

引用格式: 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, 2025, 42(X): 1-11.
ZENG Xing, BI Huaxing, GUAN Ning, *et al.* Evaluation of water conservation function of *Robinia pseudoacacia* plantation at different growth stages[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(X): 1-11.

不同生长阶段刺槐人工林水源涵养功能评价

曾 星¹, 毕华兴^{1,2,3,4}, 管 凝¹, 周 韬¹, 邱 婷¹, 康 赛¹, 黎志鹏¹, 黄浩博¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083; 3. 北京林业大学 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 4. 北京林业大学 水土保持国家林业和草原局重点实验室/北京市水土保持工程技术研究中心/林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 【目的】探明晋西黄土区不同生长阶段刺槐 *Robinia pseudoacacia* 人工林水源涵养功能的差异, 为林分水源涵养能力提升及刺槐林的管理提供科学依据。【方法】以山西省临汾市吉县蔡家川流域刺槐人工林幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林(林龄分别为 15、23、27、34、41 a) 为对象, 测定刺槐林垂直方向各层(林冠层、凋落物层、土壤层)的水源涵养指标(林冠截留率、凋落物持水能力、土壤物理性质和持水特性), 基于熵权-逼近理想解排序(TOPSIS)法综合评价其水源涵养功能。【结果】①叶面积指数、林冠截留率随龄组攀升呈先升后降趋势, 中龄林时最高, 在达到成熟林后基本维持稳定。②中龄林凋落物层有最高的蓄积量和最大持水量, 而有效拦蓄量在成熟林分中表现更佳; ③幼龄林的土壤非毛管持水能力和饱和持水能力最佳, 中龄林的毛管持水量最高。④熵权-TOPSIS 法计算得出刺槐林地土壤层对水源涵养贡献最大, 水源涵养能力整体上随龄组攀升先增强后减弱, 其中, 中龄刺槐人工林水源涵养功能最佳。【结论】中龄刺槐人工林水源涵养功能最佳。建议结合研究区现有低效林改造及功能提升工程, 对现有低效和衰退林分进行合理采伐与补植, 以更好地提升刺槐人工林水源涵养功能。图 2 表 5 参 34

关键词: 刺槐人工林; 龄组; 水源涵养功能; 熵权-TOPSIS 法; 晋西黄土区

中图分类号: S727.21 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)00-0001-11

Evaluation of water conservation function of *Robinia pseudoacacia* plantation at different growth stages

ZENG Xing¹, BI Huaxing^{1,2,3,4}, GUAN Ning¹, ZHOU Tao¹, QIU Ting¹, KANG Sai¹, LI Zhipeng¹, HUANG Haobo¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. National Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. National Forest Ecosystem Observation and Research Station in Jixian County of Shanxi Province, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation/Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation/ Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The aim is to explore the difference in water conservation function of *Robinia pseudoacacia* plantations at different growth stages in loess areas of western Shanxi, and provide scientific basis for improving water conservation capacity and management of forest stands. [Method] Taking *R. pseudoacacia* plantations of 5 age groups (with forest ages of 15, 23, 27, 34, and 41 years respectively) in Caijiachuan watershed, Linfen City of Shanxi Province as the research objects, water conservation indicators in

收稿日期: 2025-04-29; 修回日期: 2025-08-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1300401); 国家自然科学基金资助项目(U2243202)

作者简介: 曾星(ORCID: 0009-0009-3741-3558), 从事林业生态工程研究。E-mail: zengxing20000520@163.com。通信作者: 毕华兴(ORCID: 0000-0001-9726-5328), 教授, 博士生导师, 从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail: bhx@bjfu.edu.cn

vertical layers (canopy, litter, and soil) were measured, including canopy interception rate, litter water-holding capacity, soil physical properties, and water holding characteristics. Comprehensive evaluation of the water conservation function was conducted based on Entropy Weight-Approximate Ideal Solution Ranking (TOPSIS). [Result] (1) The leaf area index and interception rate of the canopy layer showed a trend of first increasing and then decreasing as the age increased, with the highest values observed in middle-aged forests (23 years), and remained stable after maturity. (2) The litter layer in middle-aged forests exhibited the highest accumulation and maximum water holding capacity, while the effective retention capacity was superior in mature stands. (3) Young stands (15 years) had the highest non-capillary and saturated water-holding capacities, while middle-aged stands excelled in capillary water retention. (4) Soil layers contributed the most to water conservation. Water retention capacity first increased and then declined with age, reaching peak in middle-aged stands. [Conclusion] The water conservation function of the middle-aged *R. pseudoacacia* plantation is the best. To enhance the water conservation function, inefficient and degraded stands should be selectively harvested and replanted, which is in line with regional project for low efficiency forest transformation and functional improvement. [Ch, 2 fig. 5 tab. 34 ref.]

Key words: *Robinia pseudoacacia* plantations; age group; water conservation function; entropy weight-TOPSIS method; loess regions in western Shanxi

森林水源涵养功能是陆地生态系统维持水文平衡、调节气候及防治水土流失的核心服务功能之一^[1]。森林通过林冠截留降雨、凋落物层拦蓄水分及土壤层渗透储水等过程,实现降水资源的时空再分配^[2]。在全球气候变化背景下,极端降水事件频发与水土流失加剧^[3]使得森林水源涵养能力成为生态脆弱区可持续发展的关键调控因子^[4]。黄土高原是全球土壤侵蚀最严重的区域之一,土层疏松、植被覆盖率低、降水集中且年际变化大^[5]。这些特征导致地表径流冲刷强烈,生态系统稳定性极低。在此背景下,人工林建设成为该区域生态恢复的核心策略,其中刺槐 *Robinia pseudoacacia* 因兼具良好的生态效益和经济效益,成为黄土高原引种最成功的水土保持树种之一,也是黄土高原地区造林面积最大的树种之一^[6]。但随着刺槐林龄的增大,其林龄结构老化问题日益突出,部分林分进入退化阶段,生态功能显著下降^[7]。

