



不同密度格木幼林的土壤理化与林下植被特征

LOMINA Sayavong, 汪丛啸, 李万年, 刘志龙, 杨梅

引用本文:

LOMINA Sayavong, 汪丛啸, 李万年, 刘志龙, 杨梅. 不同密度格木幼林的土壤理化与林下植被特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(3): 305–314.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4590>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国南方4种常见人工林林下植物多样性特征及影响因素

Understory Plant Diversity Characteristics and Influencing Factors of Four Common Plantations in South China

热带亚热带植物学报. 2022, 30(1): 1–10 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4413>

短期增温对亚热带常绿阔叶林林下植被物种多样性的影响

Effects of Short-term Warming on Species Diversity of Understory Vegetation in Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest

热带亚热带植物学报. 2023, 31(2): 153–162 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4575>

金马河温江段河岸带不同生境植物物种多样性与土壤理化性质的动态变化

Dynamic Changes in Plant Diversity and Soil Physical and Chemical Properties in Different Habitats in Wenjiang Section of Jinma River

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 1–8 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4237>

人为干扰对栲树次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响

Effect of Human Disturbance on Species Diversity and Soil Physiochemical Properties of *Castanopsis fargesii* Secondary Forest

热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 355–362 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3843>

广州红锥-马占相思林物种组成与多样性研究

Studies on Species Composition and Diversity of *Castanopsis hystrix*-*Acacia mangium* Mixed Forest in Guangzhou

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 494–502 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4361>

向下翻页，浏览PDF全文

不同密度格木幼林的土壤理化与林下植被特征

LOMINA Sayavong^{1,2}, 汪丛啸¹, 李万年¹, 刘志龙³, 杨梅^{1*}

(1. 广西大学林学院, 广西高校亚热带人工林培育与利用重点实验室, 南宁 530004; 2. 老挝农林农村发展研究所森林研究中心, 老挝 万象 01000; 3. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西 凭祥 532600)

摘要: 为探索适合格木(*Erythrophleum fordii*)人工林在幼龄阶段的种植密度, 在不同林分密度(2 m×1 m、2 m×2 m、2 m×3 m、3 m×3 m)的 6 a 生格木人工林下设置标准样地, 采用土壤质量评价和灰色关联度等方法, 探究不同密度下格木幼林的土壤理化与林下植被特征。结果表明, 密度 2 m×3 m 下的林木胸径、树高最优, 较最低水平高 16.7%、27.9%; 土壤总孔隙度最大, 全 N、硝态 N、铵态 N 含量最高, 灌木草本多样性最高。相关性分析表明土壤化学性质对灌木草本的多样性影响最大。不同林分密度下格木幼林土壤理化性质及林下植物多样性有显著差异, 因此, 选择合适的林分密度对人工林土壤肥力的可持续利用及林分的经营培育至关重要。

关键词: 格木; 林分密度; 土壤理化性质; 植物多样性; 林下植被

doi: 10.11926/jtsb.4590

Characteristics of Soil Physicochemistry and Understory Vegetation in Young Plantation of *Erythrophleum fordii* Under Different Densities

LOMINA Sayavong^{1,2}, WANG Congxiao¹, LI Wannian¹, LIU Zhilong³, YANG Mei^{1*}

(1. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory for Cultivation and Utilization of Subtropical Forest Plantation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Forest Research Center, Agriculture, Forestry and Rural Development Research Institute, Vientiane 01000, Lao PDR; 3. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forest, Pingxiang 532600, Guangxi, China)

Abstract: To explore the suitable density for young plantations of *Erythrophleum fordii*, standard plots were set in 6-year-old *Erythrophleum fordii* plantation with different densities (2 m×1 m, 2 m×2 m, 2 m×3 m, 3 m×3 m), the characteristics of soil physicochemistry and understory vegetation in young plantation were studied by using soil quality evaluation and grey correlation method. The results showed that the DBH and height of trees under the density of 2 m×3 m were optimal, which were 16.7% and 27.9% higher than the lowest level, and the total porosity, total N, nitrate N and ammonium N contents of soil, as well as shrub and herb diversities also were the highest. After analyzing the correlation between soil physical and chemical properties and plant diversity, soil chemical properties had the greatest influence on shrub and herb diversity. There were significant differences in soil physical and chemical properties and understory plant diversity of *E. fordii* plantation among different stand densities. Therefore, it was very important to select appropriate density for the sustainable utilization of soil fertility, management and cultivation of plantations.

Key words: *Erythrophleum fordii*; Planting density; Soil physicochemical properties; Plant diversity; Understory vegetation

收稿日期: 2021-12-10 接受日期: 2022-05-08

基金项目: 广西自然科学基金重点项目(2021GXNSFDA196003); 广西林业科技推广示范项目[桂林科研(2021)7号]资助

This work was supported by the Key Project for Natural Science in Guangxi (Grant No. 2021GXNSFDA196003), and the Project for Forestry Science and Technology Extension Demonstration in Guangxi (Grant No. (2021)7).

作者简介: LOMINA Sayavong (1986年生), 男, 硕士研究生, 研究方向为森林培育学。E-mail: lomina.frc@gmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fyangmei@126.com

林分密度是指林木对其所占空间的利用程度,是影响林分生长和木材产量的重要因子。大量研究证实合理的密度能保证林分的正常生长,并提出了一些基于密度效应的生长模型^[1]。土壤作为森林生态系统中参与养分循环,促进生物量生产的重要介质,是林木赖以生存的基础。不同的林分密度是造成土壤理化性质差异的重要原因之一^[2-5],对林木的干形材质、人工林的生产力及土壤的理化性质有决定性的影响^[6]。林下植被多样性是衡量森林生态系统复杂性和稳定性的重要指标,体现了各物种在环境中的竞争与共生关系^[7]。研究表明合理的林分密度能有效提高林下植物多样性,从而改善群落结构稳定性^[8-9]。同时,土壤理化性质也与植物多样性密切相关,两者互作对生态系统的稳定有重要意义^[10]。通过控制林分密度,促进林下植被的生长发育以维持地力^[11-15],是保证人工林结构功能稳定、提升林木产量的重要措施之一^[16]。

格木(*Erythrophleum fordii*)是苏木科(Caesalpiaceae)格木属的高大乔木,树木材质坚硬,耐腐蚀性强,是良好的建筑用材、家具用材及工艺材料,1997年被列为国家二级重点保护植物^[17-19]。近年来对格木的研究主要集中在种子发育、繁殖特征和生物量等方面^[20-22]。格木人工林生长过程中,林分密度对其经济效益和生态系统的稳定性有重要影响,目前对这方面的研究并不多见。本文拟通过不同密度的格木人工林,对其土壤理化性质以及林下植物多样性进行差异性分析,结合林木的生长指标,为适合格木人工林在幼龄阶段种植的密度提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

