

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.022

CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.022

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.

MO Jiajia, YANG Yanfen, LIU Guobin, et al. Influence of mixed patterns of *Robinia pseudoacacia* artificial forests on soil hydraulic properties in hilly-gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):301-309.

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

莫佳佳¹, 杨艳芬^{1,2}, 刘国彬^{1,2}, 王兵^{1,2}, 马金龙¹

(1. 西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌, 712100)

摘要: [目的] 研究旨在揭示黄土丘陵沟壑区刺槐混交林对土壤水力性质的影响, 为该区人工林土壤水分的高效利用提供科学依据。[方法] 选取黄土丘陵沟壑区刺槐×油松、刺槐×山杏、刺槐×山桃、刺槐×沙棘、刺槐×紫穗槐为研究对象, 以刺槐纯林为对照, 系统研究刺槐混交林土壤质量含水量(0~500 cm)、表层土壤水分特征曲线、田间持水量、最大有效含水量和土壤饱和导水率的影响。[结果] 1) 刺槐混交林(除刺槐×山杏)显著提高0~100 cm土层土壤质量含水量, 较刺槐纯林提高1.75%~30.61%; 2) 相同基质势下, 刺槐×山桃、刺槐×油松、刺槐×紫穗槐土壤质量含水量较刺槐纯林高0.01%~6.71%; 3) 刺槐混交林田间持水量、最大有效含水量和土壤饱和导水率较刺槐纯林提高11.97%~56.47%、4.78%~90.78%、16.67%~150.00%, 其中刺槐×油松和刺槐×山桃较高。[结论] 刺槐×油松、刺槐×山桃土壤透水和持水性能较好, 二者可作为当地植被建设的推荐模式。研究结果为黄土高原丘陵沟壑区的植被配置优化提供参考。

关键词: 刺槐混交林; 土壤质量含水量; 土壤水分特征曲线; 土壤水分常数; 土壤饱和导水率

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0301-09

Influence of Mixed Patterns of *Robinia pseudoacacia* Artificial Forests on Soil Hydraulic Properties in Hilly-Gully Region of Loess Plateau

MO Jiajia¹, YANG Yanfen^{1,2}, LIU Guobin^{1,2}, WANG Bing^{1,2}, MA Jinlong¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the influence of *Robinia pseudoacacia* mixed forests on soil hydraulic properties in the hilly-gully region of the Loess Plateau, thereby providing a scientific basis for the efficient utilization of soil moisture in the artificial forests of this region. [Methods] *Robinia pseudoacacia*×*Pinus tabuliformis*, *Robinia pseudoacacia*×*Prunus sibirica*, *Robinia pseudoacacia*×*Prunus davidiana*, *Robinia pseudoacacia*×*Hippophae rhamnoides*, and *Robinia pseudoacacia*×*Amorpha fruticosa* were selected as research subjects, with *Robinia pseudoacacia* pure forest as the control. The influence of *Robinia pseudoacacia* mixed forests on soil water content (0–500 cm), surface soil water retention curve, field capacity, maximum available water content, and saturated hydraulic conductivity was systematically investigated. [Results] 1) Except for *Robinia pseudoacacia* × *Prunus sibirica*, the mixed forests significantly increased soil water content in the 0–100 cm layer by 1.75%–30.61% compared to the pure *Robinia pseudoacacia* forest. 2) Under the same matrix potential, the soil moisture content of *Robinia pseudoacacia*×*Prunus davidiana*, *Robinia pseudoacacia*×*Pinus tabuliformis*, and *Robinia pseudoacacia*×*Amorpha fruticosa* was 0.01%–6.71% higher than that of pure *Robinia pseudoacacia* forest. 3) The field capacity, maximum available moisture content, and soil saturated hydraulic conductivity of the

收稿日期: 2025-04-28

修回日期: 2025-06-12

录用日期: 2025-06-20

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(42271042, 42377352, 42130717)

第一作者: 莫佳佳(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事植被恢复研究。E-mail: 2929754002@qq.com

通信作者: 刘国彬(1958—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持与流域管理研究。E-mail: gblu@ms.iswc.ac.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

mixed forests were 11.97%—56.47%, 4.78%—90.78%, and 16.67%—150.00% higher than those of the pure forest, with *Robinia pseudoacacia*×*Pinus tabuliformis* and *Robinia pseudoacacia*×*Prunus davidiana* showing the greatest improvements. [Conclusion] The mixed forests of *Robinia pseudoacacia*×*Pinus tabuliformis* and *Robinia pseudoacacia*×*Prunus davidiana* demonstrate superior soil permeability and water retention capacity, making them recommended patterns for local vegetation restoration. These findings can provide a reference for the optimization of vegetation configuration in the hilly-gully region of the Loess Plateau.

Keywords: *Robinia pseudoacacia* mixed forest; soil water content; soil moisture characteristic curve; soil moisture constants; soil saturated hydraulic conductivity

