

砒砂岩区4种人工林林下草本植物 多样性与土壤理化性质

张雨佳^{1,2}, 杨振奇², 李龙¹, 郭建英², 吕广林³

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古, 呼和浩特 010018; 2. 水利部

牧区水利科学研究所, 内蒙古, 呼和浩特 010020; 3. 鄂尔多斯市造林总场, 内蒙古, 鄂尔多斯 014300)

摘要: [目的] 分析砒砂岩区不同人工林类型对林下植被群落结构、物种多样性及土壤理化性质的影响, 为建设水土保持林选择适宜树种, 并为砒砂岩区植被恢复和物种多样性保护提供科学依据。[方法] 以内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡鲍家沟流域4种典型人工林(柠条林、山杏林、沙棘林、油松林)为研究对象, 以天然草地为对照(CK), 通过野外调查取样及室内试验, 并结合冗余分析等方法, 探究天然草地和4种典型人工林林下草本植物群落组成、物种多样性、土壤理化性质之间的关系。[结果] ①研究区林下草本植物共10科18属23种, 柠条林下草本植物种数最多, 共22种。4种人工林林下草本植物主要以菊科(Asteraceae)、禾本科(Gramineae)、豆科(Fabaceae)植物为主。②柠条林下草本层的盖度、生物量、Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数极显著高于其他植被类型($p < 0.01$)。③柠条林土壤含水率、土壤有机质和全氮含量极显著高于其他植被类型($p < 0.01$); 土壤有机质和全氮具有表层聚集效应。④土壤有机质和饱和导水率是影响人工林林下草本层物种多样性的主导因素; 地形是影响人工林下草本层的次要因素。[结论] 柠条是准格尔旗砒砂岩区水土保持林建设的优选树种, 兼具维持物种多样性与土壤改良的双重作用。

关键词: 砒砂岩区; 物种多样性; 土壤理化性质; 冗余分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0041-09

中图分类号: S714.2, S727.22

文献参数: 张雨佳, 杨振奇, 李龙, 等. 砒砂岩区4种人工林林下草本植物多样性与土壤理化性质[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 41-49. Zhang Yujia, Yang Zhenqi, Li Long, et al. Herbaceous plant diversity and soil physicochemical properties under four plantation types in Pisha sandstone area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 41-49.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.021

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.021

Herbaceous plant diversity and soil physicochemical properties under four plantation types in Pisha sandstone area

Zhang Yujia^{1,2}, Yang Zhenqi², Li Long¹, Guo Jianying², Lü Guanglin³

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of

Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 3. Ordos Forest Farm, Ordos, Inner Mongolia 014300, China)

Abstract: [Objective] The effects of different plantation types on understory vegetation community structure, species diversity, and soil physicochemical properties in Pisha sandstone area were analyzed, in order to select suitable tree species for constructing soil and water conservation forests and provide a scientific basis for vegetation restoration and species diversity conservation in Pisha sandstone area. [Methods] Four typical plantation types (*Caragana korshinskii*, *Prunus sibirica*, *Hippophae rhamnoides* and *Pinus tabulaeformis* forest) in Baojiagou

收稿日期: 2025-05-27

修回日期: 2025-08-11

采用日期: 2025-08-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“砒砂岩基岩岩性对植物水分利用及稳定维持的影响机制研究”(42307463); 内蒙古自治区揭榜挂帅项目(2024JBGS0023); 内蒙古自治区“科技兴蒙”行动重点专项(2022EEDSKJXM003); 国家重点研发计划项目(2023YFF1305104)

第一作者: 张雨佳(2000—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 1492210404@qq.com。

通信作者: 李龙(1989—), 男(汉族), 吉林省桦甸市人, 副教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: lilonghr@126.com。

watershed of Nuanshui Township, Jungar Banner, Ordos City, Inner Mongolia Autonomous Region, were selected as the research objects, with natural grassland (CK) as the control. Through field surveys, sampling, and laboratory experiments, the relationships among understory herbaceous plant community composition, species diversity, and soil physicochemical properties the natural grassland and the four typical plantations were investigated. [Results] ① The understory herbaceous vegetation in the study area comprised 23 species from 18 genera and 10 families. The *C. korshinskii* forest had the highest number of understory herbaceous species, with a total of 22. The understory herbaceous plants in the four plantations were mainly composed of species from the Asteraceae, Gramineae, and Fabaceae families. ② The coverage, biomass, Margalef richness index, and Shannon-Wiener diversity index of the understory herbaceous layer under the *C. korshinskii* forest were significantly higher than those under other vegetation types ($p < 0.01$). ③ The soil moisture content, soil organic matter, and total nitrogen content under the *C. korshinskii* forest were significantly higher than those under other vegetation types ($p < 0.01$). Soil organic matter and total nitrogen exhibited a surface aggregation effect. ④ Soil organic matter and saturated hydraulic conductivity were the dominant factors affecting the species diversity of the understory herbaceous layer in the plantations, while topography was a secondary factor. [Conclusion] *C. korshinskii* is the preferred tree species for constructing soil and water conservation forests in the Pisha sandstone area of Jungar Banner. It plays a dual role in maintaining species diversity and improving soil quality.

