96±2.25^{b}	17.04±3.25^{a}	13.11±2.42^{a}
Ⅲ	42.69±5.46^{b}	33.01±4.79^{b}	8.71±2.90^{b}	6.74±2.34^{b}
Ⅳ	59.68±5.10^{a}	47.44±4.06^{a}	10.15±2.88^{b}	8.07±2.28^{b}
Ⅴ	38.21±3.91^{b}	29.25±3.23^{b}	13.24±1.44^{ab}	10.13±1.07^{ab}

注:各林分类型代码含义见表1。下同。

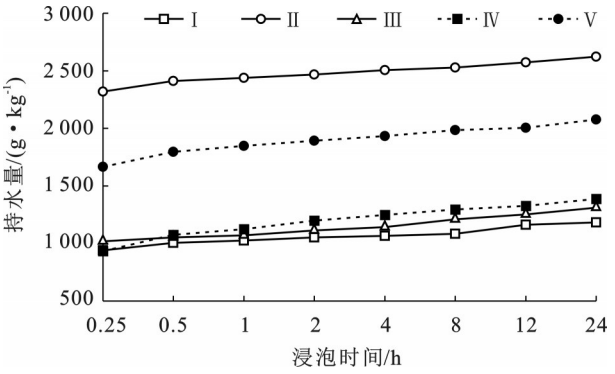

图1 丹霞山不同林分类型枯落物持水量变化特征

Fig.1 Variation characteristics of litter water-holding capacity across different forest stand types in Danxia Mountain

2.2.2 不同林分类型的枯落物吸水速率动态过程

如图2所示,5种林分类型枯落物吸水速率随时间变化规律一致。在浸泡初始的0.5 h内,枯落物吸水较快;当浸泡时间延长至2 h,吸水速率显著下降但仍维持较高水平;随着浸泡时间继续延长,吸水速率持续减缓并趋于稳定;当浸泡时间为12 h时,吸水速率趋向于0,此时各林分类型枯落物持水量基本达到最大值。将同一浸泡时间下不同林分类型枯落物吸水速率进行对比可知,在整个浸泡周期内,木荷林枯落物吸水速率最大,新木姜子林次之,其余林分差异不大。对枯落物吸水速率与浸泡时间进行回归分析拟合,相关系数R^2均大于0.99,表明枯落物吸水速率与浸泡时间具有极强的相关性,且呈幂函数关系(见表5)。拟合方程为 $V_i=a\times t^{b}$。式中:V_i为吸水速率[g/(kg·h)];t为浸泡时间(h)。

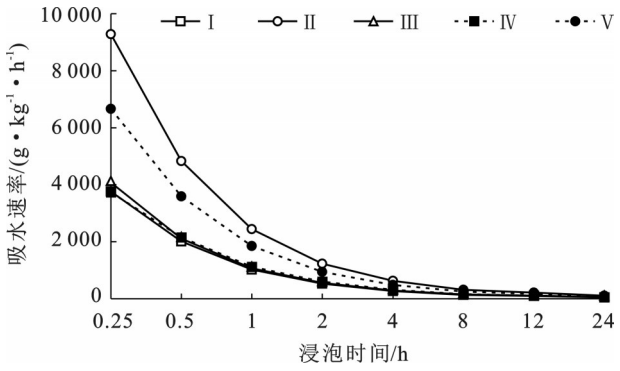

图2 丹霞山不同林分类型枯落物吸水速率的变化特征

Fig.2 Variation characteristics of water absorption rate of litter across different forest stand types in Danxia Mountain

表5 丹霞山不同林分类型枯落物持水的动态拟合方程

Table 5 Fitting equations for litter water-holding dynamics in different forest stand types in Danxia Mountain

林分类型代码	持水量与浸水时间		吸水速率与浸水时间	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
Ⅰ	$W_i=48.044\ln(t)+1\,018.5$	0.935 9	$V_i=1\,013.20\,t^{-0.955}$	0.999 5
Ⅱ	$W_i=58.893\ln(t)+2\,426.4$	0.969 5	$V_i=2\,426.81\,t^{-0.977}$	0.999 9
Ⅲ	$W_i=63.292\ln(t)+1\,085.0$	0.963 8	$V_i=1\,083.64\,t^{-0.945}$	0.999 7
Ⅳ	$W_i=91.518\ln(t)+1\,110.2$	0.970 4	$V_i=1\,093.75\,t^{-0.918}$	0.998 5
Ⅴ	$W_i=79.949\ln(t)+1\,822.7$	0.966 0	$V_i=1\,830.58\,t^{-0.961}$	0.999 8

