

黄土丘陵区混交人工林林下草本层植被 特征及其对草本截留的影响

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

(1. 西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 旨在揭示黄土丘陵区混交人工林林下草本层植物的种类组成、群落结构及生长特征, 探讨草本植物在林下对水分截留的影响, 为该区域生态恢复及未来森林管理提供理论依据。[方法] 通过野外调查与室内分析相结合, 以陕西省吴起县为研究区, 选择刺槐纯林作为对照组, 研究 5 种不同的混交人工林模式(刺槐×山杏、刺槐×山桃、刺槐×油松、刺槐×沙棘、刺槐×紫穗槐)的林下草本层植被特征及其对草本截留的影响。[结果] 1) 与刺槐纯林相比, 混交人工林提高林下草本物种的丰富度, 其中刺槐×油松的 Margalef 丰富度指数最高; 混交降低林下草本物种的均匀度, 其中刺槐×油松的 Pielou 均匀度指数最低, 不同混交模式下林下草本植被的物种丰富度显著增加, 但物种均匀度有所下降。2) 在草本层盖度和叶面积指数方面, 不同混交模式表现出显著差异, 混交林的草本截留能力普遍低于刺槐纯林, 尤其是刺槐与油松混交林的草本截留能力最低。3) 草本层盖度与截留量呈显著正相关, 盖度越高, 截留能力越强, 反映出较大的植被覆盖能够提供更有效的雨水拦截功能。[结论] 混交林模式在提高草本物种多样性方面具有优势, 但对水土保持能力的影响存在废水效应, 尤其是在草本层的雨水截留能力方面。刺槐纯林在截留雨水方面表现出更高的潜力, 为人工林的水土保持功能提供重要的管理参考。

关键词: 混交人工林; 刺槐; 草本层截留; 截留能力; 植被特征

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0163-09

Characteristics of Understory Herbaceous Vegetation in Mixed Plantations and Their Effects on Herbaceous Interception in Loess Hilly Areas

LI Qian¹, SUN Hanyu², YANG Yanfen^{1,2,3}, DENG HanXiao¹, CAO Zetao³, BIAN He²

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study was to reveal the species composition, community structure, and growth characteristics of herbaceous plants in the understory of mixed plantations in loess hilly areas, and to explore the impact of herbaceous plants on water interception in the understory, in order to provide a theoretical basis for ecological restoration and future forest management in the region. [Methods] A combination of field surveys and laboratory analysis was conducted in Wuqi County, Shaanxi Province. A pure *Robinia pseudoacacia* forest was selected as the control group to investigate the vegetation characteristics of the herbaceous layer and their effects on herbaceous interception under five different mixed plantation models (*R. pseudoacacia*×*Armeniaca sibirica*, *R. pseudoacacia*×*Prunus mongolica*, *R. pseudoacacia*×*Pinus tabulaeformis*, *R. pseudoacacia*×*Hippophae rhamnoides*, *R. pseudoacacia*×*Caragana*

收稿日期: 2024-11-07

修回日期: 2024-12-30

录用日期: 2025-01-02

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-03-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(42271042, 42377352); 中国科学院“西部之光”西部青年学者 A 类项目(XAB2022YW03)

第一作者: 李倩(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态水文过程研究。E-mail: 1493114322@qq.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

http://stbxb.alljournal.com.cn

korshinskii). [Results] 1) Compared to pure *R. pseudoacacia* forest, mixed plantations significantly increased the species richness of understory herbaceous plants. The *R. pseudoacacia* × *P. tabuliformis* mixed plantation displayed the highest Margalef richness index. However, mixed plantations reduced the species evenness of understory herbaceous plants, with the *R. pseudoacacia* × *P. tabuliformis* mixed plantation showing the lowest Pielou evenness index. Different mixed plantations substantially increased species richness but slightly decreased species evenness. 2) Coverage and leaf area index (LAI) of the herbaceous layer varied significantly among different mixed plantation models. The herbaceous interception capacity of mixed plantations was generally lower than that of pure *R. pseudoacacia* plantation, with the *R. pseudoacacia* × *P. tabuliformis* mixed plantation showing the lowest interception capacity. 3) A significant positive correlation between herbaceous layer coverage and interception capacity was found, indicating that higher coverage provides a more effective rainwater interception function. [Conclusion] While mixed plantation models improve the species diversity of understory vegetation, they may have a slight negative effect on the soil and water conservation capacity of the herbaceous layer, particularly in terms of rainwater interception by the herbaceous layer. Pure *R. pseudoacacia* plantations, in contrast, exhibit greater potential for rainwater interception, offering important management insights for the soil and water conservation functions of plantations.

Keywords: mixed plantation; *Robinia pseudoacacia* plantation; herbaceous layer interception; interception capacity; vegetation characteristics

Received: 2024-11-07

Revised: 2024-12-30

Accepted: 2025-01-02

Online(www.cnki.net): 2025-03-27

刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)属豆科落叶乔木,因其在木材、饲料、蜂蜜等多方面的广泛应用,以及在碳固定、土壤稳定和生态恢复等方面的关键作用而备受关注,并且由于刺槐具备快速生长和耐贫瘠的特性,使其成为黄土高原干旱及半干旱地区植被恢复的重要人工林树种之一^[1-2]。草本层植物因其生态位较小,对环境变化具有较高的敏感性,常被用作评估生态系统稳定性和功能恢复的重要指标,因此,分析刺槐人工林中草本层植物物种组成有助于揭示该区域植物多样性和生态系统功能的重要性^[3-4]。物种多样性代表生物多样性在物种层面的表现,揭示各物种在生态系统对环境资源的利用效能;而生物量则描述单位面积内存在的有机物质,反映不同生物在生态系统对有机物的占比^[5]。通过分析人工林下草本层植被的物种组成、生物量、生长状态等特征,有助于揭示物种在群落中的重要作用,从而为评价人工种植园地生态系统的生物多样性、稳定性与功能性提供依据^[6]。

