

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.04.015

CSTR: 32310.14.stbcbx.2026.04.015

刘恒, 鱼小兵, 杨艳芬, 等. 黄土高原刺槐林枯落物持水能力地带性特征与归因[J]. 水土保持学报, 2026, 40(4): 173-184.

Liu Heng, Yu Xiaobing, Yang Yanfen, et al. Zonal characteristics and attribution of litter water-holding capacity in *Robinia pseudoacacia* forests on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(4): 173-184.

## 黄土高原刺槐林枯落物持水能力地带性特征与归因

刘恒<sup>1</sup>, 鱼小兵<sup>2</sup>, 杨艳芬<sup>1,4</sup>, 刘国彬<sup>1,4</sup>, 周立波<sup>3</sup>, 田婧<sup>1,5</sup>, 王兵<sup>1,4</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 国网(西安)环保技术中心有限公司, 西安 710100; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043; 4. 陕西西安塞农田生态系统国家野外科学观测研究站, 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5. 云南省水利水电勘测设计院有限公司, 昆明 650021)

**摘要:** [目的] 为明确黄土高原刺槐林枯落物持水能力的地带性特征及其对混交模式的响应机制。

[方法] 以黄土高原刺槐林为对象, 采集森林区、森林草原区和草原区刺槐纯林( $R_p$ )、刺槐混交林[刺槐×侧柏( $R_p \times P_o$ )、刺槐×山杏( $R_p \times P_s$ )、刺槐×油松( $R_p \times P_t$ )]共 31 个样地枯落物, 研究其枯落物持水能力。

[结果] 1) 3 个植被带刺槐纯林枯落物最大持水率均高于刺槐混交林, 在草原区,  $R_p$  较  $R_p \times P_t$  高 5.1%, 在森林草原区和森林区,  $R_p$  较  $R_p \times P_o$ 、 $R_p \times P_s$ 、 $R_p \times P_t$  的分别高 5.6%、5.3%、11.4% 和 11.6%、11.5%、20.3%, 其中,  $R_p$  在草原区(147.88%)最低, 森林草原区(180.80%)和森林区(170.31%)相近且更高,  $R_p \times P_t$  是森林草原区(162.28%)最高, 草原区(140.64%)和森林区(141.60%)相近且偏低。2) 吸水-蒸发过程的持水率随时间变化, 吸水阶段对数增长, 蒸发阶段指数衰减, 变化速率均符合幂函数衰减。3)  $R_p$  和  $R_p \times P_t$  有效拦蓄量与多年平均降雨量和多年平均气温成正比, 且草原区掉坎式低于森林草原区和森林区, 对于各植被带内最优森林类型, 草原区  $R_p$  (7.17 t/hm<sup>2</sup>) 最高, 森林草原区  $R_p \times P_o$  (16.27 t/hm<sup>2</sup>) 最高, 森林区  $R_p \times P_t$  (17.45 t/hm<sup>2</sup>) 最高。4) 偏最小二乘结构方程模型表明, 气候与地形直接影响植被, 再与植被共同影响枯落物持水能力, 地形还可直接影响持水率。[结论] 黄土高原刺槐林枯落物有效拦蓄量与降雨量、气温正相关, 草原区、森林草原区和森林区区域最优森林类型依次为  $R_p$ 、 $R_p \times P_o$  和  $R_p \times P_t$ , 研究结果为水源涵养林优化及区域功能评估提供理论依据。

**关键词:** 枯落物; 水源涵养; 刺槐林; 植被带; 黄土高原

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0173-12

## Zonal Characteristics and Attribution of Litter Water-Holding Capacity in *Robinia pseudoacacia* Forests on the Loess Plateau

Liu Heng<sup>1</sup>, Yu Xiaobing<sup>2</sup>, Yang Yanfen<sup>1,4</sup>, Liu Guobin<sup>1,4</sup>, Zhou Libo<sup>3</sup>, Tian Jing<sup>1,5</sup>, Wang Bing<sup>1,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Grid (Xi'an) Environmental Protection Technology Center Co., Ltd., Xi'an 710100, China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China; 4. Shaanxi Ansai Agricultural Ecosystem National Observation and Research Station, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Yunnan Provincial Water Conservancy and Hydroelectric Survey Design and Research Institute, Kunming 650021, China)

**Abstract:** [Objective] To clarify the zonal characteristics of litter water-holding capacity in *Robinia pseudoacacia* forests and their response mechanisms to mixing patterns on the Loess Plateau. [Methods] Taking *R. pseudoacacia* forests on the Loess Plateau as the research subject, the litter was collected from a total of 31 sample plots of pure *R. pseudoacacia* forests ( $R_p$ ) and mixed *R. pseudoacacia* forests [*R. pseudoacacia*×*Platycladus*

收稿日期: 2025-12-26

修回日期: 2026-02-16

录用日期: 2026-03-20

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-31

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1300405); 国家自然科学基金面上项目(42271042); 国家自然科学基金重点项目(42130717)

第一作者: 刘恒(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail: heng\_liu\_ac@163.com

通信作者: 王兵(1982—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail: bwang@ms.iswc.ac.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

*orientalis* ( $R_p \times P_o$ ), *R. pseudoacacia*  $\times$  *Prunus sibirica* ( $R_p \times P_s$ ), *R. pseudoacacia*  $\times$  *Pinus tabuliformis* ( $R_p \times P_t$ ) in the forest zone, forest-steppe zone and steppe zone to study litter water-holding capacity. [Results] 1) In all three vegetation zones, the maximum water-holding rate of litter in pure *R. pseudoacacia* forests ( $R_p$ ) was higher than that in mixed *R. pseudoacacia* forests. In the steppe zone,  $R_p$  was 5.1% higher than  $R_p \times P_t$ . In the forest-steppe zone,  $R_p$  was 5.6%, 5.3%, and 11.4% higher than  $R_p \times P_o$ ,  $R_p \times P_s$ , and  $R_p \times P_t$ , respectively. In the forest zone,  $R_p$  was 11.6%, 11.5%, and 20.3% higher than  $R_p \times P_o$ ,  $R_p \times P_s$ , and  $R_p \times P_t$ , respectively. Among these,  $R_p$  was the lowest in the steppe zone (147.88%), while the values in the forest-steppe zone (180.80%) and forest zone (170.31%) were relatively similar and higher. For  $R_p \times P_t$ , the value was the highest in the forest-steppe zone (162.28%), while the values in the steppe zone (140.64%) and forest zone (141.60%) were similar and lower. 2) During the water absorption-evaporation process, the water-holding rate varied with time: it increased logarithmically during the absorption stage and decreased exponentially during the evaporation stage, with both change rates following a power function decay. 3) The effective water interception capacity of  $R_p$  and  $R_p \times P_t$  was positively correlated with mean annual precipitation and mean annual temperature, and the capacity in the steppe zone was abruptly lower than that in the forest-steppe zone and forest zone. Regarding the optimal forest type within each vegetation zone,  $R_p$  in the steppe zone (7.17 t/hm<sup>2</sup>) was the highest, followed by  $R_p \times P_o$  in the forest-steppe zone (16.27 t/hm<sup>2</sup>) and  $R_p \times P_t$  in the forest zone (17.45 t/hm<sup>2</sup>). 4) Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) revealed that climate and topography first directly affected vegetation, and then together with vegetation jointly influenced litter water-holding capacity. Topography could also directly affect the water-holding rate. [Conclusion] The effective interception capacity of litter in *R. pseudoacacia* forests on the Loess Plateau is positively correlated with precipitation and temperature. The optimal forest types for the steppe, forest-steppe, and forest zones are  $R_p$ ,  $R_p \times P_o$ , and  $R_p \times P_t$ , respectively. The results provide a theoretical basis for optimizing water conservation forests and assessing regional functions.

**Keywords:** litter; water conservation; *Robinia pseudoacacia*; vegetation zone; Loess Plateau

Received: 2025-12-26

Revised: 2026-02-16

Accepted: 2026-03-20

Online(www.cnki.net): 2026-03-31

森林生态系统通过林冠层、枯落物层和土壤层构成的垂直结构,在森林水源涵养中发挥着关键调控作用。其中枯落物层作为连接大气降水与土壤水分的关键水文界面,在森林水文过程中发挥着独特且重要的功能。枯落物层可有效拦蓄降水、降低表层土壤温度、减少土壤水分蒸发,其降解形成的腐殖质可增强土壤水分入渗<sup>[1]</sup>。相关研究<sup>[2-4]</sup>表明,干旱半干旱区枯落物持水量达自身干重的2~4倍,截留量占降水总量的5.7%~12.7%,降低土壤水分蒸发8.2%~78.3%。枯落物层可显著影响森林生态水文过程,对维持区域生态系统水源涵养功能至关重要。

枯落物持水能力是反映枯落物森林水源涵养功能的重要指标,通常用最大持水率(量)、有效拦蓄率(量)、吸水速率和蒸发速率等指标量化。具体来看,最大持水率是指单位质量枯落物的持水量,与林分类型、枯落物组分、化学成分及降解程度相关<sup>[5]</sup>。最大持水量反映整个林地的潜在持水能力,与最大持水率和枯落物蓄积量有关<sup>[6]</sup>。自然含水量是表示枯落物在自然环境下的持水能力,反映林内的水分状

