

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220492

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

任奕炜¹, 钟小瑛¹, 衣华鹏^{1*}, 常 耀²

(1. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 新疆大学地理与遥感科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: [目的] 研究不同林分类型(黑松纯林、黑松-刺槐混交林、黑松-麻栎混交林)的黑松针叶功能性状、林下物种多样性、林下土壤因子的特征, 以期为黑松海防林的建设与管理提供依据与参考。[方法] 以烟台牟平海防林内黑松为研究对象, 通过采集黑松针叶及林下 0~20 cm 土壤样品并调查林下物种多样性, 测定针叶的相关功能性状及土壤理化性质, 对林下物种多样性指标进行计算, 对林下土壤因子对针叶功能性状及林下物种多样性的影响进行 RDA 分析。[结果] (1) 不同林分类型对叶面积(LA)、叶长(LL)、比叶面积(SLA)、比叶质量(SLW)、叶干物质量(LDMC)、叶含水率(LWC)等叶结构性状均有显著影响, 叶化学性状中仅对 C、N 含量有显著影响。(2) 不同林分类型对林下植被多样性指标均有显著影响, 黑松-麻栎混交林的 Simpson 指数最高, 黑松-刺槐混交林的 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Pielou 指数均最高, 而黑松纯林各指标均表现为最低, 马唐(*Digitaria sanguinalis*)、狗尾草(*Pennisetum alopecuroides*) 在各群落中优势显著。(3) 不同林分类型对土壤 EC、有机碳(SOC)、全氮(TN)、硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、速效钾(AK)均有显著影响。(4) SOC、AK、 NH_4^+ -N 对叶功能性状及林下物种多样性均有显著影响, TP、 NO_3^- -N 分别对功能性状与物种多样性有显著影响。[结论] 本试验条件下, 不同林分类型下黑松针叶的功能性状、林下物种多样性对林下土壤因子均有一定响应, 防护林的建设与管理要综合考虑林分类型、林下植被及土壤养分的作用。

关键词: 黑松; 混交林; 叶功能性状; 物种多样性; 土壤因子

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2023)02-0161-08

在森林生态系统中, 人工林是重要组成部分, 在生态保护方面发挥关键作用^[1]。林下植被在维护林下生态系统多样性^[2]、改善林下生态环境^[3]、维持养分循环^[4]等方面发挥着重要作用。林分密度^[5]、林龄^[6]、恢复模式^[7]、林火干扰^[8]、气候与人类活动^[9]等对林下植被物种多样性均有不同程度影响。叶片的功能性状作为植物功能性状的重要组成部分, 与植物对资源的获取与利用密切相关, 植物叶片可以在环境发生变化时, 通过改变外部形态和内部生理活动以适应环境的改变^[10], 因此, 叶片功

能性状可以作为环境变化的指示指标^[11-12]。叶片的功能性状包括叶长、叶面积、比叶面积、比叶质量、叶干物质量、含水率等, C、N、P 含量也是叶片重要的化学功能性状^[13-14]; 同时, K、Ca、Na、Mg 等也是植物生长发育过程中所需的营养元素, 对叶片金属元素的研究具有不可忽视的生态学意义^[15-16]。

林下植被的物种多样性与土壤理化性质密切相关, 陈瑶等^[17]发现, 不同林分类型下的植被物种多样性与土壤理化性质差异显著; 同时, 林下植被多样性的提高还有利于提高土壤的 C、N 储量, 提

收稿日期: 2022-10-11 修回日期: 2022-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570423)

作者简介: 任奕炜, 山西太原人, 硕士, 主要从事河口海岸过程与自然环境研究。E-mail: ryw199801@163.com

* 通讯作者: 衣华鹏, 山东烟台人, 教授, 主要研究方向: 河口海岸过程与自然环境。E-mail: huapengyi@sina.com

高 N 的利用效率^[18-19]；但也有研究表明，林下植被多样性对土壤理化性质没有明显响应^[20]。关于叶功能性状，何雅琴等^[21]研究发现，椴栎 (*Eurya emarginata* (Thunb.) Makino) 叶在包括土壤理化性质在内的环境因子影响下通过性状变异和组合以适应其生存环境；王超等^[22]研究发现，土壤因子与急尖长苞冷杉 (*Abies georgei* var. *smithii* Cheng et L.) 叶的功能性状变异最密切，而海拔、坡向对其影响较小；还有研究发现，叶片各功能性状之间存在对环境的协同响应^[23]。由此可见，林下物种多样性及叶功能性状对土壤养分的变化会产生一定响应，而目前对不同林分类型下叶功能性状、林下物种多样性及土壤养分的变化鲜有报道。因此，本研究以烟台市沿海防护林省级自然保护区内优势种黑松 (*Pinus thunbergii* Parl.) 为对象，测定针叶功能性状，对林下植被群落进行调查并测定土壤指标，比较不同林分类型下黑松针叶功能性状、林下植被及土壤特征的差异，以期对烟台海岸带防护林的保护与管理提供理论依据。

