
**
*
试
验
研
究
*
**

平朔煤矿废弃地刺槐凋落物水文 变化与养分归还潜力

王东丽^{1,2}, 石婧婧¹, 赵晓亮^{1,2}, 宋子岭¹, 柴书杰³, 李明清³

(1. 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 矿山重大灾害防治与环境修复协同创新中心, 辽宁 阜新 123000; 3. 中煤平朔集团有限公司生态产业管理中心, 山西 朔州 036000)

摘要: [目的] 研究平朔露天矿排土场 20~30 a 人工林凋落物的水文特征和养分归还潜力对其衰退变化的响应, 为退化人工林的生态修复提供科学依据。[方法] 以平朔矿区刺槐纯林与刺槐—榆树混交林不同衰退程度林分凋落物为研究对象, 研究其存量、持水特性、养分含量及归还潜力。[结果] ①混交林重度衰退时凋落物蓄积量较正常林明显多 49.4% ($p < 0.05$)。②随衰退程度的增强, 两种林分凋落物的最大持水量总体均呈上升趋势。吸水速率的变化过程表现为前期吸水速率降低较快, 后期变化趋缓。刺槐—榆树混交林的凋落物最大持水量、最大持水率和持水率均高于刺槐纯林。③刺槐—榆树混交林的凋落物 C 含量是刺槐纯林 2.11 倍。刺槐纯林重度衰退时较正常林 N, K 含量分别显著增加 0.9%, 0.13% ($p < 0.05$)。刺槐—榆树混交林重度衰退时较正常林 P, K 含量分别显著增加 0.07%, 0.04% ($p < 0.05$)。不同林分不同衰退程度的 C, N, K 养分潜在归还量均存在差异显著性 ($p < 0.05$)。[结论] 矿区人工林衰退增强了其凋落物的持水性及养分归还潜力, 有利于退化林地的改善, 且刺槐—榆树混交林相对占优势。

关键词: 煤矿废弃地; 人工衰退林; 凋落物; 养分归还量; 水文特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0001-09

中图分类号: S157.1, S271

文献参数: 王东丽, 石婧婧, 赵晓亮, 等. 平朔煤矿废弃地刺槐凋落物水文变化与养分归还潜力[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 1-9. Wang Dongli, Shi Qiangqiang, Zhao Xiaoliang, et al. Hydrological shifts and nutrient return potential in *Robinia pseudoacacia* litters in Pingshuo coal mine wasteland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 1-9. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.004; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.004.

Hydrological shifts and nutrient return potential in *Robinia pseudoacacia* litters in Pingshuo coal mine wasteland

Wang Dongli^{1,2}, Shi Qiangqiang¹, Zhao Xiaoliang^{1,2}, Song Ziling¹, Chai Shujie³, Li Mingqing³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University,

Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. Collaborative Innovation Center for Prevention and Control of

Major Mining Disasters and Environmental Restoration, Fuxin, Liaoning 123000, China; 3. Ecological

Industry Management Center, China Coal Pingshuo Group Co., Ltd., Shuozhou, Shanxi 036000, China)

Abstract: [Objective] The hydrological characteristics and nutrient return potential of litter in 20—30-year-old artificial forests on the Pingshuo open-pit coal mine wasteland, and their response to degradation dynamics were investigated, in order to provide a scientific basis for the ecological restoration of degraded artificial forests. [Methods] Taking the litterfall of different degraded *Robinia pseudoacacia* pure forest and *R. pseudoacacia-Elmus pumila* mixed forest in Pingshuo mining area as the research object, the stock, water-holding characteristics, nutrient content and return potential were studied. [Results] ① The litter accumulation in severely declined mixed

收稿日期: 2024-11-25

修回日期: 2025-01-16

采用日期: 2025-01-16

资助项目: 矿山重大灾害防治与环境修复协同创新中心开放课题“半干旱露天矿排土场不同生态修复模式的植被与土壤演变及耦合机制研究”(CXZX-2024-14); 2024 年度辽宁省教育厅基本科研项目(LJ212410147039); 中煤平朔集团有限公司委托项目“平朔矿区生态重建区域植被退化及防治措施研究”

第一作者: 王东丽(1986—), 女(汉族), 山西省怀仁市人, 博士, 副教授, 主要从事植被恢复与生态修复方面的研究。Email: starhome0522@163.com。

通信作者: 赵晓亮(1981—), 男(汉族), 安徽省淮北市人, 博士, 教授, 主要从事矿山环境工程研究。Email: zhaoxiaoliang2008@126.com。

forests was significantly higher by 49.4% compared to normal forests ($p < 0.05$). With an increasing degree of decline, the maximum water-holding capacity of litter generally increased in both forest types. The water absorption rate showed a rapid decrease in the early stage and a gradual change in the later stage. The maximum water holding capacity, maximum water holding rate, and water holding rate of litter in *R. pseudoacacia-E. pumila* mixed forests were higher than those in *R. pseudoacacia* forests. The carbon content of litter in *R. pseudoacacia-E. pumila* mixed forests was 2.11 times that in *R. pseudoacacia* forests. In severely degraded *R. pseudoacacia* forests, nitrogen and potassium contents significantly increased by 0.9% and 0.13%, respectively, compared with those in relatively intact forests ($p < 0.05$). In severely degraded *R. pseudoacacia-E. pumila* mixed forests, phosphorus and potassium contents significantly increased by 0.07% and 0.04%, respectively, compared with relatively intact forests ($p < 0.05$). There were significant differences in the potential return amounts of carbon, nitrogen, and potassium nutrients among the different forest types and degrees of decline ($p < 0.05$). [Conclusion] The decline in artificial forests in the mining area enhanced the water-holding capacity and nutrient return potential of the litter, which is beneficial for the improvement of degraded forest lands. *R. pseudoacacia-Elm* mixed forests exhibited relative advantages in these respects.

