

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.004

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, 169.

CAO Zetao, DENG Yangxu, TIAN Jing, 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, 169.

混交刺槐人工林枯落物蓄积特征及其水文效应

曹泽涛¹, 邓杨旭², 田婧^{2,4}, 王兵^{2,3}, 刘国彬^{2,3}, 杨艳芬^{1,2,3}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.云南省水利水电勘测设计院有限公司, 昆明 650021)

摘要: [目的] 研究典型混交刺槐人工林蓄积特征及其水文效应对深入探究黄土高原人工林涵养水源能力具有重要意义。[方法] 选取黄土丘陵区 5 种不同混交模式(刺槐×沙棘、刺槐×紫穗槐、刺槐×油松、刺槐×山桃、刺槐×山杏)刺槐人工林为研究对象, 以刺槐纯林为对照, 通过野外调查、室内试验对不同混交模式枯落物蓄积量、持水及蒸发特性进行定量研究。[结果] (1) 不同混交刺槐人工林总蓄积量为 0.29~1.01 kg/m², 且半分解枯落物占比均>60%。除刺槐×紫穗槐, 各混交类型叶的蓄积量占比均大于刺槐纯林。(2) 不同混交类型枯落物在 24 h 后持水量均趋于稳定, 无显著差异。其中, 枯落物各器官的最大持水量呈叶>草>果>枝趋势。刺槐×紫穗槐的有效拦蓄量最大(1.74 kg/m²), 半分解枯落物的有效拦蓄量均大于未分解($p<0.05$)。(3) 半、未分解枯落物蒸发在 84, 60 h 后达到稳定阶段, 其各器官的蒸发量、蒸发速率均呈叶>草>果>枝趋势。(4) 持水-蒸发耦合过程中, 持水阶段存在显著的对数关系($R^2\geq 0.84, p<0.01$), 蒸发阶段存在显著幂函数关系($R^2\geq 0.94, p<0.01$), 室内和室外枯落物分别在 48~60, 24~36 h 达到自然含水量。[结论] 整体上, 刺槐×紫穗槐枯落物的水文效应最佳。研究结果以期为该区植被恢复与水土保持工程建设及其生态效益评价提供科学依据。

关键词: 混交; 刺槐人工林; 枯落物; 水文效应

中图分类号: S715.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)06-0152-09

Accumulation Characteristics and Hydrological Effects of Litter in Mixed *Robinia pseudoacacia* Plantations

CAO Zetao¹, DENG Yangxu², TIAN Jing^{2,4}, WANG Bing^{2,3}, LIU Guobin^{2,3}, YANG Yanfen^{1,2,3}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest

A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy

of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Yunnan Institute of Water & Hydropower

Engineering Investigation, Design Co., Ltd., Kunming 650021, China)

Abstract: [Objective] Studying the accumulation characteristics and hydrological effects of typical mixed *Robinia pseudoacacia* plantations is crucial for deeply investigating the water conservation capacity of artificial forests on the Loess Plateau. [Methods] This study focused on five different mixed planting patterns of *Robinia pseudoacacia* in the loess hilly region, including *R. pseudoacacia* × *Hippophae rhamnoides*, *R. pseudoacacia* × *Amorpha fruticosa*, *R. pseudoacacia* × *Pinus tabulaeformis*, *R. pseudoacacia* × *Prunus davidiana*, and *R. pseudoacacia* × *Prunus sibirica*, with pure *R. pseudoacacia* plantations serving as a control for comparative analysis. Through field investigations and laboratory experiments, quantitative research was conducted on the accumulation, water-holding capacity, and evaporation characteristics of litter in these mixed plantations. [Results] (1) The total litter accumulation in different mixed *R. pseudoacacia*

收稿日期: 2024-05-16 修回日期: 2024-07-09 录用日期: 2024-07-20 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-10-14

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42271042); 国家重点研发计划项目 (2022YFF1300405); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划 (XAB2022YW03)

第一作者: 曹泽涛 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态水文过程研究。E-mail: cztoops@163.com

通信作者: 杨艳芬 (1984—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事生态水文过程与模拟研究。E-mail: yfyang@ms.iswc.ac.cn

plantations ranged from 0.29 to 1.01 kg/m², with semi-decomposed litter accounting for more than 60% in all cases. Except for the mixture with *A. fruticosa*, the leaf litter accumulation in other mixtures was higher than that in pure *R. pseudoacacia* plantations. (2) After 24 hours, the water-holding capacity of litter from different mixtures stabilized with no significant differences. The trend for different organs was leaf > grass > fruit > branch. Furthermore, the effective interception and storage capacity of *R. pseudoacacia* × *A. fruticosa* was the largest (1.74 kg/m²), and the effective storage capacity of semi-decomposed litter was greater than that of undecomposed litter ($p < 0.05$). (3) Evaporation of semi-decomposed and undecomposed litter reached a stable stage after 84 and 60 hours, respectively. The evaporation amount and rate followed the same trend as water-holding capacity, in the order of leaf > grass > fruit > branch. (4) During the water-holding and evaporation coupling process, a significant logarithmic relationship existed in the water-holding phase ($R^2 \geq 0.84$, $p < 0.01$), while a significant power function relationship was observed in the evaporation phase ($R^2 \geq 0.94$, $p < 0.01$). The natural water content of litter was reached indoors and outdoors between 48~60 hours and 24~36 hours, respectively. [Conclusion] Overall, the hydrological effect of *R. pseudoacacia* × *A. fruticosa* litter was optimal. These findings provide a scientific basis for vegetation restoration, soil and water conservation projects, and ecological benefit evaluation in the region.

Keywords: mixed planting; *robinia pseudoacacia* plantation; litter; hydrological effects

Received: 2024-05-16

Revised: 2024-07-09

Accepted: 2024-07-20

Online(www.cnki.net): 2024-10-14

枯落物是森林近地表的重要组成部分,是森林生态系统物质循环和能量流动的关键环节,具有截留降水、滞缓地表径流和抑制土壤蒸发等功能^[1-2]。枯落物蓄积量、分层结构、组分构成、持水性能等特征,不仅反映森林生态系统的生产力和稳定性,而且也影响其水分平衡和水文响应。枯落物水文效应主要表现为2个方面,一方面,枯落物具有拦蓄与持水功能,可有效地拦截和存储降水,减少地表径流,增加地下水的补给;另一方面,枯落物对蒸发和微环境的调节作用,覆盖在地表的枯落物能降低地表温度,减少土壤水分的直接蒸发,并通过改变林内微气候环境来进一步调控蒸发过程。在不同林分类型中,较高的林分高度可降低森林地表蒸发率,尽管枯落物贮水能力有限(1.0~3.1 mm),但森林枯落物层可以截持年降水量的10%~19%,且林内年蒸发量约22%~33%来自该层储存水分^[3-5]。