现有研究表明:林分水源涵养能力受林龄显著影响,呈现阶段性变化特征。幼龄林因冠层稀疏、凋落物积累不足,截留与持水能力较弱;中龄林冠层郁闭度与生物量达到峰值,凋落物输入量增加,土壤结构逐步改善,水源涵养功能进入最佳阶段;林分成熟后因自然稀疏化、养分竞争加剧及根系退化,可能导致水源涵养功能开始衰退^[8-10]。杨家慧等^[11]发现:黔中地区柳杉 *Cryptomeria fortunei* 林冠层生物量随生长过程呈“单峰型”趋势,冠层截流能力也与之相近,峰值发生在成熟林时期。侯贵荣等^[12]指出:黄土区刺槐林凋落物持水量与林龄呈正相关,但未明确是否存在阈值。以往研究多注重林分垂直方向单一层次或固定林龄条件下林分水源涵养功能,对于刺槐人工林的水源涵养功能随林龄增长的动态变化规律尚未明晰。此外,传统水源涵养功能评价方法(如层次分析法)也常因主观赋权导致结果偏差^[13-14]。

针对上述问题,本研究以刺槐人工林幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林为对象,通过野外调查与室内实验结合,系统测定林冠截留能力、凋落物持水特性、土壤物理性质和持水能力,并运用熵权-逼近理想解排序(TOPSIS)法综合评价不同生长阶段刺槐林的水源涵养功能,探明不同生长阶段刺槐人工林各层次水源涵养功能变化特征,揭示刺槐林水源涵养功能的林龄效应机制,为研究区植被恢复和刺槐林的经营管理提供科学依据,提高该区生态系统的稳定性。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县蔡家川小流域(36°14'27"~36°18'23"N, 110°39'45"~110°47'45"E)。流域面积为 34.23 km²,海拔为 898~1 574 m。该区属于温带大陆性季风性气候,年平均降水量为 575.9 mm,

年际变化大，降水多集中在 6—8 月，多年平均蒸发量为 1 723.9 mm；无霜期为 172.0 d；年平均气温为 9.0~10.0 ℃，最高气温为 38.1 ℃，最低气温为-20.4 ℃。土壤主要为弱碱性褐土，黄土母质，土层深厚，质地均匀，易发生水土流失。研究区典型刺槐纯林林分密度为 1 500 株·hm⁻²，林下灌草层基本稳定。主要灌木植物有黄刺玫 *Rosa xanthina*、胡枝子 *Lespedeza bicolor*、茅莓 *Rubus parvifolius* 等；草本植物以黄花蒿 *Artemisia annua*、藨草 *Phalaris arundinacea*、披针藁草 *Carex lancifolia* 等为主。

1.2 样地选择和调查采样

从 1974 年开始，吉县林业局就多次在蔡家川流域实施人工造林，特别是 1991—1995 年，造林规模最大，达 1 000 hm²，主要造林树种为刺槐和油松 *Pinus tabulaeformis*。本研究于 2024 年 6—8 月，在试验区内选取林分密度相近，土壤、地形等立地条件基本一致的刺槐人工林地作为研究对象，用生长锥法确定实际林龄分别为 15、23、27、34、41 a，并参考《主要树种龄级与龄组划分》^[15] 将其划分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林。按照不同林龄各设置 3 个样地，样地大小为 20 m×20 m，调查样地内所有刺槐的树高、胸径、冠幅、叶面积指数，并估测林分密度。在每块样地的上坡、中坡、下坡分别设置 30 cm×30 cm 的凋落物样方，根据凋落物的颜色、形态将其分为未分解层和分解层，调查各层厚度，并全部收集。在每块样地中选取 3 个土壤取样点，挖掘深度为 100 cm 的土壤剖面。采用环刀法分别在 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 分层取样，用于测定土壤物理性质。样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the plot								
龄组	海拔/m	坡度/(°)	坡向	密度/(株·hm ⁻²)	平均树高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/m	叶面积指数
幼龄林	1 021	15	阳坡	1 650	7.82±1.58	8.95±1.92	2.19±0.25	0.40±0.02
	1 032	17	阳坡	1 600	8.79±0.79	9.34±2.06	2.32±0.16	0.42±0.02
	1 034	17	阳坡	1 600	7.40±1.26	8.81±1.86	1.91±0.26	0.38±0.02
中龄林	1 107	18	阳坡	1 700	8.95±1.64	11.38±2.58	3.64±0.33	0.74±0.16
	1 109	18	阳坡	1 700	8.86±1.47	10.92±1.76	2.98±0.36	0.72±0.08
	1 106	18	阳坡	1 600	9.16±1.93	11.72±2.69	3.69±0.28	0.82±0.12
近熟林	1 149	19	阳坡	1 725	9.62±1.09	12.88±1.81	3.05±0.78	0.66±0.08
	1 148	19	阳坡	1 625	9.04±0.87	11.93±2.18	2.84±0.72	0.56±0.06
	1 146	19	阳坡	1 650	8.74±1.04	10.98±1.37	2.96±0.63	0.58±0.10
成熟林	1 174	16	阳坡	1 300	9.25±1.24	12.90±4.20	2.59±0.66	0.36±0.04
	1 173	17	阳坡	1 600	9.43±1.37	13.92±1.92	2.75±0.58	0.44±0.05
	1 175	19	阳坡	1 600	9.06±1.15	12.36±3.42	2.40±0.87	0.34±0.04
过熟林	1 232	14	阳坡	1 550	10.05±1.85	13.34±3.58	2.57±0.72	0.29±0.02
	1 228	16	阳坡	1 550	10.76±1.47	12.98±1.53	2.96±0.57	0.30±0.02
	1 230	14	阳坡	1 600	9.65±1.29	13.88±3.09	2.48±0.86	0.26±0.01