Keywords: coal mine wasteland; degraded artificial forest; litters; nutrient return quantity; hydrology

矿产资源开采在推动社会经济快速发展的同时也会破坏矿区生态环境,损毁矿山土地资源^[1]。尤其是露天开采^[2],造成地形地貌破碎、自然植被破坏、土壤结构紊乱等生态损毁问题^[3]。目前中国涉及露天开采矿山近 1.90×10^4 座,占地面积约 2.00×10^6 hm^2 ^[4]。植被恢复是露天矿排土场生态修复的最基本、最关键的方式^[5],人工林营建是中国矿区早期植被恢复的主要途径^[6]。然而,中国人工林总体上质量不高、经济和生态效益较低,生境恶劣、极端气候胁迫、人为扰动等多重干扰下的矿区人工林出现不同程度的衰退现象,其防治及演化机理对保障矿区生态环境改善与可持续发展意义重大^[7]。

凋落物层具有较强的水分截持能力,其水文特征直接影响土壤中水分含量^[8-9],进而影响植物的生长,衰退情况^[10],其水文功能一直备受关注。研究发现不同树种混交对凋落物存量、持水性和养分影响显著^[11],同时凋落物的分解过程也影响着土壤有机质的积累、养分的转化以及生物活性的强度,进而改善土壤结构,调整土壤元素,构成动态的元素和能量循环^[12],直接制约森林生态系统的养分归还。研究表明黄土丘陵沟壑区人工乔木、灌丛不同物种间凋落物 C, N 含量差异极显著^[13]。黄先飞等^[14]针对梵净山自然保护区以冷杉林为主开展了凋落物动态及养分特征研究。然而,这些研究多聚焦于不同区域、林分、植被类型等的凋落物水文特征和养分含量,关于凋落物水文特征及养分归还潜力与林分衰退的关系鲜见报道。

平朔露天煤矿作为中国大型露天矿之一,排土场的生态重建任务一直艰巨。排土场土地复垦近 40 a 来,取得一定成果。然而,近年来平朔露天矿生态重

建早期种植的人工林出现不同程度的退化现象,林分结构、小气候及其林下群落随之改变,凋落层如何变化及其对生态恢复的影响急需明确。因此,本研究以平朔露天煤矿排土场不同衰退程度的人工刺槐林、刺槐—榆树混交林为研究对象,研究其林下凋落物的水文特性和养分归还潜力对其衰退变化的响应,进而为矿区排土场人工林衰退演变规律与机理的研究提供理论依据,也为矿区排土场人工林及其凋落物管理提供指导价值。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区所属的山西省朔州市平鲁区($112^{\circ}11' - 113^{\circ}30'E, 39^{\circ}23' - 39^{\circ}37'N$),地处黄土高原晋陕蒙接壤的黑三角地带,区内黄土广布、植被稀少、水土流失严重,生态系统较为脆弱。该地区属典型的温带半干旱大陆性季风气候区,平均气温为 $4.8 \sim 7.8$ $^{\circ}\text{C}$,极端低温可达 -32.6 $^{\circ}\text{C}$,极端高温可达 37.9 $^{\circ}\text{C}$,无霜期约 115~130 d。最大冻土深度 1.31 m。年降水量在 195.6~757.4 mm,年均降水量在 428.2~449.0 mm,且 60% 主要集中在 6—9 月。年蒸发量在 1 786.7~2 598.0 mm,是年降水量的 5 倍左右。该区每年有风时间占全年总时间的 70%,年平均风速 2.3~4.7 m/s,最大风速可达 21.7 m/s。地带性土壤为栗钙土,其成土母质为花岗岩或片麻岩的风化物,土壤物理风化较为强烈且土体干旱,平均风速为 2.5~4.2 m/s,年均日照时间为 2 750~2 808 h。地带性植被以耐旱的灌草植物为主,如兴安胡枝子 (*Lespedeza davurica*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 等^[15]。

平朔矿区下辖安太堡、安家岭和东露天3大露天煤矿,自1985年开建以来,共建有安太堡南排、内排、西排、西排扩大区,安家岭西排、东排、内排,东露天北排和麻地沟9个排土场。自1992年开始复垦,累计复垦约3400 hm²,包括人工林、牧草、农业等多种复垦模式,其中人工林复垦模式为早期的主要复垦方式,涉及榆树、刺槐、杏树、国槐、沙棘等纯林、多树种混交林,覆土均为100 cm。2000年前后,在安太堡南排、安家岭西排等区域营建的人工林出现刺槐、杨树、沙枣、沙棘等树种退化严重的现象,特别是刺槐树种,即使在混交林中也出现明显的枯梢、黄叶,甚至枯死等现象。

1.2 样地选取

基于在平朔露天矿的矿区排土场进行全面踏查,选取退化最为典型的刺槐树种作为研究对象,故选取相同龄级的刺槐人工林和刺槐×榆树混交林两类存在典型衰退的林分,其中混交林中的刺槐出现衰

退现象,而榆树则出现较多更新苗。2021年7—8月,分别从安家岭西排土场(AJL)和安太堡南排土场(ATB),在充分考虑立地条件、覆土条件、施工条件等背景条件的一致性基础上选取样地,选取面积不小于1 km²代表性林地,并从其中选取6个长度大于100 m,宽度根据实际情况而定的样地。每个样地间距离大于100 m,各样地均匀分布于代表性林地中。结合平朔露天矿排土场人工林特点,以主干干枯率占比及林木叶片稀疏度作为林木衰退程度划分依据,将主干无干枯,枝叶繁茂,定义为正常木。主干干枯率占全株的1/3~1/2,或者主干无干枯,但枝叶稀疏,不足正常木的1/3,定义为轻度衰退木。将主干干枯率已超过全株的2/3,枝叶极其稀疏,定义为重度衰退木,不同程度衰退林依不同衰退林木的比例进行区分。

本研究选取不同衰退程度代表性林地,具体情况详见表1。

表1 样地概况
Table 1 Overview of sample plots

样地编号	排土场编号	林分类型	林分密度/(株·hm ⁻²)	枯死率/%	存活率/%	衰退类型
P _{CK}	AJL	刺槐纯林	2 733	15	85	正常林
P _L	AJL	刺槐纯林	2 233	43	57	轻度衰退林
P _H	AJL	刺槐纯林	3 033	63	37	重度衰退林
M _{CK}	ATB	刺槐×榆树混交林	4 900	27	73	正常林
M _L	ATB	刺槐×榆树混交林	4 100	56	44	轻度衰退林
M _H	ATB	刺槐×榆树混交林	4 500	77	23	重度衰退林

1.3 凋落物特征调查与样品采集

2021年7—8月,分别在上述所选样地按S形随机布设6个0.5 m×0.5 m的样方,且每个样方间隔大于10 m。统计凋落物盖度与厚度,并从中选取3个代表性样方,凋落物采用全样收集法进行采集、装袋,带回实验室备用。

1.4 样品测定

1.4.1 凋落物的分类、蓄积量测定

(1) 凋落物的分类。将收集的凋落物样品自然风干(使凋落物与其上方土粒处于易分离状态),然后将各凋落物样品按序分为完全分解层、不完全分解与未分解层,并各自标号、装袋,最后在60℃下烘干24 h^[16]。

(2) 凋落物蓄积量的测定。不同分解层凋落物的蓄积量通过烘干法测定其样品的自然含水量,根据凋落物鲜重和其自然含水量计算出不同样方分解层凋落物干重,进而计算单位面积林地上不同分解层凋落物蓄积量,不同分解层凋落物蓄积量之和为总蓄积量。

