

平朔煤矿复垦区不同人工林草本层植物群落特征

李厚春^{1,2}, 秦浩³, 张红^{1,2*}, 李君剑^{1,2}, 刘勇^{1,2}

(1. 山西大学 黄土高原研究所, 山西 太原 030006;
2. 山西亚高山草地生态系统教育部野外科学观测研究站, 山西 宁武 036700;
3. 山西财经大学 统计学院, 山西 太原 030006)

摘要: 研究复垦区植被恢复过程中植物群落组成和多样性的变化, 可进一步了解植物群落的演化过程及规律。通过对山西平朔典型煤矿复垦区植被资源调查, 选取小叶杨林、油松林、榆树林、刺槐林四种人工林, 分析林下草本植物群落组成及物种多样性, 探究土壤和林分对草本层植物群落的影响, 为矿区后期复垦中植被选择提供依据。结果表明: (1) 林下草本植物物种组成共有 25 科 49 属 59 种, 其中菊科种类最多, 豆科、禾本科次之, 生活型以多年生草本为主。优势种植物主要为林地早熟禾、紫花苜蓿和赖草。(2) 随着植被恢复, 油松林草本层植物多样性呈先增加后减少趋势, 榆树林趋势相反, 小叶杨林与刺槐林变化不明显。(3) 不同人工林的土壤有机质、全氮随演化时间显著增加 ($P < 0.05$), 土壤容重显著降低 ($P < 0.05$), 全磷除刺槐外也显著增加, 土壤含水量变化不显著 ($P > 0.05$)。 (4) 土壤理化性质及林分因子对草本植物群落组成具有极显著影响 ($P < 0.01$)。本研究揭示了平朔煤矿复垦区不同人工林下草本植物群落演替特征, 可为该区域生态恢复提供科学依据。

关键词: 煤矿复垦区; 土壤理化性质; 物种多样性; 林下群落; 物种组成

中图分类号: Q948.1 文献标志码: A 文章编号: 0253-2395(2025)03-0626-11

Characteristics of Plant Communities in Different Herbaceous Layers of Plantation Forests in Pingshuo Coal Mine Reclamation Area

LI Houchun^{1,2}, QIN Hao³, ZHANG Hong^{1,2*}, LI Junjian^{1,2}, LIU Yong^{1,2}

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;
2. Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Education of Shanxi Subalpine Grassland Ecosystem, Ningwu 036700, China;
3. School of Statistics, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Changes in the composition and diversity of plant communities during vegetation restoration in reclaimed areas can enhance our understanding on the evolutionary processes and patterns of plant communities. Four planted forests, *Populus simonii*, *Pinus tabulaeformis*, *Ulmus pumila* and *Robinia pseudoacacia* in a typical coal mine reclamation area in Pingshuo, Shanxi, were selected to analyze the composition and species diversity of the understory herbaceous community and to investigate the influence of soil and stand on the herbaceous layer of the plant community. The aim of the present study was to provide basis information for species selection in the later stage of mining area reclamation. The results showed that: (1) there were 25 families, 49 genera and 59 species of understory herbaceous plants, among which the *A. Bercht* has the most species, followed by the *F. Lindl* and *P. Barnhart*, and the life type is mainly perennial herbs. The dominant species of plants are mainly woodland *P. nemoralis*, *M. sativa* and *S. chamae-*

收稿日期: 2023-06-12; 接受日期: 2023-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(U1910207); 山西省基础研究计划项目(20210302124646)

作者简介: 李厚春(1998-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要研究方向为植物-微生物生态学。E-mail: lihouchun@alu.sxu.edu.cn

* 通信作者: 张红(ZHANG Hong), E-mail: zhanghong@sxu.edu.cn

引文格式: 李厚春, 秦浩, 张红, 等. 平朔煤矿复垦区不同人工林草本层植物群落特征[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2025, 48(3): 626-636. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2023151.

jasme. (2) The herbaceous diversity of the *P. tabuliformis* showed a trend of increasing and then decreasing during vegetation recovering, while the opposite trend was observed in the *U. pumila*, and no obvious trends were observed in the *P. simonii* and *R. pseudoacacia* communities. (3) Soil organic matter and total nitrogen increased significantly ($P < 0.05$), soil bulk density decreased significantly ($P < 0.05$), and total phosphorus increased significantly ($P > 0.05$), except for *R. pseudoacacia*, while soil water content did not change significantly ($P > 0.05$). (4) Soil physical and chemical properties and highly significant effects on herbaceous community composition ($P < 0.01$). The study reveals the successional characteristics of herbaceous communities under different plantation forests in the Pingshuo coal mining reclamation area, which can provide a scientific basis for the ecological restoration in this area.

Key words: coal mine reclamation area; soil properties; species diversity; understory community; species composition

0 引言

露天开采是现代煤炭开采最常用的技术,通常会陆地生态系统造成严重的破坏^[1]。在此过程中,被开采出的土壤和碎石混合堆积,形成大规模排土场。排土场土壤和植被的自然演替是一个长期过程,容易受风蚀和水蚀影响,进一步导致生态环境恶化。因此,种植人工植被就成了煤矿复垦区生态修复的重要手段。人工植被不仅有助于改善矿区的景观格局,增加生物多样性,同时可以增加矿区土壤营养物质,提高矿区土壤肥力^[2]。近年来,有关煤矿区复垦地先锋物种的选育和不同植被配置类型生态恢复研究有了长足进展,但半干旱区煤矿复垦地的人工植被生态修复效果仍需要进一步研究^[3-4]。山西平朔露天煤矿是黄土高原生态脆弱区的典型矿区,至今已有30多年的复垦历史,复垦区经过土地复垦治理和乔灌木植被恢复,已经取得了显著的生态恢复效果^[5]。部分复垦地经过30年的生态恢复,人工林种植已经初见成效,但目前关于长时间恢复条件下不同人工林林下草本植物群落特征的研究相对较少。

林下草本植物作为森林群落中重要的组成部分,在维持森林生态系统稳定中扮演着重要角色^[6]。然而,林下草本植物的组成和分布受林分结构、气候、土壤和立地条件等多种因素影响^[7-8]。其中,乔木层的林分结构在局部小尺度范围内被认为是制约林下草本植物多样性的主要因素,这是因为上层乔木的林分结构决定着林下水、热、光照和养分等基本条件,进而对林下草本植物群落的组成和多样性产生影响^[9]。但目前关于煤矿复垦区在长时间恢复尺度上林下草本植物群落组成与多样性的变化,

