

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.04.017

CSTR:32310.14.stbxb.2025.04.017

余锦亚南,张杰铭,宁晓梅,等.晋西北黄土区典型人工林草本多样性与土壤理化性质[J].水土保持学报,2025,39(4):158-167.

YU Jinyanan, ZHANG Jieming, NING Xiaomei, et al. Biodiversity of herbaceous plants and soil physicochemical properties in typical plantations in the loess area of northwestern Shanxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):158-167.

晋西北黄土区典型人工林草本多样性与土壤理化性质

余锦亚南¹, 张杰铭², 宁晓梅¹, 李治学¹, 范明远¹,

崔悦¹, 闫冰¹, 常晓敏¹, 孙立博³

(1.山西农业大学林学院,山西 太谷 030801; 2.南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学
国家重点实验室,南京 210029; 3.山西大学黄土高原研究所,太原 030000)

摘要: [目的] 为探究不同林分类型草本多样性与土壤理化性质相互关系的差异。 [方法] 以晋西北黄土区油松纯林、小叶杨纯林、油松小叶杨混交林、小叶杨柠条混交林 4 种典型人工林为研究对象,分析不同林分类型草本多样性与土壤理化性质差异,并研究其相互关系。 [结果] 1) 研究区内林下草本共计 12 科 30 属 35 种,优势种以禾本科为主,4 种典型人工林 Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数均存在显著差异($p < 0.05$),且小叶杨柠条混交林水平最高。 2) 4 种典型人工林土壤理化性质也存在显著差异($p < 0.05$),其中小叶杨纯林与小叶杨柠条混交林土壤理化性质最优。 3) 相关性分析和冗余分析表明,不同林分类型中,土壤全磷和土壤水分体积分数对草本多样性影响存在差异,土壤水分体积分数在油松纯林中与草本多样性呈显著负相关($p < 0.05$),在混交林中与草本多样性呈显著正相关($p < 0.05$);土壤全磷在油松纯林和小叶杨柠条混交林中与草本多样性呈显著正相关($p < 0.05$),在小叶杨纯林与小叶杨油松混交林中呈负相关。 [结论] 土壤全磷和土壤水分体积分数是影响草本多样性的主要因素,研究结果对晋西北黄土区林下草本生态功能和土壤性质研究具有重要意义。

关键词: 晋西北黄土区; 人工林; 草本多样性; 土壤理化性质; 相关性; 冗余分析

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0158-10

Biodiversity of Herbaceous Plants and Soil Physicochemical Properties in Typical Plantations in the Loess Area of Northwestern Shanxi

YU Jinyanan¹, ZHANG Jieming², NING Xiaomei¹, LI Zhixue¹, FAN Mingyuan¹,

CUI Yue¹, YAN Bing¹, CHANG Xiaomin¹, SUN Libo³

(1. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. Institute of Loess Plateau Research, Shanxi University, Taiyuan 030000, China)

Abstract: [Objective] To explore the differences in the relationship between herbaceous diversity and soil physicochemical properties of different stand types, [Methods] Four typical plantations in the loess region of northwestern Shanxi Province, including *Pinus tabulaeformis* pure plantation, *Populus microphylla* pure plantation, *P. tabulaeformis* and *P. microphylla* mixed plantation, and *P. microphylla* and *Caragana korshinskii* mixed plantation, were studied to analyze the differences in herbaceous diversity and soil physicochemical properties among different stand types, and to study their correlations. [Results] 1) There were 35 species of understory herbs in 12 families and 30 genera in the study area, and the dominant species were Poaceae. There

收稿日期: 2025-01-25

修回日期: 2025-03-25

录用日期: 2025-04-16

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-21

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目(32201630); 山西省基础研究计划自由探索类项目(202203021212429, 202203021222014); 山西农业大学“杰青优青培育工程”项目(2024YQPYGC06); 山西农业大学博士科研启动项目(2021BQ105); 山西省博士毕业生、博士后研究人员来晋工作奖励经费科研项目(SXBYKY2022052); 山西省回国留学人员科研项目(2023-017)

第一作者: 余锦亚南(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与森林生态研究。E-mail: yujinyanan02@163.com

通信作者: 常晓敏(1992—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水土保持与森林生态研究。E-mail: changxiaomin123@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

were significant differences in the Simpson diversity index, Pielou evenness index, and Margalef richness index among the four typical plantations ($p < 0.05$), with the *P. microphylla* and *C. korshinskii* mixed plantation showing the highest values. 2) There were also significant differences in soil physicochemical properties among the four typical plantations ($p < 0.05$), with the *P. microphylla* pure plantation and the *P. microphylla* and *C. korshinskii* mixed plantation exhibiting the best soil properties. 3) Correlation analysis and redundancy analysis showed that there were differences in the effects of soil total phosphorus and soil water content on herbaceous diversity among different stand types. Soil water content was negatively correlated with herbaceous diversity in *P. tabuliformis* pure plantation ($p < 0.05$), but positively correlated with herbaceous diversity in mixed forest ($p < 0.05$). Soil total phosphorus was significantly positively correlated with herbaceous diversity in *P. tabuliformis* pure plantation, and in *P. microphylla* and *C. korshinskii* mixed plantation ($p < 0.05$), and negatively correlated with herbaceous diversity in *P. microphylla* pure plantation, and in *P. tabuliformis* and *P. microphylla* mixed plantation. [Conclusion] Soil total phosphorus and soil water content are the main factors affecting herbaceous diversity. The results of this study are of great significance for understanding the ecological functions of understory herbaceous plants and soil properties in the loess region of northwestern Shanxi Province.