Keywords: Pisha sandstone area; species diversity; soil physicochemical properties; redundancy analysis

林下植物作为森林群落的关键组分,在维持植物多样性及生态系统稳定性方面具有不可替代的生态功能^[1]。植物多样性指特定区域内不同植物种类的组成及数量分布,不仅反映了植物与环境因子的相互作用,也体现了植物群落的复杂程度^[2]。因此,提高林下植物多样性有助于森林生态系统稳定。林下草本层生长状况受多种因素影响,包括林分结构^[3]、土壤理化性质^[4]、地形^[5]等。有研究表明,土壤理化性质对林下草本层具有显著影响^[6],同时也有研究表明,不同类型人工林林下草本多样性受土壤理化性质影响的程度存在差异^[2]。包雪源等^[7]对山杏、油松等人工林的研究表明,土壤有机质含量是制约人工林生长的直接限制因子,而地形因子(坡度和坡向)则间接影响人工林分布格局。余锦亚南等^[8]以油松林、小叶杨和柠条混交林等为研究对象,分析了不同人工林林下草本植物多样性和土壤理化性质,发现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。这些研究结果说明,不同类型人工林土壤理化性质与林下草本多样性的关系应当深入探究,科学选择适生造林树种对于最大化发挥人工林生态效益具有重要的实践意义。

砒砂岩区地处黄土高原与鄂尔多斯高原的生态过渡带,该地春冬季主要受风力侵蚀和冻融侵蚀的影响,夏秋季则频发暴雨引发水力侵蚀^[9]。砒砂岩岩性特征表现为成岩程度低、胶结物含量少,对风蚀和水蚀等外营力作用极为敏感,致使该区域成为黄土高原土壤侵蚀最为严重的生态脆弱区^[10]。自 20 世纪

80 年代末以来,砒砂岩区的基岩产沙问题引起了相关部门的高度重视,通过实施小流域综合治理、淤地坝工程、退耕还林(草)等一系列生态修复措施,区域生态环境质量得到显著改善,植被覆盖度有所提升,土壤侵蚀强度降低^[11]。砒砂岩区特殊的土壤质地和脆弱的生态环境特征,植被恢复与重建一直是该区域生态研究的热点。现有研究多聚焦于林分密度、林龄等因子对林下植物多样性和土壤理化性质的影响^[12-13],而对砒砂岩区典型人工林林下植物多样性与土壤理化性质的耦合关系研究相对不足。因此,本研究选取砒砂岩区广泛分布的典型人工林为研究对象,分析典型人工林林下植被结构、植物多样性及其与土壤因子的关系,以期为该区域植被恢复与物种多样性保护提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概述

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡鲍家沟流域(110°31′—110°35′E, 39°46′—39°48′N),海拔 1 110~1 300 m。该地区属温带大陆性气候,年均气温 7.2 °C,年平均降水量 400.0 mm,土壤类型以栗钙土为主。主要植物有山杏(*Prunus sibirica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 野外样地布设和植被调查

2024年7月在准格尔旗暖水乡鲍家沟流域选取4种(柠条林、油松林、山杏林、沙棘林)人工林地为研究对象,以天然草地为对照,其立地条件基本一致,均为阳坡、坡中地带。地温为22~25℃,风速为1.4~

1.6 m/s。在灌木样地内均匀布设3个5 m×5 m的灌木样方,在乔木样地内均匀布设3个20 m×20 m的乔木样方,采取每木检尺法调查样地内乔、灌木的胸径、树高、株数和冠幅(表1),并在每个样方内沿对角线布设3个1 m×1 m的草本样方,调查记录样方内植株的名称、数量、高度、盖度等。

表1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

样地	海拔高度/m	坡度/(°)	样地面积/m ²	平均树高/m	平均胸径(冠幅)/cm	行距/m	土层厚度/cm
柠条	1 190	13	5 500	1.13	193×204	2×3	10
沙棘	1 104	11	3 900	1.42	101×111	2×2	25
山杏	1 133	12	4 200	3.10	24	3×4	0
油松	1 150	10	6 400	3.35	30	3×4	20
天然草地	1 154	13	4 000				0

1.2.2 林下草本生物量测定及物种多样性分析

对草本样方内植物物种组成、株数、高度、盖度进行统计与测定,计算植物的相对盖度、相对高度和相对频度,最终得到物种重要值。使用Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数4个指标分析物种多样性。剪取样方内所有植物的地上部分,装入牛皮纸袋中,称量鲜重后带回实验室,在75℃烘箱内烘至恒重后称重,用于计算地上生物量。

1.2.3 土壤理化性质测定

每个样地内挖取3个土壤剖面,按照(0,10],(10,20],[20,30],[30,40],[40,50],[50,60] cm分层采集土样,装入塑封袋内带回,进行土壤理化性质的测定。

土壤含水量采用烘干法;容重采用环刀法;土壤粒径采用马尔文3000激光粒度衍射仪测定;土壤有机质采用重铬酸钾外加热法;土壤全氮采用凯氏定氮法;土壤全磷采用浓硫酸-高氯酸混合消煮-钼锑抗比色法;土壤全钾采用NaOH熔融-火焰光度计法^[14]。