已有研究^[7-8]表明,光照、湿度等生态因素对草本植物的物种多样性和生物量具有显著影响,同时林分类型作为一个关键因素,对草本植物的物种多样性和生物量产生重要影响。林下生长的草本层植被主要分为混交林和纯林,混交林在促进林下植物的生长与更新方面效果较好,导致 2 种林分类型在

物种结构、生物多样性及地上生物量方面表现出差异,因此,探讨不同林分类型对林下草本层植物生态指标的影响对评估人工林的合理管理有重要意义。

截留能力是评估刺槐林下草层生态功能的重要指标,指生态系统或物体在面临外部物质(如水分、营养、污染物等)时能够吸收、储存或阻止其流失的能力,该指标受到多种因素的影响,如植被盖度、物种组成、叶面积指数(LAI)和草本层的物理结构等。目前大多数关于截留能力的研究主要集中在单一物种或单一林种的草本层^[9],而对混交林分类型的研究主要聚焦于混交模式中枯落物的蓄积特征、水文效应和土壤理化性质^[10-11],缺乏对不同混交模式下草本层物种多样性与截留能力之间关系的深入探讨,对地表草本植被的研究大多集中于其生物多样性,较少涉及其截留特性。因此,本文以陕西省吴起县黄土丘陵区人工刺槐林及其混交林下草本层植物为研究对象,分析林下植物组成、植物群落多样性、草本层盖度和叶面积指数等指标与草本层截留的相关关系,旨在总结草本层各生态指标对截留能力的影响机制,为人工刺槐林的经营管理和植被恢复及水土保持的建设与恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究设在陕西省延安市吴起县(36°33′33″~

37°24'27"N, 107°38'57"~108°32'49"E)开展。吴起县地处水土流失交错地带,是北洛河与无定河流域的上游地区,地理上属于黄土高原的中部,海拔1 233~1 600 m,总面积3 791.5 km²。地貌属于黄土丘陵沟壑区,大部分地表被黄土覆盖,土壤绝大多数为黄绵土,占总面积的97.6%。吴起县属暖温带半干旱大陆性季风气候。该研究区多年平均降水量为466.36 mm,植被类型多样,自1998年全县实施封山禁牧和退耕还林(草)政策以来,林草盖度显著增加,主要包括刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)、山杏(*Armeniaca sibirica* L.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、杠柳(*Periploca sepium* Bunge)、铁杆蒿(*Artemisia vestita* Wall. ex Bess.)、赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvelev)和针茅(*Stipa capillata* L.)等植被。

1.2 样地设置

通过林业局造林技术资料查阅及实地调研,以代表性和典型性为原则,选取吴起县2000年左右营造和培育的刺槐混交林(林龄为22~23 a),确保选定样地能够覆盖吴起县主要植被类型及特征、地理位置相对集中、立地条件相似(土壤类型、坡向、坡度等环境条件保持一致)的5种混交类型的刺槐林为研究对象(刺槐×山杏、刺槐×山桃、刺槐×油松、刺槐×沙棘、刺槐×紫穗槐),并以刺槐纯林作为对照。人工林营造时混交比为1:1,株行距为2 m×2 m,样地确定后,开展样地基本情况调查。

1.3 草本层调查与计算

对于林下草本层,共布置6块样地(刺槐×山杏、刺槐×山桃、刺槐×油松、刺槐×沙棘、刺槐×紫穗槐、刺槐纯林),每块样地沿坡面设置2条样线,2条样线相距10~15 m,每条样线以3~4 m为间距进行采样,每个样地共设置20个1 m×1 m的草本样方(当坡度变化>5°,适当加密采样点),采样区域中有6个样方位于斜坡上部,坡中坡度变化大,因此,设置8个草本样方,剩余6个样方布置于坡下,调查样线见图1。对每个草本样方进行详细的生态调查,记录其中的物种种类、株(丛)数、高度、盖度等关键信息。同时,计算样方内草本的总盖度和叶面积指数。测量完成后,对植物进行烘干处理,以便计算地上生物量。为评估林下植被群落的结构和物种多样性,采用物种重要值和丰富度指数作为量化指标。

1.3.1 基础指标 应用LAI Smart软件测定样地林冠层及林下草本层的叶面积,利用冠层间隙率与LAI之间的比尔-朗伯定律关系模型计算LAI^[12]。为降低太阳直射对LAI测量的影响,选择早晨、傍晚或阴天时段进行拍摄,在测量时确保前置摄像头朝上,并当

顶角为±2°时启动测量功能,LAI的测量点布置与草本样方保持一致,每个样地进行20次测量。

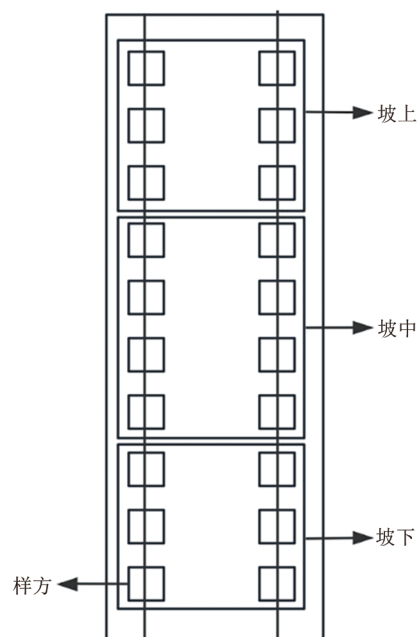


图1 混交林调查样线设置

Fig. 1 Setting of the sampling transects in mixed plantations

1.3.2 物种多样性指标 研究采用 α 多样性相关指数计算样地内各物种的重要值,如Margalef指数(M_a)、Shannon-Wiener指数(H)、Simpson指数(D)、Pielou指数(E_{pi}),林下草本群落的多样性特征通过丰富度、多样性指数和均匀度来表示,计算Jaccard群落相似系数,探究各混交类型林下草本群落的相似性^[13]。