Keywords: loess region in northwestern Shanxi Province; plantation; herbaceous diversity; soil physicochemical properties; correlation; redundancy analysis

Received: 2025-01-25

Revised: 2025-03-25

Accepted: 2025-04-16

Online(www.cnki.net): 2025-05-21

生物多样性对维持生态系统稳定性和可持续发展有重要作用^[1],植物多样性指一定地区内不同植物的种类和数量组成,其反映植物与环境因子的相互关系,也表现出植物个体的复杂度^[2]。林下草本在水土保持^[3]、生态系统演替^[4]和保护生物多样性^[5]等方面具有重要贡献。林分结构^[6]、土壤养分质量分数、地形^[7]、林冠层特征等均影响林下草本的生长情况,其中,土壤理化性质是体现土壤质量的指标,对林地生产力和林下草本的生长都有显著影响^[6]。土壤具有颗粒大小相近,质地疏松,导致植被覆盖率低,出现严重水土流失问题^[8]。林下草本多样性能提高植被覆盖率和改善土壤理化性质^[9],同时,也有研究^[2,10]表明,不同林分类型人工林草本多样性受土壤理化性质的影响存在差异。因此,研究不同林分类型人工林中土壤理化性质与草本多样性关系,对理解生物多样性维持机制和保护有重要意义。

已有诸多研究^[10-13]指出,土壤理化性质对林下草本多样性有显著影响,但由于研究环境和林分类型的区别,研究结果存在差异;任奕炜等^[10]等对烟台海防林研究发现,不同林分类型下混交林多样性指数显著高于纯林;张涵丹等^[11]等对湖北人工林研究发现,不同草本层优势种与林地树种组成密切相关,同时,草本优势种还能显著影响土壤理化性质;邹星辰等^[12]等研究发现,土壤有机质和速效钾为影响草本多样性的主导因子;陈笑等^[13]研究发现,不同林分间的平均胸径和碱解氮为影响林下草本多样性的显著特征。我国人工林造林树种多样,且对不同林分类型人工林草本多样性的

研究结果不尽相同,因此,开展不同林分类型人工林林下草本多样性与土壤因子关系的研究具有重要意义。

自1978年以来,黄土高原开始大面积营造水土保持林,经过40 a的发展,已经建立以小叶杨、油松为优势树种的防护林体系,且取得巨大的生态效益^[14]。根据人工林造林树种的不同,分为油松纯林、小叶杨纯林、油松小叶杨混交林和小叶杨柠条混交林4种人工林类型。因此,以忻州市偏关县为研究区域,对当地典型的4种类型的人工林进行试验,利用草本调查和土壤理化性质分析,探究不同林分类型土壤理化性质与林下草本的相关性,为晋西北黄土区生物多样性保护和自然恢复过程提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省忻州市偏关县(39°21'16"~39°36'55"N, 111°00'48"~112°21'02"E),平均海拔1 377 m,属典型的北温带大陆性气候,地貌类型属典型黄土丘陵区(图1)。年平均降水量425.3 mm,年平均蒸发量2 037 mm,降水多集中在7—9月。受长期人为生产、生活及退耕还林影响,该地区土壤类型以黄绵土和栗褐土为主,孔隙度高,土壤有机质质量分数低,现有植被以人工植被为主,包括油松(*Pinus tabuliformis*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana korshinskii*)在其中少量分布。林下草本植物包括赖草(*Leymus secalinus*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、白茅(*Imperata cylindrica*)和斜茎黄芪(*Astragalus laxmannii*)等。

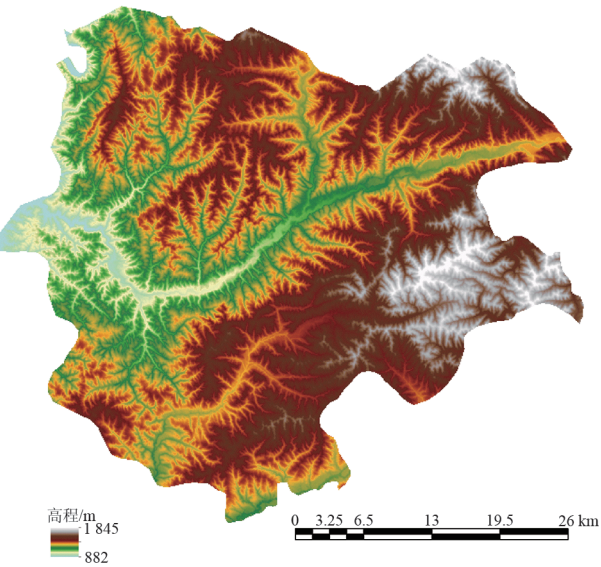


图1 研究区概况
Fig.1 Overview of the study area

1.2 样地调查

2024年7月在偏关县踏查,用典型取样法选取人为干预较少,坡度为15°~20°,pH为8.1~8.7,海拔1 100~1 400 m选择油松纯林、小叶杨纯林、油松与小叶杨混交林及小叶杨和柠条的混交林4种不同类型的人工林,并在每种林分设置8块面积为20 m×20 m样地,总共32块样地。对每块样地记录样地内每棵树木的基本信息,用手持GPS记录样地海拔、经纬度和坡向等(表1)。

1.3 样品采集与指标测定

1.3.1 土壤理化性质调查及测定 以土壤体积质量、土壤水分体积分数、土壤孔隙度及有机质、土壤全氮、土壤全磷、土壤速效磷、土壤碱解氮8个土壤指标为土壤因子。对每个样方随机选取3个取样点,用环刀采取0~20 cm土层土壤样品进行3次重复取样,待土壤样品自然风干后,将土壤样品过0.25 mm孔径筛,进行化学性质测定。

表1 样地基本情况

Tab. 1 Basic information of the sampling site

林分类型	林分密度/ (株·hm ⁻²)	海拔/m	坡向	平均胸径/cm	平均树高/m	林龄/a
油松纯林(<i>Pinus tabulaeformis</i>)	1 365.63±154.08	1 184~1 388	半阳	14.77±0.93	6.75±0.46	20~24
小叶杨纯林(<i>Populus simonii</i>)	1 003.12±84.98	1 241~1 303	半阳	15.20±0.65	6.87±0.83	21~26
油松-小叶杨混交林 (<i>Pinus tabulaeformis</i> - <i>Populus simonii</i>)	1 209.38±86.53	1 174~1 398	半阳	18.00±1.86	6.55±1.32	21~26
小叶杨-柠条混交林 (<i>Populus simonii</i> - <i>Caragana korshinskii</i>)	1 175.00±96.36	1 093~1 364	半阳	16.10±1.33	6.28±0.67	20~29

注:表中林分密度、平均胸径、平均树高均为平均值±标准差。下同。

利用环刀浸水法测定土壤物理性质;采用Kjeltec 8400凯氏定氮仪测定土壤全氮;利用钼锑抗比色法测定土壤全磷和速效磷;利用重铬酸钾容量法^[15]测定土壤有机质;利用碱扩散法测定土壤碱解氮。

