

不同刺槐混交人工林中枯落物混入对 表层土壤水分的影响

邓涵潇¹, 孙涵宇^{2,3}, 杨艳芬^{1,2,3}, 李倩¹, 边焯^{2,3}, 曹泽涛⁴

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院; 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/教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌
712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探究典型刺槐混交人工林中枯落物混入土壤的水文过程, 为提高黄土高原丘陵区典型植被水源涵养能力提供重要依据。[方法] 以陕西省吴起县 5 种典型混交人工林(刺槐×油松、刺槐×紫穗槐、刺槐×沙棘、刺槐×山桃、刺槐×山杏)以及刺槐纯林中混入土壤的枯落物为研究对象, 采用浸泡法测定不同类型与不同量枯落物混入后土壤含水量, 并分析其蒸发过程。[结果] ①典型植被样地枯落物混入量为 204~2 087 g/m², 总平均混入量为 733.53 g/m², 平均深度为 1.3~1.9 cm。②6 种混交人工林类型中均为: 人为混入枯落物土>原状混入枯落物土>裸土, 其中刺槐纯林和刺槐×紫穗槐的毛管含水量增加幅度较大。③在 6 种人工林中混入 700 g/m² 枯落物混入后土壤水分蒸发特性显示整体趋势基本一致, 随着时间的延长, 土壤含水量均呈下降趋势, 其中混入刺槐×紫穗槐与刺槐×山杏类型的枯落物使得土壤含水量增加较大, 混入刺槐×沙棘类型的枯落物土壤含水量增加较小。④同一林地类型下混入不同量的枯落物后土壤含水量均高于未混入土壤, 且刺槐纯林、刺槐×油松、刺槐×山杏在混入 1 000 g/m² 时土壤含水量达到最大, 刺槐×沙棘在混入 700 g/m² 时达到最大。[结论] 枯落物混入土壤有助于提高土壤含水量, 特别是毛管含水量, 而人为枯落物混入的效果更为显著且混交林地对土壤表层水分含量也存在影响。在黄土高原地区进行植被恢复时, 可以优先考虑种植刺槐×紫穗槐和刺槐×山杏, 以提高区域内的水源涵养功能。

关键词: 混交人工林; 枯落物混入; 表层土壤; 蒸发持水

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0054-10

中图分类号: S714

文献参数: 邓涵潇, 孙涵宇, 杨艳芬, 等. 不同刺槐混交人工林中枯落物混入对表层土壤水分的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 54-63. Deng Hanxiao, Sun Hanyu, Yang Yanfen, et al. Impact of litter incorporation on surface soil moisture in different mixed *Robinia pseudoacacia* plantations [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 54-63. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.007; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.007.

Impact of litter incorporation on surface soil moisture in different mixed *Robinia pseudoacacia* plantations

Deng Hanxiao¹, Sun Hanyu^{2,3}, Yang Yanfen^{1,2,3}, Li Qian¹, Bian He^{2,3}, Cao Zetao⁴

(1.State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences/Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The hydrological process of litter mixed with soil in typical *Robinia pseudoacacia*

收稿日期: 2024-09-20

修回日期: 2024-12-06

采用日期: 2024-12-08

资助项目: 中国科学院“西部之光”西部青年学者 A 类项目“延河流域气候和土地利用变化的水文响应”(XAB2022YW03); 国家自然科学基金面上项目“黄土高原疏伐强度对刺槐人工林能水平衡的影响机制”(42271042), “坡面土壤分离与泥沙输移耦合关系对生物结皮发育的响应机制”(42377352)

第一作者: 邓涵潇(2001—), 女(汉族), 山西省汾阳市人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文过程研究。Email: d2794734719@163.com。

通信作者: 杨艳芬(1984—), 女(汉族), 宁夏回族自治区银川市人, 博士, 副研究员, 主要从事生态水文过程与模拟的研究。Email: yfyang@ms.iswc.ac.cn。

mixed plantation was explored, in order to provide an important basis for improving the water conservation capacity of typical vegetation in the hilly area of the Loess Plateau. [Methods] We focused on five types of mixed artificial forests in Wuqi, Shaanxi (*R. pseudoacacia* × *Pinus tabulaeformis*, *R. pseudoacacia* × *Sophora viciifolia*, *R. pseudoacacia* × *Hippophae rhamnoides*, *R. pseudoacacia* × *Prunus persica*, *R. pseudoacacia* × *Armeniaca sibirica*) and on pure *Robinia pseudoacacia* forests. We used an immersion method to determine the moisture content of soil that was mixed with different types and amounts of litter. We analyzed the evaporation process. [Results] ① The litter mixture in the vegetation plots was 204~2 087 g/m², the total average amount of litter in the soil was 733.53 g/m², and the average depth of the litter was 1.3~1.9 cm. ② The soil moisture of the six types of mixed plantations was ranked as follows: artificially mixed with litter soil > undisturbed mixed with litter soil > bare soil. The capillary water content of the pure *R. pseudoacacia* forest and *R. pseudoacacia* × *S. viciifolia* was significantly higher than in the other plots. ③ The overall trends in soil water evaporation when 700 g/m² litter was mixed with the soil in the six plantations were highly consistent: the soil water content decreased over time. The litter addition to the soil of the *R. pseudoacacia* × *S. viciifolia* and *R. pseudoacacia* × *Armeniaca sibirica* forests considerably increased the soil water content, whereas the soil water content of the soil mixed with litter in the *R. pseudoacacia* × *H. rhamnoides* forest slightly increased compared with the control. ④ The soil moisture content of the same forest type was higher than that of the unmixed soil after different amounts of litter were added. The maximum soil moisture contents of the pure *R. pseudoacacia* forest as well as *R. pseudoacacia* × *Armeniaca sibirica* and *R. pseudoacacia* × *P. armeniaca* forests were reached when the litter content was 1 000 g/m², and the maximum soil moisture content was reached in the *R. pseudoacacia* × *H. rhamnoides* forest when the litter content was 700 g/m². [Conclusion] Incorporating litter into the soil increased the soil moisture content, especially capillary moisture, and the effects of artificially added litter were more pronounced than those of naturally added litter. The type of forest also influenced the surface soil moisture levels. On the Loess Plateau, planting *R. pseudoacacia* × *S. viciifolia* and *R. pseudoacacia* × *A. sibirica* should be prioritized to increase water conservation in the region.

