安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 706-716
Journal of Anhui Agricultural University [DOI] 10.13610/j.cnki.1672-352x.20260915.007

马玉华，唐 傲，朱浩天，等. 不同林龄麻栎人工林凋落物和土壤水源涵养能力研究[J]. 安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 706-716.
Ma Yuhua, Tang Ao, Zhu Haotian, et al. Study on the water conservation capacity of litter and soil in *Quercus acutissima* plantations under different stand ages[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2026, 53(4): 706-716.

不同林龄麻栎人工林凋落物和土壤水源涵养能力研究

马玉华[1]，唐 傲[2]，朱浩天[1]，童伟杰[2]，盛 晗[3]，冯 春[4]，吴 震[5]，李 旭[3*]
(1. 滁州学院现代农业与食品工程学院，滁州，239000；2. 滁州学院智能建造与水利工程学院，安徽 滁州，239000；3. 中国科学院华南植物园广东省应用植物学重点实验室，广东 广州 510650；4. 安徽农业大学林学与园林学院，安徽 合肥，230036；5. 滁州学院地理工程与空天信息学院，安徽 滁州 239000)

摘 要：【目的】探讨不同林龄麻栎人工林凋落物层和土壤层水源涵养能力，旨在为亚热带地区森林水文水资源管理与利用及麻栎人工林的经营管理提供参考。【方法】以安徽省滁州市皇甫山国有林场 4 年、10 年、25 年、45 年和 50 年林龄的麻栎人工林为研究对象，采用野外调查法和室内浸泡法，对不同林龄麻栎人工林凋落物和土壤水源涵养能力进行测定和评价。【结果】1）不同林龄麻栎人工林凋落物持水量均随浸水时间增长呈阶段性增加，并在 24 h 达到饱和；而凋落物的吸水速率均随浸水时间增长而降低（0.5 h 内达峰值，24 h 后趋近动态平衡）。2）5 个林龄麻栎人工林凋落物储量介于 1.14～3.92 t·hm^{-2}，最大持水量和有效拦蓄量分别介于 4.57～15.72 t·hm^{-2} 和 3.83～13.06 t·hm^{-2}；50 年麻栎人工林凋落物的最大持水量和有效拦蓄量显著高于其他林龄（除 25 年林龄外），而不同林龄凋落物的最大持水率和有效拦蓄率无显著差异。3）不同林龄土壤平均毛管持水率排序为 25 年＞4 年＞10 年＞45 年＞50 年，土壤平均最小持水率排序为 45 年＞25 年＞4 年＞10 年＞50 年。4）采用熵权法对不同林龄麻栎人工林水源涵养能力进行综合评价，发现 50 年麻栎人工林水源涵养能力最优。【结论】林龄会影响凋落物层和土壤层的结构，进而影响麻栎林水源涵养能力，50 年林龄的麻栎人工林综合水源涵养能力最优。因此，在亚热带地区开展以水源涵养为主要目标的人工林经营时，应重视和保护中龄林至成熟林；对于幼龄林，可考虑通过合理抚育（如间伐）改善林分结构，促进凋落物累积和土壤改良，以更快提升其水文生态效益。

关键词：林龄；麻栎人工林；凋落物；土壤；水源涵养能力
中图分类号：S714 **文献标志码：**A **文章编号：**1672−352X (2026)04−0706−11

Study on the water conservation capacity of litter and soil in *Quercus acutissima* plantations under different stand ages

Ma Yuhua[1], Tang Ao[2], Zhu Haotian[1], Tong Weijie[2], Sheng Han[3], Feng Chun[4], Wu Zhen[5], Li Xu[3]
(1. School of Modern Agriculture and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China; 2. School of Intelligent Construction and Hydraulic Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China; 3.Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 4. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 5. School of Geographic Engineering and Spatial Information, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: [**Objective**] This study examined the water conservation capacity of litter layers and soil layers in *Quercus acutissima* plantations of different ages, aiming to provide references for forest hydrology management and water resource utilization in subtropical regions, as well as for the management of *Q. acutissima* plantations. [**Method**] *Q. acutissima* plantations of different stand ages (4-, 10-, 25-, 45-, and 50-year-old stands) in Huangfushan State-owned Forest Farm were selected as the research objects. Field investigation and indoor soaking methods were used to measure the water conservation capacities of the litter and soil in *Q. acutissima* plantations of

收稿日期：2025-11-13；**录用日期：**2026-03-23；**网络出版日期：**2026-09-16
基金项目：安徽省高校自然科学研究重点项目（KJ2024AH051402）；国家自然科学基金项目（42307055）；安徽省林木资源培育重点实验室开放基金课题（LMZYPY-06）
共同第一作者：马玉华，博士，讲师，E-mail：myh@chzu.edu.cn；唐傲，本科生，E-mail：852586902@qq.com
* **通信作者：**李 旭，博士，E-mail：lixu@scbg.ac.cn

different stand ages. [**Result**] 1) The water-holding capacity of litter from *Q. acutissima* plantations of different ages increased in stages with increasing immersion time, reaching saturation after 24 hours. Meanwhile, the water uptake rate of litter decreased with prolonged immersion (peaking within 0.5 hours and approaching dynamic equilibrium after 24 hours). 2) Litter stock in 4- to 50-year-old *Q. acutissima* plantations ranged from 1.14 to 3.92 $t \cdot hm^{-2}$, with maximum water-holding capacity and effective retention capacity ranging from 4.57 to 15.72 $t \cdot hm^{-2}$ and 3.83 to 13.06 $t \cdot hm^{-2}$ respectively. The maximum water-holding capacity and effective retention capacity of litter from 50-year-old *Q. acutissima* plantations were significantly higher than those of other age classes (except the 25-year-old stand), while no significant differences were observed in maximum water-holding rate or effective retention rate across age classes. 3) The average capillary water retention capacity of soils across different forest ages was ranked as follows: 25 years > 4 years > 10 years > 45 years > 50 years. The average minimum water retention capacity was ranked: 45 years > 25 years > 4 years > 10 years > 50 years. 4) Comprehensive evaluation of water conservation capacity in *Q. acutissima* plantations of different ages using the entropy weight method revealed that 50-year-old stands exhibited the highest water conservation capacity. In summary, forest age influences the structure of the litter layer and soil profile, thereby affecting the water conservation capacity of *Q. acutissima* plantations, while 50-year-old stands exhibit optimal comprehensive water conservation capacity. [**Conclusion**] When managing plantations in subtropical regions primarily for water conservation, emphasis should be placed on protecting and nurturing middle-aged to mature plantations. For young plantations, reasonable tending methods (such as thinning) can be considered to improve stand structure, promote litter accumulation, and enhance soil quality, thereby accelerating the development of their hydrological and ecological benefits.