1.3.2 草本多样性的采集和计算 在每个样地内布置2个1 m×1 m的小样方,用于草本层调查。记录总体覆盖度及样方内的草本植物覆盖度,详细记录草本物种、株数、物种高度和物种投影盖度。

根据采集数据,按照公式计算草本多样性指数。

$$I_v=(H+C+D)/3 \tag{1}$$

$$M=(S-1)/\ln N \tag{2}$$

$$D=1-\sum_{i=1}^S p_i^2 \tag{3}$$

$$P=\frac{-\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i}{\ln N} \tag{4}$$

式中: H 为植物相对高度,%; C 为植物相对盖度,%; D 为植物相对密度,%; I_v 为重要值; M 为Margalef丰富度指数; D 为Simpson多样性指数; P 为Pielou

均匀度指数; S 为群落中的物种数; N 为群落中的物种个体总数; N_i 为第*i*个物种的相对个体数; P_i 为 N_i/N 。

1.4 数据处理

使用Excel 2021软件收集整理数据,利用SPSS 22.0软件对数据进行单因素方法分析,对不同林分类型的林下草本多样性进行差异性检验,并分析林下草本多样性与土壤理化性质的相关性。采用Cancoco 5软件中的RDA冗余分析研究林下草本多样性的主要影响因子。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型林下草本多样性和土壤理化性质分析

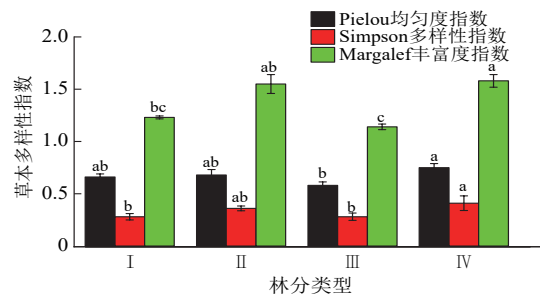
共调查林下草本种类共12科30属35种,各林分类型林下草本虽存在差异,但主要以乔本科、豆科为主。其中油松纯林7科20属22种,小叶杨纯林9科20属21种,油松小叶杨混交林9科17属20种,小叶杨柠条林8科21属23种。不同林分类型林下草本优势种不同,通过重要值比较来确定不同林分类型的优势种(表2),其中,赖草为油松纯林、小叶杨纯林,

油松小叶杨混交林的优势种,重要值分别为 15.5%、13.9%、17.5%;冰草和黄花蒿在油松林中重要值较高,分别为 15.3%、10.6%;油松小叶杨林中白莲蒿重要值较高,达到 12.75%;小叶杨柠条林的优势种为花苜蓿和斜茎黄芪,重要值分别为 10.3%、10.16%;马唐仅在小叶杨柠条林有分布,且重要值达到 6%;猪毛菜、披针叶野决明、耳草和斜茎黄芪在各个林分类型皆有分布。

表 2 不同人工林林下植物群落物种组成及重要值

Tab. 2 Species composition and importance values of the understory plant communities in different plantations						
科	属	种	油松	小叶杨	油松小叶杨	小叶杨柠条
禾本科	冠毛草属	赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	15.50	13.90	17.50	5.00
禾本科	冰草属	冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)	15.30	0.80	1.30	1.67
豆科	胡枝子属	胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)	14.70	7.75		1.67
菊科	蒿属	黄花蒿(<i>Artemisia annua</i>)	10.60	2.50		
禾本科	白茅属	白茅(<i>Imperata cylindrica</i>)	7.50	8.43	10.08	4.90
蔷薇科	委陵菜属	蛇含委陵菜(<i>Potentilla kleiniana</i>)	5.25	2.08	1.83	
豆科	苜蓿属	花苜蓿(<i>Medicago ruthenica</i>)	4.80	13.00	6.08	10.30
豆科	黄芪属	斜茎黄芪(<i>Astragalus laxmannii</i>)	4.08	6.07	1.50	9.16
苋科	猪毛菜属	猪毛菜(<i>Salsola abrotanoides</i>)	3.25	1.21	2.08	3.91
豆科	野决明属	披针叶野决明(<i>Thermopsis lanceolata</i>)	2.17	2.25	9.38	7.08
茜草科	耳草属	耳草(<i>Hedyotis auricularia</i>)	2.08	6.16	9.50	3.91
菊科	莴苣属	山莴苣(<i>Lactuca sibirica</i>)	1.50		0.10	
茜草科	拉拉藤属	六叶葎(<i>Galium hoffmeisteri</i>)	1.30	8.08	1.30	8.00
唇形科	百里香属	地椒(<i>Thymus quinquecostatus</i>)	1.25	4.17	1.75	2.00
豆科	黄芪属	草木樨状黄芪(<i>Astragalus melilotoides</i>)	1.25		3.25	1.38
禾本科	大麦属	大麦(<i>Hordeum vulgare</i>)	1.17	1.00		8.75
菊科	蒿属	白莲蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)	1.17		12.75	1.67
茜草科	蛇舌草属	百花蛇舌草(<i>Scleromitron diffusum</i>)	0.96			
禾本科	羊茅属	羊茅(<i>Festuca ovina</i>)	0.75			
菊科	风毛菊属	风毛菊(<i>Saussurea japonica</i>)	0.63		1.10	
豆科	野豌豆属	野豌豆(<i>Vicia sepium</i>)	0.52			
菊科	麻花头属	麻花头(<i>Klasea centauroides</i>)	0.51	0.71		3.93
豆科	黄芪属	糙叶黄芪(<i>Astragalus scaberimus</i>)		10.17		5.50
唇形科	青兰属	香青兰(<i>Dracocephalum moldavica</i>)		2.98		0.65
苋科	沙冰藜属	地肤(<i>Bassia scoparia</i>)		2.67		0.19
旋花科	打碗花属	藤长苗(<i>Calystegia pellita</i>)		2.15		
唇形科	迷迭香属	迷迭香(<i>Rosmarinus officinalis</i>)		1.46		1.18
檀香科	百蕊草属	白蕊草(<i>Thesium chinense</i>)		0.69		1.58
禾本科	草沙蚕属	中华草沙蚕(<i>Tripogon chinensis</i>)			8.60	5.66
菊科	蒿属	南牡蒿(<i>Artemisia eriopoda</i>)			3.55	
堇菜科	堇菜属	细距堇菜(<i>Viola tenuicornis</i>)			1.75	
远志科	远志属	远志(<i>Polygala tenuifolia</i>)			1.33	
菊科	蒿属	青蒿(<i>Artemisia caruifolia</i>)			0.94	4.08
禾本科	马唐属	马唐(<i>Digitaria sanguinalis</i>)				6.00
马齿苋科	马齿苋属	毛马齿苋(<i>Portulaca pilosa</i>)				1.30