Keywords: mixed plantations; litter incorporation; top soil; evaporation and water retention

枯落物是自然界中植物的落叶、树枝、枯枝、树皮等死去的有机物质的集合,是土壤有机物质的来源之一^[1]。这些物质分解后能够提高土壤的有机质含量,使得土壤结构更加疏松,提升土壤的保水性和透气性能^[2-3];枯落物形成的覆盖层可以减缓土壤水分蒸发速率^[4-5],降低土壤表面温度,减少太阳辐射对土壤的直接影响,从而维持土壤水分的稳定性,促进水分入渗,发挥着保水和减少流失的双重作用^[6-8]。然而以往对枯落物混入量与其水文效应的研究中多针对于地表,事实上枯落物在不同作用下也大量存在于表层土壤中。研究显示,植物枯落物会在人为耕作、土栖动物、降雨冲刷和泥沙沉降的作用下进入表层土壤,形成新的表层土壤结构,从而对水土流失产生影响^[9-11]。随着植被覆盖的迅速增长,大量的植物枯落物蓄积在土壤表面或混入土壤表层,使其养分释放速度加快,更直接地参与到土壤中的养分循环中,促进植物吸收,有机质的加入增加了土壤的团聚体形成,

改善了土壤的物理性质,提高孔隙度,增强持水能力,降低水土流失^[12]。

黄土高原地区是世界上最大的黄土分布区域,由于其区域内季节性强降雨、易侵蚀的土壤结构和不合理的土地利用方式,已经成为土壤侵蚀问题最为严重的地区之一^[13-15]。为解决这一问题,自1999年起中国开始实施“退耕还林、还草”工程,将约 2.00×10^6 hm² 的坡耕地转变为林地和草地^[16-17]。这一政策实施后,植被覆盖面积已超过黄土高原总面积的 60%^[18],其中黄土高原丘陵区中种植和培育出多种以刺槐为主的混交林,植被盖度迅速增加,植物枯落物大量蓄积土壤表面或混入土壤表层之中,表层土壤中枯落物的混入量能够达到 1 080 g/m²,已经成为影响黄土高原地区土壤水文过程的关键因素^[19]。枯落物本身的持水性和保水性在混入土壤后可能会改变土壤的物理化学性质,从而影响土壤的水分特性,而不同混交类型的枯落物混入土壤中对土壤持水蒸

发特性的影响尚不清楚,有待进一步深入研究。基于此,本研究以黄土高原丘陵区典型混交人工林枯落物为研究对象,调查不同植被类型枯落物的混入厚度与混入量,分析其对土壤含水量、水分蒸发以及混入不同种类与不同混入量对土壤水分的影响,为进一步理解森林生态系统对水文过程的调控机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于陕西省延安市吴起县(107°38′57″—108°32′49″E,36°33′33″—37°24′27″N),地处水土风蚀交错区,位于黄土高原中部地带,属于北洛河流域和无定河流域的上游部分,具有明显的温带大陆性季风气候特征。根据多年气象资料观测统计,该地区降雨在空间上差异显著,年际变化大,总体呈现为从东南向西北逐渐减少的分布特征,多年平均降水量 395.4 mm,在季节分配中呈现夏多冬少的趋势,其中 7—9 这 3 个月的降雨量约占全年降雨量的 60% 以上,多为暴雨^[20],且气候特征以寒冷和干燥为主,春季气温上升缓慢,秋季气温下降迅速,年平均气温 7.8 ℃, 平均年陆面蒸发量为 400~450 mm,年日照总时数为 2 400 h,年太阳辐射量 491.24 kJ/cm²,无霜期为 120~155 d^[21],地貌为黄土丘陵沟壑区,主要土壤类

型为黄绵土,占总面积的 97.6%。研究区属于暖温带半干旱大陆性季风气候。植被类型多样。自 1998 年起,吴起县实施封山育林、禁牧和退耕还林政策,使得林草盖度显著提高。目前该地区主要植被包括刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*) 针茅(*Stipa capillata*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*) 等^[22]。这些植被的繁茂生长不仅改善了生态环境,也为研究黄土高原的生态恢复和植被演替提供了宝贵的自然实验室。

1.2 样地选择

本研究开展于 2023 年 7—8 月,通过查阅林业局提供的造林技术资料并结合实地考察,选取林龄为 23 a 的刺槐混交林作为研究对象,这些混交林地理位置较为集中且立地条件相似,包括刺槐×山杏、刺槐×山桃、刺槐×油松、刺槐×沙棘、刺槐×紫穗槐 5 种不同混交类型,并以刺槐纯林作为对照。在每个人工刺槐林样地内,进行详细的样地基本情况调查,包括记录坡向、坡度、经纬度、海拔等信息。每个样地设置样方为 10 m×10 m,每个样方 3 个重复,对样方里乔木和灌木的株数、树高、胸径以及冠幅进行调查,样地基本情况见表 1。

表 1 典型植被样地基本情况
Table 1 Basic conditions of typical vegetation plots

混交类型	树种组成	林分密度/ (株/hm ²)	树高/ m	胸径/ cm	冠幅/ m	坡向	坡度/ (°)	经纬度	平均海拔 高度/m
刺槐×山杏	刺槐	710	7.58±1.65	10.53±3.63	3.56±1.10	东	16	36°55′41″N	1 480.3
	山杏	290	7.42±1.73	19.76±1.54	5.35±1.61			108°8′12″E	
刺槐×山桃	刺槐	1 366	8.12±1.65	10.23±3.33	4.41±0.82	东	24	36°55′34″N	1 510.15
	山桃	667	4.06±0.53	18.04±5.43	5.23±1.10			108°7′59″E	
刺槐×沙棘	刺槐	833	8.56±1.51	11.88±3.11	4.58±1.29	西北	18	36°55′42″N	1 506.49
	沙棘	667	3.30±0.75	8.95±2.63	2.40±0.51			108°9′0″E	
刺槐×紫穗槐	刺槐	1 633	11.5±2.36	13.01±5.76	4.54±1.36	西	11	36°55′28″N	1 494.67
	紫穗槐	300	1.47±0.38	9.39±9.61	1.17±0.52			108°7′52″E	
刺槐×油松	刺槐	1 300	7.54±0.93	8.86±1.59	3.40±0.60	北	9	36°55′41″N	1 490.25
	油松	800	6.38±1.03	14.08±2.42	4.48±0.78			108°9′31″E	
刺槐纯林	刺槐	2 433	8.08±1.24	10.09±3.11	3.05±1.02	东南	10	36°53′28″N 108°13′1″E	1 505.5