研究地位于广西壮族自治区凭祥市中国林业科学院热带林业实验中心(106°41'~106°59' E, 21°57'~22°16' N),属南亚热带季风气候区,年均降雨量 1 500 mm,年均气温 21 °C。土层深厚,以红壤和砖红壤为主,土壤呈酸性。

1.2 林分概况与样地设置

格木人工林的前茬为 24 a 林龄的马尾松人工林,原有林下植被为野桐(*Mallotus japonicus*)、梨叶悬钩子(*Rubus pirifolius*)、粗叶悬钩子(*R. alceaefolius*)、半边旗(*Pteris semipinnata*)等。2014 年 9 月皆伐,全面清理林下植被后进行整地,2015 年 3 月营造格木

人工林,设置 4 种不同林分密度,分别为 2 m×1 m、2 m×2 m、2 m×3 m、3 m×3 m。按设计密度、株行距定点挖穴,穴规格为 40 cm(面宽)×40 cm(底宽)×30 cm(深),每株施基肥 0.5 kg,配比为尿素:过磷酸钙:氯化钾=2.2:1.5:0.3。林分位于海拔 250 m 处,林分所处土壤腐殖质厚度为 3~5 cm,立地指数 20,坡位均为阳坡。造林后 3 a 内,每年施复合肥 1 次,除草 1 次。

2021 年 3 月进行标准地的设置,在每个林分密度下设置 3 个 20 m×20 m 标准地,同一林分内相邻样地间隔 10~20 m。每个标准地以田字分为 4 个 10 m×10 m 的小样方,调查各小样方的植物多样性,采用对角线法采集土壤样品。密度为 2 m×1 m、2 m×2 m、2 m×3 m 和 3 m×3 m 的格木人工林郁闭度分别为 0.9、0.8、0.8 和 0.7。

1.3 土壤样品采集和测定

在每个标准地中沿 1 条对角线设置 3 个采样点,取 0~20 和 20~40 cm 共 2 个土层的环刀样品用于测定土壤物理性质;同时分别取 2 个层次的土样,混合后装入密封袋,带回实验室后风干、研磨、过筛保存,用于土壤化学性质测定。

土壤容重、持水量、孔隙度、通气度等物理性质采用环刀法测定;土壤全 N 采用浓硫酸-高氯酸消煮-凯氏定 N 法测定;铵态 N、硝态 N 采用连续流动分析仪(TRACCS-2000 continuous flow analytical, CFA)测定;全 P 采用浓硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定;速效 P 采用盐酸-氟化铵浸提-钼锑抗比色法^[23-24]测定;全 K 采用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定;速效 K 采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

1.4 植物多样性调查

调查记录每个标准地各样方内灌木和草本的种名、株数或丛数、高度、盖度等,计算灌木层和草本层物种的重要值,相对密度=某种的株数/全部种的株数;相对频度=某种的频度/所有种的频度之和;相对优势度=某种的盖度/全部种的盖度之和;重要值=(相对密度+相对频度+相对优势度)/3。

然后采用 Margalef 丰富度指数(d_M)、Shannon-wiener 指数(H)、Pielou 均匀度指数(J)、Simpson 优势度指数(D)分析群落中的灌木层和草本层的物种多样性^[25-26]。

1.5 土壤质量评价

由于土壤指标多样且量纲不一致,评价前先对

数据进行标准化处理: $F(X_i)=(X_{imax}-X_{ij})/(X_{imax}-X_{imin})$, 式中, $F(X_i)$ 为土壤各指标的隶属度值, X_{imax} 为第 i 项因子的最大值, X_{imin} 为第 i 项因子的最小值, X_{ij} 为第 i 项因子的平均值。

将标准化后的数据采用主成分分析的方法核算各项指标的公因子方差, 并按照各项指标公因子方差占总公因子方差的百分比作为权重(W_i), 计算格木幼林的土壤质量指数(F)^[27]: $F=\sum[W_i \times F(X_i)]$ 。

1.6 数据的统计分析

应用 IBM SPSS Statistics 24.0 中单因素方差分析(One-Way ANOVA)和多重比较(LSD), 检验不同林分密度林分土壤理化性质和林下植物多样性在各特征指标上的差异($P<0.05$); 运用主成分分析(PCA)以提取土壤指标的主成分用于土壤质量的评价; 应用 DPS 数据处理系统进行灰色关联度分析。

2 结果和分析

2.1 格木林的生长指标

随着种植密度的增加, 格木人工林的平均树高、胸径和冠幅均呈先增大后下降的趋势, 峰值均出现在林分密度为 2 m×3 m 时, 说明在该密度下格木的生长状况较优(图 1)。林分密度为 2 m×3 m 时, 格木的平均树高、胸径和冠幅分别较最低水平高 16.7%、27.9%和 26.7%, 达差异显著水平($P<0.05$)。

2.2 不同林分密度下格木林地土壤物理性质

土壤水分 由表 1 可见, 不同林分密度间土壤毛管持水量的差异不显著。0~20 cm 土层的土壤田间持水量随林分密度增大呈先上升后下降的趋势, 在密度为 2 m×3 m 时达到最大(23.41%); 20~40 cm 土层的土壤田间持水量随林分密度的增加而逐渐下降。不同林分密度下土壤最大持水量无明显

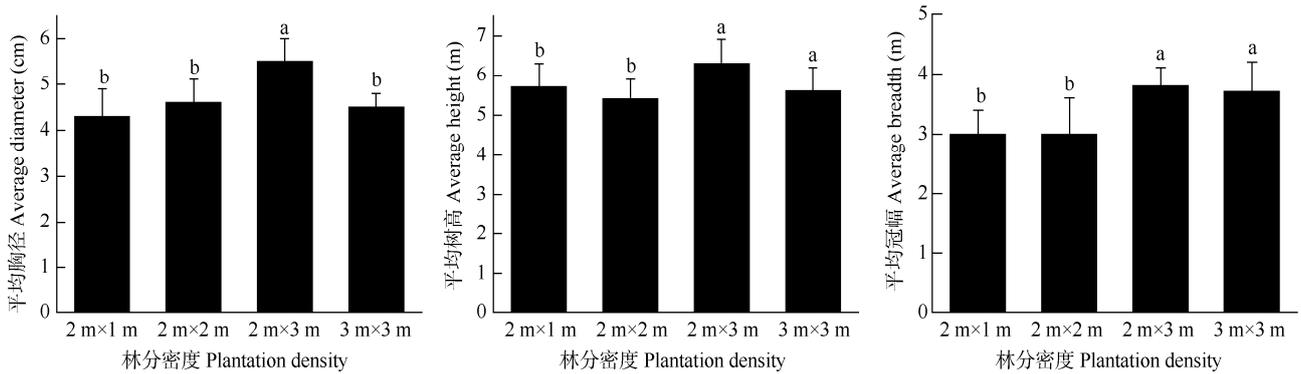


图 1 不同密度格木林的平均胸径、树高和冠幅。柱上不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Fig. 1 Mean DBH, height and crown of *Erythrophleum fordii* plantation with different density. Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level. The same below

