

砒砂岩区不同油松人工林密度对林下植物多样性与土壤理化性质的影响

樊东¹, 杨振奇^{1,2}, 秦富仓³, 张铁军², 王鑫²

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010018; 2.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 3.内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010010)

摘要: [目的] 研究不同造林密度对油松人工林林下植物群落结构、物种多样性及土壤理化性质的影响, 确定适宜的水土保持林经营管理密度, 为砒砂岩区油松人工林生态功能提升和可持续发展提供参考依据。[方法] 以准格尔旗西黑岱徐家门前沟坡面油松人工林为研究对象, 通过野外取样调查及室内实验, 探究4种造林密度(950, 2 000, 3 250, 4 300株/hm²)条件下林下草本植物群落组成、物种多样性和土壤理化性质的相互关系。[结果] ①研究区林下草本植物共有9科19属33种, 植物种数在造林密度为3 250株/hm²时最多。油松林下草本植物群落主要以禾本科(Gramineae)、菊科(Compositae)、豆科(Fabaceae)、蔷薇科(Rosaceae)植物为主, 随着造林密度增加, 伴生优势种由阳生、中生性物种向阴生性物种过渡。②不同造林密度处理下, 林下草本层物种多样性指数、植株高度、生物量以及土壤有机质、速效氮磷钾含量、土壤含水量均表现为: 3 250株/hm² > 4 300株/hm² > 950株/hm² > 2 000株/hm²。③造林密度对林下土壤含水量、有机质以及速效氮磷钾含量影响显著($p < 0.05$), 对植物物种多样性指数则无显著影响($p > 0.05$)。在相关性分析中, 土壤有机质、速效氮磷钾含量与草本层物种多样性指数之间关系最为密切。[结论] 准格尔旗砒砂岩区油松人工林造林密度在3 250株/hm²时更利于其林下植物的生长和土壤肥力的改良。

关键词: 林下植物多样性; 造林密度; 植被恢复; 油松人工林; 砒砂岩区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0068-09

中图分类号: S791.254, S714.2

文献参数: 樊东, 杨振奇, 秦富仓, 等. 砒砂岩区不同油松人工林密度对林下植物多样性与土壤理化性质的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 68-76. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.008; Fan Dong, Yang Zhenqi, Qin Fucang, et al. Influence of afforestation density on plant diversity and soil physicochemical properties of *Pinus tabulaeformis* in arsenic sandstone area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 68-76.

Influence of Afforestation Density on Plant Diversity and Soil Physicochemical Properties of *Pinus Tabulaeformis* in Arsenic Sandstone Area

Fan Dong, Yang Zhenqi, Qin Fucang, Zhang Tiejun Wang Xin

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

University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology

National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research,

Beijing 100038, China; 3. Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: [Objective] The effects of different planting densities on plant community structure, species diversity, and soil physicochemical properties of *Pinus tabulaeformis* plantation were studied, and the appropriate management density of soil and water conservation forest were determined to provide reference for the improvement of ecological function and sustainable development of *P. tabulaeformis* plantation in the arsenic sandstone area. [Methods] Taking *P. tabulaeformis* plantation on the slope of Xujiamen Qiangou in

收稿日期: 2024-05-10

修回日期: 2024-07-24

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目“黄河十大孔兑流域生态修复空间精准识别与智慧水土保持技术”(2021GG0052); 内蒙古自治区“科技兴安”行动重点专项(2022EEDSKJXM003); 鄂尔多斯重点水土流失区生态系统(西黑岱流域)水土保持综合整治技术集成效益评估项目; 国家自然科学基金项目(42307463); 内蒙古自然科学基金项目(2021BS04009)

第一作者: 樊东(1999—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 1466840799@qq.com。

通信作者: 秦富仓(1966—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持方面的研究。Email: Qinfc@126.com。

Xiheidai of Zhungeer Banner as the research site, the relationship between understory herbaceous plant community composition, species diversity and soil physical and chemical properties under four planting densities (950, 2 000, 3 250, 4 300 plant/hm²) was explored through field sampling and indoor investigation. [Results] ① There were 33 species from 9 families and 19 genera in the study area, and the number of plant species was the highest when the afforestation density was 3 250 plant/hm². The understory herbaceous plant communities of *P. tabulaeformis* were mainly Gramineae, Compositae, Fabaceae and Rosaceae. With the increase of afforestation density, the associated dominant species transited from sunny and mesophytic species to shady species. ② The species diversity index, plant height, biomass, soil organic matter, available nitrogen, phosphorus and potassium content, and soil water content in the understory herbaceous layer were 3 250 plants/hm² > 4 300 plants/hm² > 950 plants/hm² > 2 000 plants/hm². ③ Afforestation density had significant effects on soil water content, organic matter and available nitrogen, phosphorus and potassium content ($p < 0.05$), but had no significant effects on plant species diversity index ($p > 0.05$). In the correlation analysis, soil organic matter, available nitrogen, phosphorus and potassium content were most closely related to the species diversity index of herbaceous layer. [Conclusion] The planting density of 3 250 plant/hm² was more conducive to the growth of understory plants and the improvement of soil fertility in the arsenic sandstone area of Zhungeer Banner.