说明：平均树高、平均胸径、平均冠幅和叶面积指数数据为平均值±标准差。

1.3 研究方法

1.3.1 林冠层截流率测定 2024 年 6—8 月共观测到降雨事件 7 次。在每个样地中选择树高、胸径接近平均树高、平均胸径，能够代表该林分树形的平均木 3 株，设置树干流装置，连接集水槽，监测树干流；在每株标准木下和林窗中放置 3 个雨量筒监测穿透雨，每个雨量筒间隔大于 2 m；在林外空旷处放置 3 个雨量筒，监测林外降雨。基于水量平衡计算实际的林分冠层截留量(率)。计算公式如下：

$$Q = \frac{V}{S}; \tag{1}$$

$$Q_1 = \frac{V_1}{S_1} \times \theta; \tag{2}$$

$$Q_c = Q_0 - Q_1 - Q_2; \quad (3)$$

$$R_c = \frac{Q_0 - Q_1 - Q_2}{Q_0}. \quad (4)$$

式(1)~(4)中: Q 为降雨量(mm); V 为雨量筒内水量(L); S 为雨量筒的桶口面积(m^2); Q_0 为林外降雨量(mm); Q_c 为林冠层截留量(mm); Q_1 为树干流量(mm); Q_2 为林内降雨量(mm); V_1 为水槽内水量(L); S_1 为平均木林冠投影面积(m^2); R_c 为林冠截留率(%); θ 为林分郁闭度(%)。

1.3.2 凋落物层储量及持水能力测定 将收集的凋落物分层放入档案袋称量作为鲜质量, 再在烘箱中 85℃ 连续烘干 12 h 至恒量, 作为干质量。采用连续浸泡法测定凋落物持水能力。将凋落物移至尼龙网袋, 扎紧口部, 浸没在装水的盆中, 分别在 0.25、0.50、1.00、2.00、4.00、6.00、12.00、24.00 h 将网袋取出沥水至不再滴水, 称量, 作为浸泡后的质量。凋落物最大持水量(率)、凋落物有效拦蓄量(率)计算公式为:

$$R_0 = \frac{M_0 - M_1}{M_1} \times 100\%; \quad (5)$$

$$W_1 = M_2 - M_1; \quad (6)$$

$$R_m = \frac{W_1}{M_1} \times 100\%; \quad (7)$$

$$W_m = (R_m - R_0) \times M; \quad (8)$$

$$W = (0.85R_m - R_0) \times M. \quad (9)$$

式(5)~(8)中: R_0 为凋落物自然含水率(%); M_0 为凋落物鲜质量(g); M_1 为凋落物烘干后质量(g); M_2 为凋落物浸泡 24 h 后质量(g); W_1 为凋落物最大持水量(g); R_m 为凋落物最大持水率(%); W_m 为凋落物最大拦蓄量($t \cdot hm^{-2}$); R_0 为凋落物自然持水率(%); M 为凋落物蓄积量($t \cdot hm^{-2}$); W 为凋落物有效拦蓄量($t \cdot hm^{-2}$)。

1.3.3 土壤层含水及持水能力测定 用烘干法测定土壤含水量, 用环刀法测定土壤密度、土壤毛管孔隙度和土壤非毛管孔隙度等物理性质。土壤层蓄水能力计算方法为:

$$W_c = 10\,000P_cH; \quad (10)$$

$$W_n = 10\,000P_nH; \quad (11)$$

$$W_t = W_c + W_n. \quad (12)$$

式(9)~(11)中: W_c 、 W_n 、 W_t 分别为土壤毛管持水量、非毛管持水量、饱和持水量($t \cdot hm^{-2}$); P_c 、 P_n 分别为土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度(%); H 为土壤深度(m)。

1.3.4 水源涵养功能评价方法 本研究采用熵权-TOPSIS 法评价不同龄组刺槐林水源涵养功能。通过熵权法为各指标分配相对权重, TOPSIS 法构造多目标决策矩阵, 按照每个指标与理想化目标的接近程度进行排序, 从而计算每个龄组刺槐林水源涵养功能与理想最优解和最劣解的综合距离, 比较不同龄组刺槐林地水源涵养功能之间的差异。具体步骤如下: ①指标原始数据矩阵设为 $X = \{x_{ij}\} m \times n$ 。数据标准化处理采用归一化法, Y_{ij} 为原始数据经过标准化后的矩阵, 依据经标准化处理的数据计算各个指标信息熵(e_j), 得出指标权重(ω_j)。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (Y_{ij} \ln Y_{ij}); \quad (13)$$

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m 1 - e_j}. \quad (14)$$

式(13)~(14)中: i 为第 i 个龄组, $i=1, 2, 3, \dots, n$; j 为第 j 个评价指标, $j=1, 2, 3, \dots, m$ 。②用欧

氏距离计算各龄组林分水源涵养功能与正理想解(D_i^+)和负理想解(D_i^-)的距离,并加入权重。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (x_{ij} - x_j^+)^2}; \quad (15)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (x_{ij} - x_j^-)^2}。 \quad (16)$$

③计算各龄组林分水源涵养功能与正理想解的贴近度(C_i),即综合评价指数:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}。 \quad (17)$$

1.3.5 数据处理与分析 采用 Excel 2019 和 SPSS 23.0 进行数据统计分析,采用 Origin 2018 软件作图。采用单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同龄组刺槐林叶面积指数及林冠截留率

由图 1 可见:各林地刺槐林的叶面积指数随龄组的攀升呈先上升后下降的趋势,在中龄林时期达到最大,为 0.76,过熟林最低,为 0.28。除幼龄林与成熟林外,各林组的叶面积指数间存在显著差异($P < 0.05$)。各刺槐林林冠截留率随龄组攀升呈先增加后减小的趋势。中龄林林冠截留率最大,且显著高于成熟和过熟林($P < 0.05$),达 33.44%。过熟林林冠截留率最低,仅为 16.56%。

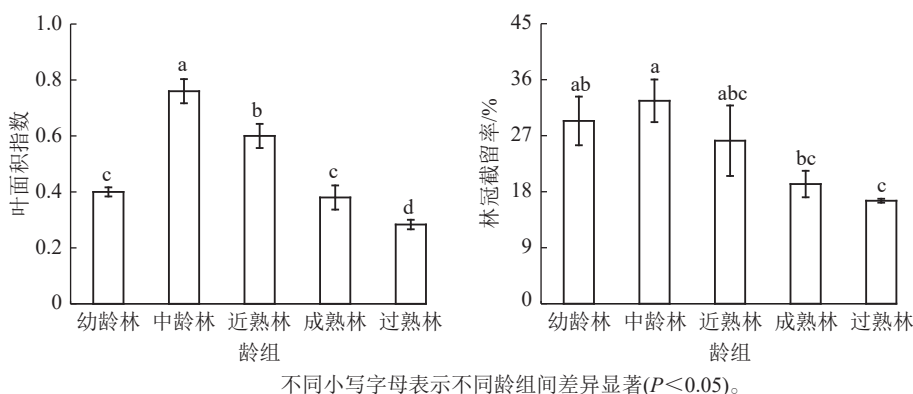


图 1 不同龄组刺槐林叶面积指数和林冠截留率

Figure 1 Leaf area index and canopy interception rate of *R. pseudoacacia* forest in different age groups

