

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.04.011 CSTR:32310.14.stbcbx.2025.04.011

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.

WANG Zhihao, ZHANG Pengfei, JIA Xiaoxu, et al. Water conservation function of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stands at different ages in Mu Us sandy land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):100-108,117.

毛乌素沙地不同林龄樟子松水源涵养功能

王志豪¹, 张鹏飞², 贾小旭^{3,4}, 王小林^{1,5}

(1.榆林学院生命科学学院,陕西榆林719000; 2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌712100;
3.中国科学院地理科学与资源研究所黄河三角洲现代农业工程实验室,北京100101; 4.中国科学院大学
资源与环境学院,北京101408; 5.陕北干旱区作物节水工程技术研究中心,陕西榆林719000)

摘要: [目的] 为明确不同林龄樟子松水源涵养功能的差异。 [方法] 基于2023—2024年野外定位观测试验获得的穿透雨量、树干径流量、土壤体积含水率和枯落物质量含水率,量化不同林龄(10、15、20 a)樟子松的水源涵养功能差异。 [结果] 随着林龄增长,冠层结构发育显著改变降水分配格局,穿透雨和树干径流占比相对降雨量降低,而冠层截留能力持续增强,反映成熟冠层对降雨再分配的关键作用,10、15、20 a林龄冠层截留量分别占降雨量17.7%、29.4%和35.4%。林下枯落物层的发育呈显著年龄效应,其持水能力随凋落物积累呈指数增长特征,与表层土壤持水功能形成协同增效机制。土壤水库的主导地位表明深层储水系统的稳定性,而不同林龄土层蓄水特征的差异则揭示植被—土壤互作关系的动态演变。水源涵养功能随林龄呈单峰变化趋势,相较于10 a林龄樟子松,15、20 a分别显著增加61.6%和56.0% ($p < 0.05$)。 [结论] 在未来的造林工程和樟子松人工林的可持续发展研究中,樟子松林水源涵养功能随林龄的变化和差异性具有重要的参考价值。

关键词: 毛乌素沙地; 不同林龄; 樟子松; 水源涵养功能

中图分类号: S791.253 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)04-0100-09

Water Conservation Function of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Stands at Different Ages in Mu Us Sandy Land

WANG Zhihao¹, ZHANG Pengfei², JIA Xiaoxu^{3,4}, WANG Xiaolin^{1,5}

(1.School of Life Sciences, Yulin College, Yulin, Shaanxi 719000, China; 2.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Yellow River Delta Modern Agricultural Engineering Laboratory, Institute of Geographic Sciences and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4.College of Resources and Environment, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 5.Crop Water Saving Engineering Research Centre for the Arid Regions of Northern Shaanxi, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to clarify the differences in water conservation function of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stands at different ages. [Methods] We quantified the differences in water conservation functions of *P. sylvestris* var. *mongolica* stands at different ages (10, 15 and 20 years) based on 2023—2024 field observations of throughfall, stemflow soil water content, and litter water content. [Results] As stand age increased, the development of canopy structure significantly altered the pattern of rainfall distribution. Specifically, the proportions of throughfall and stemflow decreased, while canopy interception capacity continued to increase, highlighting the crucial role of mature canopies in redistributing rainfall. For instance, canopy interception accounted for 17.7%, 29.4% and 35.4% of rainfall in 10, 15 and 20-year-old stands, respectively. The understory litter layer also exhibited a significant age effect, with water-holding capacity

收稿日期:2024-11-15 修回日期:2025-04-08 录用日期:2025-05-11 网络首发日期(www.cnki.net):2025-05-23

资助项目:国家自然科学基金项目(U2444217)

第一作者:王志豪(1998—),男,硕士,主要从事樟子松水源涵养功能研究。E-mail:15109973111@163.com

通信作者:贾小旭(1985—),男,博士,研究员,主要从事土壤水文过程及其生态效应研究。E-mail:jiaxx@igsnr.ac.cn

王小林(1983—),男,博士,教授,主要从事黄土旱区作物根土界面水肥高效利用生理生态机制研究。E-mail:wangxl8304@163.com

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

increasing exponentially with the accumulation of litter, forming a synergistic effect with the water-holding function of the surface soil. The dominant role of soil water storage highlighted the stability of deep water reservoir, while differences in water storage characteristics among soil layers at different stand ages revealed dynamic vegetation-soil interactions. Water conservation function of the forest ecosystem showed a unimodal trend with stand age. Compared to 10-year-old stands, there were significant increases (61.6% and 56.0%) ($p < 0.05$) in 15 and 20-year-old stands. [Conclusion] The age-dependent variations in water conservation function can provide crucial references for future reforestation projects and sustainable management of *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations.

Keywords: Mu Us sandy land; stand age; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; water conservation function

Received: 2024-11-15

Revised: 2025-04-08

Accepted: 2025-05-11

Online(www.cnki.net): 2025-05-23

沙地作为中国西北干旱区重要的自然景观,约占中国国土面积的16%。其中毛乌素沙地面积约4.88万 km^2 ,位于黄河中上游,是黄河流域生态建设的重要区域之一,在三北防护林四期工程中被列为重点管理区域^[1]。毛乌素沙地生态环境脆弱,荒漠化问题严重。三北防护林项目实施以来,该地区植被覆盖率逐渐增加,沙区面积逐渐减少,生态环境得到显著改善。然而,该地区主要以人工林为主,植被生长仍处于初级阶段,植树造林过程中没有考虑植被的环境承载能力,偏向于建立生态林,导致人工林生态系统脆弱、地下水过度开采和经济效益低下等问题日益凸显^[2]。

森林生态系统作为最广泛、最复杂和最丰富的陆地生态系统,具有多种水文调节功能^[3]。降水经过植被冠层、枯落物层和土壤层时重新分配,从而起到保持水土、补充地下水、减少地表蒸发和调节河流径流的作用^[4]。该结构特征的水文效应也随林龄发育阶段发生动态变化。研究^[5]结果表明,森林的水源涵养功能受林龄的显著影响。山楂人工林在4、7、11 a林龄时的总地上水分持水量呈数量级增加趋势。0~40 cm土层土壤的持水能力和入渗能力也呈相似趋势。油松在不同林龄期间的冠层截留量和冠层截留率也随林龄的增加而增加^[6]。针栎凋落物的蓄水量在不同林龄间也有显著的差异^[7]。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)作为毛乌素沙地的主要树种之一,具有独特的生理和形态特征,此特性在抗旱和抗寒方面发挥着重要作用^[8-9]。能通过冠层截留和枯落物层截持降水,减少地表径流对沙土的冲刷,降低风蚀风险^[4];同时,其根系形成的“土壤-植被水通道”可调节深层土壤水再分配,缓解沙地水分垂直异质性,为耐旱灌草生长提