$$IV = \frac{(RD + RP + RG)}{3} \quad (1)$$

$$RD = \frac{z}{Z} \times 100\% \quad (2)$$

$$RP = \frac{p}{P} \times 100\% \quad (3)$$

$$RG = \frac{g}{G} \times 100\% \quad (4)$$

式中:IV为重要度;RD为相对多度;RP为相对频度;RG为相对盖度; z 为某种物种的株数; Z 为所有种的总株数; p 为某物的频数; P 为所有种的总频数; g 为某物种的盖度; G 为所有种的总盖度。

$$\text{丰富度指数: } M = (S - 1) / \ln N \quad (5)$$

式中: M 为丰富度指数; S 为群落物种数; N 为样方内所有物种个体总数量。

$$\text{多样性指数: } H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (6)$$

式中: H 为Shannon-Wiener指数; P_i 为种 i 的重要值; S 为群落物种数。

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (7)$$

式中: D 为Simpson指数; P_i 为种 i 的重要值; S 为群落

物种数。

均匀度指数：
$$Epi = H / \ln S \tag{8}$$

式中： Epi 为Pielou指数； H 为Shannon-Wiener指数； S 为群落物种数。

群落相似系数：
$$J = w / (a + b - w) \tag{9}$$

式中： J 为Jaccard群落相似系数； S 为群落物种数； N 为样方内所有物种个体总数量； a 为群落A中的物种总数； b 为群落B中的物种总数； w 为群落A和B中的共同物种数。

1.4 草本层的截留特性

采用“简易吸水法”确定草本层潜在的截留能力，将收集的草本带回实验室后快速称重，然后浸入水中30 min，轻轻捞出，待草本上水珠不再下滴时称重，2次重量相减为草本层吸持水分量；用草本吸持水分量除以枝叶吸水前重，即为枝叶截留率，然后与单位面积生物量换算后可得草本层截留量。

草本层截流率 R_l 的计算公式为：

$$R_l = \frac{W_a - W_b}{W_b} \times 100\% \tag{10}$$

式中： W_a 为枝叶吸水后重，g； W_b 为枝叶吸水前重，g。

草本层截留量 M_l 计算公式为：

$$M_l = 0.001 \times R_l \times \frac{B}{A} \tag{11}$$

式中： M_l 为最大截留量，mm； B 为样方内枝叶生物量，g； A 为样方面积，m²。

1.5 数据处理

获得刺槐混交林样地基本信息见表1。试验数据采用Excel 2019和SPSS 25.0软件进行统计分析，通过Python语言、Pearson相关系数、双变量分析等对各指标间的相关性进行分析，使用曲线估计确定散点图拟合函数类型及相关参数，并用Origin 2021b软件绘制图表。

表 1 刺槐混交林样地基本信息

Table 1 Basic information of the sampling plots of Robinia pseudoacacia mixed plantations

混交类型	树种组成	林分密度/ (株·hm ⁻²)	树高/m	胸径/m	冠幅/m	林龄/ a	坡向	坡度/ (°)	经纬度	平均海拔/m	林下草本
刺槐×山杏	刺槐 山杏	710 290	7.58±1.65 7.42±1.73	10.53±3.63 19.76±1.54	3.56±1.10 5.35±1.61	23	东	16	36°55′41″N, 108°08′12″E	1 480.30	茜草、赖草
刺槐×山桃	刺槐 山桃	1 366 667	8.12±1.65 4.06±0.53	10.23±3.33 18.04±5.43	4.41±0.82 5.23±1.10	23	东	24	36°55′34″N, 108°07′59″E	1 510.15	长芒草、拟南芥、 赖草
刺槐×沙棘	刺槐 沙棘	833 667	8.56±1.51 3.30±0.75	11.88±3.11 8.95±2.63	4.58±1.29 2.40±0.51	23	西北	18	36°55′42″N, 108°09′00″E	1 506.49	赖草、地梢瓜、 小苦葵
刺槐×紫穗槐	刺槐 紫穗槐	1 633 300	11.50±2.36 1.47±0.38	13.01±5.76 9.39±9.61	4.54±1.36 1.17±0.52	23	西	11	36°55′28″N, 108°07′52″E	1 494.67	赖草、长芒草
刺槐×油松	刺槐 油松	1 300 800	7.54±0.93 6.38±1.03	8.86±1.59 14.08±2.42	3.40±0.60 4.48±0.78	23	北	9	36°55′41″N, 108°09′31″E	1 490.25	赖草、刺儿菜、 地梢瓜
刺槐纯林	刺槐	2 433	8.08±1.24	10.09±3.11	3.05±1.02	23	东南	10	36°53′28″N, 108°13′01″E	1 505.50	赖草、早熟禾、薊

注：表中数据为平均值±标准差；刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)；山杏(*Armeniaca sibirica* L.)；山桃(*Prunus davidiana* (Carrière) Franch.)；沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)；紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.)；油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)；茜草(*Rubia cordifolia* L.)；赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvelev)；长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)；拟南芥(*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.)；地梢瓜(*Cynanchum thesioides* (Freyn) K. Schum.)；小苦葵(*Ixeridium dentatum* (Thunb.) Tzvelev)；刺儿菜(*Cirsium arvense* var. *integrifolium* Wimm. & Grab.)；早熟禾(*Poa annua* L.)；薊(*Cirsium japonicum* Fisch. ex DC.)。下同。