表 1 不同林分密度格木人工林的土壤水分

Table 1 Soil moisture changes of *Erythrophleum fordii* plantations in the different density

土层 (cm) Soil layer	密度 (m) Density	毛管持水量 /% Capillary water capacity	田间持水量 /% Field water capacity	最大持水量 /% Maximum water capacity
0~20	2×1	25.69±1.52a	18.67±1.97abc	28.15±0.93abc
	2×2	22.06±0.57a	21.37±0.77a	25.70±1.05cd
	2×3	24.10±1.22a	23.41±2.53a	27.14±2.35bed
	3×3	27.03±0.59a	16.25±3.43bc	31.26±0.71a
20~40	2×1	23.30±0.60a	13.95±3.83c	24.69±1.11d
	2×2	24.11±1.13a	19.12±3.90ab	28.93±0.97abc
	2×3	26.79±2.52a	20.19±1.17ab	29.78±1.02ab
	3×3	25.78±2.29a	23.51±0.60a	28.63±2.31abc

同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.05 level. The same below

变化规律。

土壤孔隙度 由表 2 可见, 不同密度林分的土壤容重和总孔隙度差异并不显著($P>0.05$), 2 个土层的容重均以密度为 2 m×3 m 时最小, 而 2 个土层

的总孔隙度均以密度为 2 m×3 m 时最大。土壤通气度在不同林分密度间的差异显著($P<0.05$), 2 个土层的土壤通气度均以密度为 2 m×3 m 时最高, 密度为 3 m×3 m 时最低, 分别高了 414.6%和 120.3%。

表 2 不同林分密度格木人工林的土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties of *Erythrophleum fordii* plantations with different density

土层 (cm) Soil layer	密度 (m) Density	容重 (g/cm ³) Bulk density	毛管孔隙度 /% Capillary porosity	非毛管孔隙度 /% Non-capillary porosity	总孔隙度 /% Total porosity	通气度 /% Aeration
0~20	2×1	1.62±0.11a	40.79±3.28bc	3.91±0.9 a	44.70±3.00ab	13.57±1.44a
	2×2	1.57±0.09a	38.41±2.88bc	2.53±0.29b	40.94±1.65bc	8.90±0.95c
	2×3	1.50±0.12a	44.09±2.26a	2.74±0.41b	46.83±2.93a	14.41±0.60a
	3×3	1.50±0.14a	39.62±3.32bc	3.87±0.66a	43.39±1.61ab	2.80±0.41e
20~40	2×1	1.60±0.13a	34.67±1.42d	3.92±0.27a	38.59±1.87c	5.70±0.09d
	2×2	1.42±0.13a	37.63±3.70c	3.84±0.50a	41.47±1.70bc	5.75±0.45d
	2×3	1.49±0.12a	41.16±1.39b	3.55±0.28a	44.71±1.09ab	11.85±1.13b
	3×3	1.59±0.12a	39.57±0.78bc	1.64±0.30c	41.21±2.79bc	5.38±0.52d

2.3 格木林地土壤化学性质

土壤全 N 含量随林分密度增大先上升后下降, 土壤铵态 N 含量的变化趋势与全 N 一致(表 3)。同时, 土壤铵态 N 和硝态 N 含量均在密度为 2 m×3 m 时最大; 土壤全 P 含量随林分密度增大而减小, 同一土层中, 土壤速效 P 含量随林分密度的增大先升后降; 土壤全 K 含量的差异不显著($P>0.05$), 在 2 个土层中全 K 含量均在密度为 2 m×3 m 时最大; 土壤速效 K 含量在不同林分密度间的差异显著($P<0.05$), 密度为 2 m×2 m 时的土壤速效 K 含量显著高于其他 3 个林分密度。

2.4 土壤质量评价

由于土壤容重(X_{11})大小与土壤质量成反比, 因此在数据标准化时采用容重的倒数。土壤指标的主成分分析和权重核算结果见表 4, 进而计算不同密度格木人工林的土壤质量指数(F)。由图 2 可见, 土壤质量指

数随林分密度的增大呈先上升后下降的趋势, 在密度为 2 m×3 m 时最高(0.546), 说明在该密度下土壤的理化性质最优, 而此后土壤质量指数逐渐下降。

2.5 林下植物多样性

植被优势种 从表 5 可见, 格木人工林样地内的植物种类较为丰富。灌木层中, 粗叶榕(*Ficus hirta*)在 2 m×1 m、2 m×2 m 和 2 m×3 m 密度下的重要值均较高, 在 2 m×1 m 密度下重要值较高的还有椴木(*Aralia chinensis*)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum*)等, 2 m×2 m 密度下则有粗糠柴(*Mallotus philippensis*)和椴木, 而 2 m×3 m 密度下则有 大叶土蜜树(*Bridelia fordii*)和大果榕(*F. auriculata*)。3 m×3 m 密度下灌木种类较少, 重要值较高的有粗糠柴和抱茎菝葜(*Smilax ocreata*)。草本层中, 4 个林分密度下白花鬼针草(*Bidens pilosa*)的重要值均超过 20, 为格木人工林的草本优势种。

表 3 不同林分密度格木人工林的土壤化学性质

Table 3 Soil chemistry properties of *Erythrophleum fordii* plantations with different densities