供生态位水分补给。近年来,在中国三北地区,特别是毛乌素沙地,已经建立70万 hm^2 的樟子松人工林。樟子松人工林在荒漠化防治、水土保持、碳汇和生物多样性保护方面具有突出贡献,有助于维护毛乌素沙地生态系统的稳定性^[10]。水分作为荒漠区植被生长的最重要因素之一,对毛乌素植被的可持续发展至关重要。尽管樟子松人工林在毛乌素沙地的适应能力较强,但随着林龄的增加,出现生长缓慢,甚至枯死等衰退现象^[11-12]。现有评估体系多聚焦于流域或区域等宏观尺度^[13-14],而单株尺度研究则普遍局限于不同植被类型的横向对比^[15],且测量方法多为室内控制法,但在毛乌素沙地典型造林植被樟子松不同林龄阶段的水源涵养能力缺少长期且连续野外实地监测。因此,确定毛乌素沙地樟子松人工林生态系统在不同林龄阶段的水源涵养能力差异,对于理解植物-水分关系和预测未来植被生长动态具有重要意义。

基于此,以毛乌素沙地不同林龄樟子松为研究对象。通过监测樟子松人工林的穿透雨量、树干径流量、冠层截留量、枯落物蓄水量和土壤蓄水量变化特征,确定樟子松人工林在不同林龄阶段的水源涵养功能差异。本研究的目的是:1)通过监测毛乌素沙地不同林龄樟子松的降水量、穿透雨量、树干径流量和冠层截留量,从而量化不同林龄樟子松冠层降雨再分配的差异。2)通过测定冠层截留量、枯落物蓄水量和土壤蓄水量,剖析不同林龄樟子松水源涵养功能各构成要素的差异及贡献。3)确定樟子松人工林随林龄增长的水源涵养能力变化趋势。研究结果将有助于进一步了解不同林龄樟子松的水源涵养能力变化,以及林分发育对森林水分平衡的影响。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地圪丑沟流域(37°27′~39°23′N, 107°20′~111°30′E)(图 1),流域面积 45 km²,海拔 1 145~1 263 m,属半干旱大陆性气候区,年平均气温 9.1 °C,2001—2016 年平均年降水量 375.4 mm,7—9 月占总降雨量的 70% 以上^[16]。为防治荒漠化和风蚀,自 20 世纪末以来,研究区进行大规模的植树造林。因此,植被覆盖率从不足 3% 增加到 50% 以上^[17]。流域以人工植被占主导地位,主要物种有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)、长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata* Pall.)、沙柳(*Salix cheliophila*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)和沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.)等^[14]。樟子松作为该流域主要的乔木种类,且林龄 10、15、20 a 的均存在大面积种植,为研究不同林龄樟子松水源涵养功能差异性提供有利条件。

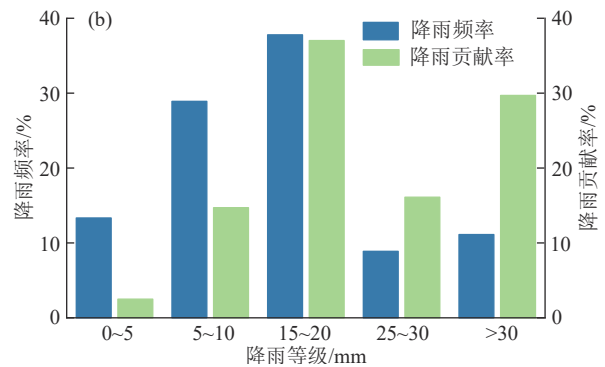
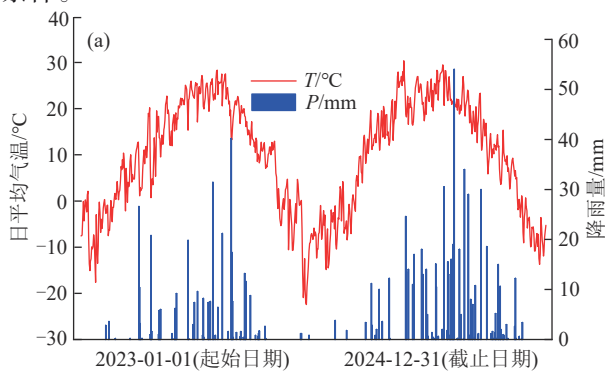


图 2 观测期间气象条件

Fig. 2 Meteorological conditions during the observation period

表 1 观测样地基础指标

Table 1 Basic indicators of the observed samples

林龄/a	胸径/cm	株高/m	枯落物厚度/cm	冠层面积/m ²	叶面积指数
10	4.73±0.55c	8.31±0.99c	0.96±0.89c	2.18±0.72c	1.80±0.11c
15	6.66±0.46b	13.69±0.98b	1.98±1.04b	5.09±1.64b	2.27±0.14b
20	9.67±0.44a	18.22±2.44a	3.77±1.19a	8.15±2.51a	2.93±0.17a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一指标不同林龄间差异显著($p < 0.05$)。

1.3 数据收集与处理

1.3.1 降雨再分配 在每个林龄樟子松林下随机放置 30 个穿透雨收集装置,直径和高均为 10 cm,收集穿过樟子松冠层的穿透雨量。穿透雨计算公式为:

$$TF = \frac{\sum_{n=1}^n \frac{V_{TF} \times 10}{A}}{n} \quad (1)$$

式中:TF 为穿透雨量,mm; V_{TF} 为穿透雨收集量,L; A 为穿透雨收集装置的底面积,m²; n 为穿透雨收集装置的数量。

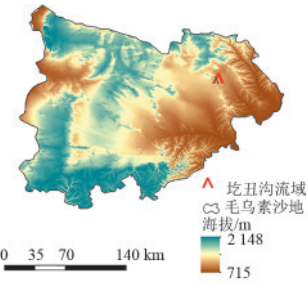


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographic location of the study area