2 结果与分析

2.1 混交人工林林下草本层物种组成及重要值

图2为各类型样地草本层植物的重要值，在5种刺槐人工林及刺槐纯林的草本层植物中，共记录到39种植物，归属于16科33属。其中，菊科植物数量最多，占总物种数的44%；其次为禾本科和夹竹桃科，分别占总物种数的13%和7%。在不同植被类型下的刺槐林草本层植物群落中，观察到植物种类及其分布情况：在刺槐纯林下，共记录18种草本植物，分属8科18属，赖草是群落中的优势品种，而地茎瓜

和早熟禾是主要伴生品种。刺槐与山杏混交林下共记录12种草本植物，涵盖6科11属，赖草为优势种，地梢瓜为主要伴生种；在刺槐与山桃的混交林下，记录8种草本植物，分属6科8属，以长芒草为优势种，伴生种包括拟南芥和赖草；刺槐与紫穗槐混交林下记录7种草本植物，涉及5科7属，赖草为优势种，伴生种包括长芒草、萝藦和早熟禾；刺槐与油松混交林下共记录22种草本植物，隶属于11科18属，优势种为赖草，主要伴生种为刺儿菜、地梢瓜和早熟禾；刺槐与沙棘混交林下共记录16种草本植物，隶属于8科15属，优势种为赖草，主要伴生种为地梢瓜和早熟禾。

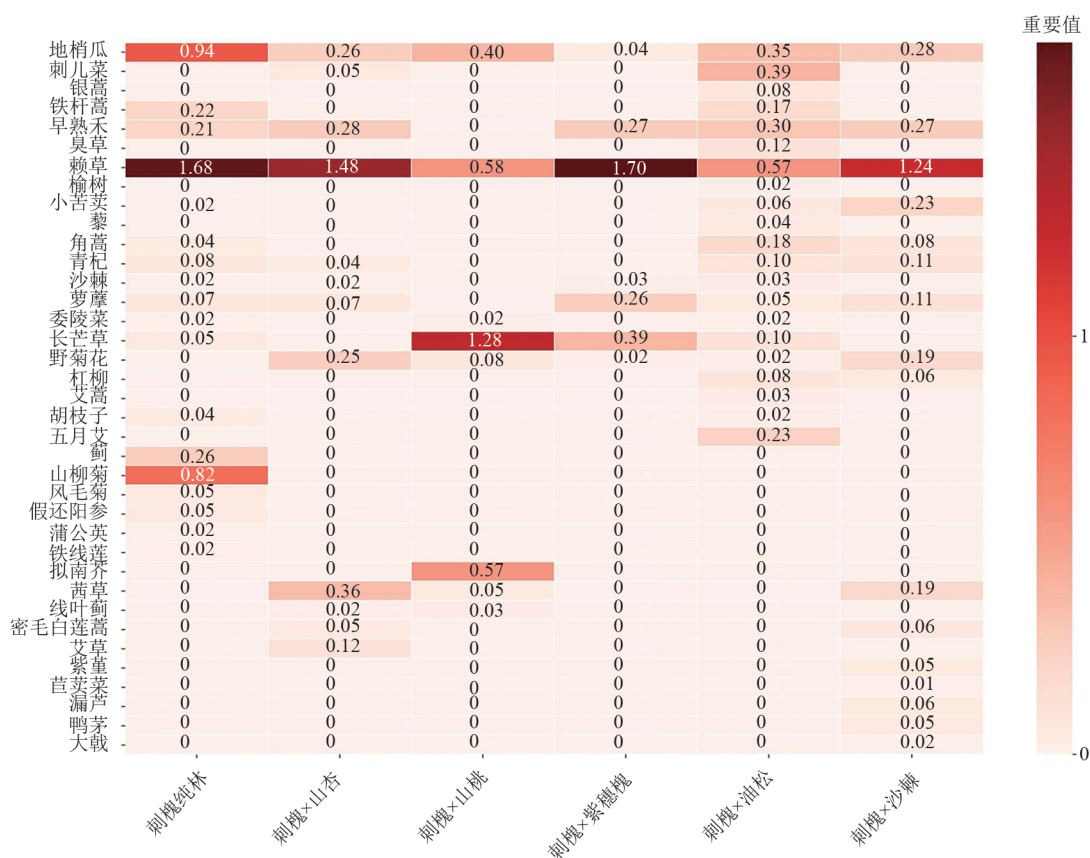


图 2 各类型样地草本层植物的重要值热度图

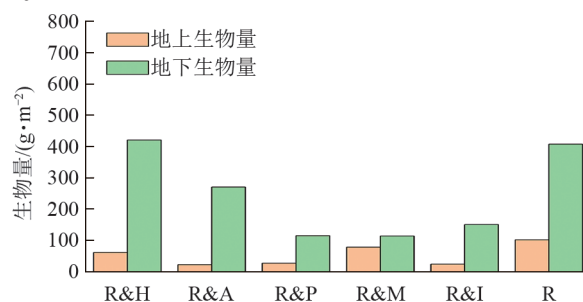
Fig. 2 Heatmap of the importance values of herbaceous plants in different types of plots

在草本层植物种类的数量上,刺槐×油松混交林、刺槐纯林、刺槐×沙棘混交林、刺槐×山杏混交林、刺槐×山桃混交林、刺槐×紫穗槐混交林依次递减,但不同种类的植物在地上生物量上的差异不明显^[13]。由图3可知,各地上草本植物地下生物量存在显著差异,特别是在刺槐纯林与刺槐山桃混合林及刺槐山杏与其混交的林下,草本植物地下生物量明显不同。刺槐×山杏与刺槐×山桃的混合型林下植物在储藏营养成分时,展现出显著差异性。