1.3 试验设计

为了探讨枯落物混入土壤对水分蒸发特征的影响,本试验将从不同样地、不同混交类型枯落物混入和不同枯落物混入量 3 个方面进行,研究区域中枯落

物混入土壤的主要原因是降雨冲刷引起的坡面泥沙沉积,在冲刷过程中保留了枯落物基本的形态特征,与泥沙混合一起沉积,属于未降解或半降解态的枯落物,其肢体大部分都埋没在土壤中,与土壤形成牢固

混合态,具体试验设计如表 2 所示。

1.3.1 原状枯落物混入土壤的水分蒸发特征 在刺槐纯林、刺槐×山杏、刺槐×山桃、刺槐×油松、刺槐×沙棘和刺槐×紫穗槐 6 种典型混交人工林设置采样线,共采集 10 个采样点,设置为 50 cm×50 cm 的样方。收集地表枯落物时,用扫把清扫不会使其脱离土壤,在收集完样方内地表枯落物后,根据双对角线规则利用环刀法(内径为 9.8 cm,高为 5 cm)采集表层 0—5 cm 土壤,并对采集的土壤进行编号,然后在 0.5 mm 筛上冲洗,用浸水筛子捞取细小土壤颗粒和小石子,用镊子剔除根系,放入烘箱在 75 ℃下,烘干 24 h 后称重,得到 0—5 cm 层土壤表层枯落物混入量。利用直尺法测量枯落物混入土壤的深度,10 次重复。将含土样的环刀充分浸泡至饱和(12 h 以上),随后取出控水 2~3 h,称重,去除其中的重力水,并记录其初始含水量。将环刀分别放入事先在对应植被类型样地中挖取的圆孔内,以保证环刀内土壤水分变化接近自然条件下土壤水分变化,确保环刀顶部与土壤表面齐平,并在环刀与土壤之间放置滤纸,并在 7

月 6 日至 7 月 15 日的 19:00—20:00 测定环刀质量。

1.3.2 枯落物混入类型对土壤蒸发特征的影响 由于样地土壤中枯落物混入量存在差异,为探究同一梯度混入量下不同混交类型间的差异,试验按照对照组 CK,700 g/m² 混入量设定,选取刺槐纯林、刺槐×山杏、刺槐×山桃、刺槐×油松、刺槐×沙棘和刺槐×紫穗槐 6 种典型人工林土壤表层提取的枯落物枯落物 5.28 g 与干土混合至 470~480 g,人为混匀后放入环刀,即表层土壤内枯落物混入量为 700 g/m²,后续试验步骤与上述一致,并在 8 月 1 日至 8 月 14 日的 19:00—20:00 测定环刀质量,每个处理 4 个重复。

1.3.3 枯落物混入量对土壤蒸发特征的影响 考虑到样地中枯落物混入量差异较大,因此选取刺槐×山杏、刺槐×油松、刺槐×沙棘和刺槐纯林 4 种典型人工林土壤表层提取的枯落物 0.75,3.02,5.28 和 7.54 g 与干土混合至 470~480 g,混匀后放入环刀,即表层土壤内枯落物混入量为 100,400,700,1 000 g/m²,后续试验步骤与上述一致,并在 7 月 6 日至 7 月 15 日 19:00—20:00 测定环刀质量,每个处理 4 个重复。

表 2 枯落物混入土壤的水分蒸发特征					
Table 2 Characteristics of moisture evaporation from soil with litter incorporation					
试验设置	混交类型	枯落物混入量/(g·m ⁻²)	重复数	监测时段	称重时间
裸 土	刺槐×山杏、刺槐×山桃 刺槐×油松、刺槐×沙棘 刺槐×紫穗槐、刺槐纯林	0	6	0706	19:00—20:00
不同混交样地 (原位取样)	刺槐×山杏、刺槐×山桃 刺槐×油松、刺槐×沙棘 刺槐×紫穗槐、刺槐纯林	204~2 087	10	0706—0715 (0711 下雨)	19:00—20:00
不同混交类型 枯落物混入	刺槐×山杏、刺槐×山桃 刺槐×油松、刺槐×沙棘 刺槐×紫穗槐、刺槐纯林	CK,700	4	0801—0814 (0804,0811 下雨)	19:00—20:00
枯落物不同混入量	刺槐×山杏、刺槐×油松 刺槐×沙棘、刺槐纯林	CK,100 400,700,1 000	4	0706—0715 (0711 下雨)	19:00—20:00

1.4 土样采集

在每个选定的样地中,依据双对角线规则布置 9 个样点,采样前清除地表枯落物、腐殖质等,随后采用内径 9.8 cm,高 5 cm 环刀对枯落物混入的表层土壤进行采集^[12]。

1.5 土壤水分指标的测定

采用浸泡法测定土壤的毛管含水量与饱和含水量。具体操作步骤如下:将环刀置于容器中,调整水位保持在 1 mm 处,期间不断添水以控制其水位恒定,待环刀及其内土壤的重量达到稳定状态时,此时测得的土壤含水量即为毛管含水量;随后添水至低于环刀上沿 1 mm 处,继续维持该水位直至环刀重量再

次稳定后,此时测得的土壤含水量即为饱和含水量。

1.6 数据处理与分析

采用 Excel 2019 和 SPSS 27 对试验数据进行统计和分析,通过单因素方差分析(one-way ANOVA),进行处理间差异分析,用曲线估计确定散点图,并用 Origin 2021 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 混交人工林原状土枯落物混入量与混入深度

典型植被样地枯落物混入量为 204~2 087 g/m²,总平均混入量为 734 g/m²,平均深度为 1.3~1.9 cm (如图 1)。其中不同混交林的平均混入量表现为:刺

