

# 淹水梯度对红树林湿地土壤微生物 生物量与酶活性的影响

陈玉军<sup>1</sup>, 李婷<sup>2</sup>, 朱立安<sup>2</sup>, 林梓<sup>2</sup>, 贾桐<sup>3</sup>, 朱虎<sup>3</sup>

(1.中国林业科学研究院 热带林业研究所, 广东 广州 510520; 2.广东省科学院

生态环境与土壤研究所 华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心 广东省农业环境  
综合治理重点实验室, 广东 广州 510650; 3.佛山科学技术学院 食品科学与工程学院, 广东 佛山 528000)

**摘要:** [目的] 研究红树林土壤微生物生物量与酶活性对不同淹水梯度的响应, 揭示随淹水时间延长红树林下土壤质量的变化特征及影响因素, 为该区域红树林保护与管理提供理论依据。[方法] 以广东省雷州半岛附城镇红树林为研究对象, 依据潮间带分布情况及红树林群落类型, 采集低潮位、中低潮位、中潮位、中高潮位、高潮位表层 0—20 cm 沉积物样品, 测定与分析红树林湿地不同潮位表层土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)、磷(MBP)与酶活性。[结果] 随淹水频率的增加, MBC, MBN 分别减少 96.7% 和 98.4%, 在高潮位为最大值; MBP 呈波浪式下降, 在中高潮位为最大值; 微生物熵( $q_{MBC}$ )、氮( $q_{MBN}$ )先增后降, 微生物熵磷( $q_{MBP}$ )呈波浪式下降,  $q_{MBC}$ ,  $q_{MBN}$ ,  $q_{MBP}$  均在中高潮位为最大值; 土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶活性先增后降, 在中高潮位为最大值, 脲酶活性显著减少 20.2%, 在高潮位为最大值。冗余分析结果表明,  $q_{MBN}$ , MBN, MBC 是研究区红树林表层土壤酶活性变异的关键环境因素, 可解释其变异的 50.9%。[结论] 淹水梯度的变化对湛江红树林湿地表层土壤微生物生物量和酶活性变化产生了显著影响。随淹水频率增加土壤质量总体呈衰退态势, 建议适当增加研究区湿地土壤氮素供给以改善土壤质量, 促进红树林植树造林及其生长。

**关键词:** 红树林湿地; 淹水梯度; 土壤微生物生物量; 微生物熵; 土壤酶活性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0068-08

中图分类号: S154.3

**文献参数:** 陈玉军, 李婷, 朱立安, 等. 淹水梯度对红树林湿地土壤微生物生物量与酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 68-75. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220929.001; Chen Yujun, Li Ting, Zhu Li'an, et al. Effects of flooding gradient on soil microbial biomass and enzyme activities in a mangrove wetland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 68-75.

## Effects of Flooding Gradient on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activities in a Mangrove Wetland

Chen Yujun<sup>1</sup>, Li Ting<sup>2</sup>, Zhu Li'an<sup>2</sup>, Lin Zi<sup>2</sup>, Jia Tong<sup>3</sup>, Zhu Hu<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangdong, Guangzhou

510520, China; 2. Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences,

National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South

China, Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong,

Guangzhou 510650, China; 3. School of Food Science and Engineering, Foshan University, Guangdong, Foshan 528000, China)

**Abstract:** [Objective] The the responses of soil microbial biomass and enzyme activities to a flooding gradient in mangroves were determined to reveal the dynamics of soil quality and its influencing factors with increasing flooding period in order to provide a theoretical basis for mangrove protection and management. [Methods] We selected a mangrove plantation located in Fucheng town on the Leizhou peninsula, Guangdong Province,

收稿日期: 2022-07-01

修回日期: 2022-09-13

**资助项目:** 广东省重点领域研发计划项目“广东红树林生态修复和功能提升技术与示范”(2020B020214001); 海南省自然科学基金项目“海南橡胶林地土壤侵蚀监测及防控研究”(421RC658); 国家自然科学基金项目“珠三角水稻土耕层下有机碳的积累和稳定性分析”(41771232); 广东省科学院项目“华南林地土壤剖面有机碳循环机制”(2019GDASYL-0104014)

**第一作者:** 陈玉军(1972—), 男(汉族), 河南省信阳市人, 博士, 副研究员, 主要从事红树林湿地生态学方面的研究。Email: yjchen@163.net。

**通讯作者:** 朱立安(1974—), 男(汉族), 河北省乐亭县人, 硕士, 副研究员, 主要从事土壤环境与区域生态、水土保持与生态修复方面的研究。Email: lazhu@soil.gd.cn。

as the study site. We collected surface sediments (0—20 cm) from low, mid-low, mid, mid-high, and high-intertidal zones according to the distribution of intertidal zones and the type of mangrove communities. Soil microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (MBN), phosphorus (MBP), and enzyme activities of different intertidal zones were measured and analyzed. [Results] As flooding frequency increased, MBC and MBN significantly decreased by 96.7% and 98.4%, respectively. The highest values were observed in the high-intertidal zone. The MBP fluctuated and decreased, with the highest value observed in the mid-high-intertidal zone. Microbial entropy carbon ( $q_{MBC}$ ) and nitrogen ( $q_{MBN}$ ) initially increased and then decreased with time, while the microbial entropy phosphorus ( $q_{MBP}$ ) fluctuated with a decreasing trend. The highest  $q_{MBC}$ ,  $q_{MBN}$ , and  $q_{MBP}$  values were observed in mid-high-intertidal zone. The activities of  $\beta$ -glucosidase and acid phosphatase initially rose and then declined, with the highest values observed in the mid-high-intertidal zone. The activities of urease significantly decreased by 20.2%, and the highest value was observed in the high-intertidal zone. Redundancy analysis indicated that  $q_{MBN}$ , MBN, and MBC were the main factors influencing soil enzyme activities in the surface soil, accounting for 50.9% of the total variation in enzyme activities. [Conclusion] Flooding gradient had a significant effect on soil microbial biomass and enzyme activities, and soil fertility decreased substantially with increased flooding time. An increase in nitrogen fertilization may improve soil quality and promote mangrove afforestation and growth.