由图 2 可知不同林分类型草本多样性。Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均在小叶杨柠条混交林中达到最高,且小叶杨柠条混交林与小叶杨油松混交林样地间存在显著差异($p<0.05$);Margalef 丰富度指数在各林分类型间差异性显著($p<0.05$),由大到小排列为小叶杨柠条混交林、小叶杨纯林、油松纯林和油松小叶杨混交林。



注：I 为油松纯林，II 为小叶杨纯林，III 为油松小叶杨混交林，IV 为小叶杨柠条混交林。

图 2 不同林分类型草本多样性指数

Fig. 2 Herbaceous diversity indices of different stand types

表 3 不同人工林土壤理化性质

Tab. 3 Soil physicochemical properties of different plantations

林分类型	体积质量/ (g·cm ⁻³)	水分体积分 数/%	最大持水 率/%	最小持水 率/%	总孔隙 度/%	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)
油松纯林	1.37± 0.07a	13.87± 2.48ab	33.76± 2.10ab	30.75± 1.84a	33.76± 1.64ab	7.72± 1.56b	0.45± 0.06ab	0.56± 0.03ab	7.86± 1.63ab	33.60± 8.90b
小叶杨 纯林	1.31± 0.11a	12.00± 3.26bc	36.51± 0.85a	30.71± 1.27a	36.51± 3.73ab	13.98± 4.40a	0.70± 0.16a	0.61± 0.05a	3.78± 0.93b	70.70± 21.30a
油松小叶 杨混交林	1.39± 0.04a	10.48± 2.04c	32.37± 0.33ab	30.50± 0.47a	32.37± 0.57ab	8.83± 2.00b	0.30± 0.03b	0.48± 0.06b	11.60± 3.31a	27.82± 3.51b
小叶杨柠 条混交林	1.41± 0.09a	15.49± 0.64a	29.04± 2.00b	26.21± 2.00a	29.04± 2.73b	9.82± 3.64b	0.44± 0.05ab	0.56± 0.02ab	7.49± 1.18ab	26.45± 4.22b

注：同列不同小写字母表示不同林分间差异显著($p<0.05$)。

2.2 不同林分类型土壤理化性质与林下草本植物多样性间的相关性

通过对研究区域内所有样地的土壤理化性质与林下草本植物多样性进行相关性分析发现,土壤的理化特性与草本植物的多样性指数间无显著相关性。因此,对不同林分类型进行相关分析(表4),油松纯林

由表 3 可知,不同林分类型对土壤水分体积分数、总孔隙度、有机质、全氮、全磷、速效磷、碱解氮均存在显著差异($p<0.05$)。

从物理性质来看,小叶杨柠条混交林水分体积分数和总孔隙度显著高于其余林分类型($p<0.05$);小叶杨纯林最大水分体积分数最高,为 36.51%。从化学性质看,土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮均在小叶杨纯林达到最高,且显著高于其余林分类型($p<0.05$);油松小叶杨混交林土壤速效磷质量分数最高,为 11.6 mg/kg。

Margalef 丰富度指数与水分体积分数呈显著负相关($p<0.05$);Simpson 多样性指数与体积质量、全氮和全磷呈显著正相关($p<0.05$),与水分体积分数、孔隙度和碱解氮呈显著负相关($p<0.05$)、Pielou 均匀度指数与体积质量呈极显著正相关($p<0.01$),与孔隙度呈极显著负相关($p<0.01$)。

表 4 不同林分类型土壤理化性质与林下草本多样性相关分析

Tab. 4 Correlation analysis of soil physicochemical properties and understory plant diversity in different stand types

林分类型	指标	体积质量	水分体积分数	孔隙度	有机质	全氮	全磷	速效磷	碱解氮
油松纯林	Simpson 多样性指数	0.65*	-0.64*	-0.66*	-0.03	0.64*	0.58*	0.45	-0.62*
	Pielou 均匀度指数	0.71**	-0.70*	-0.78**	-0.14	0.60*	0.49	0.53	-0.66
	Margalef 丰富度指数	0.52	-0.60*	-0.50	-0.10	0.46	0.06	-0.89	0.04
小叶杨纯林	Simpson 多样性指数	0.52	0.32	-0.52	0.01	-0.67	-0.10	-0.42	-0.77*
	Pielou 均匀度指数	0.23	0.31	-0.19	0.02	-0.80*	-0.22	-0.37	-0.87*
	Margalef 丰富度指数	0.27	0.067	-0.34	-0.05	-0.40	-0.18	-0.41	-0.41
油松小叶杨混交林	Simpson 多样性指数	-0.35	0.68*	0.028	-0.44	0.05	-0.51	-0.10	-0.46
	Pielou 均匀度指数	-0.19	0.80**	-0.15	-0.41	0.09	-0.47	-0.14	-0.41
	Margalef 丰富度指数	-0.02	0.29	0.05	-0.64*	-0.27	-0.23	0.26	-0.25
小叶杨柠条混交林	Simpson 多样性指数	-0.30	0.60*	0.27	-0.38	-0.25	0.36	-0.02	0.24
	Pielou 均匀度指数	-0.26	0.84**	0.21	-0.62*	-0.56	0.68*	0.19	0.33
	Margalef 丰富度指数	-0.46	0.76**	0.39	-0.65*	-0.60*	0.68*	0.29	0.27