人工林作为植被恢复的常见措施,其恢复过程中枯落物蓄积可显著影响生态水文过程。由于人工纯林结构单一,生物多样性较低,易形成低效人工林甚至衰退^[6],通常采用混交等方式对其进行改善,增强其稳定性,从而造成混交林与纯林在枯落物特征上存在显著差异。混交林能够通过树种间的相互作用改善林分结构,提高林分稳定性和生产力。一般而言,混交林相对于纯林枯落物蓄积量较高,来源多样,分解过程及土壤微生物群落结构相对复杂,进而导致其持水性能和蒸发特征存在差异。此外,混交林枯落物类型多样使得其在蓄积堆积过程中形成多孔疏松结

构,从而进一步影响枯落物拦蓄能力和蒸发过程。目前,有关混交林枯落物持水性能研究相对较多,主要通过室内浸泡法和原位测量法研究其枯落物持水、拦蓄性能^[7-9];而枯落物影响地表蒸发过程研究相对较少,尤其是混交模式下枯落物持水-蒸发连续耦合过程相关研究鲜有报道。基于此,本研究以黄土高原退耕还林20年刺槐混交林为研究对象,选取5种典型混交改造模式(针阔混交、乔灌混交)和1个刺槐纯林对照,研究黄土高原不同混交模式下枯落物分层结构及其组分蓄积特征、持水特性和蒸发动态,以及枯落物持水-蒸发耦合过程,旨在为黄土高原刺槐人工林的优化经营和水源涵养提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

吴起县位于陕西省延安市西北部,地处黄土高原南缘,属半干旱温带大陆性季风气候。年平均气温7.8℃,年平均降水量483.4 mm,年平均无霜期146天。全县地形地貌由“八川两涧两大山区”构成,属高原梁状丘陵沟壑区。自1998年全县实施封山禁牧退耕还林(草)后,逐渐形成以落叶阔叶林和灌草丛为主的次生植被类型^[10],主要物种有刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)、山杏(*Prunus sibirica* L.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow)、针茅(*Stipa capillata* L.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)和赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)等。

1.2 样地基本信息

本研究选取林龄为 23 年的刺槐×紫穗槐(I)、刺槐×山桃(II)、刺槐×沙棘(III)、刺槐×山杏(IV)、

刺槐×油松(V)5 种刺槐混交林,并以刺槐纯林(VI)为对照,严格遵循代表性与典型性原则,在立地条件相似区域分别布设 3 个 10 m×10 m 样方,见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of the sample sites

混交类型	经纬度	坡向	坡度/ (°)	平均 海拔/m	物种 组成	林龄/ a	密度/ (株·hm ⁻²)	平均 树高/m	平均 胸径/cm	冠幅/ m
I	36°55'29" N, 108°07'52" E	西	11	1 494.7	刺槐	23	1 633	11.50±2.36	13.01±5.76	4.54±1.36
					紫穗槐		300	1.47±0.38	9.39±9.61	1.17±0.52
II	36°55'34" N, 108°07'59" E	东	24	1 510.2	刺槐	23	1 366	8.12±1.65	10.23±3.33	4.41±0.82
					山桃		667	4.06±0.53	18.04±5.43	5.23±1.10
III	36°55'36" N, 108°07'21" E	西北	18	1 506.5	刺槐	23	833	8.56±1.51	11.88±3.11	4.58±1.29
					沙棘		667	3.30±0.75	8.95±2.63	2.40±0.51
IV	36°55'41" N, 108°08'12" E	东	16	1 480.3	刺槐	23	710	7.58±1.65	10.53±3.63	3.56±1.10
					山杏		290	7.42±1.73	19.76±1.54	5.35±1.61
V	36°55'35" N, 108°09'27" E	北	9	1 490.3	刺槐	23	1 300	7.54±0.93	8.86±1.59	3.40±0.60
					油松		800	6.38±1.03	14.08±2.42	4.48±0.78
VI	36°53'28" N, 108°13'01" E	东南	10	1 505.5	刺槐	23	2 433	8.08±1.24	10.09±3.11	3.05±1.02

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

1.3 样品采集与测定方法

试验于 2023 年 7—8 月进行,在每个标准地内沿坡位平行设置 2 条样线,每条样线设置 10 个 0.5 m×0.5 m 的枯落物样方,利用直尺测量枯落物层厚度,然后分别将未分解和半分解枯落物装入牛皮纸样袋中,带回实验室分别测定其鲜重,随后放入 75 °C 烘箱中烘干至恒定质量,计算枯落物的蓄积量和自然含水率,且各器官(枝、叶、果、草)均从未分解枯落物中进行挑选。采用室内浸泡法^[11-12]将烘干后的枯落物装入尼龙袋并浸入水中,分别在 0.08,0.17,0.33,0.67,1,1.5,2,4,6,12,24,36,48 h 后取出,悬挂至不滴水立即称重。通过枯落物持水、蓄积量、自然含水率计算最大持水率(量)、有效拦蓄率(量)等指标^[13]。然后在枯落物浸水 48 h 后,取出悬挂分别在 0.5,1,2,3,6,12,24,36,48,60,84,108 h 进行蒸发过程的测定。野外调研发现自然降雨对枯落物的水文效应存在一定影响,因此设计 3 种降雨情景(常规降雨、短历时降雨、间隔时间短连续降雨)对枯落物水文效应展开模拟假设,以便更准确地评估枯落物在不同条件下的水文响应。计算公式为:

$$Q = (Q_t - Q_o) / Q_o \quad (1)$$

$$Q_s = (Q_{48} - Q_{t_s}) / Q_o \quad (2)$$

$$V = Q / t \quad (3)$$

$$V_s = Q_s / t_s \quad (4)$$

式中:Q 为枯落物持水量(g/g);Q_t 为 t 时刻浸水后枯落物重量(g);Q_o 为枯落物的干重(g);Q_s 为枯落物

蒸发量(g/g);Q₄₈ 为枯落物浸水 48 h 后的质量(g);Q_{t_s} 为 t 时刻蒸发后枯落物重量(g);V 为枯落物持水速率[g/(g·h)];V_s 为枯落物蒸发速率[g/(g·h)];t 为枯落物的浸水时间(h);t_s 为蒸发时间(h)。

$$R_s = 0.85R_m - R_o \quad (5)$$

$$M_s = R_s \times N \quad (6)$$

式中:R_m 为最大持水率(%);R_o 为自然含水率(%);R_s 为有效拦蓄率(%);M_s 为有效拦蓄量(kg/m²);N 为样地枯落物蓄积量(kg/m²)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 和 SPSS 23.0 软件进行统计、曲线拟合和分析,采用 Origin 2021 软件绘图。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著法(LSD)比较不同混交类型及不同分解层枯落物持水、拦蓄及蒸发特性的差异。

2 结果与分析

2.1 混交人工林枯落物及其组分蓄积特征

不同混交刺槐人工林枯落物特性存在显著差异(表 2)。枯落物厚度为 1.91~4.52 cm,总蓄积量为 0.29~1.01 kg/m²,二者呈正相关趋势。单位厚度蓄积量以刺槐×沙棘最高(27.98 kg/m³),刺槐×山杏最低(15.39 kg/m³)。统计显示,刺槐纯林与部分混交林(紫穗槐、沙棘、油松)在蓄积量上无显著差异,但与刺槐×山杏、山桃差异显著(p<0.01),且山杏与山桃之间也有显著差异。