1.2 试验设计

试验于 2023 年 6 月 20 日至 10 月 15 日和 2024 年 4 月 20 日至 9 月 20 日在圪丑沟流域毛乌素治沙造林基地进行。观测期间研究区的气象条件见图 2。分别在林龄为 10、15、20 a 的樟子松人工林中,选取 10 m×10 m 的长期观测样地,每个样地基础指标见表 1。每个样地随机布设 30 个穿透雨收集装置、6 个树干径流收集装置和 3 根中子管,分别用于穿透雨、树干径流和土壤质量含水率的收集和测定。该样地的密度、地形、土壤组成等客观条件均一致。

在樟子松树干距地面 50~100 cm 处,通过环绕樟子松树干的圆形塑料软管收集树干茎流,并在软管下方连接 1 个 15 L 的塑料桶测量树干茎流。树干茎流的计算公式为:

$$SF = \frac{V_{SF}}{CA} \quad (2)$$

式中:SF 为树干茎流,mm; V_{SF} 为树干茎流收集量,L; CA 为冠层面积,m²;冠层截流的计算公式为:

$$I = P - TF - SF \quad (3)$$

式中: I 为冠层截留,mm; P 为降水量,mm; TF 为穿透雨,mm; SF 为树干径流,mm。

每次降雨事件结束后,立即测定穿透雨量和树干径流量,以减少水分蒸发对结果的影响;如降雨发生在夜间,则在次日清晨测量。

1.3.2 枯落物蓄水量 在不同林龄的樟子松样地中距离树干20、50、100 cm的位置采集20 cm×20 cm的枯落物样本,采集后枯落物立即装入牛皮纸档案袋测定湿重,在65℃下烘烤48 h,完全干燥后测量干重。每隔5~7 d采集1次。枯落物蓄水量的计算方法为:

$$L = L_s \times \beta / 10\,000 \quad (4)$$

式中: L 为枯落物蓄水量,mm; L_s 为枯落物现存量, g/m^2 ; β 为枯落物质量含水率,%;10 000为单位换算比例。

1.3.3 土壤蓄水量 分别在不同林龄的樟子松样地中分别布设3根中子管。使用土壤水分中子测定仪(CNC503B)每隔5~7 d测量1次土壤体积含水率。每隔10 cm测量1次,直至土壤饱和层。土壤蓄水量通过土壤水分体积分数与土壤厚度计算,公式为:

$$S = D_i \times Y_i \quad (5)$$

式中: S 为土壤蓄水量,mm; D 为土壤厚度,mm; Y 为该土层的土壤体积含水量,%; i 为不同深度土层分层。

中子水分测定标定工作在试验小区附近进行,充分考虑了土壤质地、深度和植被类型的代表性,该标定结果可较好地代表研究区的情况。本试验所用中子水分测定的标定曲线为:

$$Y_i = 0.079\,1CR - 0.323\,1 (R^2 = 0.86, p < 0.01) \quad (6)$$

式中: Y 为体积含水率,%; CR 为中子计数比。

1.3.4 综合水源涵养量 不同林龄的樟子松人工林的综合水源涵养量表示为枯落物蓄水量和土壤蓄水量之和:

$$WC = C + L + S \quad (7)$$

式中: WC 为综合水源涵养量,mm; C 为冠层截留量,mm; L 为枯落物蓄水量,mm; S 为土壤蓄水量,mm。

降雨量和气温气象数据通过研究区1~2 km的自动气象站获取。

1.4 数据分析

采用单因素方差分析不同林龄樟子松人工林的穿透雨、树干径流、冠层截留、枯落物蓄水量和土壤蓄水量的差异。统计分析使用SPSS 26.0软件进行,图表使用Origin 2021和ArcGIS 10.8软件生成。

2 结果与分析

2.1 不同林龄樟子松植被特征

由表1可知,不同林龄樟子松人工林生长参数存

在显著梯度差异($p < 0.05$)。方差分析表明,胸径、株高、枯落物厚度、冠层面积和叶面积指数(LAI)均随林龄增加呈指数增长趋势。20 a林龄樟子松各指标达峰值,胸径、株高、枯落物厚度、冠层面积和叶面积指数分别为9.67 cm、18.22 m、3.77 cm、8.15 m²和2.93。

2.2 不同林龄樟子松冠层水源涵养特征

各林龄樟子松林中穿透雨和树干径流的测定时间为2023年6月20日至10月15日和2024年4月20日至9月20日,日平均气温为21.1℃,共观测到45次有效降雨事件,累计降雨量为638.8 mm。不同降雨频率与降雨贡献率呈相似分布特征,其中,中等降雨量(10~20 mm)的降雨频率较高,达37.8%,同时也贡献37.0%的降雨量(图2)。

不同林龄樟子松降雨再分配特征存在差异(图3)。10 a林龄(519.0 mm, 76.9%±11.2%)、15年林龄(468.0 mm, 68.4%±12.2%)和20 a林龄(435.5 mm, 62.9%±12.8%)樟子松的穿透雨总量(TF, mm)和相应的穿透雨率(TF%)存在差异。10 a林龄樟子松的穿透雨量为0.9~45.2 mm,变异系数相对较小(CV=84.1%);而15 a林龄为0.7~43.7 mm(CV=87.7%),20 a林龄为0.6~42.4 mm(CV=89.3%)。随着林龄的增加,20 a林龄(8.7 mm, 1.0%±0.9%)和15 a林龄(12.2 mm, 1.4%±1.1%)相比于10 a林龄(37.7 mm, 5.1%±3.4%)樟子松的树干径流总量和相应树干径流率降低。10 a林龄樟子松的穿透雨量为0.017~5.550 mm,变异系数相对较小(CV=143.6%);而15 a林龄为0.003~2.132 mm(CV=168.7%),20 a林龄为0.003~1.681 mm(CV=183.1%)。相应地,10 a林龄樟子松树干径流率为0.7%~13.2%,变异系数相对较小(CV=66.8%)。在冠层截留方面,随着林龄的增加,20 a林龄(193.4 mm, 35.4%±13.6%)和15 a林龄(155.8 mm, 29.4%±13.4%)相比于10 a林龄(87.1 mm, 17.7%±12.6%)樟子松的冠层截留总量和相应冠层截留率显著增加。10 a林龄樟子松的冠层截留量为0.1~4.8 mm,变异系数相对较大(CV=62.8%);而15 a林龄为0.1~8.2 mm(CV=52.0%),20 a林龄为0.3~9.9 mm(CV=56.2%)。