土层(cm) Soil layer	密度 (m) Density	全 N (g/kg) Total N	铵态 N (mg/kg) Ammonium N	硝态 N (mg/kg) Nitrate N	全 P (g/kg) Total P	速效 P (mg/kg) Available P	全 K (g/kg) Total K	速效 K (mg/kg) Available K
0~20	2×1	0.16±0.01b	19.05±1.62ab	0.18±0.03c	0.69±0.04a	11.62±0.68cd	1.63±0.36a	86.80±1.13b
	2×2	0.20±0.01b	15.37±1.68cd	0.25±0.04b	0.72±0.03a	12.78±2.68bc	1.68±0.21a	105.50±1.70a
	2×3	0.36±0.05a	21.28±1.19a	0.36±0.04a	0.73±0.04a	11.57±1.50cd	1.72±0.23a	79.13±3.39c
	3×3	0.16±0.04b	15.39±1.13cd	0.26±0.05b	0.75±0.05a	8.09±0.79e	1.71±0.36a	59.10±1.02e
20~40	2×1	0.20±0.03b	13.27±1.94de	0.27±0.01b	0.53±0.04b	15.39±3.30a	1.53±0.20a	67.90±0.76d
	2×2	0.21±0.05b	14.50±0.57cd	0.30±0.04b	0.41±0.08c	11.82±0.92bcd	1.55±0.17a	88.43±2.03b
	2×3	0.19±0.04b	16.97±1.71bc	0.31±0.04ab	0.71±0.12a	12.85±0.61b	1.58±0.27a	58.20±3.40e
	3×3	0.14±0.04b	11.29±0.31e	0.26±0.02b	0.72±0.05a	10.96±0.53d	1.57±0.27a	56.30±2.69e

表4 正交旋转后主成分的载荷矩阵、公因子方差及权重

Table 4 Load matrix, common factor variance and weight of principal components after orthogonal rotation

指标 Index	主成分 Principal component						公因子方差 Communality	权重 Weight
	1	2	3	4	5	6		
全 N Total N (X ₁)	0.409	-0.364	0.177	0.639	-0.260	-0.292	0.804	0.080
铵态 N Ammonium N (X ₂)	0.556	-0.105	-0.325	0.143	0.316	0.240	0.906	0.068
硝态 N Nitrate N (X ₃)	0.066	0.141	0.209	0.756	0.429	0.071	0.871	0.052
全 P Total P (X ₄)	0.307	0.318	0.536	-0.212	-0.497	0.632	0.802	0.087
速效 P Available P (X ₅)	-0.095	-0.480	0.083	-0.137	0.196	-0.544	0.556	0.052
全 K Total K (X ₆)	0.076	-0.255	-0.224	0.220	0.312	0.806	0.859	0.058
速效 K Available K (X ₇)	0.281	-0.504	-0.212	-0.384	0.260	0.138	0.591	0.062
毛管持水量 Capillary water-holding capacity (X ₈)	0.194	0.558	-0.266	-0.300	0.193	-0.362	0.784	0.066
田间持水量 Field water-holding capacity (X ₉)	0.321	-0.140	0.596	0.335	0.581	0.333	0.725	0.075
最大持水量 Maximum water-holding capacity (X ₁₀)	0.084	0.559	-0.090	-0.291	0.394	-0.241	0.789	0.059
容重 Bulk density (X ₁₁)	-0.123	-0.211	0.283	-0.306	-0.770	-0.160	0.827	0.053
毛管孔隙度 Capillary porosity (X ₁₂)	0.468	0.244	0.491	-0.347	0.449	0.204	0.725	0.080
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity (X ₁₃)	0.142	0.185	-0.753	-0.209	0.335	0.264	0.879	0.059
总孔隙度 Total porosity (X ₁₄)	0.472	0.338	0.197	0.510	-0.249	0.287	0.727	0.078
土壤通气度 Soil aeration (X ₁₅)	0.542	-0.282	0.262	0.235	-0.213	-0.193	0.841	0.070
特征值 Eigenvalue	3.496	2.737	1.658	1.449	1.238	1.108		
贡献率 Contribute rate /%	19.864	17.984	10.670	10.365	9.864	9.158		
累积贡献率 Cumulative contribute rate /%	19.864	37.848	48.517	58.882	68.746	77.904		

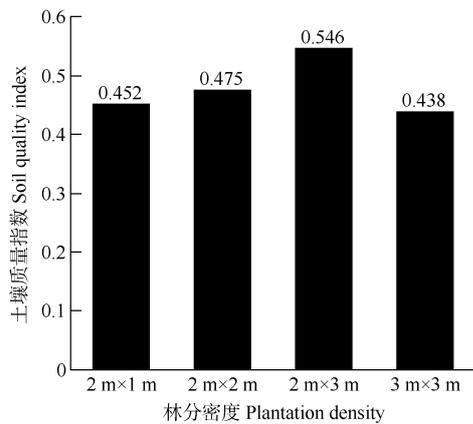


图2 不同密度林分的土壤质量指数

Fig. 2 Soil quality index of different stand density

表5 不同密度格木人工林灌木层和草本层的植物重要值

Table 5 Importance values at shrub and herb layer of *Erythrophleum fordii* plantations with different densities

序号 No.	植物 Species	密度 Density (m)			
		2x1	2x2	2x3	3x3
灌木层 Shrub layer					
1	白花银背藤 <i>Argyreia seguinii</i>	0.46	0.70	2.05	
2	抱茎菝葜 <i>Smilax ocreata</i>	1.73	0.94	0.56	2.08
3	潺槁树 <i>Litsea glutinosa</i>	1.54	0.38	0.75	0.90
4	秤星树 <i>Ilex asprella</i>	0.33		1.16	
5	臭茉莉 <i>Clerodendrum philippinum</i>	0.62			1.07
6	楸木 <i>Aralia chinensis</i>	2.87	2.57	3.34	1.40
7	粗糠柴 <i>Mallotus philippensis</i>	1.90	2.83	2.97	4.20
8	粗叶榕 <i>Ficus hirta</i>	6.16	12.88	5.25	

植被物种多样性

群落中的物种数量和均匀度决定着群落的复杂程度。由图3可见,林下草本层和灌木层植物多样性变化规律基本一致,随着林分密度增大,4个多样性指数均呈现先上升后降低再上升的趋势。不同林分密度下,灌木层的4个多样性指标均高于草本层,说明格木林下植被中灌木种类较草本更多。总体来看,2 m x 3 m 密度下的4个多样性指数均较高。

2.6 植被多样性与土壤理化性质的关系

灌木层 Shannon-Wiener 指数(H)和 Pielou 均匀度(J)与土壤容重的关联度最大,H 与土壤物理性质的关联度依次为容重(0.342)>毛管持水量(0.218)>

续表(Continued)

