

引用格式: 曹窈畅, 王旭, 冯汉华, 等. 粤北石漠化地区天然林群落特征及碳储量[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(1): 1-13.
CAO Yaochang, WANG Xu, FENG Hanhua, *et al.* Community characteristics and carbon storage of natural forests in rocky desertification areas of northern Guangdong[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(1): 1-13.

粤北石漠化地区天然林群落特征及碳储量

曹窈畅^{1,2}, 王旭^{2,3}, 冯汉华⁴, 宝音满达^{2,3}, 郭昊^{2,5}, 周光益^{2,3}, 何功秀¹

(1. 中南林业科技大学 林学院, 湖南 长沙 410004; 2. 南岭北江源森林生态系统国家定位观测研究站, 广东 广州 510520; 3. 中国林业科学研究院 热带林业研究所, 广东 广州 510520; 4. 广东省林业调查规划院, 广东 广州 510520; 5. 海南大学 热带农林学院, 海南海口 570228)

摘要: 【目的】探讨粤北石漠化地区的群落特征与碳储量的关系, 揭示影响碳储量的关键群落特征指标。【方法】以粤北轻度、中度和重度 3 种石漠化程度的森林群落为研究对象, 通过典型取样, 各选取 3 个 30 m×40 m 植物样地, 运用单因素方差分析、Pearson 相关性分析、随机森林模型等方法, 分析粤北石漠化地区的植物群落特征、碳储量特征及两者关系。【结果】①石漠化地区的植物群落优势树种为秀丽锥 *Castanopsis jucunda*、马尾松 *Pinus massoniana*、麻栎 *Quercus acutissima* 等, 中度石漠化群落物种多样性最高。②3 种石漠化程度的森林群落径级结构均呈现倒“J”型, 其中径级 I 个体占主导地位(轻度石漠化占 53.8%、中度石漠化占 67.8%、重度石漠化占 77.4%), 垂直结构以高阶 I、高阶 II 为主, 随着石漠化的加重, 群落结构趋于简化; 平均林分密度从大到小依次为重度石漠化群落、中度石漠化群落、轻度石漠化群落。③3 种森林群落碳储量从大到小依次为中度石漠化群落、轻度石漠化群落、重度石漠化群落, 群落间碳储量差异未达显著水平, 碳储量组分中枯死木、凋落物碳储量最少。④物种多样性与碳储量特征无显著相关; 胸径和树高与碳储量特征呈显著正相关 ($P<0.05$); 林分密度与碳储量特征无显著相关; 基岩裸露度与土壤碳储量呈极显著负相关 ($P<0.01$), 与总碳储量无显著相关; 物种优势度指数、胸径、树高对碳储量相对重要性分别为 21.23、19.95 和 19.55。【结论】粤北石漠化地区森林群落物种多样性以中度石漠化群落最高, 群落中物种径级总体偏小, 垂直结构分层不明显。优势种碳储量是群落碳储量的主要组成部分, 群落结构对碳储量的影响占据主导地位。图 6 表 5 参 40

关键词: 群落特征; 碳储量; 石漠化; 粤北

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)01-0001-13

Community characteristics and carbon storage of natural forests in rocky desertification areas of northern Guangdong

CAO Yaochang^{1,2}, WANG Xu^{2,3}, FENG Hanhua⁴, Baoyinmanda^{2,3}, GUO Hao^{2,5}, ZHOU Guangyi^{2,3}, HE Gongxiu¹

(1. College of Forestry, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Beijiangyuan National Forestry Ecosystem Observation and Research Station in Nanling Mts, Guangzhou 510520, Guangdong, China; 3. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China; 4. Guangdong Forestry Survey and Planning Institute, Guangzhou 510520, Guangdong, China; 5. College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the relationship between community characteristics and carbon storage in rocky desertification areas of northern Guangdong, and to reveal the key community characteristic indicators that affect carbon storage. [Method] Forest communities with mild, moderate, and severe levels of rocky desertification in northern Guangdong were selected as the research objects. Three 30 m×40 m forest plots were selected by typical sampling, and one-way analysis of variance, Pearson correlation

收稿日期: 2025-03-03; 修回日期: 2025-09-27

作者简介: 曹窈畅 (ORCID: 0009-0006-3226-4803), 从事森林培育学研究。E-mail: caoyaochang13@163.com。通信作者: 王旭 (ORCID: 0009-0004-3756-1562), 副研究员, 博士, 从事森林生态和森林培育学研究。E-mail: cafwangxu111@caf.ac.cn

analysis, and random forest model were used to analyze the characteristics of forest communities, carbon storage and their relationship in rocky desertification areas in northern Guangdong. [Result] (1) The dominant tree species of the forest community in rocky desertification areas were *Castanopsis jucunda*, *Pinus massoniana*, *Quercus acutissima*, etc., and the species diversity of moderate rocky desertification communities was the highest. (2) The diameter structure of the forest communities at three desertification levels all showed an inverted “J” shape. Among them, diameter Class I was dominant (mild desertification accounting for 53.8%, moderate 67.8%, and severe 77.4%). The vertical structure was mainly composed of Classes I — II, and the community structure tended to simplify with increasing desertification intensity. The average stand density in descending order was severe, moderate, and mild desertification communities. (3) Carbon storage of the three forest communities, ranking from large to small, was as follows: moderate rocky desertification communities, mild rocky desertification communities, and severe rocky desertification communities, with no significant differences in carbon storage among communities. The carbon storage of dead wood and litter was the least among carbon storage components. (4) There was no significant correlation between species diversity and carbon storage characteristics. DBH and tree height were significantly positively correlated with carbon storage characteristics ($P < 0.05$). There was no significant correlation between forest density and carbon storage characteristics. Bedrock exposure degree was significantly negatively correlated with soil carbon storage ($P < 0.01$), but not significantly correlated with total carbon storage. The relative importance of species dominance index, DBH, and tree height to carbon storage was 21.23%, 19.95%, and 19.55%, respectively. [Conclusion] The species diversity of forest communities in rocky desertification areas of northern Guangdong is the highest in the moderate rocky desertification community, with overall smaller species diameter classes and unclear vertical structural stratification. The carbon storage of dominant species is the main component of the community carbon storage, and the influence of community structure on carbon storage is dominant. [Ch, 6 fig. 5 tab. 40 ref.]

Key words: community characteristics; carbon storage; rocky desertification; area of northern Guangdong

岩石圈作为地球最大的碳库,碳储量占全球总碳量的 99.55%^[1]。岩溶作用驱动碳元素在不同碳库之间的迁移转化,是全球碳循环的重要组成部分。石漠化是中国南方岩溶地区主要生态问题。截至 2020 年,南方岩溶石漠化面积为 8.45 万 km²,占南方岩溶地区面积 14.43%^[2]。人地资源矛盾以及极端天气灾害的频发,导致石漠化地区大面积植被遭到破坏,植被碳库和土壤碳库受到了严重的损失。这种退化地带生态恢复工程的首要现实问题是进行植被恢复,且植物群落结构修复先于功能恢复^[3]。群落结构特征是影响生物量差异的关键因素,随着群落演替的进行,群落生境、群落结构等也随之发生变化,进而对生态系统的碳循环产生影响。

在分析群落特征的过程中,群落物种多样性是生物多样性在物种水平上的表现形式,可反映生物群落结构的复杂性,体现群落的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度和生境差异。水平和垂直方向的结构指标是群落特征研究的重要内容,其中径级分布格局不仅定量表征林木胸径变异特征与干形发育规律,还能有效反映群落更新潜力及种间、物种与环境间的互作关系^[4]。垂直分布结构则通过调控光资源梯度分布,在生境空间异质性形成过程中构建多层次生态位分化系统,为物种共存提供了丰富的生态位空间,进而塑造群落生物多样性格局^[5]。此外,林分密度是森林生态系统的关键结构特征,是控制林木生长发育和生物量积累的关键因素,与林木平均个体材积或质量也存在一定关系^[6]。已有研究表明:植物群落结构能对群落固碳能力产生影响^[7]。有学者研究发现:漓江流域喀斯特森林地上碳储量受林分结构多样性的影响大于物种多样性^[8]。群落物种丰富度与群落生物量呈正相关^[9],但物种多样性和生物量并没有固定的关系,如相较于人工林和次生林,在云南石漠化地区物种多样性指数表现居中的石漠化生态系统却拥有最高的生物量^[10]。马学威^[11]对贵州石漠化地区高效特色林研究发现:乔木层碳储量与树