2.2 混交人工林林下草本层盖度与叶面积指数

由图4可知,不同混交类型下草本盖度、叶面积指数分别为10%~78%和0.562~3.064。盖度在不同混交类型之间存在显著差异,刺槐纯林最大(53%),显著高于刺槐×山杏、刺槐×山桃和刺槐×油松($p<0.01$),与刺槐×沙棘、刺槐×紫穗槐无显著性差异,盖度在不同混交类型下依次为刺槐纯林>刺槐×紫穗槐>刺槐×沙棘>刺槐×油松>刺槐×山桃>刺槐×山杏。叶面积指数在不同混交类型之间也存在显著差异,刺槐纯林最大(1.980),显著高于刺槐×山杏、刺槐×山桃和刺槐×油松($p<0.01$),与刺槐×沙棘、刺槐×紫穗槐无显著性差异,叶面积指数在不同混交类型下依次为刺槐纯

林>刺槐×沙棘>刺槐×紫穗槐>刺槐×油松>刺槐×山桃>刺槐×山杏。本研究发现,不同混交类型草本层盖度与其叶面积指数具有较强的相关性,现对其进行拟合发现,叶面积指数为盖度的线性函数($y=0.35+3.1x, R^2=0.81$)。



注:R&A为刺槐×山杏;R&P为刺槐×山桃;R&H为刺槐×沙棘;R&M为刺槐×紫穗槐;R&I为刺槐×油松;R为刺槐纯林。下同。

图 3 混交类型草本层的生物量

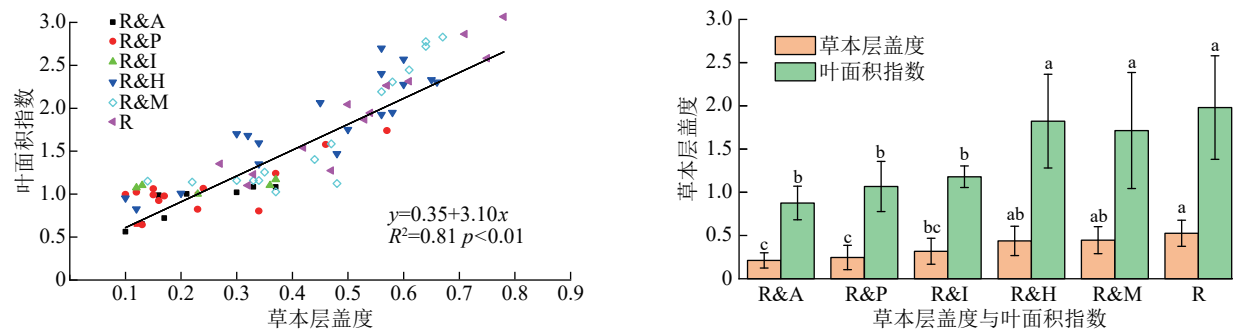
Fig. 3 Biomass of the herbaceous layers in different mixed plantations

2.3 混交人工林林下草本层物种多样性与生物量

2.3.1 混交人工林林下草本层物种多样性 由图5可知,刺槐×油松混交林物种丰富度为3.49,刺槐纯林样地的物种丰富度为2.46,刺槐×沙棘物种丰富度为

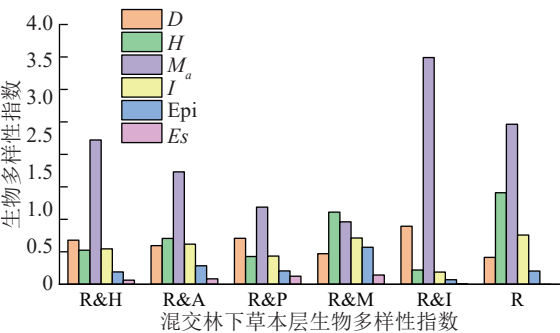
2.22, 刺槐×山杏混交林物种丰富度均值 1.73; 刺槐×山桃与刺槐×紫穗槐 2 种类型样地物种丰富度差别不大, 分别为 1.19 和 0.96; 刺槐与油松的混交林在物种丰富度方面高于刺槐纯林和刺槐与沙棘混交林, 但差异未达到显著水平; Pielou 均匀度指数 E_{pi} 和

Simpson 优势度指数 D 均显示出相似的变化趋势, 林地间的差异性较为明显; 刺槐×油松混交林物种 Shannon-Wiener 指数 H 均低于其他类型的样地。样地之间林下草本层群落的多样性差异并不显著, 但各样地的物种组成存在明显差异。



注: 图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 4 叶面积指数和草本层盖度
Fig. 4 Leaf area index and herbaceous layer coverage



注: D 为 Simpson 优势度指数; H 为 Shannon-Wiener 指数; M_a 为 Margalef 丰富度指数; I 为 Berger-Parker 优势度指数; E_{pi} 为 Pielou 均匀度指数; E_s 为 Sheldon 均匀性指数。下同。

图 5 林下草本物种多样性指数
Fig. 5 Understory herbaceous species diversity indices

2.3.2 混交人工林林下草本层生物量 在不同类型的样地中, 草本层植物的地上生物量依次为刺槐纯林 (101.13 g/m^2)>刺槐×紫穗槐 (77.90 g/m^2)>刺槐×沙棘混交林 (60.90 g/m^2)>刺槐×山桃混交林 (26.34 g/m^2)>刺槐×油松混交林 (23.29 g/m^2)>刺槐×山杏混交林 (21.73 g/m^2); 地下生物量为刺槐×沙棘混交林 (421.2 g/m^2)>刺槐纯林 (408.00 g/m^2)>刺槐×山杏混交林 (270.50 g/m^2)>刺槐×油松混交林 (150.20 g/m^2)>刺槐×山桃混交林 (114.40 g/m^2)>刺槐×紫穗槐 (113.40 g/m^2)。在不同样地中, 草本层植物的地面生物量差异不明显, 在不同类型的样地中, 草本层植物的地下生物量表现出显著的差异刺槐纯林的地下生物量与混交林相比, 显示出较为显著的差异。