以及影响林下草本物种多样性的主导因子尚不清楚。因此明确不同植被复垦方式对长期草本植物群落的影响对矿区复垦的可持续发展具有重要的理论价值和实际意义。

小叶杨(*Populus simonii*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、榆树(*Ulmus pumila*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)作为平朔煤矿露采复垦区生态恢复的主要造林树种,可恢复裸露的地表植被,修复当地因露天开采造成的生态破坏,提高植被多样性。因此,探究长时间恢复条件下不同人工林对草本植物群落多样性的影响,定量分析影响人工林下物种多样性的主导因子是复垦区生态恢复有待解决的问题。基于此,本研究以山西省朔州市平朔煤矿复垦区不同复垦年限的小叶杨林,油松林,榆树林和刺槐林为研究对象,基于42个样地的野外调查数据,研究不同人工林下草本植物群落的组成与多样性,并采用冗余分析探究影响不同人工林下草本植物群落的影响因子,以期对煤矿复垦区生态修复提供理论和技术支撑。

1 材料及方法

1.1 研究区概况

平朔矿区位于山西省朔州市平鲁区内,是我国特大型露天煤矿,其经纬度为:E112°45'~110°33',N39°3'~39°58'。该地区地势呈由西南向东北逐渐升高趋势,平均海拔1300~1400 m,是典型的温带半干旱大陆性季风气候,四季分明,日温差与年温差较大,年平均降水量约为450 mm,降水集中于7、8月份,无霜期在4—9月份^[10]。煤矿复垦区主要的复垦植被类型包括小叶杨林,油松林,榆树林和刺槐林等。

1.2 研究方法

在平朔矿区的安太堡矿区复垦地和安家岭矿区复垦地内,采用以空间代时间的方法,选择不同恢复年限的4种人工林进行调查(表1),共有样地14个,每个样地重复布设样方3个,共计样方42个。每个样方大小设置为10 m × 10 m,记录并测量样方内乔木的种名、胸径、高度和健康状况等;灌木层调查面积同乔木层,记录并测量灌木的种名、平均基径、平均高度、盖度和株数或丛数等。在每个乔木调查样方内沿对角线分别设置3个“1 m × 1 m”的小样方,进行草本层植物调查,记录小样方内草本植物的种名、丰度、盖度和高度等指标。另外记录经纬度、海拔、坡度、坡向和人为干扰等样地信息。土壤采样使用多点混合土样品品处理法,即草本小样方调查完后,去除地表植被和覆盖物,3个随机样点土钻取样(0~10 cm)并混匀,自然风干研磨过2 mm筛子备用;土壤容重(Soil Bulk Density, SBD)使用环刀法测定;土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)、土壤总氮(Total Nitrogen, TN)、土壤总磷(Total Phosphorus, TP)使用元素分析仪(Vario MACRO cube, Elementer, 德国)测定。土壤含水量使用烘干法测定^[11]。

1.3 数据处理

以重要值作为每个样方植物种的综合指标,计算不同恢复模式下草本的重要值^[12-13]:

草本植物重要值=(相对高度+相对盖度)/2;

相对高度=(某种植物的个体高度/全部植物的个体高度之和)×100%;

相对盖度=(样方中某个植物的分盖度/样方中全部个体所有分盖度之和)×100%。

草本植物的多样性指数选择两个指数:

$$\text{Patrick 丰富度指数: } Pa = S \quad (1)$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H = -P_i \ln P_i \quad (2)$$

其中S为样地内的物种数目, P_i 为种的相对重要值($P_i = N_i/N$), N_i 为种*N*的重要值, N 为种*i*所在样地的各个种的重要值之和。

生活型的划分采用Raunkier生活型分类系统^[14],即以植物休眠芽或复苏芽所在位置的高低为依据,将植物划分为高位芽植物、地上芽植物、地面芽植物、地下芽植物和一年生植物5大类群。使用单因素方差分析不同人工林下草本植物群落多样性和土壤理化性质,使用冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)探究不同人工林下草本植物群落与环境因子的关系。本文统计学分析与绘图使用R4.1.3的ggcor、vegan、ggplot2、factoextra包完成^[15-16]。

2 结果与分析

2.1 不同复垦年限不同人工林下土壤理化性质

不同复垦年限的人工林土壤理化性质存在差异,结果见图1。随着复垦年限的增加,小叶

表1 样地信息表

Table 1 Sample site information

样地	经度E	纬度N	平均海拔/m	复垦年限/a	树种	平均树高/m	平均胸径/cm	草本盖度/%
小叶杨10	112°21'09.39"	39°29'24.01"	1456	10	小叶杨	4.9	6.3	61
小叶杨20	112°18'55.30"	39°29'26.15"	1469	20	小叶杨	5.2	8.8	35
小叶杨30	112°19'39.85"	39°27'59.82"	1348	30	小叶杨	5.94	9.8	45
油松3	112°21'40.70"	39°29'19.15"	1431	3	油松	2.42	2.45	73
油松10	112°21'04.03"	39°28'58.02"	1374	10	油松	2.5	2.9	28.3
油松20	112°18'46.49"	39°29'29.82"	1471	20	油松	4.73	7.65	26.2
油松30	112°20'05.26"	39°27'41.54"	1384	30	油松	5.15	9.5	5.2
榆树10	112°21'03.90"	39°28'58.06"	1368	10	榆树	4.72	3.81	53.3
榆树15	112°18'54.66"	39°30'07.83"	1440	15	榆树	5.28	8.54	48.3
榆树20	112°18'44.41"	39°29'28.64"	1474	20	榆树	6	12.9	58
榆树30	112°20'04.13"	39°27'41.45"	1391	30	榆树	6.45	11.3	48
刺槐3	112°19'39.99"	39°30'30.31"	1424	3	刺槐	2.56	2.54	93
刺槐20	112°18'44.08"	39°29'33.35"	1474	20	刺槐	4.7	9.7	52
刺槐30	112°20'04.13"	39°27'41.45"	1391	30	刺槐	5	7.9	44