Keywords: forest age; *Quercus acutissima* plantation; litter; soil; water conservation capacity

森林作为陆地生态系统的核心组成部分，具有涵养水源、净化水质、调控径流、防止土壤水蚀和调节气候等多种生态服务功能[1]。水源涵养是指在一定时间和空间内，生态系统保留水分的能力[2-3]。森林主要通过林冠层、凋落物层和土壤层的协同作用，促进对水资源的涵养[3-4]。其中，凋落物层和土壤层在水源涵养和水土保持中发挥着重要作用，二者的蓄水量在森林总蓄水量中占比高达 85%[5]。凋落物层是森林水文效应的第二作用层[6]，一方面能够有效缓冲雨滴动能，增强雨水入渗能力，并降低土壤水分蒸发[7-8]；另一方面，凋落物具有拦蓄与持水功能，凭借自身独特的结构特性，能够吸纳超过自身质量 2～5 倍的水分，同时可拦截超过 60%的地表径流量[4,9]。土壤层是森林水文效应的第三作用层[6]，森林土壤结构疏松、孔隙度高，使其具有良好的入渗能力，而土壤的持水能力能切实反映其在水源涵养方面的潜力[10-11]。因此，凋落物层和土壤层水文效应的研究对评估森林水源涵养能力具有重要意义。

影响凋落物和土壤水源涵养能力的因素有很多，如林分组成、林分密度、林龄和环境条件等[12-13]。模拟凋落物和土壤水文效应最重要的变量之一是持水能力[14]。一般来说，林龄不同会影响其凋落物和土壤的持水能力[15]。例如，有研究发现华北落叶松（*Larix principis-rupprechtii*）中龄林人工林凋落物持水能力比成熟林强[16]，林龄为 30 年的苹果（*Malus pumila*）林地土壤持水能力比 4 年的强[13]。但不同林龄的树种水源涵养能力仍然存在明显差异。因林龄不同，林地下方的凋落物在数量、结构层面以及土壤结构方面均呈现出差异[17-19]。然而，目前对于林龄引发的这些变化与凋落物、土壤持水能力之间究竟存在怎样的内在联系，尚缺乏清晰的认知。

自 1990 年以来，天然林和半天然林面积持续减少，而人工林面积增加了 1.23 亿 hm^2，其中我国人工林面积为 6 933 万 hm^2，居世界首位[20-21]。相较于干旱和半干旱区域，降水较为充足的亚热带地区人工林面积增加对当地水资源的影响尚缺乏充分研究。麻栎（*Quercus acutissima*）属于壳斗科（Fagaceae）栎属（*Quercus*）落叶乔木，具有突出的耐旱、耐贫瘠特性，适应性极为广泛，使其在多种环境条件下均能良好生长，因而成为植树造林的理想树种，被广泛应用于国土绿化和生态修复工程[22-23]。目前，多数研究主要聚焦于不同树种间凋落物和土壤水源涵养能力的比较[24]，而针对不同林龄麻栎人工林凋落物层与土壤层水源涵养功能的研究相对匮乏，导致难以精准评估特定区域内麻栎人工林的实际水源涵养能力，进而制约了有效水土保持措施的制定。本研究旨在阐明以下科学问题：（1）不同林龄的麻栎人工林，其凋落物层与土壤层在水源涵养能力上存在何种差异？（2）能否基于凋落物和土壤的结构特征量化其持水能力？研究结果有助于优化亚热带地区森林水文与水资源的管理模式，提高其利用效

率，同时为麻栎人工林的经营提供坚实的科学依据。

1 研究地区与方法

1.1 研究区概况

研究区位于安徽省滁州市皇甫山国有林场（117°58′～118°03′E，32°17′～32°25′N），地处江淮丘陵区，属亚热带季风气候，气候温和，四季分明，日照充足；无霜期 220 d；年均降水量 1 018.6 mm，年均气温 14.3 ℃。研究区土壤类型主要为黄棕壤（包括普通黄棕壤和侵蚀黄棕壤两大类），土壤厚度 0.3～1 m，呈酸性[25]。研究区在 2016 年国有林场改革后启动了封山育林和混交林建设，并于 2020 年实施了退化林修复、间伐抚育等生态措施。

研究区森林类型多为亚热带常绿阔叶混交林、针叶林和竹林等。该研究区主要树种有马尾松（*Pinus massoniana*）、麻栎（*Quercus acutissima*）、油桐（*Vernicia fordii*）、黄檀（*Dalbergia hupeana*）、朴树（*Celtis sinensis*）、榉树（*Zelkova serrata*）等。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of the plots

林龄/a	经度	纬度	海拔/m	坡向	坡度/（°）	林分密度（plant·hm^{-2}）	平均胸径/cm	平均树高/m
4	118°00′00″E	32°24′00″N	130	南	10	4 600.00±427.20^{a}	4.33±0.11^{e}	5.67±2.89^{d}
10	118°01′12″E	32°19′48″N	139	南	12	2 683.33±224.07^{b}	7.73±0.23^{d}	8.52±0.33^{c}
25	117°59′24″E	32°21′36″N	166	南	13	2 591.67±366.00^{b}	12.62±0.34^{c}	8.92±0.07^{bc}
45	118°00′36″E	32°19′12″N	153	南	12	1 558.33±326.28^{c}	17.54±0.78^{b}	11.32±0.46^{ab}
50	117°59′24″E	32°18′00″N	169	南	11	1 158.33±52.04^{c}	19.44±1.26^{a}	12.44±0.45^{a}

注：同列不同小写字母表示不同林龄间存在显著差异（$P < 0.05$）。

1.2 样地设置

根据早期林业部门记载和前期多次样地踏查，选择海拔、坡向、立地条件、起源等一致而林龄不同的麻栎人工林分作为研究对象，尽可能保证林龄为唯一变量[25]。2024 年 9 月（植物生长期），在研究区内选取林龄为 4、10、25、45 和 50 年的典型麻栎人工林作为研究对象（表 1）。在每个林龄阶段的麻栎人工林中随机设置 3 个 20 m × 20 m 的样方，各样方之间间隔 50 m 以上，共设置 15 个样方，并对样地基本情况进行了测定[25-26]。

1.3 凋落物样品采集与指标测定

在每个林龄阶段的麻栎人工林样方（20 m × 20 m）内随机设置 3 个 1 m × 1 m 的凋落物小样方，各小样方间距大于 5 m。采集 3 个小样方内的全部凋落物，共计 45 包（5 个林龄 × 3 个样地重复 × 3 个小样方重复=45 包凋落物样品），将凋落物样品带回实验室[26-27]。首先称其自然状态质量（M_{fr}），然后置于 65 ℃烘箱中烘干至恒重，测定烘干质量（M_0），由此可以得到凋落物现存量和自然含水率。本研究采用单次采样法测定不同林龄麻栎人工林凋落物储量，该方法已在多项同类研究中得到验证与应用[4,8]。采用室内浸泡法[28-29]，将烘干后的凋落物按每袋 10 g 装入尼龙网袋，共制备 45 袋样品，所有样品均采集自各样方内随机设置的 3 个凋落物小样方。随后将尼龙网袋分别在水中浸泡 0.5、1、2、4、8、12、24 h 后取出，悬置至不滴水时称量，据此计算最大持水量、最大持水率、有效拦蓄量、有效拦蓄率、最大拦蓄量和最大拦蓄率。相关计算公式如下：

$$R_0 = \frac{M_{\mathrm{fr}} - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{\mathrm{hmax}} = \frac{M_{24} - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$W_{\mathrm{hmax}} = R_{\mathrm{hmax}} \times N \quad (3)$$