况,与枯落物蓄积量、自身持水特性和局地水热条件有关<sup>[7]</sup>。有效拦蓄量与最大持水率、自然含水量、枯落物蓄积量相关,可表征样地枯落物对降水的实际拦蓄能力<sup>[8]</sup>,受枯落物特性(类型、数量、分解程度)及环境条件(降雨、温度、海拔、坡度和坡向)影响。吸水速率主要用以表征降雨过程中枯落物的持水效率和快速拦截能力<sup>[9]</sup>。蒸发速率则表征降雨结束后枯落物对水分的维持能力。综上,区域气候(降水量和温度)与地形(坡度、坡向和海拔)通过塑造局地水热环境,间接调控植被特征、枯落物类型和蓄积量,导致枯落物持水特性呈现显著地带性差异。

目前,森林系统枯落物持水能力的区域差异尚存争议,主要源于森林类型与气候导致的枯落物组分和蓄积量的差异。森林类型与枯落物年凋落量和组分密切相关。已有研究<sup>[1]</sup>表明,黄土高原半干旱区不同刺槐林的枯落物优势组分各异,刺槐  $\times$  紫穗槐 (*Robinia pseudoacacia* L.  $\times$  *Amorpha fruticosa* L.)、刺槐  $\times$  山桃 [*R. pseudoacacia* L.  $\times$  *Prunus davidiana* (Carrière) Franch.] 以落果为主,刺槐  $\times$  沙棘 (*R.*

*pseudoacacia* L. × *Hippophae rhamnoides* L.)、刺槐 × 侧柏 [*R. pseudoacacia* L. × *Platycladus orientalis* (L.) Franco]、刺槐 × 油松 (*R. pseudoacacia* L. × *Pinus tabulaeformis* Carr.) 以落叶为主,刺槐纯林则以林下枯草为主,枯落物蓄积量  $0.29 \sim 1.01 \text{ kg/m}^2$ ,刺槐 × 紫穗槐最高,刺槐 × 山杏 (*R. pseudoacacia* L. × *P. sibirica* L.) 最低。对于半湿润区不同组分年凋落量,刺槐纯林按顺序为叶 > 花 > 枝 > 果,侧柏纯林为叶 > 枝 > 果 > 花,刺槐 × 侧柏混交林是叶 > 枝 > 花 > 果,年凋落物总量刺槐纯林 ( $840.13 \text{ g/m}^2$ ) > 刺槐 × 侧柏混交林 ( $723.06 \text{ g/m}^2$ ) > 侧柏纯林 ( $618.52 \text{ g/m}^2$ )<sup>[10]</sup>。从区域气候来看,枯落物蓄积量与水热条件密切相关,存在多重阈值且阈值效应因生态系统而异<sup>[11]</sup>。研究<sup>[12]</sup>表明,水热条件可影响年凋落物量,枯落物蓄积量随纬度的升高而降低;也有研究<sup>[13]</sup>指出,水热条件可影响枯落物的降解速率,枯落物蓄积量与水热条件呈对数负相关。黄土高原自1999年“退耕还林”工程实施后,人工林面积达  $750 \text{ 万 hm}^2$ <sup>[14]</sup>,主要以耐旱、耐贫瘠、速生的刺槐树种为主<sup>[15]</sup>,常与侧柏、山杏、油松等混交种植。黄土高原自东南向西北水热条件差异显著,刺槐林造林模式多元,枯落物组分及蓄积量存在显著的区域异质性,势必对持水效率、拦截能力、水分维持能力产生影响,然而,现有关于黄土高原刺槐林枯落物持水能力的研究多聚焦单一植被带或小尺度区域,对其地带性特征规律的揭示尚不充分,同时,混交模式的相关研究多局限于少数树种组合,缺乏刺槐与侧柏、山杏、油松等典型混交树种混交效应的系统性对比。此外,对枯落物“失水”过程(水分蒸发过程)关注较少,而枯落物吸水-蒸发持水动态是水源涵养的核心过程,也是应对极端气候如干旱的重要依据。基于此,本研究选取黄土高原刺槐纯林及刺槐混交林,探究森林区、森林草原区和草原区刺槐林枯落物持水能力的区域异质性规律和4种森林类型枯落物持水能力及吸水-蒸发动态差异,并阐明环境因子对枯落物持水能力的影响。为评价黄土高原植被恢复的水源涵养功能提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原 ( $33^\circ 43' \sim 41^\circ 16' \text{N}$ ,  $100^\circ 54' \sim 114^\circ 33' \text{E}$ ) 属于暖温带大陆性季风气候,受季风影响显著。地势呈西北高、东南低的阶梯状分布,海拔跨度为  $38 \sim 5097 \text{ m}$ 。降水和气温呈现显著的时空异质性,其年平均降水量 ( $300 \sim 600 \text{ mm}$ ) 和年平均气温 ( $8 \sim 14^\circ \text{C}$ ) 沿东南至西北呈递减梯度,65% 以上降水集中于7—9月<sup>[16]</sup>。东南部土壤类型以褐土和黑垆土

为主,中部以黄绵土为主,西北部以棕钙土和灰钙土为主。受水热条件和混交模式影响,黄土高原植被存在明显的区域性分布特征,被划分为不同植被带,包括森林植被带(年平均降雨量  $> 550 \text{ mm}$ ,简称森林区)、森林草原植被带(年平均降雨量  $450 \sim 550 \text{ mm}$ ,简称森林草原区)和草原植被带(年平均降雨量  $< 450 \text{ mm}$ ,简称草原区),草原植被区因为极度干旱,混交模式主要是刺槐纯林及刺槐 × 油松混交林。

### 1.2 试验设计和样品采集

本研究于2022年9月—10月间开展野外采样工作,通过文献查阅、咨询林业相关部门并结合实地调查,基于刺槐纯林、混交林现有分布格局(受人工林气候适应性及区域造林工程差异影响),沿黄土高原植被带分区及降水梯度系统选定31个样地,样地覆盖区域涉及13个区县(图1)。其中森林区刺槐纯林 ( $R_p$ ) 样地5个,刺槐 × 油松混交林 ( $R_p \times P_i$ ) 3个,刺槐 × 侧柏 ( $R_p \times P_o$ ) 混交林4个,刺槐 × 山杏 ( $R_p \times P_s$ ) 混交林2个,分布在吉县、永寿、富县、长武和天水5县,森林草原区  $R_p$  样地3个,  $R_p \times P_i$  样地3个,  $R_p \times P_o$  样地2个,  $R_p \times P_s$  样地4个,分布在兴县、吴起、安塞和庆城4县,草原区  $R_p$  样地4个,  $R_p \times P_i$  样地1个,分布在神木、定边、环县和会宁4县。每个样地设置3个  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  的枯落物样方,收集样方内完整枯落物层装入密封袋测定枯落物鲜重,并记录坡向(取余弦函数)、坡度和海拔信息(表1),随后带回实验室放入  $75^\circ \text{C}$  烘箱中烘干至恒定重量,计算蓄积量和自然含水率。采用室内浸泡法测定枯落物的吸水重量,将枯落物装入尼龙袋中分别测定一定时间(0.08、0.17、0.33、0.67、1.0、1.5、2.4、6、12、24、36、48 h)吸水后的重量,以计算持水率和吸水速率。之后,将尼龙袋取出,测定蒸发过程0.5、1.5、3、6、12、24、36、48、60 h的重量,计算蒸发过程持水率变化和蒸发速率。计算公式为:

$$R_t = \frac{(M_t - M_0)}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$E_t = \frac{M_{48} - M_{et}}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$V_t = \frac{R_t}{100t} \quad (3)$$

$$V_{et} = \frac{E_t}{100t} \quad (4)$$

$$R_{sv} = 0.85 \times R_m - R_0 \quad (5)$$

$$W_{sv} = R_{sv} \times M_0 \quad (6)$$

式中:  $R_t$  为枯落物  $t$  时刻持水率,%;  $M_t$  为枯落物浸水  $t$  时刻重量, g;  $M_0$  为枯落物干重, g;  $E_t$  为枯落物蒸发  $t$  时刻持水率,%;  $M_{48}$  为枯落物浸水48 h后重量, g;  $M_{et}$  为枯落物蒸发  $t$  时刻重量, g;  $V_t$  为枯落物浸水  $t$  时刻的吸



水速率,  $g/(g \cdot h)$ ;  $t$  为时间,  $h$ ;  $V_{et}$  为枯落物蒸发  $t$  时刻的蒸发速率,  $g/h$ ;  $R_{sv}$  为枯落物有效拦蓄率, %;  $R_m$  为枯落物最大持水率, %;  $R_0$  为枯落物自然含水率, %;  $W_{sv}$  是枯落物有效拦蓄量,  $t/hm^2$ ; 0.85 为有效拦蓄系数。

