

东寨港红树林湿地土壤因子与酶活性的关系

陈小花^{1,2,3}, 陈宗铸^{1,2,3}, 雷金睿^{1,2,3}, 吴庭天^{1,2,3}, 李苑菱^{1,2,3}

〔1.海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院), 海南 海口 571100; 2.海南省热带林业资源监测与应用重点实验室(筹), 海南 海口 571100; 3.海口市湿地保护工程技术研究开发中心, 海南 海口 571100〕

摘要: [目的] 红树林是热带、亚热带典型的海岸带湿地生态系统。分析不同植物群落条件下红树林湿地的土壤活性有机碳组成、土壤酶活性现状以及两者间的相互作用, 进而预测东寨港红树林片区的生态结构和功能发展趋势, 为东寨港红树林湿地的生态恢复与保护提供科学依据。[方法] 通过实地采样, 对9种红树植物群落类型〔红海榄(Type 1)、白骨壤(Type 2)、角果木(Type 3)、海莲+角果木(Type 4)、桐花树+海莲+秋茄(Type 5)、海莲+榄李+桐花树(Type 6)、秋茄+海莲+榄李(Type 7)、海莲+无瓣海桑+桐花树+秋茄(Type 8)、海莲+无瓣海桑(Type 9)〕的土壤酶活性、土壤活性有机碳组分含量和理化性质进行化验分析。[结果] ①该区表层土壤有机碳介于6.57~74.87 g/kg之间, 在不同群落类型间以Type 7群落显著最高, Type 1群落低至6.57 g/kg。②各群落类型湿地表层土壤酶活性变化规律为: 脲酶>磷酸酶>过氧化氢酶>蔗糖酶, 其中脲酶以Type 8群落最高, 显著高于Type 1—6群落; 磷酸酶以Type 8群落最高, 显著高于Type 1—3群落; 过氧化氢酶以Type 5最高, 显著高于其余群落(Type 6和Type 7除外); 蔗糖酶以Type 9群落最高, 显著高于Type 2, Type 5和Type 8群落。③土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶与土壤活性有机碳各组分含量呈显著及极显著正相关; 土壤脲酶、磷酸酶与土壤pH值呈极显著负相关, 与全氮、全磷呈极显著正相关; 土壤过氧化氢酶与全氮、全磷呈极显著正相关; 土壤蔗糖酶与全氮、全磷呈显著正相关。④冗余分析结果显示: 土壤轻组有机碳、土壤总有机碳、土壤颗粒有机碳和土壤微生物生物量碳是影响东寨港红树林植物群落土壤酶活性的主要因子。[结论] 土壤酶活性与多种土壤活性有机碳组分呈紧密正相关, 因此可用土壤酶活来表征东寨港红树林湿地土壤碳库活跃程度。

关键词: 红树林湿地; 土壤活性有机碳; 土壤酶活性; 东寨港

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0079-08

中图分类号: S714.2

文献参数: 陈小花, 陈宗铸, 雷金睿, 等. 东寨港红树林湿地土壤因子与酶活性的关系[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 79-86. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.010; Chen Xiaohua, Chen Zongzhu, Lei Jinrui, et al. Relationship between soil factors and enzyme activities in mangrove wetland of Dongzhai Port [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 79-86.

Relationship Between Soil Factors and Enzyme Activities in Mangrove Wetland of Dongzhai Port

Chen Xiaohua^{2,3}, Chen Zongzhu^{1,2,3}, Lei Jinrui^{1,2,3}, Wu Tingtian^{1,2,3}, Li Yuanling^{1,2,3}

〔1. Hainan Academy of Forestry (Hainan Academy of Mangrove), Haikou, Hainan 571100, China;

2. Hainan Key Laboratory of Monitoring and Application of Tropical Forestry Resources (Plan), Haikou, Hainan 571100, China; 3. Haikou Wetland Protection Engineering Technology Research and Development Center, Haikou, Hainan 571100, China〕