2.2 不同龄组刺槐林凋落物层水源涵养能力

各龄组刺槐人工林凋落物厚度及蓄积量见图 2A 和图 2B。凋落物厚度总体呈逐阶段降低趋势且均超过 3 cm,最大为幼龄林(4.66 cm),显著高于近熟林、成熟林、过熟林($P < 0.05$)。在过熟林时凋落物厚度降至最低(3.30 cm),显著低于幼龄林和中龄林($P < 0.05$),其余林分凋落物厚度之间无显著差异。各龄组刺槐林凋落物蓄积量随龄组的攀升呈先上升后下降趋势,为 13.58~19.01 t·hm⁻²,中龄林凋落物蓄积量最高,显著高于过熟林($P < 0.05$),过熟林凋落物蓄积量最低,其余各龄组刺槐林凋落物蓄积量之间无显著差异。

不同龄组刺槐林凋落物最大持水量为 30.63~42.00 t·hm⁻²(图 2C),最高为中龄林,成熟林与之相近,为 40.59 t·hm⁻²,最低为过熟林,显著低于中龄林和成熟林($P < 0.05$)。由图 2D 可知:不同龄组刺槐林凋落物有效拦蓄量随龄组变化趋势与最大持水量相似,为 24.41~33.57 t·hm⁻²,最高为成熟林,最低为过熟林。中龄林和成熟林有效拦蓄量显著高于过熟林($P < 0.05$),过熟林显著低于其余龄组($P < 0.05$)。

2.3 不同龄组刺槐林土壤层水源涵养能力

由表 2 可知:土壤容重随着龄组的攀升总体呈逐渐增大的趋势,最小为幼龄林(1.14 g·cm⁻³),显著低于其余生长阶段($P < 0.05$),最大为过熟林(1.33 g·cm⁻³)。土壤毛管孔隙度随着龄组的攀升呈先增大后