2.3　不同林分类型土壤物理性质及持水量

2.3.1　不同林分类型土壤容重及其孔隙度

由图3可知,5种林分类型土壤容重介于1.22～1.49 g/cm^{3}之间,其大小排序为:木荷林＞乌冈栎林＞新木姜子林＞马尾松林＞黄樟林,存在显著差异。其中,木荷林土壤容重显著大于新木姜子林、马尾松林和黄樟林,分别是其1.10倍、1.18倍和1.22倍;乌冈栎林土壤容重显著大于马尾松林和黄樟林,分别是其1.13倍和1.17倍;新木姜子林土壤容重是黄樟林的1.11倍,差异显著。其余林分之间土壤容重均无显著差异。土壤孔隙度范围为43.89%～53.82%,其大小排序为:黄樟林＞马尾松林＞新木姜子林＞乌冈栎林＞木荷林,存在显著差异。其中,黄樟林土壤孔隙度显著大于除马尾松林之外的其余林分;马尾松林土壤孔隙度显著大于乌冈栎林和木荷林;新木姜子林土壤孔隙度显著大于木荷林。其余林分之间土壤孔隙度均无显著差异。

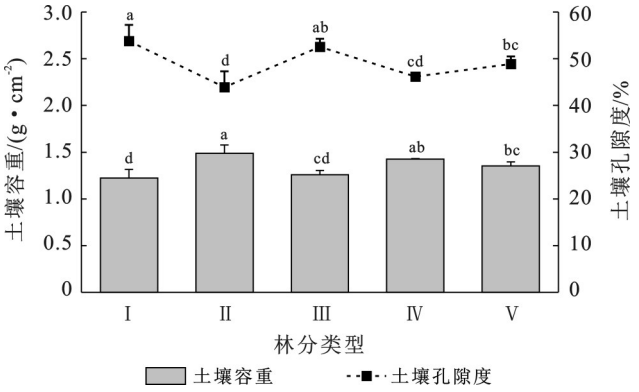

图3　丹霞山不同林分类型土壤容重与孔隙度

Fig.3　Soil bulk density and porosity of different forest stand types in Danxia Mountain

2.3.2　不同林分类型的土壤持水量

由图4可知,5种林分类型土壤饱和持水量为877.74～1 076.30 t/hm^2,其大小排序为:黄樟林＞马尾松林＞新木姜子林＞乌冈栎林＞木荷林,存在显著差异。其中,黄樟林土壤饱和持水量显著大于新木姜子林、乌冈栎林和木荷林,分别是其1.10倍、1.17倍和1.23倍;马尾松林土壤饱和持水量显著大于乌冈栎林和木荷林,分别是其1.14倍和1.20倍;新木姜子林土壤饱和持水量是木荷林的1.11倍,差异显著。其余林分之间土壤饱和持水量均无显著差异。土壤最大持水量为591.27～849.80 t/hm^2,其大小排序为:黄樟林＞木荷林＞新木姜子林＞乌冈栎林＞马尾松林,存在显著差异。其中,黄樟林土壤最大持水量显著大于其余林分,分别是木荷林、新木姜子林、乌冈栎林和马尾松林的1.22倍、1.25倍、1.32倍和1.44倍。其余林分之间土壤最大持水量均无显著差异。

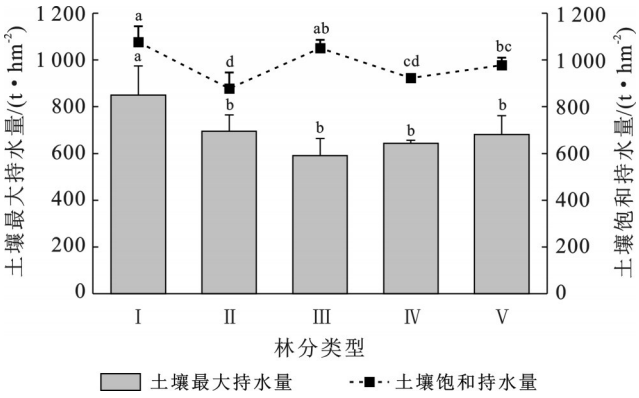

图4　丹霞山不同林分类型土壤最大持水量与饱和持水量

Fig.4　Maximum and saturated water-holding capacity of different forest stand types in Danxia Mountain