杨、油松、榆树和刺槐土壤有机质和全氮显著增加($P < 0.05$),除刺槐外全磷含量也明显增加,刺槐土壤全磷含量差异不显著($P > 0.05$),土壤容重呈现显著($P < 0.05$)下降的趋势,土壤含水量在不同的样地具有差异,但随复垦年限的增加未表现出明显的趋势。

复垦30年小叶杨土壤有机质显著高于复垦10年和复垦20年小叶杨土壤($P < 0.05$)。复垦30年油松土壤具有最高的有机质含量,达到35.75,是复垦3年油松的4.16倍。刺槐林土壤有机质随复垦年限的增加显著增加($P < 0.05$)。复垦30年小叶杨土壤全氮是复垦10年小叶杨土壤的2.8倍,达到1.36。复垦15年榆树和复垦20年榆树土壤全氮含量不显著($P > 0.05$),但显著低于复垦30年的榆树土壤全氮含量($P < 0.05$)。复垦30年油松土壤全磷显著高于其他油松样地($P < 0.05$),复垦10年油松与复垦3年油松土壤全磷含量差异不显著($P > 0.05$)。复垦30年榆树土壤全磷含量与

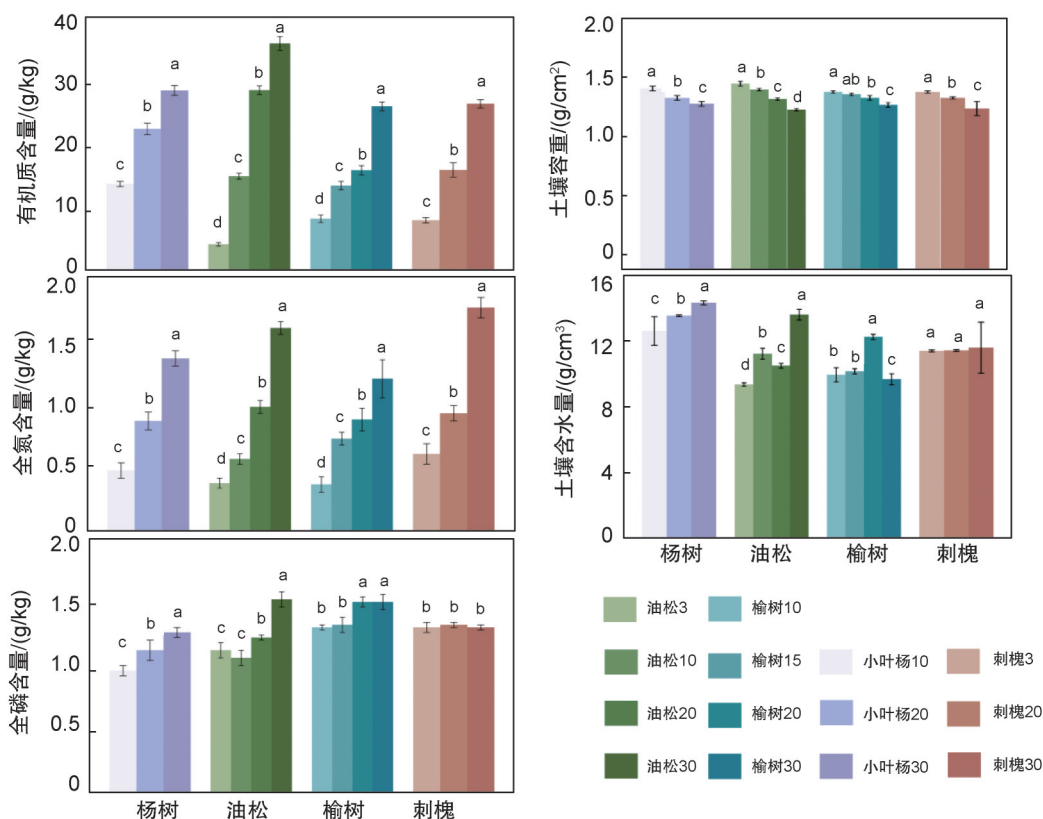
20年榆树样地差异不显著($P > 0.05$),但显著大于15年和10年榆树样地($P < 0.05$)。不同复垦年限的刺槐样地之间土壤全磷含量差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 复垦区不同人工林下草本植物群落物种组成

2.2.1 生活型组成

平朔煤矿复垦区不同人工林下草本植物群落42个样方中共记录59种草本植物,包括25科49属,以菊科、豆科、禾本科为主。其中菊科有14种,占总数的23.7%;豆科有11种,占总数的18.6%;禾本科有6种,占总数的10.1%;其余科的种类较少。

采用Raunkiner生活型系统比较人工林下草本植物群落的生活型组成(图2),发现一年生植物只占总种数的25%,多年生草本植物占绝对优势,其中又以地面芽植物为主,占到植物总种数的45.45%。分析长时间恢复下不同人工林下草本植物群落物种的Raunkiner生活型(图2)可见,不同人工林在不同时期的优势种



注:小写字母表示同一植被不同恢复年限之间的差异显著($P < 0.05, n=3$)。下同。

Note: Lowercase letters indicate differences between different years of restoration for the same vegetation ($P < 0.05, n=3$). The same below.

图1 不同复垦年限不同人工林下土壤理化性质

Fig. 1 Physicochemical properties of soils under different plantation forests of different reclamation years