1.4.2 凋落物持水性测定 包括凋落物持水能力和吸水速率。其中持水能力一般使用凋落物烘干后干物质的最大持水率表示,最大持水率越大,其持水能力越强。使用室内浸泡法对凋落物的持水性进行测定。将上述6个样地的3种烘干凋落物,分别称取一定量样品放入已称重的尼龙袋中,放入装有清水的大烧杯中,烧杯中水面略高于尼龙袋顶部。将凋落物放入水中分别浸泡15 min,30 min,2 h,6 h,14 h,24 h后取出,待沥干多余水分(无水滴滴落时)称量其湿重,最大持水率计算公式为:

$$RH_{\max} = \frac{W_2 - W_1}{W_1}$$

式中:RH_{max}为凋落物最大持水率;W₁为烘干后凋落物干重;W₂为浸水24 h后凋落物湿重。

1.4.3 凋落物养分测定 将烘干后的不同组分凋落物,用植物样品粉碎机粉碎,通过0.5 mm筛,称取0.4 g粉碎样品,有机碳采用H₂SO₄-H₂O₂消煮—重铬酸钾容量法测定;植物全氮采用H₂SO₄-H₂O₂消煮—半微量开氏法测定;植物全磷采用H₂SO₄-H₂O₂消煮

—钒钼黄比色法测定,钾含量采用火焰光度计法测定^[22]。

1.5 数据处理与分析

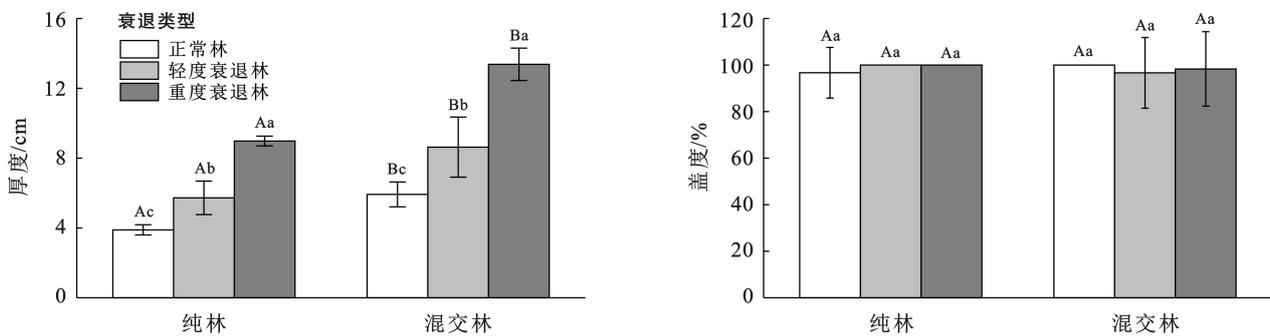
采用Excel 2010进行数据整理和公式计算,采用SPSS 16.0对不同衰退类型间凋落物进行单因素方差分析(ANOVA)和差异性显著分析(LSD),采用OriginPro 2022作图。

2 结果与分析

2.1 凋落物特征

2.1.1 凋落物的盖度与厚度 由图1可知,不同植被类型间凋落物的厚度存在显著差异($p < 0.05$),且两

种植被类型林分的凋落物厚度均表现为随着衰退程度的增强显著增大的趋势($p < 0.05$),其中刺槐纯林重度衰退林较正常林的凋落物厚度高41.3%。刺槐—榆树混交林重度衰退林较正常林的凋落物厚度高22.6%。不同林地的凋落物盖度均较高,虽然不同衰退林间差异不显著,但不同植被类型凋落物盖度对衰退的响应各异,对于刺槐纯林,正常林的凋落物盖度低于衰退林,而刺槐×榆树混交林则反之,可能与刺槐纯林林木衰退较严重,林下植被生长范围较大,进而产生更多凋落物有关。由此可见,凋落物的厚度受林分类型与衰退程度的影响显著,而盖度差异不明显。



注:不同小写字母代表不同样地凋落物差异显著($p < 0.05$),不同大写字母代表衰退程度相同样地纯林与混交林凋落物差异显著($p < 0.05$)。

图1 不同衰退程度林凋落物的厚度和盖度

Fig.1 Thickness and coverage of litters in forests with different degree decline

2.1.2 凋落物的蓄积量 由表2可知,刺槐—榆树混交林的总蓄积量普遍高于刺槐纯林的总蓄积量,且两种植被类型林分的凋落物蓄积量均表现为随着衰退程度的增强逐渐增大的趋势,但不同林分间凋落物的蓄积量表现出类型差异。对于正常林, M_{CK} 样地的总蓄积量显著大于 P_{CK} 样地的总蓄积量($p < 0.05$),且两个林地均表现为未分解层所占比例最大。对于轻度衰退林, M_L 样地的总蓄积量显著大于 P_L 样地的总蓄积量($p < 0.05$),且 P_L 样地和 M_L 样地中完全分解

层所占比例最大。重度衰退林的凋落物蓄积量表现出与轻度衰退林一致的规律。可见,混交林可增加凋落层的总蓄积量,但以未分解所占比重较大。这主要与其林木密度较大,可产生较多且不易分解的凋落物有关。而纯林则以完全分解层所占比重较大。这主要与其林木相对较少,产生不易分解的凋落物相对较少有关。同时,由于林分郁闭度小,林下植被生长较好,会产生较多且易分解的凋落物,其总蓄积量显著增大且以完全分解为主。

表2 不同样地凋落物的蓄积量及组成结构

Table 2 Accumulation and composition structure of litters in different sample plots

样地编号	未分解层		不完全分解层		完全分解层		总蓄积量/ ($t \cdot hm^{-2}$)
	蓄积量/($g \cdot m^{-2}$)	比例/%	蓄积量/($g \cdot m^{-2}$)	比例/%	蓄积量/($g \cdot m^{-2}$)	比例/%	
P_{CK}	330.6 ± 90.0^{bc}	52	119.68 ± 30.0^a	18	192.16 ± 33.1^a	30	2.5 ± 0.7^a
P_L	618.24 ± 30.9^{ab}	35	140.96 ± 41.5^a	8	214.24 ± 37.3^a	57	3.4 ± 0.3^{ab}
P_H	51.64 ± 7.07^c	6	354.88 ± 45.5^c	42	439.8 ± 53.2^{ab}	52	3.8 ± 0.5^{ab}
M_{CK}	731.52 ± 90.24^a	59	108.48 ± 28.8^a	12	259.36 ± 37.4^a	29	4.4 ± 0.1^b
M_L	625.44 ± 84.34^{ab}	23	170.32 ± 54.2^a	19	1179.36 ± 318.2^c	58	8.6 ± 0.7^c
M_H	846.88 ± 110.3^a	39	250.08 ± 39.6^b	11	1095.68 ± 145.2^c	50	8.7 ± 0.4^c