3　讨　论

3.1　不同林分类型枯落物的持水能力

枯落物持水性能是森林水文效应的关键,它不仅直接截留部分降水,更能通过减缓径流、抑制蒸发、增加入渗,起到涵养水源、保持水土和改良土壤的核心作用[3]。枯落物储量是森林水源涵养功能的重要指标,易受多种因素(如植被特性、环境条件、地形地貌、时间动态及人为活动与管理等)的影响。不同林分类型枯落物产量和分解速率不同,林分密度高,郁闭度大的群落,能产生更多的凋落物,同时也可能形成有利于保留枯落物的环境[19]。本研究中,5种林分类型枯落物储量表现为木荷林最大,新木姜子林次之,其余林分均显著小于上述2种林分。林龄可能是影响这几种森林枯落物储量的一个因素。本研究区林龄均在100 a以上且木荷林最高,因此有利于枯落物的积累[20],再加上木荷林属于常绿阔叶大乔木,叶片为厚革质,其凋落物分解速率相对缓慢,因此拥有较高的凋落物储量[21]。通常情况下,阔叶林的枯落物量会高于针叶林[22],这与本研究中木荷林和新木姜子林枯落物储量显著大于马尾松林的结果相符。但乌冈栎林和黄樟林枯落物储量未与马尾松林产生显著差异或因针叶林枯落物富含油脂不易分解[23],还可能有较难分解的物质如单宁、酚类物质和萜类等存在[24];马尾松林密度最大,致使枯落物输入量更大[25]。因此,本研究推测,当森林密度差异较小时,木荷林枯落物储量最大,马尾松林最小,这与阔叶林枯落物储量大于针叶林的结论相契合。

本研究中,5种林分类型枯落物最大持水率表现为黄樟林最大,乌冈栎林次之,其余林分之间无显著

差异。自然含水率所有林分类型之间均无显著差异,因此最大拦蓄率和有效拦蓄率变化规律同最大持水率,均呈现出:黄樟林>乌冈栎林>马尾松林>木荷林>新木姜子林的趋势。最大持水量变化规律与储量一致,均为木荷林最大,新木姜子林次之,其余林分之间无显著差异。本研究发现,枯落物最大持水率与最大持水量变化规律存在显著差异。这意味着枯落物持水能力的影响因素有很多,例如枯落物储量、干燥程度、分解程度、组分和结构等[11]。但最大持水率(量)仅表示枯落物的潜在持水能力,未体现其对降水的真实截留能力,故而在实践中,通常采用有效拦蓄量表征其在自然状态下的降水拦蓄特性[26]。最大拦蓄量和有效拦蓄量均呈现出:木荷林>新木姜子林>乌冈栎林>黄樟林>马尾松林的趋势,木荷林最大拦蓄量和有效拦蓄量近乎达到马尾松林的2倍。研究结果与"阔叶林枯落物拦蓄量大于针叶林"这一结论相契合[27]。最大拦蓄量和有效拦蓄量的变化规律与最大持水率等存在差异,但与枯落物储量的变化规律基本相符,表明枯落物储量对拦蓄量的影响更大[28]。

枯落物持水动态研究方法包括室内浸泡法和人工模拟降雨法,多数研究采用室内浸泡法[6]。因室内浸泡法操作简单,数据误差小,故采用该方法模拟枯落物对降水的吸收过程。试验结果表明,枯落物持水动态规律一致,符合对数函数关系。R^2>0.93,呈强相关性。吸水速率与浸泡时间之间变化符合幂函数关系,R^2>0.99,呈强相关性。这与多数学者[24-28]的研究结果一致。枯落物在0—2 h内持水量迅速增大。其中,在0.25 h时吸水速率最大,之后急剧减小。在2—8 h,随着浸泡时间增加,持水量增大十分缓慢,12 h基本饱和,12—24 h无明显变化。其吸水速率在初期较大后急剧下降的原因是枯落物在浸泡前处于干燥状态,与浸泡水之间存在较大水势差。因此吸水速率较高,随着浸泡时间延长,压力差逐渐减小,吸水速率趋于零,此时枯落物含水量基本达到饱和状态。