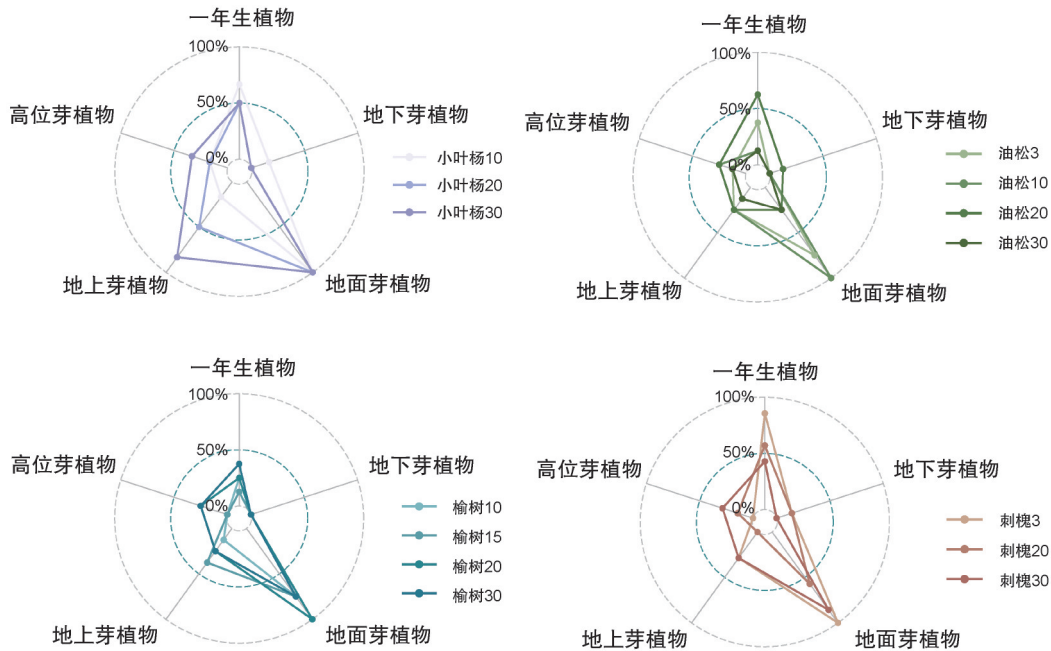


图2 长时间恢复下不同人工林下草本植物群落物种的Raunkiner生活型

Fig. 2 Raunkiner life styles of different herbaceous community under different plantation forests after long-term reclamation

不尽相同,但总体上看,以地面芽植物为主。

2.2.2 优势种组成

通过对各样地的植被调查,将各样地平均重要值在15%以上的植物列为优势种,共9种(图3),分别为林地早熟禾(*Poa nemoralis*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、赖草(*Stellera chamaejasme*)、大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、铁杆蒿(*Artemisia stechmanniana*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、火绒草(*Leontopodium lenotopodioides*)。恢复30年的小叶杨林、榆树林、刺槐林样地包括6个优势种,早熟禾、赖草和紫花苜蓿分别在12、9和5个样地中出现。可见,长时间恢复下不同人工林下草本群落的优势种并不相同,但林地早熟禾、紫花苜蓿、赖草为绝对优势种。

2.3 不同复垦年限不同人工林下草本植物群落物种多样性

对不同复垦年限的人工林样地的物种丰富度和多样性进行分析,结果见图4。不同复垦年限的小叶杨林下草本群落Patrick丰富度指数及Shannon-Weiner多样性指数之间差异性不显著($P > 0.05$),但30年小叶杨样地的物种丰富度均值为8.67,高于复垦10年小叶杨和复垦20年小叶杨样地(7.33),复垦30年的小叶杨林下

草本植物群落Shannon-Weiner多样性指数均值(1.76)大于复垦10年和复垦20年的样地(1.64)。不同复垦年限的油松林下草本植物物种丰富度均值和Shannon-Weiner多样性均值呈现先增加后减少的趋势,且复垦30年的油松林样地显著低于其他样地($P < 0.05$),在复垦10年具有最高的物种丰富度(8.67),复垦15年的榆树林样地Shannon-Weiner多样性(1.37)显著低于其他样地($P < 0.05$)。不同复垦年限的榆树林下草本植物群落Patrick丰富度指数及Shannon-Weiner多样性指数之间具有差异,且复垦30年的样地显著高于复垦15年的样地($P < 0.05$),Patrick丰富度指数均值和Shannon-Weiner多样性均值整体上呈现先减小后增加的趋势,复垦15年的榆树林Shannon-Weiner多样性(1.37)显著低于其他样地($P < 0.05$)。不同复垦年限的刺槐林Patrick丰富度和Shannon-Weiner多样性差异不显著($P > 0.05$),复垦20年刺槐样地均值大于其他两个样地。综合比较复垦30年的四种人工林下草本植物群落物种多样性,发现复垦30年的油松林下草本植物物种丰富度和多样性最低。