各混交类型中,半分解层枯落物蓄积量均超过未分解层,且占比>60%(表 2)。其中,刺槐×山杏的半分解层占比最高(81%),为主要蓄积量来源。不同混交林枯落物各组分蓄积量存在差异(图 1)。除刺槐×紫穗槐外,其他混交类型中叶的蓄积量占比均高

于刺槐纯林,特别是刺槐×山杏(69%)和刺槐×油松(72%);各类型枝的蓄积量占比相近(6%~10%)。与纯林相比,刺槐×紫穗槐和刺槐×山桃的果蓄积量占比较大(51%,44%),而其他混交类型的草蓄积量占比均较小。

表 2 不同混交类型枯落物层厚度及蓄积量特征

Table 2 Characteristics of litter thickness and storage capacity in different mixed types

混交类型	枯落物层厚度/cm			蓄积量/(kg·m ⁻²)			蓄积量比例/%	
	未分解	半分解	总计	未分解	半分解	总计	未分解	半分解
I	1.95±0.56ab	2.02±0.71a	3.97±1.13a	0.28±0.07a	0.73±0.32a	1.01±0.36a	31±10a	69±10b
II	1.34±0.57c	1.30±0.52bc	2.64±0.88b	0.16±0.07b	0.42±0.23b	0.58±0.24c	31±15a	69±15b
III	1.61±0.49bc	1.61±0.5b	3.22±0.81b	0.24±0.05a	0.66±0.27a	0.90±0.31ab	29±8a	71±8b
IV	0.94±0.46d	0.97±0.49c	1.91±0.86c	0.06±0.02c	0.23±0.11c	0.29±0.13d	21±8b	79±8a
V	1.58±0.42bc	1.62±0.67b	3.20±0.81b	0.25±0.11a	0.47±0.30b	0.72±0.38bc	36±11a	64±11b
VI	2.27±1.04a	2.25±0.76a	4.52±1.58a	0.26±0.10a	0.54±0.2ab	0.80±0.19ab	33±13a	67±13b

注:同列不同小写字母表示不同混交类型间差异显著($p < 0.05$)。下同。

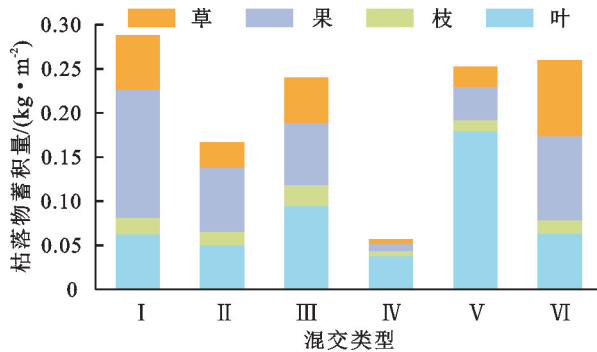


图 1 不同混交类型枯落物各器官蓄积量特征

Fig.1 Characteristics of storage capacity of litter in various organs of different mixed types

2.2 混交人工林枯落物持水性能及拦蓄能力

各混交刺槐人工林枯落物持水量随时间增加先快后慢,24 h 后趋于稳定且无显著差异,48 h 达最大持水量(图 2)。刺槐纯林最大持水量高于混交林,可吸收自重的 1.82~2.32 倍降雨,而未分解枯落物中刺槐×油松(1.69 g/g)和半分解中刺槐×山杏(1.82 g/g)持水能力较弱。纯林与混交林最大持水量差异显著($p < 0.05$),但刺槐×山桃、山杏、油松间无显著差异。整体来看,枯落物各器官的最大持水量均呈叶>草>果>枝趋势。刺槐纯林在叶、果、草上持水量最高,而刺槐×油松在叶、果上最低,刺槐×山桃在枝、草上最低。持水速率与持水量变化一致,呈先快后慢趋势($V=at^b, R^2 \geq 0.99, p < 0.01$)。

6 种林分总有效拦蓄量为 0.42~1.74 kg/m²,半分解枯落物均大于未分解(图 3),各混交类型差异显著($p < 0.05$),半、未分解分别为 0.35~1.27,0.07~0.46 kg/m²。刺槐×紫穗槐有效拦蓄量最大,刺槐×山杏最小。除刺槐×沙棘外,各林分半分解有效拦蓄率(132.65%~179.03%)大于未分解(110.07%~166.46%),

表明半分解枯落物起主导作用。与刺槐纯林相比,除刺槐×紫穗槐外,其他混交类型差异显著($p < 0.05$),刺槐×山桃和山杏的半、未分解无显著差异。

2.3 混交人工林枯落物蒸发量及蒸发速率

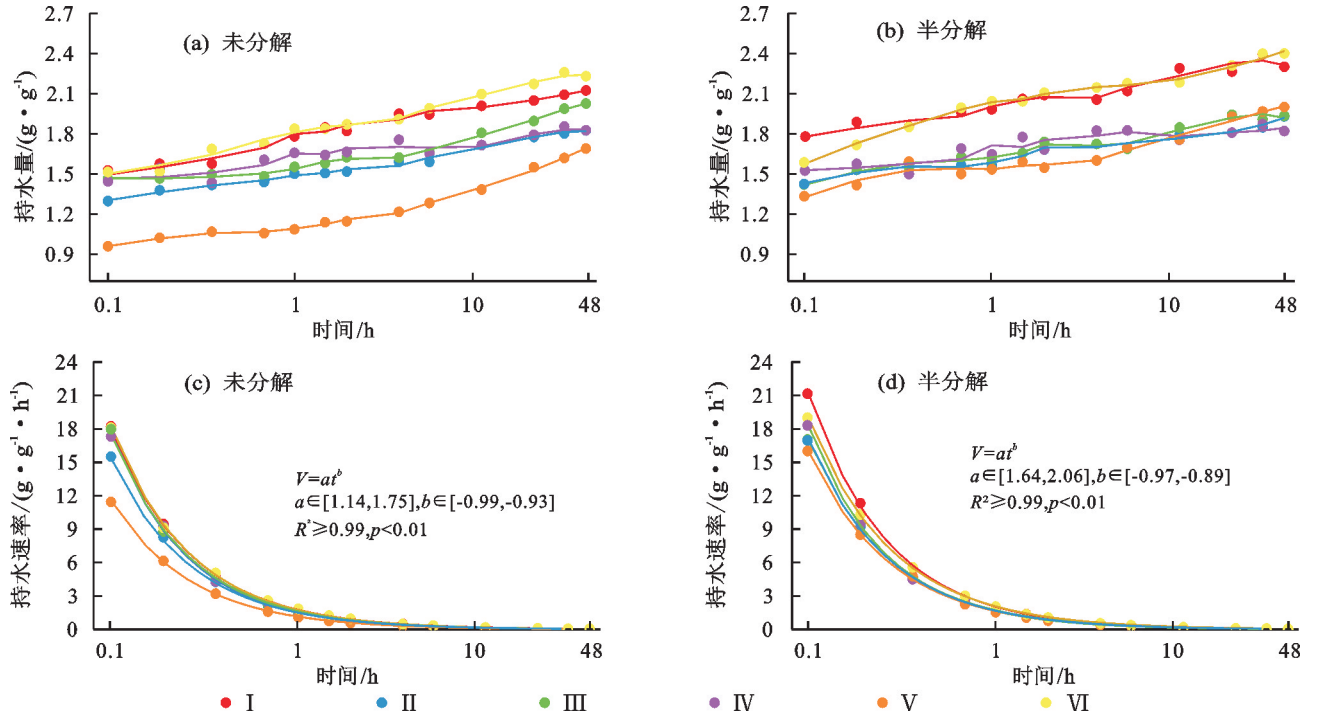
枯落物蒸发过程反映其保水能力,间接体现截流效果。不同混交类型枯落物蒸发量随时间增加,分 3 个阶段:快速(<6 h)、缓慢(6~60/84 h)、稳定($\geq 60/84$ h),且半分解达稳定阶段较未分解长(图 4)。各器官蒸发量排序为叶>草>果>枝,其中,刺槐×油松在叶、果中蒸发量最小(1.80,1.48 g/g),枝最大(1.56 g/g);刺槐×沙棘在果中蒸发量最大(1.84 g/g),枝最小(1.20 g/g);刺槐×紫穗槐、刺槐×山桃分别为草器官蒸发量最大(2.45 g/g)和最小(1.75 g/g)。蒸发速率初期(0~6 h)急速下降($p < 0.05$),后减缓,24 h 后趋稳,60 h 后无显著差异。除刺槐×山杏,刺槐纯林与其他混交类型蒸发速率无显著差异;刺槐×油松、山桃、紫穗槐间亦无显著差异。在各器官中,叶的蒸发速率依然最快,其次是草、果和枝。总体而言,蒸发速率与时间呈幂函数关系($V_s=at^b, R^2 \geq 0.91, p < 0.01$)。