1.2.4 数据处理

草本物种重要值(P)计算公式为

$$P = \frac{R_H + R_C + R_F}{3} \quad (1)$$

式中: P 为重要值; R_H 为相对高度; R_C 为相对盖度; R_F 为相对频度。

Margalef物种丰富度指数(D_{Mg})计算公式为

$$D_{Mg} = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (2)$$

式中: S 为物种数; N 为所有物种的个体总数。

Shannon-Wiener多样性指数(H')计算公式为

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (3)$$

Simpson优势度指数(D)计算公式为

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (4)$$

式中: P_i 为物种 i 个体数占全部个体数的比。

Pielou均匀度指数计算公式为

$$J = \frac{H'}{\ln S} \quad (5)$$

风速、温度等环境因子通过仪器HOBOU30获取。采用SPSS 26.0进行描述性统计和单因素方差分析,检验不同植被类型的林下草本及土壤理化性质的显著性差异,进一步使用最小显著差数法(LSD)检验不同植被类型下各特征指标差异。使用Origin 2024软件绘图。物种多样性与土壤理化性质之间的关系采用Canoco 5.0软件进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 不同林分植物群落特征

2.1.1 植物群落生长特征

由表2可知,林下草本层植物共10科,18属,23种。其中菊科4种,禾本科4种,豆科8种,唇形科2种,分别占物种总数的25.2%,24.3%,19.6%,7.2%。不同林地物种数变化趋势为:柠条>山杏>油松>天然草地>沙棘。柠条林和天然草地物种数量差值为12,可见不同林分内草本植物群落组成不同且结构复杂。

由表3可知,不同人工林林下草本层生长状况存在差异。柠条林下草本盖度最高,为70.67%,极显著高于其他植被类型($p<0.01$);天然草地的盖度最低,为20.17%,仅为柠条林下的1/3。各植被类型地上生

物量也存在极显著差异($p < 0.01$), 柠条林下草本生物量最高, 为 111.35 g/m^2 , 分别是沙棘和油松林下草本生物量的 1.80 倍和 2.03 倍, 草地生物量为 29.11 g/m^2 , 柠条林下草本生物量是其 3.83 倍。各植被类型林下草本层的平均高度存在极显著差异($p < 0.01$), 表现为: 柠条 > 沙棘 > 油松 > 山杏 > 天然草地。

表 2 不同林分林下草本植物群落物种组成
Table 2 Species composition of herbaceous plant communities under different forest stands

样地	科	属	种
柠条	8	15	22
山杏	8	11	13
油松	7	10	11
沙棘	4	7	9
天然草地	4	6	10

2.1.2 植物群落组成重要值

样地内主要以多年生草本和半灌木草本为主。

表 4 不同林下草本的重要值
Table 4 Important values of different understory herbaceous species

样地	主要物种及重要值
柠条	羊草(1.11)+狼毒(0.81)+铁杆蒿(0.80)+本氏针茅(0.74)+草木樨(0.52)
山杏	羊草(0.97)+铁杆蒿(0.75)+本氏针茅(0.67)+草木樨(0.63)+油蒿(0.49)
油松	狼毒(0.67)+本氏针茅(0.66)+羊草(0.50)+冷蒿(0.44)+细叶韭(0.43)
沙棘	羊草(0.77)+艾蒿(0.67)+草木樨状黄芪(0.51)+冷蒿(0.43)+糙叶黄芪(0.34)
天然草地	油蒿(0.33)+赖草(0.19)+草木犀状黄芪(0.15)+细叶韭(0.11)+阿尔泰狗娃花(0.11)

注:表中仅列出重要值排名前 5 位的林下草本植物。

2.1.3 植物群落多样性特征

由表 5 可知, 柠条林下草本 Margalef 丰富度指数显著高于其他植被类型, 而天然草地 Margalef 丰富度指数显著低于其他植被类型, 且不足柠条林下草本 Margalef 丰富度的 2/3。Shannon-Wiener 多样性指数考虑了物种丰富度与均匀度, 人工林中, 柠条林下草

表 4 列出了不同人工林林下草本层重要值排名前 5 位物种, 多为耐旱、耐寒强的植物。建群种以本氏针茅(*Stipa bungeana*)、羊草(*Leymus chinensis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*) 为主; 半灌木优势种为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*); 其他伴生种主要有艾蒿(*Artemisia argyi*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)、阿尔泰狗娃花等。

表 3 不同林下草本植物群落特征
Table 3 Characteristics of different understory herbaceous plant communities

样地	盖度/%	生物量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	平均高度/cm
柠条	70.67 ± 6.64^a	111.35 ± 8.72^a	17.75 ± 0.64^a
沙棘	41.33 ± 1.15^b	61.87 ± 3.59^b	11.90 ± 0.30^b
油松	37.30 ± 3.74^b	54.79 ± 3.98^b	10.69 ± 0.79^c
山杏	29.00 ± 0.80^c	35.77 ± 0.44^c	9.39 ± 0.48^d
天然草地	20.17 ± 1.04^d	29.11 ± 0.80^c	8.96 ± 0.42^d

注:表中同列不同小写字母表示差异极显著($p < 0.01$)。

本 Shannon-Wiener 多样性指数最高, 为 2.01, 山杏林最低, 为 1.49。

各人工林下草本 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数具有显著差异($p < 0.05$)。Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数无显著差异($p > 0.05$)。

表 5 不同林分林下草本层植物群落物种多样性指数特征

Table 5 Characteristics of species diversity indices of understory herbaceous plant communities under different forest stands