槐×山桃>刺槐×油松>刺槐纯林>刺槐×沙棘>刺槐×山杏>刺槐×紫穗槐;平均深度表现为:刺槐×紫穗槐>刺槐×沙棘>刺槐×油松>刺槐纯林>刺槐×山桃>刺槐×山杏。

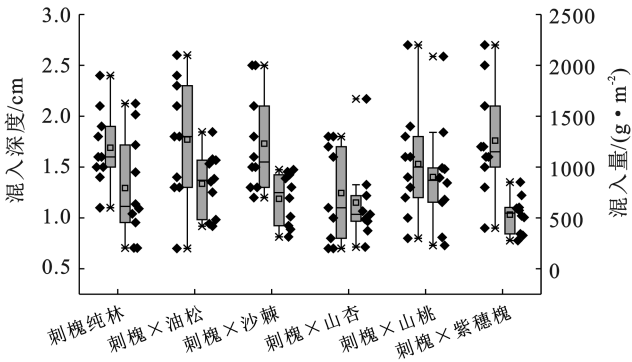


图 1 不同混交人工林中枯落物混入量与深度
Fig.1 Amount and depth of litter incorporation in different mixed artificial forests

2.2 混交人工林枯落物混入土壤水分特性

将裸土、原状土与人为混入土 3 种不同处理下的含水量进行比较,为了与原状枯落物混入土 (733.53 g/m^2) 相对比,人为枯落物混入选取 700 g/m^2 时所测得的土壤水分指标(见图 2)。原状裸土毛管含水量为 $21.89\% \sim 26.58\%$,重力含水量为 $2.81\% \sim 3.71\%$,原状枯落物混入土的毛管含水量为 $24.44\% \sim 26.06\%$,重力含水量为 $7.07\% \sim 11.25\%$,人为枯落物混入土的毛管含水量为 $38.9\% \sim 40.27\%$,重力含水量为 $1.88\% \sim 2.86\%$,其中 6 种混交人工林中毛管含水量均占有很高的比重,三者的饱和含水量依次上升。

在裸土与原状混入枯落物的土壤比较中,除刺槐×山桃与刺槐×山杏毛管含水量低于裸土,其余混交林原状土均高于裸土,且增量表现为:刺槐纯林>刺槐×油松>刺槐×沙棘>刺槐×紫穗槐,其中刺槐纯林毛管含水量增加了 1.12 倍,刺槐×紫穗槐增加了 1.02 倍;在重力含水量比较中,6 种混交林原状土均高于裸土,且增量表现为:刺槐×紫穗槐>刺槐×油松>刺槐×山桃>刺槐纯林>刺槐×沙棘>刺槐×山杏,其中刺槐×紫穗槐增加了 3.7 倍,刺槐×山杏增加了 2.3 倍。在原状混入枯落物土壤与人为混入枯落物后土壤含水量比较中,6 种混交人工林中毛管含水量均增加,重力含水量相对降低,但饱和含水量均高于原状土,其中毛管含水量增加了 1.53~1.63 倍,增量表现为:刺槐纯林>刺槐×山桃>刺槐×山杏>刺槐×紫穗槐>刺槐×沙棘>刺槐×油松,重力含水量变化了 0.18~0.29 倍,表现为:刺槐×山杏>刺槐×

油松>刺槐纯林>刺槐×沙棘>刺槐×紫穗槐>刺槐×山桃。

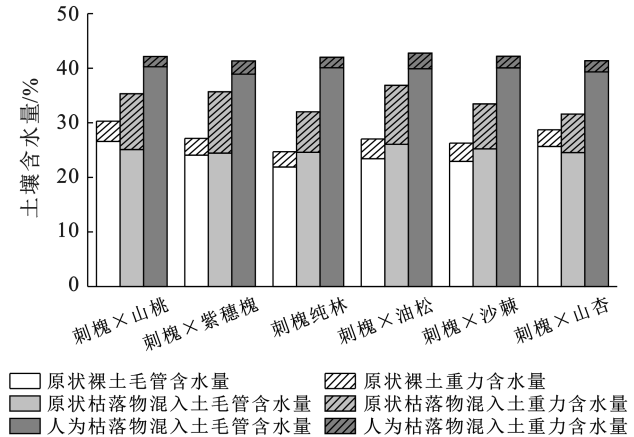


图 2 裸土、原状混入枯落物土与人为混入枯落物土壤水分含量的变化
Fig.2 Variation of soil moisture content in bare soil, soil with natural litter, and soil with artificially added litters

2.3 混交人工林枯落物混入土壤蒸发特性

2.3.1 原状枯落物混入土壤水分蒸发特征 在自然状态下,通过枯落物浸泡并放置进行蒸发测定,结果表明土壤含水量随时间的推移呈下降趋势,且不同的混交组合在土壤含水量的表现上存在差异(如图 3)。由于 7 月 11 日出现降雨天气,土壤含水量出现短暂的回升,继而下降(见图 3a),同时水分蒸发速率出现负值,随后继续蒸发,直至最后相对平稳(见图 3b)。不同混交林原状土壤中土壤含水量表现为:刺槐×山桃>刺槐×油松>刺槐纯林>刺槐×紫穗槐>刺槐×沙棘>刺槐×山杏。按顺序其平均水分含量分别为: $22.64\% \sim 45.88\%$, $21.6\% \sim 46.26\%$, $21.21\% \sim 41.79\%$, $19.61\% \sim 42.03\%$, $17.79\% \sim 40.41\%$, $15.14\% \sim 37.17\%$ 。

在降雨前 6 种人工林地含水量下降速率表现为:刺槐×油松>刺槐×紫穗槐>刺槐×山杏>刺槐×沙棘>刺槐×山桃>刺槐纯林。在降雨后 6 种混交林地下降速率表现为:刺槐×油松>刺槐×紫穗槐>刺槐×山桃>刺槐×沙棘>刺槐纯林>刺槐×山杏。6 种人工林地均在第 1 天达到最大水分蒸发速率,之后变化相对平缓,不同时间下植被枯落物水分蒸发速率存在差异,6 种人工林地土壤水分最大蒸发速率范围为 $0.073 \sim 0.112 \text{ g/(g} \cdot \text{d)}$,表现为:刺槐×紫穗槐>刺槐×油松>刺槐×山杏>刺槐×沙棘>刺槐×山桃>刺槐纯林。在静置 10 d 内,6 种人工林地土壤水分蒸发速率为 $-0.053 \sim 0.112 \text{ g/(g} \cdot \text{d)}$,平均水分蒸发速率表现为:刺槐×油松>刺槐×紫穗槐>刺槐×沙棘>刺槐×山杏>刺槐×山桃>刺槐纯林。