2.3.3 不同林分草本层植物群落的相似性分析 对人工刺槐林不同混交类型, 林下草本植物群落相似性系数进行 K-均值聚类分析, 草本群落的划分标准为

相似性系数 0.26 和 0.32, 作为最终的聚类中心, 当群落的相似性系数低于 0.26 时, 指示群落的相似度较低; 而当相似性系数高于 0.32 时, 则表明群落的相似度较高。由表 2 可知, 刺槐与山杏混交林的草本群落与刺槐与山桃及刺槐与沙棘混交林的草本群落的相似性系数均 >0.32 , 表明它们之间存在较高的相似性; 刺槐与紫穗槐混交林的草本群落与刺槐纯林的草本群落的相似性系数也高于 0.32, 进一步验证二者之间的高度相似性; 刺槐山桃与刺槐油松、刺槐沙棘及刺槐纯林的林下草本群落相似性系数 <0.26 , 显示出较弱的相似性。表明不同混交类型的人工刺槐林林下草本群落在物种组成上存在差异, 特别是刺槐山桃的草本群落物种组成与其他混交类型相比差异较大。

表 2 不同混交类型草本层植被群落相似系数

混交类型	R&H	R&A	R&P	R&M	R&I	R
R&H	1.00					
R&A	0.47	1.00				
R&P	0.20	0.33	1.00			
R&M	0.28	0.46	0.36	1.00		
R&I	0.31	0.31	0.20	0.32	1.00	
R	0.26	0.25	0.18	0.32	0.43	1.00

2.3.4 林下草本层植物的 α 多样性及其植被特征与截留的相关性 图 6 为 α 多样性各指数的显著相关性。Shannon-Wiener 指数 (H) 与 Margalef 丰富度指数 (M_a) 存在显著正相关 ($p<0.05$), 与 Simpson 指数正相关关系则更为显著 ($p<0.01$), Pielou 均匀度指数与 Simpson 指数及 Shannon-Wiener 指数的正相关

同样达极显著水平($p<0.01$)。混交林下草本层植物的生物量与其多样性各指数之间有显著的相关性,地上与地下生物量存在显著正相关($p<0.05$),地下生物量与 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数及 Pielou 均匀度指数也表现出显著正相关性($p<0.05$)。

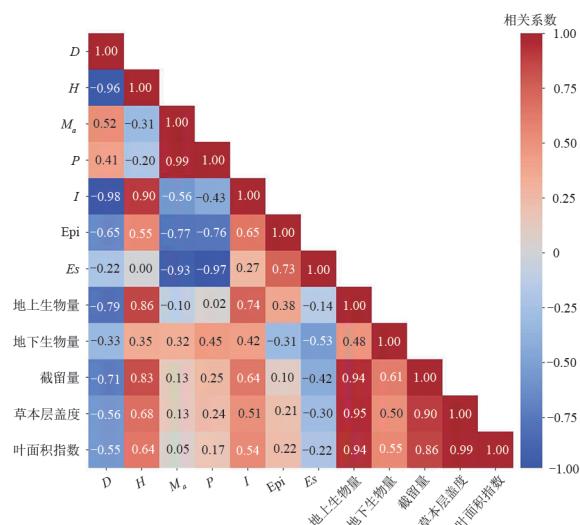


图6 林下草本层植物的植被特征与截留的相关性

Fig. 6 Correlations between understory herbaceous vegetation characteristics and interception

2.4 林下草本层截留特性

刺槐纯林的截留量达 18 mm, 显著高于其他类型(图 7), 刺槐×沙棘和刺槐×紫穗槐的截留量无显著差异, 显著高于刺槐×山杏、刺槐×山桃和刺槐×油松; 刺槐×山杏和刺槐×山桃的截留量无显著差异, 低于刺槐纯林和刺槐×沙棘/紫穗槐; 刺槐×油松的截留量最低, 与其他类型显著不同。刺槐作为耐旱、速生树种, 具有较好的截留能力, 其纯林在降水截留方面的高效性得到验证。混交林中不同植物种类的组合对截留量的影响表明, 不同植物之间的相互作用和竞争关系是影响草本层截留能力的重要因素。

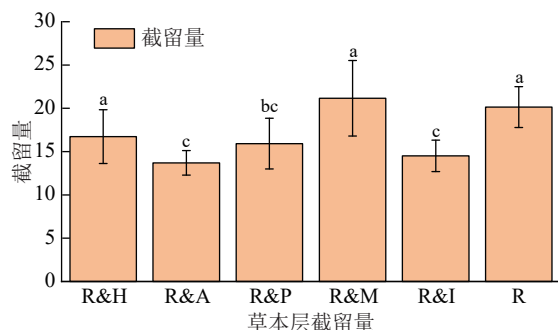


图7 草本层截留量

Fig. 7 Herbaceous layer interception

2.5 草本植被特征与截留的关系

由草本层植被特征与截留的相关性分析、生物量和草本层截留数据(图 8)可知, 刺槐纯林的生物量

最大, 其草本层截留量也最大, 刺槐×山杏、刺槐×山桃、刺槐×油松的地上生物量和截留量均无显著差异。本研究发现, 草本层的地上生物量与截留能力存在显著正相关, 地上生物量通过影响植物结构、植被盖度和生物量分配, 间接决定草本植物的截留能力。