Abstract: [Objective] Mangroves are part of a wetland ecosystem found along tropical and sub-tropical coastlines. The soil active organic carbon composition, soil enzyme activity, and the interaction between them, under different plant community conditions was analyzed in order to predict the ecological structure and functional development trend of the mangrove area in Dongzhai Port, and provide a scientific basis for ecological restoration and protection of the mangrove wetland in Dongzhai Port. [Methods] Soil enzyme activity, active organic carbon content in the soil, and physicochemical properties of nine mangrove communities

收稿日期: 2022-08-03

修回日期: 2023-06-05

资助项目: 海南省林业科学研究院项目“海南省红树林研究院基础性科研工作”(SQKY2022-0003)

第一作者: 陈小花(1989—), 女(汉族), 海南省屯昌县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事热带森林生态和林业碳汇等研究。Email: 965819833@qq.com。

通信作者: 陈宗铸(1977—), 男(汉族), 海南省海口市人, 硕士, 研究员, 主要从事林业信息研究。Email: 30160280@qq.com。

[*Rhizophora stylosa* (Type 1), *Avicennia marina* (Type 2), *Ceriops tagal* (Type 3), *Bruguiera sexangula* + *C. tagal* (Type 4), *Aegiceras corniculatum* + *B. sexangula* + *Kandelia obovata* (Type 5), *B. sexangula* + *Lumnitzera racemosa* + *A. corniculatum* (Type 6), *K. obovata* + *B. sexangula* + *L. racemosa* (Type 7), *B. sexangula* + *Sonneratia apetala* + *A. corniculatum* + *K. obovata* (Type 8), *B. sexangula* + *S. apetala* (Type 9)] were analyzed by field sampling. [Results] Soil organic carbon ranged from 6.57 g/kg to 74.87 g/kg in Dongzhai Port, with Type 7 and Type 1 communities having the highest and lowest soil organic carbon contents, respectively. Enzyme activity of wetland soil in each mangrove community followed the order of urease > phosphatase > catalase > sucrase. Type 8 community had the highest urease activity, significantly higher than Type 1 to Type 6 communities. Moreover, Type 8 community also reported the highest phosphatase activity, which was significantly higher than phosphatase activity for Type 1 to Type 3 communities. On the other hand, catalase activity was highest in Type 5 community, and significantly higher than in the other communities, except Type 6 and Type 7. Type 9 community recorded the highest sucrase activity, which was significantly higher than Type 2, Type 5, and Type 8 communities. Furthermore, it was found that urease, phosphatase, and catalase activities had significant positive correlations with soil organic carbon content. Urease and phosphatase activities were significantly negatively correlated with soil pH value, and significantly positively correlated with total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). Catalase and sucrase activities also had significant positive correlations with TN and TP. The redundancy analysis results indicated that light fraction carbon, total organic carbon, particulate organic carbon, and microbial biomass carbon (MBC) were the main factors affecting soil enzyme activity of mangrove communities in Dongzhai Port. [Conclusion] There was a strong positive correlation between soil enzyme activity and the carbon content of active organic matter. Therefore, soil enzyme activity can be used to characterize the soil carbon pool activity in the mangrove area of Dongzhai Port.

Keywords: mangrove wetland; soil microbial biomass; soil enzyme activities; Dongzhai Port

红树林是一个以发生在气候和亚热带地区的最大潮汐线为界的生态系统,生长在这种环境中,微生物及其酶参与了一系列的转化和营养循环^[1]。红树林生态系统具有强烈的碳处理和承受不利环境条件(例如盐度、温度、潮汐变化、高有机物含量和缺氧条件)的能力,其所处地区微生物群落的功能和结构多样性很大程度上受环境变量的影响,且每个红树林栖息地都有独特的微生物功能群落^[2],不同的微生物群落的储存库对环境特征的反应不同。因此,了解红树林生态系统酶活性与相关的控制环境因素是很重要的^[3]。