1 研究区概况

研究区隶属于烟台沿海防护林省级自然保护区牟平区段，该区域是保护区内面积最大的核心区，为温带海洋性季风气候，年平均气温 12.9 °C，年均降水量 723.2 mm，年均日照时数 2 121 h，无霜期 269 d。保护区内主要为黑松单层林，部分地区有黑松与麻栎 (*Quercus acutissima* Carruth.)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.) 组成的混交林。林下植被较简单，灌木层主要为紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* Linn.)，零散分布有单叶蔓荆 (*Vitex trifolia* Linn. var. *simplicifolia* Cham.)、牛奶子 (*Elaeagnus umbellata* Thunb.) 等，草本层有马唐 (*Digitaria sanguinalis* (Linn) Scop.)、卵穗薹草 (*Carex ovatispiculata* Y. L. Chang ex S. Y. Liang)、鸭跖草 (*Commelina communis* Linn.)、狗尾草 (*Setaria viridis* (Linn.) Beauv.)、垂序商陆 (*Phytolacca americana* Linn.) 等。

2 研究方法

2.1 样地设置及样品采集

2021 年 9 月在研究区进行野外调查与样品采集。沿垂直于海岸线方向，由沿海向内陆布设 7 个

样地，间隔 200 m，平行间隔 300 m 设置 3 条样带，共设置 21 个样地，其中，黑松纯林样地 8 块、黑松-刺槐混交林样地 7 块、黑松-麻栎混交林 6 块，样地内黑松于 20 世纪 50 年代栽种。

在每一样地内设置 1 个 20 m × 20 m 的样方调查乔木层，由于研究区内林下未形成明显灌木层，故仅对林下的草本层物种进行研究。在对角线上设置 3 个 1 m × 1 m 的样方调查草本层，记录每种物种的种名、数量、盖度等。在样方四角及中心位置选取 5 株长势良好无病虫害的黑松，采集 4 个方向相同叶龄的针叶样品，每株黑松采集 10 根针叶，共计 50 根，用纯净水润湿滤纸后包裹，装入自封袋放入保温箱保存。采用五点取样法，去除表面杂质后采集林下 0~20 cm 土壤样品，混匀装入自封袋待测。

2.2 样品处理与指标测定计算

2.2.1 针叶功能性状测定 采用精度为 0.000 1 g 的天平称取针叶鲜质量，将叶片在黑暗环境中浸泡 8 h 后称取其饱和鲜质量。用叶面积仪扫描针叶叶长 (LL)、叶面积 (LA)。将针叶放入烘箱中 105 °C 杀青 10 min，在 75 °C 下烘干至恒质量后称取其干质量，后用高速粉碎机粉碎后过 0.25 mm 筛待测。相关指标计算公式如下：

比叶面积 (SLA) = 叶面积 / 叶干质量

比叶质量 (SLW) = 叶干质量 / 叶面积

叶干物质量 (LDMC) = 叶干质量 / 叶鲜质量

叶含水率 (LWC) = (叶鲜质量 - 叶干质量) / 叶鲜质量 × 100%。

针叶碳含量采用重铬酸钾—外加热法测定，氮、磷、钾和钠含量经 H₂SO₄-H₂O₂ 消解后分别用奈氏比色法、钼锑抗比色法、火焰光度计测定。钙、镁含量经 1 mol·L⁻¹HCl 浸提后，采用 EDTA 配合滴定法测定。

2.2.2 土壤样品处理与测定 土壤样品过不同孔径筛后待测，土壤 C 含量采用重铬酸钾—外加热法测定。土壤电导率 (EC)、pH 值经水土比 5:1 浸提后，分别采用电导率仪、pH 计测定。土壤硝态氮 (NO₃⁻-N) 采用双波长比色法测定，土壤铵态氮 (NH₄⁺-N) 采用靛酚蓝比色法测定，土壤速效磷 (AP) 采用 NH₄F-HCl 浸提法测定，土壤速效钾 (AK) 采用乙酸铵浸提，火焰光度计测定。土壤全氮 (TN)、全磷 (TP) 分别采用 H₂SO₄-

混合催化剂、 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消解后测定, 以上样品测定时均设置 3 次重复。

2.2.3 物种多样性指标计算

(1) 重要值 (IV) = $RA + RD + RF/3 \times 100\%$

式中: RA (相对多度)=某个种的株数/全部种的株数; RD (相对优势度)=某个种的盖度/全部种的总盖度; RF (相对频度)=某个种的频度/全部种的总频度。

(2) 辛普森指数 (Simpson index, D_s):

$$D_s = 1 - \sum_{i=1}^i p_i^2$$

(3) 香农-威纳指数 (Shannon-Wiener index, H'):

$$H' = - \sum_{i=1}^i p_i \ln p_i$$

(4) 丰富度指数 (Margalef index, D_m):

$$D_m = \frac{S-1}{\ln N}$$

(5) 均匀度指数 (Pielou index, E):

$$E = \frac{H'}{\ln S}$$

式中: S 为群落物种总数; N 为群落物种个体总数; P_i 为第 i 种个体数占总个体数的比例

2.3 数据分析

在 Excel 中对数据进行统计与整理。运用 SPSS 24 中单因素 ANOVA 检验对数据间进行差异性分析 ($P < 0.05$)。利用 Canoco 5 中的 RDA 分析, 研究叶功能性状与林下植被物种多样性对土壤因子的响应。在 Origin 2021 中进行绘图。