种平均胸径和树高呈显著正相关，且群落中大径级树木对总生物量影响显著^[12]。适度的林分密度有利于提高单位面积的固碳效益，但过高或过低的密度都可能降低固碳效果^[13]。物种多样性、结构特征在森林地上碳储量中的主导地位存在争议，物种多样性是物种丰富度和均匀性的组合，而结构特征则反映了森林中树木个体及其属性之间的连接方式^[14]。这两者都会对森林地上碳储量造成影响。因此，研究森林碳储量时考虑森林群落的结构特征和物种多样性，对理解森林生态系统在陆地碳循环中的作用以及预测未来碳储量具有重要意义。

粤北地区是广东石漠化的主要分布区域，其基岩裸露度面积占据广东省石漠化土地面积的 84.4%，石漠化问题已受到广泛关注^[15]。目前，关于群落结构特征与碳储量关系的研究多集中于草地、山地等，针对石漠化地区，尤其是粤北石漠化地区的相关综合研究较缺乏，而且物种多样性和结构特征对森林群落碳储量的贡献是否会随着石漠化程度的变化而改变仍未知。

本研究通过对粤北石漠化地区不同石漠化程度的天然林群落特征、碳储量特征以及两者之间的关系分析，拟回答以下问题：①粤北不同石漠化程度的天然林植物群落特征是否存在差异？③不同群落类型的碳储量分配特征如何？②物种多样性和群落结构特征对森林群落碳储量的贡献是否会随着石漠化程度的变化而改变？研究结果可为粤北石漠化地区植被恢复与治理提供理论支撑，也可对石漠化地区碳管理提供决策依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

粤北地区的石漠化由脆弱的地质基地和人类活动胁迫共同作用形成。其中粤北地区的乐昌市石漠化面积占广东省石漠化总面积的 1/3，为全省岩溶地区石漠化程度最严重地区之一。梅花镇是乐昌市石漠化分布最广、程度最高的地区之一，基本涵盖了粤北石漠化全部类型，具有较强的代表性。目前，粤北石漠化的主要治理措施为“退耕还林草+人工造林”“防治水土流失+水利水保设施建设”以及禁止不合理的垦荒及耕作活动。本研究以乐昌市梅花镇为研究区域 (25°09'38"~25°15'45"N, 113°03'34"~113°08'02"E)。该区地处石灰岩小盆地，基岩裸露程度高，石砾多且质地疏松。属于亚热带季风气候，雨量充足，四季分明，年平均气温为 19.6℃，年平均降雨量为 1 522.0 mm；雨季为 4—9 月。研究区土壤以红壤和黄壤为主，其他土壤类型包括石灰土和紫色土等。植被类型主要为中亚热带常绿阔叶林，其次为常绿-落叶阔叶林、针阔混交林、竹林、高山草甸和各类人工林。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2023 年 7 月在实地踏查的基础上，根据基岩裸露度、地形、代表性植被等因素，参照熊康宁^[16]将研究区域划分为 3 个石漠化等级：轻度石漠化 (10%≤基岩裸露度<40%)、中度石漠化 (40%≤基岩裸露度<60%) 和重度石漠化 (基岩裸露度≥60%)，每个等级设置 3 个重复样地，样地均为天然林，每个样地面积为 1 200 m² (30 m×40 m)。样地基本情况见表 1。每个样地内左上、中部、右下 3 个方位设置 3 个 2 m×2 m 的灌木小样方，在每个灌木小样方的左下角设置 1 个 1 m×1 m 的草本小样方。

1.2.2 样地调查 对 9 个样地内所有胸径≥1 cm 的活立木进行每木检尺。乔木层和幼树层的调查内容为树木种名、胸径、树高、枝下高、冠幅等；灌草层的调查内容为物种名、株数、盖度、高度等。

1.2.3 土壤碳储量取样与测定 在每个样地，避开灌木小样方，在左上、中部、右下 3 个方位布设 3 个 5 m×5 m 的土壤采样区，采用对角线法进行土壤取样。研究区土层薄、岩石裸露，多数小生境土

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of the sampled plots						
石漠化程度	样地编号	平均胸径/cm	平均高度/m	密度/(株·hm ⁻²)	基岩裸露度/%	群落类型
轻度	LCX1	6.7	5.0	4 608	21	常绿阔叶林
轻度	LCX2	8.6	7.6	3 150	13	常绿阔叶林
轻度	LCX3	7.7	5.7	4 708	25	常绿阔叶林
中度	LCX4	7.0	5.3	7 150	40	针阔混交林
中度	LCX5	6.2	5.2	6 575	40	针阔混交林
中度	LCX6	8.6	6.7	4 942	42	针阔混交林
重度	LCX7	2.2	6.2	4 892	75	常绿阔叶林
重度	LCX8	2.9	1.9	8 558	60	常绿阔叶林
重度	LCX9	6.6	4.3	8 283	60	常绿阔叶林

层较薄, 平均土层厚度为 0~28 cm。结合前人研究^[17], 本研究采用不锈钢土钻对 0~10 和 10~20 cm 土层进行取样, 在每个采样区采集 5 个土壤样品。所有土壤样品均用无菌自封袋密封保存, 用冰盒运回实验室, 采用烧失量法测定土壤有机质, 计算土壤有机碳储量。

1.3 指标值计算

1.3.1 重要值及群落物种多样性 重要值 (VI) 是衡量物种在群落中相对重要性的综合指标, 参考马克平等^[18]的方法计算。参照 HUBBELL 等^[19]的定义划分稀有种, 在本研究中将物种数量为 1~2 种的物种判定为稀有种。群落物种多样性特征选用 Margale 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数来衡量。计算方法参考文献^[20]。

1.3.2 群落结构特征 森林调查中胸径、树高是最容易测得的结构指标, 并且胸径与树高、林冠有较好的相关性^[21], 所以选用胸径、树高和林分密度作为群落结构指标。结合样地实际调查所得的数据, 并参考有关群落径级的划分方法^[22], 将树木胸径 (DBH) 径级划分为 5 个等级: 径级 I ($1\text{ cm} \leq \text{DBH} < 5\text{ cm}$)、径级 II ($5\text{ cm} \leq \text{DBH} < 10\text{ cm}$)、径级 III ($10\text{ cm} \leq \text{DBH} < 15\text{ cm}$)、径级 IV ($15\text{ cm} \leq \text{DBH} < 20\text{ cm}$)、径级 V ($\text{DBH} \geq 20\text{ cm}$), 并将 $1\text{ cm} \leq \text{DBH} < 5\text{ cm}$ 的径级定义为小径级, $5\text{ cm} \leq \text{DBH} < 15\text{ cm}$ 径级定义为中径级, $\text{DBH} \geq 15\text{ cm}$ 的径级定义为大径级。将群落内木本植物树高 (h) 划分为 4 个等级: 高阶 I ($h < 5\text{ m}$)、高阶 II ($5\text{ m} \leq h < 10\text{ m}$)、高阶 III ($10\text{ m} \leq h < 15\text{ m}$)、高阶 IV ($h \geq 15\text{ m}$), 将 $h \leq 5\text{ m}$ 定义为下层, $5\text{ m} \leq h < 15\text{ m}$ 定义中层, $h \geq 15\text{ m}$ 定义为上层。林分密度 (D_S , 株·hm⁻²): $D_S = N/S$, 其中: N 为样地株数, S 为样地面积。

1.3.3 植被碳储量计算 喀斯特石漠化区地下生物量取样十分困难, 且本研究中灌木样地平均密度为 (6.8 ± 1.0) 株·m⁻², 草本样地平均密度为 (1.4 ± 0.5) 株·m⁻², 对固碳量影响甚微。为减少对林下植被的破坏, 根据实地调查情况, 本研究仅计算乔木层 ($\text{DBH} \geq 5\text{ cm}$) 和幼树层 ($1\text{ cm} \leq \text{DBH} < 5\text{ cm}$) 的碳储量。植被碳储量计算参照周国逸等^[23]对中国森林生态系统生物量研究结果, 采用一阶生物量 (W) 相对生长模型 $W = aD^b$ (D 为胸径, a 、 b 为拟合系数), 乔木层选取广东省针阔混交林和阔叶林生物量方程, 幼树层选取亚热带常绿阔叶林和针阔混交林生物量方程。各器官生物量计算公式见表 2, 总生物量为各器官生物量之和; $W_{\text{乔/幼}} = W_t + W_b + W_l + W_r$, 其中: $W_{\text{乔/幼}}$ 为乔木层或幼树层生物量 (kg), W_t 、 W_b 、 W_l 、 W_r 分别为树干、树枝、树叶和树根生物量 (kg)。样地植被生物量为: $W_B = W_a + W_y$; 其中: W_B 为植被生物量 (kg), W_a 、 W_y 分别为乔木层和幼树层生物量 (kg)。植被碳储量计算公式为: $C_B = W_B \times 0.5 \times 0.001/S$, 其中: C_B 为植被碳储量 (t·hm⁻²), W_B 为植被生物量; S 为样地面积 (hm²)。