作为典型的海岸带蓝碳,红树林具有强大的碳储存能力。当前,学者们对蓝碳的关注日益增多,并开展了很多相关研究,其中对红树林的研究主要集中在红树林生态系统结构与碳储量^[4]、生长适应性^[5]、恢复条件下酶活性特征^[6-7]、沉积物活性炭组分^[8]与土壤微生物等^[9]方面。红树林作为高生产力的生态系统,可以捕获潮汐输入的有机物并积累不成比例的大量碳^[10],同时红树林因其特殊的生境位置使得土壤有机质具有极低的分解速率^[11]。目前,关于土壤有机质的分解机制可以从土壤微生物和酶活性角度去解析。例如,在酶活性方面,有研究指出红树林土壤有机质含量与大多数酶(β -葡萄糖苷酶、蔗糖酶、淀粉酶、纤二糖酶)活性呈显著正相关^[12-13];同时也与某些

酶(真菌丰度、酚氧化)活性呈显著负相关^[14]。综上所述,土壤酶对红树林湿地土壤有机碳的循环过程起到关键作用。

东寨港国家级自然保护区作为中国红树林分布面积最大,森林生态系统结构最完整和生物多样性最丰富的典型湿地生态系统,在维持区域碳汇功能和生态环境可持续发展方面发挥重要作用。分析发现,目前对东寨港红树林湿地的研究主要集中在群落结构与数量变化^[15-16]、景观格局^[17]、沉积物成分特征^[18-20]、土壤有机碳组分含量^[21]、土壤微生物群落等^[22-23]方面。从碳汇角度出发,以往研究得出东寨港红树林具有净碳汇生态系统的结论,表现为不同森林群落类型间、同一区域不同位置以及不同空间分布上土壤活性有机碳组分含量差异较为明显^[24-26],研究结果为掌握东寨港红树林湿地土壤有机碳的现状和分布特征提供了数据支持。从土壤酶活性角度出发,以往研究得出清澜港红树林土壤酶活性可用于表征土壤质量状况的结论,表现为不同群落类型的土壤酶活性存在差异^[27]。由此看出,土壤活性有机碳组分和土壤酶活性均是土壤质量状况评估的关键活性因子,对土壤质量变化起到指示作用。而有关两者之间的相关性还未明确。在“双碳”背景下,维持红树林湿地生态系统稳定性与固碳能力尤其重要,因此有必要探析不同植物群

落条件下红树林湿地的土壤活性有机碳组成、土壤酶活性现状以及两者间的相互作用,进而预测东寨港红树林片区的生态结构和功能发展趋势,研究结果为东寨港红树林湿地的生态恢复与保护提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于海南岛东北部东寨港红树林自然保护区范围内(19°51′—20°01′N,110°32′—110°37′E),该区属于典型的热带季风海洋性气候,呈现出春季少雨,夏季多雨,秋季暴风雨频发,冬季寒流高发的气候现象。根据2019年海南省红树林资源调查结果,东寨港红树林群落类型复杂且多样,主要红树优势树种有角果木(*Ceriops tagal*)、秋茄(*Kandelia obovata*)、海莲(*Bruguiera sexangula*)、红海榄(*Rhizophora stylosa*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)、榄李(*Lumnitzera racemosa*)和桐花树(*Aegiceras corniculatum*)等。

1.2 样地布设

按照研究区红树林分布情况,将调查区域划分成9种群落类型,树种组成类型分别是红海榄(Type 1)、白骨壤(Type 2)、角果木(Type 3)、海莲+角果木(Type 4)、桐花树+海莲+秋茄(Type 5)、海莲+榄李+桐花树(Type 6)、秋茄+海莲+榄李(Type 7)、海莲+无瓣海桑+桐花树+秋茄(Type 8)、海莲+无瓣海桑(Type 9)。于2021年5月期间开展红树林湿地土壤样品采集工作,在9种群落类型中设置样方26个(面积20 m×20 m),采集土层深度0—20 cm,重复3次。