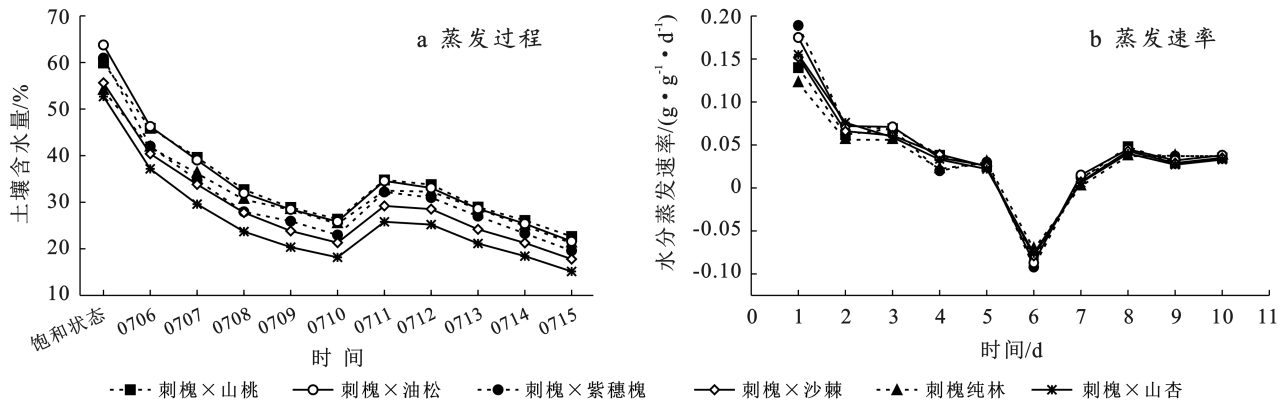


图 3 原状枯落物混入土壤的水分蒸发特性

Fig.3 Characteristics of moisture evaporation from soil with natural litter incorporation

2.3.2 枯落物混入类型对土壤蒸发特征的影响 原状枯落物混入土中平均混入量为 734 g/m^2 , 因此选取人为枯落物混入量为 700 g/m^2 分析不同枯落物混入类型对土壤含水量的影响, 整体趋势基本一致 (见图 4)。随着时间的延长, 土壤含水量均呈下降趋势。在蒸发过程中, 8 月 4 日与 8 月 11 日均出现降雨天气, 6 种人工林地土壤含水量在 8 月 4 日出现短暂回升的趋势, 在 8 月 11 日出现大幅回升, 随后继续呈下降趋势 (见图 4a), 这两天对应的水分蒸发速率也出现了负值 (见图 4b)。各混交林土壤含水量的初始值和终点值不同, 且下降的速度也有所差异, 这反映了不同植被类型对土壤水分保持能力的不同, 在第一次降雨前期, 刺槐纯林的土壤含水量为最高, 其水分蒸发速率变化较缓, 刺槐×山桃的土壤含水量为最低, 其水分蒸发速率变化较大, 这一阶段的平均水分蒸发速率变化范围为 $0.022 \sim 0.030 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{d})$, 此时刺槐×山桃的水分蒸发速率达到最大, 刺槐×紫穗槐与刺槐×山杏最小。

在两次降雨间, 6 种人工林地的土壤平均含水量表现为: 刺槐×紫穗槐 > 刺槐×山杏 > 刺槐纯林 > 刺槐×山桃 > 刺槐×油松 > 刺槐×沙棘, 这一阶段的平均水分蒸发速率变化范围为 $0.011 \sim 0.014 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{d})$, 此时刺槐×沙棘的水分蒸发速率达到最大, 刺槐×紫穗槐与刺槐×山杏最小。在最后一次降雨后期, 降雨导致土壤含水量增加, 但并未完全补给土壤水分。6 种人工林地的土壤平均含水量表现为: 刺槐×紫穗槐 > 刺槐×山杏 > 刺槐×油松 > 刺槐纯林 > 刺槐×山桃 > 刺槐×沙棘, 这一阶段的平均水分蒸发速率变化范围为 $0.018 \sim 0.029 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{d})$, 此时刺槐纯林的水分蒸发速率达到最大, 刺槐×紫穗槐与刺槐×山杏最小。3 个阶段中, 6 种人工林地变化趋势较为一致, 第一阶段的土壤水分蒸发速率变化波动较大且为最高, 在整个蒸发过程中达到一个峰值, 第二阶段土壤水分蒸发速率变化波动较平缓且在 3 个阶段中速率最低, 第三阶段土壤水分蒸发速率与第一阶段相比相差不大, 均高于第二阶段。

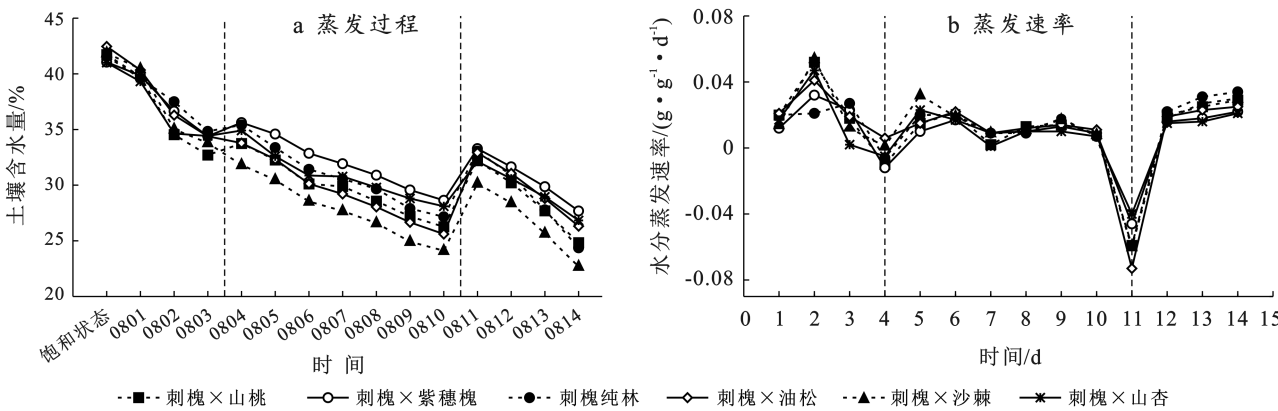


图 4 人为混入枯落物土壤水分蒸发特性

Fig.4 Characteristics of moisture evaporation from soil with artificially added litters