2.4 草本植物群落与土壤理化特性的联系

不同复垦年限的人工林下草本植物群落与环境因子的冗余分析(RDA)(图5)表明:第一

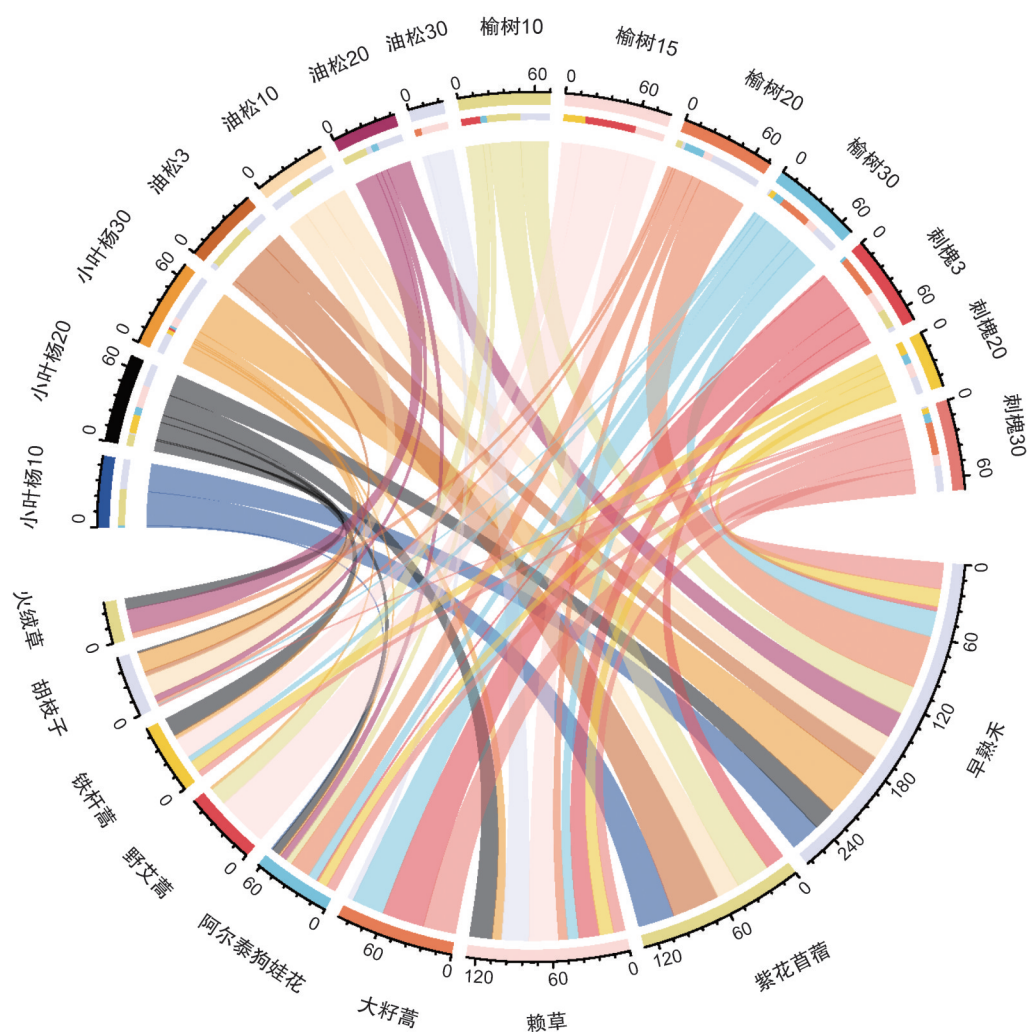


图3 样地与优势种关系

Fig. 3 Relationships between simple plots and dominant species

主成分轴和第二主成分轴分别能够解释草本植物群落组成和生境因子关系变异的30.26%和19.36%。通过对每个环境因子的Monte Carlo显著性检验显示:有机质、全氮、全磷、容重、含水量、平均树高、平均胸径、盖度、种植年限对草本植物群落组成具有极显著影响($P < 0.01$),海拔不具有显著影响($P > 0.05$)。图中箭头长度和夹角表明:有机质与全氮、全磷、含水量、平均树高、平均胸径呈正相关,与盖度、土壤容重呈负相关。

3 讨论

3.1 不同复垦年限对不同人工林下草本植被特征变化的影响

对山西平朔煤矿复垦区不同复垦年限的不同人工林下草本植物群落物种组成的研究表

明,研究区内菊科、豆科和禾本科3个科植物占绝对优势,其他22个科为少数科和单种科。菊科、豆科和禾本科植物具有耐干旱、耐贫瘠的特点,能够更好地适应黄土高原半干旱区煤矿复垦区土壤含水量低,营养贫瘠的环境^[5]。植物生活型是植物对生存环境适应产生的生理、结构的具体反应,在不同复垦年限的人工林下草本植物生活型不同,不同生活型植物对生境的适应能力不同,多年生草本植物对土壤的固持力较高,通过积累一定的营养物质和保留地下植物部分,能够为第二年生长提供一定的基础^[17-18]。多年生草本植物中以地面芽植物为主(图2),说明地面芽植物是对煤矿复垦区干旱、多风和土壤贫瘠环境适宜最成功的生活型。各个样地的优势种不尽相同,但均为多年生草本植物(图2),且以禾本科的林地早熟禾、赖草和

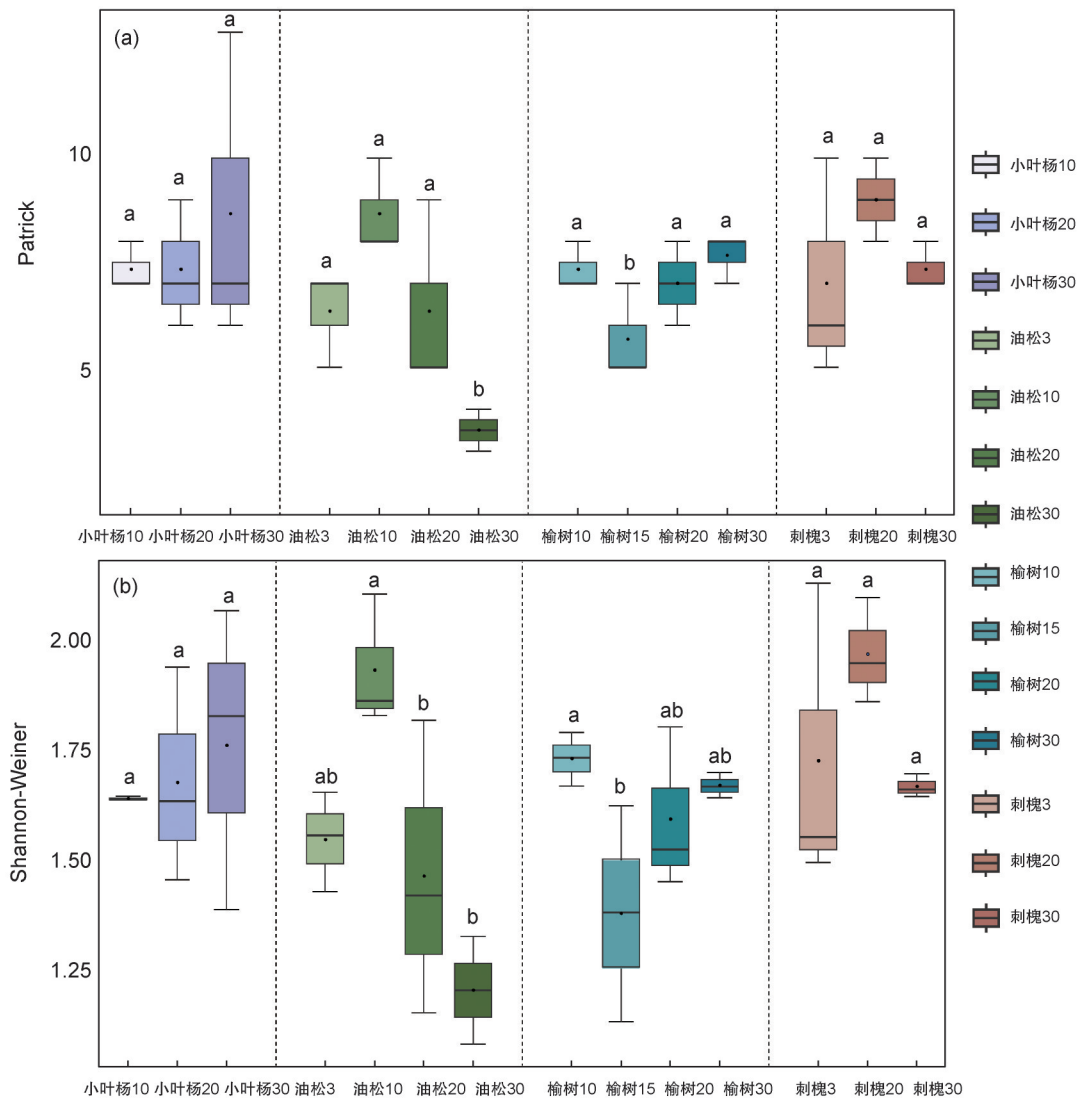


图4 不同复垦年限不同人工林下草本植物群落多样性指数

Fig. 4 Diversity indices of herbaceous communities in different plantation forests with different reclamation years