Received: 2025-04-28

Revised: 2025-06-12

Accepted: 2025-06-20

Online(www.cnki.net): 2025-09-01

土壤水力性质是决定土壤中水分保持和传导能力的关键,对于确保农业和环境的可持续发展具有至关重要的意义^[1]。一般而言,土壤饱和导水率直观体现土壤在饱和状态下传导水分的能力,其值越高说明水分的渗透速度较快,土壤透水性能较好;而土壤水分特征曲线(SWCC)则精准描绘出土壤水吸力与含水率之间的关系,曲线越平缓说明土壤持水能力越好;土壤水分常数(如田间持水量、凋萎系数、最大有效含水量)是土壤在特定条件下含水量保持相对稳定的数值,反映土壤持水能力^[2]。这些指标从不同角度揭示土壤水分的运移规律和特征差异,是土壤水力性质的核心内容。一般而言,土壤水力性质与土壤性质密切相关,随着粉粒、黏粒含量的增加,土壤饱和导水率下降、SWCC在高吸力阶段变得平缓,低吸力阶段变得陡峭,田间持水量则有所提高^[3];而土壤孔隙度特别是大孔隙度的增加,会导致土壤饱和导水率的增加^[4];土壤有机质含量的增加可提高田间持水量、有效含水量及饱和导水率^[1]。受植被恢复驱动的土壤性质变化,土壤水力学性质也存在显著差异。相关研究^[5]表明,植被林分结构越复杂,根系分布范围越广,越有利于提高土壤水分的保持和渗透。与单一树种的纯林相比,混交林的多树种组合形成浅根与深根的互补,促进根系在土壤中的层次分布,从而提高土壤孔隙度和土壤饱和导水率等^[6]。此外,固氮与非固氮树种的组合则提高土壤肥力,促进田间持水量等提升^[7],使得混交林在土壤水力性质方面呈现出更加复杂且多变的变化。然而,这些变化受到混交林的树种组合、混交模式等多重因素的影响。张甜等^[8]研究表明,朴树×榉树的土壤持水能力大于油松×朴树;张益等^[9]研究则发现,侧柏×灌木的土壤饱和导水率大于侧柏×五角枫。因此,混交林的不同树种组合对土壤水力性质的影响调节机制仍有待进一步研究。

黄土高原是我国“两屏三带”生态安全战略格局的关键区域,自1999年退耕还林(草)工程实施以来,

人工林种植面积大幅增加,显著改善土壤理化性质。刺槐是黄土丘陵沟壑区分布最广、面积最大的造林树种,占该区人工林总面积的90%以上^[10]。吴起县地处黄土丘陵区的森林草原过渡带,低降雨、高蒸发导致植被生长受限,不利于刺槐的生长,而营造刺槐混交林促进植被的良好生长,表明刺槐混交林可有效提高水资源利用效率,对该地区的植被恢复产生积极的影响^[11]。然而,土壤水力学性质作为研究刺槐混交林土壤水分利用的基础,其对刺槐混交林的响应机制仍不清楚。因此,本研究以黄土高原丘陵沟壑区刺槐混交林为研究对象,探究刺槐混交林土壤水力性质差异,分析土壤性质对土壤水力学性质的影响,明确土壤水力性质对刺槐林混交的响应机制,以期为黄土丘陵沟壑区土壤水分高效利用和植被优化配置提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市吴起县(36°33′33″~37°24′27″N,107°38′57″~108°32′49″E),处于水蚀风蚀交错区,总面积达到3 791.5 km²,地貌类型为黄土高原梁状丘陵沟壑区,海拔1 233~1 809 m,绝大多数土壤为黄绵土。吴起县属于温带大陆性气候,四季分明,年平均气温8.23℃,极端最高气温37.1℃,极端最低气温-25.1℃,年平均降水量466.36 mm,主要集中在7—9月,占全年降水量的60%以上。自1998年实施封山禁牧退耕还林(草)后,林草盖度显著增加,通过直接营造刺槐(*Robinia pseudoacacia*)与山杏(*Prunus sibirica*)混交林或在沙棘(*Hippophae rhamnoides*)纯林中补植刺槐、油松(*Pinus tabuliformis*)等方式以提高混交林的占比,以改善土壤理化性质,提高生态系统稳定性。

1.2 样点布设与样品采集

在吴起县选取2000年左右营造的刺槐混交林(刺槐×山杏、刺槐×山桃、刺槐×油松、刺槐×沙棘、刺

槐×紫穗槐),以刺槐纯林为对照,每个样地设置3个乔木样方(10 m×10 m)并调查坡度、坡向、树种组成、密度、树高、胸径、林龄、林下植被等信息(表1)。

土壤样品采集:在样方内沿对角线设置样点(土壤饱和导水率和田间持水量为5个样点,土壤质量含水量和SWCC为3个样点),将采样点表面的枯落物

等清除后用内径5 cm、体积100 cm³的环刀采样,每次采样在降雨结束3~5 d后进行。在室内进行土壤质量含水量、土壤饱和导水率、田间持水量、SWCC的测定。其中土壤含水量采用土钻法进行采样,取样深度为500 cm(0~100 cm,每隔10 cm取1个样品;100~500 cm,每隔20 cm取1个样品)(图1)。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

样地	坡度/ (°)	坡向	经纬度	海拔/m	有机质/ (g·kg ⁻¹)	土壤体积 质量/ (g·cm ⁻³)	D ₅₀ / mm	黏粒< (0.002 mm) /%	粉粒 (0.002~ 0.05 mm)/%	砂粒 (0.05~ 2 mm)/%	林龄/ a	树种 组成	密度/ (株·hm ⁻²)	树高/m (地径) /cm	林下主要 草本
刺槐 纯林	10	东南 137°	36°53'28"N 108°13'01"E	1505.5	10.10	1.22	32.58	15.38	59.41	25.21	23	刺槐	2433	8.08± 1.24 10.09± 3.11	赖草、 早熟禾、薊
刺槐× 油松	9	北0°	36°55'41"N 108°09'31"E	1490.25	15.01	1.17	29.97	16.57	60.59	22.84	23	刺槐 油松	1300 800	7.54± 0.93 8.86± 1.59 6.38± 1.03 14.08± 2.42	赖草、 刺菜、 地梢瓜
刺槐× 山杏	16	东85°	36°55'41"N 108°08'12"E	1480.3	11.81	1.18	32.40	16.31	58.13	25.56	23	刺槐 山杏	710 290	7.58± 1.65 10.53± 3.63 7.42± 1.73 19.76± 1.54	茜草、 赖草
刺槐× 山桃	24	东98°	36°55'34"N 108°07'59"E	1510.15	11.73	1.13	34.59	14.81	57.08	28.11	23	刺槐 山桃	1366 667	8.12± 1.65 10.23± 3.33 4.06± 0.53 5.43	长芒草、 拟南芥、 赖草
刺槐× 沙棘	18	西北 305°	36°55'42"N 108°09'00"E	1506.49	8.99	1.17	33.88	13.69	60.24	26.06	23	刺槐 沙棘	833 667	8.56± 1.51 11.88± 3.11 3.30± 0.75 2.63	赖草、 地梢瓜、 小苦荬
刺槐× 紫穗槐	11	西 244°	36°55'28"N 108°07'52"E	1494.67	11.06	1.13	36.26	12.28	58.81	28.90	23	刺槐 紫穗 槐	1633 300	11.50± 2.36 5.76 1.47± 9.39± 0.38 9.61	赖草、 长芒草