注：*表示差异显著($p<0.05$);**表示差异极显著($p<0.01$)。

小叶杨纯林 Simpson 多样性指数与碱解氮、Pielou 均匀度指数与全氮均呈显著负相关($p<0.05$)。油松小叶杨混交林中 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均与水分体积分数呈显著正相关($p<0.05$);Margalef 丰富度指数与有机质呈显著负相关($p<0.05$)。小叶杨柠条混交林中 Simpson 多样性指数与水分体积分数呈显著正相关($p<0.05$),Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数与水分体积分数呈极显著正相关($p<0.01$);有机质与 3 个多样性指数均呈显著负相关;全氮与 Margalef 丰富度指数呈显著负相关($p<0.01$);全磷与 Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数均呈显著正相关($p<0.05$)。

不同林分类型林下草本多样性指数受不同土壤因子影响,选用相关性分析中具有显著差异的土壤因子进行回归分析,得到土壤理化性质与林下草本多样性的多元回归方程(表 5),各回归方程拟合系数良好。油松纯林中土壤体积分数、土壤水分体积分数、全磷、全氮和碱解氮为草本多样性指数的主导因子;小叶杨纯林中,碱解氮为 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的主导因子;油松小叶杨混交林中,土壤水分体积分数为 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的主导因子,土壤有机碳为 Margalef 丰富度指数的主导因子;小叶杨柠条混交林草本多样性的主导因子为土壤水分体积分数、土壤有机质、土壤全氮和全磷。

表 5 土壤理化性质与林下草本多样性多元回归方程

Tab. 5 Multiple regression equations for soil physicochemical properties and understory herbaceous diversity			
林分类型	多样性指数	回归方程	R ²
油松纯林	Simpson 多样性指数	$S_1=2.321BD+0.087SWC+2.348TP+0.724TN-0.531AN$	0.476
	Pielou 均匀度指数	$P_1=0.997BD-0.246SWC-1.525TP-0.033TN$	0.553
	Margalef 丰富度指数	$M_1=-0.598SWC$	0.357
小叶杨纯林	Simpson 多样性指数	$S_2=-0.955AN$	0.912
	Pielou 均匀度指数	$P_2=-0.982AN$	0.964
	Margalef 丰富度指数	—	
油松小叶杨混交林	Simpson 多样性指数	$S_3=0.671SWC$	0.450
	Pielou 均匀度指数	$P_3=0.797SWC$	0.635
	Margalef 丰富度指数	$M_3=-0.64SOC$	0.410
小叶杨柠条混交林	Simpson 多样性指数	$S_4=0.599SWC$	0.359
	Pielou 均匀度指数	$P_4=1.095SWC+0.104SOC-0.191TP$	0.726
	Margalef 丰富度指数	$M_4=0.797SWC-0.527SOC-0.792TP-0.322TN$	0.608

注:S₁、S₂、S₃、S₄为 Simpson 多样性指数;P₁、P₂、P₃、P₄为 Pielou 均匀度指数;M₁、M₃、M₄为 Margalef 丰富度指数;BD 为土壤体积分数;SWC 为土壤水分体积分数;SP 为土壤孔隙度;SOC 为土壤有机质;TN 为全氮;TP 为全磷;AN 为碱解氮。

2.3 不同林分类型草本植物多样性驱动因子分析

对不同林分类型土壤影响因子与草本多样性指数进行 RDA 冗余分析(图 3),实心箭头代表草本多样性指标,空心箭头代表土壤影响因子,油松纯林、小叶杨纯林、油松小叶杨混交林和小叶杨柠条混交林的累计贡献度分别达 69.91%、75.12%、69.4% 和 74.67%,能较好地反映土壤影响因子的大部分信息。在油松纯林中土壤全磷、全氮、水分体积分数和总孔隙度对草本多样性相关指标有较强的解释能力;在小叶杨纯林中,碱解氮与草本多样性指标呈锐角且实践最长,说明碱解氮在小叶杨纯林中对草本多样性指标有较强的解释能力;在 2 种不同的混交林中,水分体积分数与土壤全磷均对草本多样性指标有较强的解释能力。值得注意的是,土壤全磷和水分体积分数在 4 种不同林分类型中均有较强的解释能力,并且在油松纯林,油松小叶杨混交林,小叶杨柠条混交林中对草本多样性指数有显著影

响($p<0.05$)。但土壤全磷在油松纯林和小叶杨柠条混交林中,对草本多样性正相关进行解释,在油松小叶杨混交林中,对草本多样性负相关有较强的解释能力;水分体积分数在油松小叶杨混交林和小叶杨柠条混交林中对草本多样性指数正相关有较强的解释能力,在油松纯林中对草本多样性负相关有较强解释。