$$R_{\mathrm{rmax}} = R_{\mathrm{hmax}} - R_0 \quad (4)$$

$$W_{\mathrm{rmax}} = R_{\mathrm{rmax}} \times N \quad (5)$$

$$R_{\mathrm{sc}} = 0.85R_{\mathrm{hmax}} - R_0 \quad (6)$$

$$W_{\mathrm{sc}} = R_{\mathrm{sc}} \times N \quad (7)$$

$$R_{\mathrm{L}} = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (8)$$

$$V_{\mathrm{L}} = \frac{M_t - M_0}{M_0 \times t} \quad (9)$$

式（1）—（9）中：M_{24} 为凋落物浸泡 24 h 后的重量；R_0 为自然含水率（%）；R_{hmax} 为最大持水率（%）；R_{rmax} 为最大拦蓄率（%）；R_{sc} 为有效拦蓄率（%）；N 为凋落物储量（t·hm^{-2}）；W_{hmax} 为最大持水量（t·hm^{-2}）；W_{rmax} 为最大拦蓄量（t·hm^{-2}）；W_{sc} 为有效拦蓄量（t·hm^{-2}）；R_{L} 为吸水率（%）；M_t 为吸水 t （h）后的质量（g）；V_{L} 为吸水速率（g·g^{-1}·h^{-1}）；t 为吸水时间（h）。

1.4 土壤样品采集与指标测定

在每个林龄阶段的麻栎人工林样方（20 m × 20 m）内随机选取 3 个点，用容积为 100 cm^3 的环刀采集（0，10] cm、（10，20] cm、（20，30] cm 土层的土壤样品，每层采集 3 个环刀样品，共计 135 个（5

个林龄 ×3 个样地重复 ×3 个土层 ×3 个小样品重复 =135 个环刀样品）。依据（LY/T 1215—1999）森林土壤水分—物理性质的测定 [30]，采用烘干法和环刀法测定土壤水分物理性质，计算土壤容重、毛管持水率、最大持水率、最小持水率、非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度。相关计算公式如下：

$$Z=\frac{m_0}{V} \quad (10)$$

$$Y=\frac{m_2-m_0}{m_0}\times 100\% \quad (11)$$

$$Q_{\mathrm{a}}=\frac{m_{12}-m_0}{m_0}\times 100\% \quad (12)$$

$$Q_{\mathrm{b}}=\frac{m_{24}-m_0}{m_0}\times 100\% \quad (13)$$

$$P_{\mathrm{a}}=(Q_{\mathrm{a}}-Y)\times Z \quad (14)$$

$$P_{\mathrm{b}}=Y\times Z \quad (15)$$

$$P=P_{\mathrm{a}}+P_{\mathrm{b}} \quad (16)$$

式（10）—（16）中：m_0 为烘干质量（g）；m_2 为干沙放置 2 h 后土壤质量（g）；m_{12} 为土壤浸泡 12 h 后的质量（g）；m_{24} 为干沙放置 24 h 后土壤质量（g）；Z 为土壤容重（g·cm^{-3}）；V 为环刀体积（cm^3）；Y 为毛管持水率（%）；Q_{a} 为最大持水率（%）；Q_{b} 为最小持水率（%）；P_{a} 为非毛管孔隙度（%）；P_{b} 为毛管孔隙度（%）；P 为总孔隙度（%）。

1.5　凋落物和土壤水源涵养能力综合评价

为了评估 5 种林龄凋落物和土壤的水文效应及水源涵养能力，采用熵权法对各指标进行量化，计算公式如下：

$$X'_{ij}=\frac{X_{ij}-\min(X_j)}{\max(X_j)-\min(X_j)} \quad (17)$$

$$P_{ij}=\frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}X'_{ij}} \quad (18)$$

$$\mathrm{e}_j=\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n}P_{ij}\ln P_{ij} \quad (19)$$

$$\omega_j=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{m}(1-e_j)} \quad (20)$$

$$S=\sum_{j=1}^{m}\omega_j\cdot X'_{ij} \quad (21)$$

式（17）—（21）中：X_{ij} 为第 i 个样本的第 j 项指标值；X_{ij}'为标准化后的值；e_j 为第 j 项指标的信息熵；n 为样本数；ω_j 为第 j 项指标的权重；m 为指标总数；S 为综合评价值，P_{ij} 为第 i 个样本的第 j 项的贡献度。

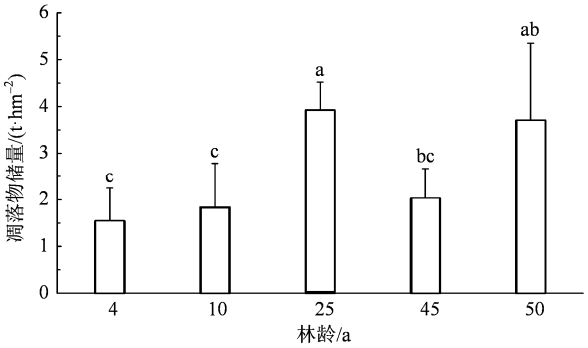
1.6　数据分析

本研究首先采用 Excel 2016 进行数据整理，随后通过 SPSS 20.0 进行统计分析和差异显著性检验，最后使用 Origin 2022 进行数据可视化。具体而言，采用单因素方差分析检验不同林龄（4 年、10 年、25 年、45 年和 50 年）麻栎人工林凋落物指标（凋落物储量、自然含水率、最大持水量、最大持水率、有效拦蓄量、有效拦蓄率、吸水速率等）和土壤指标（容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、毛管持水率、最大持水率和最小持水率等）的统计学差异（P＜0.05）。采用回归分析探究凋落物持水量与浸水时间、吸水速率与浸水时间的函数关系。采用主成分分析法（PCA）筛选水源涵养核心评价指标，结合熵权法量化各指标权重并计算综合评价值，同时通过变异系数法验证评价结果的稳健性。

2　结果与分析

2.1　不同林龄麻栎人工林凋落物层水源涵养能力

2.1.1　*不同林龄麻栎人工林凋落物储量*　通过对皇甫山国有林场不同林龄麻栎人工林的调查与分析发现，凋落物储量最大为 3.92 t·hm^{-2}，最小为 1.14 t·hm^{-2}，其凋落物储量排序为 25 年＞50 年＞45 年＞10 年＞4 年（图 1）。从统计结果来看，不同林龄麻栎林凋落物储量随林龄增加先显著上升，至 25 年达到最大，之后下降，到 50 年时再次回升。方差分析结果表明，不同林龄麻栎人工林凋落物储量差异显著（P＜0.05），其中 25 年生林分的凋落物储量显著大于 4 年、10 年和 45 年生林分（P＜0.05）。



不同小写字母表示不同林龄间存在显著差异（P＜0.05）。

图 1　不同林龄麻栎人工林凋落物储量

Figure 1　Present stock of litter in *Quercus acutissima* plantations of different stand ages

2.1.2　*不同林龄麻栎人工林持水量的动态变化*　由图 2 所示，所有不同林龄麻栎人工林凋落物的持水量随浸水时间的延长而增加。在 0～0.5 h 内，持水量迅速上升；在 0.5～4 h 时，持水量增速逐渐减缓；在 4～12 h 内，持水量增加明显减少；至 24 h 时，持水量达到最大值，基本处于饱和状态。不同林龄麻栎人工林凋落物的持水能力存在差异，其持水量