注:表中数据为平均值±标准差。

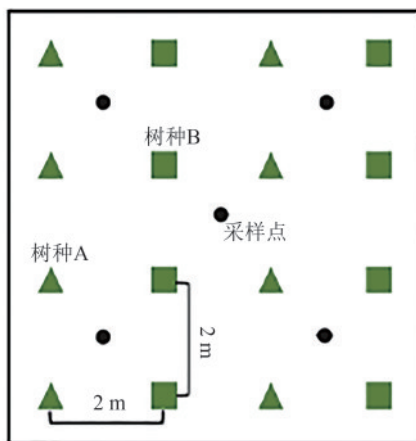


图 1 刺槐纯林及其混交林采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in pure and mixed forests of *Robinia pseudoacacia*

1.3 土壤性质分析

1.3.1 土壤水分测定 将样品中的砾石等杂质剔除掉后,用烘干法测定土壤质量含水量(W),计算公式为:

$$W = \frac{m_w - m_s}{m_s} \quad (1)$$

式中:W为土壤质量含水量,%;m_w为烘干前的湿土重,g;m_s为烘干后的干土重,g。土壤质量含水量为

体积含水量与体积质量的比值。

变异系数(CV)通常用于衡量数据的离散程度,采用变异系数法来划分土壤水分变化的活跃程度层次,计算公式为:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad (2)$$

式中:CV为变异系数;S为标准差; \bar{X} 为平均值。当CV≥30%为速变层,20%≤CV<30%为活跃层,10%≤CV<20%为次活跃层,0<CV<10%为相对稳定层^[12]。

1.3.2 田间持水量(θ_f)测定 采用威尔科克斯法^[13]测定。土壤样品浸泡至饱和直至重量不再发生变化后将其标记为A。在相同土层采集的土壤风干后过1 mm的筛子后将其填入环刀内(体积质量1.27 g/cm³),并标记为B。将环刀A底盖打开,连同滤纸一起放到环刀B上使其紧密接触并将结合处密封,减少水分在试验过程中蒸发和渗漏。8 h后从环刀A内取出20 g左右的原状土测量含水量,此值为田间持水量。所有样品的测定在室内温度和湿度等环境条件一致下进行。

1.3.3 土壤水分特征曲线(SWCC)测定 采用离心法测定 SWCC。高速离心机(GR21G)在 4 ℃ 的恒温下,在 0、1、10、20、40、60、80、100、200、400、600、800 kPa 的土壤基质势下测定土壤体积含水量。SWCC 采用 Van Genuchten(VG)模型进行拟合,拟合公式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha\varphi)^n\right]^m} \quad (3)$$

式中: θ 为土壤体积含水量,%; θ_s 为土壤饱和体积含水量,%; θ_r 为土壤残余体积含水量,%;当土壤基质势为 1 500 kPa 时为凋萎含水量(θ_w);最大有效含水量=田间持水量-凋萎含水量; φ 为土壤基质势,kPa; α 为尺度参数,值越小,土壤平均孔隙直径越大; n 为土壤水分特征曲线形状参数,其值越小,曲线越平缓; $m = 1 - 1/n$ 。

1.3.4 饱和导水率(k_t)测定 采用常水头法^[14]测定 k_t 。将样品浸泡至饱和后取掉上盖并放上滤纸,用另一空环刀接在其上并将连接处密封好,用马氏瓶向空环刀加水并保持 5 cm 常水头,从滴下第 1 滴水开始计时,每 5 min 记录读数直至达到稳定状态(最后 5 个读数没有显著差异),计算公式为:

$$k_t = \frac{Q_n \times 10 \times l}{t_n \times S \times (h + l)} \quad (4)$$

式中: k_t 为饱和导水率,mm/min; Q_n 为 n 个时段入渗的水量,mL; l 为土层厚度,cm; t_n 为第 n 时段的时长,min; h 为水层厚度,cm。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019、SPSS 25.0 软件对数据进行整理和分析,用 Origin 2021b 软件进行曲线拟合与图表绘制。

2 结果与分析

2.1 刺槐混交林土壤含水量垂直分布特征

刺槐纯林及其混交林土壤质量含水量随土层深度逐渐降低且趋于一致,为 3.59%~10.84%,0~100 cm 土层土壤质量含水量较高且具有较大的变异性,主要为活跃层和次活跃层(图 2)。90~100 cm 土层土壤质量含水量较表层 0~10 cm 降低 1.98%~3.90%,而 480~500 cm 土层较 90~100 cm 土层也仅降低 0.53%~2.33%。尽管如此,0~100 cm 土层平均土壤质量含水量依然较 100~200、200~300、300~400、400~500 cm 土层分别高 1.66%~3.49%、2.21%~3.98%、2.66%~4.18%、2.11%~4.20%。刺槐×油松土壤水分在 0~500 cm 土层整体最高,尤其是在 0~100 cm,其土壤质量含水量较其他样地增加 4.02%~31.53%;其次是刺槐×沙棘和刺槐×山桃,0~100 cm 土层土壤质量含水量较刺槐纯林平均高出 19.09%、25.56%;对于刺槐×山杏,在 0~30 cm 土层其土壤质量含水量高于刺槐纯林 0.78%~1.38%,而后均不同程度低于刺槐纯林;刺槐×紫穗槐与刺槐×山杏则相反,在 0~20 cm 土层土壤质量含水量较刺槐纯林低 0.14%~0.61%、而后略高于刺槐纯林。说明刺槐混交林对提高土壤水分利用效率的影响主要集中在浅层土壤,并随着土层深度的增加,其影响效果逐渐减小。