2.2 凋落物持水能力对干扰的响应

2.2.1 凋落物持水量动态变化 由图2可知,持水量总体表现为随时间变化呈逐渐上升趋势。对于正常

林和同一衰退程度的林分,混交林的最大持水量均大于纯林的最大持水量,表明混交林凋落物持水力更强。不同林分类型中重度衰退林凋落物最大持

水量高于轻度衰退林和正常林,主要由于凋落物持水量动态变化与凋落物持水率、蓄积量和组成特征有关。重度衰退林总蓄积量高于轻度衰退林和正常林,

因此其持水能力较强。刺槐—榆树混交林的持水能力普遍高于刺槐纯林,这是因为混交林可增加凋落层的总蓄积量且未分解物质所占比重较大。

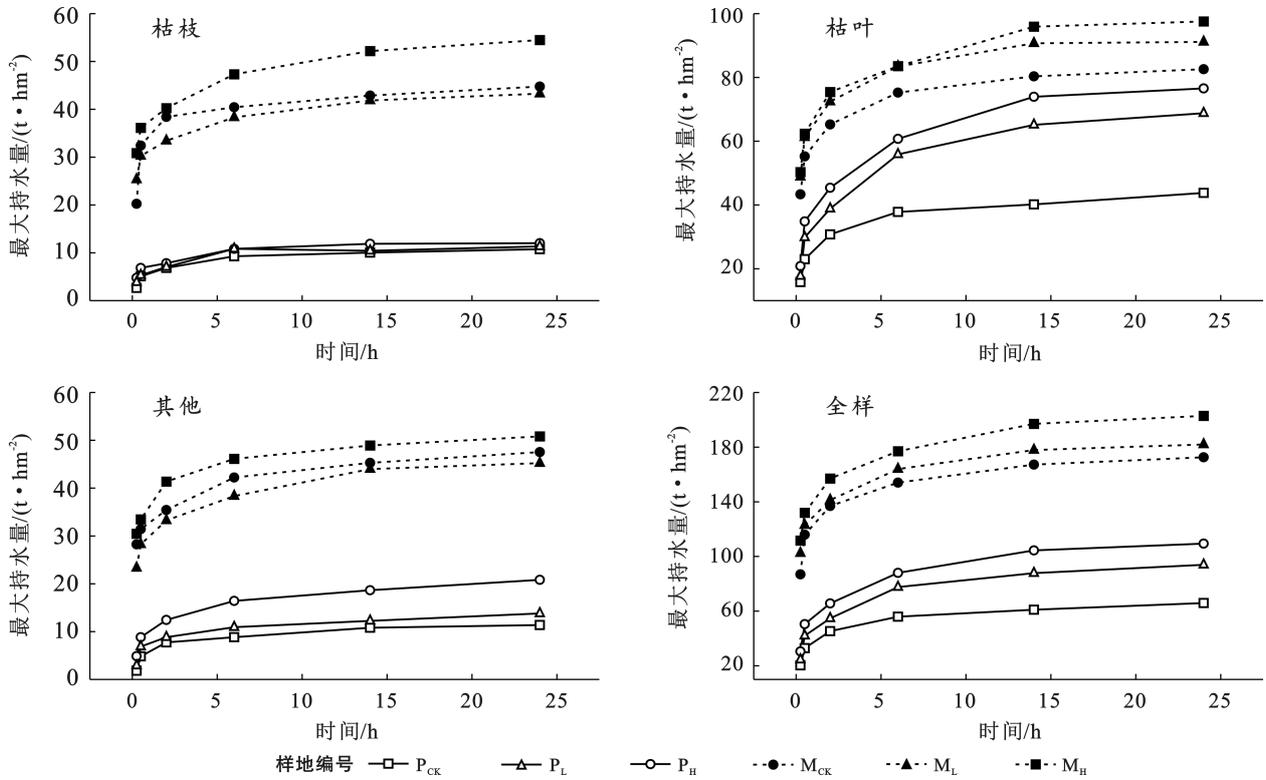


图2 不同样地凋落物持水量动态变化

Fig.2 Dynamic changes in water holding capacity of litters in different sample plots

2.2.2 凋落物最大持水率 由表3可知,刺槐—榆树混交林的最大持水率普遍高于刺槐纯林。不同样地凋落物最大持水率变化趋势表现为:全样>枯叶>其他>枯枝。对于刺槐纯林,不同凋落物均表现为重度衰退林明显高于正常林与轻度衰退林,其中枯枝、枯叶与其他分别高出1.37,18.5和16.2 g/g。对于刺槐—榆树混交林,不同凋落物均表现为重度衰退林明显高于正常林与轻度衰退林,其中枯枝、枯叶与其他分别高出15.1,12.1和11.2 g/g。

枝>其他。不同类型凋落物的持水率在0~24 h时间内均呈现上升趋势,对于正常林,MCK样地的持水率大于PCK样地的持水率,且两个林地均表现为枯叶所占比例最大。对于轻度衰退林,ML样地的持水率大于PL样地的持水率,且PL样地和ML样地中枯叶所占比例最大。重度衰退林的凋落物持水率及组成特征表现出与轻度衰退林一致的规律。不同类型凋落物的持水率在0~24 h时间内均呈现上升趋势,与最大持水量和最大持水率变化一致。刺槐—榆树混交林的最大持水率大于刺槐纯林,这与混交林的凋落物结构更复杂、蓄积量更大有关。

表3 不同样地凋落物最大持水率
Table 3 Maximum water holding capacity of litters in different sample plots g/g

凋落物类型	不同样地最大持水率					
	P _{CK}	P _L	P _H	M _{CK}	M _L	M _H
枯枝	1.09	1.80	2.61	1.54	1.59	4.71
枯叶	3.31	4.17	5.74	5.01	6.67	7.56
其他	1.54	1.49	3.13	2.35	2.45	5.32
全样	5.94	9.29	11.48	8.9	10.71	17.59

注:样地编号具体情况详见表1。

2.2.3 凋落物持水率动态 由图3可知,不同类型凋落物的持水率在0~24 h时间内均呈现上升趋势,不同样地凋落物持水率变化表现为:全样>枯叶>枯

2.2.4 凋落物吸水速率动态 由图4可知,刺槐纯林、刺槐—榆树混交林吸水速率均呈下降趋势,枯枝、枯叶、其他和全样的吸水速率在0.25~2 h内下降趋势明显,2~24 h变化趋缓;其他和全样的变化范围在0.25~2 h内较为相似,凋落物吸水速率的总体变化过程表现为前期吸水速率降低较快,其后变化趋缓。这是因为在凋落物初期浸水阶段,水势差大,枯枝落叶吸水迅速,凋落物持水量随浸水时间延长逐渐增大并趋于饱和,吸水速率随浸水时间延长逐渐减小直至稳定状态。