整个过程中, 与刺槐纯林相比, 5 种混交人工林中刺槐×紫穗槐 (33.24%) 与刺槐×山杏 (32.25%) 的

土壤平均含水量最高, 平均水分蒸发速率最低, 其次刺槐×山桃 (31.45%) 的土壤平均含水量和平均水分

蒸发速率与刺槐纯林(31.44%)较为接近,刺槐×油松(30.89%)与刺槐×沙棘(30.27%)的土壤平均含水量最低,平均水分蒸发速率最大。与原状混入枯落物土相比,人为混入枯落物后 6 种人工林土壤水分蒸发速率均降低,其中刺槐×紫穗槐与刺槐×山杏的水分蒸发速率降低程度较大,刺槐×油松降低程度最小。

2.3.3 枯落物混入量对土壤蒸发特征的影响 选取 100,400,700,1 000 g/m² 共 4 种混入量分别混入对应的混交林地中,并与对照组进行比较发现混入不同量的枯落物同样会影响土壤含水量的大小(见图 5)。整体来看,不同混入量均会增加 4 种人工林土壤含水量,4 个梯度的混入量混入后土壤平均含水量均高于

对照组 CK。具体地,刺槐纯林在混入量为 100 g/m² 时与对照组 CK 土壤平均含水量较为接近,在降雨后略低于 CK(31.35%),在混入量为 1 000 g/m² 时平均含水量达到最大,为 32.28%;刺槐×沙棘在无混入时土壤平均含水量最小,为 29.39%,在混入 400 g/m² 时平均含水量达到最大,为 30.39%,混入 700 g/m² (30.15%)与 1 000 g/m² (30.32%)与之相差较小;对刺槐×油松而言,在无枯落物混入时土壤平均含水量最小,为 31.29%,在混入 1 000 g/m² 时平均含水量最大,为 33.50%;刺槐×山杏在无枯落物混入时土壤平均含水量最小,为 31.18%,在混入 1 000 g/m² 时平均含水量最大,为 32.36%。

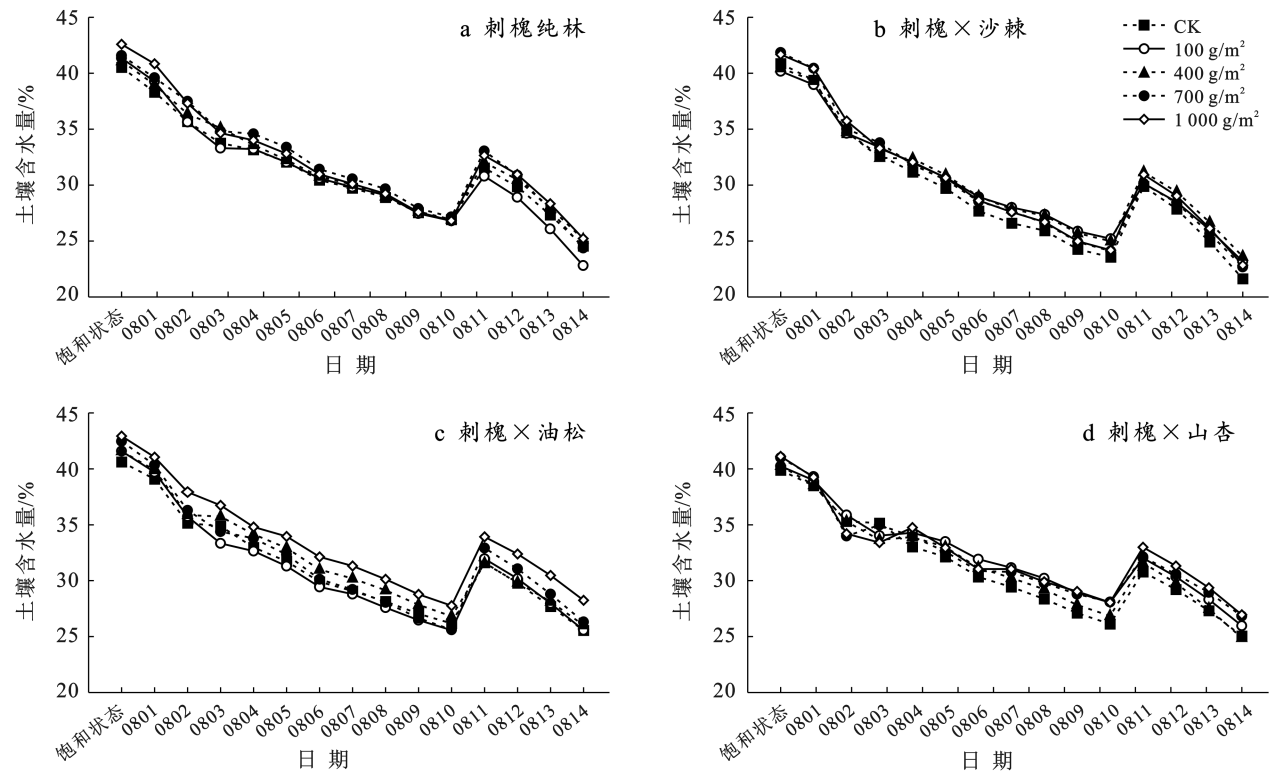


图 5 人为混入不同量枯落物土壤的水分蒸发过程
Fig.5 Moisture evaporation process from soil with different amounts of artificially added litters

3 讨论

在研究混交人工林枯落物混入土壤水分特性中,整体的饱和含水量比裸土高,说明枯落物混入总体上提高了土壤的持水能力和水源涵养效果,这与张宝琦等^[23]所得研究一致。刺槐×山桃与刺槐×山杏的裸土毛管含水量比原状土高,可能由于地表裸露时土壤毛管作用较为显著,水分能够更自由地在土壤中移动和分布。而原状土由于枯落物层的存在,可能会影响毛管作用,使得水分在土壤中的分布不如裸土均匀。也有研究表明,在土壤性质与降雨条件基本一致的情况下,不同植被类型土壤水分的差异主要是植被特征