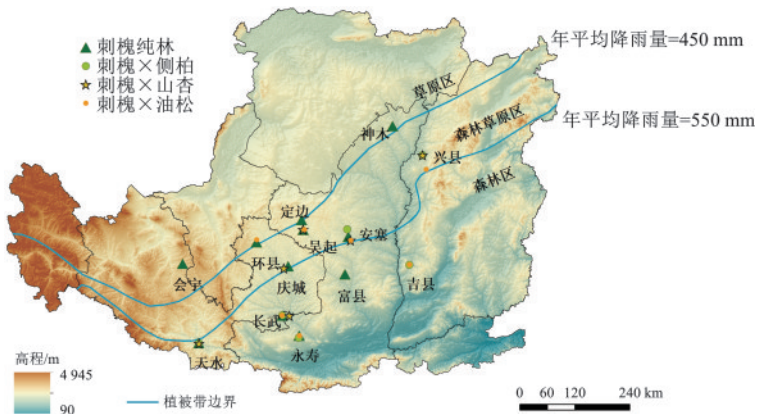


图 1 研究区样地位置  
Fig.1 Location of sampling plots in study area

表 1 调查样地刺槐林基本信息

Table 1 Basic information of *R. pseudoacacia* forests in sampling plots

| 植被带  | 县名 | 年平均降雨量/mm | 年平均气温/℃ | 海拔/m  | 林分类型                           | 纬度(N)     | 经度(E)      | 平均树高/m     | 平均胸径/cm    | 密度/(株·hm <sup>-2</sup> ) |
|------|----|-----------|---------|-------|--------------------------------|-----------|------------|------------|------------|--------------------------|
| 草原   | 会宁 | 360.3     | 9.7     | 1 795 | R <sub>p</sub>                 | 36°09′07″ | 105°13′54″ | 4.97±0.67  | 7.84±2.54  | 1 100±100                |
|      | 神木 | 435.2     | 10.5    | 1 223 | R <sub>p</sub>                 | 38°44′08″ | 110°18′14″ | 5.20±1.36  | 8.86±3.29  | 1 433±58                 |
|      | 定边 | 444.8     | 10.8    | 1 379 | R <sub>p</sub>                 | 37°07′15″ | 108°04′59″ | 7.50±1.23  | 13.62±4.56 | 1 800±100                |
|      | 环县 | 458.1     | 12.0    | 1 247 | R <sub>p</sub>                 | 36°33′32″ | 107°17′52″ | 9.01±1.68  | 8.23±3.31  | 1 500±0                  |
| 森林草原 | 吴起 | 464.2     | 11.1    | 1 426 | R <sub>p</sub> ×P <sub>t</sub> | 36°33′43″ | 107°17′17″ | 5.29±1.37  | 6.24±2.63  | 2 133±462                |
|      |    |           |         | 1 419 | R <sub>p</sub>                 | 36°55′28″ | 108°07′50″ | 9.07±1.74  | 10.58±2.79 | 1 567±252                |
|      |    |           |         | 1 387 | R <sub>p</sub> ×P <sub>s</sub> | 36°55′48″ | 108°07′48″ | 6.26±1.43  | 11.40±3.94 | 1 633±58                 |
|      | 兴县 | 515.6     | 11.1    | 1 396 | R <sub>p</sub> ×P <sub>t</sub> | 36°55′48″ | 108°09′32″ | 7.00±1.35  | 10.51±3.23 | 1 933±153                |
|      |    |           |         | 1 067 | R <sub>p</sub> ×P <sub>o</sub> | 38°25′48″ | 111°03′36″ | 5.43±2.11  | 7.47±3.73  | 2 467±252                |
|      |    |           |         | 1 135 | R <sub>p</sub> ×P <sub>s</sub> | 38°25′41″ | 111°03′36″ | 7.57±2.26  | 11.04±5.16 | 967±126                  |
|      | 安塞 | 525.8     | 12.3    | 1 313 | R <sub>p</sub> ×P <sub>t</sub> | 38°09′07″ | 111°09′11″ | 6.90±1.08  | 12.02±4.06 | 1 833±153                |
|      |    |           |         | 1 170 | R <sub>p</sub>                 | 36°48′36″ | 109°14′20″ | 11.36±3.25 | 13.14±4.79 | 1 867±58                 |
|      |    |           |         | 1 243 | R <sub>p</sub> ×P <sub>o</sub> | 36°57′18″ | 109°12′32″ | 5.67±1.32  | 6.72±2.53  | 3 167±1 286              |
|      | 庆城 | 541.2     | 12.2    | 1 387 | R <sub>p</sub> ×P <sub>s</sub> | 36°44′28″ | 109°17′49″ | 9.14±3.05  | 9.70±4.46  | 1 733±252                |
|      |    |           |         | 1 419 | R <sub>p</sub> ×P <sub>t</sub> | 36°44′24″ | 109°18′00″ | —          | —          | —                        |
|      |    |           |         | 1 118 | R <sub>p</sub>                 | 36°05′34″ | 107°47′18″ | 10.26±3.12 | 11.95±4.24 | 1 667±115                |
| 森林   | 吉县 | 541.8     | 12.7    | 1 086 | R <sub>p</sub> ×P <sub>s</sub> | 36°00′04″ | 107°41′13″ | 9.27±4.99  | 9.20±4.31  | 2 567±611                |
|      |    |           |         | 1 100 | R <sub>p</sub>                 | 36°16′23″ | 110°45′43″ | 11.54±1.96 | 12.47±1.73 | 2 067±115                |
|      |    |           |         | 1 127 | R <sub>p</sub> ×P <sub>o</sub> | 36°16′12″ | 110°44′24″ | 7.94±1.76  | 12.20±5.31 | 2 267±306                |
|      | 富县 | 566.5     | 12.0    | 1 132 | R <sub>p</sub> ×P <sub>t</sub> | 36°16′22″ | 110°44′20″ | 7.95±2.66  | 10.79±4.21 | 2 633±208                |
|      |    |           |         | 1 181 | R <sub>p</sub>                 | 36°04′18″ | 109°10′28″ | 16.14±1.18 | 15.97±3.94 | 1 300±100                |
|      | 长武 | 584.0     | 9.1     | 1 229 | R <sub>p</sub>                 | 35°13′34″ | 107°41′13″ | 13.43±5.08 | 9.27±3.31  | 1 183±625                |
|      |    |           |         | 1 229 | R <sub>p</sub> ×P <sub>o</sub> | 35°13′48″ | 107°41′24″ | 7.53±3.81  | 5.55±2.20  | 1 100±35                 |
|      |    |           |         | 1 229 | R <sub>p</sub> ×P <sub>s</sub> | 35°13′34″ | 107°51′43″ | 9.75±5.07  | 7.52±3.46  | 1 108±224                |
|      | 永寿 | 606.1     | 13.0    | 1 080 | R <sub>p</sub> ×P <sub>t</sub> | 35°13′37″ | 107°40′48″ | 10.09±4.16 | 7.79±3.81  | 2 267±153                |
|      |    |           |         | 1 352 | R <sub>p</sub>                 | 34°50′24″ | 108°06′25″ | 17.20±3.72 | 15.72±4.34 | 2 167±451                |
|      |    |           |         | 1 105 | R <sub>p</sub> ×P <sub>o</sub> | 34°47′53″ | 108°05′42″ | 12.38±5.89 | 12.03±4.37 | 1 192±614                |
|      | 天水 | 638.3     | 13.2    | 1 135 | R <sub>p</sub> ×P <sub>t</sub> | 34°50′24″ | 108°06′36″ | 11.15±5.78 | 15.07±5.05 | 1 850±867                |
|      |    |           |         | 1 590 | R <sub>p</sub>                 | 34°36′52″ | 105°43′28″ | 11.63±3.13 | 12.28±4.31 | 1 867±58                 |
|      |    |           |         | 1 602 | R <sub>p</sub> ×P <sub>o</sub> | 34°36′36″ | 105°43′48″ | 7.77±2.62  | 9.29±2.57  | 2 700±265                |
|      |    |           |         | 1 602 | R <sub>p</sub> ×P <sub>s</sub> | 34°36′22″ | 105°43′48″ | 6.64±2.86  | 8.35±3.85  | 2 067±379                |

注:表中数据为平均值±标准差。

### 1.3 植被特征测定与计算

采用标准地调查法分别调查样地内乔木层、灌木层和草本层植被特征。乔木样方大小为  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ , 设置 3 个重复点, 调查乔木种类、平均树高 (Height)、林分密度 (TD) 和 1.3 m 处平均胸径 (DBH) 用以表征乔木层特征。在每个乔木样方内框选 1 个  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的灌木样方和 1 个  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的草本样方, 记录灌木和草本的种类和数量, 分别计算灌木层和草本层的 Patrick 丰富度指数 ( $R$ )、Shannon 多样性指数 ( $H$ )、Simpson's 多样性指数 ( $D$ ) 和 Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 用以表征灌木层和草本层的特征, 计算方式参考文献[17]。

### 1.4 气候因子获取

在本研究中, 气候因子为采样县市多年平均降水量 (MAP) 和多年平均气温 (MAT)。使用 2003—2022 年高分辨率月平均降水 (MMP) 和月平均气温 (MMT) 数据, 数据来源于“中国国家科技基础设施国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)”, 通过 ArcGIS 软件 (10.8 版本) 提取逐月数据后, 按算术平均法计算 MAP 和 MAT。