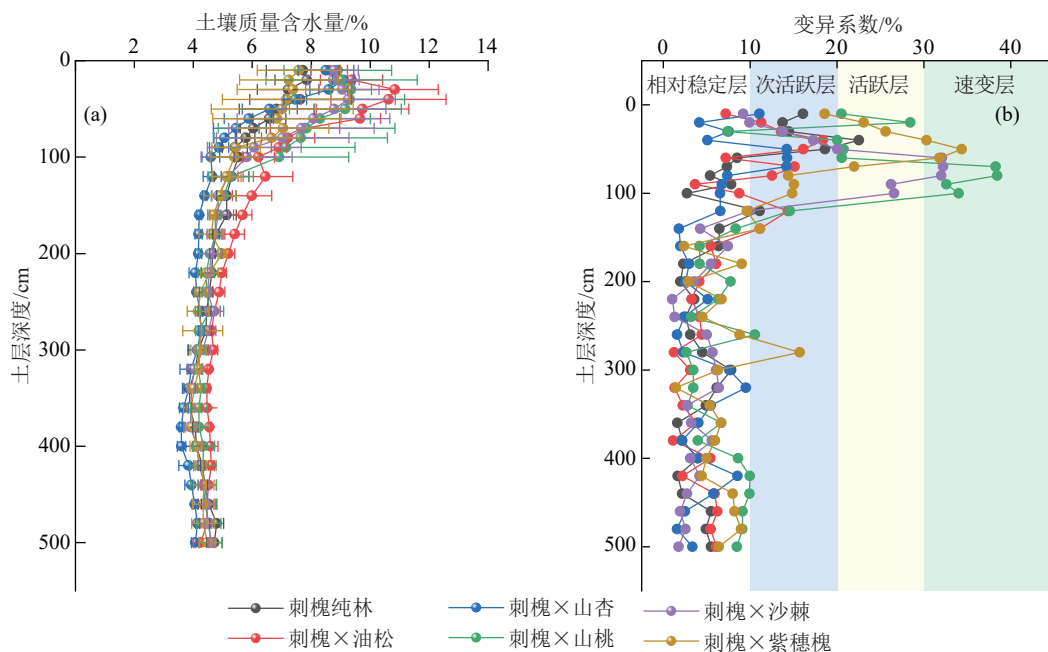


图 2 刺槐纯林及其混交林 0~500 cm 土层土壤质量含水量及变异系数

Fig. 2 Soil water content and coefficient of variation in 0–500 cm soil layer of pure and mixed forests of *Robinia pseudoacacia*

2.2 刺槐混交林土壤水分特征曲线变化特征

刺槐纯林及其混交林 SWCC 呈“L”形,土壤含水量随土壤基质势的增加先急剧下降而后缓慢下降(图 3)。在低吸力段(0~40 kPa),所有刺槐混交林土壤含水量较刺槐纯林高 2.89%~12.09%,该阶段刺槐混交林的土壤持水能力高于刺槐纯林。在中高吸力段(>40 kPa),与刺槐纯林相比,刺槐×山桃、刺槐×油松、刺槐×紫穗槐的土壤体积含水量高 3.08%~14.69%,刺槐×山杏与刺槐×沙棘低 10.98%、5.27%。总体而言,刺槐×油松、刺槐×山桃和刺槐×紫穗槐土壤持水能力强于刺槐纯林和其他混交林。

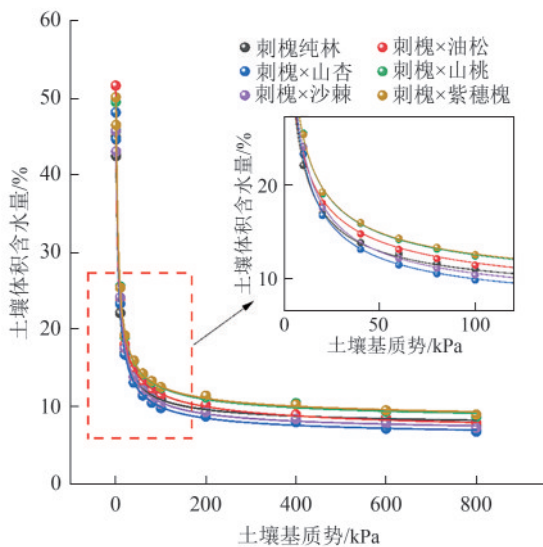


图 3 刺槐纯林及其混交林土壤水分特征曲线

Fig. 3 Soil moisture characteristic curves of pure and mixed forests of *Robinia pseudoacacia*

VG 模型拟合 SWCC 参数见表 2,各刺槐人工林 R^2 均为 0.99,说明采用 VG 模型拟合 SWCC 效果较好; θ_r 为 5.90%~7.95%,刺槐×山桃与刺槐×紫穗槐比刺槐纯林高 0.42%、0.71%,其他混交林比刺槐纯林低 0.46%~1.34%; θ_s 为 45.14%~51.49%,所有刺槐混交林与刺槐纯林相比提高 0.10%~6.35%; α 为 32.21~71.65,其值越低说明在低吸力阶段土壤持水能力越高,刺槐×山杏和刺槐×沙棘分别比刺槐纯林低 2.38、8.84; n 为 1.48~1.65,其值越低,曲线越平缓,刺槐×油松、刺槐×山桃、刺槐×紫穗槐与刺槐纯林相比分别低 0.15、0.05、0.06。说明刺槐混交林的土壤持水能力高于刺槐纯林。