等因素影响,山桃与山杏均属于当地乡土树种,二者的表皮细胞、气孔大小均小于其他树种,且叶片上下表皮均具有表皮毛^[24],这些结构特征说明两者抗旱能力较强,裸土由于没有枯落物层的阻隔,土壤水分蒸发较大时,山桃与山杏的根系结构能较好地保持土壤水分,而当有枯落物层覆盖后,土壤水分蒸发较小时,山桃与山杏更依赖表层土壤水分^[25],可能造成裸土时土壤毛管含水量相较于原状土偏高的现象,但二者裸土的饱和含水量均低于原状土的饱和含水量,表明枯落物混入能够减少水分蒸发与流失,对提高整体土壤含水量有着积极作用。而人为混入枯落物土的土壤水分比原状混入枯落物土后的土壤含水量多,这

可能是由于当人为地混入枯落物时,如果添加的数量超过了自然状态下土壤所能承载的量,那么这些额外的枯落物可能会改变土壤的结构和性质,增加土壤孔隙度、改善土壤通气性等,这都有可能使得土壤能够容纳更多的水分,因此测得的土壤毛管含水量可能会比自然状态时偏大。

在同一混入量下,刺槐×紫穗槐、刺槐×山杏、刺槐×山桃混入后土壤水分均高于刺槐纯林,刺槐×油松与刺槐×沙棘混入后土壤水分低于刺槐纯林,其中刺槐×油松为针阔混交林,刺槐纯林为阔叶纯林,前者含水量低于后者,这与邓仕坚等^[26]的研究结果一致。此外,刺槐×油松的枯落物主要是掉落的松针和枯枝,保水性较差,易干燥,使得土壤表层水分较低^[27],刺槐×沙棘土壤水分较低可能是由于不同树种间根系结构与分布不同,前者均为乔木混交,而刺槐×沙棘属于乔灌混交,其根系较为浅薄,对表层土壤水分的消耗要高于其余混交林^[28],并且沙棘的枯落物可能疏松且含有一些易于分解的物质,这些结构可能增加土壤表面的通风性和暴露度,从而促进土壤水分的蒸发。而前者中刺槐与紫穗槐均属于豆科物种,其生长特性与适应环境的能力较为一致,二者混交后物种间竞争较小,使其在自然环境中更高效地利用水分与热量资源,提高保持水分的能力。刺槐×山杏、刺槐×山桃为当地乡土树种,对研究区域的立地条件适应较快,且刺槐×紫穗槐为天然人工林,其土壤水分高于刺槐×山杏与刺槐×山桃,说明天然林的水源涵养能力相较于经济果林要高,这与艾彪等^[29]的研究结果相一致。

随着混入量的增加,刺槐纯林、刺槐×沙棘、刺槐×油松与刺槐×山杏混交林的平均含水量均呈现轻微波动上升趋势,基本在 1 000 g/m² 时含水量达到最大,但并非随着混入量越高含水量越大,这可能是过量的枯落物会导致土壤通气性下降,抑制微生物活动,甚至导致土壤酸化等问题。

4 结 论

(1) 枯落物混入土壤有助于提高土壤含水量,尤其是毛管含水量,而人为枯落物混入的效果更为显著且混交林地对土壤表层水分含量也存在影响。原状枯落物混入土的毛管含水量和重力含水量均高于裸土,而人为枯落物混入土的毛管含水量更高,重力含水量较低。在裸土与原状混入比较中,大部分混交林原状土的毛管含水量和重力含水量均高于裸土,其中刺槐纯林和刺槐×紫穗槐的毛管含水量增加幅度较大。而在原状混入与人为混入比较中,所有混交人工

林的毛管含水量均有所增加,重力含水量则相对降低,但饱和含水量均高于原状土。

(2) 不同枯落物混入类型的土壤蒸发过程明显不同。在不同混入类型与土壤含水量的关系中,不同树种间存在显著性差异($p < 0.05$),其中 5 种混交人工林中,混入刺槐×紫穗槐与刺槐×山杏类型的枯落物显著提高了土壤含水量,混入刺槐×沙棘类型的枯落物土壤含水量提升作用相对较小,因此刺槐×紫穗槐与刺槐×山杏这两种林分类型中的枯落物层在减缓土壤水分蒸发与增强土壤保水性能方面更为有效,对于森林水源涵养,存储水分有着积极作用。

(3) 不同枯落物混入量可以有效减缓土壤蒸发,随着混入量的增加,4 种人工林土壤含水量呈波动变化,基本上均高于对照组,且基本在混入量为 1 000 g/m² 时土壤含水量达到最大。

参考文献 (References)

- [1] 林波,刘庆,吴彦,等.森林凋落物研究进展[J].生态学杂志,2004,23(1):60-64.
Lin Bo, Liu Qing, Wu Yan, et al. Advances in the studies of forest litter [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23 (1): 60-64.
- [2] 涂志华,范志平,孙学凯,等.大伙房水库流域不同植被类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报,2019, 33(1):127-133.
Tu Zhihua, Fan Zhiping, Sun Xuekai, et al. Hydrological effects of litters layer and soil layer in different vegetation types in Dahuofang watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1):127-133.
- [3] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等.森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998, 12(2):23-28.
Wu Qinxiao, Zhao Hongyan, Liu Xiangdong, et al. Evaluation on role of forest litter to water source conservation and soil and water conservation [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 12 (2):23-28.
- [4] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究[J].林业科学,2003, 39(1): 168-172.
Zhao Hongyan, Wu Qinxiao, Liu Guobin. Studies on soil and water conservation functions of litter in chinese pine stand on Loess Plateau [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(1):168-172.
- [5] 郑江坤,王婷婷,付万全,等.川中丘陵区典型林分枯落物层蓄积量及持水特性[J].水土保持学报,2014, 28(3): 87-91.
Zheng Jiangkun, Wang Tingting, Fu Wanquan, et al.