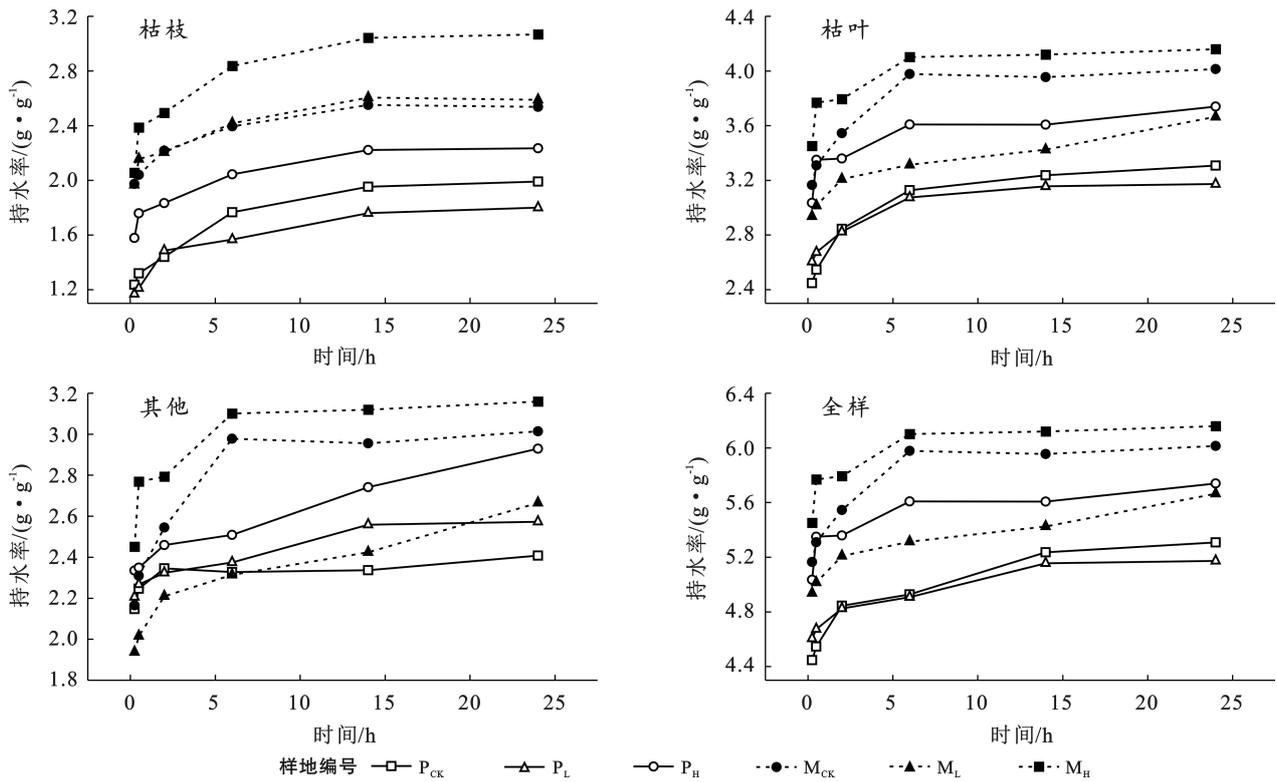


图3 凋落物持水率随浸水时间的变化

Fig.3 Changes in litter water holding rate with soaking time

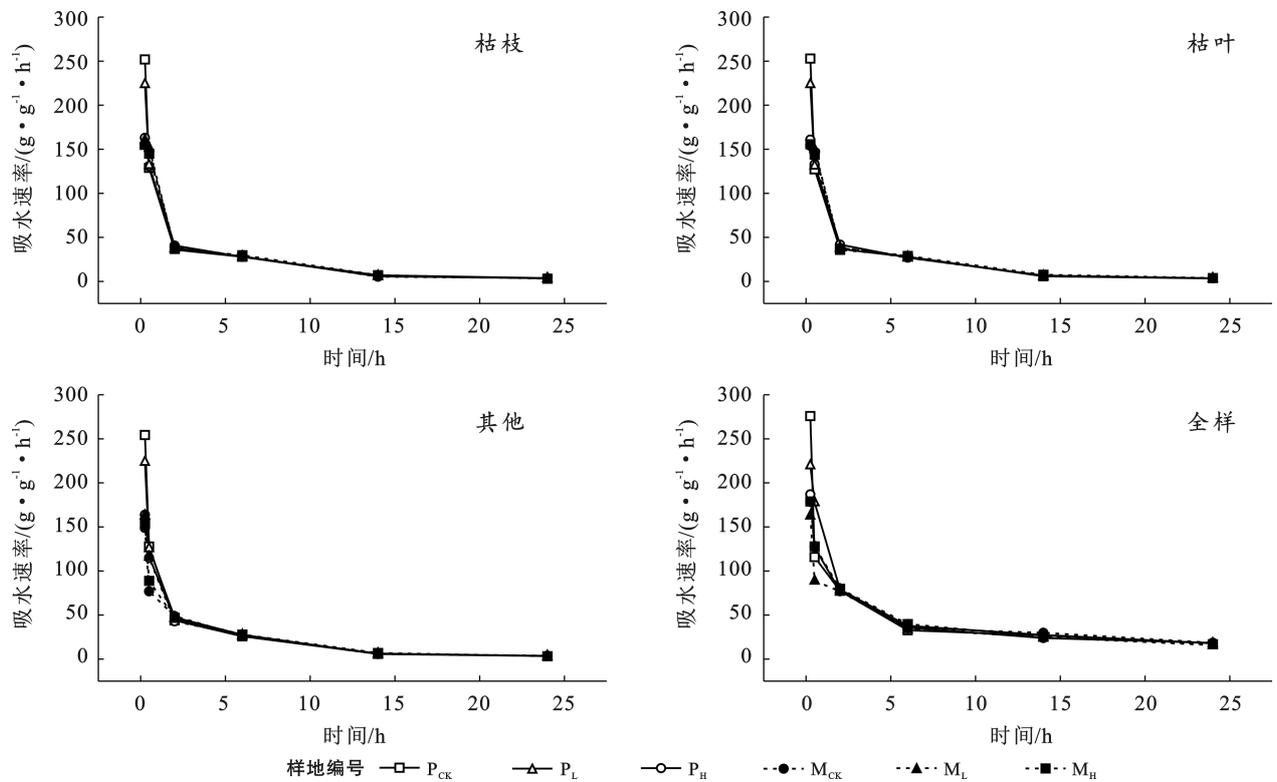


图4 凋落物吸水速率随浸水时间的变化

Fig.4 Changes in litter water absorption rate with soaking time

2.3 凋落物养分归还潜力

2.3.1 凋落物养分含量状况 由表4可知,重度衰退刺槐纯林和刺槐—榆树混交林的有机碳含量差异不

显著,可能是大多数植物体内碳含量高且变异较小的缘故。刺槐—榆树混交林的有机碳含量高于刺槐纯林。正常刺槐纯林的氮含量在1.12%~1.77%,正

常刺槐—榆树混交林的氮含量在1.09%~1.56%，二者间差异不显著，纯林中，重度衰退林较正常林N和K含量分别显著增加了0.9%和0.13% ($p < 0.05$)。刺槐—榆树混交林中，重度衰退林较正常林P和K含量分别显著增加了0.07%和0.04% ($p < 0.05$)。