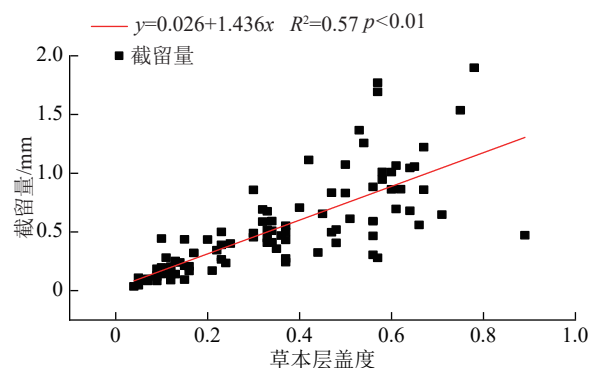


图8 草本层盖度与草本截留的关系

Fig. 8 The relationship between herbaceous layer coverage and interception capacity

由图 8 还可看出, 刺槐纯林的植被盖度最大且截留量最多, 同时, 随着盖度的降低, 草本层的截留量也随之降低。草本层截留量为 0.29~1.14 mm, 刺槐纯林最大, 显著高于其他混交类型; 刺槐×山杏草本层截留量最小, 显著低于刺槐×油松、刺槐×沙棘、刺槐×紫穗槐及刺槐纯林; 刺槐×紫穗槐与刺槐×沙棘草本层截留量之间无显著差异。草本层截留量在不同混交类型下依次为刺槐纯林>刺槐×紫穗槐>刺槐×沙棘>刺槐×油松>刺槐×山桃>刺槐×山杏。本研究发现, 草本层截留能力为草本层盖度的线性函数($y=0.026+1.436x$, $R^2=0.57$), 截留量随植被盖度的增加呈上升趋势, 即随着植被盖度的增大, 植被的截留量增加, 不同林地类型截留能力存在明显差异。

地上生物量与截留量呈极强正相关性, 地下生物量与截留量呈中等正相关, 草本层盖度与截留量呈极强正相关, 叶面积指数与截留量呈极强正相关。通过分析相关性指标, 可知地上生物量、草本层盖度和叶面积指数是影响截流量的主要正向因素, 而 Simpson 指数指标对截流量有显著负面影响。

3 讨论

3.1 混交林对林下植被多样性的影响

已有研究表明, 植物多样性在提升生态系统功能方面具有重要作用。LEUSCHNER 等^[14]研究表明, 混交林通过增加植物多样性, 改善群落结构, 增强生态系统的稳定性和抗逆性; FORRESTER 等^[15]研究表明, 不同树种的组合通过互补效应和资源利用效率的提高, 增强混交林的生态效益。本研究表明, 黄土丘陵区混交人工林显著提高林下草本层的

物种丰富度,但降低物种均匀度,虽然混交林在一定程度上提高草本植物多样性,但不同树种间的竞争关系可能导致均匀度下降。LOREAU 等^[16]研究表明,植物多样性与生态系统功能之间存在复杂的互补效应和竞争关系。

与刺槐纯林相比,混交人工林显著提高林下草本物种的丰富度,表明混交模式能够促进多样性,提供多种植物栖息空间,有助于生态系统的稳定性和恢复能力。尤其是刺槐与油松的混交模式,其 Margalef 丰富度指数的提高,表明混交模式有效增加草本物种的多样性。尽管物种丰富度增加,混交林模式却导致草本物种均匀度下降,可能与不同物种间生长竞争加剧有关,尤其是在刺槐与油松混交模式下,Pielou 均匀度指数下降^[7],显示某些优势物种可能对生长环境占据主导地位,从而减少其他物种的生长空间。

3.2 混合林模式对草本层覆盖度和叶面积指数的影响

本研究表明,刺槐纯林的植被盖度和叶面积指数最高,草本层的截留能力也最强,与王依瑞等^[17]的研究结果相吻合,证明较高的植被盖度和叶面积指数能够显著提升降水截留能力在实际应用中,通过增加植被盖度和优化叶面积指数来提高人工林的水土保持效果。然而,不同混交类型对截留能力的影响表明,混交林中不同植物间的相互作用和竞争关系是影响草本层截留能力的重要因素^[18]。因此,未来研究应进一步探讨如何通过优化混交林的树种组合和配置,以最大化其水土保持功能。

3.3 生物量、覆盖度与截留量的关系

已有研究^[19]表明,刺槐纯林的地上和地下生物量最大,其草本层截留量也最高。地上生物量和截留量存在显著正相关,表明生物量越大,植物结构越复杂,截留能力越强。地下生物量的增加同样有助于提升植物对水分的截留能力,因为较高的地下生物量可以增强植物对水分的吸收和存储能力。在人工林的管理中,不仅关注地上部分的生长情况,还需重视地下部分的健康和生长,以全面提升草本层的截留能力。草本层盖度与截留量的显著正相关进一步验证草本层对水土保持的重要性。已有研究^[20]发现,草本层盖度能够显著提高雨水截留能力,在进行人工林水土保持功能设置,尤其是在黄土丘陵区等易受本季度监测的地区,合理配置草层植物,植被覆盖率,将有助于提升增加整体水土保持效果。

4 结 论

1)与刺槐纯林相比,混交提高林下草本物种的

丰富度,其中刺槐×油松的 Margalef 丰富度指数最高(3.49);混交降低林下草本物种的均匀度,其中刺槐×油松的 Pielou 均匀度指数最低,不同混交模式下林下草本植被的物种丰富度显著增加,但物种均匀度有所下降。

2)混交人工林通过增加植物多样性,改变林下草本层的截留特征,草本层截留量在不同混交类型下为刺槐纯林>刺槐×紫穗槐>刺槐×沙棘>刺槐×油松>刺槐×山桃>刺槐×山杏。尽管不同混交模式下的草本层截留能力存在差异,整体来看,植物多样性的增加有助于提升草本层的生态功能。混交林中不同植物种间的互补效应和竞争关系,共同决定草本层的截留特征和生态效益。