2.3 刺槐混交林土壤水分常数及饱和导水率特征

刺槐纯林及其混交林的田间持水量、最大有效含水量、土壤饱和导水率存在差异,其中刺槐混交林多高于刺槐纯林(图 4)。与刺槐纯林相比,所有刺槐混交林田间持水量均显著提高 11.97%~

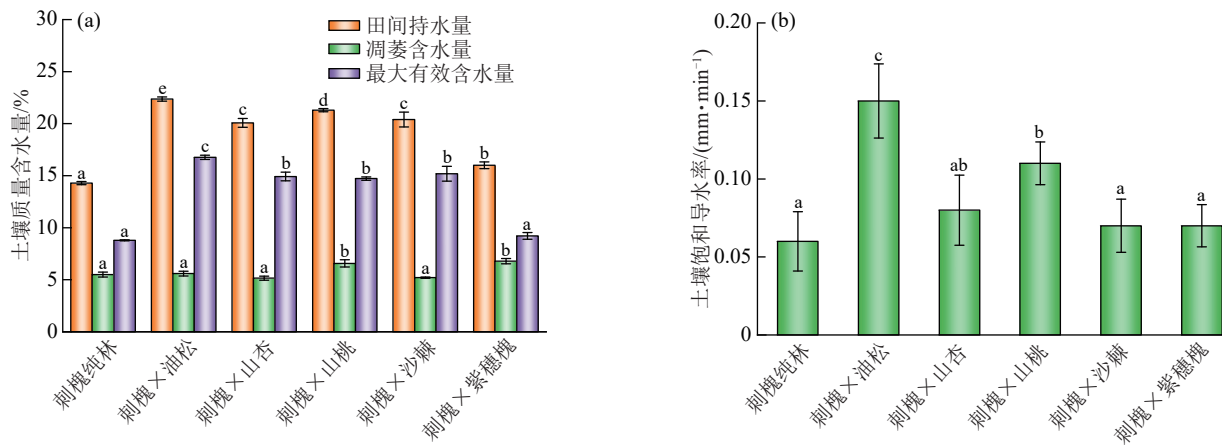
56.47% ($p < 0.05$);所有刺槐混交林(除刺槐×紫穗槐外)最大有效含水量显著提高 67.46%~90.78% ($p < 0.05$),刺槐×紫穗槐提高 4.78% 但不显著 ($p > 0.05$);刺槐×山桃和刺槐×紫穗槐的凋萎含水量显著提高 19.53%、23.45% ($p < 0.05$),其他刺槐混交林与刺槐纯林的差异不显著 ($p > 0.05$);刺槐×油松、刺槐×山桃土壤饱和导水率显著提高 150.00%、83.33% ($p < 0.05$),刺槐×山杏、刺槐×沙棘、刺槐×紫穗槐提高 16.67%~33.33%,但不显著 ($p > 0.05$),其中刺槐×油松的田间持水量(22.36%)、最大有效含水量(16.77%)、土壤饱和导水率(0.15 mm/min)均最高,表明刺槐混交林对提高土壤持水性能和透水性能具有显著优势,特别是刺槐×油松混交林。

表 2 刺槐纯林及其混交林土壤水分特征曲线模型参数(VG)
Table 2 Parameters of Van Genuchten (VG) model for soil moisture characteristic curves in pure and mixed forests of *Robinia pseudoacacia*

混交类型	残余含水量(θ_r)/%	饱和含水量(θ_s)/%	尺度参数(α)	形状参数(n)	决定系数(R^2)
刺槐纯林	7.24	45.14	41.05	1.63	0.99
刺槐×油松	6.78	51.49	71.65	1.48	0.99
刺槐×山杏	5.90	47.96	38.67	1.64	0.99
刺槐×山桃	7.66	49.39	43.48	1.57	0.99
刺槐×沙棘	6.46	45.51	32.21	1.65	0.99
刺槐×紫穗槐	7.95	50.11	44.06	1.58	0.99

2.4 土壤水力性质的影响因素分析

将土壤理化性质(D_{50} 、黏粒、粉粒、砂粒、有机质含量、体积质量)作为解释变量、将土壤水力性质(土壤饱和导水率、田间持水量、凋萎含水量、最大有效含水量)作为响应变量进行冗余分析(图 5)。刺槐混交林(除刺槐×紫穗槐外)与刺槐纯林存在显著差异,说明刺槐混交林对土壤水力性质有显著影响。RDA1 和 RDA2 分别解释了土壤水力性质指标变异的 85.87%、12.55%,总解释度为 98.42%。有机质含量与土壤饱和导水率呈极显著正相关($p \leq 0.01$),与田间持水量和最大有效含水量呈显著正相关($p \leq 0.05$);黏粒含量与土壤饱和导水率和最大有效含水量呈显著正相关($p \leq 0.05$),与凋萎含水量呈显著负相关($p \leq 0.05$); D_{50} 与凋萎含水量呈极显著正相关($p \leq 0.01$),与土壤饱和导水率、最大有效含水量呈显著负相关($p \leq 0.05$)。



注:图柱上方不同小写字母表示不同混交类型间差异显著($p < 0.05$)。

图4 刺槐纯林及其混交林土壤水分常数及饱和导水率

Fig. 4 Soil moisture constants and saturated hydraulic conductivity of pure and mixed forests of *Robinia pseudoacacia*