**Keywords:** mangrove wetland; flooding gradient; soil microbial biomass; microbial entropy; soil enzyme activities

作为生态系统的重要组成部分,土壤微生物和酶直接或间接参与土壤养分循环、能量流动、有机物质转化等生物化学过程<sup>[1-2]</sup>,是环境变化的敏感指标<sup>[3-4]</sup>,对土壤养分、结构、稳定性和植被恢复有重要影响<sup>[4]</sup>。土壤微生物是驱动地球生物化学循环的引擎<sup>[5]</sup>,其生物量是土壤中不涵盖根系等大型动植物体,体积小于  $5.00 \times 10^3 \mu\text{m}^3$  的生物总量<sup>[6]</sup>,是土壤有机质、养分转化和循环的动力,是植物重要的养分储备<sup>[1]</sup>。土壤微生物生物量变化和生态化学计量比可在很大程度上决定土壤微生物分解和矿化效率<sup>[7]</sup>。研究土壤微生物生物量及其生态化学计量比可判断土壤养分限制,明确土壤质量和土壤健康状况<sup>[8]</sup>。土壤酶是催化土壤有机质分解的蛋白质,主要源于土壤微生物、植物根系和动物分泌物<sup>[9]</sup>,其中土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶主要参与土壤纤维素降解的碳循环过程<sup>[10]</sup>,脲酶主要参与土壤有机质中蛋白质和氨基酸水解,其活性可以指示土壤对氮素的需求和利用,酸性磷酸酶主要参与土壤有机磷矿化,其活性高低直接影响土壤有机磷的分解转化及生物有效性<sup>[11]</sup>。土壤酶活性可指征土壤生产力和微生物活性,反映各种生物化学过程的方向和强度<sup>[12-13]</sup>。土壤微生物是酶的重要来源之一,影响土壤微生物活性的因素亦影响土壤酶活性,两者联系紧密<sup>[14]</sup>。明确红树林土壤微生物生物量与酶活性对不同淹水梯度的响应,可揭示红树林随淹水时间延长其土壤质量的变化特征及影响因素,加深红树林土壤碳、氮、磷地球化学循环特征的认识。

红树林是生长在热带、亚热带潮间带独特的木本植物群落,具有很高的初级生产力水平,被认为是世

界上碳储量最高的生态系统之一,一般分布在平均海平面至最高潮时潮水所能淹没的区域,受海水周期性淹没的影响<sup>[15-16]</sup>。淹水梯度控制潮滩湿地与邻近海洋系统之间水文、能量和营养物质的交换,它的变化使土壤性质和微生物群落组成存在差异,这势必引起土壤养分、微生物生物量与酶活性的变化<sup>[17-18]</sup>。目前,关于湿地淹水梯度的研究多涉及土壤理化性质、微生物群落结构和功能、初级生产力、二氧化碳吸收通量和生态系统功能等方面<sup>[3,19-22]</sup>,而对于淹水梯度下红树林土壤微生物生物量和酶活性方面的研究尚缺乏相关报道。基于此,本研究选取湛江红树林不同淹水频率沉积物土壤为研究对象,明确不同淹水频率下红树林土壤微生物生物量碳氮磷和酶活性的空间异质性,以期厘清各淹水频率下红树林土壤质量状况及其生态效应,为该区域红树林保护与管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广东省雷州半岛附城镇迈奏村,属广东湛江红树林国家级自然保护区,系红树人工林。研究区内地势较平坦,属亚热带湿润性季风气候,光照充足,热量丰富,年温差明显,干湿分明,区域内降雨不均匀,无霜期较长。年平均气温  $15.9^\circ\text{C}$ ,年平均降雨量  $1\,711.6\text{ mm}$ ,年平均日照时数为  $2\,003.6\text{ h}$ ,年均气温  $22^\circ\text{C}$ 。

### 1.2 样地选择与样品采集

于 2021 年 4 月 22 日在研究地,依据潮间带分布

情况及红树林群落类型,每潮位设置 3 个 20 m×20 m 样地,平行样地间距 40 m 左右,分别采集低潮位(KT)、中低潮位(KD)、中潮位(DD)、中高潮位(ZZ)、高潮位(ZG)沉积物样品(表 1)。采集样品时,每个

样方内按照对角线取样方式,多点采集表层 0—20 cm 土壤,均匀混合分别装入密封封口袋,低温保存并迅速运回实验室,将样品均分为两份,一份挑选出杂物存于冰箱待测,另一份自然风干后过筛装袋待测。

表 1 样地基本信息

项 目	地理位置	土壤质地	植被组成	淹水频率/(h·d <sup>-1</sup> )
低潮位(KT)	20°55′7.61″N, 110°10′26.8″E	壤质砂土	光 滩	>15
中低潮位(KD)	20°55′7.60″N, 110°10′09.7″E	壤质砂土	光 滩	13~15
中潮位(DD)	20°55′7.27″N, 110°09′9.63″E	壤 土	无瓣海桑+白骨壤(4:6)	11~13
中高潮位(ZZ)	20°55′7.23″N, 110°09′9.20″E	粉砂质黏壤土	无瓣海桑+白骨壤(8:2)	8~11
高潮位(ZG)	20°55′7.14″N, 110°09′8.45″E	粉砂质黏壤土	无瓣海桑	<8