表 2 混合种 (组) 生物量方程

Table 2 Mixed species (group) biomass equation

群落层次	林型	树干		树枝		树叶		树根		胸径/cm
		W_t	决定系数	W_b	决定系数	W_l	决定系数	W_r	决定系数	
乔木层	针阔混交林	$0.054\ 2D^{2.544\ 9}$	0.89	$0.009\ 7D^{2.692\ 3}$	0.81	$0.030\ 2D^{2.021\ 2}$	0.62	$0.055\ 1D^{2.067\ 1}$	0.73	5~65
	阔叶林	$0.076\ 3D^{2.502\ 2}$	0.94	$0.018\ 9D^{2.499\ 6}$	0.78	$0.008\ 0D^{2.652\ 8}$	0.89	$0.006\ 7D^{2.832\ 7}$	0.98	5~94
幼树层	针阔混交林	$0.105\ 0D^{2.226\ 0}$	0.99	$0.024\ 0D^{2.256\ 0}$	0.99	$0.039\ 0D^{1.814\ 0}$	0.99	$0.092\ 0D^{1.805\ 0}$	0.99	<5
	常绿阔叶林	$0.050\ 0D^{2.566\ 9}$	0.88	$0.045\ 3D^{2.034\ 1}$	0.83	$0.013\ 8D^{2.517\ 6}$	0.89	$0.052\ 9D^{1.582\ 2}$	0.48	<5

说明: W_t 为树干生物量; W_b 为树枝生物量; W_l 为树叶生物量; W_r 为树根生物量, 各器官生物量单位均为 kg。D 为调查样地内树种胸径 (cm)。

1.3.4 凋落物、枯死木碳储量计算 凋落物、枯死木碳储量根据《森林生态系统碳储量计算指南》公式计算, 即: $C_l = B_{lg} \times F_{Dl} \times F_{Cl} \times 0.001/S$; $C_d = B_{lg} \times F_{Dd} \times F_{Cd} \times 0.001/S$; $B_{lg} = W_t + W_b + W_l$ 。其中: C_l 为凋落物碳储量 (t·hm⁻²); C_d 为枯死木碳储量 (t·hm⁻²); B_{lg} 为乔木地上生物量 (kg), 由树干 (W_t)、树枝 (W_b)、树叶 (W_l) 生物量组成; F_{Dl} 为凋落物生物量分配系数, 针阔混交林 (亚热带) 取 7.309%, 阔叶混交林取 11.414%; F_{Dd} 为枯死木生物量分配系数, 广东地区取 2.25%; F_{Cl} 、 F_{Cd} 为含碳系数, 均取缺省值 0.37; S 为样地面积 (hm²)。

1.3.5 土壤有机碳储量计算 $S_{\text{SOC}} = \theta \times \rho \times (1 - \sigma) \times (1 - \delta) \times T \times \alpha \times 0.000\ 1$ 。其中: S_{SOC} 为土壤碳储量 (t·hm⁻²);

θ 为土壤有机质质量分数 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); σ 为岩石裸露率 (%); T 为土壤厚度 (cm); ρ 为土壤容重 ($1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)^[24]; δ 为土壤中粒径 $> 2 \text{ mm}$ 砾石体积百分比 (%); α 为土壤有机碳的转化系数, 为 0.58。根据王万同等^[25] 的方法, 选取广东省针阔混交林和常绿阔叶林 0~10、10~20 cm 土层土壤砾石体积百分比 (δ) 分别为 19.79% 和 15.39%。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据的整理, 用 SPSS 27.0 对不同石漠化程度森林群落的物种多样性、结构特征及碳储量分配特征进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 采用 Tukey HSD 检验进行组间差异性分析 ($\alpha=0.05$), 利用 Origin 2021 绘图。采用 R-4.3.1 对群落特征及与碳储量特征进行 Pearson 相关性分析, 并用 corplot 包进行绘图。运用随机森林模型进一步评估群落特征指标对群落碳储量的重要性贡献程度。利用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同石漠化程度森林群落物种组成及重要值分析

9 块样地共有植物 47 科 94 属 139 种。从表 3 可以看出: 各群落类型的优势种存在明显差异。轻度石漠化样地中共有植物 59 种, 隶属于 29 科 50 属, 群落类型为秀丽锥 *Castanopsis jucunda*+鸡仔木 *Sinoadina racemosa*+马尾松 *Pinus massoniana*, 优势种为秀丽锥、鸡仔木、马尾松、麻栎 *Quercus acutissima* 等; 中度石漠化样地中共有植物 86 种, 隶属于 36 科 64 属, 群落类型为秀丽锥+马尾松+山胡椒 *Lindera glauca*, 优势种为秀丽锥、马尾松、山胡椒、桂花 *Osmanthus fragrans*、青冈 *Cyclobalanopsis glauca* 等; 重度石漠化样地中共有植物 88 种, 隶属于 37 科 66 属, 群落类型为麻栎+欆木 *Loropetalum chinense*+牡荊 *Vitex negundo* var. *cannabifolia*, 优势种为牡荊、麻栎、欆木、桂花、秀丽锥等。另外对不同群落类型的物种统计发现: 各石漠化程度样地的稀有种组成具有明显的特异性, 轻度石漠化样地中为卫矛 *Euonymus alatus* 和长叶胡颓子 *Elaeagnus bockii*, 中度石漠化样地中为枳椇 *Hovenia acerba* 和吴茱萸 *Tetradium ruticarpum*, 重度石漠化样地中为印度崖豆 *Millettia pulchra*。

2.2 不同石漠化程度森林群落物种多样性指数特征

由表 4 可知: 从数值排序特征来看: 乔木层中 Margale 指数从大到小依次为轻度石漠化群落、中度石漠化群落、重度石漠化群落, Shannon-Wiener 指数从大到小依次为轻度石漠化群落、重度石漠化群落、中度石漠化群落, Simpson 指数和 Pielou 指数从大到小依次为轻度石漠化群落、中度石漠化群落、重度石漠化群落。幼树层中 Margale 指数、Shannon-Wiener 指数从大到小依次为中度石漠化群落、轻度石漠化群落、重度石漠化群落, Simpson 指数、Pielou 指数从大到小依次为轻度石漠化群落、中度石漠化群落、重度石漠化群落; 4 个多样指数在灌草层从大到小依次均为中度石漠化群落、轻度石漠化群落、重度石漠化群落。从排序特征分析, 除幼树层中重度石漠化群落与其他 2 个群落在 Simpson 指数、Pielou 指数中存在显著差异 ($P<0.05$) 外, 3 种不同石漠化程度森林群落其他物种多样性指数差异均不显著, Margale 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数在中度石漠化群落最高, Simpson 指数在轻度石漠化群落最高, Margale 指数、Simpson 指数在重度石漠化群落最低, Shannon-Wiener 指数、Pielou 指

表 3 不同石漠化程度森林群落植物重要值

石漠化程度	群落类型	优势种	相对频度	相对多度	相对显著度	重要值
轻度	秀丽锥+鸡仔木+马尾松	秀丽锥	0.27	0.09	0.41	0.26
		鸡仔木	0.07	0.08	0.17	0.10
		马尾松	0.14	0.06	0.05	0.09
		麻栎	0.04	0.05	0.05	0.05
中度	秀丽锥+马尾松+山胡椒	桂花	0.06	0.05	0.04	0.05
		秀丽锥	0.02	0.23	0.30	0.19
		马尾松	0.02	0.03	0.15	0.07
		山胡椒	0.02	0.08	0.06	0.06
		桂花	0.02	0.07	0.02	0.04
		青冈	0.01	0.06	0.04	0.04
		牡荊	0.02	0.25	0.09	0.12
		麻栎	0.02	0.03	0.20	0.08
重度	麻栎+欆木+牡荊	欆木	0.03	0.15	0.06	0.08
		桂花	0.02	0.08	0.13	0.08
		秀丽锥	0.03	0.09	0.11	0.07