3 结果与分析

3.1 不同林分类型黑松针叶功能性状

由表 1 可知: 黑松纯林的叶面积、叶长显著高于黑松与刺槐、麻栎的混交林 ($P < 0.05$)。黑松-麻栎混交林下的比叶面积、叶含水率显著高于黑松纯林与黑松-刺槐混交林, 而叶干物质质量显著低于黑松纯林与黑松-刺槐混交林 ($P < 0.05$)。黑松纯林叶碳含量显著高于其他 2 种林分类型, 叶氮含量显著低于黑松-麻栎混交林 ($P < 0.05$), 而黑松-刺槐混交林的叶氮含量与二者间差异不显著。叶 P、K、Na、Ca、Mg 含量在不同林分类型间差异不显著。

表 1 不同林分类型黑松针叶功能性状特征

Table 1 Characteristics of needle functional traits of *Pinus thunbergii* in different stand types

分类 Classification	项目 Type	黑松纯林 <i>Pinus thunbergia</i> pure forest	黑松-刺槐混交林 <i>Pinus thunbergia-Robinia</i> <i>pseudoacacia</i> mixed forest	黑松-麻栎混交林 <i>Pinus thunbergia-Quercus</i> <i>acutissima</i> mixed forest
结构功能性状 Structural functional traits	叶面积 LA/cm ²	1.40 ± 0.28 a	1.17 ± 0.26 b	1.11 ± 0.18 b
	叶长 LL/cm	12.27 ± 1.76 a	10.41 ± 1.27 b	10.59 ± 0.86 b
	比叶面积 SLA/(cm ² ·g ⁻¹)	2.67 ± 0.48 b	2.76 ± 0.37 b	3.35 ± 0.19 a
	比叶质量 SLW/(g·cm ²)	0.38 ± 0.05 a	0.31 ± 0.05 b	0.30 ± 0.02 b
	叶干物质质量 LDMC/(g·g ⁻¹)	0.46 ± 0.05 a	0.46 ± 0.04 a	0.39 ± 0.02 b
	叶含水率 LWC/%	54.22 ± 4.71 b	53.98 ± 3.60 b	60.55 ± 1.86 a
化学功能性状 Chemical functional traits	叶碳含量 LCC/(g·kg ⁻¹)	430.08 ± 20.51 a	405.27 ± 30.97 b	401.95 ± 24.20 b
	叶氮含量 LNC/(g·kg ⁻¹)	7.40 ± 0.81 b	7.93 ± 0.82 ab	8.24 ± 0.53 a
	叶磷含量 LPC/(g·kg ⁻¹)	0.87 ± 0.07 a	0.90 ± 0.15 a	0.87 ± 0.04 a
	叶钾含量 LKC/(g·kg ⁻¹)	4.59 ± 0.52 a	4.96 ± 0.71 a	4.75 ± 0.20 a
	叶钠含量 LNaC/(g·kg ⁻¹)	0.75 ± 0.34 a	0.77 ± 0.30 a	0.83 ± 0.51 a
	叶钙含量 LCaC/(g·kg ⁻¹)	5.83 ± 1.35 a	5.85 ± 1.48 a	5.80 ± 1.78 a
	叶镁含量 LMgC/(g·kg ⁻¹)	1.54 ± 0.53 a	1.43 ± 0.58 a	1.45 ± 0.16 a

注: 同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same line indicate significant difference ($P < 0.05$). The same below.

3.2 不同林分类型黑松林下植物的物种组成与多样性

研究区内林下植物共有 14 科 31 属 32 种, 由表 2 可知: 黑松纯林下马唐为优势物种, 狗尾草、卵穗藁草、狼尾草、白草等为伴生种; 黑松-刺槐

混交林下马唐也为优势物种, 狗尾草、垂序商陆、卵穗藁草、鸭跖草等为伴生种; 黑松-麻栎混交林下狗尾草与马唐为优势种, 鸭跖草、垂序商陆、卵穗藁草等为伴生种; 混交林下狗尾草的优势度有所上升。

表 2 不同林分类型林下重要值前 5 位物种

Table 2 Top 5 species of understory importance in different stand types

黑松纯林 <i>Pinus thunbergia</i> pure forest		黑松-刺槐混交林 <i>Pinus thunbergia-Robinia pseudoacacia</i> mixed forest		黑松-麻栎混交林 <i>Pinus thunbergia-Quercus acutissima</i> mixed forest	
物种 Species	重要值 IV/%	物种 Species	重要值 IV/%	物种 Species	重要值 IV/%
马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	34.35	马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	41.65	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	32.37
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	14.50	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	22.50	马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	27.48
卵穗藁草 <i>Carex ovatisciculata</i>	13.34	垂序商陆 <i>Phytolacca americana</i>	11.14	鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	8.03
狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>	7.08	卵穗藁草 <i>Carex ovatisciculata</i>	8.97	垂序商陆 <i>Phytolacca americana</i>	7.18
白草 <i>Pennisetum centrasiaticum</i>	4.80	鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	4.82	卵穗藁草 <i>Carex ovatisciculata</i>	6.43