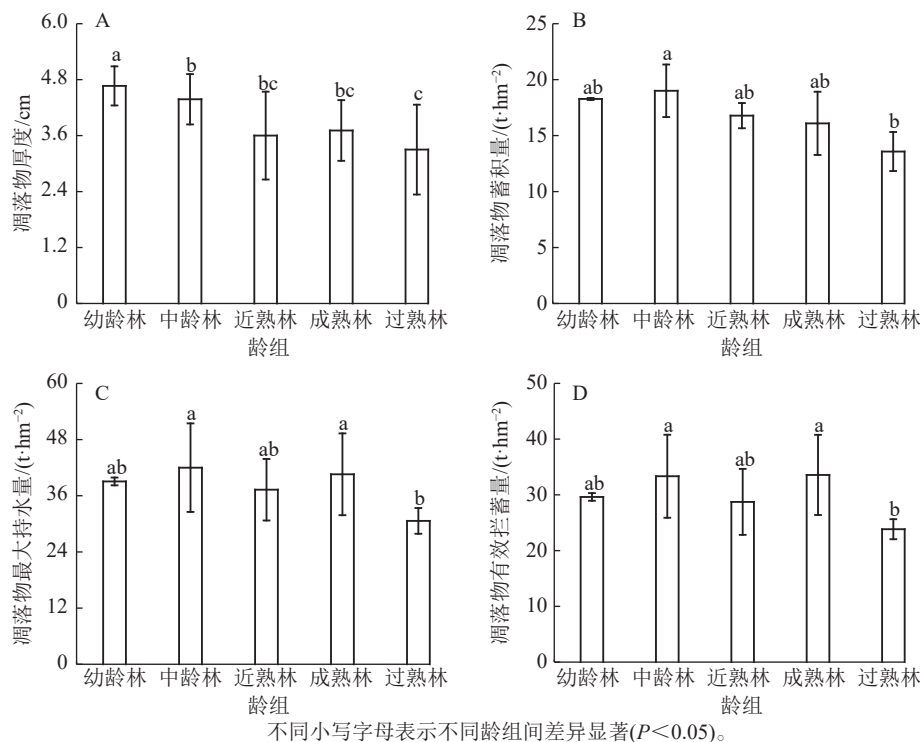


图2 凋落物厚度、蓄积量、持水能力

Figure 2 Litter thickness, volume, and water-holding capacity

表2 不同龄组林地土壤物理性质

Table 2 Physical properties of soil in woodland of different forest age group

龄组	不同土层土壤容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100 cm	0~100 cm均值
幼龄林	1.06±0.02	1.18±0.03	1.16±0.03	1.15±0.04	1.15±0.02	1.14±0.02 b
中龄林	1.18±0.07	1.25±0.01	1.32±0.03	1.31±0.02	1.29±0.01	1.27±0.02 a
近熟林	1.13±0.08	1.24±0.02	1.25±0.02	1.29±0.02	1.26±0.01	1.23±0.02 ab
成熟林	1.23±0.03	1.33±0.06	1.27±0.03	1.23±0.04	1.23±0.02	1.26±0.02 a
过熟林	1.07±0.02	1.39±0.03	1.43±0.04	1.40±0.02	1.39±0.03	1.33±0.06 a
龄组	不同土层土壤毛管孔隙度/%					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100 cm	0~100 cm均值
幼龄林	39.99±1.39	43.14±0.25	44.91±0.48	44.96±0.41	45.60±0.28	43.72±0.91 a
中龄林	46.22±0.63	44.61±0.49	44.32±0.92	47.28±1.39	45.99±0.07	45.68±0.49 a
近熟林	43.54±1.62	44.50±0.79	45.01±0.71	45.20±0.50	48.03±2.37	45.25±0.67 a
成熟林	43.75±1.53	42.24±1.39	44.46±0.04	44.50±0.67	44.39±0.87	43.87±0.38 a
过熟林	41.45±1.45	38.76±1.16	39.00±1.54	42.18±0.71	43.17±0.30	40.91±0.78 b
龄组	不同土层土壤非毛管孔隙度/%					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100 cm	0~100 cm均值
幼龄林	9.62±1.04	4.37±0.20	4.27±0.14	5.17±0.82	4.14±0.12	5.52±0.93 a
中龄林	5.51±1.57	3.04±0.07	2.71±0.14	2.45±0.38	2.39±0.30	3.22±0.52 a
近熟林	6.43±1.11	3.25±0.70	3.15±0.40	2.45±0.40	2.29±0.44	3.51±0.67 a
成熟林	6.72±0.47	5.36±0.84	4.59±0.96	4.61±0.84	4.68±0.40	5.19±0.36 a
过熟林	11.98±1.56	2.80±0.46	2.42±0.39	2.44±0.22	2.36±0.28	4.40±1.70 a
龄组	不同土层土壤总孔隙度/%					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100 cm	0~100 cm均值
幼龄林	49.61±1.90	47.51±0.37	49.17±0.57	50.13±0.70	49.74±0.25	49.23±0.41 a
中龄林	51.73±1.08	47.66±0.55	47.02±1.06	49.72±1.25	48.37±0.32	48.90±0.75 a
近熟林	49.97±1.71	47.74±0.75	48.16±0.60	47.65±0.85	50.31±2.10	48.77±0.51 a
成熟林	50.47±1.07	47.60±2.23	49.05±1.03	49.11±1.03	49.08±1.26	49.06±0.41 a
过熟林	53.43±0.21	41.56±0.71	41.42±1.90	44.62±0.57	45.53±0.35	45.31±1.96 b

说明：数据为平均值±标准差。均值后不同小写字母表示不同龄组间差异显著($P < 0.05$)。

减小的趋势，最大为中龄林 (45.68%)，过熟林 (40.91%) 显著低于其他龄组 ($P<0.05$)。土壤非毛管孔隙随着龄组攀升总体呈先减小后增大的趋势，最大为幼龄林时期 (5.52%)，最低为中龄林时期 (3.22%)。土壤总孔隙度总体呈逐阶段减小趋势，幼龄林阶段最大 (49.23%)，过熟林时期 (45.31%) 显著低于其余生长阶段 ($P<0.05$)。

土壤层水源涵养能力与土壤容重、孔隙度密切相关。由表 2 和表 3 可知：土壤持水量与土壤孔隙度随龄组增加的变化趋势一致，毛管持水量在中龄林最大，为 $913.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，在过熟林最小，为 $818.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，显著低于其余龄组 ($P<0.05$)。幼龄林饱和持水量最大，为 $984.69 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，过熟林饱和持水量显著低于其余生长阶段 ($P<0.05$)，为 $906.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；非毛管持水量占总持水能力的比例为 6.58%~11.21%，占比最小为中龄林，最大为幼龄林。

表 3 不同龄组林地土壤持水特征

Table 3 Soil water retention in woodlands of different age group

龄组	不同土层土壤毛管持水量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100 cm	0~100 cm均值
幼龄林	799.73±33.96	862.83±6.06	898.11±11.77	899.12±10.11	911.99±6.89	874.35±18.22 a
中龄林	924.35±15.48	892.27±11.89	886.37±22.51	945.58±34.10	919.70±1.75	913.65±9.74 a
近熟林	870.80±39.57	889.95±19.40	900.18±17.50	903.98±12.13	960.52±58.02	905.08±13.42 a
成熟林	875.07±37.53	844.75±34.09	889.20±9.74	889.95±16.44	887.88±21.34	877.37±7.69 a
过熟林	829.05±35.42	775.12±28.33	779.95±37.64	843.62±17.31	863.39±7.23	818.23±15.65 b

龄组	不同土层土壤非毛管水持水量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100 cm	0~100 cm均值
幼龄林	192.49±25.45	87.46±4.95	85.38±3.49	103.47±20.12	82.87±3.04	110.33±18.65 a
中龄林	110.25±38.35	60.90±1.66	54.12±3.52	48.91±9.26	47.72±7.31	64.38±10.47 a
近熟林	128.52±27.21	64.29±17.10	62.97±9.88	48.97±9.87	45.77±10.79	70.23±13.46 a
成熟林	134.36±11.45	107.30±20.63	91.85±23.41	92.29±20.65	93.67±9.87	103.89±7.28 a
过熟林	239.64±38.24	56.07±11.24	48.47±9.52	48.78±5.45	47.15±6.82	88.02±33.93 a

龄组	不同土层土壤饱和持水量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100 cm	0~100 cm均值
幼龄林	992.22±46.43	950.28±8.94	983.50±13.95	1 002.58±17.24	994.86±6.20	984.69±8.16 a
中龄林	1 034.60±26.35	953.17±13.52	940.49±26.03	994.48±30.72	967.42±7.84	978.03±14.98 a
近熟林	999.32±41.86	954.87±18.42	963.15±14.76	952.92±20.92	1 006.29±51.46	975.31±10.20 a
成熟林	1 009.43±26.11	952.04±54.57	981.05±25.32	982.24±25.13	981.55±30.95	981.26±8.12 a
过熟林	1 068.69±5.17	831.18±17.27	828.42±46.56	892.40±13.93	910.54±8.48	906.25±39.14 b

说明：数据为平均值±标准差。均值后不同小写字母表示不同龄组间差异显著 ($P<0.05$)。

2.4 不同龄组刺槐林水源涵养功能评价

根据科学性、层次性和独立性的原则，选取林冠截流率、凋落物最大持水量、凋落物有效拦蓄量、土壤孔隙度、土壤持水量等作为评价指标，使用熵权-TOPSIS 法计算各指标权重，评价水源涵养功能优劣，计算结果如表 4 所示。各指标权重为 0.064 8~0.121 4，其中权重较大的指标有叶面积指数、非毛管孔隙、林冠截留率，分别为 0.121 4、0.113 5、0.104 4。各层次权重从大到小依次为土壤层 (0.481 1)、林冠层 (0.295 6)、凋落物层 (0.223 3)。由此可知，在刺槐人工林中，土壤层承担了主要的水源涵养功能。