Keywords: understory plant diversity; afforestation density; vegetation restoration; *Pinus tabulaeformis* plantation; arsenic sandstone area

森林是陆地最主要的生态系统之一,物种多样性丰富,群落结构复杂,是植物生长与能量交换的重要场所^[1]。人工造林是自然条件恶劣的干旱、半干旱地区森林生态恢复的重要途径之一,在影响人工林地生长发育的诸多因子中,造林密度的可调控程度最高^[2]。林冠层是植被与外界环境接触作用的第一界面^[3],冠层郁闭度的大小直接影响着林冠层遮荫,截留降水,抑制土壤水分蒸发等效应^[4]。光照显著影响着植物生长温度、蒸腾和光合作用以及土壤水分的蒸散^[5],是植物生长必不可少的条件之一^[6],造林密度的差异使植物在不同的自然光照和遮阴环境下,会通过调整形态结构和生理生态特性来适应一定范围内的光强环境,造成植物生长与土壤养分的分配利用状况有差异^[7]。冠层截留在林地生态系统中扮演着重要角色^[8],其延长了降雨落地时间,削弱雨滴溅蚀的同时减缓了径流对土壤的冲刷^[9],对林下土壤对水分的吸收和养分的维持起重要作用^[10]。枯落物作为森林物质、水文循环的第二界面^[11],不仅可以抑制土壤水分蒸发、减缓地表径流、防止土壤溅蚀,还可以通过微生物分解改善土壤结构,增加土壤养分,起到调节土壤肥力的作用^[12],而光照强度也对枯落物的凋谢以及微生物的分解速度有显著影响^[13]。造林密度通过控制林冠层郁闭度来调节冠层截留、林下光照、温度、枯落物数量以及植物与土壤水分特征^[14],这些因子又相互作用进而影响着林下植物生长发育、物种组成、数量以及土壤养分、水分的含量^[15]。目前诸多研究结果均表明造林密度的改变对人工林下植被

恢复有显著影响,适宜的造林密度可以有效提高林下植被多样性,改善群落稳定性以及水土保持功效^[16]。因此,研究造林密度对人工林地植物多样性和土壤理化特征的影响机制,可以为人工林地合理种植与水土保持林持续经营管理提供重要的理论依据^[17]。

砒砂岩区基岩成岩程度低,夏末秋初暴雨集中,高含沙洪水暴发频率高,该区面积仅 1.67×10^4 km²,是黄河流域上中游段的泥沙集中来源区。过去几十年来,国家各级部门在山西、陕西、内蒙古等地开展了以人工林种植为主的生态恢复工程。经过专家学者的不懈努力,砒砂岩区植被配置治理模式逐渐趋于成熟。油松是砒砂岩区的乡土树种,因其抗干旱、抗贫瘠、适应性强,作为水土保持乔木树种被广泛种植于砒砂岩区坡面。经调查发现砒砂岩区油松人工林疏密程度不一,其林下草本面积、物种多样性和长势差异显著。因此,本文以准格尔旗西黑岱徐家门前沟内4种造林密度的油松人工林为研究对象,通过野外样地调查,分析油松人工林下植物群落组成、物种多样性指数和土壤理化性质随造林密度的变化,探讨造林密度与林下物种多样性和土壤理化性质的相互关系,确定适宜的水土保持林经营管理密度,以期为砒砂岩区油松人工林生态功能提升和可持续发展提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗薛家湾镇西黑岱沟流域,该区基岩大面积裸露,出露面积超

过总面积 70%，上覆薄层的黄土，深度为 40~60 cm，下伏砒砂岩，土壤类型以栗钙土为主。地貌多呈岗状丘陵，沟壑密度平均为 5~7 km/km²，海拔高度在 1 110~1 300 m。属温带大陆性气候，冬季漫长干燥，夏季短暂温热，年降雨量 400 mm，降雨量集中在夏季 6—8 月，降雨形式以暴雨为主。试验区附近布设有径流小区若干，沟口设有三角堰，均与实验所选样地距离较远。研究区天然本土植被保存不多，种类单一，植被覆盖度低，草本主要有大针茅 (*Stipa grandis*)、百里香 (*Thymus mongolicus*) 等；灌木主要有沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、柠条 (*Caragana korshinskii*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*) 等；乔木类

主要是油松 (*Pinus tabulaeformis*)。

1.2 研究方法

1.2.1 野外样地布设和植被调查 于 2023 年 8 月在准格尔旗西黑岱沟上游以生长良好，林分结构基本一致的典型油松人工林为研究对象，选取 4 种 (950, 2 000, 3 250, 4 300 株/hm²) 造林密度，每种密度下选取坡度、坡向、海拔高度等基本相同的乔木样地 4 个均匀布设的 20 m×20 m 样方，并采取每木检尺法调查样方内油松的胸径、树高、株数以及冠幅，在每个乔木样方内再设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方，调查记录样方内灌木和草本植株的名称、数量、高度、盖度等。表 1 为样地的基本信息。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

样地号	密度/ (株·hm ⁻²)	海拔高度/m	坡向	坡度/ (°)	平均胸径/ cm	平均树高/ m	树龄/a
1	950	1 208	阳坡	15	57.63	6.24	16
2		1 223	阳坡	15	26.55	3.53	
3		1 216	阳坡	14	47.08	4.52	
4		1 220	阳坡	15	27.75	3.59	
5	2 000	1 205	阳坡	16	41.84	3.75	13
6		1 211	阳坡	15	44.39	4.23	
7		1 204	阳坡	16	48.75	3.98	
8		1 227	半阳坡	15	41.74	4.94	
9	3 250	1 203	阳坡	15	39.38	4.42	15
10		1 209	阳坡	15	34.15	5.10	
11		1 213	半阳坡	16	34.38	4.52	
12		1 218	阳坡	14	33.83	3.97	
13	4 300	1 185	阳坡	15	43.29	3.58	14
14		1 187	阳坡	15	38.80	5.07	
15		1 193	阳坡	16	38.69	3.60	
16		1 195	阳坡	15	39.37	3.22	