不同林龄樟子松的穿透雨量、树干径流量和冠层截留量与降雨量间存在显著线性关系(图4)。根据回归方程,10、15、20 a林龄樟子松产生穿透雨的降雨阈值分别为1.1、1.6、1.8 mm。当降雨量超过4.8、6.3、6.5 mm时,10、15、20 a林龄樟子松开始产生树干径流。

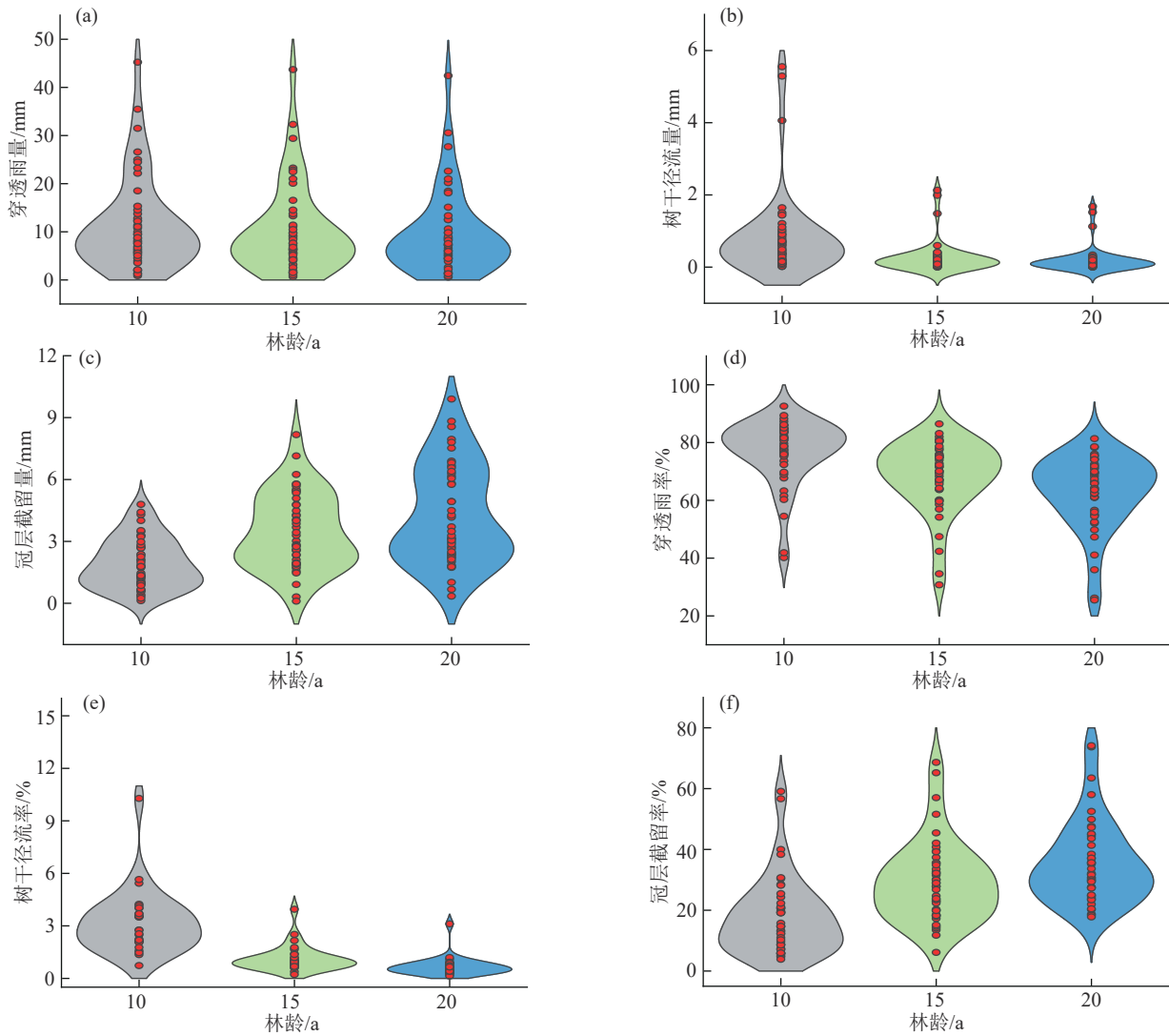
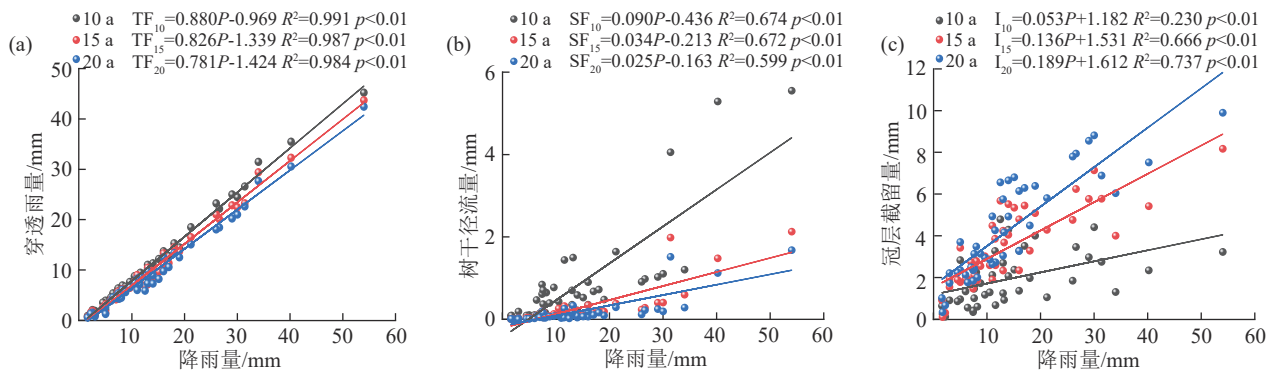