3 讨论

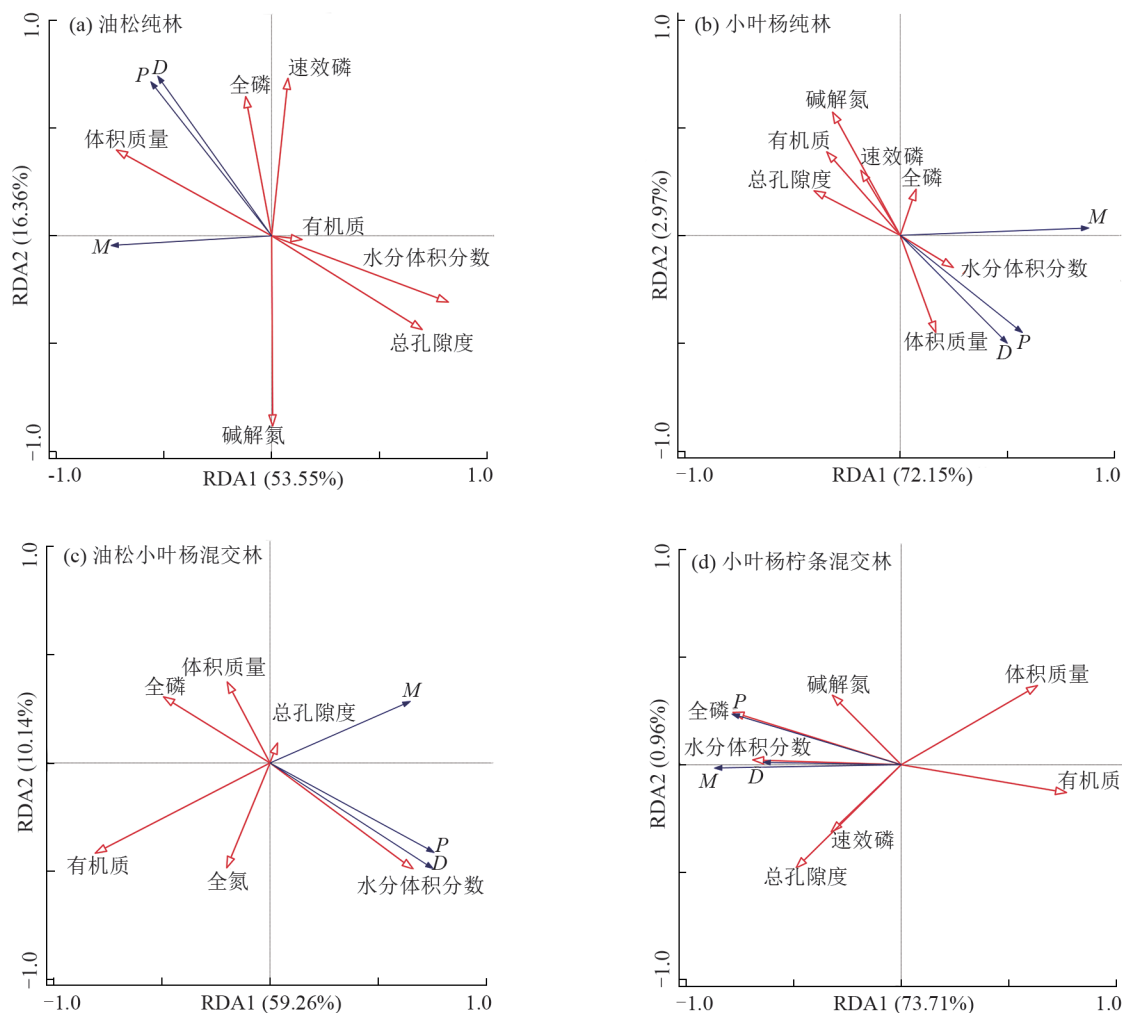
3.1 不同林分类型林下草本植物多样性和土壤理化性质

在黄土高原区,人工林不仅重塑林下草本植物的种类与分布,还通过改变局部环境条件,对整体生物多样性产生连锁反应。本研究表明,晋西北黄土区不同林分类型的草本组成和林下草本多样性存在显著差异,赖草、白茅等禾本科植物在不同林分类型中均为优势种,与云慧雅等^[16]研究结果相似,各个林

分类型也表现出优势种属于少数科,弱势种占据多数科的特点。

本研究发现,不同林分类型 Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数在小叶杨柠条混交林种最高,在油松小叶杨混交林最低,一方面,说明小叶杨柠条林的林下结构更为复杂,符合

多种草本植物的生长条件,柠条凋落物也为林下草本提供充足养分来源,促进多年生草本的生长;另一方面,可能是针阔混交导致林窗面积减小林内光照不足使林下草本生长受限^[17]。人工林在选择造林树种和造林模式时具有差异,也导致林下草本多样性的不同^[18]。



注: D 为 Simpson 多样性指数; P 为 Pielou 均匀度指数; M 为 Margalef 丰富度指数。

图 3 不同林分类型林下草本多样性与土壤影响因子 RDA 分析

Fig. 3 RDA analysis results of the influencing factors of the understory herbaceous diversity of different stand types

土壤物理性质对植物根系生长发育具有重要作用^[19],同时土壤有机质、全氮、全磷作为生态系统养分循环核心,也是当前全球土壤化学计量特征研究的主要内容。本研究中,不同林分类型间理化性质除土壤体积质量和最小持水量外均存在显著差异($p < 0.05$),其中,小叶杨纯林土壤有机质、全氮和碱解氮水平均高于其余人工林,原因可能是不同林分微生物活动不同,小叶杨林中固氮菌和固碳菌多样性较高^[20]。云慧雅等^[21]研究发现,晋北黄土区油松纯林土壤体积质量较高,小叶杨纯林有机质质量分数较高,与本研究结果一致。此现象是由于不同林

分类型产生的凋落物的数量与种类不同,对土壤理化性质的影响也存在差异^[10],同时,磷元素大多来自土壤母质矿化,油松枯落物中含有油性物质,降低土壤矿物胶体对磷的吸附性能,间接造成土壤有机质质量分数降低,体积质量增加。

3.2 土壤理化性质与草本多样性

土壤植被间存在相互作用,植被生长影响土壤理化性质,土壤理化性质又限制植被生长。本研究中,不同林分类型的林下草本多样性与土壤理化性质的相关性不同,土壤全磷与油松纯林和油松小叶杨混交林草本多样性呈正相关,与小叶杨纯林和小

叶杨柠条混交林呈负相关,与贾亚捷等^[22]研究结果一致。土壤全磷和水分体积分数显著影响林下草本多样性,与胡广德等^[23]研究结果相似,土壤水分是限制黄土丘陵区植被的关键要素,由于土壤水分对植被的胁迫效应,土壤水分与林下草本多样性的相关性也不断增强^[24]。

本研究发现,林下草本多样性指数受到土壤因子影响,尤其是水分体积分数和全磷的影响,与朱羚等^[25]研究结论相近。一方面,磷是腺苷三磷酸的关键组分,同时参与叶绿素的合成,林下草本的光合作用,使其充分利用有限光能^[26];另一方面,土壤水分对枯落物腐殖质层的分解和林下草本的根系活动有密切关系^[25]。然而,在干旱地区,由于土壤中钙盐较高,加上水分稀缺,本来就低的磷可用性变得更加有限,显著限制植物的生长^[27]。本研究中,磷的可用性限制植物生长,改变物种组成和丰富度,不同的土壤水分体积分数对营养吸收和植物间竞争作用不同,二者共同作用使不同林分类型林下草本多样性呈现差异^[28]。