序号 No.	植物 Species	密度 Density (m)			
		2×1	2×2	2×3	3×3
9	粗叶悬钩子 <i>Rubus alceaefolius</i>	0.88	7.87		
10	大果榕 <i>Ficus auriculata</i>			5.16	1.18
11	大罗伞树 <i>Ardisia hanceana</i>	0.35			0.96
12	大青 <i>Clerodendrum cyrtophyllum</i>	2.50	1.02	1.06	
13	大叶土蜜树 <i>Bridelia fordii</i>	1.14	0.92	3.89	
14	地桃花 <i>Urena lobata</i>	0.31	0.88	0.44	0.28
15	毒根斑鸠菊 <i>Vernonia cumingiana</i>	2.12		0.85	0.63
其他 Other		76.52	69.01	72.52	87.30
草本层 Herb layer					
1	白花鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	21.40	25.93	25.33	32.35
2	半边旗 <i>Pteris semipinnata</i>	2.14	2.71	1.49	
3	东方乌毛蕨 <i>Blechnum orientale</i>	0.68			
4	东风草 <i>Blumea megacephala</i>	2.39	3.69	3.09	1.64
5	飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i>	3.19	2.49	8.78	4.94
6	粪箕笃 <i>Stephania longa</i>	2.44	1.54	1.54	0.72
7	海金沙 <i>Lygodium japonicum</i>	5.02	6.10	2.58	7.06
8	海芋 <i>Alocasia macrorrhiza</i>	0.70			
9	华南毛蕨 <i>Cyclosorus parasiticus</i>	1.21	1.81	0.74	0.73
10	华山姜 <i>Alpinia chinensis</i>	0.63			1.52
其他 Other		60.20	55.73	56.45	51.04

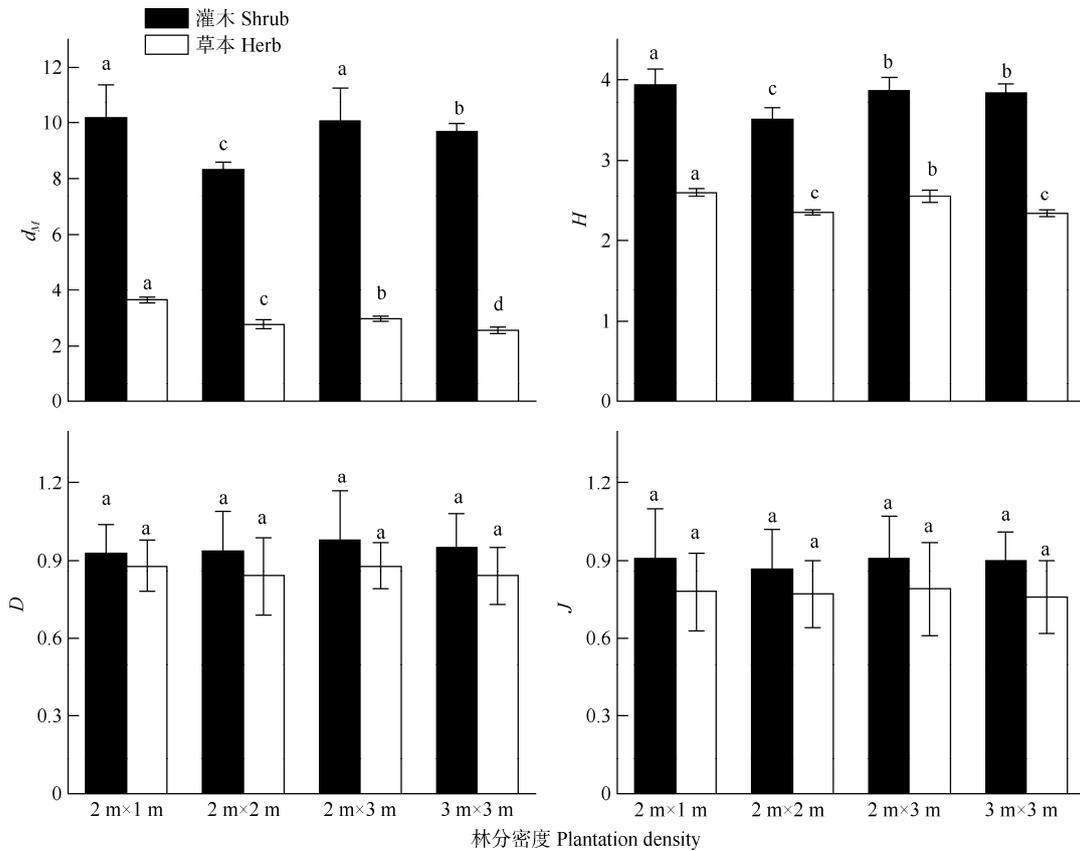


图 3 不同密度格木人工林的物种多样性。 d_M : Margalef 丰富度指数; H : Shannon-Wiener 指数; D : Simpson 优势度指数; J : Pielou 均匀度指数。

Fig. 3 Species diversities of *Erythrophleum fordii* with different densities. d_M : Margalef richness index; H : Shannon-Wiener index; D : Simpson's diversity index; J : Pielou evenness index.

容积含水率(0.213)>总孔隙度(0.206)>最大含水量(0.200)>毛管孔隙度(0.190); J 依次为容重(0.411)>总孔隙度(0.399)>毛管孔隙度(0.395)>最大含水量(0.383)>毛管持水量(0.366)>容积含水率(0.355)。Margalef 丰富度指数(d_M)与土壤毛管孔隙度(0.280)的关联度最大,其次为总孔隙度(0.269)>最大持水量(0.259)>毛管持水量(0.215)>容重(0.194)>容积含水率(0.145); Simpson 优势度指数(D)与毛管持水量(0.383)的关联度最大,其次为毛管孔隙度(0.344)>总孔隙度(0.331)>最大含水量(0.326)>容重(0.308)>容积含水率(0.305); d_M 、 D 、 J 指数与土壤容积含水率的关联度均最小。草本层 D 与土壤物理性质的关联度依次为总孔隙度(0.483)>最大持水量(0.478)>毛管持水量(0.449)>毛管孔隙度(0.426)>容积含水率(0.353)>容重(0.324); J 依次为总孔隙度(0.465)>最大持水量(0.457)>毛管持水量(0.433)>毛管孔隙度(0.405)>容重(0.358)>容积含水率(0.322), d_M 依次为容积含水率(0.258)>毛管孔隙度(0.229)>总孔隙度(0.224)>最大持水量(0.224)>容重(0.208)>毛管持水量(0.208); H 依次为毛管持水量(0.482)>总孔隙度(0.433)>最大持水量(0.426)>毛管孔隙度(0.419)>容积含水率(0.312)>容重(0.237)。