1.3 样品测定

微生物生物量碳、氮(MBC, MBN)采用氯仿熏蒸—浸提法<sup>[23]</sup>,0.5 mol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸提,总有机碳自动分析仪测定。以熏蒸和未熏蒸土样提取的有机碳和全氮差值( $E_C, E_N$ )除以转换系数  $K_C$  (0.45)、 $K_N$  (0.54)分别作为 MBC 和 MBN 含量。土壤微生物生物量磷(MBP)采用氯仿熏蒸—浸提法<sup>[24]</sup>,0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 溶液浸提,紫外分光光度计测定,除熏蒸和未熏蒸处理外,另设置一组处理测定外加正磷酸盐态无机磷( $P_i$ )的回收率,用以校正土壤对熏蒸处理所释放出来的微生物生物量磷的吸附和固定。以熏蒸和未熏蒸土样提取的磷差值( $E_P$ )除以转换系数  $K_P$  (0.40)和  $P_i$  作为 MBP 含量。计算公式为:

$$MBC = E_C / K_C \tag{1}$$

$$MBN = E_N / K_N \tag{2}$$

$$MBP = E_P / (K_P \cdot P_i) \tag{3}$$

微生物熵碳( $q_{MBC}$ )、微生物熵氮( $q_{MBN}$ )、微生物熵磷( $q_{MBP}$ )分别以土壤微生物生物量碳、氮、磷占土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)的百分比表示。计算公式为:

$$q_{MBC} = (MBC / SOC) \times 100\% \tag{4}$$

$$q_{MBN} = (MBN / TN) \times 100\% \tag{5}$$

$$q_{MBP} = (MBP / TP) \times 100\% \tag{6}$$

土壤 β-葡萄糖苷酶活性采用 pNPG 法,酶活性以单位土壤质量消耗的 0.1 mol/L Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的量(L/kg)表示。土壤脲酶活性采用碱皿扩散法,酶活性以单位土壤在 37 ℃培养 24 h 释放出 NH<sub>3</sub>-N 的量(mg/kg)表示。土壤酸性磷酸酶活性采用 4-氨基—安替比林比色法测定,酶活性以单位土壤在 37 ℃培养 12 h 后生成酚的量(mg/kg)表示<sup>[25]</sup>。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 对试验数据进行统计处理,运用 SPSS 21.0 进行数据分析,对所有数据进

行正态性和方差齐性检验。符合正态分布、方差齐次,则对不同潮位梯度的差异进行单因素方差(one-way ANOVA)分析,使用 Tukey 检验,反之则使用韦尔奇方差(Welch’s ANOVA)分析,使用 Games-Howell 检验, $p < 0.05$  表示差异显著。使用 Pearson 相关分析,研究土壤微生物生物量与酶活性间的相关关系,\* 表示显著相关( $p < 0.05$ , 双尾),\*\* 表示极显著相关( $p < 0.01$ , 双尾)。使用 R 中 Rdacca.hp 包<sup>[26]</sup>进行冗余分析(RDA),Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 淹水梯度对土壤微生物生物量的影响

红树林表层土壤微生物生物量碳、氮(MBC, MBN)含量变化趋势相似(见表 2),变化范围分别介于 3.39~100.52 mg/kg,0.41~25.02 mg/kg,随淹水梯度的增加而减少( $p < 0.001$ ),高潮位土壤 MBC, MBN 最高,表现为:高潮位>中高潮位>中潮位>中低潮位>低潮位,低潮位、中低潮位、中潮位、中高潮位土壤 MBC 较高潮位分别降低 96.7%,93.9%,74.8%,36.0%,MBN 较高潮位分别降低 98.4%,93.8%,89.1%,15.6%。土壤微生物生物量磷(MBP)在不同淹水梯度间差异显著( $p < 0.001$ ),变化范围为 1.62~41.89 mg/kg,中高潮位土壤 MBP 显著高于其他潮位( $p < 0.001$ ),其中高潮位和低潮位、中低潮位、中潮位之间差异显著( $p < 0.001$ ),低潮位和中低潮位、中潮位之间差异显著( $p < 0.01$ )。

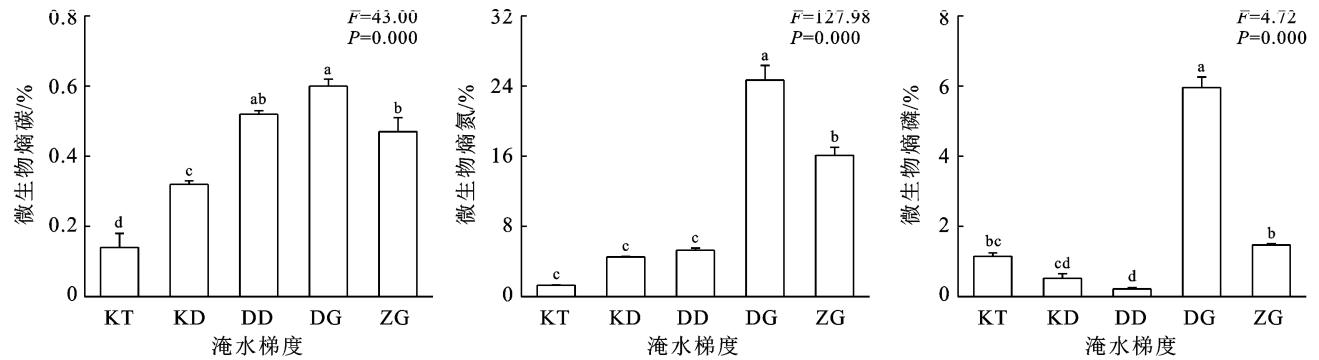
淹水梯度显著影响红树林表层土壤微生物熵碳( $q_{MBC}$ )、微生物熵氮( $q_{MBN}$ )、微生物熵磷( $q_{MBP}$ )( $p < 0.001$ )(图 1),变化范围分别介于 0.14%~0.60%,1.29%~24.69%和 0.22%~5.96%。 $q_{MBC}$  和  $q_{MBN}$  变化趋势相同,随淹水频率的减少表现为先增后降的趋势,中高潮位为最大值,低潮位、中低潮位、中潮位、高潮位  $q_{MBC}$  较中高潮位分别降低 76.3%,47.3%,13.7%,