由图 1 可知: 林下草本层 Simpson 指数表现为: 黑松-麻栎混交林 > 黑松-刺槐混交林 > 黑松纯林, 且在不同林分类型间差异显著 ($P < 0.05$); Shannon-Wiener 指数与 Margalef 指数均表现为黑松-刺槐混交林 > 黑松-麻栎混交林 > 黑松纯林, 且黑松-刺槐混交林与黑松纯林间差异显著 ($P < 0.05$); Pielou 指数也表现为黑松-刺槐混交林 > 黑松-麻栎混交林 > 黑松纯林, 黑松-刺槐混交林显著高于其他 2 种林分类型 ($P < 0.05$)。

3.3 不同林分类型黑松林下的土壤因子

由表 3 可知: 不同林分类型黑松林下的土壤 pH 值差异不显著, 黑松-麻栎混交林下的土壤电导率显著高于黑松-刺槐混交林与黑松纯林 ($P < 0.05$); 黑松纯林下的土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 含量均显著高于其他 2 种林分类型 ($P < 0.05$), AK 显著低于其他 2 种林分类型 ($P < 0.05$); 黑松-刺槐混交林下的 SOC、TN 均显著高于其他 2 种林分类型 ($P < 0.05$); 土壤 TP、AP 在各林分类型间差异不显著。

3.4 叶功能性状及林下物种多样性与土壤因子的冗余分析

由图 2A 可知: 林下植被物种多样性的 RDA 分析第一轴的解釋量为 55.38%, 第二轴的解釋量为 6.06%, 2 轴的累计解釋量为 61.44%。土壤 SOC、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 与全部多样性指标呈正相关, 土壤 AP 与 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Pielou 指数呈正相关, 与 Simpson 指数呈负相关。土壤 EC 与 Simpson 指数、Margalef 指数呈正相关, 与 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数呈负相关, 土壤 pH、AK、TP、TN 与各多样性指标均呈负相关。SOC、TP、AK、 NH_4^+ -N 能更好的解釋林下物种多样性的差异。

由图 2B 可知: 叶功能性状与土壤因子的 RDA 分析第一轴的解釋量为 69.95%, 第二轴的解

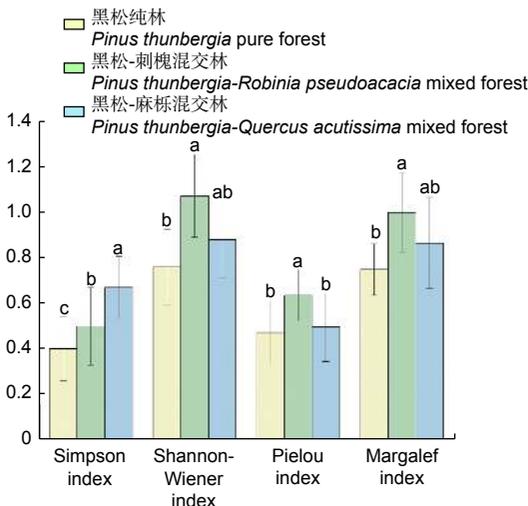


图 1 不同林分类型黑松林下草本层物种多样性特征
Fig. 1 Characteristics of species diversity in herb layer of *Pinus thunbergia* understory in different stand types

表 3 不同林分类型黑松林下土壤因子

Table 3 Understory edaphic factors of *Pinus thunbergia* in different stand types

项目 Type	黑松纯林 <i>Pinus thunbergia</i> pure forest	黑松-刺槐混交林 <i>Pinus thunbergia</i> - <i>Robinia pseudoacacia</i> mixed forest	黑松-麻栎混交林 <i>Pinus thunbergia</i> - <i>Quercus acutissima</i> mixed forest
pH值 pH value	5.88 ± 0.24 a	5.87 ± 0.12 a	5.97 ± 0.04 a
电导率 EC/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	40.68 ± 12.94 b	36.27 ± 11.87 b	55.50 ± 9.18 a
硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	3.12 ± 0.53 a	2.37 ± 0.47 b	2.17 ± 0.28 b
氨态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	6.26 ± 1.65 a	4.22 ± 0.98 b	4.04 ± 0.51 b
速效磷 AP/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	18.23 ± 9.55 a	13.20 ± 7.47 a	12.66 ± 3.75 a
速效钾 AK/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	6.69 ± 3.19 b	11.56 ± 6.05 a	11.42 ± 1.49 a
有机碳 SOC/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	7.27 ± 0.97 b	9.28 ± 2.02 a	7.11 ± 0.50 b
全氮 TN/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.21 ± 0.09 b	0.41 ± 0.03 a	0.21 ± 0.07 b
全磷 TP/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.06 ± 0.01 a	0.06 ± 0.01 a	0.05 ± 0.00 a