不同林分类型土壤理化性质对林下草本多样性的影响也存在差异,土壤全磷在油松纯林、小叶杨柠条混交林中,与草本多样性呈正相关,在小叶杨纯林和油松小叶杨混交林中相反;水分体积分数在油松纯林中,草本多样性相关性与其他林分类型存在差异。原因可能是,不同林分类型产生的枯落物不同,枯落物的不同时间堆积可改变表层土壤温度与湿度,进而在春季影响林下草本生长发育^[29],同时,不同林分类型人工林对土壤养分利用程度不同,微生物群落的结构特征不同,营养型真菌通过改善土壤养分环境与林下草本形成共生关系,改变根系对土壤养分的吸收能力^[30],导致不同林分类型的林下草本对土壤养分利用不同。

4 结论

1)研究区内林下草本共计12科30属35种,优势种以冠毛草、白茅为主,4种典型人工林草本多样性指数存在显著差异($p < 0.05$),且小叶杨柠条混交林水平最高。

2)4种典型人工林土壤理化性质存在显著差异($p < 0.05$),其中,小叶杨纯林具有较高的土壤物理性质,小叶杨柠条混交林的土壤化学性质最优。

3)相关性分析和冗余分析表明,不同林分类型中,土壤全磷和土壤水分体积分数对草本多样性影响存在差异,土壤水分体积分数在油松纯林中与草本多样性呈负相关($p < 0.05$),在混交林中与草本多样性呈显著正相关($p < 0.05$);土壤全磷在油松纯林和小叶杨柠条混交林中,与草本多样性呈显著正相

关,在小叶杨纯林、小叶杨油松混交林中呈负相关。

参考文献:

- [1] PEREIRA HM, LEADLEY PW, PROENÇA V, et al. Scenarios for global biodiversity in the 21st century [J]. Science, 2010, 330(6010):1496-1501.
- [2] 孙婉怡,余新晓,贾国栋,等.内蒙古半干旱地区不同人工林土壤因子与林下植物多样性的相关性[J].东北林业大学学报,2024,52(7):51-57.
SUN W Y, YU X X, JIA G D, et al. Correlation between soil factors and understory plant diversity in different plantations in semi-arid regions of Inner Mongolia [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(7):51-57.
- [3] MCALPINE K, LAMOUREAUX S, et al. Understory vegetation provides clues to succession in woody weed stands [J]. New Zealand Journal of Ecology, 2021, 45(1):e3418.
- [4] DONG S K, SHA W, SU X K, et al. The impacts of geographic, soil and climatic factors on plant diversity, biomass and their relationships of the alpine dry ecosystems: cases from the Aejin Mountain Nature Reserve, China [J]. Ecological Engineering, 2019, 127:170-177.
- [5] LANDUYT D, DE LOMBAERDE E, PERRING M P, et al. The functional role of temperate forest understorey vegetation in a changing world [J]. Global Change Biology, 2019, 25(11):3625-3641.
- [6] 刘俊廷,张建军,王恒星,等.晋西黄土区不同退耕年限油松林草本多样性与土壤养分的关系[J].干旱区研究, 2020, 37(2):400-409.
LIU J T, ZHANG J J, WANG H X, et al. Relationship between species diversity at the herbaceous stratum and soil nutrients in *Pinus tabulaeformis* plantations of various ages on the Loess Plateau of western Shanxi Province, China [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2):400-409.
- [7] 李登醒,杨章旗,颜培栋,等.林分密度对马尾松人工林群落冠层结构及林下草本的影响[J].西南林业大学学报(自然科学),2024,44(2):60-68.
LI D X, YANG Z Q, YAN P D, et al. Effects of stand density on canopy structure and understory herbs of *Pinus massoniana* plantation community [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2024, 44(2):60-68.
- [8] 王子婷,杨磊,李广,等.半干旱黄土丘陵区微地形变化对人工柠条林草本分布的影响[J].草地学报,2021, 29(2):364-373.
WANG Z T, YANG L, LI G, et al. Effects of microtopography variation on the distribution of herbaceous vegetation of *Caragana korshinskii* plantations in the semi-arid Loess Hilly Region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(2):364-373.