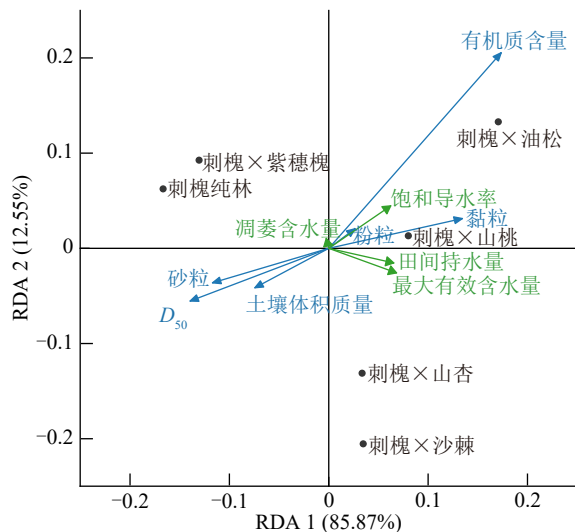


图5 土壤水力性质的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of soil hydraulic properties

3 讨论

3.1 土壤水分对刺槐混交林的响应

土壤含水量与植被类型和土壤剖面深度密切相关^[15]。刺槐纯林及其混交林的土壤含水量主要在100 cm土层呈现明显下降,而随土层深度的增加土壤含水量逐渐稳定且含量较低。主要是因为黄土高原土层深厚没有地下水补给,降雨作为土壤水分唯一的来源,其补给深度主要受植物根系的影响^[16]。本研究中,林下灌木和草本的根系多集中在浅层土壤^[17],其生长过程中穿透于土壤增加土壤孔隙度,有利于水分的入渗^[18]。也正因如此,林下植被对浅层土壤水分利用也相对较多,加上蒸散发作用,导致浅层土壤含水量虽然较高但变异较大^[19]。而深层土壤由于植物根系较少,上层土体压实导致土壤容重较大、孔隙度较小,水分难以入渗^[20],因此土壤含水量总体较低且变异小。刺槐混交林类型差异也可显著

影响土壤水分含量。本研究发现,刺槐×油松的土壤含水量高于其他样地,是因为油松的耗水量小于刺槐,且根系主要集中在0~40 cm土层,而刺槐根系集中在40~80 cm土层,能够减少对同一土层中水分的竞争^[21],加上油松枝叶由于具有较高的油脂和木质素,凋落物分解速度慢,枯落物蓄积量高,林下草本少,有利于提高林地对降雨的截留,减少土壤水分蒸发和植物蒸腾^[22-23]。本研究还发现,刺槐×沙棘和刺槐×紫穗槐土壤含水量呈先降低后增加再降低的变化趋势,有可能是因为沙棘和紫穗槐均为灌木,根系分布较浅对浅层土壤水分的消耗较高^[24],同时刺槐、紫穗槐、沙棘均有较强的固氮能力,能够有效地提高土壤肥力,有利于林下植物的生长^[25-26],而草本根系多集中在0~20 cm土层,进而增加对表层土壤水分的消耗^[27],因而表层土壤水分较低且一直降低。而刺槐×山杏的土壤含水量低于刺槐纯林,可能是因为刺槐×山杏的枯落物单位厚度蓄积量低于刺槐纯林和其他刺槐混交林^[23],减少水分截留的同时增加土壤水分蒸发量,因而土壤含水量低。

3.2 土壤水力性质对刺槐混交林的响应

土壤的水力性质受到土壤理化性质的显著影响,如土壤饱和导水率、田间持水量与土壤有机质含量和孔隙度呈正相关、与土壤体积质量呈负相关,而地上凋落物、地下根系则显著影响土壤理化性质^[28]。本研究结果表明,刺槐混交林的土壤持水性能(田间持水量、最大有效含水量、SWCC)和透水性能(土壤饱和导水率)较高,与ZHANG等^[29]研究结果一致。首先,是因为混交林不同树种凋落物的化学组成不同,如山杏、沙棘凋落物的碳氮比、木质素/氮低更易分解,能够快速释放养分,进而提高土壤养分含量,

同时混交林中不同的凋落物分解速度有所差异,后能够为微生物提供长期的营养物质,更有利于微生物对凋落物的持续分解,促进土壤有机质的积累、团粒结构的形成和容重的降低等^[30]。其次,混交林根系分布互补性及其分泌物对改善土壤理化性起到关键作用,例如,紫穗槐为灌木,根系分布较刺槐乔木浅,二者混交后根系有利于形成复杂且互补的网络分布格局,提高土壤孔隙度和连通性,而不同树种的根系分泌物促进土壤颗粒胶结以形成团粒结构,提升土壤有机质含量,降低土壤体积质量等^[31],因此刺槐混交林具有较高的土壤饱和导水率、田间持水量、最大有效含水量,SWCC的斜率更低。

本研究还表明,刺槐×油松的土壤饱和导水率、田间持水量、最大有效含水量均高于刺槐纯林和其他刺槐混交林,可能是因为油松较刺槐、沙棘的生长速度慢,能够减少对土壤养分的消耗^[32],加上油松叶中较高的木质素和单宁等物质,导致分解速度慢,凋落物的蓄积量较高,能够长期为微生物提供营养物质,有利于养分的长期释放^[33],进而提高土壤有机质含量等,土壤持水能力和透水能力强于其他刺槐混交林。然而,深层土壤的透水性能和持水性能对土壤剖面水分平衡有重要影响,能够影响植物的生长发育^[34],而本研究仅进行浅层土壤水分和表层土壤水力性质的研究,无法全面了解土壤水分在剖面中的分布规律及影响因素,因此,在未来的研究中可进一步探讨土层深度、季节变化等对土壤水力性质的影响,从而为提高土壤水资源利用效率提供更为全面的科学依据。

4 结论

对于5种刺槐混交林及其纯林对照,土壤含水量在0~500 cm土层范围内均表现为先降低后趋于平稳的变化趋势,水分补给深度主要集中在0~100 cm土层,刺槐×油松和刺槐×山桃的土壤含水量较刺槐纯林提升明显,具有较高的水分利用效率。同时,刺槐×油松和刺槐×山桃的持水性能和透水性能均优于刺槐纯林。土壤持水性能和透水性能变化的驱动因素主要由土壤质地、有机质含量和体积质量解释。总体而言,刺槐×油松和刺槐×山桃对土壤水力性质的改善效果较为明显,二者可作为当地混交林建设的推荐模式。

参考文献:

[1] 杨颖楠,黄明斌.长期不同施肥处理对不同土层土壤水力性质的影响[J].水土保持通报,2022,42(1):56-62.