灌木层的4个植物多样性指数与土壤化学性质的关联度变化基本一致,多样性指数与土壤全K含量的关联度最大,铵态N次之,全N最小, d_M 与土壤化学性质的关联度依次为全K (0.678)>铵态N (0.661)>全P (0.599)>速效P (0.559)>速效K (0.345)>全N (0.198); H 依次为全K (0.736)>全P (0.725)>铵态N (0.652)>速效P (0.527)>速效K (0.441)>全N (0.207); D 依次为全K (0.874)>铵态N (0.747)>全P (0.675)>速效P (0.561)>速效K (0.404)>全N (0.217); J 依次为全K (0.806)>铵态N (0.758)>全P (0.710)>速效P (0.577)>速效K (0.396)>全N (0.215)。草本层的 D 、 J 指数与土壤全K含量的关联度最大,4个多样性指数与土壤全N含量的关联度均最小, d_M 依次为速效P (0.717)>全P (0.565)>全K (0.531)>铵态N (0.520)>速效K (0.338)>全N (0.208); H 依次为铵态N (0.747)>全K (0.684)>速效P (0.653)>全P (0.581)>速效K (0.386)>全N (0.204); D 依次为全K (0.828)>铵态N (0.792)>全P (0.622)>速效P (0.595)>速效K (0.430)>全N (0.209); J 依次为全K (0.865)>铵态N (0.787)>全P (0.629)>速效P (0.574)>速效K (0.404)>全N (0.211)。

3 结论和讨论

3.1 林分密度对格木幼林林地理化特性的影响

林分密度可通过光照的强弱、根系的疏密等因素影响林下植被和土壤微环境,从而促进或阻碍植物的生长^[28]。容重对林下植被生长的影响密切^[29],林下植被根系互相缠绕的网状结构有效粘聚了细微的土壤颗粒,形成土壤团聚体并减小了土壤容重,有利于格木人工林的生长^[30]。本研究中,土壤容重随格木林分密度的下降而下降,可能是因为林分密度较小时光照条件充足,植株生长较快,枯落物覆盖在表层土壤上削弱了雨滴击打土壤的能力,且枯落物易于被分解成为土壤腐殖质从而增强了土壤团聚性^[31]。林分密度为2 m×3 m时田间持水量在两个土层中均最大,即中等密度下的植物根系能有效降低土壤的紧密程度,同时过大的林分密度会使林下植被的盖度降低,土壤质量下降^[25]。土壤孔隙是容纳水分空气及植物根系与微生物活动的空间,一般情况下,总孔隙度大于35%时,土壤的通气、透水和持水能力较强,利于林木生长^[23]。本研究中格木人工幼林4个林分密度下的土壤总孔隙度大,土壤通气性能良好,尤以密度为2 m×3 m时林地土壤的通气透水能力最好。

林分密度可通过改变生态系统中光、热等条件影响土壤肥力,而土壤肥力是控制林木和土壤微生物生长发育的重要因素,可通过供给植物养分参与森林生态系统的物质循环^[32-33]。土壤全N反映了土壤N素供应的容量指标,其含量与土壤有机质的积累、分解作用相关。全N、硝态N、铵态N含量随着林分密度的增大而先增大后减小,有可能是林分密度增大时,大量的表层凋落物经过分解为土壤提供了更多养分;而过高的林分密度导致林下光照条件差,微生物数量减少,养分归还少,过大和过小的林分密度都不利于人工林土壤保肥^[34]。全P、K和速效P、K在土壤中的含量也呈类似规律,高密度林分中林木会加速对养分的吸收导致土壤退化^[35]。上层土壤的全P、全K含量较下层土壤的高,这与林木根系、动植物残体、土壤微生物等因素在土壤垂直方向的递减有关^[36]。从土壤质量指标的评价结果看,中等林分密度下(2 m×3 m)土壤的理化性质最优。

3.2 不同林分密度对林下植物物种多样性的影响

林下植被优势种一定程度上反映了人工林群

落结构,目前一般用重要值衡量植被在群落中的作用^[25]。林分密度是影响郁闭度的主要因素,其造成林地的生境异质性会导致群落内物种组成的小幅度差异^[35]。本次试验中样地中的坡位、海拔等基本一致,林分密度不同所造成光照条件的差异会影响林下各类生长因子,进而对林下植物多样性造成一定影响。不同林分密度格木人工林调查样地内林下植物种类较为丰富,灌木层优势种分化明显,草本层优势种分化不明显,各林分密度优势种变化幅度不大。林下草本层和灌木层植物多样性变化规律基本一致,林分从低密度到高密度变化时,乔木冠层的结构变化影响了灌木层,使其所处的微环境明显变化导致分化剧烈,同时过高密度下土壤需水量降低,光照不足等因素使得该区域允许生长的植物种类与数量减少^[37-38]。

通过林下植物多样性与土壤关联度的分析可知,土壤的容重、孔隙度、全 K 和铵态 N 含量是影响林下植物多样性的主要因子。结合土壤理化性质和林下植物多样性,在格木幼林生长阶段,低密度与高密度的林分同样不利于土壤养分的积累,在中等林分密度 2 m×3 m 下的土壤理化性质及林下植物多样性最佳,且格木的平均树高、胸径和冠幅等生长指标最优,说明此密度较适合格木幼林的生长,为该地格木人工林的合理栽培模式提供参考。