表4 不同衰退林凋落物养分含量状况
Table 4 Nutrient content status of litters in forests with different degree decline %

样地编号	有机碳含量	氮含量	磷含量	钾含量
P _{CK}	23.74±1.53 ^b	1.45±0.32 ^c	0.16±0.01 ^{ab}	0.31±0.01 ^b
P _L	22.38±2.35 ^a	1.42±0.21 ^{ab}	0.22±0.02 ^a	0.19±0.01 ^{ab}
P _H	23.66±1.37 ^{ab}	2.35±0.52 ^a	0.21±0.04 ^c	0.44±0.02 ^c
M _{CK}	28.92±2.69 ^a	1.51±0.43 ^c	0.17±0.05 ^a	0.22±0.03 ^{ab}
M _L	28.46±3.15 ^a	1.42±0.24 ^b	0.21±0.17 ^{ab}	0.22±0.05 ^b
M _H	29.41±2.14 ^b	1.59±0.12 ^{ab}	0.24±0.03 ^c	0.18±0.01 ^c

2.3.2 凋落物养分潜在归还量 凋落物养分潜在归还量是指凋落物完全分解后所归还到土壤中的养分量，通过各凋落物养分含量与凋落物蓄积量的乘积可估算出凋落物养分的潜在归还量。由表5可知，刺槐—榆树混交林的C, N, P潜在归还量高于刺槐纯林，这主要与其凋落物蓄积量有关。各样地C, N, P, K养分潜在归还量均存在差异显著性 ($p < 0.05$)。

表5 不同衰退林凋落物养分潜在归还量
Table 5 Potential nutrient return of litters in forests with different degrees of decline kg/hm²

样地编号	有机碳归还量	氮归还量	磷归还量	钾归还量
P _{CK}	195.65±0.28 ^c	28.92±0.07 ^b	3.54±0.02 ^d	6.25±0.23 ^c
P _L	148.80±2.19 ^a	21.43±0.10 ^a	2.46±0.01 ^b	2.18±0.17 ^c
P _H	161.78±3.32 ^b	32.64±0.07 ^c	2.34±0.15 ^b	8.63±0.35 ^f
M _{CK}	247.17±1.83 ^d	41.47±0.03 ^d	1.21±0.03 ^a	1.49±0.03 ^b
M _L	417.21±1.63 ^f	45.68±0.28 ^f	2.29±0.01 ^b	1.07±0.21 ^a
M _H	478.79±2.41 ^e	28.99±0.28 ^b	3.32±0.12 ^c	2.41±0.16 ^d

3 讨论

森林系统中凋落物是植物群落及生态系统生态功能的体现和回归，其在物质循环、能量流动中起着重要作用^[17]。森林凋落物蓄积量主要取决于凋落物输入量、分解量和积累年限。本研究中刺槐—榆树混交林的总蓄积量高于刺槐纯林的总蓄积量，根据刘小娥等^[18]的研究结果，可能是因为刺槐—榆树混交林形成复层林冠结构，增加林冠光合作用面积，提高凋落物产量，而刺槐纯林为单一层次林冠结构，林

冠相互遮掩，光能利用率较低，造成光合产能降低。刘尚华等^[19]认为，林分凋落物层厚度也是评价森林质量的指标之一，凋落物厚度与凋落物蓄积量呈显著正相关关系^[20]这与本研究结果一致。同时本研究中，刺槐—榆树混交林凋落物厚度均大于刺槐纯林。这与陈亮等的研究结果一致^[11]，这是因为营建混交林改变单一树种的凋落物结构。此外，不同林分类型厚度大小顺序为：重度衰退林>轻度衰退林>正常林，是因为重度衰退林里凋枝所占比例较大，且凋落物蓄积量较大，而凋枝易产生空隙，相比于其他类型凋落物密度较小，导致平均厚度增大。

凋落物持水能力与植被类型、凋落物蓄积量及其组成特征等因素有关^[21]，最大持水量，吸水速率等是评估凋落物水源涵养功能的重要指标^[22]，决定着凋落物拦截降水及减少地表径流的能力，其中凋落物最大持水量和持水率是最常用的指标^[23]，凋落物持水率及其蓄积量决定凋落物持水量的多少^[24]。本研究中，不同衰退类型的刺槐纯林，刺槐—榆树混交林的最大持水量均总体呈现上升趋势。侯春兰等^[25]认为，不同林分凋落物水源涵养与凋落物层厚度、蓄积量有关。同时，重度衰退林的最大持水量、最大持水率、持水率及吸水速率均高于轻度衰退林和正常林，这与凋落物的总蓄积量有关，重度衰退林的蓄积量高于轻度衰退林和正常林。

凋落物是植物与土壤物质交换的枢纽。凋落物有机质和养分通过分解释放归还给土壤，而土壤在植物生长过程中又源源不断地输送有机质和养分以维持植物生长^[26]。有研究表明植物所吸收的90%以上的N, P, 以及60%以上的矿质元素来源于森林凋落物的分解和归还^[27]。研究发现树种多样性控制着分解和养分循环^[28]，凋落物水文特征对其C, N, P, K等养分潜在归还量有影响^[29]，本研究发现刺槐—榆树混交林的C, N, P潜在归还量均高于刺槐纯林，证实这些结论。张晓曦等^[30]研究发现随林龄增加，刺槐林地凋落物的C, N和P含量总体呈增加趋势，这与本研究重度衰退林C, N, P的养分潜在归还量显著高于轻度衰退林和正常林结果一致，一方面凋落物初始化学性质在控制凋落物分解方面起着核心作用^[31]，其分解质量取决于植物生长和养分摄取状况；研究区土壤物理风化较为强烈且土体干旱^[32]，水文条件较好的地区可能会提高凋落物分解速率，进而改变凋落物C, N, P, K养分归还含量。另一方面，综合考虑凋落物厚度，蓄积量和水文特征等因素会影响土壤生物数量与活性，从而促进凋落物元素释放及生态化学计量特征。

4 结论

平朔矿区不同人工林的凋落物对林分衰退响应不同。刺槐—榆树混交林的总蓄积量高于刺槐纯林。刺槐纯林与刺槐—榆树混交林凋落物的最大持水量和持水率在0~24 h内均呈现上升趋势,吸水速率的总体变化过程表现为前期吸水速率降低较快,其后趋缓。重度衰退林的最大持水量、最大持水率及吸水速率高于轻度衰退林和正常林。刺槐—榆树混交林的有机碳含量高于刺槐纯林,刺槐—榆树混交林的C, N, P潜在归还量高于刺槐纯林,重度衰退林C, N, P的养分潜在归还量高于轻度衰退林和正常林。因此,在平朔矿区排土场的植被重建时应优先考虑混交林模式,作为生态恢复过程中提高水源涵养功能及保护生态脆弱区的有效方法。