3.2 不同林分类型的土壤水文特性

土壤水文特性是森林水文性能的关键参数。土壤作为水分贮存的重要场所,其水源涵养能力与土壤类型、质地、孔隙度、生物及环境因子等因素相关[3],主要通过其物理性质和持水力特征表现。枯落物可通过微生物分解成腐殖质,提高土壤养分含量,改善土壤结构,进而提高森林生态系统水源涵养能力[27]。本研究中,土壤容重介于1.22~1.49 g/cm^{3}之间,土壤孔隙度范围为43.89%~53.82%。其中,木荷林土壤容重最大,土壤孔隙度最小。黄樟林与之相反。这表明木荷林土壤紧实,土壤理论持水能力较弱,黄樟林土壤疏松,土壤理论持水能力较强。土壤饱和持水量与孔隙度正相关,黄樟林土壤孔隙度最大,故饱和持水量最大,而木荷林与之相反。然而,土壤最大持水量与饱和持水量变化规律不完全一致。结果显示,黄樟林土壤最大持水量显著大于其余林分,其余林分之间无显著差异。此外,虽然木荷林饱和持水量最小,但其最大持水量仅小于黄樟林;马尾松林饱和持水量较大,但其最大持水量最小。这可能是因为马尾松林下土壤储水的毛管孔隙相对较少,供降水快速入渗土壤的非毛管孔隙相对较多。秦佳双等[29]研究发现,林龄增长至过熟林时,马尾松林毛管孔隙度减小,非毛管孔隙度增大,土壤持水性减弱但透水性增强。本研究中马尾松林的林龄为120 a,适用此结论。温林生等[30]研究发现,在江西退化红壤区木荷林土壤的最大吸持贮水量高于马尾松林。马尾松林作为针叶林,其凋落物含有较多不易分解的树脂和蜡质,分解速度慢,对土壤结构的改良作用相对较弱,可能导致土壤非毛管孔隙相对较多。综合比较发现,黄樟林下土壤能吸纳并有效保存大量降水,同时维持良好的通气性,水文特性最为优越。

4 结 论

(1)丹霞山5种林分类型枯落物层中以木荷林的储量最大,黄樟林最小;最大持水率、最大拦蓄率和有效拦蓄率为黄樟林最大,新木姜子林最小;最大持水量为木荷林最大,黄樟林最小;最大拦蓄量和有效拦蓄量为木荷林最大,马尾松林最小。本研究中,5种林分类型枯落物持水能力表现为木荷林最强,马尾松林最弱。

(2)各林分类型枯落物层持水量与浸泡时间变化趋势一致,均呈正相关,符合对数函数关系(R^2>0.93),持水速率与浸泡时间之间均呈负相关,符合幂函数关系(R^2>0.99)。整个浸泡周期,持水量与吸水速率均为木荷林最大,新木姜子林次之,其余林分之间无显著差异。

(3)丹霞山5种林分类型中,枯落物储量、最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量均为木荷林最大,并且其土壤最大持水量仅小于黄樟林。基于对枯落物层与土壤层持水性能的综合评估,木荷林表现最优。因此,该区域在未来森林经营和水土保持过程中,可考虑适当提高木荷林的种植比例,增加枯落物储量和持水能力,最大限度地发挥林下枯落物和土壤的持水能力。

参考文献(References)

[1] 吴石磊,马程耀.全球森林生态系统面临多重挑战[J].生态经济,2024,40(11):1-4.
Wu Shilei, Ma Chengyao. The global forest ecosystem faces multiple challenges [J]. Ecological Economy, 2024,40(11):1-4.

[2] Lei Jie, Du Hailun, Duan Aiguo, et al. Effect of stand density and soil layer on soil nutrients of a 37-year-old *Cunninghamia lanceolata* plantation in Naxi, Sichuan Province, China [J]. Sustainability, 2019,11(19):5410.

[3] 曹云,欧阳志云,郑华,等.森林生态系统的水文调节功能及生态学机制研究进展[J].生态环境,2006,15(6):1360-1365.
Cao Yun, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, et al. Hydrological adjusting function of forest ecosystems and ecological mechanism: A review [J]. Ecology and Environment, 2006,15(6):1360-1365.