样地	Margalef 丰富度指数(D_{Mg})	Pielou 均匀度指数(J)	Shannon-Wiener 多样性指数(H')	Simpson 优势度指数(D)
柠条	2.47 ± 0.27^a	0.77 ± 0.06^a	2.01 ± 0.08^a	0.81 ± 0.06^a
沙棘	1.64 ± 0.04^b	0.82 ± 0.02^a	1.71 ± 0.04^b	0.78 ± 0.02^{ab}
油松	1.57 ± 0.03^b	0.75 ± 0.06^a	1.60 ± 0.08^c	0.73 ± 0.04^{ab}
山杏	1.30 ± 0.04^c	0.79 ± 0.05^a	1.49 ± 0.04^d	0.71 ± 0.08^{ab}
天然草地	1.25 ± 0.03^c	0.83 ± 0.01^a	1.40 ± 0.02^d	0.69 ± 0.02^b

注:表中同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

2.2 不同林分土壤理化特征

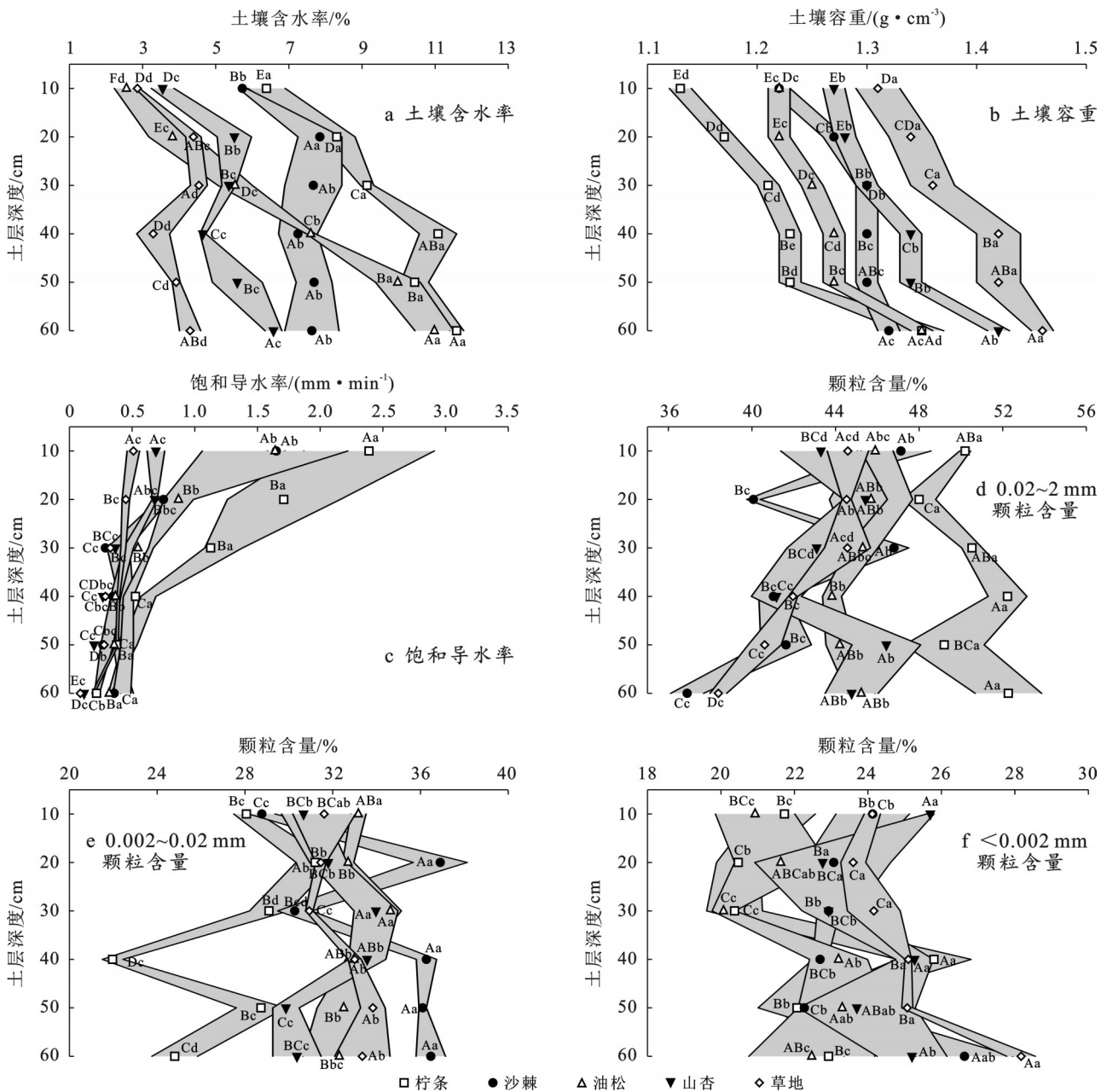
2.2.1 土壤物理性质

由图 1a 可知, 随土层深度增加, 各植被类型土壤含水率均有所增加, 且各土层间均存在显著差异 ($p < 0.01$), 0—40 cm 柠条土壤含水率显著高于其他植被类型 ($p < 0.01$), 40—60 cm 柠条和油松土壤含水率显著高于其他植被类型 ($p < 0.01$), 不同人工林土壤含水率均值表现为: 柠条 > 沙棘 > 油松 > 山杏 > 天然草地。