参考文献(References)

- [1] 魏远,顾红波,薛亮,等. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 107-114.
Wei Yuan, Gu Hongbo, Xue Liang, et al. Review of studies on reclamation and ecological restoration of abandoned land of mine [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(2): 107-114.
- [2] 李晶,杨超元,殷守强,等. 草原型露天煤矿区土壤重金属污染评价及空间分布特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3676-3684.
Li Jing, Yang Chaoyuan, Yin Shouqiang, et al. Evaluation and spatial distribution characteristics of soil heavy metals pollution in grassland open-pit coal mine area [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3676-3684.
- [3] 毕银丽,伍越,张健,等. 采用HYDRUS模拟采煤沉陷地裂缝区土壤水盐运移规律[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 360-367.
Bi Yinli, Wu Yue, Zhang Jian, et al. Simulation of soil water and salt movement in mining ground fissure zone based on HYDRUS [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 360-367.
- [4] 地调局航空物探遥感中心. 全国露天开采矿山占地面积达到200余万 hm^2 [EB/OL]. <http://www.agrs.cgs.gov.cn/>, 2018-12-04/2023-05-09.
The Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center of the Geological Survey Bureau. The total area occupied by open-pit mines nationwide exceeds 2 million hectares. [EB/OL]. (2018-12-04)/[2023-05-09] Available at: <http://www.agrs.cgs.gov.cn/>, accessed on.
- [5] 张立恒,王翠萍,王昊琛,等. 林草交错带草原保护利用对策研究: 以东北林草交错带为例[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(12): 108-111.
Zhang Liheng, Wang Cuiping, Wang Haochen, et al. Study on the grassland protection and utilization countermeasure in the forest and steep ecotone: Taking the northeast forest and steep ecotone as an example [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(12): 108-111.
- [6] 彭苏萍,毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术及战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211-1221.
Peng Suping, Bi Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.
- [7] 杨梦格,邓莹莹,雷震,等. 桂北地区不同林龄杉木人工林土壤基质入渗变化及影响因素[J]. 应用生态学报, 2024, 35(4): 1007-1015.
Yang Mengge, Deng Yingying, Lei Zhen, et al. Changes and influence factors of soil matrix infiltration in Chinese fir plantations with different stand ages in northern Guangxi [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(4): 1007-1015.
- [8] 李俊超,党廷辉,郭胜利,等. 植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3842-3850.
Li Junchao, Dang Tinghui, Guo Shengli, et al. Soil organic carbon storage changes with land reclamation under vegetation reconstruction on opencast coal mine dump [J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 3842-3850.
- [9] 刘平,杨章旗,颜培栋,等. 马尾松林下植被和凋落物的碳氮磷化学计量特征[J]. 森林与环境学报, 2023, 43(5): 473-480.
Liu Ping, Yang Zhangqi, Yan Peidong, et al. C, N, P stoichiometric characteristics of vegetation and litter in the *Pinus massoniana* understory [J]. Journal of Forest and Environment, 2023, 43(5): 473-480.
- [10] 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.
- [11] 陈亮,王家妍,黄芳,等. 桂南地区4种桉树林分凋落物持水性及养分特征研究[J]. 桉树科技, 2023, 40(2): 47-52.
Chen Liang, Wang Jiayan, Huang Fang, et al. Water holding and nutrient characteristics of four eucalypt stands in southern Guangxi [J]. Eucalypt Science & Technology, 2023, 40(2): 47-52.
- [12] 侯东杰,乔鲜果,高趁光,等. 内蒙古典型草原枯落物的生态水文效应[J]. 草地学报, 2018, 26(3): 559-565.
Hou Dongjie, Qiao Xianguo, Gao Chenguang, et al.

- Hydro-ecological effects of litter in typical steppe of Inner Mongolia [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(3): 559-565.
- [13] 许森平,任成杰,张伟,等.土壤微生物生物量碳氮磷与土壤酶化学计量对气候变化的响应机制[J].应用生态学报,2018,29(7):2445-2454.
Xu Miaoping, Ren Chengjie, Zhang Wei, et al. Responses mechanism of C:N:P stoichiometry of soil microbial biomass and soil enzymes to climate change [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7): 2445-2454.
- [14] 黄先飞,张珍明,刘盈盈,等.梵净山冷杉林凋落物动态及养分特征[J].四川农业大学学报,2018,36(2):161-166.
Huang Xianfei, Zhang Zhenming, Liu Yingying, et al. Litterfall dynamic and nutrient characteristics of *Abies fabric* (mast.) Craib in the Fanjingshan [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, 36(2):161-166.
- [15] 王军,李红涛,白中科,等.矿区不同复垦模式下大型土壤动物功能类群及其分布研究:以山西省平朔矿区为例[J].中国土地科学,2017,31(11):83-90.
Wang Jun, Li Hongtao, Bai Zhongke, et al. Research on functional groups and distribution of soil macro-fauna communities of different reclamation modes in mining area: A case study on Pingshuo mining area, Shanxi Province [J]. *China Land Sciences*, 2017, 31(11):83-90.
- [16] 郑笑影,王东丽,赵晓亮,等.菌剂配施有机肥下植物—土壤—微生物生态化学计量特征及内稳性:以内蒙矿区排土场中药复垦模式为例[J].水土保持学报,2023, 37(5):352-362.
Zheng Xiaoying, Wang Dongli, Zhao Xiaoliang, et al. Ec stoichiometric characteristics and internal stability of plant-soil-microbial ecosystem under organic fertilizer application with fungicides: An example of traditional Chinese medicine reclamation model in a mining site in Inner Mongolia [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5):352-362.
- [17] 张苗苗,刘廷玺,段利民,等.半干旱沙丘与草甸典型植被类型区大气—叶片—凋落物—土壤连续体碳同位素特征[J].生态学报,2022,42(18):7663-7675.
Zhang Miaomiao, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. Carbon isotope characteristics of atmosphere-leaf-litter-soil continuum in typical vegetation types of semi-arid sand dune and meadow [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18):7663-7675.
- [18] 刘小娥,苏世平.兰州市南北两山5种典型人工林凋落物的水文功能[J].应用生态学报,2020,31(8):2574-2582.
Liu Xiaoe, Su Shiping. Hydrological functions of litters under five typical plantations in southern and northern mountains of Lanzhou City, northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8):2574-2582.
- [19] 刘尚华,吕世海,冯朝阳,等.京西百花山区六种植物群落凋落物及土壤呼吸特性研究[J].中国草地学报, 2008, 30(1):78-86.
Liu Shanghua, Lv Shihai, Feng Chaoyang, et al. Study on soil and litter respiration characteristics of six communities in Baihua Mountainous area in west Beijing [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(1):78-86.
- [20] 时忠杰,王彦辉,于澎涛,等.宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究[J].水土保持学报,2005, 19(3):134-138.
Shi Zhongjie, Wang Yanhui, Yu Pengtao, et al. Study on different forestry vegetation's eco-hydrological function in Liupan Mountain of Ningxia China [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(3):134-138.
- [21] 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.
- [22] 郭婧,喻林华,方晰,等.中亚热带4种森林凋落物量、组成、动态及其周转期[J].生态学报,2015, 35(14): 4668-4677.
Guo Jing, Yu Linhua, Fang Xi, et al. Litter production and turnover in four types of subtropical forests in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14):4668-4677.
- [23] 李文影,满秀玲,张阳武.不同林龄白桦次生林土壤特性及其水源涵养功能[J].中国水土保持科学,2009, 7(5):63-69.
Li Wenying, Man Xiuling, Zhang Yangwu. Soil properties and water conservation function of *Betula platyphylla* secondary forest with different stand ages [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(5): 63-69.
- [24] 孟庆权,葛露露,杨馨邈,等.滨海沙地不同人工林凋落物现存量及其持水特性[J].水土保持学报,2019, 33(3):146-152.
Meng Qingquan, Ge Lulu, Yang Xinmiao, et al. Water-holding capacity and accumulation amount of litters in different plantations in coastal sandy area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3):146-152.
- [25] 侯春兰,杨瑞,刘志,等.贵州草海植被恢复区不同草本植物的土壤持水性能[J].贵州农业科学,2019, 47(8): 52-56.
Hou Chunlan, Yang Rui, Liu Zhi, et al. Water holding capacity of soil covered with different herbaceous plants in Caohai vegetation recovery area, Guizhou [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2019, 47(8):52-56.