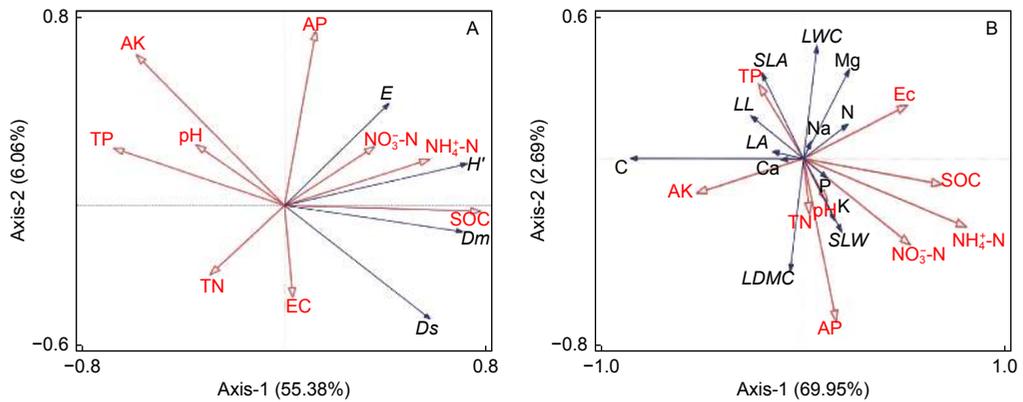


图 2 叶功能性状及林下物种多样性与土壤因子的 RDA 排序

Fig. 2 RDA ranking of leaf functional traits, understory species diversity and soil factors

释量为 2.69%，2 轴的累计解释量为 72.64%。LL、LA、叶 C、Ca 含量与土壤 TP、AK 呈正相关，与其他土壤因子呈负相关。SLA、LWC 含量与土壤 TP、EC 呈正相关，与其他土壤因子呈负相关。叶 Mg、Na 含量与土壤 EC、SOC、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 呈正相关，叶 N 含量与土壤 EC、SOC、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 呈正相关。SLW、叶 K 含量与土壤 TN、AP、pH、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 呈正相关，叶 P 含量与 TN、AP、pH、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 及 EC 呈正相关。LDMC 与土壤 TN、AP、pH、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、SOC 呈正相关。SOC、TP、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、AK 能更好的解释叶功能性状的差异。

4 讨论

4.1 不同林分类型黑松针叶功能性状差异及对土壤因子的响应

叶功能性状在纯林与混交林之间有不同的适应

策略^[24]，因而，不同林分类型之间黑松针叶的功能形状可能有不同表现。黑松纯林的 LA 与 LL 均显著高于其他 2 种混交林（表 1），LL 的增加可以提高 LA，从而对植物的光合作用产生影响^[25]，这表明黑松纯林可能通过增加 LL 与 LA 来获取更多的能量物质。黑松-麻栎混交林的 SLA 显著高于其他 2 种林分类型（表 1），SLA 可以很大程度上反映植物对环境的适应，SLA 在资源丰富的生境中较高^[26]，这表明黑松-麻栎混交林内的植物对环境的适应性可能较强。LDMC 也是植物叶片重要的功能性状，也能反映植物对环境的适应，且与 SLA 有协同效应，黑松-麻栎混交林的 LDMC 显著较低，SLA 显著较高（表 1），可以实现快速生产的目，而其他 2 种林分相对较低的 SLA 与相对较高的 LDMC 可以达到保存养分的目的^[27]。黑松-麻栎混交林的 LWC 显著较高，这可能与其较小的

SLW 有关, 随着 SLW 减小, 叶片储水的空间被释放, 进而导致 LWC 提高^[28]。黑松针叶各养分含量与张鹏^[29]对山东海岸黑松针叶含量的研究相比, 除 C 含量偏低外, 其他养分含量较接近。C 含量与中国东部 102 个物种叶片 C 含量相比 (374.1~646.5 g·kg⁻¹)^[30] 也偏低, 这表明研究区内针叶的储 C 能力偏低, 而 C 含量较高一般认为对外部环境的适应性较强^[31], 黑松纯林针叶的 C 含量显著高于其他林分类型 (表 1), 这可能与研究区黑松纯林的分布更靠近海岸, 受到的海风胁迫更严重, 会引起 C 同化速率降低, 同时针叶为应对胁迫进行的一系列生理活动加速了 C 的消耗有关^[32-33]。黑松-麻栎混交林针叶的 N 含量显著高于黑松纯林, 其 SLA 也显著较高 (表 1), 这验证了 SLA 与叶 N 含量存在正相关关系^[34]。叶的化学功能性状除 C、N 含量外, 其他养分含量在不同林分类型间差异不显著, 而 LL、LA、SLA 等结构功能性状在不同林分类型之间均表现出差异性 (表 1), 可见, 不同林分类型对黑松针叶的结构功能性状的影响强于化学功能性状。