[4] 伊怀虎,艾力夏提·库尔班,韦自强,等.不同结构落叶松人工林枯落物和土壤的持水特性[J].森林与环境学报,2023,43(5):481-490.
Yi Huaihu, Kuerban Ailixiati, Wei Ziqiang, et al. Litter and soil water-holding capacity of *Larix gmelinii* plantations with different plantation structures [J]. Journal of Forest and Environment, 2023,43(5):481-490.

[5] 王零,吕春燕,武天伟,等.祁连山中段不同密度青海云杉林枯落物及土壤水源涵养功能研究[J].中南林业科技大学学报,2025,45(6):126-135.
Wang Ling, Lyu Chunyan, Wu Tianwei, et al. Study on litter and soil water conservation function of *Picea crassifolia* forest with different stand densities in the middle part of Qilian Mountains [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(6): 126-135.

[6] 刘燕平,王根绪,胡兆永,等.西南山区典型森林枯落物储量及持水能力[J].应用生态学报,2022,33(8):2113-2120.
Liu Yanping, Wang Genxu, Hu Zhaoyong, et al. Litter storage and water-holding capacity of typical forests in mountainous area of southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(8):2113-2120.

[7] Ferraz S F B, de Paula Lima W, Rodrigues C B. Managing forest plantation landscapes for water conservation [J]. Forest Ecology and Management, 2013,301:58-66.

[8] 邓涵潇,孙涵宇,杨艳芬,等.不同刺槐混交人工林中枯落物混入对表层土壤水分的影响[J].水土保持通报,2025,45(2):54-63.
Deng Hanxiao, Sun Hanyu, Yang Yanfen, et al. Impact of litter incorporation on surface soil moisture in different mixed *Robinia pseudoacacia* plantations [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(2):54-63.

[9] 杨寒月,张光辉,张宝军.黄土丘陵区沟坡典型植物群落枯落物蓄积量及其持水性能[J].中国水土保持科学,2019,17(3):83-90.
Yang Hanyue, Zhang Guanghui, Zhang Baojun. Litter and its water-holding properties of typical plant communities distributed on gully steep slopes in the loess hilly-gully region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019,17(3):83-90.

[10] 潘春翔,李裕元,彭亿,等.湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能[J].生态学报,2012,32(2):538-547.
Pan Chunxiang, Li Yuyuan, Peng Yi, et al. Soil water holding capacity under four typical ecosystems in Wuyunjie nature reserve of Hunan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(2):538-547.

[11] 张静,贾洪文,李远航,等.青海大通县典型林分的枯落物和土壤蓄水能力评价[J].中国水土保持科学,2022,20(2):106-114.
Zhang Jing, Jia Hongwen, Li Yuanhang, et al. Evaluation of litter and soil water-holding capacity of typical stand in Datong, Qinghai [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(2):106-114.

[12] 孟广涛,文毅,柴勇,等.高黎贡山南段4种典型植被类型枯落物层持水性能研究[J].西部林业科学,2012,41(3):8-13.
Meng Guangtao, Wen Yi, Chai Yong, et al. Study on water holding capacity of litter of four typical vegetation types in south section of Gaoligongshan Mountain [J]. Journal of West China Forestry Science, 2012,41(3):8-13.

[13] Burrows C R, Appold M S. Hydrology of the Forest City basin, Mid-Continent, USA: Implications for CO_2 sequestration in the St. Peter Sandstone [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(4):1409-1425.

[14] 张甜,李瑞蓉,畅元生.临猗县不同林龄苹果林地枯落物及土壤水源涵养功能研究[J].森林工程,2024,40(6):30-40.
Zhang Tian, Li Ruirong, Chang Yuansheng. Study on water conservation function of litter and soil in apple tree plantation of different stand ages of Linyi [J]. Forest Engineering, 2024,40(6):30-40.

[15] Wu Xi, Shi Wenjiao, Guo Bin, et al. Large spatial variations in the distributions of and factors affecting forest water retention capacity in China [J]. Ecological Indicators, 2020,113:106152.

[16] 刘忠玲,刘建明,吕跃东.倭肯河上游两种林型枯落物和土壤持水特性[J].水土保持研究,2021,28(2):235-241.
Liu Zhongling, Liu Jianming, Lü Yuedong. Characteristics of litter and soil water-holding of two types forest stand in upstream of Woken River [J]. Research of Soil

and Water Conservation, 2021,28(2):235-241.