2.4 混交人工林枯落物水文效应

在持水-蒸发耦合过程中,混交人工林枯落物各阶段持水量变化有所差异(图 5)。持水阶段的持水量随时间变化呈显著对数关系,持水初期(0~2 h)增加最快,之后增加减缓。未分解枯落物在 12 h 达到基本饱和,而半分解在 6 h 基本饱和,持水能力相对更强。24 h 后趋于稳定,无显著差异,48 h 后达到饱和阶段。蒸发阶段的持水量随时间变化呈显著幂函数关系,相较于持水阶段,蒸发阶段的持水量变化相对缓慢;未分解枯落物除刺槐×油松在蒸发 24~36 h 达到自然含水量,其他混交类型均在蒸发 48~60 h 达

到自然含水量,半解除刺槐×沙棘、刺槐×油松在蒸发 48~60 h 达到自然含水量,其他各混交类型均在蒸发 60 h 后达到自然含水量。各混交类型组间无显著差异。在室外,未分解层刺槐×油松、刺槐×紫穗槐、刺槐纯林分别在蒸发 6~12、36~48、48~60 h 达到

自然含水量,其他混交类型均在 24~36 h 达到自然含水量。半解除刺槐纯林和刺槐×紫穗槐在蒸发 48~60 h 达到自然含水量,其他混交类型均在 24~36 h 达到自然含水量。总体而言,室外的蒸发比室内更为激烈,蒸发速率也更快。



注:V 为枯落物持水速率[g/(g·h)];t 为持水时间(h);a 为系数;b 为常数项。

图 2 不同混交类型枯落物持水量、持水速率随时间的变化

Fig.2 Changes in water-holding capacity and water-holding rate of litter in different mixed types with time

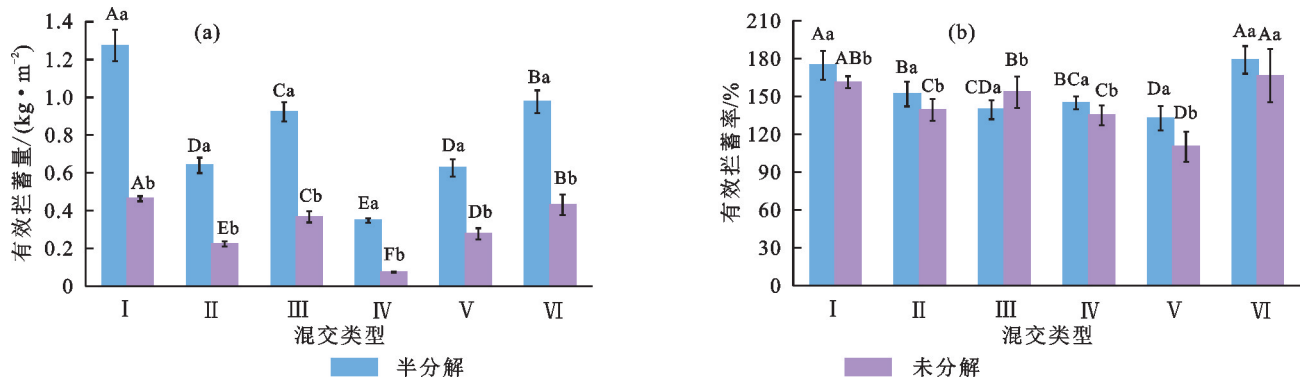


图 3 枯落物有效拦蓄量(率)

Fig.3 Effective water conservation capacity(rate) of litter

为了更好地阐述枯落物在自然环境中的水文效应,将 3 阶段进行拟合得到分段函数,分别为持水阶段: $Q=a-b\ln(t+c)$, $a\in[0.83,2.01]$, $b\in[-0.22,-0.05]$, $c\in[-0.07,2.34]$, $R^2\geq 0.79$, $p<0.01$;饱和阶段: $Q=a$, $a\in[1.69,2.40]$;蒸发阶段: $Q=a+bx^c$, $a\in[1.93,2.59]$, $b\in[-0.67,-0.19]$, $c\in[0.30,0.53]$, $R^2\geq 0.98$, $p<0.01$ 。

本研究设置 3 个情景更好地阐明枯落物的水文效应(图 6),情景 1 为在常规降雨情况下,枯落物持

水量由自然含水量先快后慢随后达到饱和状态。降雨结束后,枯落物开始缓慢蒸发,直至其持水量恢复至自然含水量;情景 2 为在短历时降雨下,枯落物的持水量未达到饱和状态,随后进行蒸发,持水量恢复到自然含水量;情景 3 为间隔时间短连续降雨的情况,在第 1 场降雨结束后,枯落物进行蒸发,当持水量未蒸发到自然持水量时,又一场长历时降雨而至,持水缓慢达到饱和阶段,待降雨结束,持水量缓慢蒸发至自然含水量。