土壤中的磷是植物磷元素的重要来源^[35], 土壤 TP 影响植物养分的利用策略, 从而导致叶功能性状的改变^[36]。本研究中, 土壤 TP 与 LA、LL 等结构功能性状相关性较强。有研究表明, 针叶的 P 含量与土壤中 NH₄⁺-N 显著相关^[27], 这可以解释 NH₄⁺-N 与化学功能性状显著相关 ($P < 0.05$), 与 NH₄⁺-N 相关的结构功能形状中仅有 SLW 在不同林分类型下有差异。土壤碳循环会受到凋落物、根系、微生物等多个生态过程的影响, 进而可能使叶片的功能性状发生改变^[37]。叶功能性状与 AK 也显著相关 ($P < 0.05$), 可见, 土壤可利用 K 元素也是影响叶功能性状的重要因子, 这与徐敏^[38]的研究结果相同。

4.2 不同林分类型黑松林下物种多样性及对土壤因子的响应

3 种林分类型的 Simpson 指数差异显著, 黑松纯林较低, 黑松-麻栎混交林最高。Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Pielou 指数均表现为黑松-刺槐混交林最高, 且均显著高于黑松纯林 ($P < 0.05$) (图 1), 黑松纯林下分布的科属种最多, 但其优势种优势度较大, 更多物种为偶见种, 导致其林下物种数与多样性指数不同步。由此可见, 混交林下的物种多样性、丰富性、分布均匀

程度明显高于纯林, 这与黄欣宇等^[39]对马尾松纯林与混交林下物种多样性的研究结果及陈笑等^[40]对不同人工林下草本植物多样性的研究结果基本一致, 与刘富强^[41]对山东沙质海岸黑松林及混交林下群落特征的结果也一致, 这可能与混交林通过改变林分结构使其得到优化, 有利于物质的循环, 从而改善林下生境, 使物种多样性提高有关^[42]。至于黑松-刺槐混交林下的物种多样性高于黑松-麻栎混交林, 这可能与林分密度有关。相关研究发现, 林分密度与林下物种多样性呈负相关^[43], 而研究区内黑松-刺槐混交林的林分密度 (559 株·hm⁻²) 低于黑松-麻栎混交林 (625 株·hm⁻²), 加之在调查中发现黑松-麻栎下出现了如臭椿 (*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle)、合欢 (*Albizia julibrissin* Durazz)、桑树 (*Morus alba* L.) 等乔木幼树, 这些幼树也会增大林分郁闭度, 占据生存空间, 从而导致林下植被多样性指数相对降低^[44]。物种多样性高可以使群落内保持相对的稳定, 更能适应外部环境的变化^[45], 这表明混交林可能更有利于提高林下植被群落的稳定性, 对其林下群落的发展起积极作用。

林下植被的物种多样性与土壤因子密切相关^[17], 黑松-刺槐混交林下的土壤有机碳含量显著高于其他林分类型, 其 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Pielou 指数也显著高于其他林分类型 (图 1), 这与廖娇娇等^[46]的研究结果一致, 土壤 SOC 含量与植被群落的多样性指数呈正相关, 这可能是由于植被多样性的提高使根系分布较广, 根际土养分充足促进了微生物活性, 导致 SOC 含量上升^[46]。分析结果表明, 土壤 AK 与物种多样性指数显著相关 ($P < 0.05$)。有研究发现, 土壤 AK 与群落稳定性有关, 群落稳定性可以反映物种多样性^[47], 黑松纯林下 AK 含量显著较低, 其稳定性可能较差, 可能说明其林下物种多样性较低, 而本研究发现黑松纯林下物种多样性较低, 表明土壤 AK 可以表征林下的物种多样性。土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 对林下物种多样性也有显著影响 ($P < 0.05$), 这说明土壤氮素也是植被多样性重要的影响因素, 这与陈笑等^[40]的研究结果一致。

5 结 论

研究区内共调查到草本层植物 14 科 31 属 32 种, 马唐与狗尾草为优势种, 主要伴生种有卵穗藎草、美洲商陆、鸭跖草等。研究发现, 不同林分类型对黑松针叶的功能性状、林下物种多样性及

林下土壤因子均有一定影响。针叶结构功能性状相较于化学功能性状对外部环境的反应更敏锐,黑松-刺槐混交林物种多样性较高,黑松-麻栎混交林更倾向于快速生长的开放型策略,而黑松纯林与黑松-刺槐混交林相对倾向于保守型策略,混交林更有利于提高林下物种多样性及群落稳定性。林分的优化要综合考虑林分类型、林下植被及土壤养分。

参考文献:

- [1] 葛兆轩,苑美艳,单博文,等.塞罕坝北落叶松人工林不同经营模式效果评价[J].林业科学研究,2020,33(5):38-47.
- [2] 刘亚栋,王晓霞,和璐璐,等.北京地区油松人工林不同演替类型空间结构对林下植被及土壤的影响[J].生态学报,2023,43(5):1-12.
- [3] 毛燕,林虎,孙林山,等.柏木人工林林分空间结构对林下物种多样性的影响[J].广西林业科学,2021,50(6):639-645.
- [4] NILSSON M C, WARDLE D. Understory vegetation as a forest ecosystem driver: evidence from the northern Swedish boreal forest[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(8): 421-428.
- [5] 吴海平,孙清琳,张彦君,等.不同密度油松人工林群落特征与物种多样性耦合关系[J].西北林学院学报,2022,37(5):1-8.
- [6] 段文军,李达,李冲.5种不同林龄巨桉人工林林下植物多样性及其影响因素分析[J].生态环境学报,2022,31(5):857-864.
- [7] 农友,卢立华,贾宏炎,等.桂西南岩溶区不同恢复模式群落生物量及林下植物多样性[J].林业科学研究,2017,30(2):200-205.
- [8] 武秀娟,奥小平.油松林火烧迹地恢复初期林下植被特征[J].西北林学院学报,2022,37(5):155-161.
- [9] WANG Y B, XIE Y, LIU X Q, et al. Climate and human induced 2000-year vegetation diversity change in Yunnan, southwestern China[J]. *The Holocene*, 2022, 32(11): 1327-1339.
- [10] 郑大桢,秦倩倩,邱聪,等.重度火烧1年后林下植被的物种多样性及叶功能性状[J].应用与环境生物学报,2022,28(6):1601-1607.
- [11] DUAN X G, JIA Z Y, LI J Q, et al. The influencing factors of leaf functional traits variation of *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 38: e02177.
- [12] 焦亮,关雪,刘雪蕊,等.内陆河湿地芦苇叶功能性状特征及其对土壤环境因子的响应[J].干旱区研究,2020,37(1):202-211.
- [13] 杨克彤,陈国鹏.红豆杉幼树异龄叶的功能性状[J].应用生态学报,2022,33(2):329-336.
- [14] 周丽丽,钱瑞玲,李树斌,等.滨海沙地主要造林树种叶片功能性状及养分重吸收特征[J].应用生态学报,2019,30(7):2320-2328.
- [15] 褚青帅,刘贵华,邢伟.青藏高原湿地植物轻金属元素含量特征及其与环境因素的关系研究[J].植物科学学报,2021,39(2):121-131.
- [16] 黄雍容,叶功富,高伟,等.亚热带海岸沙地主要树种叶片金属元素含量与重吸收率[J].亚热带资源与环境学报,2021,16(2):10-16.
- [17] 陈瑶,李云红,邵英男,等.阔叶红松林物种多样性与土壤理化特征研究[J].生态环境学报,2022,31(4):679-687.
- [18] ZHANG J Y, QIN G Z, ZHAI Z, et al. Diverse understory vegetation alleviates nitrogen competition with crop trees in poplar plantations[J]. *Forests*, 2021, 12(6): 705.
- [19] ZHAO F Z, KANG D, HAN X H, et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 415-422.
- [20] 韦维,卢立华,李华,等.林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J].生态学报,2021,41(11):4521-4530.
- [21] 何雅琴,史晓洁,陈国杰,等.滨柃叶功能性状对环境因子的响应[J].生态学报,2022,42(6):2418-2429.
- [22] 王超,卢杰,姚慧芳,等.急尖苞冷杉叶功能性状特征及其环境响应[J].森林与环境学报,2022,42(2):123-130.
- [23] 张秀芳,穆振北,林美娇,等.琅岐岛4种优势植物叶功能性状及其影响因子[J].应用与环境生物学报,2020,26(3):667-673.
- [24] IGOR A, PAULO S M, ANGE'LICA O. M, et al. Leaf functional traits and monodominance in Southern Amazonia tropical forests[J]. *Plant Ecology*, 2022, 223: 185-200.
- [25] 田岳梨.秦岭山脊油松针叶功能性状特征及其对土壤和海拔的响应[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [26] YANG J, CI X Q, LU M M, et al. Functional traits of tree species with phylogenetic signal co-vary with environmental niches in two large forest dynamics plots[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2014, 7(2): 115-125.
- [27] 王泽鑫,刘洪柳,郭晋平,等.油松天然林针叶功能性状及其与土壤养分的关系[J].森林与环境学报,2022,42(3):262-270.
- [28] 刘朝阳.4种乡土珍贵树种叶功能性状和小枝生物量及其影响因素的研究[D].南宁:广西大学,2020.
- [29] 张鹏.海岸梯度上黑松针叶性状的适应性研究[D].北京:中国林业科学研究院,2018.
- [30] 任书杰,于贵瑞,姜春明,等.中国东部南北样带森林生态系统102个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征[J].应用生态学报,2012,23(3):581-586.
- [31] 俞月凤,何铁光,曾成城,等.喀斯特区不同退化程度植被群落植物-凋落物-土壤-微生物生态化学计量特征[J].生态学报,2022,42(3):935-946.
- [32] McDowell N G. Mechanisms Linking Drought, Hydraulics, Carbon Metabolism, and Vegetation Mortality[J]. *Plant Physiology*, 2011, 155(3): 1051-1059.
- [33] SMITH V C, ENNOS A R. The effects of air flow and stem flexure on the mechanical and hydraulic properties of the stems of sunflowers *Helianthus annuus* L.[J]. *Journal of experimental botany*, 2003, 54(383): 845-849.
- [34] 魏海霞,董庆芝,周忠科,等.毛乌素沙地不同生境主要植物叶性状研究[J].干旱区资源与环境,2022,36(1):172-177.
- [35] 马剑.祁连山北麓中段典型灌丛群落生态化学计量特征研究[D].兰州:甘肃农业大学,2021.
- [36] 赵江平.人工刺槐中龄林密度和抚育年限对林分组成结构、植物功能性状和土壤性质的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [37] 何斌,李青,冯图,等.不同林龄马尾松人工林针叶功能性状及其与土壤养分的关系[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(2):181-190.
- [38] 许敏.喀斯特石漠化生境质量与林灌草多样性修复研究[D].贵