1.2.2 草本地上生物量测定 采用刈割法收取草本样方内植株的地上部分并装入牛皮纸袋中，称量其鲜重后将样品带回室内，先在烘箱内 105~110 °C 杀青 30 min，然后在 75 °C 烘干至恒重，称量其干重后计算草本地上生物量。

1.2.3 物种多样性计算 对草本样方内植被物种组成、盖度、高度、生物量进行统计，得出样方中植物的相对盖度(RC)、相对高度(RH)及相对生物量(RS)，最终计算得到样方内物种重要值(IV)。采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(D)、Margalef 丰富度指数(R)以及 Pielou 均匀度(J_w)指数 4 种指标分析本样地植被的多样性，计算公式为^[18]：

样方内物种重要值(IV)。

$$IV = \frac{RC+RH+RS}{3} \quad (1)$$

$$RC = \frac{\text{该种的盖度}}{\text{所有种的盖度总和}} \times 100\% \quad (2)$$

$$RH = \frac{\text{该种的高度}}{\text{所有种的高度总和}} \times 100\% \quad (3)$$

$$RS = \frac{\text{该种的生物量}}{\text{所有种的生物量总和}} \times 100\% \quad (4)$$

Shannon-Wiener 多样性指数(H')

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (5)$$

Simpson 优势度指数(D)：

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (6)$$

Pielou 均匀度指数(J_w)：

$$J_w = \frac{H'}{\ln S} \quad (7)$$

Margalef 丰富度指数(R)：

$$R = \frac{S-1}{\ln N} \quad (8)$$

式中:RC,RH,RS 为相对盖度、相对高度、相对生物量;S 为样方物种总数; P_i 为第 i 种的相对个体数(即个体数/物种总数, N_i/N); N 为样方内全部种的个体总数; N_i 为第 i 个物种的个体数。

1.2.4 土壤理化性质测定 在每个乔木样地内随机开挖 3 个土壤剖面,因油松为浅根系树种,植物所能汲取到的养分和水分主要集中在 0—40 cm 土层,且 40 cm 以下埋有砒砂岩,所以试验按照 0—10,10—20,20—30,30—40 cm 土层深度,用环刀和取土铲分层采集土壤样品,装入塑封袋带回室内进行分析。土壤含水量采用烘干法,容重采用环刀法,土壤颗粒分析采用马尔文 3000 激光粒度衍射仪测定,土壤有机质采用重铬酸钾容量法(外加热),速效磷采用碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法,速效钾测定采用乙酸氨浸提—火焰光度法,碱解氮采用碱解扩散法。

1.2.5 数据处理 用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件进行数据统计整理分析,Origin 2021 作图,采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),采用最小显著差数法(LSD)检验不同造林密度下各特征指标上的差异,采用 Pearson 相关系数进行数据相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同造林密度油松人工林下植被特征

2.1.1 植物群落组成特征及重要值 研究发现油松人工林下草本层植物共 9 科 19 属 33 种,这些植物中禾本科 7 种,菊科 11 种,豆科 6 种,蔷薇科 3 种,分别占物种总数的 21.21%,33.33%,18.18%,9.10%。

表 3 不同密度油松人工林下草本植物的重要值

Table 3 Important values of understory herbaceous plants under different densities of *Pinus tabulaeformis* plantation

密度/(株·hm ⁻²)	主要物种及重要值/%
950	百里香(45.0)+大针茅(40.3)+短花针茅(35.7)+羊草(33.2)+阿尔泰狗娃花(19.1)
2 000	大针茅(61.3)+羊草(34.4)+百里香(26.3)+本氏针茅(21.3)+阿尔泰狗娃花(13.8)
3 250	羊草(44.3)+大针茅(43.1)+牛尾蒿(24.3)铁杆蒿(24.0)+本氏针茅(22.5)
4 300	大针茅(71.0)+牛尾蒿(43.3)+短花针茅(38.2)+铁杆蒿(22.1)+糙隐子草(9.8)

注:表中仅列出重要值排名前 5 的林下草本植物。

表 4 油松人工林不同密度下林下草本植物生长特征

Table 4 Growth characteristics of understory herbaceous plants under different densities of *Pinus tabulaeformis* plantation

密度/(株·hm ⁻²)	盖度/%	生物量/(g·m ⁻³)	平均高度/cm
950	20.1±1.9 ^b	210.9±14.5 ^a	18.8±6.9 ^b
2 000	32.2±6.3 ^{ab}	174.8±18.4 ^a	17.3±8.1 ^b
3 250	36.6±8.9 ^{ab}	224.7±26.8 ^a	25.1±4.4 ^a
4 300	42.4±9.5 ^a	191.7±17.7 ^a	22.8±5.8 ^a

注:表中不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

如表 2 所示,草本层物种数随造林密度的变化趋势为:3 250 株/hm²,950 株/hm² > 4 300 株/hm² > 2 000 株/hm²。各密度间物种数量上下峰值差仅为 4。

表 2 不同密度油松人工林下草本植物群落物种组成

Table 2 Species composition of herbaceous plant communities under different densities of *Pinus tabulaeformis* plantation

密度/(株·hm ⁻²)	科	属	种
950	7	14	19
2 000	7	13	15
3 250	7	15	19
4 300	5	13	16

由表 3 可知,油松人工林下草本层主要优势种为适应性强、抗旱、耐碱,耐贫瘠的大针茅、克氏针茅、羊草、糙隐子草、胡枝子等。当密度低于 2 000 株/hm² 时,百里香、阿尔泰狗娃花、二裂委陵菜、冷蒿等耐旱植物作为优势种出现,在密度为 950 株/hm² 重要值最大;当密度高于 3 250 株/hm² 时,百里香等优势种被牛尾蒿、铁杆蒿、漏芦等喜温喜湿性植物代替,此类植物在密度为 3 250 株/hm² 时重要值最大。由此可见,随着油松人工林密度的逐渐增加,其林下草本群落有从阳生性—中生性—阴生性过渡的趋势。