豆科的紫花苜蓿为绝对优势种(图3)。

物种多样性是维持生态系统功能和结构的基础,主要表现为丰富度和多样性^[19]。研究发现不同复垦年限下不同人工林样地的Patrick丰富度指数和Shannon多样性指数变化并不相同,不同复垦年限的小叶杨和刺槐样地的丰富度指数和多样性指数差异不显著($P > 0.05$),但在不同时期样地内植被群落的生活型和优势种不同(图2)。不同复垦年限的油松林丰富度指数和多样性指数均值表现出先增加后减少的趋势(图4),可能是油松林复垦初期自发演替较为明显,随着土壤营养物质不断累积,草本植物生存环境逐渐改善,一年生草本逐渐被多年生草本竞争排斥(图2),导致多样性逐渐增加^[20]。但

油松林复垦后期,油松林郁闭度提高,油松凋落物不易分解,在地表形成较厚的松针层,导致复垦30年的油松林下草本群落多样性显著降低^[21]。不同复垦年限的榆树林丰富度和多样性均值表现出先减少后增加的趋势(图4),可能是复垦早期一年生入侵物种被多年生植物取代导致多样性下降,复垦后期随着林地土壤养分的累积,使草本群落多样性逐渐增加^[22]。

3.2 不同复垦年限对不同人工林林分结构和表层土壤养分的影响

乔木层的林分因子在小范围内被认为是影响林下草本植物群落的主要因素^[23]。长时间的演替使林分因子发生明显的改变,平均树高和平均胸径逐渐增加(表1),表明小叶杨、油

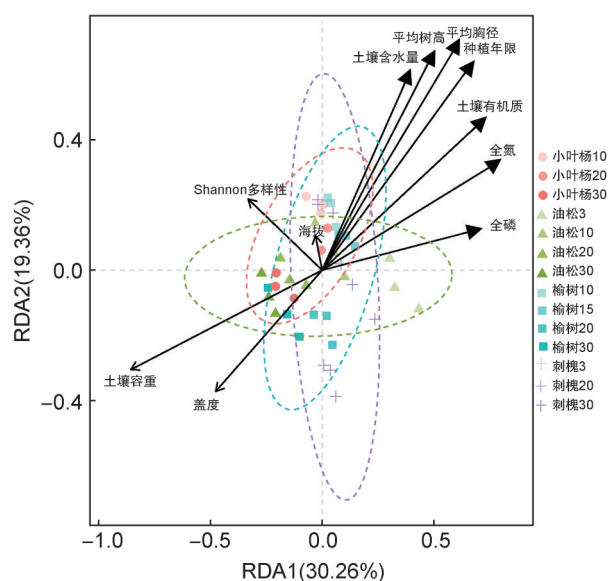


图5 草本植物群落与环境因子的RDA分析排序图

Fig. 5 Ranking diagram of RDA analysis of herbaceous plant communities and environmental factors

松、榆树和刺槐对复垦区贫瘠的土壤具有较好的耐受性。草本层盖度随演替逐渐降低,且与平均树高和平均胸径呈负相关(图5),这是由于树林郁闭度的上升减少了林下草本植物的可用光,因此演替后期草本盖度受到抑制^[24]。在本研究中,随着复垦年限的增加,四种人工林土壤有机质和总氮显著增加($P < 0.05$)(图1)。土壤有机质在土壤层中的累积在草本植物生长发育过程中起着关键作用,因为土壤有机质支持土壤团聚体和结构的形成,并影响土壤持水能力^[25]。此外,土壤有机质还是草本植物重要的能量来源,土壤有机质主要来源于动物植物微生物的残体、排泄物和分泌物,随着复垦年限的增加树林中生物量的增加导致土壤有机质输入的增加^[26]。除土壤有机质外,土壤全氮随复垦年限的增加也显著增加($P < 0.05$)(图1),土壤中的氮由生物固定,且主要与植物根际的固氮微生物有关,如根瘤菌和各种放线菌^[27]。与有机质和总氮不同的是,小叶杨、油松和榆树林土壤总磷随演替增加,刺槐林总磷变化却不显著(图1),可能与不同树种对全磷利用率有关,在一项关于黄土高原刺槐林演替过程中全磷变化中也有发现。植物根系生长和土壤大型动物的活动使复垦区紧实的土壤松动是土壤容重随人工林演替逐渐降低的主要原

因^[28]。在本研究中,土壤含水量随演替并无明显规律(图1),可能与复垦区人工林种植过程中人工浇水有关。

3.3 不同复垦年限不同人工林下草本层植物群落与环境因子的关系

从环境因子对不同复垦年限不同人工林下草本植物群落冗余分析结果来看(图5),有机质、全氮、全磷、容重、含水量、平均树高、平均胸径、盖度对草本植物群落组成具有极显著影响($P < 0.01$)。表明土壤理化因子和森林林分因子都对草本植物群落组成具有影响^[29-30],但本研究中,不同人工林海拔差异小导致海拔因子对植物群落影响不显著($P > 0.05$)。林下草本层植物群落与林分特征及土壤理化性质有较强的关联性,说明合理优化林分特征,能够有效提高土壤养分含量从而提高林下草本层植物群落获取水、热、光等基本条件^[31]。土壤容重和盖度与平均树高、土壤有机质、种植年限等呈负相关(图5),随着种植年限的增加,土壤养分不断累积,植物根系的生长和土壤动物的活动导致土壤容重降低,平均树高和平均胸径的增加导致林间郁闭度不断增加,草本层植物群落对此做出响应,物种丰富度下降^[32-33]。