### 1.5 数据处理与分析

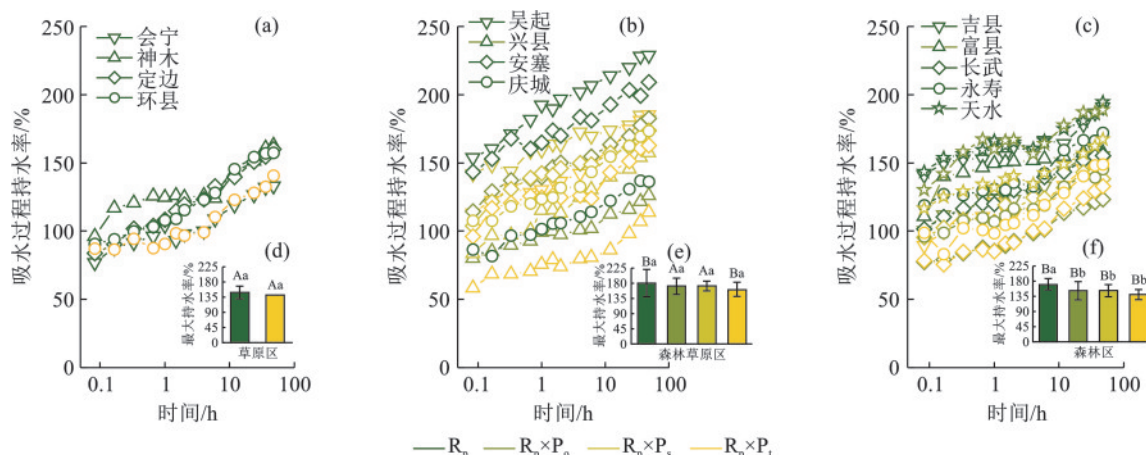
本研究采用 Excel 2021 软件进行数据整理与预处理, 并基于 IBM SPSS Statistics 26 完成统计分析。对于同一林分类型不同植被带间及同一植被带不同林分类型的枯落物蓄积量和持水能力差异, 通过单因素方差分析 (one-way ANOVA) 进行差异性检验, 若存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 则进一步采用 Duncan's 检验进行事后多重比较。枯落物蓄积量、持水能力、植被特征、地形因子和气候因子间的相关性使用皮

尔逊相关分析检验, 并使用偏最小二乘结构方程模型 (PLS-SEM) 建立环境变量和枯落物持水能力的因果路径。图表通过 Origin 2021、Python 3.8 和 R4.4.2 (RStudio) 软件绘制完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同混交模式刺槐林枯落物持水动态特征

2.1.1 枯落物吸水过程动态特征 由图 2 可知, 刺槐林枯落物吸水过程中持水率随时间符合对数增长趋势, 该函数关系很好地描述吸水过程持水率先快速上升后逐渐趋缓的态势, 但该过程受森林类型和植被带影响。从森林类型来看, 各样地的  $R_p$  纯林各时刻的持水率常高于混交林, 除庆城  $R_p \times P_s$  持水率高于  $R_p$  和天水  $R_p$  和  $R_p \times P_o$  上下波动。从最大持水率平均值来看,  $R_p$  枯落物的最大持水率在草原区 (147.88%) 低于森林区 (170.31%) 与森林草原区 (180.80%), 差异显著 ( $p < 0.05$ )。但  $R_p \times P_i$  最大持水率表现出森林草原区 (162.28%) 大于森林区 (141.60%) 和草原区 (140.64%), 差异显著 ( $p < 0.05$ )。同一植被带不同刺槐林枯落物持水率存在差异。具体表现为森林区  $R_p$  较  $R_p \times P_o$ ,  $R_p \times P_s$ ,  $R_p \times P_i$  分别显著提高 11.6%、11.5%、20.3% ( $p < 0.05$ ), 草原区  $R_p$  最大持水率比  $R_p \times P_i$  高 5.1%, 森林草原区  $R_p$  较  $R_p \times P_o$ 、 $R_p \times P_s$ 、 $R_p \times P_i$  分别提高 5.6%、5.3%、11.4%, 但草原区和森林草原区刺槐林间最大持水率差异未达到显著水平 ( $p > 0.05$ )。进一步分析枯落物吸水速率 (图 3) 发现, 其随时间变化规律可用衰减幂函数进行拟合, 在吸水前 2 h, 枯落物与水分快速结合, 吸水速率下降迅速, 之后随着枯落物逐渐达到饱和, 吸水速率趋缓。



注: 图柱上方不同大写字母为同一刺槐林在不同植被带间差异显著 ( $p < 0.05$ ); 不同小写字母为同一植被带不同刺槐林间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图2 3个植被带刺槐林枯落物吸水过程持水率随时间的变化特征

Fig.2 Temporal variation of litter water-holding rate in *R. pseudoacacia* forests across three vegetation zones during water absorption

2.1.2 枯落物蒸发过程动态特征 在蒸发过程中, 负指数衰减函数能描述刺槐林枯落物持水率的衰减趋势(图 4)。由于最大持水率的影响, 各样地的  $R_p$  在蒸发过程各时刻同样常比其他混交林具有更高的持水率(除庆城和天水外), 蒸发速率随时间的变化同样符合衰减幂函数拟合(图 5), 从初期(0~6 h)蒸发速率可以看出, 植被带和森林类型对枯落物

蒸发过程持水能力的影响,  $R_p$  平均蒸发速率表现为草原区低于森林草原区和森林区,  $R_p \times P_i$  平均蒸发速率表现为森林草原区低于草原区和森林区, 同时, 在草原区,  $R_p$  平均蒸发速率小于  $R_p \times P_i$ , 森林草原区,  $R_p$  平均蒸发速率和  $R_p \times P_s$  相近,  $R_p \times P_i$  最小, 森林区, 4 种森林类型的平均蒸发速率上下波动相近。

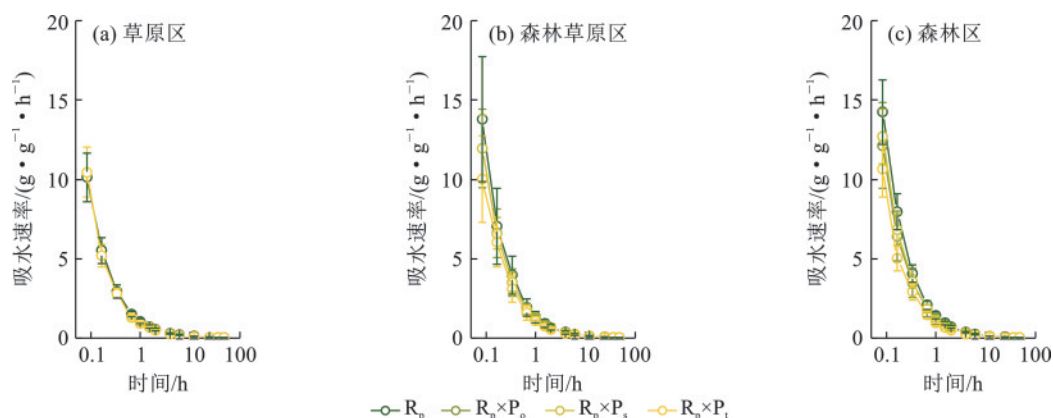


图 3 3个植被带刺槐林枯落物吸水速率随时间的变化特征

Fig.3 Temporal variation of litter water absorption rate in *R. pseudoacacia* forests across three vegetation zones

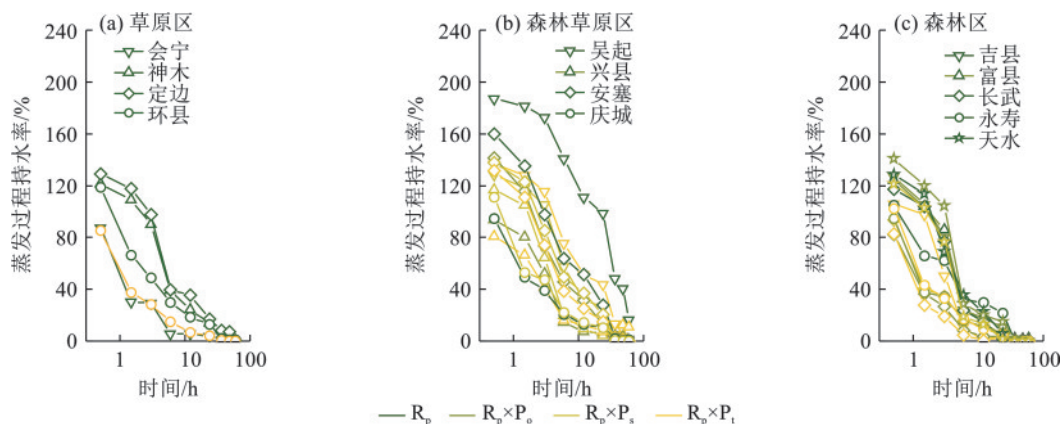


图 4 3个植被带刺槐林枯落物蒸发过程持水率随时间的变化特征

Fig.4 Temporal variation of litter water-holding rate in *R. pseudoacacia* forests across three vegetation zones during evaporation