数在轻度石漠化群落最低。综上分析可知：中度石漠化群落的各物种多样性表现最好，重度石漠化群落优势物种最不突出，轻度石漠化群落的空间分布均匀性较差。

表 4 不同石漠化程度群落物种多样性

Table 4 Species diversity of communities with different degrees of rocky desertification								
石漠化程度	乔木层				幼树层			
	Margale指数	Simpson指数	Shannon-Wiener指数	Pielou指数	Margale指数	Simpson指数	Shannon-Wiener指数	Pielou指数
轻度	4.5±0.2 a	0.7±0.1 a	2.1±0.1 a	0.6±0.1 a	5.3±0.2 a	0.9±0.0 b	2.7±0.1 a	0.8±0.0 b
中度	3.9±0.4 a	0.7±0.2 a	1.9±0.5 a	0.6±0.1 a	6.0±1.2 a	0.9 ±0.0 b	2.7 ±0.2 a	0.8 ±0.0 b
重度	3.2±0.6 a	0.8±0.0 a	2.0±0.2 a	0.8±0.1 a	5.0±0.7 a	0.7±0.1 a	2.0±0.2 a	0.6±0.1 a

石漠化程度	灌草层				整体			
	Margale指数	Simpson指数	Shannon-Wiener指数	Pielou指数	Margale指数	Simpson指数	Shannon-Wiener指数	Pielou指数
轻度	2.2±0.5 a	0.6±0.0 a	1.4±0.1 a	0.7±0.0 a	5.9±0.2 a	0.9±0.1 a	2.0±0.4 a	0.6±0.1 a
中度	4.0 ±1.5 a	0.8 ±0.1 a	2.0 ±0.3 a	0.7±0.1 a	6.2±1.2 a	0.8±0.1 a	2.6±0.3 a	0.8±0.1 a
重度	3.0±1.1 a	0.7±0.1 a	1.7±0.4 a	0.6±0.1 a	5.6±0.6 a	0.8±0.1 a	2.1±0.3 a	0.6±0.1 a

说明：不同字母表示不同石漠化群落间差异显著($P<0.05$)。数据为平均值±标准误。

2.3 不同石漠化程度森林群落结构特征

树木的胸径和高度分布特征是表征群落结构的主要指标。轻度石漠化群落平均林分密度为 (4 156±504) 株·hm⁻²，中度石漠化群落平均林分密度为 (6 222±661) 株·hm⁻²，重度石漠化群落平均林分密度为 (7 244±1 179) 株·hm⁻²。由图 1 可知：3 种石漠化程度的森林群落树木胸径分布均呈现倒“J”型径级结构，但分布模式存在明显差异。轻度石漠化群落中，径级 I 个体平均为 (299±61) 株，占总株数的 53.8%；径级 II 为 (110±15) 株，占 19.8%；径级 III 为 (58±4) 株，占 10.4%；径级 IV 和径级 V 分别占 10.1% 和 7.0%，径级分布相对均匀。中度石漠化群落小径级个体比例进一步增加，径级 I 达 (442±67) 株，占 67.8%；径级 II 为 (191±12) 株，占 29.3%，大径级个体比例明显减少。重度石漠化群落表现出极端的径级分布特征，径级 I 个体高达 (701±197) 株，占总株数的 77.4%；径级 II 骤降至 (101±46) 株，占 11.2%；径级 III 以上大径级树木稀少。由图 2 可知：石漠化程度对群落垂直结构产生明显影响。轻度石漠化群落垂直分布较为均衡，高阶 I 为 (175±30) 株，占 31.4%；高阶 II 为 (190±48) 株，占 34.1%；高阶 III 为 (128±21) 株，占 23.0%；高阶 IV 虽然数量较少但仍有分布，形成相对完整的垂直层次结构。中度石漠化群落呈现向中下层集中的趋势，高阶 I 为 (273±62) 株，占 42.0%；高阶 II 为 (305±55) 株，占 46.9%，上层个体比例下降。重度石漠化群落垂直结构极度简化，呈现明显的倒“J”型分布，高阶 I 个体高度集中，达 (583±213) 株，占 67.0%，高阶 II 急剧减少至 (204±191) 株，仅占 23.4%，高阶 III、高阶 IV 个体稀缺。

总体上看，轻度石漠化群落保持相对完整的径级和高度级结构，群落稳定性较好；中度石漠化群落

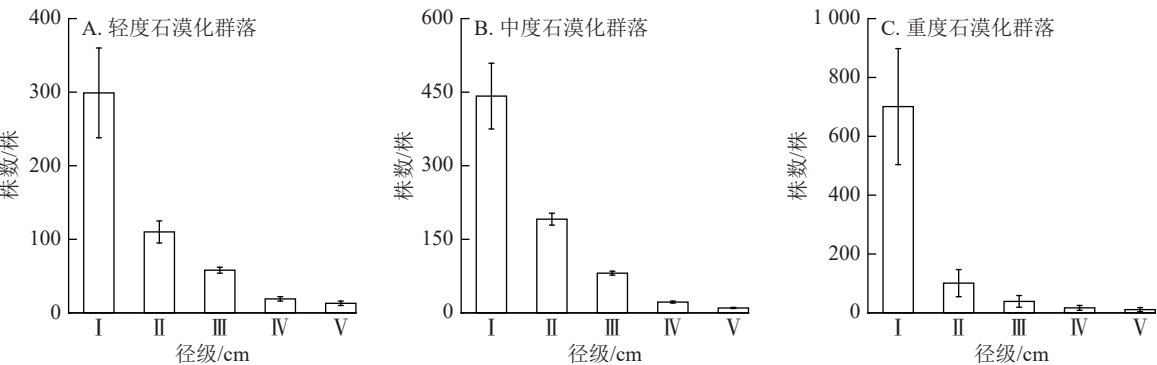


图 1 不同石漠化程度群落各径级株数分布

Figure 1 Distribution of plant number in different DBH classes in communities with different rocky desertification degrees

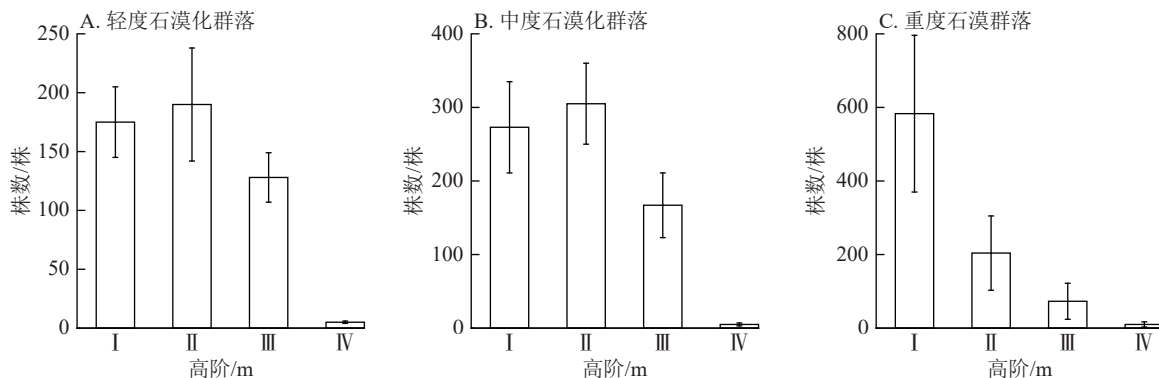


图 2 不同石漠化程度群落各高阶株数分布

Figure 2 Distribution of plant number in high class of communities with different degrees of rocky desertification

结构开始简化,但仍维持基本的层次分异;重度石漠化群落结构高度简化,主要由幼树和低矮个体构成,群落处于受干扰后的恢复初期阶段。植株密度较大,在每个径级和高阶中都存在着特定的个体分布,树木的数量在径级和高阶的划分中呈现出连贯性,并未出现明显的断层情况。