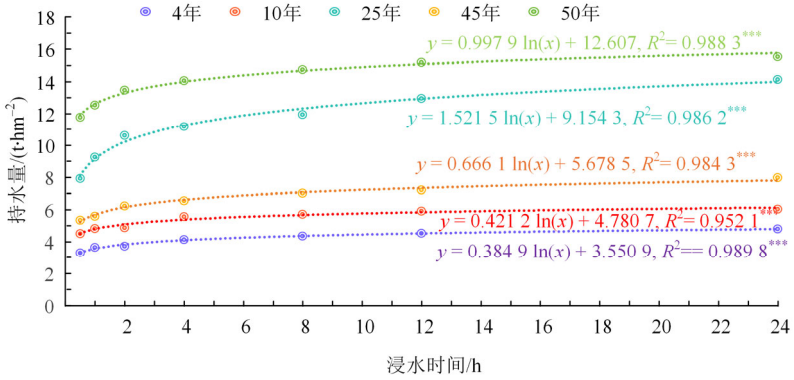
排序为 50 年＞25 年＞45 年＞10 年＞4 年林龄。

通过对 0.5～24 h 内凋落物持水量与浸泡时间的回归分析可知，二者呈显著的对数函数关系（图 2），且 R^2 均高于 0.9。表达式如下：

$$Y = a\ln X + b \quad (22)$$

式（22）中：Y 为凋落物的持水量（t·hm^{-2}）；X 为浸泡时间（h）；a 为系数；b 为常数。

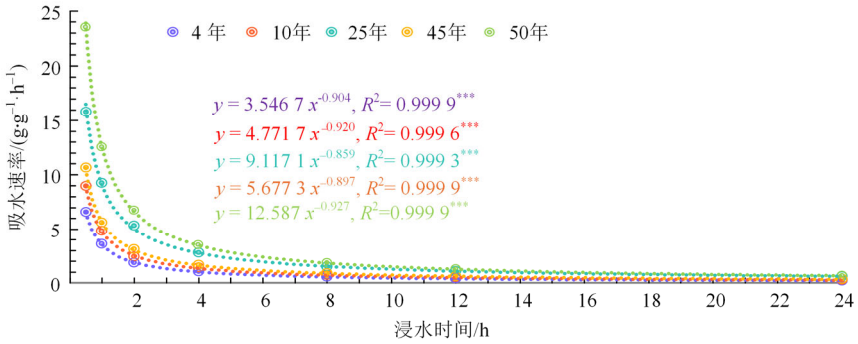
2.1.3 不同林龄麻栎人工林凋落物吸水速率的动态变化 如图 3 所示，所有不同林龄麻栎人工林的凋落物吸水速率随浸水时间的延长而减小。在最初的 0.5 h 内，凋落物的吸水速率最大；在 1～12 h 内，吸水速率逐渐减小；浸泡 24 h 后，吸水速率接近于 0，处于动态平衡状态。通过对比分析可知，不同林龄麻栎人工林凋落物的吸水速率存在差异，其排序为 50 年＞25 年＞45 年＞10 年＞4 年林龄。



***代表极其显著相关（P＜0.001）。

图 2 不同林龄凋落物持水量随浸水时间的变化

Figure 2 Variation of water-holding capacity of litter with forest age and immersion time



***代表极其显著相关（P＜0.001）。

图 3 不同林龄凋落物吸水速率随浸水时间的变化

Figure 3 Variation of the water absorption rate of litter from forests of different ages with immersion time

表 2 不同林龄麻栎人工林凋落物持水能力

Table 2 Water-holding capacity of litter in *Quercus acutissima* plantations of different stand ages

林龄/a	自然含水率/%	最大持水量/（t·hm^{-2}）	最大持水率/%	有效拦蓄量/（t·hm^{-2}）	有效拦蓄率/%
4	4.12±2.75^{a}	4.57±3.29^{c}	300.07±135.95^{a}	3.83±2.75^{c}	250.94±113.08^{a}
10	24.36±14.60^{a}	6.18±3.67^{c}	329.16±47.53^{a}	4.90±3.22^{bc}	255.43±46.35^{a}
25	20.07±22.17^{a}	13.75±0.98^{ab}	354.79±39.30^{a}	10.97±1.45^{ab}	281.50±15.83^{a}
45	9.39±2.23^{a}	7.85±3.46^{bc}	380.02±59.63^{a}	6.47±2.84^{bc}	313.62±48.70^{a}
50	8.71±1.67^{a}	15.72±6.80^{a}	429.43±38.49^{a}	13.06±5.68^{a}	356.31±31.66^{a}

注：表中数值为平均值±标准差，同列不同小写字母表示不同林龄间差异显著（P ＜ 0.05）。

通过对 0.5～24 h 内凋落物吸水速率与浸水时间的回归分析可知，二者呈显著的幂函数关系（图 3），且 R^2 均高于 0.99，表达式如下：

$$Q = at^{-b} \quad (23)$$

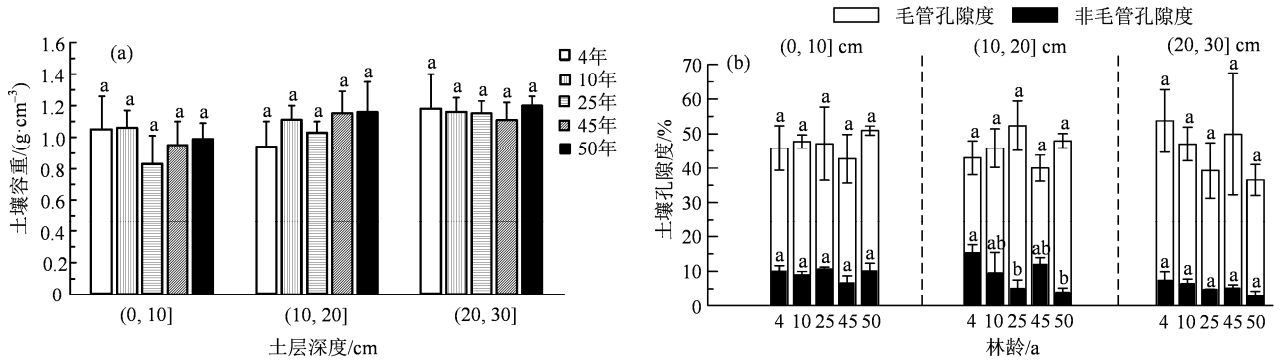
式（23）中：Q 为凋落物的吸水速率（g·g^{-1}·h^{-1}）；t 为浸泡时间（h）；a、b 为系数。

2.1.4 不同林龄麻栎人工林凋落物的持水能力 自然含水率是衡量凋落物层持水能力的基础指标，决定了其在自然状态下的吸附能力。不同林龄麻栎人工林凋落物自然含水率范围为 4.12%～24.36%，由

大到小依次为 10 年、25 年、45 年、50 年和 4 年林龄，不同林龄间自然含水率无显著差异（P＞0.05）。

最大持水量和最大持水率是衡量凋落物层水文生态功能的关键指标，决定了其实际蓄水能力。不同林龄麻栎人工林凋落物最大持水量范围为 4.57～15.72 t·hm^{-2}，由大到小依次为 50、25、45、10、4 年林龄，其中 50 年林龄的最大持水量显著大于其他林龄（P ＜ 0.05，表 2）。凋落物最大持水率范围为 300.07%～429.43%，由大到小依次为 50、45、25、10、4 年林龄，各林龄间最大持水率无显著差异（P ＞0.05）。