3)盖度在不同混交类型下为刺槐纯林>刺槐×紫穗槐>刺槐×沙棘>刺槐×油松>刺槐×山桃>刺槐×山杏;叶面积指数在不同混交类型下为刺槐纯林>刺槐×沙棘>刺槐×紫穗槐>刺槐×油松>刺槐×山桃>刺槐×山杏,刺槐纯林的草本层盖度和叶面积指数均最高(53%,1.980),显著高于各混交林类型,且此类指标与草本层截留能力之间存在显著线性关系($y=0.35+3.1x$, $R^2=0.81$),表明植被盖度和叶面积指数是影响草本截留能力的关键因素。

4)刺槐纯林的地上和地下生物量最大,对应草本层截留量也最高。地上生物量与截留量之间存在显著正相关($p<0.05$),地下生物量对截留能力有积极影响,说明生物量是决定草本层截留能力的重要因素。生物量通过影响植物结构、植被盖度和生物量分配,间接影响草本植物的截留能力。

参考文献:

- [1] SONG X S, SHI S M, LU S, et al. Changes in soil chemical properties following afforestation of cropland with plateau of China [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 487: e118993.
- [2] ZHANG J J, GUO B N, JIANG Q O, et al. Study on microclimate characteristics and vertical variation of potential evapotranspiration of the *Robinia pseudoacacia* forest in the Loess Plateau of China [J]. Advances in Meteorology, 2013, 2013(1): e748418.
- [3] LIANG H B, XUE Y Y, LI Z S, et al. Soil moisture decline following the plantation of *Robinia pseudoacacia* forests: Evidence from the Loess Plateau [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 412: 62-69.
- [4] 苏金娟,刘永萍,刘丽燕,等.阿勒泰荒漠区草本植物生态位与种间关联[J].草业科学,2024,41(10):2217-2228.
- SU J J, LIU Y P, LIU L Y, et al. Niche and interspecific correlation of herbaceous plants in the Altay desert region

- [J].Pratacultural Science, 2024, 41(10): 2217-2228.
- [5] ZHANG X, CHEN M, LI M, et al. Drivers of *Robinia pseudoacacia* L. growth during stand development on the Loess Plateau, China [J]. Dendrochronologia, 2023, 81: e126132.
- [6] 李佳佳, 樊妙春, 上官周平. 黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7996-8002.
- LI J J, FAN M C, SHANGGUAN Z P. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of the *Robinia pseudoacacia* forest on the north-south strip of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7996-8002.
- [7] MESTRE L, TORO-MANRÍQUEZ M, SOLER R, et al. The influence of canopy-layer composition on understory plant diversity in southern temperate forests [J]. Forest Ecosystems, 2017, 4(1): e6.
- [8] SHIRIMA D D, PFEIFER M, PLATTS P J, et al. Interactions between canopy structure and herbaceous biomass along environmental gradients in moist forest and dry miombo woodland of Tanzania [J]. PLoS One, 2015, 10(11): e0142784.
- [9] KOVALENKO I, KYRYLCHUK K, KLYMENKO H, et al. Influence of tree-crown density on dominant plant species of the herb-shrub stratum in the zone of mixed forests [J]. Biosystems Diversity, 2023, 31(3): 382-387.
- [10] 曹泽涛, 邓杨旭, 田婧, 等. 混交刺槐人工林枯落物蓄积特征及其水文效应 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 152-160.
- CAO Z T, DENG Y X, TIAN J, et al. Accumulation characteristics and hydrological effects of litter in mixed *Robinia pseudoacacia* plantations [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 152-160.
- [11] 田婧. 黄土丘陵区刺槐人工林混交改造水文效应研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- TIAN J. Hydrological effects of mixed transformation of *Robinia pseudoacacia* plantation in loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.
- [12] 洪楚翹, 屈永华. 智能手机 App 与数字半球摄影测量叶面积指数对比研究 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(1): 125-135.
- HONG C Q, QU Y H. Comparison of smartphone APP and digital hemispherical photography for estimating leaf area index [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2023, 59(1): 125-135.
- [13] 杨玉凤, 武利玉, 马永林, 等. 不同类型侧柏人工林下草本层植物多样性及其生物量研究 [J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 61-68.
- YANG Y F, WU L Y, MA Y L, et al. Diversity and biomass of herbaceous layer plants under different types of *Platycladus orientalis* plantations [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(2): 61-68.
- [14] LEUSCHNER C, MEIER I C, HERTEL D. On the niche breadth of *Fagus sylvatica*: Soil nutrient status in 50 Central European beech stands on a broad range of bedrock types [J]. Annals of Forest Science, 63(4): 355-368.
- [15] FORRESTER D I, BAUHHUS J, COWIE A L. Carbon allocation in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233(2/3): 275-284.
- [16] LOREAU M, HECTOR A. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments [J]. Nature, 2001, 412(6842): 72-76.
- [17] 王依瑞, 王彦辉, 段文标, 等. 黄土高原刺槐人工林郁闭度对林下植物多样性特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2023, 34(2): 305-314.
- WANG Y R, WANG Y H, DUAN W B, et al. Effects of canopy density on understory plant diversity in *Robinia pseudoacacia* plantations on the Loess Plateau of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(2): 305-314.
- [18] WANG Q, GUO J P. Rainfall interception loss as a function of leaf area index and rainfall by soybean [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2024, 155(1): 289-297.
- [19] HOOPER D U, CHAPIN III F S, EWEL J J, et al. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge [J]. Ecological Monographs, 2005, 75(1): 3-35.
- [20] 张洪达, 赵传普, 戴玉婷, 等. 群落尺度植被水土保持功能评价模型的构建: 以大别山北麓安徽省金寨县为例 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 122-129.
- ZHANG H D, ZHAO C P, DAI Y T, et al. Construction of evaluation model for soil and water conservation function of vegetation at community scale-taking Jinzhai County, Anhui Province at northern foot of Dabie Mountains as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 122-129.