参考文献

- [1] HE J, ZHU G Y, ZHANG X Y, et al. A growth model of average tree diameter at breast height of *Quercus* natural forests in Hunan based on site and density effects [J]. *J CS Univ For Technol*, 2021, 41(10): 75–82. [何静, 朱光玉, 张学余, 等. 基于立地与密度效应的湖南栎类天然林平均木胸径生长模型 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(10): 75–82. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.10.009.]
- [2] ZHAO W W, LIANG W J, WEI X. Effects of different forest types on soil characteristics [J]. *J Shanxi Agric Univ (Nat Sci)*, 2019, 39(2): 61–68. [赵伟文, 梁文俊, 魏曦. 不同林分类型对土壤理化性质特征的影响 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(2): 61–68. doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.201810063.]
- [3] ZHANG W M, QIU Y B, ZHENG W H, et al. Effects of thinning on soil physical and chemical properties in Chinese fir plantation [J]. *E China For Manage*, 2019, 33(1): 1–3. [张伟民, 邱勇斌, 郑文华, 等. 间伐对杉木人工林土壤理化性质的影响 [J]. *华东森林经理*, 2019, 33(1): 1–3. doi: 10.3969/j.issn.1004-7743.2019.01.001.]
- [4] REN Q W, WANG X, LI L D, et al. Vertical variation of soil physical and chemical properties at different altitudes in Xiaowutai Mountain [J]. *J Soil Water Conserv*, 2019, 33(1): 241–247. [任启文, 王鑫, 李联地, 等. 小五台山不同海拔土壤理化性质垂直变化规律 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 241–247. doi: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.038.]
- [5] XUE P P, QI D H, CHEN K P. Dynamics of soil physical-chemical properties and soil fertility evaluation in *Cinnamomum camphora* forest succession [J]. *For Invent Plann*, 2019, 44(1): 64–70. [薛沛沛, 齐德华, 陈昆鹏. 香樟林演替过程中土壤理化性质动态变化及土壤肥力评价 [J]. *林业调查规划*, 2019, 44(1): 64–70. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2019.01.012.]
- [6] WILKINS M J, WRIGHTON K C, NICORA C D, et al. Fluctuations in species-level protein expression occur during element and nutrient cycling in the subsurface [J]. *PLoS One*, 2013, 8(3): e57819. doi: 10.1371/journal.pone.0057819.
- [7] GU Z J, LIU Q, ZENG J M, et al. Effects of density management on understory plant diversity in plantation forests of *Pinus massoniana* [J]. *J For Environ*, 2021, 41(5): 504–509. [谷振军, 刘倩, 曾纪孟, 等. 马尾松人工林密度控制对林下植被多样性的影响 [J]. *森林与环境学报*, 2021, 41(5): 504–509. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2021.05.008.]
- [8] LI J J, ZHANG J, ZHANG A J, et al. Understory plant species diversity and allelochemicals in rhizosphere soils of *Eucalyptus grandis* plantations with different densities [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, 31(7): 2175–2184. [李金金, 张健, 张阿娟, 等. 不同密度巨桉人工林林下植物多样性及根际土壤化感物质 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(7): 2175–2184. doi: 10.13287/j.1001-9332.202007.003.]
- [9] YANG A F, HAN Y Z, YANG X Q, et al. Diversity of understory herbs in *Picea* forests with different stand densities [J]. *J Zhejiang Agric For Univ*, 2014, 31(5): 676–682. [杨爱芳, 韩有志, 杨秀清, 等. 不同密度云杉林下草本植物多样性 [J]. *浙江农林大学学报*, 2014, 31(5): 676–682. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2014.05.003.]
- [10] SUN Q H, WU X, WANG M Z, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of *Pinus massoniana* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, 29(3): 732–738. [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. doi: 10.13287/j.1001-9332.201803.004.]
- [11] YU S T, FU L H. Understory vegetation-diversity of *Picea meyeri* forest planation at different development stages in Saihanba Machinery Forest Farm [J]. *Prot For Sci Technol*, 2018(11): 10–12. [于士涛, 付立华. 塞罕坝不同发育阶段白杆人工林林下植被多样性研究 [J]. *防护林科技*, 2018(11): 10–12. doi: 10.13601/j.issn.1005-5215.2018.11.003.]

- [12] TANG X J, TANG X J. Biodiversity characteristics of understory vegetation in *Pinus elliottii* plantation [J]. *Agric Technol*, 2019, 39(5): 81–82. [唐孝甲, 唐学君. 湿地松人工林林下植被生物多样性特征 [J]. *农业与技术*, 2019, 39(5): 81–82. doi: 10.19754/j.nyyjs.20190315033.]
- [13] YU Y Y, LIAO B Y, CHENG F, et al. Dynamic effects of site preparation on the growth of *E. wrophylla* × *E. grandis* plantation and understory vegetation [J]. *J Henan Agric Univ*, 2018, 52(3): 335–341. [于洋洋, 廖博一, 程飞, 等. 整地对尾巨桉人工林及林下植被生长的动态影响 [J]. *河南农业大学学报*, 2018, 52(3): 335–341. doi: 10.16445/j.cnki.1000-2340.2018.03.005.]
- [14] FIANDINO S I, PLEVICH J O, TARICO J C, et al. Effects of low-density *Pinus elliottii* (slash pine) afforestation on environmental conditions and native plant diversity, in the mountains of central Argentina [J]. *Appl Veg Sci*, 2018, 21(3): 442–50. doi: 10.1111/avsc.12385.
- [15] CHEN Y M, CAO Y. Response of tree regeneration and understory plant species diversity to stand density in mature *Pinus tabulaeformis* plantations in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. *Ecol Eng*, 2014, 73: 238–245. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.055.
- [16] LIU H M, HAN H R, CHENG X Q, et al. Effects of different density regulation intensities on soil quality in *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. *J Beijing For Univ*, 2021, 43(6): 50–59. [刘慧敏, 韩海荣, 程小琴, 等. 不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(6): 50–59. doi: 10.12171/j.1000-1522.20200322.]
- [17] YI W J, ZHANG H D, YE S M, et al. From the effects of light intensity on seedling growth and photosynthetic characteristics of *Erythrophleum fordii* [J]. *S China For Sci*, 2018, 46(1): 29–32. [易伟坚, 张海东, 叶绍明, 等. 光强对格木幼苗生长及光合特性的影响 [J]. *南方林业科学*, 2018, 46(1): 29–32. doi: 10.16259/j.cnki.36-1342/s.2018.01.008.]
- [18] HAO J. Research on system of pruning technology of *Erythrophleum fordii* plantation [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017. [郝建. 格木人工林修枝技术体系研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.]
- [19] HAO H K, HUANG Z L, PENG Y H, et al. Size variation and germination characteristics of *Erythrophleum fordii* seeds [J]. *Guangxi For Sci*, 2016, 45(1): 30–34. [郝海坤, 黄志玲, 彭玉华, 等. 格木种子大小变异及萌发特性 [J]. *广西林业科学*, 2016, 45(1): 30–34. doi: 10.3969/j.issn.1006-1126.2016.01.006.]
- [20] YI G L, LUO J H, LIN G R, et al. Effects of different treatment on germination of *Erythrophleum fordii* seeds [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2004, 31(3): 68–70. [易观路, 罗建华, 林国荣, 等. 不同处理对格木种子发芽的影响 [J]. *福建林业科技*, 2004, 31(3): 68–70. doi: 10.3969/j.issn.1002-7351.2004.03.018.]
- [21] SHEN W H, LI Z H, PENG Y H, et al. Light response of photosynthesis of different provenance *Erythrophleum fordii* Oliv [J]. *J CS Univ For Technol*, 2014, 34(6): 13–18. [申文辉, 李志辉, 彭玉华, 等. 格木不同种源光合作用光响应分析研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(6): 13–18. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2014.06.004.]
- [22] HONG P Z, LIU S R, WANG H, et al. Characteristics of soil microbial community structure in two young plantations of *Castanopsis hystrix* and *Erythrophleum fordii* in subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(14): 4496–4508. [洪丕征, 刘世荣, 王晖, 等. 南亚热带红椎和格木人工幼龄林土壤微生物群落结构特征 [J]. *生态学报*, 2016, 36(14): 4496–4508. doi: 10.5846/stxb201411242328.]
- [23] FENG Y M, LI Y, CAO X W, et al. Characteristics of stand structure and soil physicochemical properties of artificial young *Picea asperata* plantation with different densities in southern Gansu [J]. *Sci Silvae Sin*, 2018, 54(10): 20–30. [冯宜明, 李毅, 曹秀文, 等. 甘肃南部不同密度云杉人工幼林的林分结构特征及土壤理化性质 [J]. *林业科学*, 2018, 54(10): 20–30. doi: 10.11707/j.1001-7488.20181003.]
- [24] LIU X, PENG D L, QIU X C. Differences in soil physicochemical properties between different forest types of *Larix principis-rupprechtii* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2018, 24(4): 735–743. [刘欣, 彭道黎, 邱新彩. 华北落叶松不同林型土壤理化性质差异 [J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(4): 735–743. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2018.01020.]
- [25] ZHOU S P, LIANG K N, DU J, et al. Research on understory vegetation and soil physical-chemical properties of teak plantation with difference stand densities [J]. *Bull Bot Res*, 2017, 37(2): 200–210. [周树平, 梁坤南, 杜健, 等. 不同密度柚木人工林林下植被及土壤理化性质的研究 [J]. *植物研究*, 2017, 37(2): 200–210.]
- [26] WEI P J, SUN B, HE X R, et al. Analysis on plant community diversity in Jingzhou city parks [J]. *J Henan Norm Univ (Nat Sci)*, 2019, 47(3): 106–113. [魏普杰, 孙兵, 贺心茹, 等. 荆州城市公园植物群落多样性研究 [J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(3): 106–113.]
- [27] YUAN Y, HOU Y L, ZHAO Y, et al. Soil quality evaluation of artificial *Picea asperata* forest with different densities [J]. *J NW For Univ*, 2021, 36(1): 18–24. [原源, 侯亚莉, 赵阳, 等. 不同密度人工云杉林土壤质量评价 [J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(1): 18–24. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2021.01.03.]
- [28] BU R Y, LIANG W J, WEI X, et al. Soil nutrient characteristics of *Larix principis-rupprechtii* forest with different stand densities [J]. *J For Environ*, 2021, 41(2): 140–147. [卜瑞瑛, 梁文俊, 魏曦, 等. 不