2.1.2 植物群落生长特征 由表 4 可知,造林密度对林下草本生长特征影响不显著($p > 0.05$),草本层植物的平均高度与生物量随造林密度的增加呈先减小后增加而后再减小的趋势,均在 3 250 株/hm² 时达到峰值,总盖度呈现出随造林密度的增加而增大的趋势。可见当造林密度为 3 250 株/hm² 时,林下草本生长发育最佳。

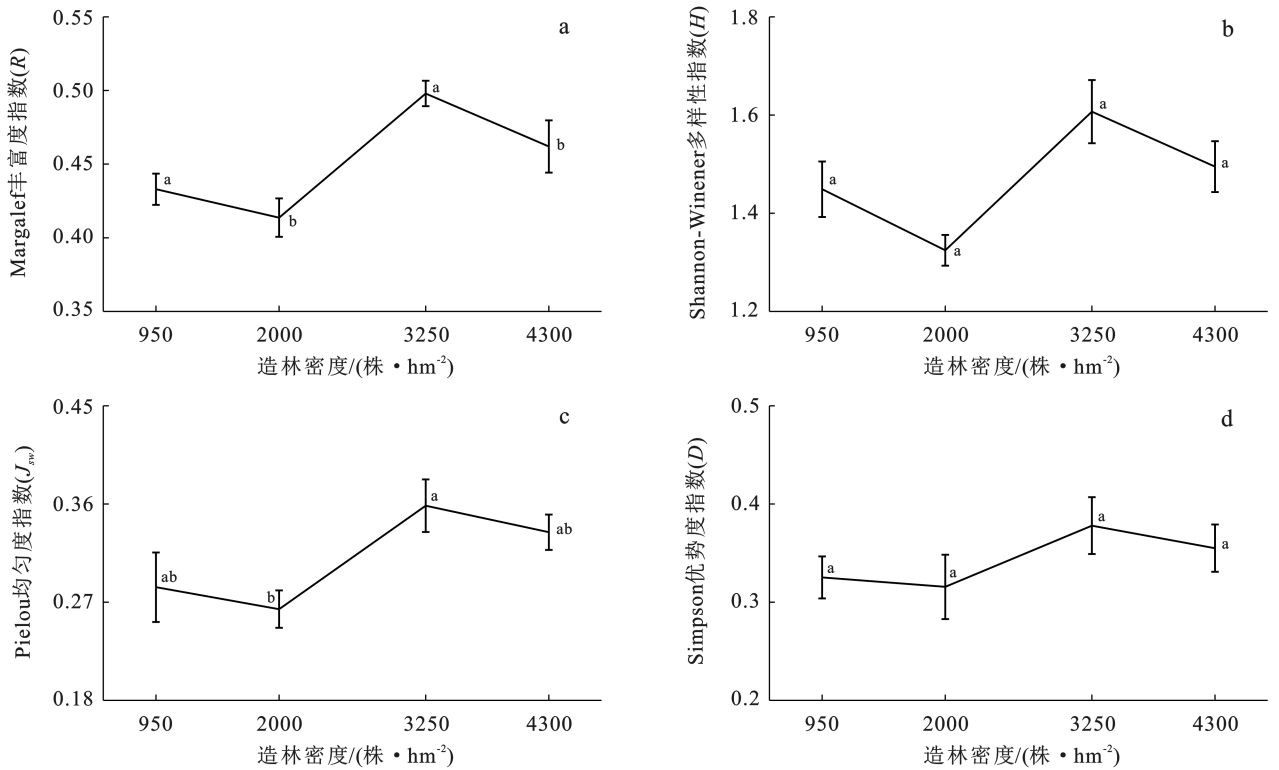
2.1.3 植物群落物种多样性特征 由图 1 可知,Margalef 指数,Shannon-Wiener 指数,Simpson 指数和 Pielou 指数在不同造林密度间均无显著差异($p > 0.05$)。随着造林密度的增加,4 种造林密度林下草本植物多样性指数均表现出先减小后增加再减小的趋势,均在 3 250 株/hm² 密度达到最大值。

2.2 不同造林密度油松人工林下土壤理化性质特征

2.2.1 土壤物理性质 由图 2 可知,造林密度对 0—20 cm 土层土壤含水量影响显著($p < 0.05$),对土壤

容重无显著影响($p>0.05$)。土壤容重随土层深度和造林密度的增加无显著变化。土壤含水量随土层深

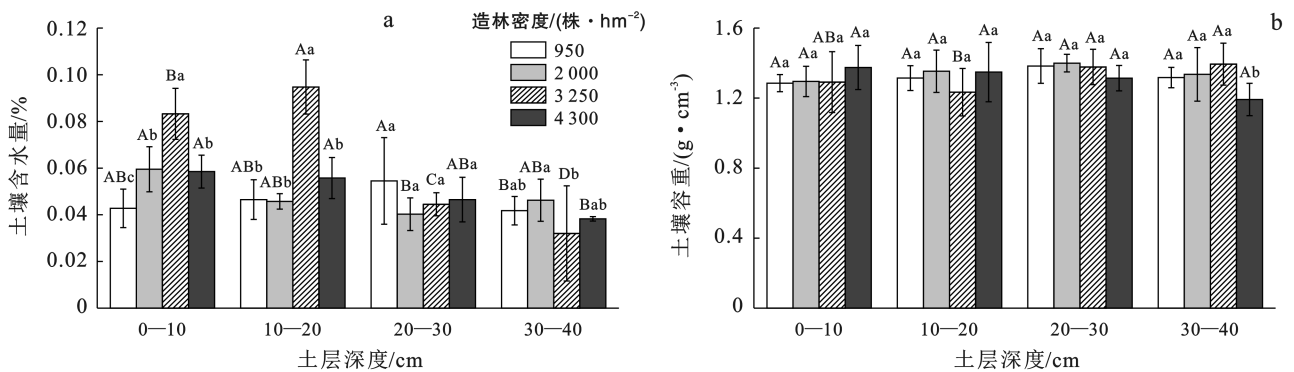
度的增加而降低,随造林密度的增加呈现出先增加后减小的趋势,到 3 250 株/hm²达到峰值。