2.4 不同石漠化程度森林群落碳储量分配格局

从植被碳储量来看,3种石漠化程度森林群落均以树干为主要碳储量器官。从林木器官组分(图3A)来看,轻度和中度石漠化群落的树根存在显著差异($P<0.05$)。不同的石漠化群落植被碳储量从大到小依次为中度石漠化群落 $[(66.7\pm 8.6) \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}]$ 、重度石漠化群落 $[(53.9\pm 27.3) \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}]$ 、轻度石漠化群落 $[(45.7\pm 7.2) \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}]$,3种群落类型植被碳储量之间差异不显著。从土壤碳储量(图3B)来看,不同程度石漠化群落类型土壤碳储量从大到小依次为轻度石漠化群落 $[(39.5\pm 2.0) \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}]$ 、中度石漠化群落 $[(28.67\pm 0.27) \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}]$ 、重度石漠化群落 $[(22.82\pm 5.64) \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}]$,3种群落类型0~10 cm土层土壤有机碳储量均大于10~20 cm土层,土壤碳储量轻度石漠化群落与中度石漠化群落、重度石漠化群落存在显著差异($P<0.05$)。各群落类型总碳储量从大到小依次为中度石漠化群落 $(101.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})$ 、轻度石漠化群落 $(89.6 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})$ 、重度石漠化群落 $(80.4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})$,各群落类型之间差异不显著(图3C)。3种石漠化程度森林群落中植被碳储量远超其群落总碳储量的50%,次之为土壤碳储量、凋落物碳储量和枯死木碳储量。

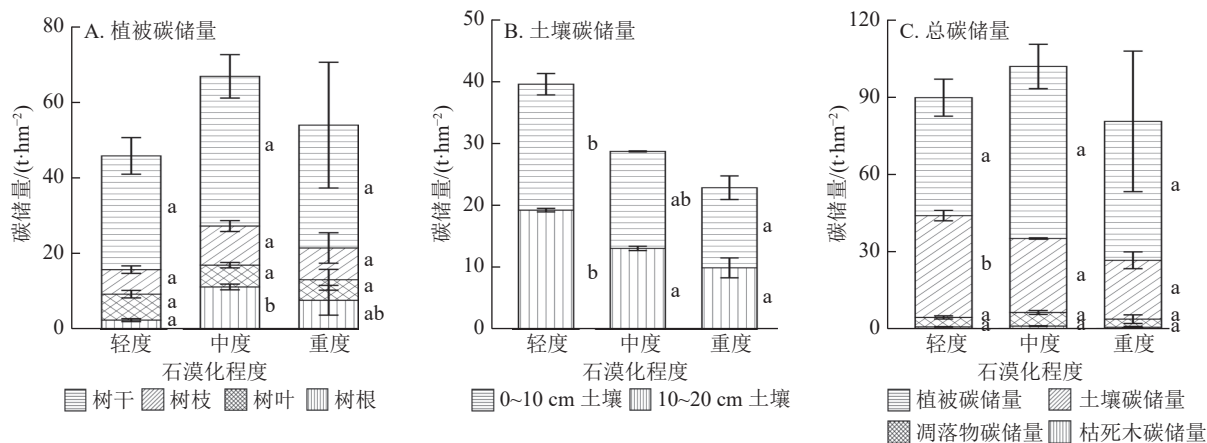
不同小写字母表示同一组分在不同石漠化群落之间差异显著($P<0.05$)。数据为平均值±标准误。

图 3 不同石漠化程度群落碳储量

Figure 3 Characteristics of communities carbon storage with different rocky desertification degrees

2.5 优势种和林分结构对碳储量的影响

如图4及表5所示:3种群落中, $5 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 20 \text{ cm}$ 或树高 $\geq 10 \text{ m}$ 的林木碳储量最高,其中轻度石漠化群落的优势种秀丽锥和马尾松,中度石漠化群落的优势种秀丽锥、马尾松,重度石漠化群落的优势种麻栎和秀丽锥的胸径和树高符合上述区间。3种群落类型中 $1 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 5 \text{ cm}$ 或树高 $< 5 \text{ m}$ 的林木碳储量较低,中度和重度石漠化群落的中径级树种的碳储量存在显著差异($P<0.05$)。其次,优势

种在轻度石漠化群落、中度石漠化群落占据主导地位，分别占 74% 和 68%，重度石漠化群落以非优势种占据主导地位，占 54%。综合来看，3 种群落类型中大径阶和上层的树种为其碳储量重要组成部分，优势种秀丽锥、马尾松和麻栎具有较强的碳汇功能。

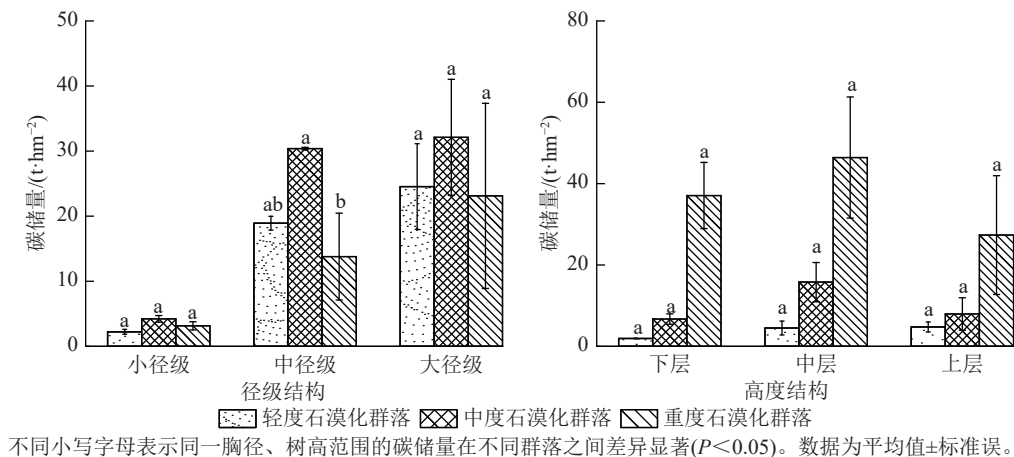


图 4 各群落类型不同径级树种、高阶树种碳储量分布
Figure 4 Distribution of carbon storage of tree species with different diameters and high-order tree species in each community type

表 5 不同石漠化程度群落优势种重要值前 5 位树种碳储量

Table 5 Carbon storage of top 5 tree species with important values of dominant species in different rocky desertification degrees									
群落类型	树种	平均胸径/cm	平均高度/m	碳储量/(t·hm ⁻²)	群落类型	树种	平均胸径/cm	平均高度/m	碳储量/(t·hm ⁻²)
轻度石漠化群落	秀丽锥	8.6±0.5	9.9±0.6	20.3±9.9	中度石漠化群落	桂花	1.5±0.8	2.1±1.1	0.4±0.3
	马尾松	14.8±3.0	11.6±1.2	9.3±4.4		青冈	4.2±0.0	5.2±0.0	4.3±0.0
	鸡仔木	3.7±0.2	6.6±0.2	1.3±0.5		牡荆	1.1±0.6	2.0±1.0	0.7±0.7
	桂花	3.3±0.5	3.4±0.4	0.5±0.0	重度石漠化群落	麻栎	10.6±6.9	8.5±4.6	15.1±13.6
	麻栎	8.6±1.0	9.4±1.3	2.2±0.6		欆木	2.8±0.9	4.2±0.8	0.9±0.7
中度石漠化群落	秀丽锥	7.2±0.6	8.6±0.0	24.6±13.8		桂花	2.9±1.4	3.5±1.9	2.8±2.7
	马尾松	15.5±1.8	12.7±0.6	15.3±8.2		秀丽锥	8.9±4.2	8.9±2.6	5.1±4.6
	山胡椒	5.2±0.5	7.4±0.4	3.6±2.8					

说明：数据为平均值±标准误。

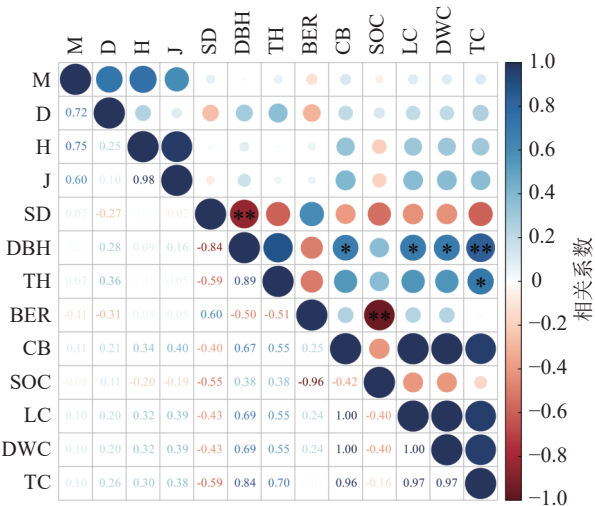
2.6 群落特征与碳储量特征的相关分析

相关性分析(图 5)显示：群落结构特征中，胸径与植被碳储量呈显著正相关 ($P<0.05$)，与总碳储量呈极显著正相关 ($P<0.01$)，与凋落物碳储量和枯死木碳储量呈显著正相关 ($P<0.05$)；树高与总碳储量呈显著正相关 ($P<0.05$)。群落物种多样性与碳储量均不存在显著相关，基岩裸露度与总碳储量无显著相关，与土壤碳储量呈极显著负相关 ($P<0.01$)；林分密度与群落物种多样性无显著相关，与胸径极显著负相关 ($P<0.01$)。随机森林模型分析(图 6)可知：物种优势度指数、胸径和树高是影响群落碳储量的重要因子，其特征贡献度分别为 21.23%、19.95% 和 19.55%，群落结构特征总贡献度为 55.43%，群落物种多样性特征总贡献度为 35.28%。