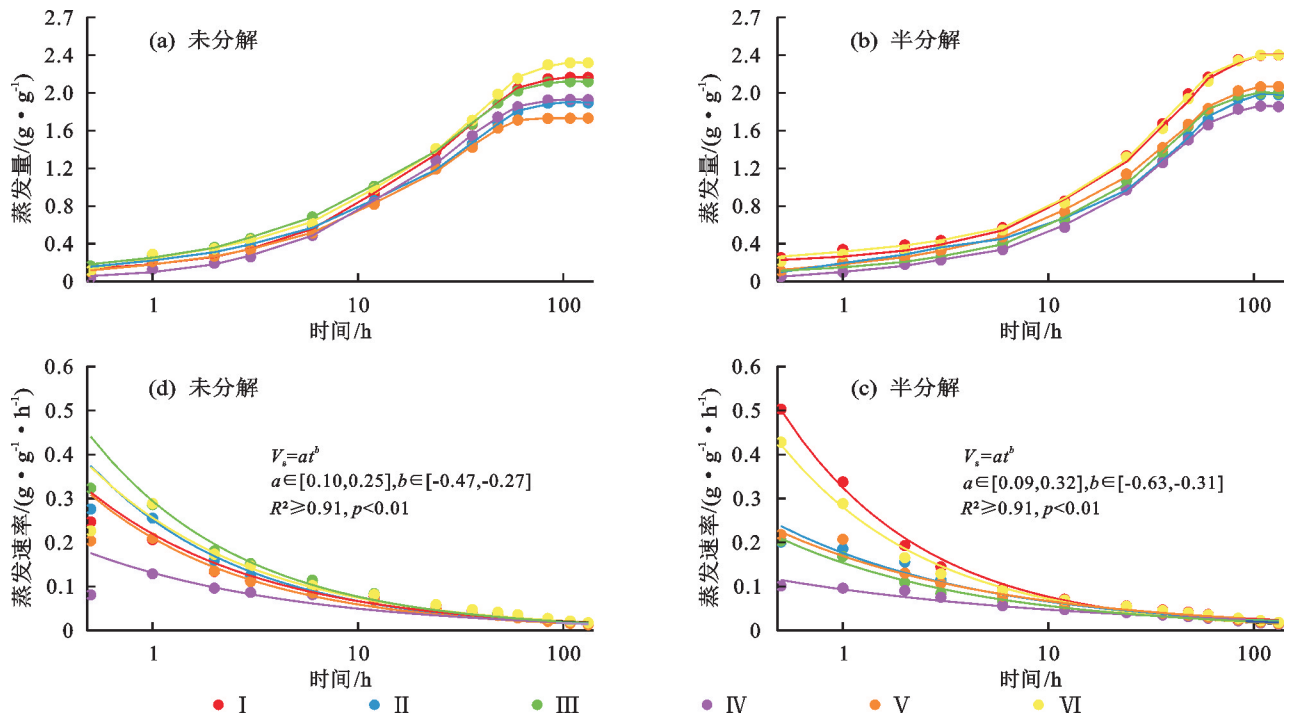


图 4 不同混交类型枯落物蒸发量、蒸发速率随时间的变化

Fig.4 Changes in evapotranspiration amount and evapotranspiration rate of litter in different mixed types with time

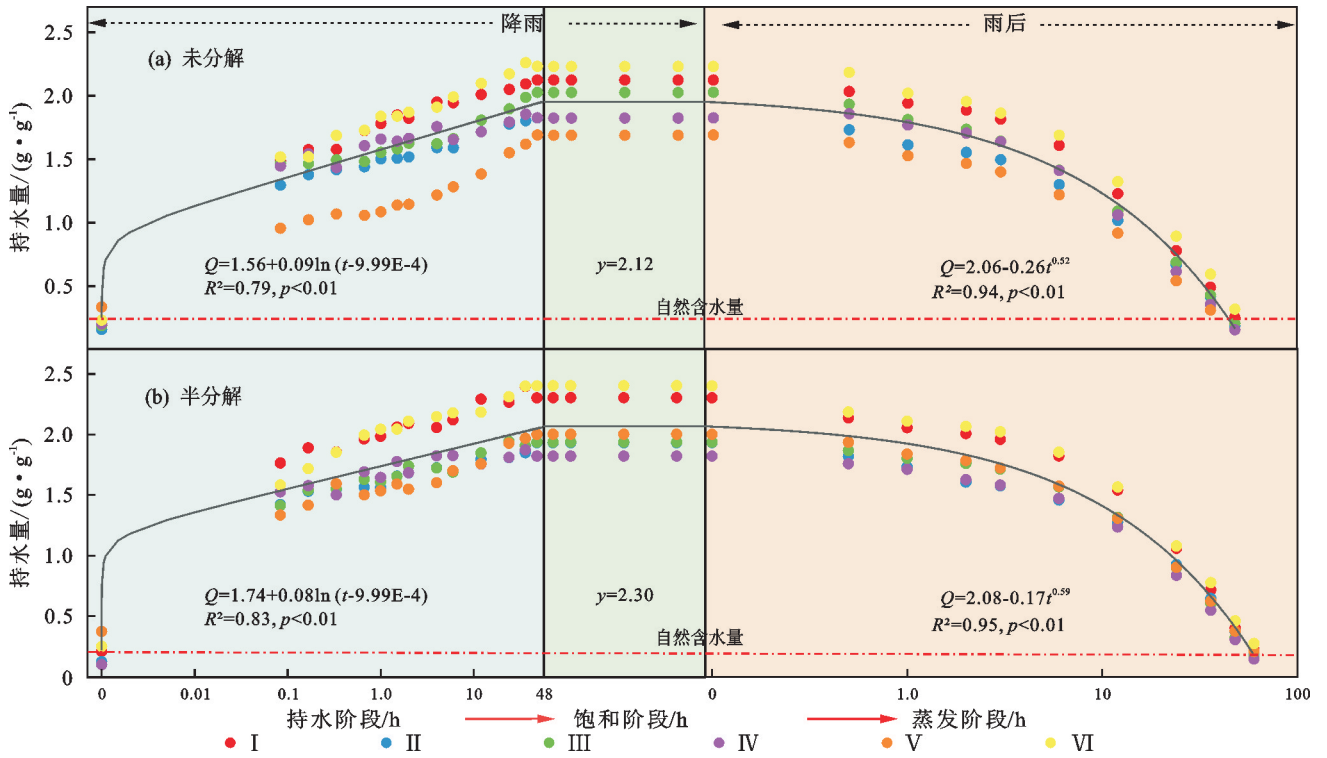


图 5 枯落物持水—蒸发过程耦合

Fig.5 Coupling of water-holding—evaporation process of litter

3 讨论

3.1 人工林混交类型对枯落物持水与蒸发的影响

枯落物的持水、蒸发性能与其分解程度、结构组分及环境条件等紧密相关,反映其在自然条件下的保水和蓄水截留能力。各混交类型枯落物的持水量和蒸发量

随时间延长而增加,持水、蒸发速率则随时间延长而下降,与前人^[14-16]研究一致,表明林地枯落物对短时、高强度降水有良好的拦蓄功能,有效防止地表径流。未分解枯落物在 10~12 h 达到基本饱和,而半分解在 6 h 基本饱和,表明未分解持水蓄水能力更强。一些学者^[15,17]通常研究枯落物蒸发过程仅限在 24 h 内,并未达到稳定;