注:图中不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同密度油松人工林林下草本层植物群落物种多样性指数变化

Fig.1 Change of species diversity index of understory herb layer plant community of *Pinus tabulaeformis* plantation



注:不同大写字母表示同一密度不同土层间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一土层不同林分密度间差异显著($p<0.05$)。

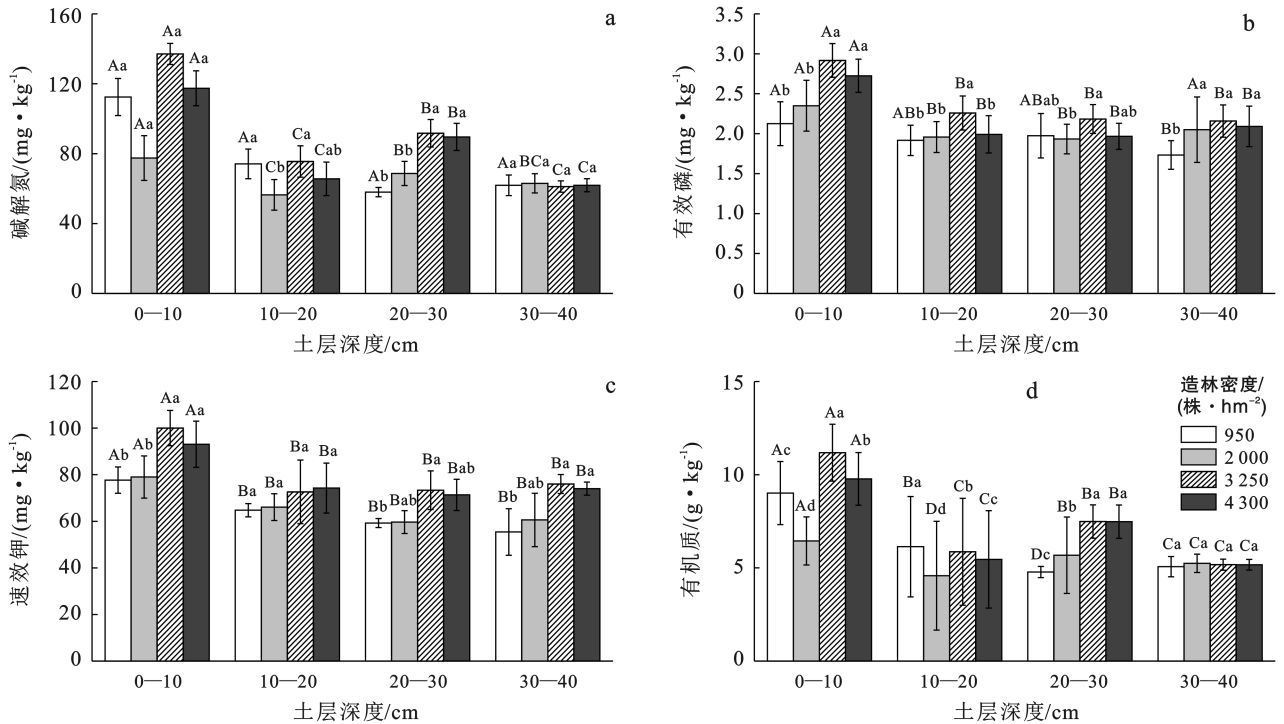
图 2 油松人工林不同密度下 0—40 cm 土壤含水量和土壤容重特征

Fig.2 Characteristics of soil water content and soil bulk density in 0—40 cm under different densities of *Pinus tabulaeformis* plantation

2.2.2 土壤化学性质 由图 3 可知,土壤养分均随土层深度的增加而减小,主要聚集在 0—20 cm 土层。有效磷、速效钾含量随造林密度的增加呈先增加后减小的趋势,在 3 250 株/hm²时达到峰值,而有机质、碱解氮含量随造林密度的增加表现为:3 250 株/hm²>4 300 株/hm²>950 株/hm²>2 000 株/hm²。

2.3 林下植物多样性与土壤因子的相关性分析

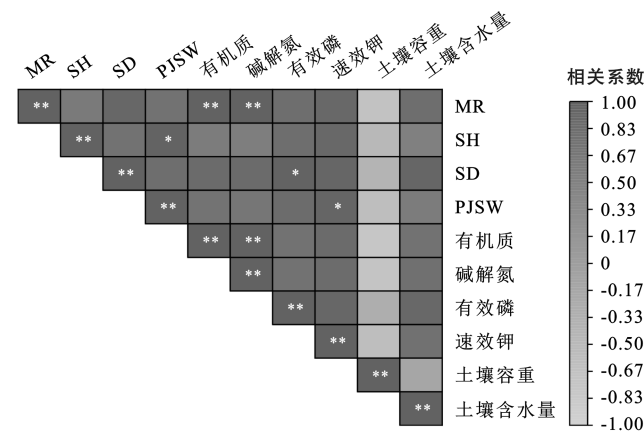
由图 4 可知,Margalef 指数与有机质、碱解氮含量极显著正相关($p<0.01$),Simpson 指数与有效磷含量显著正相关($p<0.05$),Pielou 指数与速效钾含量显著正相关($p<0.05$)。林下植物物种多样性及土壤养分与土壤容重呈负相关,与土壤含水量呈正相关。