图3 不同林龄樟子松人工林的穿透雨量、树干径流量、冠层截留量及其占降雨量比例

Fig. 3 Throughfall, stemflow, canopy interception, and their proportions of rainfall in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stands at different ages



注:TF、SF和I分别代表穿透雨量、树干径流量和冠层截留量;10-yr、15-yr和20-yr分别为10、15、20 a年樟子松人工林。下同。

图4 不同林龄樟子松的穿透雨、树干径流、冠层截留与降雨量的线性关系

Fig.4 Linear relationships between throughfall, stemflow, canopy interception, and rainfall in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stands at different ages

2.3 不同林龄樟子松枯落物层水源涵养特征

整个观测期间,10 a [(0.7±0.2) kg/m², (8.8±4.4%)],15 a [(1.5±0.4) kg/m², (12.2±3.9%)]和20 a [(2.6±0.7) kg/m², (15.6±4.7%)]林龄樟子松

的枯落物平均干重和质量含水率存在显著差异(图5)。10 a林龄樟子松枯落物干重为0.4~1.2 kg/m²,变异系数相对较小(CV=24.9%);而15 a林龄为0.8~2.5 kg/m²(CV=28.5%),20 a林龄为1.1~4.1 kg/m²

(CV=27.1%)。相比于 10 a 林龄樟子松林的平均枯落物干重, 15、20 a 分别显著增加 114.3% 和 271.4% ($p < 0.05$)。10 a 林龄樟子松的枯落物质量含水率为 2.8%~19.4%, 变异系数相对较大(CV=49.6%); 而 15 a 林龄为 3.0%~22.5%(CV=31.8%), 20 a 林龄为 3.6%~31.8%(CV=30.2%)。相比于 10 a 林龄樟子松林的平均枯落物质量含水率, 15、20 a 分别显著增加 38.6% 和 77.3% ($p < 0.05$)。

10 a [(0.6±0.3) mm]、15 a [(1.8±0.6) mm] 和 20 a [(4.0±1.3) mm] 林龄樟子松的枯落物蓄水量差异显著(图 5)。10 a 林龄樟子松枯落物蓄水量为 0.2~1.2 mm, 变异系数相对较大(CV=45.6%); 15 a 为 0.6~2.9 mm (CV=34.5%), 20 a 为 1.3~6.7 mm (CV=32.4%)。相比于 10 a 林龄樟子松林的平均枯落物蓄水量, 15、20 a 分别显著增加 200.0% 和 566.7% ($p < 0.05$)。

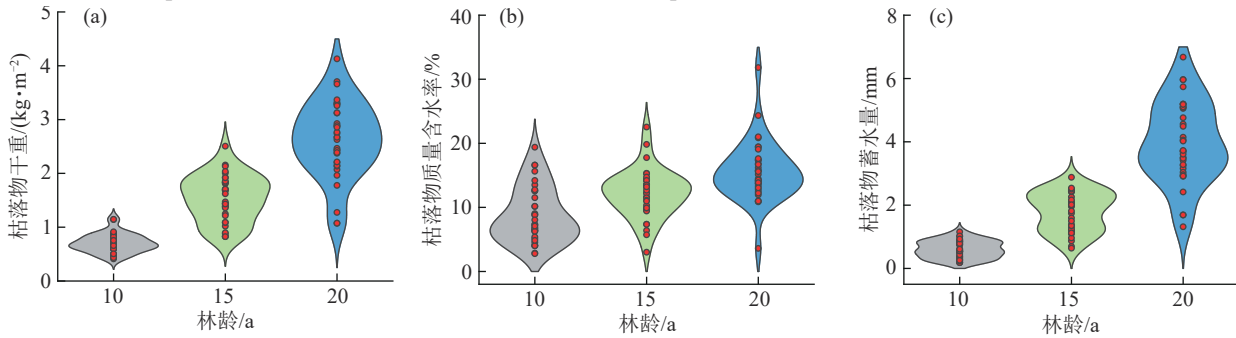


图 5 不同林龄樟子松枯落物干重、质量含水率和蓄水量

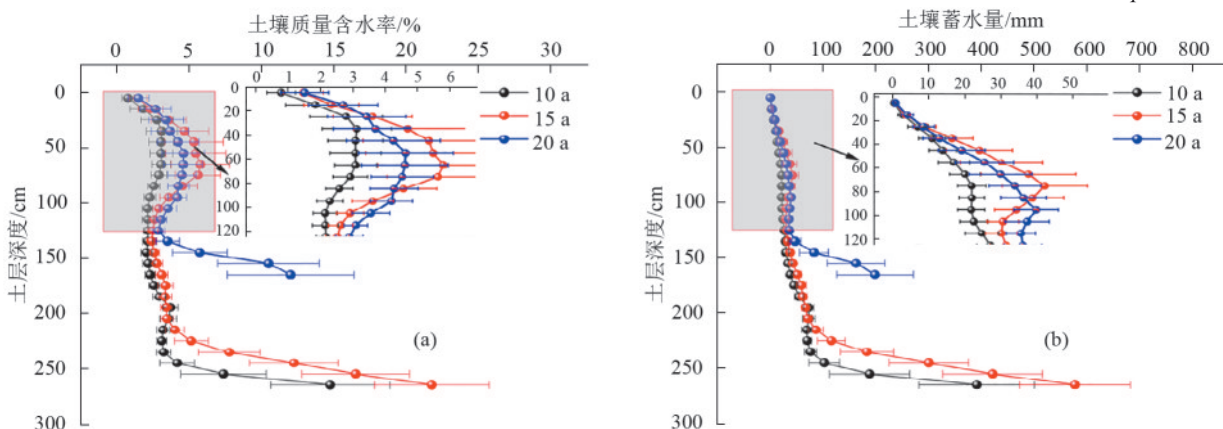
Fig.5 Dry weight of litterfall, water content, and water storage in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stands at different ages