而蒸发过程较持水缓慢,需更长时间达稳定,如小五台山典型林分枯落物蒸发达到平衡在 60~72 h^[18]。

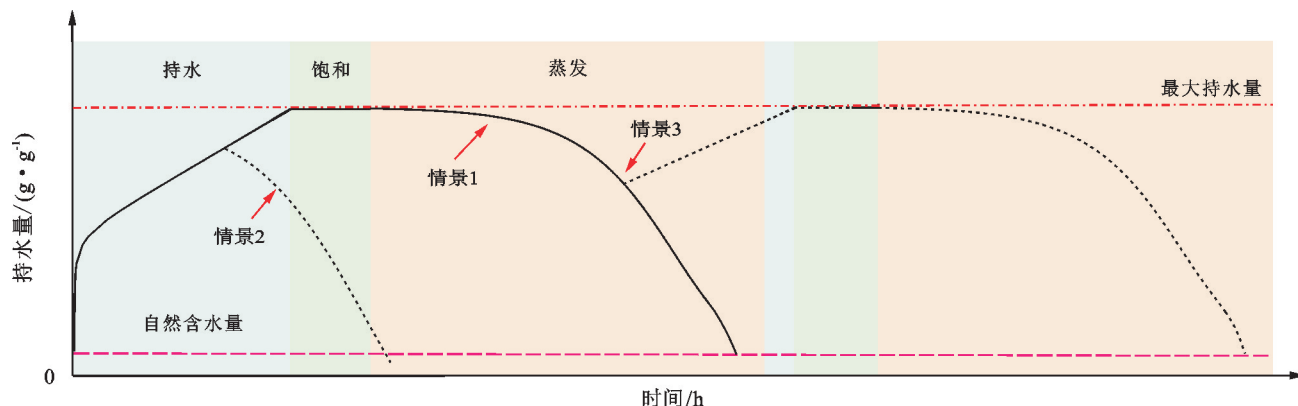


图 6 枯落物水文效应情景模拟

Fig.6 Scenario simulation of the hydrological effects of litter

本研究发现,各林分枯落物在未分解层和半分解层分别在 60,84 h 后达稳定,且半分解枯落物的保水和调蓄水分的能力更强。其中,刺槐×紫穗槐持水能力较强(2.12,2.30 g/g),而未分解层中刺槐×油松(1.69 g/g)和半分解层中刺槐×山杏(1.82 g/g)的持水能力相对较弱。相较于最大持水量,有效拦蓄量更能准确衡量枯落物在自然条件下对降雨的拦蓄及对水土流失的改善效果,刺槐×紫穗槐、刺槐×山杏分别具有最大、最小有效拦蓄量,刺槐与紫穗槐混交同属豆科,产生更加复杂和稳定的枯落物结构,从而形成更稳定、储水能力更强的枯落物层;而刺槐与山杏混交由于其混交密度(1 000 N/hm²)远小于刺槐纯林(2 433 N/hm²),则形成较为疏松的枯落物层,导致有效拦蓄量较小。树木生长特性对枯落物性质及其功能具有潜在影响,刺槐×紫穗槐枯落物的水文效应最佳,与其树高、胸径及冠幅的显著优势之间存在着密切的相关性。较高的树木和较大的冠幅意味着更多的叶片和枝条,较大的胸径表明树木具有更强的生长势和更健康的生理状态,这有助于产生更多且质量更好的枯落物,在降雨过程中能够更有效地拦截雨水,减缓水流速度,从而增加地表水分的渗透和储存能力。刺槐和紫穗槐作为具有固氮作用的豆科植物,其枯落叶在分解过程中可能释放对土壤有益的物质,如氮素等,这些物质有助于改善土壤质量,进一步提高土壤的水文功能,进而对水文效应产生积极影响。枯落物的分解程度也影响其拦蓄能力,6 种林分的有效拦蓄量(率)均表现为半分解大于未分解,表明半分解枯落物对整个枯落物层的拦蓄能力起主导作用。其原因在于半分解枯落物蓄积量远大于未分解,其分解速度快、物理性质改变(密度降低、孔隙度增加等)、化学性质变化(如木质素、纤维素等难分解物质的

含量会逐渐降低)、时间累积效应,以及人为或自然干扰(混交、疏伐、畜牧等)等因素共同作用。整体来看,枯落物各器官的最大持水量、蒸发量、蒸发速率均呈叶>草>果>枝趋势。其持水与蒸发差异主要是其不同的生理生态特性(表面结构、化学成分、分解速率等)所致。叶片作为光合器官因其较大表面积、多孔结构,结合高含量的亲水性组分(多糖、蛋白质等),使叶片能迅速吸水并高效蒸发;而油松叶由于其针叶性、质地硬和含有油脂等特点,导致分解速度缓慢。草类植物的细长疏松结构和富含纤维素等,使其具有适中的吸水与蒸发能力,但低于叶片。果实作为繁殖器官通常具有较厚的外皮和小表面积,外皮富含蜡质、角质等保水组分,内部含有较多油脂、果胶,有效减少水分蒸发。而枝条具有较高的木质化程度(组织细胞壁加厚、水分传输的通道减少)及富含木质素和纤维素^[19],分解较其他器官可能更缓慢,使其吸水与蒸发能力较弱。另外,水、热、光、土壤肥力等环境因子也可影响植物器官的更新和衰亡^[20]。

3.2 枯落物对混交人工林水文过程的响应

在森林生态系统中,持水与蒸发是维系水分平衡的关键过程,二者紧密相连,共同驱动着水文循环。枯落物,作为森林生态系统的重要组成部分,其多孔疏松的结构赋予其独特的非饱和入渗性,进而影响着水分的吸收、储存、分配及散失。枯落物的水通量主要由重力、直接蒸发和枯落物的整体物理存储特性控制,由于分解程度、组成结构及环境条件(温度、湿度、风速)、表面特性(粗糙度和水分吸附能力)等多重因素的影响,不同刺槐混交林分枯落物在持水与蒸发过程中持水量差异较大,且速率不一致。尤其是未分解与半分解枯落物,在持水与蒸发上呈显著差异。其原因可能是半分解由于部分降解,结构更加疏松多孔,有利于水分的

渗透和保持,水分可以更容易地渗透到枯落物的内部孔隙中;而未分解枯落物虽然结构完整、比表面积大,但由于其结构相对紧密,水分渗透和储存的空间有限,更容易暴露在空气中,导致蒸发速率相对较快。这种差异主要源于分解过程中枯落物物理和化学性质的变化。相关研究^[1,21]也表明,枯落物层分解程度与其持水能力呈正比,分解程度越高,持水能力越强。在自然界中,相同条件下蒸发速率通常低于持水速率。因持水是一个物理吸附和渗透过程,无需额外能量,而蒸发则需要能量驱动水分子从液态转为气态,并克服表面张力逸散到空气中。蒸发还受到更多动态环境因素的影响,如风速、湿度、温度波动等。