有效拦蓄量和有效拦蓄率是衡量凋落物实际水文调节能力的核心指标，决定了降水的最大截留能力。不同林龄麻栎人工林凋落物有效拦蓄量为 3.83～13.06 t·hm^{-2}，由大到小依次为 50、25、45、10、4 年林龄，其中 50 年林龄的有效拦蓄量显著大于其他林龄（P ＜ 0.05，表 2）。凋落物有效拦蓄率范围为 250.94%～356.31%，由大到小依次为 50、45、25、10、4 年林龄，各林龄间有效拦蓄率无显著差异（P ＞ 0.05）。



不同小写字母表示同一土层不同林龄之间存在显著差异（P＜0.05）。

图 4　不同林龄麻栎人工林土壤容重（a）、毛管孔隙度和非毛管孔隙度（b）随土层深度的变化

Figure 4　Changes in soil bulk density (a), capillary porosity, and non-capillary porosity (b) with soil depth in *Quercus acutissima* plantations of different stand ages

2.2　不同林龄麻栎人工林土壤层水源涵养能力

2.2.1　*不同林龄麻栎人工林土壤的物理性质*　不同林龄麻栎人工林土壤的容重变化范围为 0.83～1.20 g·cm^{-3}。其中，土壤容重随土层深度的增加而增大（图 4（a）），同一土层不同林龄间土壤容重无显著差异（P ＞ 0.05）。不同林龄土壤平均容重大小排序为 50 年＞10 年＞45 年＞4 年＞25 年。不同林龄麻栎人工林土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度随土层深度的变化规律不一致；除 25 年和 50 年外，其他林龄的土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度均随土层深度的增加先增大后减小（图 4（b））。各土层间毛管孔隙度差异不显著（P ＞ 0.05）；在（0，10] cm 和（20，30] cm 土层中，林龄间非毛管孔隙度差异不显著（P ＞ 0.05），而在（10，20] cm 土层中，4 年生与 25 年、50 年生土壤非毛管孔隙度差异显著（P ＜ 0.05）。在（10，20]cm 和（20，30] cm 土层，非毛管孔隙度在 4 年生时最大，分别为 15.37%和 7.41%，在 50 年生时最小，分别为 4.00%和 3.01%；在（0，10]cm 和（10，20] cm 土层，毛管孔隙度在 45 年生时最小，分别为 42.75%和 40.03%。

2.2.2　*不同林龄麻栎人工林土壤的持水能力*　由表 3 可知，相同林龄麻栎人工林土壤各土层间自然含水率差异不显著（P ＞ 0.05），但在（20，30] cm 土层中，4 年林龄的土壤平均自然含水率显著大于其他林龄（P ＜ 0.05）。除 4 年和 45 年林龄外，其他林龄土壤的毛管持水率和最大持水率均随土层深度增加而降低，且在同一土层下不同林龄间的毛管持水率和最大持水率无显著差异（P ＞ 0.05）。然而，在 25 年林龄土壤中，（0，10] cm 土层的最大持水率显著大于（20，30] cm 土层；在 50 年林龄土壤中，（0，10] cm 土层的毛管持水率和最大持水率均显著大于（20，30] cm 土层（P＜0.05）。不同林龄土壤平均毛管持水率排序为：25 年 ＞ 4 年 ＞ 10 年 ＞ 45 年 ＞ 50 年；平均最大持水率排序为：4 年 ＞ 25 年 ＞ 10 年 ＞ 45 年 ＞ 50 年。此外，除 10 年林龄外，其余林龄的最小持水率均随土层深度增加而降低；在（20，30] cm 土层，4 年林龄土壤的最小持水率显著大于 45 年和 50 年林龄（P ＜ 0.05）；10 年和 45 年林龄土壤在（0，10] cm 土层的最小持水率均显著大于其他土层（P ＜ 0.05）；不同林龄土壤平均最小持水率无显著差异（P ＞ 0.05）。不同林龄土壤平均最小持水率排序为：45 年＞ 25 年＞ 4 年＞ 10 年＞ 50 年。

表 3 不同林龄麻栎人工林土壤持水能力

Table 3 Soil water-holding capacity of *Q. acutissima* plantations with different stand ages

林龄/a	土层厚度/cm	自然含水率/%	毛管持水率/%	最大持水率/%	最小持水率/%
4	（0，10]	9.10±3.78^{Aa}	45.31±15.12^{Aa}	54.87±15.63^{Aa}	21.47±7.22^{Aa}
	（10，20]	8.29±2.26^{Aa}	45.88±1.06^{Aa}	63.23±6.68^{Aa}	20.13±2.78^{Aa}
	（20，30]	10.64±4.08^{Aa}	45.08±8.51^{Aa}	51.89±5.80^{Aa}	19.11±0.28^{Aa}
均值		9.34±1.19^{Aa}	45.43±0.41^{Aa}	56.67±5.88^{Aa}	20.24±1.18^{Aa}
10	（0，10]	3.67±1.28^{Ba}	45.41±6.23^{Aa}	54.10±8.52^{Aa}	29.39±8.81^{Aa}
	（10，20]	4.02±0.86^{ABa}	41.36±8.90^{Aa}	49.57±12.77^{Aa}	12.80±5.34^{Ab}
	（20，30]	3.22±2.46^{Ba}	40.46±4.62^{Aa}	46.19±4.31^{Aa}	15.52±4.19^{ABb}
均值		3.64±0.40^{Ba}	42.41±2.64^{Aa}	49.96±3.97^{Aa}	19.24±8.89^{Aab}
25	（0，10]	6.07±2.32^{ABa}	57.48±19.92^{Aa}	70.85±22.12^{Aa}	30.25±10.41^{Aa}
	（10，20]	4.34±2.56^{ABa}	51.53±14.95^{Aa}	56.36±12.28^{Aab}	18.89±3.92^{Aab}
	（20，30]	4.38±1.56^{Ba}	34.35±12.88^{Aa}	38.54±12.84^{Ab}	14.28±5.39^{ABb}
均值		4.93±0.99^{Ba}	47.78±12.01^{Aa}	55.25±16.18^{Aab}	21.14±8.22^{Aab}
45	（0，10]	4.24±0.52^{ABa}	46.53±19.60^{Aa}	53.68±18.40^{Aa}	35.35±3.63^{Aa}
	（10，20]	2.78±2.35^{Ba}	35.36±8.95^{Aa}	45.73±8.12^{Aa}	16.20±9.03^{Ab}
	（20，30]	3.86±0.59^{Ba}	43.98±24.27^{Aa}	48.70±25.29^{Aa}	12.71±2.66^{Bb}
均值		3.63±0.76^{Ba}	41.96±5.85^{Aa}	49.37±4.02^{Aa}	21.42±12.19^{Aab}
50	（0，10]	6.31±4.65^{ABa}	51.76±5.15^{Aa}	61.82±2.81^{Aa}	24.84±7.54^{Aa}
	（10，20]	4.52±4.26^{ABa}	41.98±5.65^{Aab}	45.72±7.83^{Aab}	13.96±5.91^{Aab}
	（20，30]	2.69±1.49^{Ba}	30.61±7.22^{Ab}	33.08±5.50^{Ab}	10.59±0.55^{Bb}
均值		4.51±1.81^{Ba}	41.45±10.59^{Aab}	46.87±14.41^{Aab}	16.46±7.45^{Aab}