通过 TOPSIS 法对各林分水源涵养能力进行综合评价，综合评价指数从大到小依次为中龄林、近熟林、幼龄林、成熟林、过熟林，分别为 0.812 9、0.618 8、0.612 9、0.448 7、0.202 0。由幼龄林至过熟林阶段的各刺槐林地水源涵养能力呈先上升后下降的趋势，在中龄林阶段水源涵养功能达到峰值 (表 5)。

3 讨论

森林的水源涵养功能是森林生态系统的重要生态功能之一^[16]，通过林冠层、凋落物层、土壤层拦截

表 4 水源涵养各功能权重

Table 4 The weight of each function of water conservation							
一级指标	权重	二级指标	权重	一级指标	权重	二级指标	权重
林冠层	0.295 6	密度/(株·hm ⁻²)	0.069 8	土壤层	0.481 1	土壤容重/(g·cm ⁻³)	0.093 8
		叶面积指数	0.121 4			毛管孔隙度/%	0.072 1
		林冠截留率/%	0.104 4			非毛管孔隙度/%	0.113 5
凋落物层	0.223 3	凋落物蓄积量/(t·hm ⁻²)	0.077 0			总孔隙度/%	0.064 8
		凋落物最大持水量/(t·hm ⁻²)	0.069 8			毛管持水量/(t·hm ⁻²)	0.072 1
		凋落物有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)	0.076 5			饱和持水量/(t·hm ⁻²)	0.064 8

降水、减少地表径流、改善土壤物理性质，起到降雨再分配，调水蓄水的作用。本研究通过熵权法计算了水源涵养能力各指标权重，并使用 TOPSIS 法对不同龄组刺槐林水源涵养功能进行综合评价。

森林的水源涵养功能首先体现在林冠层对降水的截流及重新分配，直接对降雨的动能起削减作用，防止雨滴直接击溅地表，以缓解雨滴对土壤的溅蚀^[17]。林冠层截留降雨作用的大小和降雨特征、

林分类型以及树种特性等因素相关，冠层结构直接影响林冠层截流能力。本研究中各龄组刺槐林的林冠截流率为 16.55%~32.60%，随龄组的攀升呈先增大后减小的趋势。张日施等^[18]研究也表明：在桂西北地区秃杉 *Taiwania cryptomerioides* 林冠层截流能力随林龄的增大呈先增大后减小的趋势。这可能是由于刺槐林在幼龄林时期快速生长，林冠逐渐郁闭，在中龄林时达到峰值。此时资源竞争初现，林分产生自疏现象，导致林冠截留能力随龄组攀升而先上升后下降。幼龄林叶片面积大、蜡质层薄，有更强的亲水性，因此其单叶截留量要高于近熟林^[19-20]，但受制于林分郁闭程度，幼龄林的林冠截留量小于中龄林。

凋落物层是森林水源涵养的第 2 层次，通过地表覆盖减轻降雨侵蚀、延长水分入渗时间，并改善土壤结构与养分循环^[21-22]。凋落物层的水源涵养功能由蓄积量、最大持水量和有效拦蓄量决定。研究表明：林分郁闭度与凋落物分解速率呈负相关，高郁闭度林分通过降低光照、穿透雨和温度抑制凋落物破碎淋溶，同时高郁闭度为林分带来更多的凋落物输入，从而使林下调落物堆积更为紧密^[23]，因此各龄组林下调落物蓄积量变化趋势与叶面积指数相似，均随刺槐龄组攀升先增大后减小。凋落物的蓄积量、分解程度决定了凋落物的持水能力。李良等^[24]、侯贵荣等^[12]认为：凋落物半分解层持水和拦蓄能力强于未分解层。本研究中最大持水量和有效拦蓄量在中龄林和成熟林中较大而近熟林较低，这可能是因为近熟林较成熟林郁闭度较高，导致凋落物分解程度低，因此半分解层凋落物占比小。同时，李江文等^[25]研究表明：林下植被的覆盖度会随林分郁闭程度的增加而减小，故而成熟林林下植被覆盖度较大，有更多的凋落物输入，从而出现近熟林分水源涵养能力低于中龄林和成熟林的现象。可见林分郁闭度也会间接影响凋落物层的水源涵养功能。

土壤是森林储藏水分最主要的场所，其容重、孔隙度能反映土壤孔隙状况、松紧程度，评价土壤空气和水分的通透情况^[26]，直接影响土壤层水源涵养能力。土壤毛管孔隙与非毛管孔隙分别主导土壤的储水和透水性能，两者持水量总和直接表征土壤水源涵养潜力上限^[27-29]。从研究区不同生长阶段刺槐林地的土壤性状来看，幼龄林土壤非毛管孔隙度与总孔隙度最大且容重最小，表现出最优透水性能；中龄林土壤毛管孔隙度达到峰值，储水能力显著增强；过熟林土壤孔隙结构退化，持水能力降至最低。这可能是因为凋落物分解速率受林分郁闭度抑制，但与土壤有机质积累呈正相关关系^[30]。受叶面积指数随龄组攀升先增后减的规律影响，幼龄林凋落物分解更为彻底，其土壤有机质质量分数高于中龄林。这一过程进一步促进土壤团聚体形成并诱导大孔径孔隙发育^[31]，因此不同龄组林分的郁闭程度差异也间接影响了不同生长阶段刺槐林土壤层水源涵养功能。同时刺槐根系集中在 40~80 cm 土层中^[32]，有机质的“表聚”现象和深层根系的穿插作用，使得土壤孔隙呈现出先减小后增大的趋势。

表 5 不同龄组水源涵养功能综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation value of water conservation function at different forest age group		
龄组	综合评价指数	排名
幼龄林	0.612 9	3
中龄林	0.812 9	1
近熟林	0.618 8	2
成熟林	0.448 7	4
过熟林	0.202 0	5