在自然条件下,持水—蒸发耦合过程是一个动态变化的过程,包括持水阶段、饱和阶段和排水/蒸发阶段^[22-23]。在持水阶段,枯落物层在降雨初期迅速吸收水分,随后吸收速率减缓直至达到饱和阶段;降雨停止后进入排水/蒸发阶段,储存在森林地面枯枝落叶层中的水将被蒸发回到大气中或通过重力排出渗透。饱和时间与枯落物类型、质量和降雨特征有关,且降雨强度、历时是影响饱和阶段的重要因素。降雨强度越大,枯落物达到饱和所需的时间越短。当降雨历时长时,枯落物层有更长的时间吸收水分,更容易达到饱和状态。然而,降雨历时较短,枯落物层无法充分吸收水分,导致难以达到饱和阶段。如降雨强度在30~120 mm/h,但由于降雨时间较短(1 h),枯落物层未能达到饱和^[24],其持水量将低于其潜在的最大持水量,进而影响后续的蒸发过程。连续降雨事件之间的时间间隔也对枯落物层的持水和蒸发过程产生影响。若时间间隔较短,前一场降雨留下的水分可能尚未完全蒸发,导致下一场降雨开始时枯落物层的初始状态不同。这种差异影响枯落物层对后续降雨的响应,包括吸水速率、持水量和蒸发速率等。为了更好地理解和评价森林枯落物层的水文效应,已有学者^[22,24]用 C_{\max} 和 C_{\min} 衡量枯落物储水能力,分别代表最大截留雨水量和降雨结束后的保留水量。阔叶树种因表面特性,其 C_{\max} 和 C_{\min} 通常大于针叶树种,储水能力更强。因此,阔叶或针阔混交林在持续降雨下的蓄水及洪峰调节作用因此更显著。

室内和室外条件下的枯落物水文效应存在差异。室内试验由于可以控制环境因素,便于精确测量和重复,为学者们提供便捷的研究平台^[23,25],如LID设备能够在实验室条件下模拟野外条件,并连续监测枯落物层的水分动态,涵盖降雨截留、渗透和蒸发等环节。但室内无法完全模拟野外条件下复杂环境因素的综

合影响和水循环动态变化过程。相比之下,室外枯落物水文过程受到更多不可控因素的影响,如风速、温度、湿度、降雨等气象条件的时空变化以及地形、植被等地理因素的异质性,特别是在缺乏连续直接测量设备的情况下,准确评估野外枯落物的持水蒸发特性成为一项挑战。本研究在降雨结束后将枯落物放到混交林地中,发现蒸发速率比室内快,室内和室外枯落物分别在48~60,24~36 h达到自然含水量,原因可能是本研究未在雨后放置,林内环境较为干燥,温度差、湿度差相对较大,蒸发速率较快,而在自然降雨后,温度、湿度差较小,蒸发相对缓慢;已有研究^[1]表明,枯落物层随着蒸发的进行,白天的水储存量减少,而夜间由于冷凝或吸收而增加储存量,并通过增加湿度、降低温度和减少饱和水汽压差来调节树冠下的小气候。为了更好地评估枯落物持水—蒸发耦合过程,一些学者^[26-27]利用水箱模型、SWAT模型模拟枯落物的截留降雨的过程,利用Soil-Litter-ISO模型模拟枯落物与土壤间的热和水耦合运输,为深入研究枯落物的水文效应提供新的视角和工具。因此,为了更准确地模拟和预测枯落物对混交人工林水文过程的影响,未来研究应更多地考虑室外试验和野外观测,并不断改进和完善模型以提高其精度和适用性。通过综合考虑室内外条件的差异及降雨历时、间隔时间等关键因素,以更全面地理解枯落物在混交人工林水文过程中的作用,并为森林生态系统的可持续管理提供科学依据。

4 结论

(1)不同混交刺槐人工林的枯落物蓄积特征存在显著差异(0.29~1.01 kg/m²),且半分解枯落物占比均>60%为蓄积量主要来源。其中各器官(叶、枝、果、草)蓄积量有所差异,除刺槐×紫穗槐,各混交类型的叶蓄积量占比均大于刺槐纯林,而各混交类型枝蓄积量占比较为相似(6%~10%)。

(2)不同混交类型枯落物在24 h后持水量均趋于稳定,无显著差异,48 h后达到饱和阶段。其中,刺槐纯林与各混交林最大持水量差异显著($p<0.05$);而枯落物各器官的最大持水量呈叶>草>果>枝趋势。枯落物有效拦蓄量表现为刺槐×紫穗槐(1.74 kg/m²)>刺槐纯林(1.41 kg/m²)>刺槐×沙棘(1.29 kg/m²)>刺槐×油松(0.90 kg/m²)>刺槐×山桃(0.86 kg/m²)>刺槐×山杏(0.42 kg/m²);半分解枯落物的有效拦蓄量均大于未分解($p<0.05$),在自然条件下对降雨的拦截及对水土流失的改善效果更佳。

(3)不同混交林枯落物保水能力不同,且蒸发较

持水过程缓慢。半、未分解枯落物蒸发在 84, 60 h 后达到稳定阶段, 其各器官的蒸发量、蒸发速率均呈叶 > 草 > 果 > 枝趋势。

(4) 持水-蒸发耦合过程中, 持水阶段存在显著的对数关系 ($R^2 \geq 0.84, p < 0.01$), 蒸发阶段存在显著幂函数关系 ($R^2 \geq 0.94, p < 0.01$); 受自然环境因素影响, 室内和室外枯落物分别在 48~60, 24~36 h 达到自然含水量。

整体上, 刺槐 × 紫穗槐混交林枯落物的水文效应最佳。黄土丘陵区典型混交刺槐人工林经营需采取有效措施: 合理疏伐更新, 提升林地生产力; 强化林地管理保护, 尤其是枯落物层的积存; 优化树种选择与配置, 以科学指导植被恢复和水土保持工程, 准确评估生态效益。

参考文献:

- [1] FLORIANCIC M G, ALLEN S T, MEIER R, et al. Potential for significant precipitation cycling by forest-floor litter and deadwood [J]. *Ecohydrology*, 2023, 16 (2): e2493.
- [2] LI X, NIU J Z, XIE B Y. Study on hydrological functions of litter layers in North China [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(7): e70328.
- [3] VAN STAN J T II, COENDERS-GERRITS M, DIBBLE M, et al. Effects of phenology and meteorological disturbance on litter rainfall interception for a *Pinus elliotii* stand in the Southeastern United States [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(21): 3719-3728.
- [4] SUN X Y, WANG G X, LIN Y, et al. Intercepted rainfall in *Abies fabri* forest with different-aged stands in southwestern China [J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2013, 37(4): 495-504.
- [5] GERRITS A M J, PFISTER L, SAVENIJE H H G. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(21): 3011-3025.
- [6] QIU L P, ZHANG X C, CHENG J M, et al. Effects of black locust (*Robinia pseudoacacia*) on soil properties in the loessial gully region of the Loess Plateau, China [J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1): 207-217.
- [7] 马正锐, 程积民, 班松涛, 等. 宁夏森林枯落物储量与持水性能分析 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 199-203.
- MA Z R, CHENG J M, BAN S T, et al. Litter storage and water-holding characteristics of typical forest types in Ningxia [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 199-203.
- [8] 汪建芳, 王兵, 王忠禹, 等. 黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征 [J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 139-144.
- WANG J F, WANG B, WANG Z Y, et al. Slope distribution and water holding characteristics of typical vegetation litter on the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 139-144.
- [9] 白云星, 周运超, 张薰元, 等. 马尾松针阔混交人工林凋落物和土壤水源涵养能力 [J]. *林业科学*, 2021, 57(11): 24-36.
- BAI Y X, ZHOU Y C, ZHANG X Y, et al. Water conservation capacity of litter and soil in mixed plantation of *Pinus massoniana* and broadleaved trees [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, 57(11): 24-36.
- [10] 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, 2024.
- DAN C H. Effects of mixed forest planting patterns in the Loess Plateau on soil aggregate stability and organic carbon [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.
- [11] 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.
- 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.
- [12] 丁咸庆, 常月, 柏菁, 等. 亚热带不同次生林地凋落物持水特性及季节变化 [J]. *生态学报*, 2021, 41(8): 3190-3200.
- DING X Q, CHANG Y, BAI J, et al. Seasonal changes of litter water-holding characteristics under different secondary forests in subtropical area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(8): 3190-3200.
- [13] 郭宇嘉, 牛庆花, 陆贵巧, 等. 承德市第三乡林场不同林分类型枯落物和土壤的持水特性 [J]. *水土保持通报*, 2018, 38(3): 38-44.
- GUO Y J, NIU Q H, LU G Q, et al. Water-holding capacity of litters and soil in different forests in Disanxiang forest farm of Chengde City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(3): 38-44.
- [14] 刘琳, 熊东红, 张宝军, 等. 拉萨河谷杨树人工林枯落物蓄积特征及持水性能 [J]. *干旱区研究*, 2021, 38(6): 1674-1682.
- LIU L, XIONG D H, ZHANG B J, et al. Litter storage and its water-holding capacity of *Populus plantations* in Lhasa River Valley [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(6): 1674-1682.
- [15] 刘一霖, 温娅檬, 李巧玉, 等. 川西高山峡谷区 6 种森林枯落物的持水与失水特性 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 151-156.
- LIU Y L, WEN Y M, LI Q Y, et al. Water-holding and water-loss characteristics of six types of forest litter in the alpine gorge region of western Sichuan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 151-156.

- 固碳潜力估算[J].水土保持学报,2022,36(4):342-349.
- WU P X, WANG X Z, WU J Z, et al. Estimation of carbon stock and carbon sequestration potential for China's grain for green project[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(4):342-349.
- [35] 翟淑君,列志暘,卢嘉华,等. 增温对南亚热带季风常绿阔叶林土壤有机碳及其组分的影响[J].生态学报,2024,44(13):5508-5518.
- ZHAI S J, LIE Z Y, LU J H, et al. Effects of warming on soil organic carbon and its fractions of evergreen broad-leaved forests in southern subtropical monsoon region[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(13):5508-5518.
- [36] WANG T, DENG Z M, ZHANG C Y, et al. Vegetation types and flood water level are dominant factors controlling the carbon sequestration potential in Dongting Lake floodplain, China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 921:e171146.
- [37] WANG L J, WANG K, SHENG M Y. Changes in land use are associated with the accumulation of soil phytolith-occluded organic carbon[J]. Ecological Indicators, 2023,151:e110300.
- [38] ZHOU Z H, REN C J, WANG C K, et al. Global turnover of soil mineral-associated and particulate organic carbon[J]. Nature Communications,2024,15(1):e5329.
- [39] DENG L, LIU G B, SHANGGUAN Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A synthesis[J]. Global Change Biology,2014,20(11):3544-3556.
- (上接第160页)
- [16] 杨霞,陈丽华,康影丽,等.辽东低山区5种典型水源涵养林枯落物持水特性[J].生态学杂志,2019,38(9):2662-2670.
- YANG X, CHEN L H, KANG Y L, et al. Water-holding characteristics of litter in five typical water conservation forests in low mountainous areas of eastern Liaoning[J]. Chinese Journal of Ecology,2019,38(9):2662-2670.
- [17] 吕宸,龚伟,车明轩,等.海拔和坡向对高寒灌丛草甸凋落物水源涵养功能的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):219-225.
- LÜ C, GONG W, CHE M X, et al. Effects of altitude and slope direction on water conservation function of litter in alpine shrub meadow[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(6):219-225.
- [18] 杜晨曦,史常青,杨建英,等.小五台山典型林分枯落物持水恢复能力研究[J].水土保持学报,2021,35(3):236-243.
- DU C X, SHI C Q, YANG J Y, et al. Recovery characteristics of water-holding capacity of litter in typical stands of Xiaowutai Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(3):236-243.
- [19] FRESCHET G T, AERTS R, CORNELISSEN J H C. A plant economics spectrum of litter decomposability[J]. Functional Ecology,2012,26(1):56-65.
- [20] 李强,周道玮,陈笑莹.地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J].生态学报,2014,34(14):3807-3819.
- LI Q, ZHOU D W, CHEN X Y. The accumulation, decomposition and ecological effects of above ground litter interterrestrial ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14):3807-3819.
- [21] 陆梅,田昆,赖建东,等.高原湿地纳帕海周边山地不同植被类型枯落物持水特性[J].水土保持通报,2011,31(1):28-34.
- LU M, TIAN K, LAI J D, et al. Water holding characteristics of litters of different species in mountainous area of Napahai Plateau wetland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2011,31(1):28-34.
- [22] DENG W P, ZHENG X L, XIAO S S, et al. Effects of leaf type, litter mass and rainfall characteristics on the interception storage capacity of leaf litter based on process simulation[J].Journal of Hydrology,2023,624:e129943.
- [23] LI X, XIAO Q F, NIU J Z, et al. Rainfall interception by tree crown and leaf litter: An interactive process[J]. Hydrological Processes,2017,31(20):3533-3542.
- [24] DU J, NIU J Z, GAO Z L, et al. Effects of rainfall intensity and slope on interception and precipitation partitioning by forest litter layer[J].Catena,2019,172:711-718.
- [25] ROSALEM L M P, WENDLAND E C, ANACHE J A A. Understanding the water dynamics on a tropical forest litter using a new device for interception measurement[J]. Ecohydrology,2019,12(2):e2058.
- [26] NETO A J S, RIBEIRO A, DE CARVALHO LOPES D, et al. Simulation of rainfall interception of canopy and litter in *Eucalyptus* plantation in tropical climate[J]. Forest Science,2012,58(1):54-60.
- [27] HAVERD V, CUNTZ M. Soil-Litter-Iso: A one-dimensional model for coupled transport of heat, water and stable isotopes in soil with a litter layer and root extraction[J]. Journal of Hydrology,2010,388(3/4):438-455.