注：表中数值为（平均值±标准差），不同大写字母表示同一土层不同林龄间差异显著，不同小写字母表示同一林龄不同土层间差异显著（$P < 0.05$）。

表 4 KMO 检验和 Bartlett 球形度检验

Table 4 KMO test and Bartlett's sphericity test

项目		数值
KMO 取样适切性量数		0.681
Bartlett 球形度检验	近似卡方	87.571
	自由度	10
	显著性	＜0.001

表 5 主成分特征值与方差贡献率

Table 5 Principal component eigenvalues and variance contribution rates

主成分	特征值	方差贡献率/%
成分 1	3.080	61.595
成分 2	1.085	21.692
成分 3	0.768	15.358
成分 4	0.065	1.295
成分 5	0.003	0.059

2.3 不同林龄麻栎人工林凋落物和土壤水源涵养能力评价

2.3.1 选取主要评价指标 由于分析指标较多，故采用主成分分析法（PCA）[31]。首先，对数据进行 Z-score 标准化；接着对标准化后的数据进行 KMO 检验和 Bartlett 球形度检验，如表 4 所示，KMO ＞ 0.6，$P < 0.05$，表明数据适合进行 PCA；最后计算相关系数矩阵，并通过特征值和方差贡献率筛选主成分。前两个主成分的特征值均大于 1，累计方差贡献率达 83.287%，因此选取这两个主成分。结果见表 5 和表 6。

表 6 水文指标主成分分析

Table 6 Principal component analysis of hydrological indicators

指标	成分 1	成分 2
蓄积量	0.990	−0.038
凋落物最大持水量	0.987	−0.011
凋落物有效拦蓄量	−0.135	0.865
毛管孔隙度	−0.434	−0.572
非毛管孔隙度	0.959	−0.086
特征值	3.080	1.085
贡献率	61.595	21.692

2.3.2 不同林龄评价指标数据 采用熵权法[5]构建多指标评价体系，定量评估不同林龄麻栎人工林的水源涵养能力。选取的 5 项核心指标，涵盖凋落物层和土壤层两个维度，其中凋落物层包括凋落物储量、最大持水量和有效拦蓄量，土壤层包括毛管孔隙度和非毛管孔隙度（见表 7）。

2.3.3 构造标准化矩阵和计算权重 通过将各指标原始数据转换为比重进行无量纲化处理，构建归一化

评价矩阵以消除量纲差异（表 8）。随后，基于信息熵理论，计算各指标在评价体系中的熵值和权重（表 9）。

2.3.4 计算综合评价值　将各核心指标标准值与指标权重值相乘，所得结果即为综合评价值，该值可反映凋落物和土壤的水源涵养能力。由表 10 可知，不同林龄麻栎人工林的水源涵养能力大小依次为：50 年＞25 年＞45 年＞10 年＞4 年。

表 7　5 种不同林龄评价核心指标

Table 7　Evaluation core indicators of five different forest ages

林龄/a	A1/（t·hm^{-2}）	A2/（t·hm^{-2}）	A3/（t·hm^{-2}）	A4/%	A5/%
4	1.14	4.57	3.83	47.53	10.96
10	1.83	6.18	4.90	46.89	8.38
25	3.92	13.75	10.99	46.26	6.90
45	2.02	7.85	6.47	44.23	8.01
50	3.70	15.72	13.06	45.17	5.72

注：A1 为凋落物储量；A2 为凋落物最大持水量；A3 为凋落物有效拦蓄量；A4 为土壤毛管孔隙度；A5 为土壤非毛管孔隙度。

表 8　各核心指标标准化矩阵

Table 8　Standardized matrix of each core indicator

林龄/a	A1	A2	A3	A4	A5
4	0.09	0.10	0.10	0.21	0.28
10	0.15	0.13	0.12	0.20	0.21
25	0.31	0.29	0.28	0.20	0.17
45	0.16	0.16	0.17	0.19	0.20
50	0.29	0.33	0.33	0.20	0.14

表 9　指标权重值

Table 9　Index weight values

指标	A1	A2	A3	A4	A5
权重	0.29	0.31	0.31	0.00	0.08

表 10　水源涵养综合评价值

Table 10　Comprehensive evaluation values of water conservation

林龄/a	A1	A2	A3	A4	A5	综合评价值
4	0.03	0.03	0.03	0.00	0.02	0.11
10	0.04	0.04	0.04	0.00	0.02	0.14
25	0.09	0.09	0.09	0.00	0.01	0.28
45	0.05	0.05	0.05	0.00	0.02	0.17
50	0.08	0.10	0.10	0.00	0.01	0.30

表 11　变异系数法综合得分与排名

Table 11　Comprehensive score and ranking of coefficient of variation method

林龄	综合得分	排名
4	0.15	5
10	0.23	4
25	0.77	2
45	0.31	3
50	0.83	1

2.3.5 评价结果可靠性验证　运用变异系数法[32]对综合评价值进行验证。由表 11 可知，该结果与熵权法所得结果一致，因此熵权法所得结果具有较强的稳健性。

3　讨论

3.1　不同林龄对麻栎人工林凋落物层水源涵养的影响

随着林龄的增长，森林的林下凋落物会增多，且更加紧密、孔隙度较小[33]。但在本研究中，5 个不同林龄麻栎人工林凋落物储量并未表现出随林龄呈明显规律性变化，其中 25 年生麻栎人工林凋落物储量大于其他林龄，这可能是由于随着林龄增长，林地凋落物分解速率加快，导致储量降低[34]。在本研究中，不同林龄麻栎人工林凋落物持水量和吸水速率随浸泡时间变化呈现显著规律性变化。在浸泡初期，凋落物持水量迅速增加，吸水速率达到峰值；随着时间延长，持水量增速趋缓，吸水速率逐渐减小；至 24 h 后，持水量达到最大值，吸水速率接近于 0。这可能是因为浸水初期凋落物叶组织及叶片间隙的水势较低，促使水分快速渗入；随着时间推移，水势逐渐升高并与外界趋于一致，最终达到动态平衡[35]。不同林龄麻栎人工林凋落物持水量和吸水速率排序为 50 年生 ＞ 25 年生 ＞ 45 年生 ＞ 10 年生 ＞ 4 年生。凋落物持水量和吸水速率与浸水时间存在良好的对数和幂函数关系，与大多数学者的研究结果相似[4-5,13]，因此可利用该经验方程对麻栎林凋落物水文要素进行预测和模拟。

凋落物的持水性能是衡量森林水源涵养与水土保持功能的关键指标。在本研究中，50 年林龄的凋落物最大持水量、最大持水率、有效拦蓄量和有效拦蓄率均大于其他林龄，这可能是因为凋落物的持水能力与其干燥程度、现存量及其分解程度有关。随着林龄的增长，凋落物越干燥，分解程度越大，持水能力也越强[15]。除文中提及的林龄影响因素