1.3 土壤样品测定

土壤总有机碳(TOC)、土壤易氧化有机碳(EOC)、土壤颗粒有机碳(POC)、土壤轻组有机碳(LFC)、土壤微生物生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)、土壤全氮(TN)、土壤全磷(TP)和土壤全钾

(TK)等指标的测定:参照《土壤农业化学分析方法》中各项指标的测定方法^[28]。

土壤磷酸酶(PHO)、土壤蔗糖酶(SUC)、土壤过氧化氢酶(CAT)和土壤脲酶(URE)等4种酶活性的测定:参照《土壤酶及其研究法》中土壤酶活性的测定方法^[29]。

1.4 数据分析

利用Excel 2010对原始数据进行统计与分析;采用SPSS软件对土壤有机碳组分与酶活性指标进行显著性差异分析($\alpha = 0.05$)和Pearson相关性分析;冗余分析(RDA)则是在Canoco Software5.0软件中完成。

2 结果与分析

2.1 不同红树植物群落土壤理化性质分析

从图1可以看出,不同树种构成的红树林群落土壤pH值、全氮、全磷和全钾含量分别介于5.10~6.38(弱酸性),0.05%~0.36%,0.22~0.76 g/kg,5.04~22.31 g/kg之间,在不同红树植物群落间存在差异,但无规律性。