4 结论

(1)平朔煤矿复垦区不同复垦年限的不同人工林下草本植物群落组成中,菊科、豆科和禾本科占绝对优势,优势种植物主要为林地早熟禾、紫花苜蓿和赖草。

(2)长时间恢复下油松林多样性均值呈现先增加后减少的趋势,榆树林趋势相反,小叶杨林与刺槐林变化不明显。

(3)不同人工林土壤有机质、全氮随演替显著增加($P < 0.05$),全磷除刺槐外也累积增加,土壤容重随演替显著下降($P < 0.05$),土壤含水量随演替变化不显著($P > 0.05$)。

(4)土壤理化因子和森林林分因子都对草本植物群落组成具有影响($P < 0.05$)。

(5)不同人工林草本层植物群落特征在一定程度上表明随复垦年限增加植物生长状况和复垦效果逐渐变好。

参考文献:

- [1] SAINT-AMAND A, GRECH A, CHOUKROUN S, *et al.* Quantifying the Environmental Impact of a Major Coal Mine Project on the Adjacent Great Barrier Reef Ecosystems[J]. *Mar Pollut Bull*, 2022, **179**: 113656. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113656.
- [2] LIU J, ZHANG S W, LI E W, *et al.* Effects of Cubic Ecological Restoration of Mining Wasteland and the Preferred Restoration Scheme[J]. *Sci Total Environ*, 2022, **851**: 158155. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158155.
- [3] VACEK Z, LINDA R, CUKOR J, *et al.* Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.), the Suitable Pioneer Species for Afforestation of Reclamation Sites? [J]. *For Ecol Manag*, 2021, **485**: 118951. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.118951.
- [4] 珊丹, 邢恩德, 荣浩, 等. 草原矿区排土场不同植被配置类型生态恢复[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(2): 336-342. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201902.019.
- SHAN D, XING E D, RONG H, *et al.* Ecological Restoration of Different Vegetation Collocations of Coal Mine Dump in Typical Steppe[J]. *Chin J Ecol*, 2019, **38**(2): 336-342. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201902.019.
- [5] 耿冰瑾, 王舒菲, 曹银贵, 等. 山西平朔露天矿区不同年限复垦地植被重建特征对比分析[J]. *生态学报*, 2022, **42**(8): 3400-3419. DOI: 10.5846/stxb202102270548.
- GENG B J, WANG S F, CAO Y G, *et al.* Comparative Analysis of Vegetation Reconstruction Characteristics of Different Years in the Reclaimed Land of the Pingshuo Opencast Mining Area, Shanxi Province[J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, **42**(8): 3400-3419. DOI: 10.5846/stxb202102270548.
- [6] SPICER M E, RADHAMONI H V N, DUGUID M C, *et al.* Herbaceous Plant Diversity in Forest Ecosystems: Patterns, Mechanisms, and Threats[J]. *Plant Ecol*, 2022, **223**(2): 117-129. DOI: 10.1007/s11258-021-01202-9.
- [7] 郭文慧, 顾润源, 丁锋. 蒲公英和车前草在山东境内的春季物候特征及对气候变化的响应[J]. *草业学报*, 2021, **30**(12): 27-38. DOI: 10.11686/cyxb2020471.
- GUO W H, GU R Y, DING F. Spring Phenological Characteristics of Dandelion and Plantain in Shandong Province and Their Responses to Climate Change[J]. *Acta Prataculturae Sin*, 2021, **30**(12): 27-38. DOI: 10.11686/cyxb2020471.
- [8] LIU J, WANG J, MORREALE S J, *et al.* Contributions of Plant Litter to Soil Microbial Activity Improvement and Soil Nutrient Enhancement along with Herb and Shrub Colonization Expansions in an Arid Sandy Land [J]. *CATENA*, 2023, **227**: 107098. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107098.
- [9] CUI R R, QI S, WU B C, *et al.* The Influence of Stand Structure on Understory Herbaceous Plants Species Diversity of *Platyclusus orientalis* Plantations in Beijing, China[J]. *Forests*, 2022, **13**(11): 1921. DOI: 10.3390/f13111921.
- [10] 白中科, 赵景逵, 李晋川, 等. 大型露天煤矿生态系统受损研究: 以平朔露天煤矿为例[J]. *生态学报*, 1999, **19**(6): 870-875. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.1999.06.018.
- BAI Z K, ZHAO J K, LI J C, *et al.* Ecosystem Damage in a Large Opencast Coal Mine: A Case Study on Pingshuo Surface Coal Mine, China[J]. *acta Ecol Sin*, 1999, **19**(6): 870-875. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.1999.06.018.
- [11] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- ZHANG G L, GONG Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [12] 张桂莲, 张金屯, 郭道宇. 安太堡矿区人工植被在恢复过程中的生态关系[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(1): 151-155.
- ZHANG G L, ZHANG J T, GUO X Y, *et al.* Ecological Relationships among Artificial Vegetations during Their Restoration in Antaibao Mining Area[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16**(1): 151-155.
- [13] 郭东罡, 上官铁梁. 中条山中段植物群落数量分类与排序研究[J]. *武汉植物学研究*, 2005(5): 444-448.
- GUO D G, SHANGGUAN T L. Quantitative Classification and Ordination of Plant Communities in Midpiece of Zhongtiao Mountains[J]. *J Wuhan Bot Res*, 2005(5): 444-448.
- [14] C D, RAUNKIAER C. The Life Forms of Plants and Statistical Geography: Being the Collected Papers of C. Raunkiaer[J]. *Geogr J*, 1934, **84**(5): 455. DOI: 10.2307/1786954.
- [15] WICKHAM H. Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis[M]. Berlin, Germany: Springer Publishing Company, Incorporated, 2009, 189-201.
- [16] KASSAMBARA A, MUNDT F. Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses[DS/OL]. CRAN: Contributed Packages, 2016. <https://cran.r-project.org/web/packages/factoextra/factoextra.pdf>.
- [17] 高贤明, 陈灵芝. 植物生活型分类系统的修订及中国暖温带森林植物生活型谱分析[J]. *植物学报*, 1998, **40**(6): 70-76. DOI: 10.3321/j.issn:1672-9072.1998.06.012.
- GAO X M, CHEN L Z. The Revision of Plant Life-Form System and an Analysis of the Life-Form Spectrum of Forest Plants in the Waem Temperate Zone of China[J]. *J Integr Plant Biol*, 1998, **40**(6): 70-76. DOI: 10.3321/j.issn:1672-9072.1998.06.012.