由图 1b 可知, 不同人工林 0—60 cm 的土壤容重均呈增加的趋势, 且存在显著差异 ($p < 0.01$), 均

值表现为: 草地 (1.39 g/cm^3) > 山杏 (1.33 g/cm^3) > 沙棘 (1.29 g/cm^3) > 油松 (1.26 g/cm^3) > 柠条 (1.22 g/cm^3), 说明柠条林对土壤容重的影响大于天然草地。

由图 1c 可知, 随土层加深土壤饱和导水率不断减少, 各土层间存在显著差异 ($p < 0.01$)。柠条、沙棘和油松林土壤饱和导水率在 0—30 cm 处急剧下降, 而山杏林土壤和天然草地土壤变化趋势较为平缓, 饱和导水率最终在 40—60 cm 土层接近, 主要由于人工林下土层厚度不同, 山杏和天然草地的砒砂岩较为裸露。



注: 不同大写字母表示同一植被类型不同土层间差异显著 ($p < 0.05$) 及差异极显著 ($p < 0.01$)。不同小写字母表示同一土层不同植被类型间差异显著 ($p < 0.05$) 及差异极显著 ($p < 0.01$)。下同。

图 1 不同林分 0—60 cm 土壤物理性质

Fig.1 Soil physical properties at 0—60 cm depth under different forest stands

由图 1d 和 1f 可知, 柠条土壤各土层砂粒含量均显著高于其他植被类型 ($p < 0.05$), 变化范围为 47%~51%。山杏和天然草地黏粒含量显著高于其他植被类型 ($p < 0.05$), 分别为 24.26% 和 25.04%。不同人工林下土壤机械组成差异均表现为: 砂粒 > 粉粒 > 黏粒。随土层深度的增加, 各粒径均表现出先增大后减小再增大的趋势。因此, 相比于其他林分, 柠条土壤相对疏松, 土壤水分条件更好。

2.2.2 土壤化学性质

由图 2a 可知, 不同林分土壤有机质含量在 6.68~22.90 g/kg 之间, 主要积累在表层 (0—10 cm)。表层天然草地有机质含量最低 (12.04 g/kg), 柠条有

机质含量最高 (21.57 g/kg), 与其他植被类型存在极显著差异 ($p < 0.01$); 由图 2a 和图 2b 可知, 土壤有机质含量和全氮含量平均值表现为柠条和沙棘显著高于其他植被类型, 其余依次为油松、山杏、天然草地, 不同林下土壤有机质含量和全氮含量在 0—60 cm 土层均表现为下降趋势, 且各土层间均呈极显著差异 ($p < 0.01$)。全钾含量总体表现为山杏林和天然草地最高。土壤有机质、全氮和全钾均呈现出明显的表层聚集效应, 全磷含量在不同林分 and 不同土层上变化均不明显 (图 2c)。不同植被对土壤有机质、全氮含量具有极显著影响 ($p < 0.01$), 对全钾含量具有显著影响 ($p < 0.05$) (图 2d)。