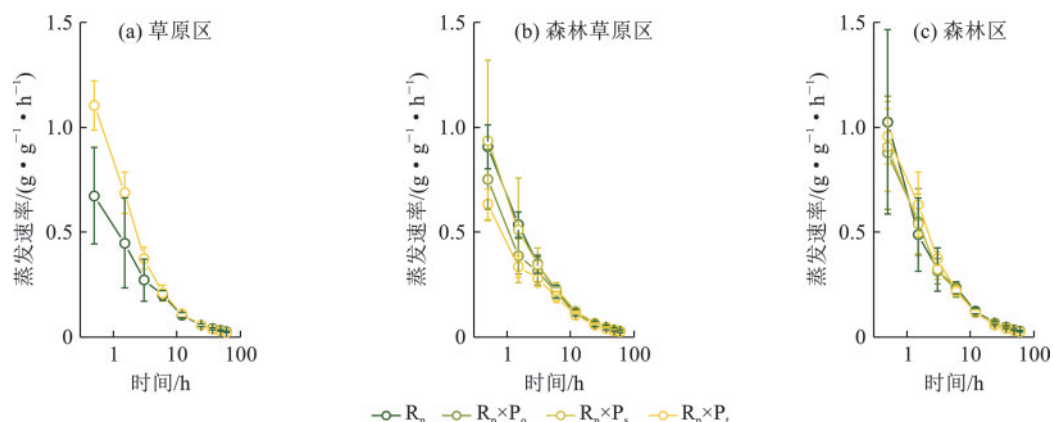


图 5 3个植被带刺槐林枯落物蒸发速率随时间变化

Fig.5 Temporal variation of litter evaporation rate in *R. pseudoacacia* forests across three vegetation zones

## 2.2 不同混交模式刺槐林枯落物拦蓄能力区域特征

刺槐林枯落物蓄积量和有效拦蓄量也受植被

带和森林类型的调控。从植被带平均值(图 6)来看, 对于  $R_p$ , 草原区枯落物蓄积量最低(7.17 t/



$\text{hm}^2$ ),分别低于森林草原区 29.8% 和森林区 41.2% ( $p<0.05$ )。相应地,  $R_p$  枯落物有效拦蓄量在草原区为  $8.18 \text{ t/hm}^2$ ,较森林草原区和森林区分别低 44.1% 和 51.6% ( $p<0.05$ )。同样,  $R_p \times P_i$  在草原区的枯落物蓄积量 ( $4.11 \text{ t/hm}^2$ ) 比森林草原区和森林区低 54.9% 和 72.5% ( $p<0.05$ ),草原区枯落物有效拦蓄量 ( $4.39 \text{ t/hm}^2$ ) 较森林草原区和森林区低 63.1% 和 74.9% ( $p<0.05$ )。特殊地,长武的  $R_p$  和  $R_p \times P_i$  枯落物蓄积量较低,可能是较森林区其他样地,该地乔木密度较低且都位于阳坡,土壤含水量较低,乔木

生长较差。森林类型变化对枯落物的持水能力也具有影响。在草原区,  $R_p$  枯落物蓄积量比  $R_p \times P_i$  高 74.5%,有效拦蓄量高 86.3%。在森林草原区,  $R_p$  枯落物蓄积量和有效拦蓄量分别是  $R_p \times P_o$ 、 $R_p \times P_s$ 、 $R_p \times P_i$  的 77.9%、96.9%、112.2% 和 89.9%、94.7%、123.0%,在森林区,  $R_p$  枯落物蓄积量和有效拦蓄量分别是  $R_p \times P_o$ 、 $R_p \times P_s$ 、 $R_p \times P_i$  的 129.3%、160.2%、81.7% 和 144.5%、179.9%、96.6%。综上,枯落物持水能力方面,草原区  $R_p$  更好,森林草原区  $R_p \times P_o$  最好,森林区  $R_p \times P_i$  最好。

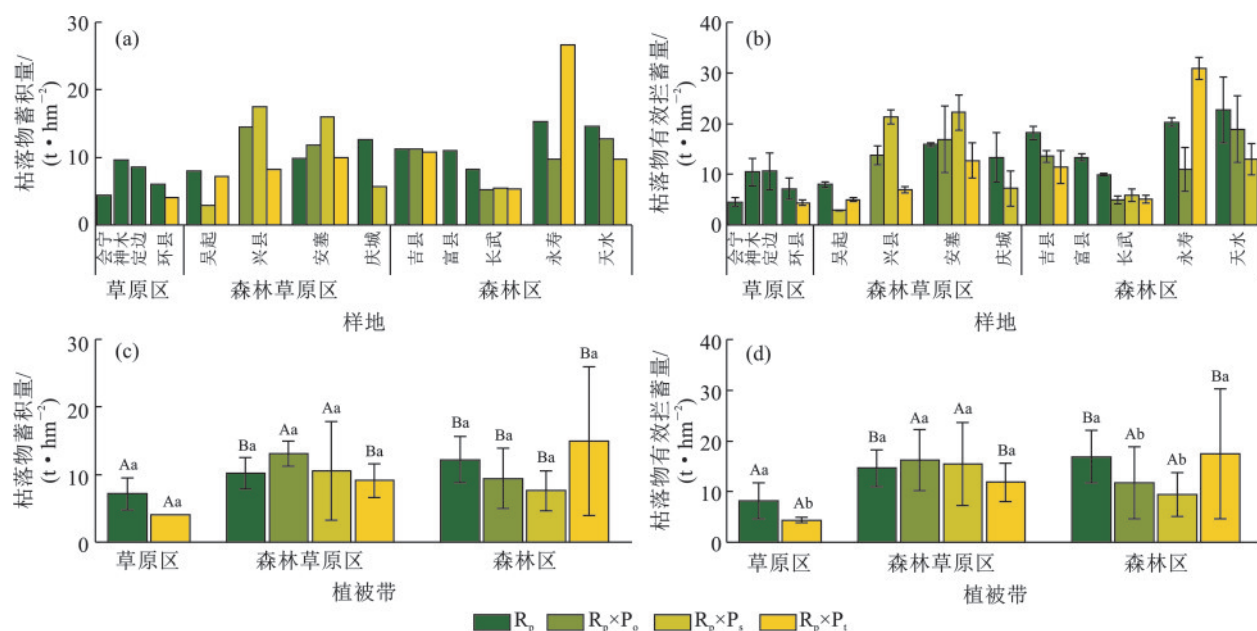


图6 刺槐林枯落物蓄积量和有效拦蓄量

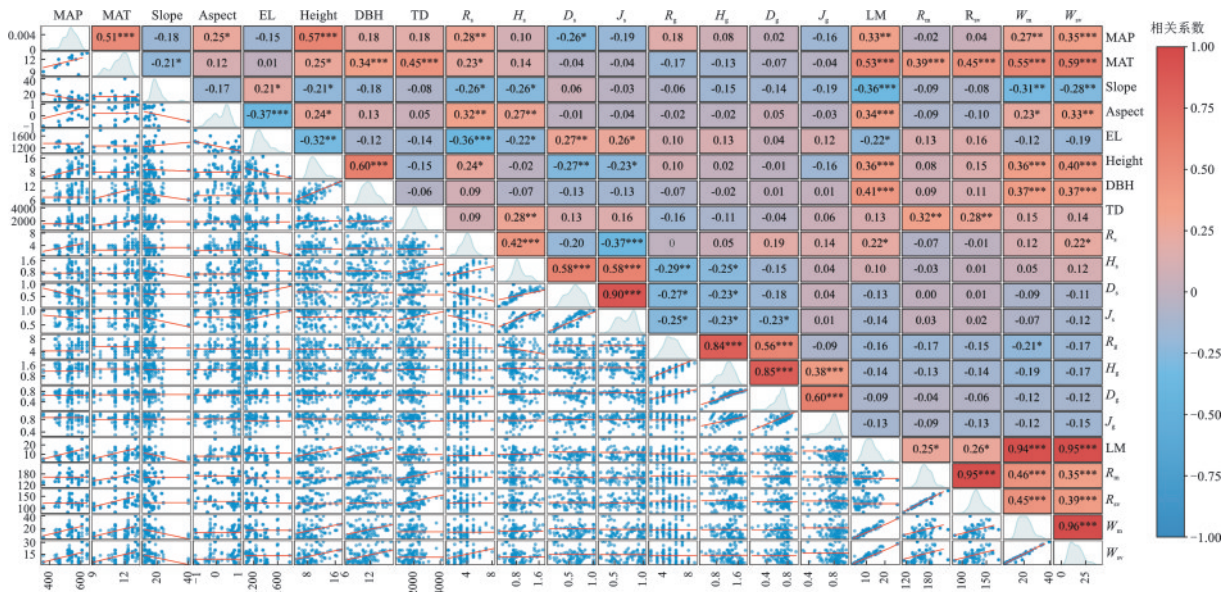
Fig.6 Litter accumulation and effective interception capacity of *R. pseudoacacia* forests