- 同林分密度华北落叶松林的土壤养分特征 [J]. 森林与环境学报, 2021, 41(2): 140–147. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2021.02.004.]
- [29] 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. [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. doi: 10.5846/stxb201610162093.]
- [30] CAO C Y, JIANG D M, QUAN G J, et al. Soil physical and chemical characters changes of *Caragana microphylla* plantation for sand fixation in Keerqin sandy land [J]. J Soil Water Conserv, 2004, 18(6): 108–111. [曹成有, 蒋德明, 全贵静, 等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工固沙区土壤理化性质的变化 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 108–111. doi: 10.3321/j.issn:1009-2242.2004.06.026.]
- [31] FENG Q Q, TIE Y, ZHOU M, et al. Analysis of physical and chemical soil properties of larch plantations with different afforestation densities in north China [J]. For Resour Manage, 2018(6): 106–110. [冯倩倩, 铁英, 周梅, 等. 华北落叶松人工林不同造林密度土壤理化性质分析 [J]. 林业资源管理, 2018(6): 106–110. doi: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2018.06.017.]
- [32] PAN L J, WANG M, ZOU X J, et al. Study on soil chemical property and enzyme activity in four mixed broadleaved plantations [J]. J Green Sci Technol, 2019(6): 24–26. [盘李军, 王敏, 邹晓君, 等. 4种人工林的土壤化学性质和酶活性特征研究 [J]. 绿色科技, 2019(6): 24–26. doi: 10.16663/j.cnki.lskj.2019.06.010.]
- [33] LIU G H, LI B Y, GONG D P, et al. Effects of forest fire on soil chemical properties of *Pinus tabuliformis* forest in Pinggu District of Beijing [J]. J Beijing For Univ, 2019, 41(2): 29–40. [刘冠宏, 李炳怡, 宫大鹏, 等. 林火对北京平谷区油松林土壤化学性质的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(2): 29–40. doi: 10.13332/j.1000-1522.20180339.]
- [34] ZENG X L, XUE L, LIU B, et al. Soil fertility in young *Rhododcica championii* stands of different densities [J]. Bull Soil Water Conserv, 2010, 30(5): 43–45. [曾小梨, 薛立, 刘斌, 等. 不同密度红苞木幼林的土壤理化性质研究 [J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 43–45. doi: 10.13961/j.cnki.stbctb.2010.05.036.]
- [35] SUN J, WANG H Y, DING G D, et al. Soil physico-chemical properties under *Larix principis-rupprechtii* plantations of different stand densities [J]. For Resour Manage, 2011(1): 62–66. [孙嘉, 王海燕, 丁国栋, 等. 不同密度华北落叶松人工林土壤理化性质研究 [J]. 林业资源管理, 2011(1): 62–66. doi: 10.3969/j.issn.1002-6622.2011.01.013.]
- [36] REN L N, WANG H Y, DING G D, et al. Effects of *Larix principis-rupprechtii* plantation density control on soil organic carbon and nutrients characteristics [J]. J Arid Land Resour Environ, 2012, 26(4): 138–143. [任丽娜, 王海燕, 丁国栋, 等. 密度调控对华北落叶松人工林土壤有机碳及养分特征的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(4): 138–143. doi: 10.13448/j.cnki.jalre.2012.04.021.]
- [37] ZOU Y, HE K N, ZHAO C, et al. Relationship between plantation density and the plants diversity under forest of *Picea crassifolia* in alpine region [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2013, 33(12): 2543–2549. [邹扬, 贺康宁, 赵畅, 等. 高寒区青海云杉人工林密度与林下植物多样性的关系 [J]. 西北植物学报, 2013, 33(12): 2543–2549.]
- [38] PANG S L, OU Z Y, SHEN W H, et al. Edaphic characteristics of different regeneration patterns in karst mountainous areas of Guangxi [J]. J CS Univ For Technol, 2016, 36(7): 60–66. [庞世龙, 欧芷阳, 申文辉, 等. 广西喀斯特地区不同植被恢复模式土壤质量综合评价 [J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(7): 60–66. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2016.07.011.]