YANG Y N, HUANG M B. Effects of different long-term fertilization treatments on soil hydraulic properties and their changes with depth [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 56-62.

- [2] 孙树臣,赵鑫,翟胜,等.生物质炭施用对土壤水分影响的研究进展[J].灌溉排水学报,2020,39(11):112-119.
SUN S C, ZHAO X, ZHAI S, et al. The effect of biochar amendment on soil moisture: A review [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 112-119.
- [3] 郭拿拿,黄明斌,郭天崎,等.晋陕蒙地区土壤质地重构对土壤水力性质的影响[J].水土保持通报,2023,43(4):77-82.
GUO N N, HUANG M B, GUO T Q, et al. Effects of soil texture reconstruction on soil hydraulic properties in Shanxi-Shaanxi-Mongolia region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 77-82.
- [4] 彭心,倪玲珊,纪柯言,等.黄土高原梯田土壤饱和导水率长期变化及其影响因素[J].水土保持学报,2024,38(6):122-129.
PENG X, NI L S, JI K Y, et al. The long-term variations and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity in terraces on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 122-129.
- [5] 吴天宇,冯天骄,刘亚博,等.晋西黄土区典型人工林与天然林的植被属性对土壤水力特性的影响[J].水土保持学报,2025,39(4):148-157.
WU T Y, FENG T J, LIU Y B, et al. Effects of vegetation attributes on soil hydraulic properties in typical plantations and natural forests in the loess region of western Shanxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4): 148-157.
- [6] ANTONIO Y, A. B J, BOSCO I J, et al. *Pinus sylvestris* L. and *Fagus sylvatica* L. effects on soil and root properties and their interactions in a mixed forest on the southwestern Pyrenees [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 481: e118726.
- [7] HE Y, JIANG C, FAN R, et al. Mixed *Eucalyptus* plantations enhance soil organic carbon accumulation and chemical stability through soil microbial community and multifunctionality [J]. Catena, 2024, 245: e108315.
- [8] 张甜,李龙龙.中条山不同森林类型土壤和枯落物的水文性能分析[J].森林工程,2022,38(3):32-39.
ZHANG T, LI L L. Hydrological characteristics of soil and litter of different forest types in Zhongtiao Mountain [J]. Forest Engineering, 2022, 38(3): 32-39.
- [9] 张益,林毅雁,贾国栋,等.北京山区典型植被类型土壤饱和导水率及其影响因素[J].水土保持学报,2022,36(6):171-178.

- ZHANG Y, LIN Y Y, JIA G D, et al. Soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors of typical vegetation types in Beijing mountainous area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 171-178.
- [10] 汲玉河, 周广胜, 李宗善. 气候变化驱动下黄土高原刺槐林气候适宜性和脆弱性 [J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3348-3358.
- JI Y H, ZHOU G S, LI Z S. Climate suitability and vulnerability of *Robinia pseudoacacia* forest driven by climate change on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3348-3358.
- [11] 吴冠宇. 黄土丘陵区典型退耕还林植被水分利用效率及其影响因素 [J]. 节水灌溉, 2021, (10): 78-83.
- WU G Y. Water use efficiency and its influencing factors of typical returning farmland to forest vegetation in loess hilly area [J]. Water Saving Irrigation, 2021, (10): 78-83.
- [12] 刘晓丽, 汪有科, 马理辉, 等. 密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布关系 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 90-97.
- LIU X L, WANG Y K, MA L H, et al. Relationship between deep soil water vertical variation and root distribution in dense jujube plantation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 90-97.
- [13] 江培福, 雷廷武, 刘晓辉, 等. 用毛细吸渗原理快速测量土壤田间持水量的研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 1-5.
- JIANG P F, LEI T W, LIU X H, et al. Principles and experimental verification of capillary suction method for fast measurement of field capacity [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(7): 1-5.
- [14] 祁子寒, 王云琦, 王玉杰等. 根系对浅表层土大孔隙分布特征及饱和渗透性的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 94-100.
- QI Z H, WANG Y Q, WANG Y J, et al. Effect of root system on macropores distribution and saturated permeability of surface soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 94-100.
- [15] 韩美清, 闫晓俊, 周宇, 等. 植物配置对岷江干旱河谷铁路边坡土壤理化性质的影响 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(2): 134-140.
- HAN M Q, YAN X J, ZHOU Y, et al. Effects of plant configuration pattern on soil physical-chemical properties of railway slopes in arid valley in the upper reaches of the Minjiang River [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2020, 37(2): 134-140.
- [16] 赵丹阳, 毕华兴, 侯贵荣, 等. 晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 181-187.
- ZHAO D Y, BI H X, HOU G R, et al. Soil moisture dynamics of typical plantation in Loess Region of west Shanxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 181-187.
- [17] 高利强. 黄土丘陵区 3 种典型植物群落生态水文过程研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- GAO L Q. Study on eco-hydrological process of three typical plant communities in loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [18] 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 148-159.
- LI L J, SONG X Y, XIA L, et al. Response of evaporation and transpiration of typical afforestation tree species to climate changes in gully region of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 148-159.
- [19] CAI J J, ZHOU B T, CHEN S Y, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture and its driving factors in the northern agricultural regions of China [J]. Water, 2024, 16(4): e556.
- [20] 杜康, 张北赢. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤水分变化特征 [J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 72-76.
- DU K, ZHANG B Y. Characteristics of soil moisture variation in different types of land uses in the loess hilly region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 72-76.
- [21] 杨建伟, 梁宗锁, 韩蕊莲, 等. 不同土壤水分含量对 4 个树种 WUE 的影响 [J]. 西北林学院学报, 2004, 19(1): 9-13.
- YANG J W, LIANG Z S, HAN R L, et al. Water use efficiency of four species under the different soil water content [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(1): 9-13.
- [22] 刘秉儒, 张文文, 李学斌. 贺兰山不同林分凋落物微生物群落特征与影响因素 [J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8145-8158.
- LIU B R, ZHANG W W, LI X B. Microbial community characteristics and influencing factors of litter in different forest stands in Helan Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 8145-8158.
- [23] 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.
- CAO Z T, DENG Y X, TIAN J, et al. Accumulation characteristics and hydrological effects of litter in mixed *Robinia pseudoacacia* plantations [J]. Journal of Soil and