2.4 不同树龄樟子松土壤层水源涵养特征

由图 6 可知, 不同林龄(10、15 和 20 a)樟子松的土壤质量含水率随土层深度的变化分布不同。由于地下水的存在, 20 a 林龄樟子松在 140 cm 以下的土层中土壤质量含水率急剧增加, 而 10、15 a 林龄樟子松的土壤体积含水率深度分布相似, 均表现为 220 cm 以下土层土壤水分急剧增加。因此, 本试验计算不同林龄(10、15、20 a)土壤质量含水率和土壤蓄水量的土层深度均为 0~120 cm。

和 48.0% ($p < 0.05$)。0~120 cm 的土壤蓄水量也呈相同趋势。15 a 林龄樟子松的土壤蓄水量为 297.8 mm, 高于 10 a (184.8 mm) 和 20 a (283.9 mm) 林龄樟子松的土壤蓄水量; 相比于 10 a 林龄樟子松的土壤蓄水量, 15、20 a 分别显著增加 61.6% 和 53.6% ($p < 0.05$)。在土壤表层(0~20 cm)随着林龄的增加土壤蓄水量增加, 分别为 10 a (3.2 mm)、15 a (4.2 mm) 和 20 a (4.8 mm), 但差异不显著($p > 0.05$)。在土壤深层(80~120 mm), 相比于 10 a (91.0 mm) 林龄土壤蓄水量, 15 a (133.9 mm) 和 20 a (140.1 mm) 分别显著增加 47.1% 和 54.0%。相比之下, 在土层中层(20~80 cm)则表现出与整体蓄水量相似的特征, 相比于 10 a (90.7 mm) 林龄土壤蓄水量, 15 a (159.6 mm) 和 20 a (130 mm) 分别显著增加 76.0% 和 43.3% ($p < 0.05$)。

随着樟子松林龄的增加, 0~120 m 的土壤质量含水率呈先增加后减少趋势。15 a 林龄樟子松的平均土壤质量含水率为 4.0%±1.5%, 高于 10 a (2.5%±0.9%) 和 20 a (3.7%±0.9%); 相比于 10 a 林龄樟子松的土壤质量含水率, 15、20 a 分别显著增加 60.0%



注: n=34。

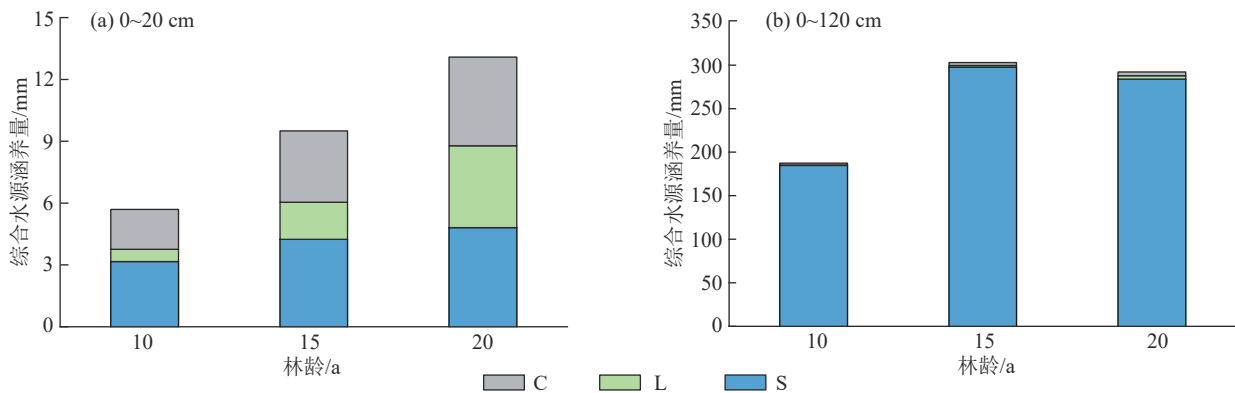
图 6 不同林龄樟子松的土壤质量含水率和土壤蓄水量

Fig.6 Soil water content and soil water storage in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stands at different ages

2.5 不同树龄樟子松综合水源涵养量

不同林龄樟子松人工林水源涵养量存在差异(图7)。以0~120 cm 土层深度计算水源涵养量时,随着林龄的增大,樟子松人工林水源涵养量呈先增加后减少趋势。具体分别为10 a(185.8 mm)、15 a(300.3 mm)和20 a(289.9 mm)。相比于10 a林龄樟子松的水源涵养量,15、20 a分别显著增加65.9%和56.0%($p < 0.05$)。组分贡献分析表明,在樟子松人工林水源涵养功能的相对贡献上,0~120 cm 土层土壤蓄水量(98.9%)显著高于枯落物蓄水量(0.8%)和冠层截

留量(1.2%)。以土壤表层(0~20 cm)计算水源涵养量时,随着林龄的增大,樟子松人工林水源涵养量呈逐渐增加趋势。具体分别为10 a 4.1 mm、15 a 6.8 mm和20 a 10.8 mm,相比于10 a林龄樟子松的水源涵养量,15、20 a分别显著增加65.9%和163.4%($p < 0.05$)。其中,10、15、20 a林龄樟子松的土壤蓄水量分别占水源涵养总量的55.5%、44.6%和36.8%,枯落物蓄水量分别占水源涵养量的10.5%、18.9%、30.4%,而冠层截留量分别占水源涵养量的34.0%、36.4%、32.9%。



注:C、L和S分别表示冠层截留量、枯落物蓄水量和土壤蓄水量。

图7 不同林龄樟子松的综合水源涵养量

Fig. 7 Combined water conservation capacity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stands at different ages