熵权-TOPSIS 法可以完全剔除主观因素的影响, 客观地判断各评价因素的相对重要性, 并且解决因各层次内涵不同, 不能相加的弊端^[33]。同时, 排序结果直观且符合逻辑, 能够有效区分不同生长阶段林分土壤的水源涵养功能的相对优劣。本研究采用熵权-TOPSIS 法对 5 个龄组刺槐林土壤进行水源涵养功能评价并排序, 结果表明: 各龄组刺槐林的水源涵养能力随龄组的攀升先增大后减小, 可见刺槐林水源涵养功能有一定阈值, 到达一定林龄, 水源涵养功能将逐渐减弱。这与张甜等^[26]、WANG 等^[34]的研究结果一致。水源涵养能力最佳的为中龄林。ZHAO 等^[10]在晋西黄土区不同林龄刺槐林生态功能的研究中也表明: 刺槐人工林在成熟前主要提供水源涵养功能。这可能是由于叶面积指数、凋落物蓄积量、土壤毛管孔隙度等均随龄组的攀升而先增大后减小, 在中林龄阶段达到峰值, 进而影响水源涵养功能。

4 结论

在刺槐林林冠层, 各龄组叶面积指数、冠层截留率变化趋势一致, 均表现出随龄组的攀升而先上升后下降的趋势, 中龄林水源涵养能力高于其余龄组林分。在凋落物层, 凋落物蓄积量表现为随龄组攀升先增大后减小, 中龄林高于其余林分; 凋落物最大持水量和最大拦蓄量在中龄林和成熟林中有更好的表现; 同时半分解层的蓄积量、最大持水量、有效拦蓄量均大于未分解层。在土壤层, 土壤容重、土壤非毛管孔隙度、土壤总孔隙度及土壤各孔隙对应的持水量表现为幼龄林高于其余林分, 毛管孔隙度和毛管持水量均表现为中龄林高于其余林分。在 0~100 cm 土层中, 土壤孔隙度和持水量基本随土层深度增加而先减小后增大的趋势, 土壤容重则与之相反。通过熵权法分析认为, 影响刺槐林地水源涵养功能的主要因素为叶面积指数、非毛管孔隙度、林冠截留能力, TOPSIS 法评价各龄组刺槐人工林水源涵养能力从高到低依次中龄林、近熟林、幼龄林、成熟林、过熟林, 说明在相似的立地条件下, 中林龄刺槐林地有更好的水源涵养功能。建议结合研究区现有低效林改造及功能提升工程, 对现有低效和衰退林分进行合理采伐与补植, 以更好地提升刺槐人工林水源涵养功能。

5 参考文献

- [1] COSTANZA R, D'ARCE R, de GROOT R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Ecological Economics*, 1998, **25**(1): 3–15.
- [2] YI Caili, ZHAO Xinyu, FENG Yingjie, *et al.* Regional climax forest has a better water conservation function than pine plantation: a comparative study in humid subtropical China[J/OL]. *CATENA*, 2024, **239**: 107935 [2025-03-29]. DOI: 10.1016/j.catena.2024.107935.
- [3] 匡舒雅, 周泽宇, 梁媚聪, 等. IPCC 第六次评估报告第二工作组报告解读[J]. *环境保护*, 2022, **50**(9): 71–75.
KUANG Shuya, ZHOU Zeyu, LIANG Meicong, *et al.* Interpretation of the main conclusions of IPCC AR6 working group II report [J]. *Environmental Protection*, 2022, **50**(9): 71–75.
- [4] 邓雅元, 王美琪, 闫烨琛, 等. 白洋淀上游山区典型流域水源涵养林不同植被优化配置[J]. *浙江农林大学学报*, 2025, **42**(3): 457–467.
DENG Yayuan, WANG Meiqi, YAN Yechen, *et al.* Optimal allocation of different vegetation types for water conservation forests in typical watershed in the upper reaches of Baiyangdian mountainous area [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **42**(3): 457–467.
- [5] 刘宇, 宋进喜, 邢璐通, 等. 黄土高原植被变化对土壤侵蚀的影响[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2024, **54**(3): 398–412.
LIU Yu, SONG Jinxi, XING Lutong, *et al.* The impact of vegetation changes on soil erosion in the Loess Plateau [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2024, **54**(3): 398–412.
- [6] 赵丹阳, 毕华兴, 侯贵荣, 等. 不同林龄刺槐林植被与土壤养分变化特征[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, **19**(3): 56–63.
ZHAO Danyang, BI Huaxing, HOU Guirong, *et al.* Evolution of vegetation and soil nutrients of artificial *Robinia pseudoacacia* forest [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, **19**(3): 56–63.
- [7] 于博威, 刘高焕, 刘庆生, 等. 晋西黄土丘陵区不同退耕年限刺槐林土壤养分效应[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(4): 188–193.
YU Bowei, LIU Gaohuan, LIU Qingsheng, *et al.* Effects of soil nutrient in *Robinia pseudoacacia* forests with various ages in