21.6%,  $q_{MBN}$  较中高潮位分别显著降低 94.8%, 81.7%, 78.6%, 34.8% ( $p < 0.001$ )。  $q_{MBP}$  随淹水频率的减少呈先降后升再降的变化趋势, 中高潮位显著高于其他潮位 ( $p < 0.05$ ), 低潮位、中低潮位、中潮位、高潮位  $q_{MBP}$  比中高潮位分别降低 80.7%, 91.3%, 96.4%, 75.3%。

表 2 不同淹水梯度土壤微生物生物量变化特征

指 标	潮 位					方差分析	
	KT	KD	DD	ZZ	ZG	F	p
微生物量碳/(mg · kg <sup>-1</sup> )	3.29±1.02 <sup>c</sup>	6.14±0.29 <sup>c</sup>	25.28±2.20 <sup>c</sup>	64.38±2.63 <sup>b</sup>	100.52±11.12 <sup>a</sup>	63.85	0.000
微生物量氮/(mg · kg <sup>-1</sup> )	0.41±0.06 <sup>b</sup>	1.56±0.06 <sup>b</sup>	2.73±0.49 <sup>b</sup>	21.12±0.76 <sup>a</sup>	25.02±2.25 <sup>a</sup>	120.11	0.000
微生物量磷/(mg · kg <sup>-1</sup> )	6.62±0.24 <sup>c</sup>	3.74±0.41 <sup>d</sup>	1.62±0.30 <sup>d</sup>	41.89±0.58 <sup>a</sup>	18.64±0.64 <sup>b</sup>	1 300.73	0.000

注:同行不同小写字母表示各潮位间差异显著( $p < 0.05$ )。



注:不同小写字母表示各潮位间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图 1 不同淹水梯度土壤微生物熵变化特征

2.2 淹水梯度对红树林土壤酶活性的影响

淹水梯度显著影响红树林表层土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶、脲酶、酸性磷酸酶活性 ( $p < 0.01$ ) (图 2), 其变化范围分别介于 19.9~145.0 L/kg, 156.5~196.0 mg/kg, 10.1~173.0 mg/kg。

土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶活性随淹水频率的减少呈先增后降的趋势, 表现为: 中高潮位 > 高潮位 > 中潮位 > 中低潮位 > 低潮位, 低潮位、中低潮位、中潮位、高潮位  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性较中高潮位分别显

著降低 86.3%, 72.7%, 69.4%, 64.3% ( $p < 0.001$ ), 低潮位、中低潮位、中潮位酸性磷酸酶活性较中高潮位分别显著降低 94.2%, 92.7%, 75.5% ( $p < 0.001$ ), 高潮位与中高潮位无显著差异。土壤脲酶活性随淹水频率的减少呈增加趋势, 表现为: 高潮位 > 中高潮位 > 中潮位 > 中低潮位 > 低潮位, 低潮位、中低潮位、中潮位脲酶活性较高潮位分别显著降低 20.2%, 16.6%, 11.5% ( $p < 0.05$ ), 高潮位与中高潮位无显著差异。