- Storage and water holding characteristics of the litter layer of typical forest types in the central Sichuan hilly region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 87-91.
- [6] Pereira L C, Balbinot L, Lima M T, et al. Aspects of forest restoration and hydrology: The hydrological function of litter [J]. *Journal of Forestry Research*, 2022, 33(2): 543-552.
- [7] 万春红, 陶楚, 杨小波, 等. 森林群落物种组成对凋落物组成的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(22): 7435-7443.
Wan Chunhong, Tao Chu, Yang Xiaobo, et al. Impact of forest community species composition on litter species composition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7435-7443.
- [8] 张月, 马岚, 何娇, 等. 晋西黄土区典型林分枯落物持水特性[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(12): 3177-3183.
Zhang Yue, Ma Lan, He Jiao, et al. Water holding characteristics of litters of typical forest in loess area of Western Shanxi Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(12): 3177-3183.
- [9] Tsukamoto J. Downhill movement of litter and its implication for ecological studies in three types of forest in Japan [J]. *Ecological Research*, 1991, 6(3): 333-345.
- [10] 王忠禹, 王兵, 刘国彬, 等. 黄土丘陵区典型植被枯落物坡面分布及混入土壤对土壤性状的影响[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(11): 2020-2031.
Wang Zhongyu, Wang Bing, Liu Guobin, et al. Distribution of plant litter on the slope and its effect of litter incorporated in the soil on soil properties in typical vegetation community in loess hilly region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(11): 2020-2031.
- [11] Li Zhenwei, Zhang Guanghui, Geng Ren, et al. Spatial heterogeneity of soil detachment capacity by overland flow at a hillslope with ephemeral gullies on the Loess Plateau [J]. *Geomorphology*, 2015, 248: 264-272.
- [12] 杨寒月, 张光辉, 张宝军. 黄土丘陵区沟坡典型植物群落枯落物蓄积量及其持水性能[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(3): 83-90.
Yang Hanyue, Zhang Guanghui, Zhang Baojun. Litter and its water-holding properties of typical plant communities distributed on gully steep slopes in the loess hilly-gully region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(3): 83-90.
- [13] 张喜荣, 蔡艳蓉, 赵晶, 等. 黄土高原水土流失造成的危害及其综合治理措施[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(28): 15776-15781.
Zhang Xirong, Cai Yanrong, Zhao Jing, et al. Caused harm of soil erosion in the Loess Plateau and its comprehensive control measures [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(28): 15776-15781.
- [14] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7398-7409.
Li Zongshan, Yang Lei, Wang Guoliang, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [15] 庞启航, 毕忠飞, 樊晓华, 等. 新时期黄土高原水土流失治理存在问题与对策[J]. *人民黄河*, 2022, 44(S1): 73-74.
Pang Qihang, Bi Zhongfei, Fan Xiaohua, et al. Problems and countermeasures of soil erosion control in Loess Plateau in the new period [J]. *Yellow River*, 2022, 44(S1): 73-74.
- [16] 张光辉. 退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(4): 143-154.
Zhang Guanghui. Potential effects of changes in near soil surface characteristics driven by farmland abandonment on soil erosion [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(4): 143-154.
- [17] Deng Lei, Shangguan Zhouping, Sweeney S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7039.
- [18] 刘佳鑫. 黄土丘陵区典型草地枯落物混入对土壤分离过程的影响及其季节响应[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
Liu Jiaxin. Effects of mixing of typical grassland litter on soil segregation process and its seasonal response in loess hilly area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2020.
- [19] 淡彩虹. 黄土高原人工林混交模式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
Dan Caihong. Effects of plantation forest mixing patterns on soil aggregate stability and organic carbon in the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2023.
- [20] 苟清平, 朱清科, 李依璇, 等. 陕北黄土区不同林地土壤干燥化效应[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7161-7168.
Gou Qingping, Zhu Qingke, Li Yixuan, et al. Soil desiccation effects under different vegetation types in the loess region of Northern Shaanxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(19): 7161-7168.
- [21] 史嘉豪, 闫慧玲, 王思艺, 等. 黄土高原退耕还林区典型植被大型土壤动物群落特征[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(3): 68-75.
Shi Jiahao, Yan Huiling, Wang Siyi, et al. Characteristics of large soil animal communities in the returning farmland to forests area of the Loess Plateau [J]. *Journal of Yan'an University (Natural Science Edition)*,

- 2024,43(3):68-75.
- [22] 董育公.陕北黄土高原植物群落物种多样性特征分析[J].陕西农业科学,2024,70(6):58-62.
Dong Yugong. Analysis of species diversity characteristics of plant communities in Loess Plateau of Northern Shaanxi [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2024,70(6):58-62.
- [23] 张宝琦,王忠禹,杨艳芬,等.黄土丘陵沟壑区典型灌木林地枯落物的蓄积特征及持水性能[J].水土保持通报,2019,39(4):76-81.
Zhang Baoqi, Wang Zhongyu, Yang Yanfen, et al. Accumulation and water-holding capacity of typical shrub woodland litters in loess hilly region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(4):76-81.
- [24] 张益望.黄土高原半干旱区山杏种群生长与水分生态特性研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2006.
Zhang Yiwang. Research on the growth and water ecological characteristics of mountain almond populations in the semi-arid region of the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2006.
- [25] 韩蕊莲,侯庆春.山桃山杏苗木耗水特性研究[J].西北植物学报,1996,16(6):92-94.
Han Ruilian, Hou Qingchun. Study on water consumption characteristics of mountain peach and mountain apricot seedlings [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1996,16(6):92-94.
- ~~~~~
- (上接第53页)
- [31] 孙浩,刘晓勇,何齐发,等.修河上游流域4种森林类型的水源涵养功能评价[J].水土保持研究,2017,24(4):337-341.
Sun Hao, Liu Xiaoyong, He Qifa, et al. Assessments of four types of forests on soil water conservation functions in the upper reaches of Xiu River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(4):337-341.
- [32] 李鹏,陈璇,杨章旗,等.不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):368-377.
Li Peng, Chen Xuan, Yang Zhangqi, et al. Effects of litter input on soil physical and chemical properties of *Pinus massoniana* plantations with different densities [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):368-377.
- [33] 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.
Zhao Min, Dai Quanhong, Yan Youjin, et al. Litter and soil hydrological effects of typical vegetation types in Karst Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):241-249.
- [34] 陈进,徐明,邹晓,等.贵阳市不同林龄马尾松林凋落物储量及持水特性[J].水土保持研究,2018,25(6):146-151.
Chen Jin, Xu Ming, Zou Xiao, et al. Litter layer reserve and water holding capacity of *Pinus massoniana* in different successional stages in Guiyang [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(6):146-151.
- [35] Shi Rui, Li Biao, Liu Shaoxiong, et al. Water holding characteristics of litters from different ecological public welfare forest types [C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Green Materials and Environmental Engineering. December 20-21, 2015. Phuket, Thailand. Paris, France: Atlantis Press, 2015:55-59.
- [36] 李开凤.不同叶形凋落物层持水能力及其影响因素研究[D].贵州 贵阳:贵州大学,2021.
Li Kaifeng. Study on the water holding capacity of different leaf litter layers and its influencing factors [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University, 2021.