3 讨论

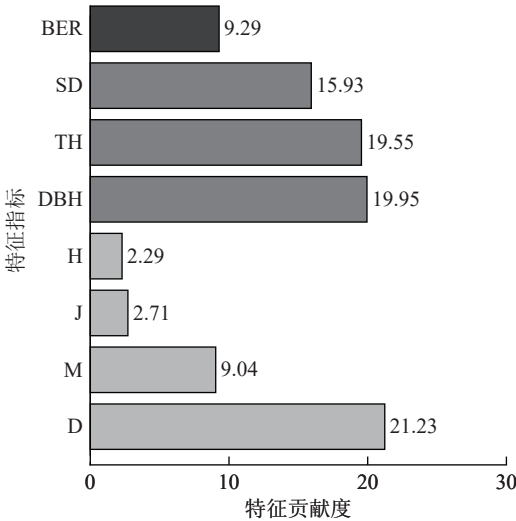
3.1 石漠化地区森林群落植物与结构特征

物种多样性和群落结构反映了生态系统的稳定性。本研究显示：粤北石漠化地区优势树种为秀丽锥、马尾松、麻栎等。重度石漠化群落植物种类相较最多，林分密度最大，植物种类数量和林木密度并未随石漠化程度的加剧而减少。前人在石漠化地区的相关研究也得出了不一致的结果^[26]。这可能是岩石裸露度高，形成多种微生境为不同类型的植物提供了多样资源，生境的异质性为更多物种的共存创造了条件，也促进了物种的适应性进化^[27]。本研究发现：物种数量的增加主要体现在稀有种数量的增加，轻度、中度和重度石漠化群落稀有种数量依次为 23、35、36，这与“稀有种是维持生物多样性的重要机制



M. Margale指数; D. Simpson指数; H. Shannon-Wiener指数; J. Pielou指数。SD. 林分密度; DBH. 胸径; TH. 树高; BER. 基岩裸露度; CB. 植被碳储量; SOC. 土壤有机碳; LC. 凋落物碳储量; DWC. 枯死木碳储量; TC. 总碳储量。* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

图 5 群落特征与碳储量特征相关系数热力图
Figure 5 Thermodynamic map of correlation coefficient between community characteristics and carbon storage characteristics



深灰色代表群落结构特征指标，浅灰色代表群落物种多样性特征指标，黑色代表基岩裸露度。M. Margale指数; D. Simpson指数; H. Shannon-Wiener指数; J. Pielou指数; DBH. 胸径; TH. 树高; BER. 基岩裸露度; SD. 林分密度。

图 6 群落特征指标相对重要性
Figure 6 Relative importance of community characteristics indicators

之一”的观点一致^[28]。但中度石漠化群落物种多样性表现最好，可能与中度石漠化区域受到生态和人为干扰的强度适中有关，结果符合中度干扰假说^[29]。中度石漠化群落中多见的桂花、光叶海桐 *Pittosporum glabratum* 等树种，是人工促进更新物种。这说明在适度的人工促进更新可以促进林下更新，提升多样性，同时也能够增加森林的碳汇功能。对不同群落类型多样性进行比较发现：粤北石漠化地区物种多样性指数与其他亚热带常绿阔叶林相比均较低^[30]，且除 Simpson 指数外，其他物种多样性指数与石漠化等级演替没有明显相关性。产生这种现象的原因：一是石漠化地区自然条件恶劣，适生树种少，适生树种受到竞争压力小，表现出更强的优势地位；二是不同石漠化程度生境的差异，以及不同物种的耐受性、群落繁殖策略等生态习性的不同也可能导致不同石漠化程度下群落呈现不同的物种多样性特征^[31]；三是研究区为天然次生林，群落的生长受到树种、树龄和环境多种因素影响，导致植物多样性指数的变化。植物多样性与石漠化群落演替之间的规律还与其他生态因子有关。在今后的研究中需综合考虑各种生态因子影响，更加全面解释石漠化地区植物多样性与群落类型之间的关系。

胸径和树高结构是预测群落结构发展趋势的 2 个指标^[32]。本研究显示：随着石漠化程度加剧，群落结构呈现幼龄化和低矮化趋势，小径级、低高度级个体比例显著增加，大径级、高层个体比例相应减少，径级分布基本形成倒“J”型，这种结构特征反映了恶劣立地条件对树木生长发育的限制作用，说明粤北石漠化地区群落结构龄级为增长型，同时也表明群落具备一定的更新潜力。复杂的垂直群落造成群落郁闭度增加，改变了光照、温度、水分分布，下层环境变得较为阴暗、凉爽和湿润。这种微环境的变化为林下中性或阴性树种的生长提供了良好的生境，增加了群落中间层植物的种类，使中间层植物数量达到最多。因此，应根据具体的立地环境和实际需求，合理调控粤北石漠化地区的林分结构，逐渐形成复层林。

3.2 不同石漠化程度森林群落碳库特征

森林生态系统的碳储量主要由植被碳库和土壤碳库组成。本研究中轻度石漠化群落土壤碳储量远高于中度和重度石漠化群落土壤碳储量，这与张穗粒等^[33]对西南喀斯特地区土壤有机碳的研究结果一致。通常，相较于中度和重度石漠化地区，轻度石漠化地区水土流失量小，土壤通气性和保水保肥性好，植物的生存环境较好，更有利于有机质的分解和转化。灌草类植物定居及产生的凋落物，经微生物分解产

生新的有机物质进入土壤,增加了表层土壤碳。本研究中,0~10 cm 土层土壤有机碳储量较高,这与其他森林类型的研究结果基本一致^[34]。本研究中森林群落中大径级、中层和上层的树种碳储量处于优势地位,植被碳储量不随石漠化程度的增加而减少,呈现中度石漠化群落碳储量高于轻度和重度石漠化群落,这与前人研究结果不一致^[35]。轻度石漠化群落离居民点较近,人为干扰严重,重度石漠化森林样地林木生境条件最差,因此中度石漠化群落中位于中径级、大径级和中、上层的树种碳储量远高于其他2种森林群落。森林群落碳储量更多由群落的大径级树种数量和高碳储量物种决定,大径级优势种在碳汇功能的维持中具有重要作用^[36],且林分结构处于碳储量优势范围内,树种皆为粤北石漠化地区高效碳汇乡土树种^[37],这与本研究结果相符。由此可见,修复粤北石漠化地区植被、发展碳汇林产业、促进植物群落正向演替应该筛选适生高效的碳汇乡土树种进行栽植,重点关注群落中现有的中、大径级和中、上层树种进行管护。