注：不同大写字母表示同一密度不同土层间差异显著 ($p < 0.05$)；不同小写字母表示同一土层不同林分密度间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 3 油松人工林不同密度下土壤物速效氮磷钾特征

Fig.3 Characteristics of soil available nitrogen, phosphorus and potassium under different densities of *Pinus tabulaeformis* plantation



注：* 表示显著性水平 $p \leq 0.05$ ；** 表示显著性水平 $p \leq 0.01$ 。

图 4 油松人工林下植物多样性指数与土壤理化性质的相关性

Fig.4 Correlation between understory plant diversity index and soil physical and chemical properties of *Pinus tabulaeformis* plantation

3 讨论

3.1 造林密度对油松林下草本植物物种组成的影响

本研究中油松人工林林下草本层植物共出现 9 科 19 属 33 种，耐贫瘠的禾本科、菊科、豆科等植物均占据群落演替的主导地位。随着造林密度的增加，草本群落物种数表现为： $2\ 000\ \text{株}/\text{hm}^2 < 4\ 300\ \text{株}/\text{hm}^2 < 950\ \text{株}/\text{hm}^2 = 3\ 250\ \text{株}/\text{hm}^2$ ，这与李登醒等^[19]研究结果一致。造林密度通过控制乔木层的透光性以及彼此之间的竞争来影响林下植物的种类和分布，当造林

密度较低时，林冠层郁闭度较低，水热、光照资源充足，植株个体充分发育；当造林密度过高时林冠层郁闭度过高，光照减弱，群落的生长则受到抑制。研究发现，随着造林密度的增加，其林下草本群落有从阳性—中生性—阴生性过渡的趋势，这与孙千惠等^[20]的研究结果一致。低密度草本群落中作为伴生种出现的百里香、阿尔泰狗娃花、冷蒿等耐旱植物在密度高于 $3\ 250\ \text{株}/\text{hm}^2$ 时被牛尾蒿、铁杆蒿、漏芦等喜温喜湿性植物完全取代，这表明随造林密度的增加，林冠层郁闭度逐渐增加，林地内光照减弱，土壤水分、温度等条件逐渐适宜一些中生、阴生性植物的生长发育。当造林密度达到 $4\ 300\ \text{株}/\text{hm}^2$ 时，林冠层郁闭度过高，植物种间对土壤养分、水分和光照的竞争激烈，植物个体可利用的资源减少，导致林下草本群落物种数和油松树高降低。因此，当造林密度在 $3\ 250\ \text{株}/\text{hm}^2$ 左右时，更有利于油松及其林下草本植物群落的生长发育。

3.2 造林密度对油松林下草本物种多样性与生长特征的影响

植物多样性指数可以度量一个群落内种类多样性的程度，是判别一个群落或生态系统的稳定性指标^[21]，植物群落结构越复杂，其多样性指数就越大，群落稳定性就越高。在本研究中，造林密度对林下草本群落 Margalef 指数有显著影响 ($p < 0.05$)，对

Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数均无显著影响($p > 0.05$)。其原因可能是砒砂岩区环境恶劣、油松林下植物群落结构单一;随造林密度的增加,针茅、羊草、糙隐子草、胡枝子等始终占据群落主导地位,导致其群落相似度较高。植株平均高度、盖度、地上生物量 3 类指标对预防降雨溅蚀、坡面水蚀以及涵养水土有重要作用^[22],造林密度对林下草地上生物量、植株平均高度、总盖度均无显著影响($p > 0.05$),这与王思洪等^[23]研究结果一致。研究显示,植株地上生物量、平均高度以及 4 种物种多样性指数均随造林密度的增加,均表现为先减小再增加而后再减小的趋势,草本盖度表现为随造林密度的增加而增加,密度在 3 250 株/hm²时林下草本植株平均高度、生物量以及物种丰富度、多样性最高。究其原因可能是造林密度存在一个临界范围 α ,当造林密度小于 α 时,郁闭度的增减对林下光照,水热等条件影响有限,油松个体的增加还会加剧林下植物群落对资源的竞争;当造林密度等于 α 时,随造林密度的增加,郁闭度开始显著影响林下光照、水热特征,局部气候开始适合一些中生性、阴生性植物的生长,使林下草本群落物种多样性、丰富度增加,当造林密度大于 α 时,油松大量消耗土壤养分,导致林下草本群落种间竞争激烈,而过高的郁闭度使林冠层透光性变差,开始对林下草本群落的光合作用产生负面影响,使林下水热条件不再适合某些物种生长。

3.3 造林密度对油松林土壤理化性质的影响

土壤的物理性质通过影响水分供应、气体交换和根系吸收等直接或间接影响林木的生长^[24]。在本研究中,造林密度对土壤容重无显著影响,对土壤含水量影响显著($p < 0.05$)。随造林密度的增加土壤容重小幅降低,土壤含水量呈先增加后降低的趋势,均在 3 250 株/hm²时达到峰值,表明造林密度在 3 250 株/hm²左右时更有利于砒砂岩区油松林地土壤结构的改良和土壤水分的维持,能更好地发挥水土保持作用。