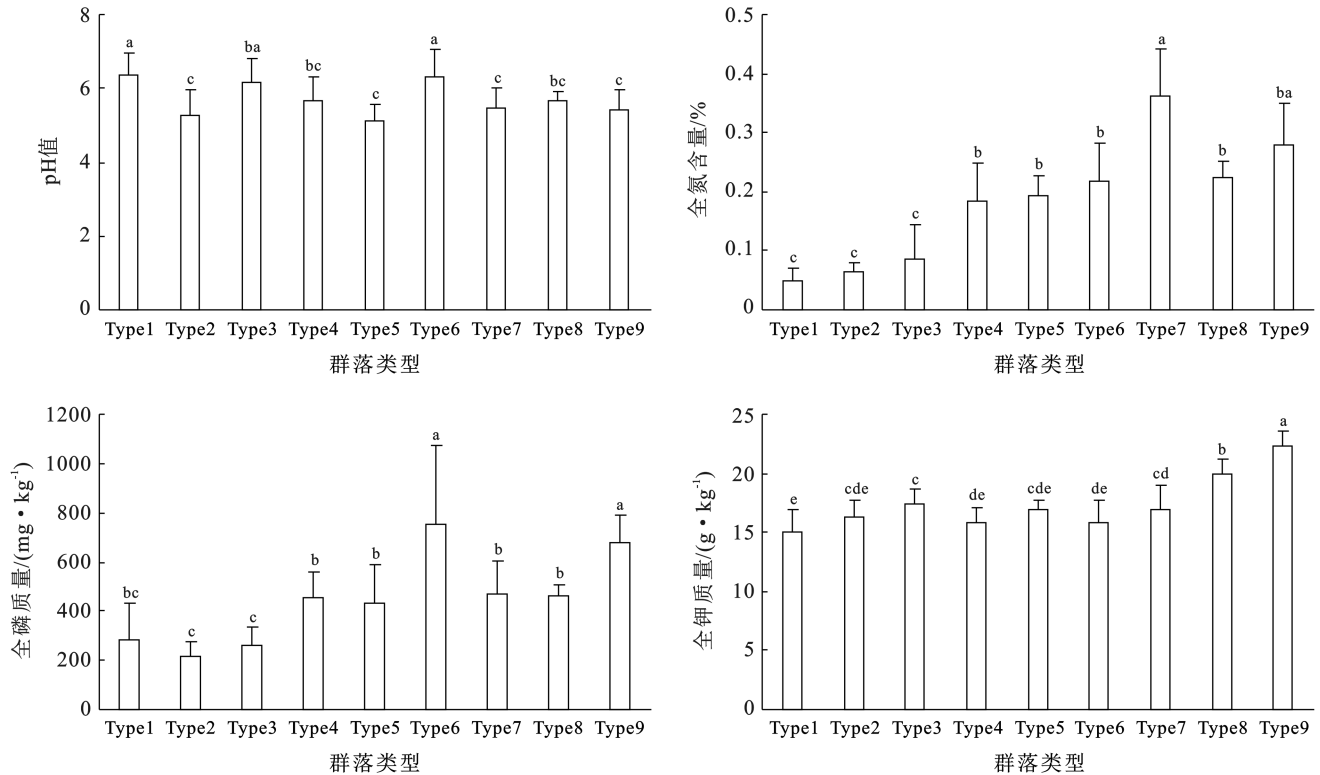
2.2 不同红树植物群落土壤有机碳及其活性组分含量分析

从表1可以看出,不同树种构成的红树林群落土壤总有机碳(TOC)含量在6.57~74.87 g/kg之间,最大值落在Type 7群落,显著高于其余群落。不同群落土壤活性有机碳含量基本呈现出土壤易氧化有机碳>土壤微生物生物量碳>可溶性有机碳(Type 4和Type 5除外)>颗粒有机碳>轻组有机碳的变化规律,分别占土壤总有机碳含量的3.38%~6.48%,0.79%~3.16%,0.01%~0.49%,0.04%~0.09%和0.01%~0.04%,土壤活性有机碳各组分含量在不同群落间存在显著差异,但变化规律较不一致。由此看出该区红树林湿地土壤有机碳组分分布变异程度高。

表1 东寨港红树林湿地土壤总有机碳及活性有机碳组分

Table 1 Total organic carbon and active organic carbon components of mangrove wetland soil in Dongzhai Port

群落类型	总有机碳/ (g·kg ⁻¹)	易氧化有机碳/ (g·kg ⁻¹)	微生物生物量碳/ (mg·kg ⁻¹)	可溶性有机碳/ (mg·kg ⁻¹)	颗粒有机碳/ (mg·kg ⁻¹)	轻组有机碳/ (mg·kg ⁻¹)
Type 1	6.57 ^d	0.28 ^d	157.65 ^d	26.98 ^c	5.95 ^c	2.35 ^d
Type 2	11.08 ^{cd}	0.72 ^{cd}	135.83 ^d	18.38 ^c	8.95 ^{bc}	3.13 ^d
Type 3	17.10 ^{cd}	0.70 ^{cd}	540.45 ^{bcd}	3.83 ^c	9.85 ^{bc}	4.03 ^{cd}
Type 4	34.39 ^{bc}	1.37 ^{bcd}	270.50 ^{cd}	3.75 ^c	23.88 ^{bc}	5.38 ^{bc}
Type 5	40.42 ^b	2.04 ^b	827.95 ^{ab}	5.97 ^c	24.58 ^{bc}	6.71 ^{ab}
Type 6	39.65 ^b	1.55 ^{bc}	663.57 ^{bc}	108.10 ^b	23.70 ^{bc}	6.43 ^{ab}
Type 7	74.87 ^a	3.49 ^a	599.12 ^{bcd}	119.83 ^b	54.66 ^a	7.86 ^a
Type 8	39.28 ^b	1.40 ^{bcd}	1 171.24 ^a	151.47 ^b	15.42 ^{bc}	6.56 ^{ab}
Type 9	46.69 ^b	1.58 ^{bc}	1 168.82 ^a	227.43 ^a	27.05 ^b	7.56 ^a



注:①Type 1 为红海榄群落;Type 2 为白骨壤群落;Type 3 为角果木群落;Type 4 为海莲+角果木群落;Type 5 为桐花树+海莲+秋茄群落;Type 6 为海莲+榄李+桐花树群落;Type 7 为秋茄+海莲+榄李群落;Type 8 为海莲+无瓣海桑+桐花树+秋茄群落;Type 9 为海莲+无瓣海桑群落;②不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同红树植物群落表层土壤理化性质