3.3 石漠化地区群落特征与碳储量特征的关系

植物群落物种多样性、结构特征和林分密度,都可对地上碳储量产生直接或间接影响。本研究发现:物种多样性与群落碳储量呈现弱正相关,这一点和 OUYANG 等^[38]在中国南方的研究结果一致,但与其他学者研究不一致^[39]。产生研究结果差异的主要原因:首先,研究区域群落处于生长演替发展阶段,植被碳主要存在于乔木层,大树可能会通过非对称性竞争抑制所在样方的物种多样性。群落演替过程中,碳储量占优势地位的树种通过竞争逐渐淘汰掉其他树种,使得物种多样性与碳储量相关性较弱^[21];其次,碳储量和群落结构特征呈现显著正相关,主要体现在树高和胸径上,且群落中占据高位或优势径级地位的树种更容易获取水分、阳光等,有利于碳储量的积累。第三,本研究中胸径作为植被层、凋落物和枯死木碳储量的计算参数,对植被碳储量结果也有影响。林分密度从资源竞争角度调节碳储量,其影响可能大于胸径和树高。本研究结果显示:林分密度与胸径呈现极显著负相关,与碳储量无显著相关性,说明粤北石漠化地区森林群落的林分密度可能是通过胸径间接作用于群落碳储量。林分密度越大树木间的资源竞争加剧,个体生长受限,胸径显著减小。虽然林分密度的增加会提升单位面积的林木株数,但密度适中的中度石漠化群落优势种胸径较大,林分空间结构更合理,碳储量最高。胸径可能就是影响碳储量的主要因素。考虑到基岩裸露度是影响石漠化地区森林碳汇的最主要因素,因此本研究将基岩裸露度也作为分析因子之一。本研究显示:基岩裸露度只与土壤碳储量呈极显著负相关,与植被碳储量无相关,表明石漠化程度越高的森林群落碳储量不一定低,但土壤碳储量会更低,说明石漠化地区森林群落碳储量可能更多由群落结构特征决定,基岩裸露度则更多是土壤碳储量高低的主要影响因素。物种优势度虽然不如树高、胸径与碳储量的相关性显著,但是重要性高。方国景等^[40]指出:物种优势度对群落生物量的贡献主要是通过树高、胸径和环境因素的共同效应发挥作用。高优势度物种往往是群落中的优势种,具有较高的树高和胸径,能更有效利用资源,占据更高生态位,对生态系统的维护和生物多样性具有重要意义。对于一些特殊地区或特殊类型的森林生态系统而言,物种多样性、结构特征和碳储量之间可能会呈现不同的关系。今后可以在更多地区对不同生态系统类型开展相关研究,以期获得更全面、更具有代表性的数据。

4 结论

本研究发现:粤北石漠化地区物种多样性指数偏低,以中度石漠化群落物种多样性最高,建群种马尾松、秀丽锥等作为粤北石漠化地区高效碳汇林营造树种,群落植物多样性对碳储量影响较小,群落结构对碳储量具有主导作用,基岩裸露度是土壤碳储量高低的主要因素。因此,在粤北地区石漠化治理中,建议以天然林群落的优势种为首选树种,在经营过程中重视林分结构调整,加强中大径级树种的管护,同时改善石漠化立地条件,提升粤北石漠化生态系统恢复能力和碳汇能力。轻度石漠化群落可以通过封山育林或适当地进行人工促进恢复,优先保护秀丽锥、马尾松等优势种的中小径阶个体,促进林下幼树自然更新,补植高效固碳乡土树种;中度石漠化区选择性保留胸径 ≥ 15 cm 的秀丽锥、马尾松个体,促进上层发育,补植中层伴生树种,增强垂直分层异质性;重度石漠化区加强小生境的管理,以耐旱、耐贫瘠的岩生植物为优选种,先固定薄层土壤,再引入演替中后期树种。

5 参考文献

- [1] FALKOWSKI P, SCHOLLES R J, BOYLE E, *et al.* The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system [J]. *Science*, 2000, **290**(5490): 291–296. DOI: 10.1126/science.290.5490.291.
- [2] 涂纯, 罗为群, 李发东, 等. 中国南方岩溶石漠化的时空变化及其原因[J]. 地质通报, 2025, **44**(2): 326–339. TU Chun, LUO Weiqun, LI Fadong, *et al.* Spatial and temporal changes of karst rocky desertification and its cause analysis in South China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2025, **44**(2): 326–339. DOI: 10.12097/gbc.2021.50.120.
- [3] 喻理飞, 朱守谦, 祝小科, 等. 退化喀斯特森林恢复评价和修复技术[J]. 贵州科学, 2002, **20**(1): 7–13. YU Lifei, ZHU Shouqian, ZHU Xiaoke, *et al.* A study on evaluation of restoration and remedy technology of degraded karst forest [J]. *Guizhou Science*, 2002, **20**(1): 7–13. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6563.2002.01.002.
- [4] 杨佰润, 吴江, 官凯程, 等. 大陈岛植物群落结构及物种组成[J]. 浙江农林大学学报, 2025, **42**(2): 321–328. YANG Bairun, WU Jiang, GUAN Kaicheng, *et al.* Community structure and species composition in Dachen Island [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **42**(2): 321–328. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20240423.
- [5] 楼一恺, 范忆, 戴其林, 等. 天目山常绿落叶阔叶林群落垂直结构与群落整体物种多样性的关系[J]. 生态学报, 2021, **41**(21): 8568–8577. LOU Yikai, FAN Yi, DAI Qilin, *et al.* Relationship between vertical structure and overall species diversity in an evergreen deciduous broad-leaved forest community of Tianmu Mountain Natural Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(21): 8568–8577. DOI: 10.5846/stxb202007301989.
- [6] 陈波兰, 吴雨茹, 钟欣艺, 等. 林分密度对云顶山柏木人工林下物种多样性和生物量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2023, **41**(4): 665–672. CHEN Bolan, WU Yuru, ZHONG Xinyi, *et al.* Effects of stand density on understory plant diversity and biomass in a *Cupressus funebris* plantation in yunding mountain [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023, **41**(4): 665–672. DOI: 10.16036/j.issn.1000-2650.202305240.
- [7] PACH M, PODLASKI R. Tree diameter structural diversity in Central European forests with *Abies alba* and *Fagus sylvatica*: managed versus unmanaged forest stands [J]. *Ecological Research*, 2015, **30**(2): 367–384. DOI: 10.1007/s11284-014-1232-4.
- [8] 赵毅. 漓江流域喀斯特森林物种多样性和地上碳储量分布格局及其驱动机制[D]. 广西: 桂林电子科技大学, 2024. ZHAO Yi. *Study on the Distribution Pattern of Karst Forest Species Diversity and Aboveground Carbon Storage in the Lijiang River Basin* [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2024. DOI: 10.27049/d.cnki.gglde.2024.000236.
- [9] LAUTENBACH S, JUNGANDREAS A, BLANKE J, *et al.* Trade-offs between plant species richness and carbon storage in the context of afforestation—Examples from afforestation scenarios in the Mulde Basin, Germany [J]. *Ecological Indicators*, 2017, **73**: 139–155. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.09.035.
- [10] 朱习爱, 沈有信, 何贝贝, 等. 云南石林岩生维管植物多样性及生物量特征[J]. 山地学报, 2016, **34**(2): 165–172. ZHU Xiai, SHEN Youxin, HE Beibei, *et al.* Species diversity and biomass of vascular plant on rocky outcrops in karst area [J]. *Mountain Research*, 2016, **34**(2): 165–172. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000114.
- [11] 马学威. 喀斯特石漠化地区高效特色林碳储量特征与碳汇林产业培育技术[D]. 贵州: 贵州师范大学, 2020. MA Xuewei. *Carbon Storage Features of High-efficiency Characteristic Forests and Carbon Sequestration Forestry Cultivation Techniques in the Karst Rocky Desertification Areas* [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020. DOI: 10.27048/d.cnki.ggzsu.2020.000494.
- [12] NOWAK D J, CRANE D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **116**(3): 381–389. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00214-7.
- [13] ZHENG Zheng, FENG Zhili, CAO Min, *et al.* Forest structure and biomass of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, southwest China [J]. *Biotropica*, 2006, **38**(3): 318–327. DOI: 10.1111/j.1744-7429.2006.00148.x.
- [14] 赵中华, 惠刚盈. 林分结构多样性研究进展[J]. 林业科学, 2020, **56**(9): 143–152. ZHAO Zhonghua, HUI Gangying. Advances in structural diversity of stand structure [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, **56**(9): 143–152. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20200916.
- [15] 黄金国, 郭志永. 粤北岩溶山区土地石漠化成因及防治对策[J]. 现代农业科技, 2010(15): 349–350. HUANG Jinguo, GUO Zhiyong. Causes and control countermeasures of land rocky desertification in karst mountainous areas of northern