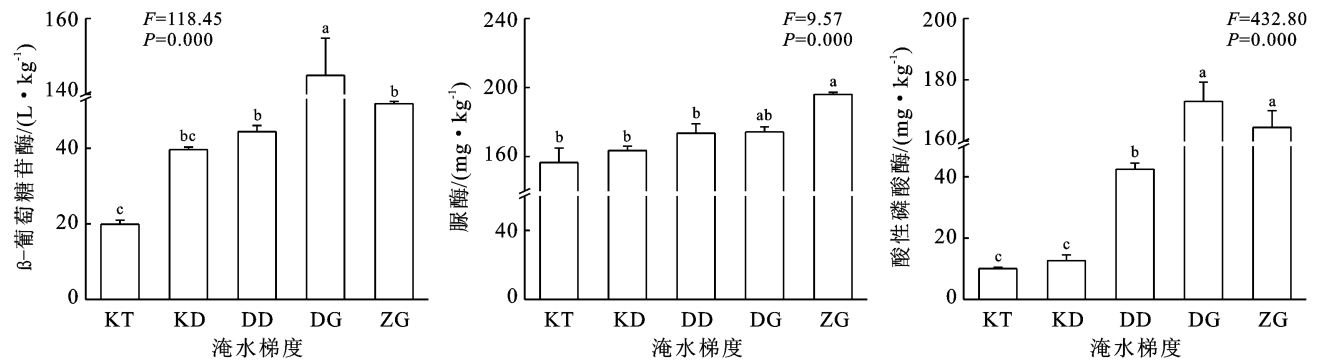


图 2 不同淹水梯度土壤酶活性变化特征

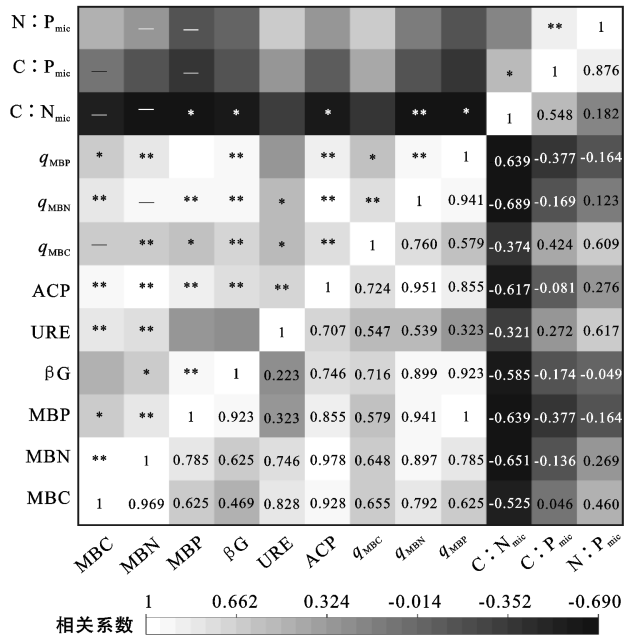
2.3 土壤微生物生物量与酶活性关系

不同淹水梯度下红树林表层土壤微生物生物量与酶活性相关关系存在差异 (图 3)。土壤 MBC, MBN, MBP 两两之间显著或极显著正相关 ( $p < 0.05$ ),

酸性磷酸酶活性与  $\beta$ -葡萄糖苷酶、脲酶活性极显著正相关 ( $p < 0.01$ )。土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性与 MBN 显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 与 MBP,  $q_{MBC}$ ,  $q_{MBN}$ ,  $q_{MBP}$  均极显著正相关 ( $p < 0.01$ ); 脲酶活性与 MBC, MBN 极显著正



相关( $p<0.01$ ),与  $q_{MBC}$ ,  $q_{MBN}$  显著正相关( $p<0.05$ );酸性磷酸酶活性与 MBC, MBN, MBP,  $q_{MBC}$ ,  $q_{MBN}$ ,  $q_{MBP}$  极显著正相关( $p<0.01$ )。



注: MBC 为微生物量碳; MBN 为微生物量氮; MBP 为微生物量磷;  $\beta G$  为  $\beta$ -葡萄糖苷酶; URE 为脲酶; ACP 为酸性磷酸酶;  $q_{MBC}$  为微生物熵碳;  $q_{MBN}$  为微生物熵氮;  $q_{MBP}$  为微生物熵磷; C:N<sub>mic</sub> 为微生物量碳氮比; C:P<sub>mic</sub> 为微生物量碳磷比; N:P<sub>mic</sub> 为微生物量氮磷比,“—”表示存在自相关关系。下同。

图 3 土壤微生物生物量与酶活性的相关性特征

2.4 土壤酶活性特征的冗余分析

以土壤酶活性为响应变量,土壤微生物生物量为解释变量进行冗余分析(图 4)。

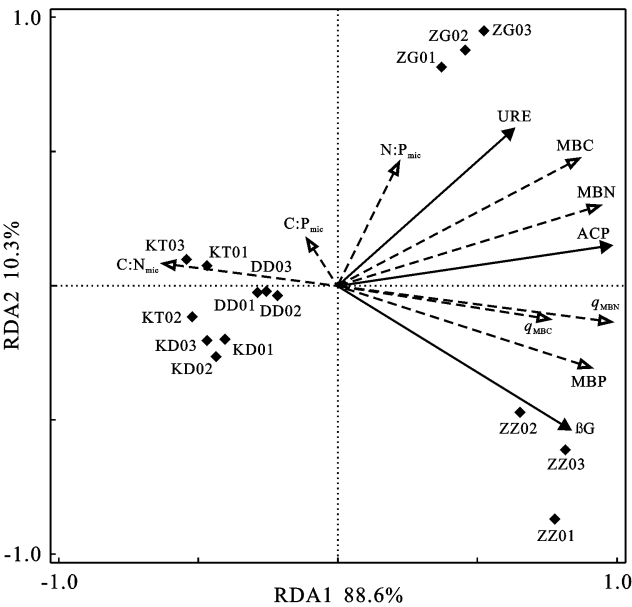


图 4 土壤微生物生物量和酶活性的冗余分析

排序第一轴、第二轴分别解释了酶活性变异的 88.6% 和 10.3%。其中  $q_{MBN}$ , MBN, MBC 可解释土壤酶活性变异的 18.0%, 17.7% 和 15.2%, 是研究区红树林表层土壤酶活性变异的关键环境因素。土壤微生物生物量、微生物熵、N:P<sub>mic</sub> 与  $\beta$ -葡萄糖苷酶、脲酶、酸性磷酸酶活性呈正相关, C:N<sub>mic</sub>, C:P<sub>mic</sub> 与  $\beta$ -葡萄糖苷酶、脲酶、酸性磷酸酶活性呈负相关。

3 讨论

3.1 淹水梯度对红树林土壤微生物生物量和微生物熵的影响

淹水频率的变化是影响河口潮汐湿地生态系统的关键因子之一<sup>[27]</sup>。研究<sup>[28]</sup>表明,江苏大丰滨海湿地土壤(0—10 cm)由陆向海 MBC 减少 94.2%; 九龙江河口潮滩湿地土壤 MBC 随淹水频率增加而减少 80.2%<sup>[29]</sup>; 洞庭湖湿地土壤 MBN 在丰水期最低<sup>[30]</sup>; 崇明东滩湿地淹水处理显著降低土壤 MBN 含量<sup>[31]</sup>。本研究中, MBC, MBN 随淹水频率增加而分别减少了 96.7% 和 98.4%, 中高、高潮位 MBP 显著高于其他潮位, 与上述研究结果具有相似性。究其原因, 研究区红树林植被由陆向海为无瓣海桑林、无瓣海桑和白骨壤混交林、光滩, 而无瓣海桑较白骨壤、桐花树等红树植物可以在地上、地下积累更多的生物量<sup>[32-33]</sup>, 表明研究区植被生物量由陆向海有所减少, 致使随淹水频率增加而土壤微生物可利用养料减少。其次, 土壤养分含量是影响土壤微生物生物量的重要因素<sup>[34]</sup>, 营养元素如有效磷的缺失, 可以限制微生物生物量积累和微生物活动<sup>[35]</sup>。研究<sup>[36]</sup>表明, 随潮滩高程增加红树林土壤碳、氮、磷养分均呈增加的规律, 且长时间潮水浸淹使低潮位土壤多处于低氧水平, 抑制土壤微生物活动<sup>[37]</sup>, 从而使高潮位微生物生物量显著高于低潮位。