油松林造林密度不同会导致林地透光性改变,光照直接影响着林地蒸腾耗水、局部温度以及林下植物群落结构的不同,而林下植物群落的差异又影响着林下土壤的理化性质。研究发现,同一造林密度下,土壤养分随着土层深度的增加而减小,主要集中在 0—20 cm 土层,这与前人研究结果一致^[25],而造林密度对 0—20 cm 土层中土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾均有显著影响($p < 0.05$),随着造林密度的增加,土壤有机质、碱解氮呈先减小再增加而后再减小的趋势,均在 3 250 株/hm²时达到峰值,与林下物种多样

性及生长特征变化趋势一致,其原因是造林密度会影响枯落物数量,并通过光照、温湿度等环境因素影响枯落物分解速率,在一定的造林密度范围内随着造林密度的增加,植物之间的竞争变得更加激烈,导致油松林土壤养分随着造林密度的增加先呈下降趋势,随着造林密度进一步增加,林下植物物种多样性、生物量的增加提供了更多的植物残体和凋落物,促进了土壤养分的积累^[26-27],当造林密度过大时,虽然林地的枯落物依旧在增加,但郁闭度过大导致林地透光性变差,林内光照减少,影响到了土壤中酶的活性,导致枯落物分解的速率降低,进入土壤的有机质和氮磷钾含量减少^[28]。

4 结论

(1) 在调查的 4 种密度油松人工林林下共出现 9 科 19 属 33 种草本植物,以禾本科、菊科、豆科为主,在造林密度为 3 250 株/hm²时植物种类最多。主要优势种明显,伴生优势种随造林密度变化显著,随造林密度的增加呈现阳生性—中生性—阴生性的过渡趋势。

(2) 油松林下草本层物种多样性指数、植株高度、生物量以及土壤有机质、速效氮磷钾、土壤含水量随造林密度的增加均表现为:3 250 株/hm² > 4 300 株/hm² > 950 株/hm² > 2 000 株/hm²,表明造林密度在 3 250 株/hm²时更有利于林下植物的生长和土壤肥力的改良。

(3) 造林密度对土壤含水量、有机质以及速效氮磷钾含量影响显著($p < 0.05$),对土壤容重以及林下 4 种物种多样性指数则无显著影响($p > 0.05$)。在相关性分析中,土壤速有机质、速效氮磷钾含量与林下草本多样性指数之间关系最为密切。

参考文献 (References)

- [1] 田震,高凡,赛硕,等.清水河县森林生态系统碳储量、碳密度分布特征[J].干旱区资源与环境,2024,38(6):166-173.
Tian Zhen, Gao Fan, Sai Shuo, et al. Distribution of carbon stock and carbon density of forest ecosystems in Qing Shui He County, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(6): 166-173.
- [2] 郭欣宇,杨光,陆乃静,等.造林密度对科尔沁沙地奈曼沙区小叶杨防护林林下植被的影响[J].水土保持研究,2024,31(1):199-206.
Guo Xinyu, Yang Guang, Lu Naijing, et al. Influence of *Populus simonii* planted forest density on understory in

- Naiman Banner of the Horqin sandy land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1):199-206.
- [3] 孙梓欣, 朱连奇, 赵体侠, 等. 秦巴山地植被冠层降雨截留时空分异特征及驱动因素[J]. 生态学报, 2024, 44(5): 2029-2042.
- Sun Zixin, Zhu Lianqi, Zhao Tixia, et al. Spatio-temporal variations and driving factor analysis of rainfall interception by vegetation canopy in the Qinling-Daba Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5):2029-2042.
- [4] 马剑, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山西水林区灌木林降雨截留特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3):363-368.
- Ma Jian, Liu Xiande, Jin Ming, et al. Characteristics of rainfall interception by shrubs in Xishui forest district of Qilianshan Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3):363-368.
- [5] 黄春娥. 不同光照强度及温度对刺槐主要生理代谢的影响[J]. 防护林科技, 2020(4):39-41.
- Huang Chune. Effects of different light intensity and temperature on the main physiological metabolism of *Robinia pseudoacacia* [J]. Protection Forest Science and Technology, 2020(4):39-41.
- [6] 刘从, 田甜, 李珊, 等. 中国木本植物幼苗生长对光照强度的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(2):518-527.
- Liu Cong, Tian Tian, Li Shan, et al. Growth response of Chinese woody plant seedlings to different light intensities [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2):518-527.
- [7] 童翠芸, 王占林, 张得芳, 等. 白云杉光合特性对土壤水分含量和光照强度的响应[J]. 青海大学学报, 2019, 37(4): 14-19, 48.
- Tong Cuiyun, Wang Zhanlin, Zhang Defang, et al. Response of soil moisture content and light intensity on photosynthetic characteristics of *Picea glauca* [J]. Journal of Qinghai University, 2019, 37(4):14-19, 48.
- [8] 陈书军, 陈存根, 曹田健, 等. 降雨量级和强度对秦岭油松林林冠截留的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1):41-55.
- Chen Shujun, Chen Cungen, Cao Tianjian, et al. Effects of rainfall size class and intensity on canopy interception of *Pinus tabulaeformis* forest in the Qinling Mountains, China [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(1):41-55.
- [9] 白雲, 苏德, 李新通, 等. 井冈山国家级自然保护区林冠降雨截留模拟研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(增刊1):70-77.
- Bai Yun, Su De, Li Xintong, et al. Study of simulating forest canopy rainfall interception at the Jinggangshan national nature reserve, China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(Suppl.1):70-77.
- [10] 赵文玥, 吉喜斌. 干旱区稀疏树木冠层降雨截留蒸发的研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2021, 36(8):862-879.
- Zhao Wenyue, Ji Xibin. A review of research advances and future perspectives of evaporation of intercepted rainfall from sparse tree canopy in drylands [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(8):862-879.
- [11] 冯燕辉, 梁文俊, 魏曦, 等. 不同林分密度华北落叶松林枯落物及土壤特征分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(3):179-187.
- Feng Yanhui, Liang Wenjun, Wei Xi, et al. On litter and soil characteristics of *Larix principis-rupprechtii* forest with different stand densities [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2021, 46(3):179-187.
- [12] 薛艳春, 杨光, 陆乃静, 等. 林分密度对柠条人工林林下物种多样性及土壤物理性质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(10):69-78.
- Xue Yanchun, Yang Guang, Lu Naijing, et al. Effects of afforestation density on species diversity and soil physical properties under *Caragana korshinskii* plantations [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2024, 52(10):69-78.
- [13] 陈欣, 韩有志. 华北落叶松林林分密度对林下更新影响研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2024, 44(2):110-118.
- Chen Xin, Han Youzhi. Study on the effect of stand density on understory regeneration in *Larix principis-rupprechtii* forest in North China [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2024, 44(2):110-118.
- [14] 程一伦, 江天一, 李思睿, 等. 造林密度对桉楠人工林土壤理化性质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(3):446-455.
- Cheng Yilun, Jiang Tianyi, Li Sirui, et al. Effects of stand density on soil physicochemical properties of *Phoebe zhenan* plantation [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 41(3):446-455.
- [15] 朱燕, 翟博超, 孙美美, 等. 黄土丘陵区不同密度刺槐和油松人工林土壤理化性质与化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6):160-167.
- Zhu Yan, Zhai Bochao, Sun Meimei, et al. Soil physicochemical properties and stoichiometry characteristics in *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* plantations across different densities in the Loess Hilly Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6):160-167.
- [16] 汪星星, 廖文海, 左晓东, 等. 密度调控对杉木人工林土壤理化性质的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(1):82-87.
- Wang Xingxing, Liao Wenhai, Zuo Xiaodong, et al.