- Guangdong Province [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(15): 349–350. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2010.15.232.
- [16] 熊康宁. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究: 以贵州省为例[M]. 北京: 地质出版社, 2002. XIONG Kangning. *A Typical Study of Karst Rocky Desertification Based on Remote Sensing and GIS: A Case Study of Guizhou Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [17] 冯汉华, 吴斌, 伍国清, 等. 喀斯特不同植被类型土壤细菌群落与功能特征[J]. 森林与环境学报, 2024, 44(2): 148–156. FENG Hanhua, WU Bin, WU Guoqing, *et al.* Characteristics and functions of soil microbial communities under different vegetation types in karst areas [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2024, 44(2): 148–156. DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2024.02.005.
- [18] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 (II) 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995, 15(3): 286–277. MA Keping, HUANG Jianhui, YU Shunli, *et al.* Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China (II) species richness, evenness, and species diversities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 286–277. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.1995.03.006.
- [19] HUBBELL S, FOSTER R. Commonness and rarity in a neotropical forest: implications for tropical tree conservation [J]. *Plant Ecology*, 1986, 8: 205–231.
- [20] 刘灿然, 马克平. 生物群落多样性的测度方法 (V) 生物群落物种数目的估计方法[J]. 生态学报, 1997, 17(6): 39–48. LIU Canran, MA Keping. Measurement of biotic community diversity (V) methods for estimating the number of species in a community [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(6): 39–48.
- [21] 谭珊珊, 王忍忍, 龚筱羚, 等. 群落物种及结构多样性对森林地上生物量的影响及其尺度效应: 以巴拿马 BCI 样地为例[J]. 生物多样性, 2017, 25(10): 1054–1064. TAN Shanshan, WANG Renren, GONG Xiaoling, *et al.* Scale dependent effects of species diversity and structural diversity on aboveground biomass in a tropical forest on Barro Colorado Island, Panama [J]. *Biodiversity Science*, 2017, 25(10): 1054–1064. DOI: 10.17520/biods.2017155.
- [22] 李桥, 范清平, 唐战胜, 等. 浙江东白山次生针阔混交林群落组成及结构动态[J]. 广西植物, 2022, 42(6): 1067–1076. LI Qiao, FAN Qingping, TANG Zhansheng, *et al.* Community composition and structure dynamics of secondary coniferous and broad-leaved mixed forest in Dongbaishan, Zhejiang Province [J]. *Guihaia*, 2022, 42(6): 1067–1076. DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202012022.
- [23] 周国逸, 尹光彩, 唐旭利, 等. 中国森林生态系统碳储量——生物量方程[M]. 北京: 科学出版社, 2018. ZHOU Guoyi, YIN Guangcai, TANG Xuli, *et al.* *Carbon Storage-Biomass Equation of Forest Ecosystem in China*[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [24] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳贮量估算的意义[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3903–3910. CHAI Hua, HE Nianpeng. Evaluation of soil bulk density in Chinese terrestrial ecosystems for determination of soil carbon storage on a regional scale [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 3903–3910. DOI: 10.5846/stxb201411222312.
- [25] 王万同, 唐旭利, 黄玫, 等. 中国森林生态系统碳储量——动态及机制[M]. 北京: 科学出版社, 2018. WANG Wantong, TANG Xuli, HUANG Mei, *et al.* *Carbon Storage-Dynamics and Mechanism of Forest Ecosystem in China*[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [26] 周文昌, 郑兰英, 曹国, 等. 鄂北岩溶山地石漠化植物组成及物种多样性特征[J]. 中南林业调查规划, 2017, 36(1): 21–25. ZHOU Wenchang, ZHENG Lanying, CAO Guo, *et al.* Characteristics of the composition and diversity of plants in the rocky desertification karst land in northern Hubei [J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2017, 36(1): 21–25. DOI: 10.16166/j.cnki.cn43-1095.2017.01.006.
- [27] 程晶, 刘济明, 熊华, 等. 喀斯特中度石漠化不同小生境的植物群落特征[J]. 四川农业大学学报, 2020, 38(3): 272–279. CHENG Jing, LIU Jiming, XIONG Hua, *et al.* Plant communities characteristics of different microhabitats of karst moderate rocky desertification [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2020, 38(3): 272–279. DOI: 10.16036/j.issn.1000-2650.2020.03.004.
- [28] 王世雄, 赵亮, 李娜, 等. 稀有种和常见种对植物群落物种丰富度格局的相对贡献[J]. 生物多样性, 2016, 24(6): 658–664. WANG Shixiong, ZHAO Liang, LI Na, *et al.* The relative contributions of rare and common species to the patterns of species richness in plant communities [J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(6): 658–664. DOI: 10.17520/biods.2015239.

- [29] 姚小兰, 郝建锋, 齐锦秋, 等. 人为干扰对川西碧峰峡木荷次生林群落结构和物种多样性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, **45**(11): 18–26. YAO Xiaolan, HAO Jianfeng, QI Jinqiu, *et al.* Effects of human disturbance on community structure and species diversity of *Schima superba* secondary forest in Bifengxia, western Sichuan [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2017, **45**(11): 18–26. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.11.003.
- [30] 魏识广, 叶万辉, 练琚愉, 等. 南亚热带常绿阔叶林群落及其卫星样地物种多样性特征[J]. 生态学报, 2022, **42**(11): 4515–4523. WEI Shiguang, YE Wanhui, LIAN Juyu, *et al.* Species diversity characteristics of lower subtropical evergreen broad-leaved forest community and its satellite plots [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(11): 4515–4523. DOI: 10.5846/stxb202105071190.
- [31] 白义鑫, 王霖娇, 盛茂银. 我国西南岩溶地区自然植被群落与小生境耦合关系研究[J]. 世界林业研究, 2018, **31**(5): 58–63. BAI Yixin, WANG Linjiao, SHENG Maoyin. A study of the coupling relationship between natural vegetation community and micro-habitat in karst ecosystem of southwest China [J]. *World Forestry Research*, 2018, **31**(5): 58–63. DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2018.0046.y.
- [32] 李晨笛, 杨小波, 李东海, 等. 海南中部山区天然林群落结构与多样性变化[J]. 生态学杂志, 2023, **42**(3): 513–523. LI Chendi, YANG Xiaobo, LI Donghai, *et al.* Changes of community structure and diversity of natural forests in mountainous areas of central Hainan Island [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(3): 513–523. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202303.013.
- [33] 张穗粒, 盛茂银, 王霖娇, 等. 西南喀斯特长期植被修复对土壤有机碳组分的影响[J]. 生态学报, 2023, **43**(20): 8476–8492. ZHANG Suili, SHENG Maoyin, WANG Linjiao, *et al.* Effects of long term vegetation restorations on soil organic carbon fractions in the karst rocky desertification ecosystem, Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(20): 8476–8492. DOI: 10.20103/j.stxb.202208152346.
- [34] 刘攀, 陆梅, 李聪, 等. 纳帕海典型草甸群落土壤有机碳储量及碳组分变化特征[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(2): 274–284. LIU Pan, LU Mei, LI Cong, *et al.* Changes of soil organic carbon storage and carbon components in typical meadow communities in Napahai [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(2): 274–284. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20220377.
- [35] 文林琴, 栗忠飞, 黎明钰, 等. 黔西南石漠化演变过程中植被与土壤物理特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, **48**(12): 97–106. WEN Linqin, LI Zhongfei, LI Mingyu, *et al.* Characteristics of vegetation and soil physical properties in evolution processes of rocky desertification in Southwest Guizhou [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2020, **48**(12): 97–106. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.12.012.
- [36] 李林, 赵毅, 温智峰, 等. 南亚热带常绿阔叶林地上碳储量空间分布特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2024, **44**(11): 4687–4697. LI Lin, ZHAO Yi, WEN Zhifeng, *et al.* Spatial distribution characteristics and influencing factors of carbon storage on a subtropical evergreen broad-leaved forest in South Asia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(11): 4687–4697. DOI: 10.20103/j.stxb.202311162499.
- [37] 冯汉华, 曹窈畅, 鲍熙梅, 等. 粤北石漠化地区植被恢复树种选择[J]. 林业与环境科学, 2024, **40**(3): 41–48. FENG Hanhua, CAO Yaochang, BAO Ximei, *et al.* Selection of tree species for vegetation restoration in the rocky desertification areas of northern Guangdong Province [J]. *Forestry and Environmental Science*, 2024, **40**(3): 41–48. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4427.2024.03.006.
- [38] OUYANG Shuai, XIANG Wenhua, WANG Xiangping, *et al.* Significant effects of biodiversity on forest biomass during the succession of subtropical forest in South China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, **372**: 291–302. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.04.020.
- [39] 郝珉辉, 代莹, 岳庆敏, 等. 阔叶红松林功能多样性与森林碳汇功能关系[J]. 北京林业大学学报, 2022, **44**(10): 68–76. HAO Minhui, DAI Ying, YUE Qingmin, *et al.* Relationship between functional diversity of broadleaved Korean pine forest and forest carbon sink function [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, **44**(10): 68–76. DOI: 10.12171/j.1000-1522.20220237.
- [40] 方国景, 汤孟平. 天目山常绿阔叶林优势种群胸径的空间连续性分析[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(5): 663–667. FANG Guojing, TANG Mengping. Spatial continuity for DBH in dominant populations of an evergreen broadleaved forest in National Nature Reserve of Mount Tianmu, China [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2014, **31**(5): 663–667. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2014.05.001.