外，气温等环境因素亦与凋落物的分解密切相关。有研究显示，气温升高会提升凋落物中微生物的活性，进而加速凋落物的分解，最终影响凋落物的持水特性[36]。此外，森林所在地区的林分组成、密度等因素也会对凋落物的持水特性产生影响[37]。不过，相关研究的总体数量相对较少，这也将成为未来研究探索的重点方向。

3.2 不同林龄对麻栎人工林土壤层水源涵养功能的影响

不同林龄麻栎人工林土壤容重随土层深度的增加而增大，这可能是因为随着土层加深，腐殖质和有机质含量呈递减趋势，该变化会影响土壤团聚性，从而导致土壤容重逐渐增大[38]。同时，已有研究表明，凋落物的掺入会降低土壤容重[39]。本研究发现 25 年生麻栎林凋落物储量大于其他林龄，这可能是其土壤容重最小的原因。

相关研究表明，随着林龄的增加，土壤平均毛管孔隙度、平均非毛管孔隙度、平均总孔隙度逐渐增加[13]。但本研究中麻栎人工林土壤平均毛管孔隙度、平均非毛管孔隙度、总孔隙度随着林龄增加逐渐减小。这可能是因为不同树种林地表层凋落物组成、凋落物储量不同以及根系吸水性能不同，从而导致土壤物理性质存在差异[5,40]。研究表明，土壤总孔隙度一般在 30%～60%之间，大多数树木正常生长的总孔隙度在 50%左右[39]。本研究发现土壤总孔隙度范围在 50.89%～58.49%之间，说明 5 个不同林龄麻栎人工林土壤孔隙度条件较优越。此外，研究表明，非毛管孔隙度在总孔隙度中所占比例越大，保水能力越强[41]。在本研究中，4 年生麻栎林非毛管孔隙度占比最高，说明 4 年生麻栎林土壤保水能力大于其他林龄。

本研究发现，不同林龄麻栎林的毛管持水率和最大持水率总体随林龄增加呈下降趋势，但在 25 年林龄时出现明显回升。其中，25 年生麻栎林的毛管持水率高于其他林龄，4 年生麻栎林的最大持水率高于其他林龄。这可能是因为林龄差异导致林分密度不同，进而引起林下植被组成、生物量累积及群落物种丰富度的差异；此外，林内通风透光条件良好，促使凋落物分解速率加快，土壤养分返还量增多，有机质含量显著提升，最终导致土壤持水性能存在差异[42]。

本研究发现，不同林龄麻栎人工林的水源涵养能力以 50 年林龄林分最优，但在土壤平均毛管持水率和平均最小持水率排序中，50 年林龄林分却处于末位。这可能是因为凋落物分解速率与林分郁闭度呈负相关，而与土壤有机质积累呈显著正相关[43]。叶面积指数随林龄增长先增后减，50 年林龄林分郁闭度相对较高，导致凋落物分解不彻底，其土壤有机质质量分数也低于其他林分。这一过程抑制了土壤团聚体的形成和大孔隙发育[44]，因此，不同林龄的郁闭度差异也间接影响了麻栎人工林在不同生长阶段土壤层的水源涵养能力。

3.3 不同林龄麻栎人工林水源涵养能力综合评价

凋落物层和土壤层是水源涵养的主体，熵权法可有效消除主观因素干扰，通过客观量化的方式判定各评价指标的相对权重，能够解决因指标内涵差异导致的不可加性问题[45]。本研究运用熵权法[5]对 5 个林龄麻栎人工林凋落物层和土壤层水源涵养能力进行综合评估，得到 50 年＞25 年＞45 年＞10 年＞4 年林龄，即整体趋势上随着林龄的增加，麻栎人工林水源涵养能力越强。该结果与张淑兰等[29]、张日施等[46]的研究结果大体一致，这可能是因为麻栎人工林在生长过程中，能够借助凋落物层的生物积累，减轻径流对土壤的冲刷作用，进而提升林地的水源涵养功能。但与王志豪等[47]关于樟子松（*Pinus sylvestris*）林、杨家慧等[48]关于柳杉（*Cryptomeria japonica*）人工林的研究结论存在差异，后者发现水源涵养能力随林龄增长呈先增强后减弱的趋势。这种差异可能由树木年龄差异引起的凋落物产量差异、凋落物分解速率差异以及树种类型不同所致[42,49]。然而，未来仍需长期监测，以更精确地量化不同林龄麻栎人工林水源涵养功能的差异规律与机理。

3.4 研究不足与展望

本研究采用单次采样测定不同林龄麻栎人工林凋落物储量。虽然本次研究选择了代表性较好的 9 月进行同步采样，以确保不同林龄间的横向可比性，但仍需承认，凋落物储量存在明显的季节性波动。单次采样结果可能无法完全捕捉全年凋落物输入与分解动态平衡的峰值。然而，鉴于本研究旨在探讨林龄对水源涵养能力的相对影响，且所有样地均在同一时段采集，这种相对差异的对比结果依然具有重要的参考价值。未来研究建议通过长期定位观测（如月度或季度采样）进一步量化不同林龄麻栎林凋落物储量的季节动态规律，以获得更精确年际通量数据。此外，森林的水文功能不仅与凋落物和土壤层相关，还受到林冠层影响。林冠层是森林与外界环境相互作用、彼此反馈的首个界面层[28,36,41,50]。后续应将林冠层纳入森林水源涵养能力的综合评价范畴，以便更深入地探究不同林龄麻栎人工林的水

源涵养趋势，为区域水资源管理提供参考依据。

4　结论

本研究以皇甫山国有林场麻栎人工林（4 年、10 年、25 年、45 年和 50 年林龄）为研究对象，探究其凋落物和土壤水源涵养能力，结果发现：1）不同林龄麻栎人工林凋落物持水量均随浸水时间延长呈阶段性增加，并在 24 h 达到饱和；而凋落物的吸水速率均随浸水时间延长而降低（0.5 h 内达峰值，24 h 后趋近动态平衡）。2）50 年林龄麻栎人工林凋落物的最大持水量和有效拦蓄量显著大于其他林龄，而不同林龄凋落物的最大持水率和有效拦蓄率无显著差异。3）不同林龄土壤平均毛管持水率排序为 25 年＞4 年＞10 年＞45 年＞50 年，土壤平均最小持水率排序为45 年＞25 年＞4 年＞10 年＞50 年。4）采用熵权法对不同林龄麻栎人工林水源涵养能力进行综合评价，发现 50 年林龄麻栎人工林水源涵养能力最优。综上，林龄会影响凋落物层和土壤层的结构，进而影响麻栎林水源涵养能力，50 年林龄麻栎人工林综合水源涵养能力最优。在亚热带地区开展以水源涵养为主要目标的麻栎人工林经营时，应重视和保护中龄林至成熟林；对于幼龄林，可考虑通过合理抚育（如间伐）改善林分结构，促进凋落物累积和土壤改良，以更快提升其水文生态效益。未来需开展长期监测，以更精确量化不同经营措施下麻栎林长期水文功能的演变及其对区域水资源的影响。

参考文献：

[1] 刘效东, 张卫强, 冯英杰, 等. 森林生态系统水源涵养功能研究进展与展望[J]. 生态学杂志, 2022, 41(4): 784-791.

[2] 王鹏, 马逸伦, 程静, 等. 宁夏水源涵养功能时空演变格局及其归因分析[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 191-199.