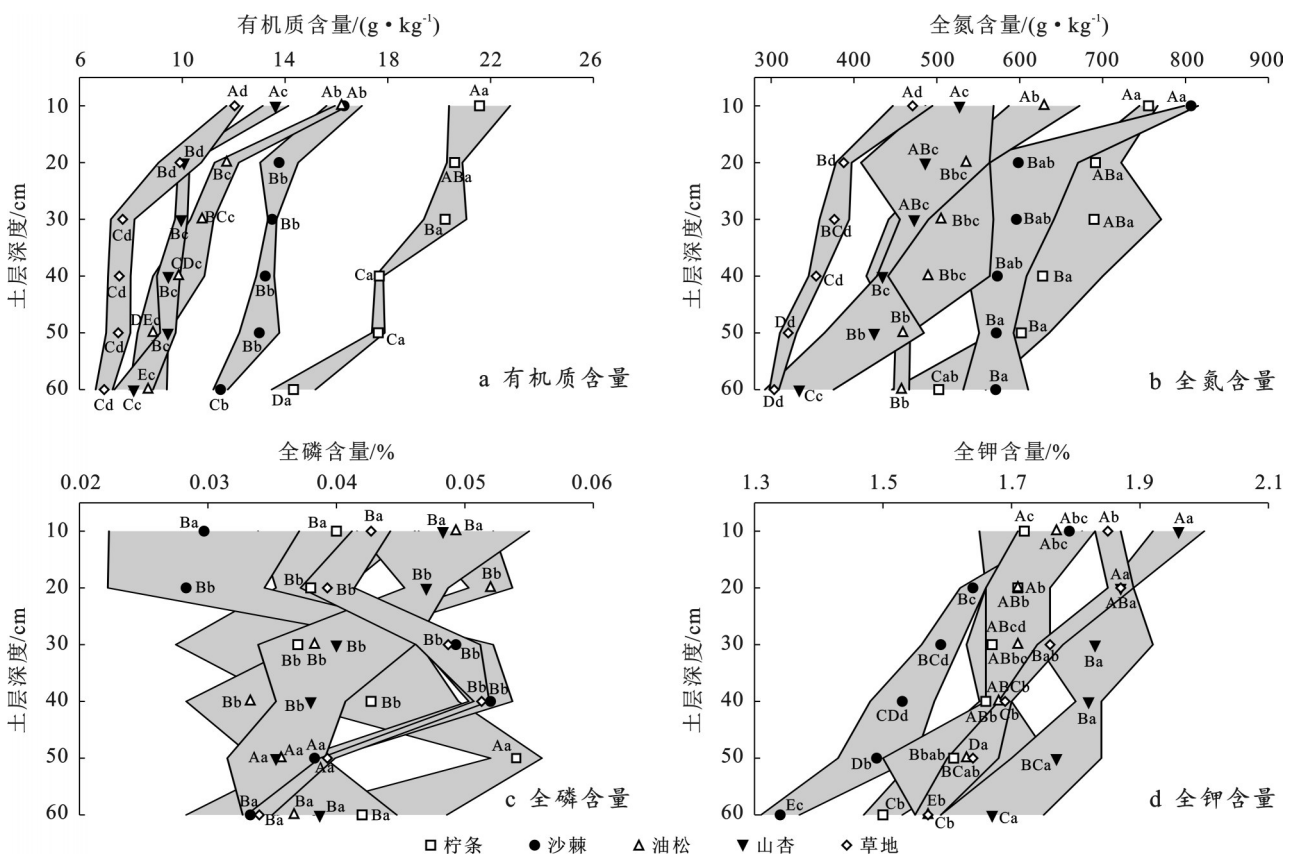


图 2 不同林分土壤养分特征

Fig.2 Soil nutrient characteristics under different forest stands

2.3 林下植物多样性与土壤理化性质的关系

研究表明, 物种多样性与土壤理化因子的 RDA 排序累计解释 99.43% 的群落特征变化。在物种多样性与土壤因子的 RDA 排序中, 第一轴 ($F=56.7, p=0.016$) 和所有轴 ($F=29.1, p=0.02$) 的蒙特卡罗检验结果显著 ($p < 0.05$), 物种多样性与土壤理化性质具有较好的相关性。图 3 为物种多样性 (样地) 与土壤因子的 RDA 分析, 样地间的距离可以反映样地的相似度, 可以看出柠条和天然草地生境差异

较大。从图 3 中土壤因子箭头的连线长度及土壤因子与物种多样性的夹角可以看出土壤因子对物种多样性的影响。草本层物种 Shannon-Wiener 多样性指数与土壤有机质、含水率、饱和导水率、全氮和砂粒呈正相关。

3 讨论

物种多样性是草本群落物种均匀度和丰富度的整体表现, 反映了群落结构的稳定性和生境差异^[15]。

本研究中不同植被类型的植被群落物种多样性指数较低^[8],可能是由于砒砂岩区环境恶劣,物种单一,不同植被类型林下草本群落中羊草、本氏针茅等耐旱、耐贫瘠的禾本科物种占据主导地位。研究表明,柠

条林下草本物种数量相对较多,物种丰富度高,潜在的生态系统功能可能更丰富。植被盖度、生物量、平均高度对预防降雨侵蚀、坡面径流和涵养水土具有重要作用^[16]。

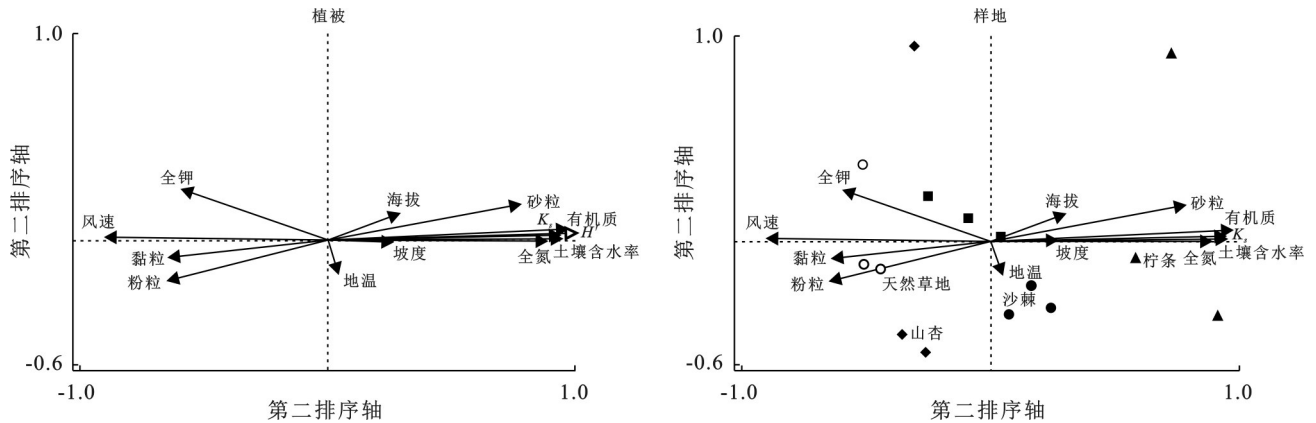


图3 样地物种多样性指数与土壤理化性质 RDA 排序图

Fig.3 RDA ordination diagrams of species diversity indices and soil physicochemical properties of sample plots

本研究中,柠条林下草本盖度是天然草地的3倍,林下草本生物量也显著高于其他植被类型。其原因可能是柠条具有良好的固氮能力,使土壤养分在表层聚集;其根系发达,促进土壤水分下渗和养分循环;柠条对地表水分和养分的改善作用使其林下环境适应多个物种生长。研究结果显示,柠条林地林下草本生长发育最佳,灌木林地林下草本植物生长发育优于乔木林地。