3 讨论

本试验定量分析不同林龄(10、15、20 a)樟子松人工林在冠层、枯落物层和土壤层的水源涵养功能方面的差异。表明随着樟子松林龄的增加,穿透雨总量和穿透雨率呈逐渐降低趋势,而冠层截留总量和冠层截留率显著增加(图3),与不同林龄樟子松冠层结构的发育特征差异有关。幼龄林(10 a)冠层郁闭度较低,枝叶空间分布松散,导致降雨截留能力有限;随着林龄的增加,冠层枝叶密度和分层结构逐渐完善,尤其是20 a林龄冠层趋于密闭化,能够有效拦截更多的降雨,减少穿透雨量并增加冠层截留量^[18]。穿透雨和冠层截留量的变化直接影响降雨对土壤水分的补给,对森林生态系统的水文循环具有重要影响。树干径流率随着樟子松林龄的增加急剧下降,可能是由于随着树木的生长,树干表面积增大,树皮变得更加粗糙,减少雨水沿树干流动的速度和总量^[19]。冠层截留的增加也可能减少到达树干表面的降雨量,进一步降低树干径流量^[20]。产生穿透雨和树干径流时的降雨量阈值随林龄增加而增加,说明林龄较大的人工林的树冠和树干结构更能有效地缓冲小降雨事件,促进雨水的滞留与再分配,与其冠层截留能力的提升形成协同效应。表明在评估森林生态水文功能时,需同步考虑冠层结构与树干形态的

协同演变。

枯落物作为森林生态系统的重要组成部分,对土壤水分保持和水文循环具有重要影响^[21-22]。表明枯落物蓄水量随林龄呈指数增长,其增量主要源于生物量积累和持水性能改善。尽管20 a林龄枯落物蓄水量显著高于幼龄林,但其对水源涵养总量的贡献率仍仅为0.8%,表明枯落物层在樟子松林水文循环中主要发挥短期调蓄功能,而非长期储水主体。主要是因为土壤作为森林生态系统中的主要储水介质,具有更大的蓄水能力和更广泛的分布范围^[23]。枯落物层的水文功能分异还体现在其与降雨事件的动态响应。10 a林龄枯落物质量含水率变异系数(CV=49.6%)显著高于20 a林龄(30.2%),表明幼龄林枯落物层对降雨的响应更敏感,可能与未分解凋落物比例高、孔隙结构不稳定有关。而高林龄枯落物层因半分解物质积累形成稳定基质,缓冲降雨波动能力增强。该机制解释为何在极端降雨事件中,高林龄林分地表径流控制能力更优。

土壤蓄水量是评价森林水源涵养功能的重要指标之一^[21,24]。表明0~120 cm 土层土壤蓄水量在15 a林龄达到峰值(297.8 mm),较10、20 a分别增加61.6%、4.8%(图5),呈中间林龄最优的特征。出现此现象的主要原因是,树龄为10 a的樟子松人工林根系

尚未发育成熟,不能有效吸收和利用土壤水分。随着樟子松年龄的增长,其根系逐渐发达,可更好地吸收和利用土壤中的水分。此时,15 a林龄樟子松的土壤水分体积分数达到小高峰,也说明林龄适中的樟子松能够更好地保持土壤水分。然而,随着林龄的不断增加,樟子松的郁闭度加强,林内的光照也减弱,从而导致地表蒸发减弱。随着林龄更大的樟子松对水分的需求量越来越大,它们之间的竞争也越来越激烈,导致对土壤水分的竞争加剧^[25-27]。表明人工林蓄水能力随发育存在临界林龄,超过该阈值后生态耗水主导作用凸显。进一步分析表明,土壤表层(0~20 cm)蓄水量随林龄增加而增加,深层(80~120 cm)在20 a林龄出现140.1 mm的高蓄水量,可能反映樟子松根系分布的垂直扩展策略:幼龄林根系集中于表层争夺水分,而成熟林通过深层根系获取地下水,形成双峰式水分利用模式。此策略虽保证个体生存,但可能导致土壤蓄水功能在系统尺度上呈现非单调变化。

水源涵养量是评价森林生态系统水源涵养功能的关键指标^[28-29]。以0~120 cm土层深度为基准计算水源涵养量时,樟子松人工林的水源涵养能力随林龄增加呈先增强后减弱趋势,具体为15 a(300.3 mm)高于20 a(289.9 mm)和10 a(185.8 mm)林龄的樟子松林。结果表明,林龄适中的15 a林龄樟子松在提升森林水源涵养功能方面存在优势。然而,在不同土层深度内,冠层截留量、枯落物蓄水量和土壤蓄水量对水源涵养功能的相对贡献存在差异。组分贡献分析显示,土壤蓄水量占水源涵养总量的98.0%,凸显其在系统中的核心地位,而冠层截留量和枯落物蓄水量分别仅占1.2%和0.8%。在土壤表层(0~20 cm),随着林龄的增加,土壤蓄水量占水源涵养量的比重逐渐下降,枯落物蓄水量的比重则相应上升,而冠层截留量表现为先增加后减少趋势。此变化反映随着树木生长,冠层截留和枯落物积累对地表水文过程的影响逐渐增强^[25]。冠层截留通过减少地表径流侵蚀风险、调节降雨动能保护土壤结构;枯落物层则通过抑制蒸发维持表层土壤湿度。因此,未来研究需结合过程模型,量化组分的间接水文效应。

综上所述,不同林龄樟子松在降雨再分配和水源涵养功能方面存在差异。其中,15 a林龄的樟子松林具有较好的水源涵养功能,其次是20 a和10 a,而土壤蓄水量是影响水源涵养功能的主要因素。研究结果为樟子松人工林的合理经营和管理提供科学依据,有助于优化森林生态系统的水文功能和生态服务功能。未来的研究应进一步探讨不同林龄樟子松林对气候变化的响应及其对水源涵养功能的影响,

为森林生态系统的可持续发展提供理论支持。

4 结论

冠层截留能力随林龄的增加逐渐增强,但穿透雨和树干径流的衰减导致有效水源输入减少,凸显冠层发育对水文再分配的双刃剑效应。在调节降雨分配的同时可能削弱生态系统的水分可利用性,尤其是在中小降雨事件中,成熟林对降水响应的滞后性可能加剧干旱期的水分竞争压力。枯落物层的蓄水能力随林龄增加呈指数增长,但其对综合水源涵养的贡献受限于持水容量较小。土壤蓄水量在15 a林龄达到峰值,深层根系扩展与蒸腾耗水的权衡可能是驱动蓄水功能先增后减的关键。综上所述,相较于10、20 a林龄的樟子松,15 a林龄的樟子松人工林在保持土壤水分和提升水源涵养功能方面表现最佳,该结果为樟子松人工林的合理经营和管理提供科学依据,有助于优化森林生态系统的水文功能和生态服务功能。