[17] Lin Sha, He Kangning, Wang Zuoxiao, et al. Multifactor relationships between the forest structure and water conservation function of *Picea crassifolia* Kom. plantations in Qinghai Province, China [J]. Land Degradation & Development, 2022,33(14):2596-2605.

[18] 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.
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.

[19] 张缓,穆兴民,高鹏.黄土高原不同立地条件下枯落物蓄积量及持水特征[J].水土保持研究,2021,28(3):45-52.
Zhang Huan, Mu Xingmin, Gao Peng. Variation of litter accumulation and water holding capacity at different site conditions in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(3):45-52.

[20] 马书国,杨玉盛,谢锦升,等.亚热带6种老龄天然林及杉木人工林的枯落物持水性能[J].亚热带资源与环境学报,2010,5(2):31-38.
Ma Shuguo, Yang Yusheng, Xie Jinsheng, et al. The water retention characteristic of litter in six old growth natural forests compared with a *Cunninghamia lanceolata* plantation in subtropical zone [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2010,5(2):31-38.

[21] 俞益武,吴家森.木荷林凋落物的归还动态及分解特性[J].水土保持学报,2004,18(2):63-65.
Yu Yiwu, Wu Jiasen. Dynamics and decomposition characteristics of litter of evergreen broad-leaved forest with *Schima superba* [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004,18(2):63-65.

[22] 杨玉盛,林鹏,郭剑芬,等.格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解[J].生态学报,2003,23(7):1278-1289.
Yang Yusheng, Lin Peng, Guo Jianfen, et al. Litter production, nutrient return and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,23(7):1278-1289.

[23] 王亚萍,刘庆安,庞军柱,等.秦岭南坡不同林分类型枯落物层和土壤层水文功能综合评价[J].西北林学院学报,2024,39(3):50-58.
Wang Yaping, Liu Qing'an, Pang Junzhu, et al. Comprehensive evaluation of hydrological function of litter and soil layers in different stand types in the south slope of the Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024,39(3):50-58.

[24] 石媛,鲁绍伟,陈波,等.河北雾灵山不同密度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2014,28(3):92-97.
Shi Yuan, Lu Shaowei, Chen Bo, et al. Soil hydrological effects and forest litters of *Pinus tabulaeformis* plantation under different densities in Wuling Mountain of Hebei [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(3):92-97.

[25] 王兴怡,赵锦梅,付殿霞,等.连城自然保护区典型植被类型枯落物和土壤水源涵养功能评价[J].林业科学研究,2025,38(4):94-102.
Wang Xingyi, Zhao Jinmei, Fu Dianxia, et al. Evaluation of litter and soil water conservation function of typical vegetation types in Liancheng nature reserve [J]. Forest Research, 2025,38(4):94-102.

[26] 张月,马岚,何娇,等.晋西黄土区典型林分枯落物持水特性[J].应用生态学报,2023,34(12):3177-3183.
Zhang Yue, Ma Lan, He Jiao, et al. Water holding characteristics of litters of typical forest in loess area of Western Shanxi Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(12):3177-3183.

[27] 郑淼.华北土石山区不同林分类型枯落物及土壤水文生态效应[J].中国水土保持科学,2020,18(2):84-91.
Zheng Miao. Litter and soil hydro-ecological effects of different stand types in the rocky mountain area of north China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(2):84-91.

[28] 邹奕巧,孙欧文,刘海英,等.浙江省天台县不同森林类型枯落物及土壤水文特性[J].水土保持通报,2020,40(3):170-174.
Zou Yiqiao, Sun Ouwen, Liu Haiying, et al. Hydrological characteristics of litters and soils of different forest types in Tiantai County of Zhejiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 170-174.

[29] 秦佳双,李明金,宋尊荣,等.不同年龄阶段马尾松人工林土壤水分-物理性质[J].广西科学,2019,26(2):245-251.
Qin Jiashuang, Li Mingjin, Song Zunrong, et al. Soil water-physical properties of *Pinus massoniana* plantation at different ages [J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(2):245-251.

[30] 温林生,邓文平,彭云,等.江西退化红壤区3种森林恢复模式的枯落物和土壤表层水文功能研究[J].水土保持学报,2020,34(4):158-163.
Wen Linsheng, Deng Wenping, Peng Yun, et al. The hydrological functions of litter and soil surface of three forest restoration modes in degraded red soil area of Jiangxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(4):158-163.