砒砂岩区土壤具有质地疏松,肥力低下,持水保肥能力弱等显著特征^[17]。然而,不同植被类型因凋落物输入量及其分解速率的差异,导致林下土壤理化性质呈现显著差异,进而影响林下草本植物的生长发育^[18-19]。本研究表明,油松林土壤含水率变化最为显著,呈现持续增加趋势,这主要归因于降水对表层土壤水分补给作用较强,进而对深层土壤水分利用相对有限,从而导致表层土壤含水率维持在较低水平。土壤颗粒机械组成是土壤的重要组成部分,不同粒径含量的多少可以反映土壤提供养分的能力^[20];土壤有机质作为植物养分的重要来源,是评价土壤养分的重要指标之一^[21-22],柠条林下土壤表层有机质含量是天然草地的1.79倍,主要是因为柠条林下植物种类及生物量较多,提高了土壤有机质的含量。土壤全氮含量受植被类型和土壤质地等多重环境因子影响,与地表植被特征密切相关^[21];因土壤全氮大部分来源于土壤有机质,故二者变化趋势相似^[23]。

本研究发现,不同植被类型中,土壤有机质量和全氮含量均表现为:柠条>沙棘>油松>山杏>天

然草地,其中沙棘林表层土壤氮元素含量最高,这可能与其固氮能力较强有关。土壤全磷含量主要受土壤质地的影响^[24],其总体表现为:人工草地>柠条>山杏>油松>沙棘,且各林分类型的土壤全磷含量随土层深度的变化不明显。不同植被类型的土壤养分含量差异可能源于各植物群落对养分需求的异质性,进而导致不同林分土壤养分含量不同。因此,相比于其他林分,柠条林土壤相对疏松,土壤水分条件更好,而灌木林的土壤有机质含量和全氮含量最高。

在既往研究中,物种多样性与土壤理化性质之间的关系多采用传统的相关性分析方法进行探讨,本研究引入约束性排序的方法,将物种多样性数据沿土壤因子和地形因子的环境梯度进行排序。所选用的地形因子和土壤因子指标体系较为全面,涵盖了影响砒砂岩区人工林下草本物种多样性的关键环境变量。研究结果表明,有机质、饱和导水率、土壤含水率、全氮是影响人工林下草本物种多样性的主导因子,而海拔、坡度、地温的作用次之。

柠条作为豆科灌木,在干旱、半干旱地区的生态恢复中表现出良好的持水能力。研究表明,种植柠条可以显著降低土壤容重,改善土壤孔隙结构,提高土壤持水能力^[25];同时,柠条的凋落物分解速度快,土壤有机质含量高,团聚体更易形成,土壤导水率进一步得到提高^[26];柠条土壤的高饱和导水率和持水能力使其在干旱区生态恢复中显著优于油松等乔木。未来砒砂岩区的生态建设中应将柠条作为优先树种,以实现更高效的水土保持效益。

4 结论

(1) 砒砂岩区典型人工林草本层有10科,18属,23种植物,以菊科、禾本科、豆科、唇形科植物为主,柠条林下草本植物种类最多,沙棘林最少。

(2) 柠条林地土壤疏松,土壤水分和养分条件更好。各样地土壤有机质、全氮、全钾含量随土层深度的增加呈减少趋势,全氮含量的空间分布规律与有机质一致。灌木林的土壤有机质含量和全氮含量相对较高。

(3) 土壤有机质是影响该区人工林林下草本植物物种多样性的主导因素。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Yunxiang, Liu Tairui, Guo Jingping, et al. Changes in the understory diversity of secondary *Pinus tabulaeformis* forests are the result of stand density and soil properties [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021,28:e01628.
- [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 Wanyi, Yu Xinxiao, Jia Guodong, 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] 金锁,毕浩杰,刘佳,等.林分密度对云顶山柏木人工林群落结构和物种多样性的影响[J].北京林业大学学报,2020,42(1):10-17.
Jin Suo, Bi Haojie, Liu Jia, et al. Effects of stand density on community structure and species diversity of *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020,42(1):10-17.
- [4] 林丽,代磊,林泽北,等.黔中城市森林群落植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J].生态环境学报,2021,30(11):2130-2141.
Lin Li, Dai Lei, Lin Zebei, et al. Plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties of urban forest communities in central Guizhou [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021,30(11):2130-2141.
- [5] 温佩颖,金光泽.地形对阔叶红松林物种多样性的影响[J].生态学报,2019,39(3):945-956.
Wen Peiying, Jin Guangze. Effects of topography on species diversity in a typical mixed broadleaved-Korean pine forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(3):945-956.
- [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 Juntao, Zhang Jianjun, Wang Hengxing, 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] 包雪源,杨振奇,郭建英,等.黄河流域砒砂岩区典型水土保持植被生长特征及限制因素研究[J].西北林学院学报,2023,38(1):50-57.
Bao Xueyuan, Yang Zhenqi, Guo Jianying, et al. Growth characteristics and limiting factors of typical soil and water conservation vegetation in the feldspathic sandstone region of the Yellow River [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023,38(1):50-57.
- [8] 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.
- [9] 张攀,姚文艺,肖培青,等.黄河流域砒砂岩区多动力侵蚀交互叠加效应研究[J].水利学报,2022,53(1):109-116.
Zhang Pan, Yao Wenyi, Xiao Peiqing, et al. Interactive superposition effect of multi-dynamic erosion in the Pisha sandstone area of the Yellow River basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022,53(1):109-116.
- [10] 肖培青,姚文艺,刘慧.砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径[J].人民黄河,2014,36(10):92-94.
Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Liu Hui. Research progress and harnessing method of soil and water loss in Pisha sandstone region [J]. *Yellow River*, 2014, 36(10):92-94.
- [11] 秦富仓,杨振奇,李龙.砒砂岩区土壤侵蚀机理与生态修复技术研究进展[J].北京林业大学学报,2020,42(12):142-150.
Qin Fucang, Yang Zhenqi, Li Long. Research progress on soil erosion mechanism and ecological restoration technology in feldspathic sandstone region [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020,42(12):142-150.
- [12] 李婧豪,马英,张彬彬,等.北京地区典型人工林分密度对植物多样性和生物量的影响[J].东北林业大学学报,2025,53(9):13-19.
Li Jinghao, Ma Ying, Zhang Binbin, et al. The impact of stand density on plant diversity and biomass in typical plantations in Beijing area [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025,53(9):13-19.