### 2.3 地带性环境因子与枯落物持水能力关联性

气候、地形和植被因子显著影响枯落物蓄积量和持水能力(图7)。枯落物蓄积量(LM)与 MAT、MAP、Aspect、 $R_s$ 、Height 和 DBH 呈正相关( $r=0.53$ 、 $p<0.001$ ;  $r=0.33$ 、 $p<0.01$ ;  $r=0.22$ 、 $p<0.05$ ;  $r=0.22$ 、 $p<0.05$ ;  $r=0.36$ 、 $p<0.001$ ;  $r=0.41$ 、 $p<0.001$ ),而与 Slope 和 EL 呈负相关( $r=-0.36$ 、 $p<0.001$ ;  $r=-0.22$ 、 $p<0.05$ )。最大持水率( $R_m$ )和有效拦蓄率( $R_{sv}$ )与 MAT( $p<0.001$ )、TD( $p<0.01$ )呈正相关。最大持水量( $W_m$ )与 MAP、MAT、Height 和 DBH 呈正相关( $r=0.27$ 、 $p<0.01$ ;  $r=0.56$ 、 $p<0.001$ ;  $r=0.37$ 、 $p<0.001$ ;  $r=0.38$ 、 $p<0.001$ )。有效拦蓄量( $W_{sv}$ )与 MAP、MAT、Height 和 DBH 均呈极显著正相关( $r=0.36$ 、 $p<0.001$ ;  $r=0.60$ 、 $p<0.001$ ;  $r=0.40$ 、 $p<0.001$ ;  $r=0.38$ 、 $p<0.001$ ),与  $R_s$  有微弱正相关( $R=0.24$ 、 $p<0.05$ ),而与 Slope、EL 呈负相关( $r=-0.25$ 、 $p<0.05$ ;  $r=-0.20$ 、 $p<0.05$ )。

基于黄土高原不同植被带刺槐林样点的高程、

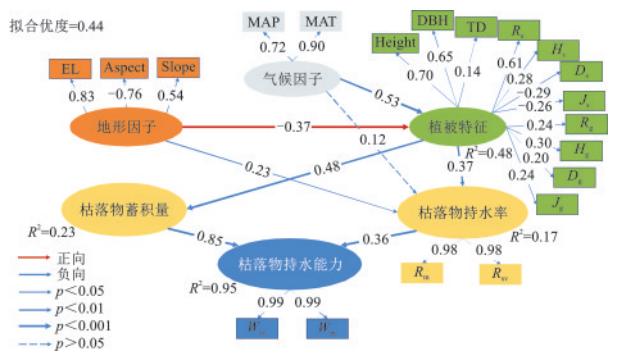
坡度、坡向、2003—2022 年 MAP 和 MAT、植被特征,利用 PLS-SEM 分析地形、气候、植被对枯落物蓄积量和持水能力的影响。图8中箭头上的值表示2个变量间直接影响的路径系数( $\beta$ )。PLS-SEM 结果表明,枯落物蓄积量(LM,由枯落物数量介导,  $\beta=0.85$ 、 $p<0.001$ )比枯落物持水率( $R$ ,包括  $R_m$ 、 $R_{sv}$ ,由枯落物质量介导,  $\beta=0.36$ 、 $p<0.001$ )对于枯落物持水能力(WHC,包括  $W_m$ 、 $W_{sv}$ )更重要。具体而言,植被特征和地形因子对枯落物持水率有显著正相关( $\beta=0.37$ 、 $p<0.001$ ;  $\beta=0.23$ 、 $p<0.05$ ),同时,气候因子对植被特征有极显著正相关( $\beta=0.53$ 、 $p<0.001$ ),而地形因子则相反( $\beta=-0.37$ 、 $p<0.001$ )。枯落物蓄积量受植被特征的影响呈显著正相关( $\beta=0.48$ 、 $p<0.001$ )。总体而言,气候和地形因子解释植被变化的 46%。气候、地形和植被因子共同解释 20% 的枯落物持水率变化和 38% 的枯落物蓄积量变化。枯落物持水率变化和蓄积量变化占枯落物 WHC 变化的 95%。



注: 填充矩形的刻度颜色表示相关性的强度, 数字表示相关系数, 相关系数为斯皮尔曼秩相关。\*、\*\*、\*\*\*分别表示  $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 、 $p < 0.001$ 。MAP、MAT、Slope、Aspect、EL、Height、DBH、TD、 $R_s$ 、 $R_g$ 、 $H$ 、 $D$ 、 $J$ 、LM、 $R_m$ 、 $R_{sv}$ 、 $W_m$ 、 $W_{sv}$ 、 $W_v$  分别为多年平均降雨量、多年平均气温、坡度、坡向、海拔高度、乔木层平均树高、乔木层平均胸径、乔木层树木密度、灌木层 Patrick 丰富度指数、草本层 Patrick 丰富度指数、Shannon 多样性指数、Simpson's 多样性指数、Pielou 均匀度指数、枯落物蓄积量、最大持水率、有效拦蓄率、最大持水量、有效拦蓄量。

图 7 枯落物蓄积量和持水能力与植被特征和环境因子的相关性

Fig.7 Correlations of litter accumulation and water-holding capacity with vegetation characteristics and environmental factors



注: 潜变量和观测变量间的箭头上的数字表示负载; 潜变量间的粗体箭头表示显著相关 ( $p < 0.05$ ), 箭头上的数字表示路径系数; 虚线箭头表示相关性不显著 ( $p > 0.05$ )。

图 8 PLS-SEM 分析结果

Fig.8 Results of PLS-SEM analysis

图 9 阐述 PLS-SEM 模型中所有变量的影响结果, 包括直接、间接和总影响。植被对枯落物持水能力的总影响为正 (0.54), 通过对枯落物持水率的直接影响 (0.37) 和枯落物蓄积量的直接影响 (0.48) 间接影响枯落物持水能力。气候变化主要通过直接影响植被生长而间接影响枯落物蓄积量和持水率 (0.25、0.19)。且气候还可影响枯落物分解状态直接调控枯落物持水率 (0.12), 但不显著 ( $p > 0.05$ )。气候对枯落物持水能力总影响为正 (0.33)。同样, 地形也通过直接影响植被间接影响枯落物蓄积量和持水率从而调控枯落物持水能力 (-0.18、-0.13)。且地形还通过影响枯落物分解状态直接调控枯落物持水率 (0.23)。地形对枯落物持水能力总影响为负 (-0.12)。

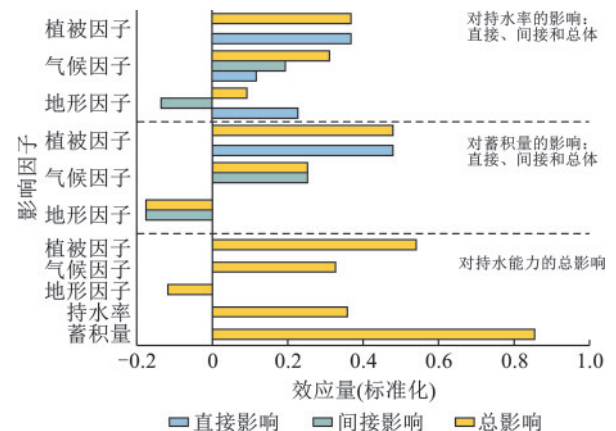


图 9 基于 PLS-SEM 的枯落物持水率、蓄积量和持水能力标准化效应量

Fig.9 Standardized effect sizes of litter water-holding rate, litter accumulation and water-holding capacity based on PLS-SEM

### 3 讨论

#### 3.1 混交模式对枯落物持水能力的影响及其区域响应

相关研究<sup>[1]</sup>表明, 森林类型会影响枯落物的持水能力, 主要是由于枯落物组成、成分、分解情况和蓄积量等不同。本研究中森林区  $R_p$  纯林最大持水率显著高于混交林, 混交林间变异性相对较小。分析原因是刺槐凋落物木质素含量低<sup>[18]</sup>、角质层薄<sup>[19]</sup>, 分解速率显著快于油松、侧柏和山杏<sup>[20-23]</sup>。在分解速率较快的森林区, 刺槐枯落物通过快速矿化形成高孔隙度结构的半分解层, 促进水分吸附; 而油松等凋落物因分解滞后, 积累更多未分解层, 不利于持水能力提



升<sup>[24]</sup>。混交林间的变异性差异可能来源于混交树种的叶片特征,油松针叶因含有树脂,具有疏水和更慢的分解速率,但由于刺槐枯落物主导混交林枯落物层的整体性质,混交林枯落物层差异相对较小。值得注意的是,并不意味着 $R_p$ 一定比其他混交林具有更强的拦蓄降雨能力,还与枯落物蓄积量有关,在森林区, $R_p \times P_i$ 枯落物平均蓄积量最多,导致有效拦蓄量 $R_p \times P_i > R_p > R_p \times P_o > R_p \times P_s$ 。在森林草原区和草原区,不同刺槐林枯落物最大持水率差异较小,可能归因于相对寒冷干燥的环境条件限制,降低微生物多样性,减少生物量,并削弱细胞外酶的活性,导致枯落物分解受阻且分解速率表现出较低的变异性<sup>[25]</sup>,使枯落物维持初始疏水状态。考虑到蓄积量的影响,森林草原区枯落物的有效拦蓄量 $R_p \times P_o > R_p \times P_s > R_p > R_p \times P_i$ ,而草原区的有效拦蓄量 $R_p > R_p \times P_i$ 。