土壤微生物熵主要受土壤有机质数量和质量的影响, 可反映土壤有机质向微生物生物量的转化效率、养分元素的损失和矿物对有机质的固定, 其值越高, 土壤碳、氮、磷积累强度越大<sup>[4, 38]</sup>。淹水梯度显著影响研究区红树林表层土壤微生物熵, 随淹水频率减少  $q_{MBC}$  和  $q_{MBN}$  先增后降, 而  $q_{MBP}$  先降后升再降。表明随淹水梯度变化, 不同潮位土壤微生物碳、氮、磷固定能力存在差异, 可归因于淹水频率增加植被生物量减少, 土壤有机质数量和质量下降, 使土壤微生物种类和数量存在差异, 且土壤氮、磷的积累和消耗程度取决于土壤有机质的积累和分解, 从而影响土壤微生物熵<sup>[39-40]</sup>。研究<sup>[41]</sup>表明, 鄱阳湖湿地秋季长时间淹水条件降低土壤  $q_{MBC}$ ,  $q_{MBN}$ ; 长期淹水沼泽湿地  $q_{MBC}$

显著低于季节性和短暂积水湿地<sup>[42]</sup>。本研究中,高潮位  $q_{MBC}$ ,  $q_{MBN}$  显著高于低潮位,  $q_{MBP}$  高于低潮位,与上述研究结果研究具有相似性,表明随淹水频率减少土壤有机碳积累效率和供氮潜能提高,为碳积累状态。

### 3.2 淹水梯度对红树林土壤酶活性的影响

土壤酶在陆地生态系统主要物质(碳、氮、磷)循环过程中起关键作用,其活性受植被特征、土壤水分等生物和非生物因素的影响<sup>[43]</sup>。研究<sup>[41]</sup>表明,鄱阳湖湿地秋季淹水环境下土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶、磷酸酶活性最低;毛茛草湿地淹水后,土壤脲酶、酸性磷酸酶活性显著低于干旱和干湿交替处理的酶活性<sup>[43]</sup>;红河自然保护区内长期淹水的湿地纤维素酶、转化酶、过氧化氢酶活性低于未淹水湿地<sup>[44]</sup>。本研究中, $\beta$ -葡萄糖苷酶、脲酶、酸性磷酸酶活性随淹水频率增加而减少 61.6%, 20.2% 和 93.9%, 与上述研究结果具有相似性。淹水梯度的变化使土壤水分条件存在差异,土壤干旱可以增加凋落物产量和(或)土壤有机质,并刺激土壤酶活性,而土壤淹水可通过改变微生物群落和增加  $Fe^{2+}$  等抑制剂的浓度来显著抑制土壤酶活性,因此低潮位土壤酶活性最低<sup>[45-46]</sup>。但土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶活性最大值在中高潮位,其在中高潮位活性较中高潮位降低 64.3% 和 4.9%。这可能是由于土壤水分过多和过低均不利于土壤微生物生长和繁衍,减少了土壤酶来源,使土壤酶活性降低<sup>[43]</sup>。此外,A'Bear 等<sup>[47]</sup>研究表明,温带林地土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶活性随土壤湿度提高而提高,与本研究结果不同,这可能是不同类型和地域土壤理化性状存在较大差异而造成的<sup>[48]</sup>。

### 3.3 土壤微生物生物量对土壤酶活性的影响

土壤酶是催化土壤众多生化反应的主要载体,其活性受土壤水分和温度、微生物生物量、养分有效性、植被组成等因素的影响<sup>[9,49]</sup>。研究<sup>[4,14]</sup>表明,土壤微生物的种类和数量可在一定程度上决定土壤酶的来源及活性,影响土壤微生物活性的因素亦影响土壤酶活性,土壤微生物生物量与酶活性相辅相成,密不可分。本研究中,土壤 MBC, MBN, MBP 与土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶、脲酶、酸性磷酸酶活性呈显著或极显著正相关,与已有研究结果具有一致性<sup>[4,50]</sup>。冗余分析表明,  $q_{MBN}$ , MBN, MBC 是影响研究区红树林土壤酶活性的关键环境因素。红树林土壤通常缺乏养分,氮、磷或铁常被报道限制红树林生长<sup>[51-52]</sup>。研究表明,在养分不足的土壤环境下, MBC 等养分因素是决定酶活性强弱的主导因素<sup>[53]</sup>,且课题组前期研究表明,研究区土壤受氮限制, MBN 作为土壤有机氮的组

成部分,可对土壤有机氮进行补充,这可在一定程度上解释  $q_{MBN}$ , MBN, MBC 是影响研究区红树林土壤酶活性的关键环境因素。

## 4 结论

(1) 淹水梯度显著影响湛江红树林湿地表层土壤微生物生物量和酶活性。土壤微生物生物量碳、氮、磷总体上随淹水频率增加而减少,低潮位土壤微生物生物量碳、氮为最小值,中高潮位土壤微生物碳、氮、磷为最大值。