- Effect of soil physicochemical properties of fir plantation under density regulation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023,51(1):82-87.
- [17] 武燕,黄青,刘讯,等.西南喀斯特地区马尾松人工林林龄对土壤理化性质的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(3):99-107.
Wu Yan, Huang Qing, Liu Xun, et al. Effects of *Pinus massoniana* plantation age on soil physical and chemical properties in Karst areas in Southwest China [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024,48(3):99-107.
- [18] 韩煜,王琦,赵伟,等.草原区露天煤矿周边植物多样性和土壤养分关系研究[J].东北农业大学学报,2023,54(9):23-33.
Han Yu, Wang Qi, Zhao Wei, et al. Research on relationship between plant diversity and soil nutrient of open-pit coal mines in prairie [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023,54(9):23-33.
- [19] 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 Dengxing, Yang Zhangqi, Yan Peidong, 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.
- [20] 孙千惠,吴霞,王媚臻,等.林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].应用生态学报,2018,29(3):732-738.
Sun Qianhui, Wu Xia, Wang Meizhen, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of *Pinus massoniana* plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3):732-738.
- [21] 胡昌平,王有兵,姜健发,等.漾濞县核桃林下草本植物多样性特征研究[J].中国农学通报,2023,39(35):49-54.
Hu Changping, Wang Youbing, Jiang Jianfa, et al. Diversity characteristics of herbaceous plants under walnut forests in Yangbi County [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023,39(35):49-54.
- [22] 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.
- [23] 王思淇,张建军,张彦勤,等.晋西黄土区不同密度刺槐林下植物群落物种多样性[J].干旱区研究,2023,40(7):1141-1151.
Wang Siqi, Zhang Jianjun, Zhang Yanqin, et al. Understory plant community diversity of *Robinia pseudoacacia* plantation with different densities in the Loess Plateau of Western Shanxi Province [J]. Arid Zone Research, 2023,40(7):1141-1151.
- [24] 于航,冯天骄,卫伟,等.晋西黄土区土壤理化特征对长期植被恢复的响应[J].生态学报,2024,44(7):2873-2885.
Yu Hang, Feng Tianjiao, Wei Wei, et al. Response of soil physicochemical characteristics to long-term vegetation restoration in loess region of Western Shanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(7):2873-2885.
- [25] 宋依璇,邓继峰,李景浩,等.辽西北典型人工林地不同坡位土壤养分特征及与林木生长性状的关系[J].西北林学院学报,2017,32(3):18-24.
Song Yixuan, Deng Jifeng, Li Jinghao, et al. Soil chemical properties and their relations with stand growth of typical afforestation tree species in Northwest Liaoning Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017,32(3):18-24.
- [26] 王媚臻,毕浩杰,金锁,等.林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].生态学报,2019,39(3):981-988.
Wang Meizhen, Bi Haojie, Jin Suo, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(3):981-988.
- [27] 王慧敏,朱仲元,张璐.典型草原不同土壤类型对群落特征和种群生态位的影响:以锡林河流域为例[J].水土保持研究,2020,27(4):142-148.
Wang Huimin, Zhu Zhongyuan, Zhang Lu. Effects of different soil types on community characteristics and population niche in typical grasslands: Taking the Xilin River basin as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(4):142-148.
- [28] 周璇,刘凯利,胡佳怡,等.川西柳杉幼林间伐后林下植被和土壤特征变化[J].西北林学院学报,2024,39(1):44-51.
Zhou Xuan, Liu Kaili, Hu Jiayi, et al. Understory vegetation and soil characteristic variations of young *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* plantations after thinning in Western Sichuan [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024,39(1):44-51.