- [13] 白荣芬. 不同林龄和密度的红松人工林植物多样性分析[J]. 林业科技通讯, 2025(6):31-35.
Bai Rongfen. Analysis of plant diversity in *Pinus koraiensis* plantations with different forest ages and densities [J]. Forest Science and Technology, 2025(6):31-35.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [15] 郝志远, 李素清. 阳泉矿区煤矸石山复垦地不同植被下草本植物群落生态关系[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(5):1158-1164.
Hao Zhiyuan, Li Suqing. Ecological relationships in herbaceous plant communities under different plantations on reclaimed coal gob piles in the Yangquan mining area, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(5):1158-1164.
- [16] 张春霞, 董智, 高波, 等. 侵蚀性雨型分类及不同植被类型对棕壤坡面土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2):36-41.
Zhang Chunxia, Dong Zhi, Gao Bo, et al. Effects of erosive rainfall patterns and different vegetation types on soil erosion in slope with brown soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2):36-41.
- [17] 赵晓雪, 饶良懿, 申震洲. 砒砂岩区不同地形位置土壤物理性质分异特征[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6):1359-1368.
Zhao Xiaoxue, Rao Liangyi, Shen Zhenzhou. Heterogeneous characteristics of soil physical properties of different terrain locations in the Pisha sandstone area [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(6):1359-1368.
- [18] 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区小流域土壤有机质的空间分布及其环境影响因素研究[J]. 土壤, 2020, 52(3):625-632.
Yang Zhenqi, Qin Fucang, Li Long, et al. Study on spatial distribution of SOM and environmental impact factors in small watershed of feldspathic sandstone region [J]. Soils, 2020, 52(3):625-632.
- [19] 姜丽娜, 马洁, 刘建康, 等. 毛乌素沙地不同植被恢复措施下土壤理化性质空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5):1-7.
Jiang Lina, Ma Jie, Liu Jiankang, et al. Spatial distribution of soil physicochemical properties under different vegetation restoration measures in Mu Us sand land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5):1-7.
- [20] 张缓. 黄土高原不同植被带土壤理化性质及枯落物持水特征研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Zhang Huan. Study on soil property and water holding characteristics of different vegetation belt in the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2021.
- [21] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 等. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(15):5594-5602.
Gao Junliang, Luo Fengmin, Gao Yong, et al. Ecological soil C, N, and P stoichiometry of different land use patterns in the agriculture-pasture ecotone of northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15):5594-5602.
- [22] 胡小燕, 段爱国, 张建国, 等. 南亚热带杉木人工成熟林密度对土壤养分效应研究[J]. 林业科学研究, 2018, 31(3):15-23.
Hu Xiaoyan, Duan Aiguo, Zhang Jianguo, et al. Effect of stand density on soil nutrient of Chinese fir mature plantations in south Asia subtropical zone [J]. Forest Research, 2018, 31(3):15-23.
- [23] 张春霞, 董智, 高波, 等. 侵蚀性雨型分类及不同植被类型对棕壤坡面土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2):36-41.
Zhang Chunxia, Dong Zhi, Gao Bo, et al. Effects of erosive rainfall patterns and different vegetation types on soil erosion in slope with brown soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2):36-41.
- [24] Chen Xiongwen, Li Bailian. Change in soil carbon and nutrient storage after human disturbance of a primary Korean pine forest in northeast China [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 186(1/2/3):197-206.
- [25] Chen Tianyu, Qu Ning, Wang Jinxiao, et al. Effects of different ecological restoration methods on the soil physicochemical properties and vegetation community characteristics of the Baotou light rare earth tailings pond in Inner Mongolia, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(13):19725-19737.
- [26] 郭鑫, 卢立娜, 贺晓辉, 等. 毛乌素沙地人工固沙灌木林凋落物分解及改良土壤的研究[J]. 林业资源管理, 2014(5):74-78.
Guo Xin, Lu Lina, He Xiaohui, et al. Study on litter decomposition and soil improvement in artificial shrub forest in Maowusu sandy land [J]. Forest Resources Management, 2014(5):74-78.