枯落物分解状况<sup>[25]</sup>和化学成分<sup>[26]</sup>均受降雨量和气温的影响,因此,植被带间的持水能力差异是可以预见的。本研究结果表明, $R_p$ 枯落物的最大持水率表现为在草原区低于森林区和森林草原区,可能是因为植物通过提高木质素含量<sup>[27]</sup>及角质层厚度<sup>[28]</sup>以降低蒸腾损耗应对草原区低降雨量的胁迫,同时水资源限制还改变枯落物的C、N、P比例,具体表现为增加C/N比和降低N/P比,从而进一步限制微生物分解枯落物<sup>[26]</sup>,导致枯落物疏水性增强,持水能力更差。 $R_p \times P_i$ 枯落物的最大持水率表现为森林草原区显著大于森林区和草原区,草原区较低与 $R_p$ 原因类似,森林区较低可能归咎于刺槐枯落物持水能力强于油松枯落物,而森林区水热条件好,且刺槐枯落物更易分解,造成油松枯落物在森林区占比高于森林草原区,因此,森林草原区 $R_p \times P_i$ 最大持水率更高。同时,随着降雨量和气温的增大, $R_p$ 和 $R_p \times P_i$ 枯落物蓄积量持续增加,该结果与该地区部分发现一致<sup>[16,25]</sup>。二者结合导致, $R_p$ 和 $R_p \times P_i$ 枯落物的有效拦蓄量均表现为在草原区远低于森林区和森林草原区。

### 3.2 植被带对刺槐林枯落物吸水-蒸发过程的影响

凋落物吸水过程代表其水文特性,蒸发过程代表其保水能力<sup>[29]</sup>。黄土高原刺槐林吸水过程持水率随时间变化符合对数增长(图2),蒸发过程符合负指数衰减(图4),而衰减幂函数可描述吸水速率和蒸发速率随时间的动态变化(图3和图5),与其他森林类型的研究<sup>[29]</sup>结果一致,表明该模型在刺槐林枯落物吸水和蒸发过程中的适用性。同时,各样地的 $R_p$ 纯林吸水和蒸发过程各时刻的持水率常高于混交林(除庆城和天水外)。 $R_p$ 枯落物在森林草原区和森林区比在草原区吸水更多且更快、蒸发速率也更低, $R_p$

$\times P_i$ 枯落物在森林草原区吸水最多,蒸发最慢。表明吸水过程和蒸发过程受森林类型和植被带影响,反映枯落物在不同生态环境及不同刺槐林间,持水能力发生明显变化。可能与不同区域和不同刺槐林枯落物的分解程度<sup>[30]</sup>、枯落物组分<sup>[31]</sup>和化学成分等<sup>[22]</sup>相关。此外,吸水过程持水率的快速变化主要发生在初始的0~2 h,而蒸发过程持水率的快速变化集中在初始0~6 h,时间非对称性,表征枯落物对降雨的快速拦截及涵养水源、淡化洪峰的能力。

### 3.3 解耦黄土高原环境因子影响枯落物持水能力机制

气候控制区域水热条件,地形则决定其坡面尺度的重新分配,二者共同造就的局部水热环境,不仅影响植被特征控制枯落物产量,还影响最大持水率。除植被带水热条件对枯落物蓄积量的影响之外,相关性结果表明,阴坡相较阳坡枯落物蓄积量明显增加,坡度越缓、海拔越低枯落物蓄积量越高,因为局部水热条件好植物生产力高,与部分研究<sup>[32]</sup>一致。有研究<sup>[25]</sup>表明,降雨量和气温是控制枯落物前中期分解速率的关键因子从而影响枯落物持水率。然而,PLS-SEM模型中枯落物持水率与MAP和MAT并不显著相关,是因为水热条件通过影响区域内植被特征调控枯落物组分<sup>[33]</sup>、化学成分<sup>[34]</sup>进而影响枯落物持水率,弱化枯落物持水率对降水和气温的直接响应关系(图8)。地形对枯落物持水率的直接影响主要表现为通过调控分解速率,进而影响半分解层与分解层的相对比例。相关研究<sup>[35-36]</sup>指出,坡度越大、海拔越高枯落物分解速率越慢,从而导致半分解层比例较高。PLS-SEM结果还表明,枯落物蓄积量对枯落物持水能力的贡献显著大于枯落物持水率,是由于相比于枯落物的性质,其蓄积量对水热因子更敏感。总的来说,气候、地形和植被共同影响枯落物的数量和自身质量,即蓄积量和持水率,从而调控枯落物层的持水能力。

尽管考虑到水热条件对枯落物分解情况的影响,但由于缺乏对分解情况的直接测量,结构方程中未包含气候和地形通过分解作用影响枯落物蓄积量的路径,限制了对枯落物持水能力的全面理解。因此,今后研究可着眼于刺槐林枯落物分解情况的区域性特征,进一步完善研究成果。

## 4 结论

黄土高原不同植被带刺槐林枯落物持水能力存在森林类型分异和区域差异。根据植被带平均值,在枯落物最大持水率方面,刺槐纯林( $R_p$ )在3个植被带均高于刺槐混交林, $R_p$ 以草原区(147.88%)最低,森林草原区(180.80%)和森林区(170.31%)相近且