阳: 贵州师范大学, 2019.

- [39] 黄欣宇, 黄春晖, 聂锦燕, 等. 马尾松-湿加松混交林与马尾松纯林生长量及林下植被特征分析[J]. 浙江林业科技, 2022, 42 (4): 30-36.
- [40] 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.
- [41] 刘富强. 山东省沙质海岸防护林群落多样性及其土壤理化性质研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2009.
- [42] 王 磊, 温远光, 周晓果, 等. 尾巨桉与红锥混交对林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31 (7): 1340-1349.
- [43] ASHFAQ A, DONG D, KASHIF A, *et al*. Response of understory vegetation, tree regeneration, and soil quality to manipulated stand density in a *Pinus massoniana* plantation[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 20(C): e00775.
- [44] 周钰淮, 王瑞辉, 刘凯利, 等. 抚育间伐对川西柳杉人工林生长和林下植被多样性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42 (6): 65-74,84.
- [45] 张继义, 赵哈林. 植被(植物群落)稳定性研究评述[J]. 生态学杂志, 2003, 22 (4): 42-48.
- [46] 廖娇娇, 窦艳星, 安韶山. 黄土高原不同植被群落多样性与土壤有机碳密度关系研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29 (4): 75-82.
- [47] 张奇奇, 韩广轩, 路 峰, 等. 不同修复年限对黄河三角洲湿地植物多样性和群落稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41 (7): 1249-1257.

Effects of Different Stand Types on Leaf Functional Traits, Understory Species Diversity and Soil Nutrients

REN Yi-wei¹, ZHONG Xiao-ying¹, YI Hua-peng¹, CHANG Yao²

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China; 2. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang China)

Abstract: [Objective] To explore the needle functional traits, understory species diversity and understory soil factors of different forest types (*Pinus thunbergia* pure forest, *Pinus thunbergia* -*Robinia pseudoacacia* mixed forest, *Pinus thunbergia* -*Quercus acutissima* mixed forest) for providing basis and reference for the construction and management of *Pinus thunbergia* in the coastal shelter forest. [Methods] Based on *Pinus thunbergia* in the coastal shelter forest of Muping, Yantai, the needles and understory 0~20cm soil samples of *Pinus thunbergia* were collected, and the understory species diversity was investigated. The related functional traits of needles and soil physical and chemical properties were measured, and the understory species diversity index was calculated. Also the effects of understory soil factors on needle functional traits and understory species diversity were analyzed by RDA. [Results] (1) Different stand types had significant effects on leaf structural traits such as leaf area (LA), leaf length (LL), specific leaf area (SLA), specific leaf weight (SLW), leaf dry matter mass (LDMC) and leaf water content (LWC), while only C and N contents were significantly affected by leaf chemical traits. (2) Different stand types had significant effects on understory vegetation diversity indexes. Simpson index was the highest in the *Pinus thunbergia* -*Quercus acutissima* mixed forest, Shannon-Wiener index, Margalef index and Pielou index were the highest in the *Pinus thunbergia* -*Robinia pseudoacacia* mixed forest, and all indexes were the lowest in the *Pinus thunbergia* pure forest. *Digitaria sanguinalis* and *Pennisetum alopecuroides* were dominant in each community. (3) Different stand types had significant effects on soil EC, SOC, TN, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N and AK. (4) SOC, AK and NH₄⁺-N had significant effects on leaf functional traits and understory species diversity, while TP and NO₃⁻-N had significant effects on functional traits and species diversity, respectively. [Conclusion] Under the experimental conditions, the functional traits of *Pinus thunbergii* needles and the diversity of understory species under different stand types have certain responses to the understory soil factors. The construction and management of shelterbelt should comprehensively consider the role of stand type, understory vegetation and soil nutrients.

Keywords: *Pinus thunbergii*; mixed forest; leaf functional trait; diversity of species; edaphic factor