(2) 土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶活性随淹水频率增加而先增后减,脲酶活性随淹水频率增加而减少,低潮位酶活性均为最小值。可主要归因于随淹水频率的增加致使植被生物量的减少、土壤养分与有机质数量和质量下降及缺氧状态的增多影响土壤微生物生物量和酶活性。

(3) 土壤微生物生物量和酶活性呈显著或极显著正相关,  $q_{MBN}$ , MBN, MBC 是影响研究区红树林土壤酶活性的关键环境因素。增加研究区湿地土壤氮养分供给可能会改善土壤质量,促进红树植物造林及生长。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Wang Lide, Wu Chunrong, Song Dacheng, et al. Affecting factors of soil microorganisms and their research prospects [J]. *Frontiers in Environmental Microbiology*, 2021, 7(3): 74-79.
- [2] Li Fu, Zang Shuying, Liu Yingnan, et al. Effect of freezing-thawing cycle on soil active organic carbon fractions and enzyme activities in the wetland of Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Wetlands*, 2020, 40: 167-177.
- [3] Chambers L G, Guevara R, Boyer J N, et al. Effects of salinity and inundation on microbial community structure and function in a mangrove peat soil [J]. *Wetlands*, 2016, 36(2): 361-371.
- [4] 张雅茜,方晰,洗应男,等.亚热带区4种林地土壤微生物生物量碳氮磷及酶活性特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5326-5338.
- [5] Falkowski P G, Fenchel T, Delong E F. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles [J]. *Science*, 2008, 320: 1034-1039.
- [6] 罗明霞,胡宗达,刘兴良,等.川西亚高山不同林龄粗枝云杉人工林土壤微生物生物量及酶活性[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5632-5642.
- [7] Zhou Xuan, Sun Hui, Pumpanen J, et al. The impact of wildfire on microbial C : N : P stoichiometry and the fungal-to-bacterial ratio in permafrost soil [J]. *Biogeochemistry*, 2019, 142(1): 1-17.

- [8] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: Is there a “redfield ratio” for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85: 235-252.
- [9] 赵盼盼, 周嘉聪, 林开森, 等. 不同海拔对福建戴云山黄山松林土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2676-2686.
- [10] 马伟伟, 王丽霞, 李娜, 等. 不同水氮水平对川西亚高山林地土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7218-7228.
- [11] 许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 等. 施用生物炭 6 年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1110-1118.
- [12] Alvarez S, Guerrero M C. Enzymatic activities associated with decomposition of particulate organic matter in two shallow ponds [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1941-1951.
- [13] 周礼恺, 张志明, 陈恩凤. 黑土的酶活性[J]. *土壤学报*, 1981(2): 158-166.
- [14] Vallejo V E, Roldan F, Dick R P. Soil enzymatic activities and microbial biomass in an integrated agroforestry chronosequence compared to monoculture and a native forest of Colombia [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46: 577-587.
- [15] Feng Jianxiang, Cui Xiaowei, Zhou Jian, et al. Effects of exotic and native mangrove forests plantation on soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus contents and pools in Leizhou, China [J]. *Catena*, 2019, 180: 1-7.
- [16] 傅海峰, 陶伊佳, 王文卿. 海平面上升对中国红树林影响的几个问题[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2842-2848.
- [17] Bockelmann A C, Bakker J P, Neuhaus R, et al. The relation between vegetation zonation, elevation and inundation frequency in a Wadden Sea salt marsh [J]. *Aquatic Botany*, 2002, 73: 211-221.
- [18] Yu Shen, Ehrenfeld J G. Relationships among plants, soils and microbial communities along a hydrological gradient in the New Jersey Pinelands, USA [J]. *Annals of Botany*, 2010, 105(1): 185-196.
- [19] Wang Lixia, Yan Baixing, Prasher S O, et al. The response of microbial composition and enzyme activities to hydrological gradients in a riparian wetland [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19: 4031-4041.
- [20] Morris J T, Sundareshwar P V, Nietch C T, et al. Responses of coastal wetlands to rising sea level [J]. *Ecology*, 2002, 83(10): 2869-2877.
- [21] Ishtiaq K S, Abdul-Aziz O I. Ecological parameter reductions, environmental regimes, and characteristic process diagram of carbon dioxide fluxes in coastal salt marshes [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-12.
- [22] Neubauer S C. Ecosystem responses of a tidal freshwater marsh experiencing saltwater intrusion and altered hydrology [J]. *Estuaries and Coasts*, 2013, 36(3): 491-507.
- [23] 全国土壤质量标准化技术委员会. GB/T 39228-2020 土壤微生物生物量的测定熏蒸提取法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [24] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [25] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [26] Lai Jiangshan, Zou Yi, Zhang Jinlong, et al. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca, hp R package [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13(4): 782-788.
- [27] 孙秀茹, 童帮会, 闫如玉, 等. 崇明东滩湿地土壤生物固氮沿滩水淹梯度的特征[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(6): 2304-2313.
- [28] Li Niu, Shao Tianyun, Zhu Tingshuo, et al. Vegetation succession influences soil carbon sequestration in coastal alkali-saline soils in Southeast China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-12.
- [29] 黄小清, 全川, 罗敏, 等. 九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 2226-2236.
- [30] 肖烨, 黄志刚, 肖茵曦, 等. 不同水位时期东洞庭湖湿地土壤微生物生物量碳氮和酶活性变化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2958-2966.
- [31] 解丽娜, 李亚雷, 李诗华, 等. 本土和外来湿地植物土壤微生物生物量对水、盐胁迫的响应[J]. *生态科学*, 2020, 39(6): 181-190.
- [32] Ren Hai, Chen Hua, Li Zhian, et al. Biomass accumulation and carbon storage of four different aged *Sonneratia apetala* plantations in Southern China [J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 279-291.
- [33] 缪绅裕, 陈桂珠, 陈正桃, 等. 广东湛江保护区红树林种群的生物量及其分布格局[J]. *广西植物*, 1998(1): 20-24.
- [34] 万晓华, 黄志群, 何宗明, 等. 改变碳输入对亚热带人工林土壤微生物生物量和群落组成的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3582-3590.
- [35] Cleveland C C, Townsend A R, Schmidt S K. Phosphorus limitation of microbial processes in moist tropical forests: evidence from short-term laboratory incubations and field studies [J]. *Ecosystems*, 2002, 5: 680-691.
- [36] 陈瑶瑶, 张雅松, 姜铎, 等. 广东英罗湾不同潮位红树林—滩涂系统碳密度差异[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(6): 1134-1140.
- [37] Drenovsky R E, Vo D, Graham K J, et al. Soil water content and organic carbon availability are major determinants of soil microbial community composition [J].