- [23] 赵文玥,吉喜斌,金博文,等.西北干旱区泡泡刺灌丛的降雨再分配特征及影响因素分析[J].生态学报,2022,42(2):804-817.
Zhao Wenyue, Ji Xibin, Jin Bowen, et al. Rainfall partitioning patterns of the desert shrub *Nitraria sphaerocarpa* and its influencing factors in drylands of northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(2):804-817.
- [24] 马孟良,李强,王疆尧,等.中国旱区森林生态系统的林冠截留综述[J].西北林学院学报,2024,39(5):1-13.
Ma Mengliang, Li Qiang, Wang Jiangyao, et al. A review of canopy interception of forest ecosystems in drylands of China [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024,39(5):1-13.
- [25] 韩青池,裴志永,孙小添,等.库布其沙漠人工沙柳灌丛降雨再分配特征及其抚育时间的影响[J].生态学报,2024,44(19):8661-8674.
Han Qingchi, Pei Zhiyong, Sun Xiaotian, et al. Investigation of rainfall redistribution characteristics in artificial *Salix psammophila* shrub plantations in the Kubuqi Desert and the impact of different management durations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(19):8661-8674.
- [26] 马剑,刘贤德,金铭,等.祁连山西水林区灌木林降雨截留特征[J].水土保持研究,2017,24(3):363-368.
Ma Jian, Liu Xiande, Jin Ming, et al. Characteristics of rainfall interception by shrubs in Xishui forest district of Qilianshan Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(3):363-368.
- [27] 张雪.祁连山东段典型灌丛降雨再分配特征研究[D].甘肃兰州:甘肃农业大学,2021.
Zhang Xue. Study on rainfall redistribution characteristics of typical shrubs in the eastern section of Oilian Mountains [D]. Lanzhou, Gansu: Gansu Agricultural University, 2021.
- [28] 李海防,俞洁蕾,邵西宁,等.半湿润地区6种常用灌木对降雨截留的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(6):83-93.
Li Haifang, Yu Jielei, Shao Xining, et al. Effects of six shrub species in semi-humid region on the rainfall interceptions [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(6):83-93.
- [29] Xiao Qingfu, McPherson E G, Ustin S L, et al. Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California [J]. Hydrological Processes, 2000,14(4):763-784.
- ~~~~~
- (上接第9页)
- [26] 乐易迅,胡敏杰,肖琳,等.河口湿地红树林植被恢复对土壤养分动态的影响[J].水土保持学报,2022,36(3):333-337.
Le Yixun, Hu Minjie, Xiao Lin, et al. Effects of mangrove vegetation restoration on soil nutrient dynamics in estuarine wetlands [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):333-337.
- [27] 赵燕波,纪托末,张丹桔,等.3个树种与巨桉混交土壤理化性质、凋落物量和养分含量特征[J].应用与环境生物学报,2015,21(5):948-953.
Zhao Yanbo, Ji Tuowei, Zhang Danju, et al. Soil physicochemical properties, biomass and nutrient contents of forest litter in mixed plantations of *Eucalyptus grandis* and three tree species [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015,21(5):948-953.
- [28] 潘玉梅,张乃莉.亚热带森林树种多样性对凋落叶分解胞外酶活性的影响[J].生物多样性,2021,29(11):1447-1460.
Pan Yumei, Zhang Naili. Effects of tree diversity on enzyme activity in litter of a subtropical forest ecosystem [J]. Biodiversity Science, 2021,29(11):1447-1460.
- [29] 韩翠,康扬眉,余海龙,等.降水量对4种荒漠草原植物凋落物碳氮磷释放的影响[J].生态学杂志,2022,41(6):1090-1100.
Han Cui, Kang Yangmei, Yu Hailong, et al. Effects of precipitation on the release of carbon, nitrogen, and phosphorus from decomposing litter of four plant species in a desert steppe [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022,41(6):1090-1100.
- [30] 张晓曦,胡嘉伟,王丽洁,等.不同林龄刺槐林地凋落物分解及养分释放对氮沉降的响应差异[J].植物资源与环境学报,2021,30(6):10-18.
Zhang Xiaoxi, Hu Jiawei, Wang Lijie, et al. Response differences in decomposition and nutrient release of litter from *Robinia pseudoacacia* plantations with different stand ages to nitrogen deposition [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2021,30(6):10-18.
- [31] 涂利华,胡红玲,胡庭兴,等.华西雨屏区亮叶桦凋落叶分解对模拟氮沉降的响应[J].植物生态学报,2012,36(2):99-108.
Tu Lihua, Hu Hongling, Hu Tingxing, et al. Response of *Betula luminifera* leaf litter decomposition to simulated nitrogen deposition in the rainy area of west China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012,36(2):99-108.
- [32] 张前进,白中科,郝晋珉,等.黄土区大型露天煤矿排土场景观格局分析:以平朔矿区为例[J].山西农业大学学报(自然科学版),2006,26(4):317-320.
Zhang Qianjin, Bai Zhongke, Hao Jinmin, et al. Landscape pattern analysis of dumping large opencast coal mine within loess area [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2006,26(4):317-320.