- the Loess Hilly Region of western Shanxi Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(4): 188–193.
- [8] 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.
- ZHANG Xuelong, JIN Ming, LIU Xiande, *et al.* Litter storage and its water holding capacity characteristics of five typical shrubs in Qilian Mountains [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(5): 735–740.
- [9] SANAEI A, ALI A, YUAN Zuoqiang, *et al.* Context-dependency of tree species diversity, trait composition and stand structural attributes regulate temperate forest multifunctionality[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2021, **757**: 143724[2025-03-29]. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143724](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143724).
- [10] ZHAO Danyang, BI Huaxing, WANG Ning, *et al.* Does increasing forest age lead to greater trade-offs in ecosystem services? A study of a *Robinia pseudoacacia* artificial forest on the Loess Plateau, China[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2024, **926**: 171737[2025-03-29]. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.171737](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171737).
- [11] 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.
- YANG Jiahui, TAN Wei, MAO Guangxian, *et al.* Water conservation ability of litter in *Cryptomeria fortunei* plantation with different age groups in central Guizhou [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(2): 296–301, 308.
- [12] 侯贵荣, 毕华兴, 魏曦, 等. 黄土残塬沟壑区刺槐林枯落物水源涵养功能综合评价[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(2): 251–257.
- HOU Guirong, BI Huaxing, WEI Xi, *et al.* Comprehensive evaluation of water conservation function of litters of *Robinia pseudoacacia* forest lands in Gully Region on Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(2): 251–257.
- [13] 邱陆旸, 张丽萍, 陆芳春, 等. 基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(4): 74–79.
- QIU Luyang, ZHANG Liping, LU Fangchun, *et al.* Evaluation of forest soil anti-erodibility and influencing factors analysis based on entropy method [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(4): 74–79.
- [14] 朱柱, 杨海龙, 黄乾, 等. 青海高寒黄土区典型水源涵养林健康评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(6): 1166–1173.
- ZHU Zhu, YANG Hailong, HUANG Qian, *et al.* Health evaluation of typical water conservation forests in the alpine loess area of Qinghai [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(6): 1166–1173.
- [15] 全国森林资源标准化技术委员会. 主要树种龄级与龄组划分: LY/T 2908—2017 [S]. 北京: 国家林业和草原局, 2017.
- National Technical Committee on Forest Resources of Standardization Administration of China. *Regulations for Age-class and Age-group Division of Main Tree-species: LY/T 2908–2017*[S]. Beijing: National Forestry and Grassland Administration, 2017.
- [16] ZHANG Biao, LI Wenhua, XIE Gaodi, *et al.* Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value [J]. *Ecological Economics*, 2010, **69**(7): 1416–1426.
- [17] 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 Bin, QIN Wuming, DAI Jun, *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.
- [18] 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 Rishi, HUANG Guangyou, NAN Yawei, *et al.* Water conservation function of *Taiwania flousiana* plantations at different ages in northwest Guangxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(5): 130–136, 143.
- [19] MA Changkun, LUO Yi, SHAO Mingan, *et al.* Estimation and testing of linkages between forest structure and rainfall interception characteristics of a *Robinia pseudoacacia* plantation on China's Loess Plateau [J]. *Journal of Forestry Research*, 2022, **33**(2): 529–542.
- [20] 刘雨, 高光耀, 王棣, 等. 不同疏伐强度下黄土丘陵区刺槐林的水分利用特征[J]. *生态学报*, 2023, **43**(7): 2845–2855.
- LIU Yu, GAO Guangyao, WANG Di, *et al.* Water use characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantations under different thinning intensities in the Loess Hilly Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(7): 2845–2855.
- [21] 王作泉, 贺康宁. 祁连山东部地区不同林分水源涵养能力综合评估[J]. *生态学报*, 2024, **44**(17): 7662–7672.
- WANG Zuoxiao, HE Kangning. Comprehensive assessment of water conservation capacity in different forest stands in the

- eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(17): 7662–7672.
- [22] GESSNER M O, SWAN C M, DANG C K, *et al.* Diversity meets decomposition [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, **25**(6): 372–380.
- [23] 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.
- GAO Di, GUO Jianbin, WANG Yanhui, *et al.* Hydrological effects of forest litters of *Larix principis-rupprechtii* plantations with varying ages in Liupanshan of Ningxia, China [J]. *Forest Research*, 2019, **32**(4): 26–32.
- [24] 李良, 翟洪波, 姚凯, 等. 不同林龄华北落叶松人工林枯落物储量及持水特性研究[J]. 中国水土保持, 2010(3): 32–34, 45, 60.
- LI Liang, ZHAI Hongbo, YAO Kai, *et al.* Litter reserves and water-holding capacity of *Larix principis-rupprechtii* with different stand ages [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2010(3): 32–34, 45, 60.
- [25] 李江文, 何邦印, 李彩, 等. 不同林龄刺槐林下植物群落物种组成及功能多样性差异分析[J]. 植物科学学报, 2022, **40**(3): 315–323.
- LI Jiangwen, HE Bangyin, LI Cai, *et al.* Differences in species composition and functional diversity of understory plant communities of *Robinia pseudoacacia* L. stands with different ages [J]. *Plant Science Journal*, 2022, **40**(3): 315–323.
- [26] 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.
- [27] 白云星, 周运超, 张薰元, 等. 马尾松针阔混交人工林凋落物和土壤水源涵养能力[J]. 林业科学, 2021, **57**(11): 24–36.
- BAI Yunxing, ZHOU Yunchao, ZHANG Xunyu, *et al.* Water conservation capacity of litter and soil in mixed plantation of *Pinus massoniana* and broadleaved trees [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, **57**(11): 24–36.
- [28] 梁晓娇, 王树力. 阿什河源头不同类型红松人工林枯落物及其土壤水文特性[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(1): 140–145, 152.
- LIANG Xiaojiao, WANG Shuli. Litter and soil hydrological properties of *Pinus koraiensis* plantations in Ashi river's headstream [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(1): 140–145, 152.
- [29] 王景燕, 龚伟, 胡庭兴, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后的土壤水源涵养功能[J]. 浙江农林大学学报, 2007, **24**(5): 569–574.
- WANG Jingyan, GONG Wei, HU Tingxing, *et al.* Water conservation in a natural evergreen broadleaf forest and three plantations in southern Sichuan Province [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2007, **24**(5): 569–574.
- [30] 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.
- JING Ruyan, HUANG Yali, DING Xinjing, *et al.* Difference of litter decomposition in *Robinia pseudocacia* and *Fraxinus velutina* mixed forests with different ages in Yellow River Delta [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(6): 333–337.
- [31] 温云杰, 张建诚, 杨娜, 等. 长期秸秆还田配施有机肥对土壤有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. 农业工程学报, 2024, **40**(21): 74–81.
- WEN Yunjie, ZHANG Jiancheng, YANG Na, *et al.* Effects of the long-term application of organic fertilization and straw returning on the components of soil organic carbon and pores [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, **40**(21): 74–81.
- [32] 郭钰, 姚佳峰, 董媛, 等. 油松和刺槐纯林及混交林根系分布特征[J]. 应用生态学报, 2023, **34**(11): 2881–2888.
- GUO Yu, YAO Jiafeng, DONG Yuan, *et al.* Root distribution characteristics of monoculture and mixture of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* plantation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, **34**(11): 2881–2888.
- [33] 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 Jianan, ZHANG Jianjun, ZHANG Haibo, *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.
- [34] WANG Qiuming, LIU Hongyan, LIANG Boyi, *et al.* Will large-scale forestation lead to a soil water deficit crisis in China's drylands? [J]. *Science Bulletin*, 2024, **69**(10): 1506–1514.