- Microbial Ecology, 2004, 48(3):424-430.
- [38] 吴秀芝, 刘秉儒, 阎欣, 等. 荒漠草地土壤微生物生物量和微生物熵对沙漠化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8):2691-2698.
- [39] 胡宗达, 刘世荣, 刘兴良, 等. 川西亚高山天然次生林不同演替阶段土壤—微生物生物量及其化学计量特征[J]. 生态学报, 2021, 41(12):4900-4912.
- [40] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Phosphorus in the soil microbial biomass [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1984, 16(2):169-175.
- [41] 邹锋, 武鑫鹏, 张万港, 等. 鄱阳湖典型湿地土壤微生物活性对季节性水位变化的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(11):3838-3847.
- [42] 胡洋, 丛孟非, 陈末, 等. 氮添加对巴音布鲁克高寒湿地土壤微生物量和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(13):5328-5339.
- [43] 万忠梅, 宋长春, 郭跃东, 等. 毛苔草湿地土壤酶活性及活性有机碳组分对水分梯度的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(12):5980-5986.
- [44] Xiao Ye, Huang Zhigang, Lu Xianguo. Changes of soil labile organic carbon fractions and their relation to soil microbial characteristics in four typical wetlands of Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Ecological Engineering, 2015, 82:381-389.
- [45] Dodor D E, Tabatabai M A. Effect of cropping systems on phosphatases in soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2003, 166:7-13.
- [46] Wang Xiaochang, Lu Qin. Effect of waterlogged and aerobic incubation on enzyme activities in paddy soil [J]. Pedosphere, 2006, 16(4):532-539.
- [47] A'Bear A D, Jones T H, Kandeler E, et al. Interactive effects of temperature and soil moisture on fungal-mediated wood decomposition and extracellular enzyme activity [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 70:151-158.
- [48] 鄢紫薇, 高璟赟, 张秀玲, 等. 不同水分处理对华中地区稻田土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1):91-98.
- [49] Erica D O S, Erika V D M, Gustavo P D, et al. Seasonal effect of land use type on soil absolute and specific enzyme activities in a Brazilian semi-arid region [J]. Catena, 2019, 172:397-407.
- [50] Groffman P M, McDowell W H, Myer J C, et al. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(10):1339-1348.
- [51] Lee R Y, Porubsky W P, Feller I C, et al. Porewater biogeochemistry and soil metabolism in dwarf red mangrove habitats (Twin Cays, Belize) [J]. Biogeochemistry, 2008, 87(2):181-198.
- [52] Almahasheer H, Duarte C M, Irigoien X. Nutrient limitation in central Red Sea mangroves [J]. Frontiers in Marine Science, 2016, 3:271-285.
- [53] Gao Jintao, Wang Enxi, Ren Weiling, et al. Effects of simulated climate change on soil microbial biomass and enzyme activities in young Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4):272-278.

(上接第 60 页)

- [33] 卫智军, 李青丰, 贾鲜艳, 等. 矿业废弃地的植被恢复与重建[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4):172-175.
- [34] Ahirwal, Jitendra, Maiti, et al. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal(*Shorea robusta*) forest, India [J]. Catena: An Interdisciplinary Journal of Soil Science Hydrology-Geomorphology Focusing on Geoecology and Landscape Evolution, 2016, 140:155-163.
- [35] 姚敏娟, 张树礼, 李青丰, 等. 黑岱沟露天矿排土场不同植被配置土壤水分研究: 土壤水分垂直动态研究[J]. 环境与发展, 2011, 23(1):29-32.
- [36] 张燕乐, 甄庆, 张兴昌, 等. 露天煤矿排土场不同植被土壤水分特征及其时间稳定性[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3):212-218.
- [37] 刘艳萍, 梁占岐, 荣浩, 等. 基于植被恢复边坡稳定性的适宜节水灌溉技术研究[J]. 草原与草坪, 2019, 39(6):94-99.
- [38] Geerts S, Raes D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(9):1275-1284.
- [39] 万文亮, 郭鹏飞, 胡语妍, 等. 调亏灌溉对新疆滴灌春小麦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6):166-174.
- [40] 孟维伟, 张微, 张永丽, 等. 灌水对不同小麦品种耗水特性和土壤硝态氮运移的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(6):1123-1129.
- [41] 党志强, 赵桂琴, 龙瑞军. 河西地区紫花苜蓿的耗水量与耗水规律初探[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3):67-71.
- [42] Ali S, Xu Y Y, Ma X C, et al. Deficit irrigation strategies to improve winter wheat productivity and regulating root growth under different planting patterns [J]. Agricultural Water Management, 2019, 219(6):1-11.