[3] 贾雨凡, 杨勤丽, 胡非池, 等. 变化环境下的水源涵养能力评估研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2022(1): 37-47.

[4] 蔚阿龙, 温慧, 丛日春, 等. 坝上地区不同森林类型凋落物层水文效应[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(5): 959-969.

[5] 陈晶亮, 杨慧, 刘超, 等. 宁夏罗山自然保护区 3 种典型林分凋落物和土壤层水源涵养能力综合评估[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 7987-7997.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 曹泽涛, 邓杨旭, 田婧, 等. 混交刺槐人工林枯落物蓄积特征及其水文效应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 152-160.

[9] 赵敏, 戴全厚, 严友进, 等. 喀斯特山地典型植被类型凋落物和土壤水文效应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 241-249.

[10] 邱展鹏, 何佳丽, 李志飞, 等. 抚育间伐对人工阔叶混交林土壤水源涵养能力的影响[J]. 林业与环境科学,2026, 42(3): 117-124.

[11] 莫佳佳, 杨艳芬, 刘国彬, 等. 黄土高原丘陵沟壑区刺槐人工林混交模式对土壤水力性质的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6): 301-309.

[12] 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]. Agric For Meteor, 2019, 278: 107656.

[13] 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.

[14] Bai Y X, Zhou Y C, Du J J, et al. Effects of a broadleaf-oriented transformation of coniferous plantations on the hydrological characteristics of litter layers in subtropical China[J]. Glob Ecol Conserv, 2021, 25: e01400.

[15] 王美莲, 王飞, 姚晓娟, 等. 不同林龄兴安落叶松枯落物及土壤水文效应研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 925-931.

[16] 高迪, 郭建斌, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山不同林龄华北落叶松人工林枯落物水文效应[J]. 林业科学研究, 2019, 32(4): 26-32.

[17] Sun L, Zhu Y, Zhang S H, et al. The contribution of litter and soil to water conservation capacity as affected by land use change and stand age in *Carya cathayensis* plantations[J]. Agric Water Manag, 2026, 329: 110380.

[18] 谢川, 王刚, 武华卫, 等. 林龄对川黄柏林下植物及土壤理化性质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2025, 43(1): 184-192.

[19] Li X, Wu T, Wu G P, et al. Increasing stand age increases N deficiency but alleviates relative P limitations in Castanopsis hystrix plantations in Southern China[J]. Land Degrad Dev, 2024, 35(6): 2173-2183.

[20] Payn T, Carnus J M, Freer-Smith P, et al. Changes in planted forests and future global implications[J]. For Ecol Manag, 2015, 352: 57-67.

[21] FAO. Global Forest Resources Assessment 2025: Main report [R]. Rome, Italy: FAO, 2025.

[22] Wang N, Song M X, Zhang Y, et al. Physiological responses of *Quercus acutissima* and *Quercus rubraseedlings* to drought and defoliation treatments[J]. Tree Physiol, 2023, 43(5): 737-750.

[23] 方培, 胡海波, 王霞, 等. 不同林龄麻栎人工林土壤生态化学计量特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2022, 42(2): 39-47.

[24] Huang Y P, Han Y J, Mao R W, et al. Water conservation capacity of soil and litter layers of five Magnoliaceae plants in Hainan Island, China[J]. Forests, 2025, 16(3): 514.

[25] Ma Y H, Xu D Y, Xu H N,et al. Understory vegetation diversity dynamics across a chronosequence of *Quercus acutissima* plantations: roles of stand development and environmental factors[J]. For Res Adv,2026, 2 (1):e005.

[26] Li X, Wu G P, Lie Z Y, et al. Microbial community variation in rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Castanopsis hystrix* plantations across stand ages[J]. J For Res, 2025, 36: 82.

[27] Ma Y H, Xu D Y, Huang Z M, et al. Mixed forest conversion from moso bamboo forests in wetland parks increases understory species diversity and improves soils[J]. Glob Ecol Conserv, 2025, 57: e03386.

[28] 苏纯兰, 严朝东, 刘颂颂, 等. 不同改造模式下马占相思林凋落物和土壤水文效应分析[J]. 林业与环境科学, 2024, 40(1): 27-35.

[29] 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.

[30] LY/T 1215-1999.森林土壤水分-物理性质的测定[S]

[31] 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.

[32] 禹琴, 李奇, 方海燕, 等. 基于变异系数法的龙羊峡水库消落带生态敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 245-254.

[33] 张学龙, 金铭, 刘贤德, 等. 祁连山 5 种典型灌木林枯落物蓄积量及其持水特性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 735-740.

[34] 耿琦, 王海燕, 张美娜, 等. 森林枯落物持水特性影响因素研究进展[J]. 生态科学, 2020, 39(5): 220-226.

[35] 张晓曦, 胡嘉伟, 刘凯旋, 等. 4 种园林绿化植物凋落物混合对其持水特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(4): 178-188.

[36] 陈婷, 郗敏, 孔范龙, 等. 枯落物分解及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1927-1935.

[37] 简永旗, 吴家森, 盛卫星, 等. 间伐和林分类型对森林凋落物储量和土壤持水性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(2): 320-328.

[38] 农海勤, 陆明路, 易弘韬, 等. 亚热带人工林凋落物和土壤层水源涵养功能[J]. 生态学报, 2025, 45(17): 8599-8613.

[39] Wang Q, Zhao P, Chen X, et al. Hydrological effects of three plantations in hilly regions of South China[J]. Ecohydrol Hydrobiol, 2025, 25(4): 100648.

[40] 陈琳, 赵廷宁, 赵陟峰. 晋西半干旱黄土地区典型林分枯落物及土壤水文效应[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 14106-14108.

[41] 赵雨森, 韩春华, 张宏光, 等. 阿什河上游小流域主要林分类型土壤水文功能研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 203-208.

[42] 刘婧雯, 程唱, 邹星晨, 等. 高寒区不同密度白桦天然林枯落物层与土壤层水文效应[J]. 林业科学研究, 2025, 38(2): 156-164.

[43] 敬如岩, 黄雅丽, 丁新景, 等. 黄河三角洲地区刺槐白蜡人工混交林枯落物分解的林龄差异[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 333-337.

[44] 曾星,毕华兴,管凝,等.不同生长阶段刺槐人工林水源涵养功能评价[J].浙江农林大学学报,2026,43(3):609-619.

[45] 李树宝, 张丽娜, 王树森, 等. 森林经营方式对不同林龄落叶松林枯落物及土壤水源涵养能力的影响[J]. 森林工程, 2023, 39(2): 12-21.

[46] 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.

[47] 王志豪, 张鹏飞, 贾小旭, 等. 毛乌素沙地不同林龄樟子松水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4): 100-108, 117.

[48] 杨家慧, 谭伟, 卯光宪, 等. 黔中不同龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力综合评价[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 296-301, 308.

[49] 邓雅丽, 赵新宇, 崔自杰, 等. 中国森林生态系统林冠层降雨截留特征[J]. 生态学报, 2024, 44(7): 2981-2992.

[50] Zhou S Y D, Li X, Peñuelas J, et al. Soil and litter microbiomes as joint drivers of ecosystem multifunctionality in a 60-year-old forest plantation[J]. J Environ Manag, 2025, 380: 124900.