更大,  $R_p \times P_i$  则以森林草原区(162.28%)最高, 草原区(140.64%)和森林区(141.60%)相近且更低。枯落物有效拦蓄量方面,  $R_p$  和  $R_p \times P_i$  均随年均降雨量和年均气温增大而增大, 且呈现草原区显著低于森林草原区和森林区的跳跃式下降。各植被带内最优森林类型存在差异, 草原区  $R_p$  (7.17 t/hm<sup>2</sup>) 最高, 森林草原区  $R_p \times P_o$  (16.27 t/hm<sup>2</sup>) 最高, 森林区  $R_p \times P_i$  (17.45 t/hm<sup>2</sup>) 最高。吸水和蒸发过程持水率变化分别符合对数增长和负指数衰减函数, 且变化特征受到植被带和刺槐林类型的影响。PLS-SEM 结果表明, 气候(降雨、气温)和地形(海拔、坡度、坡向)通过显著影响植被生长状况和群落特征, 与植被共同影响枯落物的蓄积量和持水率, 进而调控枯落物层持水能力, 地形还可直接影响枯落物持水率, 且相较于枯落物持水率, 蓄积量对持水能力的影响更大。尽管本研究全面分析黄土高原刺槐林枯落物持水能力, 但样地缺乏枯落物分解数据, 制约了对枯落物持水能力的完整认知。未来可探究环境因子对枯落物分层及分解速率的影响, 以提升区域森林生态系统水文功能的理解。总之, 本研究揭示黄土高原刺槐林枯落物水源涵养功能的区域性特征及其对植被、气候和地形的响应机制, 可为黄土高原不同植被带水源涵养林的林分配置及造林工程提供科学性指导, 也为区域尺度的森林水源涵养功能评估提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 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 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.
- [2] 王佑民. 中国林地枯落物持水保土作用研究概况[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 108-113.  
Wang Youmin. Summary of researches on water and soil conservative function of litter in forestland in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 108-113.
- [3] 朱金兆, 刘建军, 朱清科, 等. 森林凋落物层水文生态功能研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5): 30-34.  
Zhu Jinzhao, Liu Jianjun, Zhu Qingke, et al. Hydro-ecological functions of forest litter layers[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5): 30-34.
- [4] 申卫军, 彭少麟, 周国逸, 等. 马占相思(*Acacia mangium*)与湿地松(*Pinus elliotii*)人工林枯落物层的水文生态功能[J]. 生态学报, 2001, 21(5): 846-850.  
Shen Weijun, Peng Shaolin, Zhou Guoyi, et al. Ecohydrological functions of litter in man-made *Acacia mangium* and *Pinus elliotii* plantations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(5): 846-850.
- [5] 王士永, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京山区主要人工林枯落物水文效应[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 42-47.  
Wang Shiyong, Yu Xinxiao, Jia Guodong, et al. Hydrological effects of forest litters of different forests in Beijing mountainous area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(5): 42-47.
- [6] 贺万鹏, 周晓雷, 解婷婷, 等. 青藏高原东北边缘云杉属-冷杉属林火烧迹地枯落物持水特征[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 204-210.  
He Wanpeng, Zhou Xiaolei, Xie Tingting, et al. Water retention characteristics of litter in fire-burned land of spruce and abies forests on the northeastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 204-210.
- [7] 贺宇, 丁国栋, 臧荫桐, 等. 燕山山地典型森林枯落物持水特性[J]. 四川农业大学学报, 2012, 30(2): 161-166.  
He Yu, Ding Guodong, Zang Yintong, et al. Study on water-holding characteristics of typical forest litter in Yan-shan Mountain[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2012, 30(2): 161-166.
- [8] 刘婧雯, 程唱, 邹星辰, 等. 高寒区不同密度白桦天然林枯落物层与土壤层水文效应[J]. 林业科学研究, 2025, 38(2): 156-164.  
Liu Jingwen, Cheng Chang, Zou Xingchen, et al. Hydrological effects of litter layer and soil layer in birch natural forest with different densities in alpine region[J]. Forest Research, 2025, 38(2): 156-164.
- [9] 邓慧华, 林晗, 郑义文, 等. 林分改造后的水土保持林地土壤的持水性能[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 9-15.  
Deng Huihua, Lin Han, Zheng Yiwen, et al. Soil water-holding capacity of soil and water conservation forest land after stand reconstruction[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 9-15.
- [10] Zhang Lili, Vivek Y, Zhu Hengchen, et al. Climate drivers of litterfall biomass dynamics in three types of forest stands on the Loess Plateau[J]. Ecological Indicators, 2024, 163: e112088.
- [11] 张艺斐, 王兴, 潘海珠, 等. 中国北方荒漠草原长期围栏封育恢复效应及其环境依赖性[J]. 生态学报, 2025, 45(17): 8529-8543.  
Zhang Yifei, Wang Xing, Pan Haizhu, et al. Long-term enclosure restoration effects and their environmental dependencies in desert steppes of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): 8529-8543.
- [12] 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 Qiang, Zhou Daowei, Chen Xiaoying. The accumulation, decomposition and ecological effects of above-ground litter in terrestrial ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(14): 3807-3819.
- [13] 李学斌, 陈林, 张硕新, 等. 围封条件下荒漠草原4种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态[J]. *生态学报*, 2012, 32(20): 6575-6583.
- Li Xuebin, Chen Lin, Zhang Shuoxin, et al. Litter amount and its dynamic change of four typical plant community under the fenced condition in desert steppe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(20): 6575-6583.
- [14] 巩晨. 黄土高原不同造林模式生态功能特征及权衡/协同效应[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2022.
- Gong Chen. Characteristics and trade-off/synergy effects of ecological functions under different afforestation patterns on China's Loess Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences), 2022.
- [15] 刘美君, 吕金林, 陈秋文, 等. 黄土丘陵区两典型造林树种生长季树干直径微变化动态及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1673-1680.
- Liu Meijun, Lü Jinlin, Chen Qiuwen, et al. Dynamics and influencing factors of stem diameter micro-variations during the growing season in two typical forestation species in the loess hilly region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1673-1680.
- [16] 栾莉莉, 张光辉, 孙龙, 等. 黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6): 48-53.
- Luan Lili, Zhang Guanghui, Sun Long, et al. Spatial variation of typical plant litters in the Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(6): 48-53.
- [17] Xu Hongwei, Qu Qing, Chen Yanhua, et al. Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after cropland abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2021, 196: e104812.
- [18] 杜宁宁. 不同降水条件下叶凋落物分解中碳氮动态的双同位素示踪研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- Du Ningning. Dual isotopes tracing carbon and nitrogen dynamics during leaf litter decomposition under different precipitation regimes[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [19] 靳欣, 徐洁, 白坤栋, 等. 从水力结构比较3种共存木本植物的抗旱策略[J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(6): 135-141.
- Jin Xin, Xu Jie, Bai Kundong, et al. Comparison of drought strategies of three co-existing woody plants by their hydraulic structures[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(6): 135-141.
- [20] 严昌荣, 韩兴国, 陈灵芝. 北京山区落叶阔叶林优势种叶片特点及其生理生态特性[J]. *生态学报*, 2000, 20(1): 53-60.
- Yan Changrong, Han Xingguo, Chen Lingzhi. The relationship between the ecophysiological feature and leaf characteristics of some woody plants in Beijing mountain zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 53-60.
- [21] 叶小曼, 魏天兴, 于欢, 等. 黄土丘陵区典型森林生态系统碳储量及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2025, 44(5): 1409-1416.
- Ye Xiaoman, Wei Tianxing, Yu Huan, et al. Carbon storage and influencing factors of typical forest ecosystems in loess hilly region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(5): 1409-1416.
- [22] 胡承海, 兰健. 辽西地区树种叶片结构的分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 1993, 24(4): 269-273.
- Hu Chenghai, Lan Jian. Analysis of the anatomical structure of tree leaves from western Liaoning[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1993, 24(4): 269-273.
- [23] 臧雪晴, 王狮狮, 怀志文, 等. 焦作龙翔山植物群落地表凋落物及其影响因素[J]. *林草资源研究*, 2024(3): 121-129.
- Zang Xueqing, Wang Shishi, Huai Zhiwen, et al. Surface litter of the plant community in Jiaozuo Longxiang Mountain and its influencing factors[J]. *Forest and Grassland Resources Research*, 2024(3): 121-129.
- [24] 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.
- [25] Zhao Yuedan, Lu Nan, Shi Hao, et al. Patterns and driving factors of litter decomposition rates in global dryland ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31: e70025.
- [26] Wang Shumei, Luan Junwei, Li Siyu, et al. Litter quality and decomposer complexity co-drive effect of drought on decomposition[J]. *Forest Ecosystems*, 2024, 11: e100194.
- [27] 谢尧, 赵琼, 李炎真, 等. 干旱化对樟子松固沙林氮磷循环的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3593-3600.
- Xie Yao, Zhao Qiong, Li Yanzhen, et al. Effects of aridification on nitrogen and phosphorus cycles in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand-fixation plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12): 3593-3600.
- [28] 程云霞, 谭占明, 郭玲, 等. 不同干旱胁迫对野生山杏和人工栽培山杏品种根茎叶解剖结构的影响[J]. *新疆农业科学*, 2024, 61(11): 2684-2692.



- Cheng Yunxia, Tan Zhanming, Guo Ling, et al. Effects of different drought stresses on anatomical structure of roots, stems and leaves of two apricot varieties[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(11): 2684-2692.
- [29] Chen Suyi, Huang Yanping, Yan Mei, et al. Differential water conservation capacity in broadleaved and mixed forest restoration in latosol soil-eroded region, Hainan Province, China[J]. Plants, 2024, 13(5): e694.
- [30] Tan Bo, Yin Rui, Zhang Jian, et al. Temperature and moisture modulate the contribution of soil fauna to litter decomposition *via* different pathways [J]. Ecosystems, 2021, 24(5): 1142-1156.
- [31] 张远东, 刘彦春, 顾峰雪, 等. 川西亚高山五种主要森林类型凋落物组成及动态[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 502-508. Zhang Yuandong, Liu Yanchun, Gu Fengxue, et al. Litter composition and its dynamic in five main forest types in subalpine areas of west Sichuan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 502-508.
- [32] 许小明, 易海杰, 何亮, 等. 黄土高原地区林地枯枝落叶层水土保持效应研究进展[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 415-421. Xu Xiaoming, Yi Haijie, He Liang, et al. Research advances on water and soil conservation effects of forest litter layer on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 415-421.
- [33] Liu Xiaodong, Feng Yingjie, Zhao Xinyu, et al. Climatic drivers of litterfall production and its components in two subtropical forests in South China: A 14-year observation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 344: e109798.
- [34] Zhao Qingzhou, Freschet G T, Tao Tingting, et al. Resolving the intricate effects of multiple global change drivers on root litter decomposition [J]. Global Change Biology, 2024, 30(10): e17547.
- [35] 陈涛, 齐实, 孙保平. 川东山地马尾松林枯落物和土壤层持水能力特性[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(3): 742-750. Chen Tao, Qi Shi, Sun Baoping. Water-holding capacity of litter and soil layers of *Pinus massoniana* forest in the mountainous areas of eastern Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(3): 742-750.
- [36] 何淑勤, 宫渊波, 郑子成. 岷江上游不同植被恢复模式枯落物层水源涵养能力[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9): 1986-1994. He Shuqin, Gong Yuanbo, Zheng Zicheng. Water conservation capacity of litters in different vegetation restoration patterns in the upper reaches of Minjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(9): 1986-1994.
- 上接第 172 页
- [33] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 等. 黄土高原植被变化与恢复潜力预测[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 205-212. Zhao Guangju, Mu Xingmin, Tian Peng, et al. Prediction of vegetation variation and vegetation restoration potential in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 205-212.
- [34] 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.
- [35] 王宁, 毕华兴, 郭孟霞, 等. 晋西黄土残塬沟壑区刺槐人工林土壤水分植被承载力研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 213-219. Wang Ning, Bi Huaxing, Guo Mengxia, et al. Study on soil water vegetation carrying capacity of *Robinia pseudo-acacia* plantation in the loess gully area of western Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 213-219.
- [36] Zhang Shulei, Yang Dawen, Yang Yuting, et al. Excessive afforestation and soil drying on China's Loess Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018.
- [37] 曹军胜, 朱清科, 薛智德. 黄土高原地区土地植被承载力与植被生态恢复建设[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(1): 39-43. Cao Junsheng, Zhu Qingke, Xue Zhide. Vegetation carrying capacity of land and vegetation restoration and construction in the Loess Plateau region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(1): 39-43.
- [38] 阿拉木萨, 慈龙骏, 杨晓晖, 等. 科尔沁沙地不同密度小叶锦鸡儿灌丛水量平衡研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 31-35. ALamusa, Ci Longjun, Yang Xiaohui, et al. Water balance of different density artificial *Caragana microphylla* shrubs in Horqin sand land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(1): 31-35.
- [39] 刘新平, 赵哈林, 何玉惠, 等. 生长季流动沙地水量平衡研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 663-667. Liu Xinping, Zhao Halin, He Yuhui, et al. Water balance of mobile sandy land during the growing season[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(4): 663-667.