参考文献:

- [1] XIE J L, LU Z X, FENG K. Effects of climate change and human activities on aeolian desertification reversal in Mu Us sandy land, China[J].Sustainability, 2022, 14(3):e1669.
- [2] WANG S, FU B J, PIAO S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J].Nature Geoscience, 2016, 9(1):38-41.
- [3] 吴诗婷,王国兵,杨立青,等.干旱对森林生态系统结构及功能的影响研究进展[J].世界林业研究, 2024, 37(4):37-45.
- [4] WU S T, WANG G B, YANG L Q, et al. Impacts of drought on forest ecosystem structure and function: A review of research progress[J].World Forestry Research, 2024, 37(4):37-45.
- [4] GUO Z W, GAN Y L. Ecosystem function for water retention and forest ecosystem conservation in a watershed of the Yangtze River[J].Biodiversity and Conservation, 2002, 11(4):599-614.
- [5] HE B, QIN W M, WU Q B, et al. Function and value of water conservation in different age classes of *Acacia mangium* plantations[J].Frontiers of Forestry in China, 2007, 2(4):443-447.
- [6] DONG L L, HAN H R, KANG F F, et al. Rainfall partitioning in Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) stands at three different ages[J].Forests, 2020, 11(2):e243.
- [7] 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.
- [7] 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.
- [8] 王炫臻,段义忠,黄来明,等.陕北榆林沙区樟子松人工林蒸腾耗水动态与影响因素[J/OL].土壤学报,1-13 [2025-03-05]
WANG X Z, DUAN Y Z, HUANG L M, et al. This study investigates the dynamics of transpiration and water consumption in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation forests in the Yulin sandy area of north Shaanxi Province, and the factors that affect these processes[J/OL]. Acta Pedologica Sinica, 1-13 [2025-03-05]
- [9] 孙昊慷,韩佳轩,贾建恒,等.不同林龄及径级樟子松径向生长对干旱事件的响应[J/OL].应用生态学报,1-11 [2025-03-05].
SUN H K, HAN J X, JIA J H, et al. The response of radial growth to drought events in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* of varying stand ages and diameter classes is the subject of this study [J/OL]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1-11 [2025-03-05]
- [10] FARLEY K A, JOBBÁGY E G, JACKSON R B. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy [J]. Global Change Biology, 2005, 11(10):1565-1576.
- [11] ZHENG X, ZHU J J, YAN Q L, et al. Effects of land use changes on the groundwater table and the decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in southern Horqin sandy land, northeast China [J]. Agricultural Water Management, 2012, 106:10994-11106.
- [12] SONG L N, ZHU J J, LI M C, et al. Water use patterns of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trees of different ages in a semiarid sandy lands of northeast China [J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 129:94-107.
- [13] 刘俸汝,赵俊三,林伊琳,等.基于气候和土地利用变化的云南省水源涵养功能时空演变及驱动力分析[J].水土保持学报,2024,38(5):212-224.
LIU F R, ZHAO J S, LIN Y L, et al. Temporal and spatial evolution and driving force analysis of water conservation function in Yunnan Province based on climate and land use change[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5):212-224.
- [14] 王刚,卢小坤.黔西北森林生态系统水源涵养功能评估:以毕节市七星关区为例[J].现代农业科技,2025(2):134-137.
WANG G, LU X K. Evaluation of water conservation function of forest ecosystem in northwest Guizhou: A case study of Qixingguan district, Bijie City [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025(2):134-137.
- [15] 葛俸池.黄土高原典型人工植被水源涵养功能研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
GE F C. Study on water conservation function of typical artificial vegetation in Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [16] XIU L N, YAN C Z, LI X S, et al. Monitoring the response of vegetation dynamics to ecological engineering in the Mu Us sandy land of China from 1982 to 2014 [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(9):e543.
- [17] 韩超群,王娇,赵春雷,等.毛乌素沙地典型人工植被根际土壤磷形态特征[J/OL].土壤学报,1-14 [2025-03-05].
HAN C Q, WANG J, ZHAO C L, et al. The following study will examine the morphological characteristics of phosphorus in the soil between roots of typical artificial vegetation in the Maowusu Sandland [J/OL]. Acta Pedologica Sinica, 1-14 [2025-03-05].
- [18] 徐小勤,于澎涛,王彦辉,等.六盘山华北落叶松林的结构随林龄变化及其水文影响[J].林业科学研究,2023,36(1):109-116.
XU X Q, YU P T, WANG Y H, et al. The variation of stand structure with age and its hydrological effects of larch plantation in Liupan Mountains [J]. Forest Research, 2023, 36(1):109-116.
- [19] 谢刚,夏玉芳,郗静,等.不同林龄香椿对林冠截留雨水的的影响[J].贵州农业科学,2013,41(1):153-157.
XIE G, XIA Y F, CHI J, et al. Effects of different age of *Toona sinensis* on forest canopy interception [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(1):153-157.
- [20] 张勇波,谢江,陈国云,等.西双版纳不同树龄橡胶林对降雨的再分配特征[J].热带生物学报,2022,13(1):57-63.
ZHANG Y B, XIE J, CHEN G Y, et al. Characteristics of rainfall redistribution of *Rubber* plantations at different ages in Xishuangbanna [J]. Journal of Tropical Biology, 2022, 13(1):57-63.
- [21] 李凯,王根绪,孙向阳,等.西南地区森林生态系统水源涵养评价[J].地理科学,2023,43(12):2217-2227.
LI K, WANG G X, SUN X Y, et al. Evaluation on water conservation of forest ecosystem in southwest China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(12):2217-2227.
- [22] 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/OL].水土保持学报,1-11 [2025-03-05].
CAO Z T, DENG Y X, TIAN J, et al. This paper sets out to explore the characteristics of litter accumulation in mixed acacia plantations, and its hydrological effect [J/OL]. Journal of Soil and Water Conservation 1-11 [2025-03-05].
- [23] 马文.黄土丘陵区典型人工林土壤水分补给与消耗特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
MA W. Study on soil water supply and consumption characteristics of typical plantations in loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.

(下转第 117 页)