- [9] 刘宏文,程小琴,康峰峰.油松人工林林下植物群落变化及其环境解释[J].生态学报,2014,33(2):290-295.
LIU H W, CHENG X Q, KANG F F. Changes of understory plant community in *Pinus tabulaeformis* plantation and associated environmental explanations [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(2): 290-295.
- [10] 任奕炜,钟小瑛,衣华鹏,等.不同林分类型对叶功能性状、林下物种多样性及土壤养分的影响[J].林业科学研究,2023,36(2):161-168.
REN Y W, ZHONG X Y, YI H P, et al. Effects of different stand types on leaf functional traits, understory species diversity and soil nutrients [J]. Forest Research, 2023, 36(2): 161-168.
- [11] 张涵丹,康希睿,邵文豪,等.不同类型杉木人工林林下草本植物多样性特征[J].生态学报,2021,41(6):2118-2128.
ZHANG H D, KANG X R, SHAO W H, et al. Characteristics of herbaceous plant biodiversity in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different community structures [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2118-2128.
- [12] 邹晨星,王欣苗,左亚凡,等.青海云杉不同演替阶段林下草本多样性特征及其环境解释[J].生态学报,2023,43(24):10285-10294.
ZOU X C, WANG X M, ZUO Y F, et al. Characteristics of herbaceous diversity and environmental interpretation of *Picea crassifolia* at different succession stages [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10285-10294.
- [13] 陈笑,李远航,左亚凡,等.林分特征和土壤养分对林下草本物种多样性的影响[J].西北植物学报,2022,42(8):1396-1407.
CHEN X, LI Y H, ZUO Y F, et al. Effects of stand characteristics and soil nutrient characteristics on herbaceous diversity [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, 42(8): 1396-1407.
- [14] 梁潇瑜.河北坝上地区退化小叶杨土壤水分时空分布及其影响因素[D].北京:北京林业大学,2022.
LIANG X Y. Temporal and spatial distribution of soil moisture and its influencing factors in degraded *Populus simonii* in Bashang area, Hebei Province [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] 云慧雅,毕华兴,焦振寰,等.晋西黄土区不同林分类型和密度条件下林下灌草组成及多样性特征[J].浙江农林大学学报,2023,40(3):569-578.
YUN H Y, BI H X, JIAO Z H, et al. Composition and diversity of understory plants under different stand types and densities in loess region of western Shanxi Province [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(3): 569-578.
- [17] 袁媛,姚甲宝,徐克芹,等.林窗面积、年龄对赣中南杉木低效林灌草物种多样性和碳储量的影响[J/OL].应用与环境生物学报,2024:1-19.(2024-11-26).
YUAN Y, YAO J B, XU K Q, et al. Effects of gap area and age on species diversity and carbon storage of shrub and grass in inefficient Chinese fir forests in central and southern Jiangxi Province [J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-19. (2024-11-26).
- [18] ZHANG Q Y, JIA X X, ZHAO C L, et al. Revegetation with artificial plants improves topsoil hydrological properties but intensifies deep-soil drying in northern Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(3): 335-346.
- [19] 管迟明,马永贵,王强,等.生物炭对草地土壤有机碳固存的正向调控作用[J/OL].草业科学,2024:1-14.(2024-10-23).
GUAN C M, MA Y G, WANG Q, et al. Positive regulation of biochar on organic carbon sequestration in grassland soil [J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-14. (2024-10-23).
- [20] 王子擎,张颖,王扬,等.科尔沁沙地植被重建对土壤固氮和固碳菌群的影响[J].应用生态学报,2024,35(1):31-40.
WANG Z Q, ZHANG Y, WANG Y, et al. Effects of revegetation on soil nitrogen-fixation and carbon-fixation microbial communities in the Horqin sandy land, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(1): 31-40.
- [21] 云慧雅,毕华兴,王珊珊,等.不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):183-189.
YUN H Y, BI H X, WANG S S, et al. Soil physical and chemical characteristics of different forest types and their effects on soil infiltration process [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 183-189.
- [22] 贾亚捷,杨建英,张建军,等.晋西黄土区林分密度对油松人工林生物量及土壤理化性质的影响[J].浙江农林大学学报,2024,41(6):1211-1221.
JIA Y J, YANG J Y, ZHANG J J, et al. Effects of stand density on biomass and soil physico-chemical properties of *Pinus tabulaeformis* forest in the loess area of western Shanxi [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(6): 1211-1221.
- [23] 胡广德,周继强,达军山,等.金塔沙地不同人工林下草本植物多样性与土壤性质的关系[J].草地学报,2023,31(6):1834-1841.
HU G D, ZHOU J Q, DA J S, et al. Relationship between understory plant diversity and soil properties of different forests in sandy land of Jinta [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(6): 1834-1841.
- [24] 逯金鑫,高飞,周荣磊,等.不同植被类型下草本群落与土壤因子的关系[J].水土保持研究,2023,30(3):310-317.

- LU J X, GAO F, ZHOU R L, et al. Relationship between herbaceous communities and soil nutrients under different vegetation types[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 310-317.
- [25] 朱羚, 金一兰, 丛日慧, 等. 环境因素及种间竞争在群落多样性格局中的作用[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1427-1435.
- ZHU L, JIN Y L, CONG R H, et al. Effects of environmental factors and interspecific competition in community biodiversity pattern[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1427-1435.
- [26] ZHANG Z L, LIAO H, LUCAS W J. Molecular mechanisms underlying phosphate sensing, signaling, and adaptation in plants [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2014, 56(3): 192-220.
- [27] 盘远方, 李娇凤, 姚玉萍, 等. 桂林岩溶石山青冈群落植物功能多样性和环境因子与坡向的关联研究[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4484-4492.
- PAN Y F, LI J F, YAO Y P, et al. Changes in plant functional diversity and environmental factors of *Cyclobalanopsis glauca* community in response to slope gradient in karst hills, Guilin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4484-4492.
- [28] 许驭丹, 董世魁, 李帅, 等. 植物群落构建的生态过滤机制研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2267-2281.
- XU Y D, DONG S K, LI S, et al. Research progress on ecological filtering mechanisms for plant community assembly[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2267-2281.
- [29] 张峰, 李邵宇, 杨立山, 等. 内蒙古不同草地类型植物群落地上净初级生产力的影响因素[J]. 草地学报, 2025, 33(3): 902-909.
- ZHANG F, LI S Y, YANG L S, et al. Influencing factors of above-ground net primary productivity of different grassland types of flora in Inner Mongolia[J]. Acta Grassland Sinica, 2025, 33(3): 902-909.
- [30] 邓翔尹, 王克勤, 王振超, 等. 金沙江干热河谷不同植被类型的土壤微生物群落结构特征[J]. 四川农业大学学报, 2024, 42(6): 1328-1338.
- DENG X Y, WANG K Q, WANG Z C, et al. Soil microbial community structure of different vegetation types in the dry-hot valley of Jinsha River[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2024, 42(6): 1328-1338.
- (上接第157页)
- [25] 张林, 齐实, 周飘, 等. 北京山区侧柏林下草本植物多样性的影响因素分析[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 2199-2206.
- ZHANG L, QI S, ZHOU P, et al. Analysis of influencing factors on the understory herbaceous plant diversity of *Platycladus orientalis* forest in Beijing mountainous areas[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(8): 2199-2206.
- [26] LIU X R, FENG T J, ZHANG Y F, et al. Vegetation restoration affects soil hydrological processes in typical natural and planted forests on the Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2025, 650: e132465.
- [27] 王作泉, 贺康宁. 祁连山东部地区不同林分水源涵养能力综合评估[J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7662-7672.
- WANG Z X, HE K N. Comprehensive assessment of water conservation capacity in different forest stands in the eastern Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7662-7672.
- [28] 陈秋文. 黄土丘陵区两典型森林群落土壤水分时空动态及影响因素[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- CHEN Q W. Temporal and spatial dynamics of soil moisture and its influencing factors in two typical forest communities in loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [29] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3441-3449.
- YU Y, WEI W, CHEN L D, et al. Coupling effects of different land preparation and vegetation on soil moisture characteristics in a semi-arid loess hilly region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3441-3449.
- [30] GE L B, MEI X M, PING J H, et al. Identification of suitable vegetation restoration areas and carrying capacity thresholds on the Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 373: e123660.
- [31] PÁEZ-BIMOS S, VILLACÍS M, MORALES O, et al. Vegetation effects on soil pore structure and hydraulic properties in volcanic ash soils of the high Andes [J]. Hydrological Processes, 2022, 36(9): e14678.