- [18] GUO H, ZHOU X B, TAO Y, *et al.* Perennial Herb Diversity Contributes More Than Annual Herb Diversity to Multifunctionality in Dryland Ecosystems of Northwestern China[J]. *Front Plant Sci*, 2023, **14**: 1099110. DOI: 10.3389/fpls.2023.1099110.
- [19] 高瑞, 艾宁, 刘广全, 等. 煤矿复垦区不同修复年限林下草本群落特征及其与土壤耦合关系[J]. 草业学报, 2022, **31**(6): 61-68. DOI: 10.11686/cyxb2021151.
- GAO R, AI N, LIU G Q, *et al.* Characteristics of Understory Herb Communities Across Time During Restoration in Coal Mine Reclamation Areas and Their Coupling with Soil Properties[J]. *Acta Prataculturae Sin*, 2022, **31**(6): 61-68. DOI: 10.11686/cyxb2021151.
- [20] 张琳, 陆兆华, 唐思易, 等. 露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价[J]. 生态学报, 2021, **41**(14): 5764-5774. DOI: 10.5846/stxb202007312000.
- ZHANG L, LU Z H, TANG S Y, *et al.* Slope Vegetation Characteristics and Community Stability at Different Restoration Years of Open-pit Coal Mine Waste Dump [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41**(14): 5764-5774. DOI: 10.5846/stxb202007312000.
- [21] 金山, 武帅楷. 太岳山油松林火烧迹地恢复初期植物群落结构特征[J]. 生态学报, 2021, **41**(10): 4182-4193. DOI: 10.5846/stxb202001230170.
- JIN S, WU S K. The Plant Community Structure of Burned *Pinus tabulaeformis* Forest in Taiyue Mountain in the Early Ecological Restoration Stage[J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41**(10): 4182-4193. DOI: 10.5846/stxb202001230170.
- [22] 赵冰清, 白中科, 郭东罡, 等. 黄土区露天煤矿排土场人工林下植被发育动态[J]. 地学前缘, 2021, **28**(4): 153-164. DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.10.18.
- ZHAO B Q, BAI Z K, GUO D G, *et al.* The Undergrowth Developmental Dynamics of Plantations in an Open-pit Coal Mine Waste Dump in Loess Area [J]. *Earth Sci Front*, 2021, **28**(4): 153-164. DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.10.18.
- [23] 闫明, 刘青青, 刘志萍, 等. 干旱和林分因子对树木死亡的影响: 以美国德克萨斯州东部国家森林为例[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(11): 2897-2906. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202211.002.
- YAN M, LIU Q Q, LIU Z P, *et al.* Impacts of Drought and Stand Factors on Tree Mortality: a Case Study of National Forests in East Texas, USA[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2022, **33**(11): 2897-2906. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202211.002.
- [24] 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. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202302.008.
- 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]. *Chin J Appl Ecol*, 2023, **34**(2): 305-314. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202302.008.
- [25] LEI W Y, PAN Q, TENG P J, *et al.* How does Soil Organic Matter Stabilize with Soil and Environmental Variables Along a Black Soil Belt in Northeast China? an Explanation Using FTIR Spectroscopy Data[J]. *CATENA*, 2023, **228**: 107152. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107152.
- [26] 李俊颖, 李新举, 吴克宁, 等. 济宁引黄复垦区不同年限土壤养分变化预测[J]. 土壤学报, 2018, **55**(6): 1358-1366. DOI: 10.11766/trxb201802250023.
- LI J Y, LI X J, WU K N, *et al.* Prediction of Variation of Soil Nutrient Status in Reclaimed Subsidence-damaged Farmlands by Filling with Yellow River Sediment Different in Reclamation History in Jining City[J]. *Acta Pedol Sin*, 2018, **55**(6): 1358-1366. DOI: 10.11766/trxb201802250023.
- [28] SONG T J, AN Y, TONG S Z, *et al.* Soil Water Conditions Together with Plant Nitrogen Acquisition Strategies Control Vegetation Dynamics in Semi-arid Wetlands Undergoing Land Management Changes[J]. *CATENA*, 2023, **227**: 107115. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107115.
- [29] 吕刚, 王婷, 李叶鑫, 等. 樟子松固沙林更新迹地草本植物多样性及其对土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(24): 8294-8303.
- LÜ G, WANG T, LI Y X, *et al.* Herbaceous Plant Diversity and Soil Physicochemical Properties on the Regeneration Slash of *Pinus sylvestris* Var. *Mongolica* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(24): 8294-8303.
- [30] 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. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2022.08.1396.
- CHEN X, LI Y H, ZUO Y F, *et al.* Effects of Stand Characteristics and Soil Nutrient Characteristics on Herbaceous Diversity[J]. *Acta Bot Boreali Occidentalia Sin*, 2022, **42**(8): 1396-1407. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2022.08.1396.
- [31] 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 lanceolate* Plantations with Different Community Structures[J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41**(6): 2118-2128.
- [32] 赵富王, 王宁, 苏雪萌, 等. 黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(5): 105-113. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.05.016. ZHAO F W, WANG N, SU X M, *et al.* Effects of Main Plant Roots on Soil Organic Matter and Aggregates in Loess Hilly Region[J]. *J Soil Water Conserv*, 2019, **33**(5): 105-113. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.05.016.
- [33] 张林, 周飘, 齐实, 等. 侧柏人工林林分空间结构对林下草本多样性的差异性影响及其关联度[J]. *生态环境学报*, 2022, **31**(9): 1794-1801. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.09.009. ZHANG L, ZHOU P, QI S, *et al.* Difference Influence of Spatial Structure of *Platycladus orientalis* Plantations on Diversity of Understory Herbaceous and Its Correlation Degree[J]. *Ecol Environ Sci*, 2022, **31**(9): 1794-1801. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.09.009.