- Water Conservation, 2024, 38(6):152-160.
- [24] 姚武扬眉, 卓玛草, 袁建钰, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤碳库及碳库管理指数的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(5):277-285.
YAO W Y M, ZHUO M C, YUAN J Y, et al. Effects of different land-use practices on soil carbon pool and its management index in loess hilly region [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(5):277-285.
- [25] 张爱梅, 殷一然, 孙坤. 沙棘属植物弗兰克氏菌研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, 47(11):3933-3944.
ZHANG A M, YIN Y R, SUN K. Research progress in *Frankia* spp. associated with *Hippophae* L. [J]. Microbiology China, 2020, 47(11):3933-3944.
- [26] DEJUAN E, DENNIS J, ANDREA P. Wood properties and transcriptional responses of poplar hybrids in mixed cropping with the nitrogen-fixing species *Robinia pseudoacacia* [J]. Tree Physiology, 2020, 41(5):865-881.
- [27] 万海霞, 蔡进军, 郭永忠, 等. 宁夏南部黄土丘陵区典型草本根系分布特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4):149-156.
WAN H X, CAI J J, GUO Y Z, et al. Characteristics of root distributions of typical herbs in loess hilly region of southern Ningxia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4):149-156.
- [28] 石常卿, 张海林, 韩雨蓉, 等. 近江平原区土壤水力参数及相关理化性质空间分布与影响因素[J]. 土壤, 2024, 56(1):182-192.
SHI C Q, ZHANG H L, HAN Y R, et al. Spatial distribution and influencing factors of soil hydraulic parameters and related physiochemical properties in river-nearby plain [J]. Soils, 2024, 56(1):182-192.
- [29] WANJUN Z, XIAI Z, XIN X, et al. Changes in soil infiltration and water flow paths: Insights from subtropical forest succession sequence [J]. Catena, 2023, 221:e106748.
- [30] 李欣阳, 张娟娟, 周建云, 等. 宁南山区人工混交林叶片-凋落物-细根生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2023, 34(11):2889-2897.
LI X Y, ZHANG J J, ZHOU J Y, et al. Ecological stoichiometry of leaf-litter-fine roots in mixed plantations in mountainous area of southern Ningxia, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(11):2889-2897.
- [31] ZHU L, HUANG R, GUAN H, et al. Litter, root, and mycorrhiza manipulations and seasonal effects on soil physicochemical properties and microbial communities in a subtropical coniferous and broad-leaved mixed forest [J]. Applied Soil Ecology, 2024, 204:e105721.
- [32] 金思雨, 彭祚登. 刺槐和油松干旱胁迫响应研究进展[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(4):79-91.
JIN S Y, PENG Z D. Research progress on drought stress on *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4):79-91.
- [33] 王云霞, 刘桂要, 邓强, 等. 黄土丘陵区人工林刺槐和油松凋落叶在不同降雨时期的分解特征[J]. 生态学报, 2020, 40(19):6872-6884.
WANG Y X, LIU G Y, DENG Q, et al. Leaf-litter decomposition of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* planted forests at different rainy periods in the loess hilly region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19):6872-6884.
- [34] 刘新春, 赵勇钢, 刘小芳, 等. 晋西黄土区人工林细根与土壤水碳的耦合关系[J]. 生态学报, 2019, 39(21):7987-7995.
LIU X C, ZHAO Y G, LIU X F, et al. Coupling fine roots with soil moisture and organic carbon in artificial forests in loess region of western Shanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21):7987-7995.
- (上接第300页)
- [30] WELDEGEBRIEL L, THOMPSON S, TILAHUN S, et al. Organization of the soil profile controls the risks of runoff in the humid Ethiopian Highlands [J]. Journal of Hydrology, 2023, 617:e129031.
- [31] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985, 16(9):10-21.
LEI Z D, YANG S X, XU Z R, et al. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 16(9):10-21.
- [32] 魏强, 张秋良. 地表径流与土壤侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持, 2008(9):30-33.
WEI Q, ZHANG Q L. Research progress of surface runoff and soil erosion [J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(9):30-33.
- [33] 陶洁怡, 章锦河, 郭丽佳, 等. 三江源国家公园水源涵养服务时空演变特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2025, 45(3):1226-1238.
TAO J Y, ZHANG J H, GUO L J, et al. Spatiotemporal change and driving factors of water conservation in Sanjiangyuan National Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3):1226-1238.
- [34] CHEN G, ZUO D P, XU Z X, et al. Changes in water conservation and possible causes in the Yellow River basin of China during the recent four decades [J]. Journal of Hydrology, 2024, 637:e131314.