Fig.1 Physicochemical properties of different mangrove communities

2.3 不同红树植物群落土壤酶活性

对 9 种类型的红树林植物群落土壤酶活性进行比较分析,结果(图 2)表明,土壤脲酶(URE)活性介于 0.46~2.43 mg/g 之间,最高值落在 Type 8 群落,显著高于 Type 1 至 Type 6 群落。土壤磷酸酶(PHO)活性介于 0.24~1.21 mg/g,最高值落在 Type 8 群落,显著高于 Type 1 至 Type 4 群落。土壤过氧化氢酶(CAT)介于 0.05~0.75 ml/g,最高值落在 Type 5 群落,显著高于其余群落(Type 6 和 Type 7 除外)。土壤蔗糖酶(SUC)活性介于 0.08~0.21 mg/g 之间,显著高于 Type 2,Type 5 和 Type 8 群落。对比 3 种水解酶活性发现,脲酶最大,其次是磷酸酶,蔗糖酶最小。

2.4 土壤因子与酶活性之间的相关分析

由表 2 可知,过氧化氢酶与磷酸酶、脲酶呈极显著正相关;过氧化氢酶与 TOC,EOC,DOC,POC,LFC,TN 和 TP 呈极显著正相关,与 MBC 呈显著正相关,与 pH 值,TK 呈无相关性。蔗糖酶与磷酸酶、脲酶呈无相关性;蔗糖酶与 TOC,POC,LFC,TN 和 TP 呈显著正相关,与 EOC,MBC,DOC,pH 值和 TK 呈无相关性。磷酸酶与脲酶呈极显著正相关;磷酸酶与 TOC,EOC,MBC,POC,LFC,TN 和 TP 呈极显著正相关,与 pH 值呈极显著负相关,与 DOC 呈显著正

相关,与 TK 呈无相关性。脲酶与 TOC,EOC,MBC,DOC,POC,LFC,TN,TP 和 TK 呈极显著正相关,与 pH 值呈极显著负相关。以上说明,该区 4 种土壤酶活性对湿地土壤代谢发挥重要作用。

表 2 土壤因子与土壤酶活性的相关性

Table 2 Correlation between soil factors and soil enzyme activity

指标	过氧化氢酶	蔗糖酶	磷酸酶	脲酶
蔗糖酶	0.097	1		
磷酸酶	0.553**	0.116	1	
脲酶	0.438**	0.090	0.879**	1
总有机碳	0.562**	0.250*	0.718**	0.763**
易氧化有机碳	0.535**	0.136	0.625**	0.655**
微生物量碳	0.253*	0.205	0.557**	0.620**
可溶性有机碳	0.296**	0.051	0.285*	0.465**
颗粒有机碳	0.537**	0.257*	0.603**	0.629**
轻组有机碳	0.628**	0.280*	0.794**	0.811**
pH 值	-0.181	0.040	-0.536**	-0.481**
全氮含量	0.598**	0.278*	0.695**	0.767**
全磷含量	0.608**	0.233*	0.345**	0.317**
全钾含量	0.012	0.002	0.201	0.359**

注:①表中数值为相关系数。②* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ 。

根据以上相关性分析结果,进行 RDA 分析。分别选取土壤因子作解释变量,土壤 4 种酶活性作响应变量。结果(表 3)表明,土壤酶活性累计解释量

为 76.0%，土壤酶活性特征和土壤因子累计解释量为 96.6%。从图 3 可以看出，LFC 和 TOC 的箭头连线最长，且与酶活性箭头方向基本一致，可认为是影响土壤酶活性分布的关键影响因素。依据置换检验

的显著性(p 值)对土壤因子进行重要性的排位，最终确定对 4 种土壤酶活性特征差异的解释量达显著水平($p < 0.05$)的土壤因子依次为:LFC(62.7%),TOC(2.5%),POC(2.5%),MBC(2.2%)。

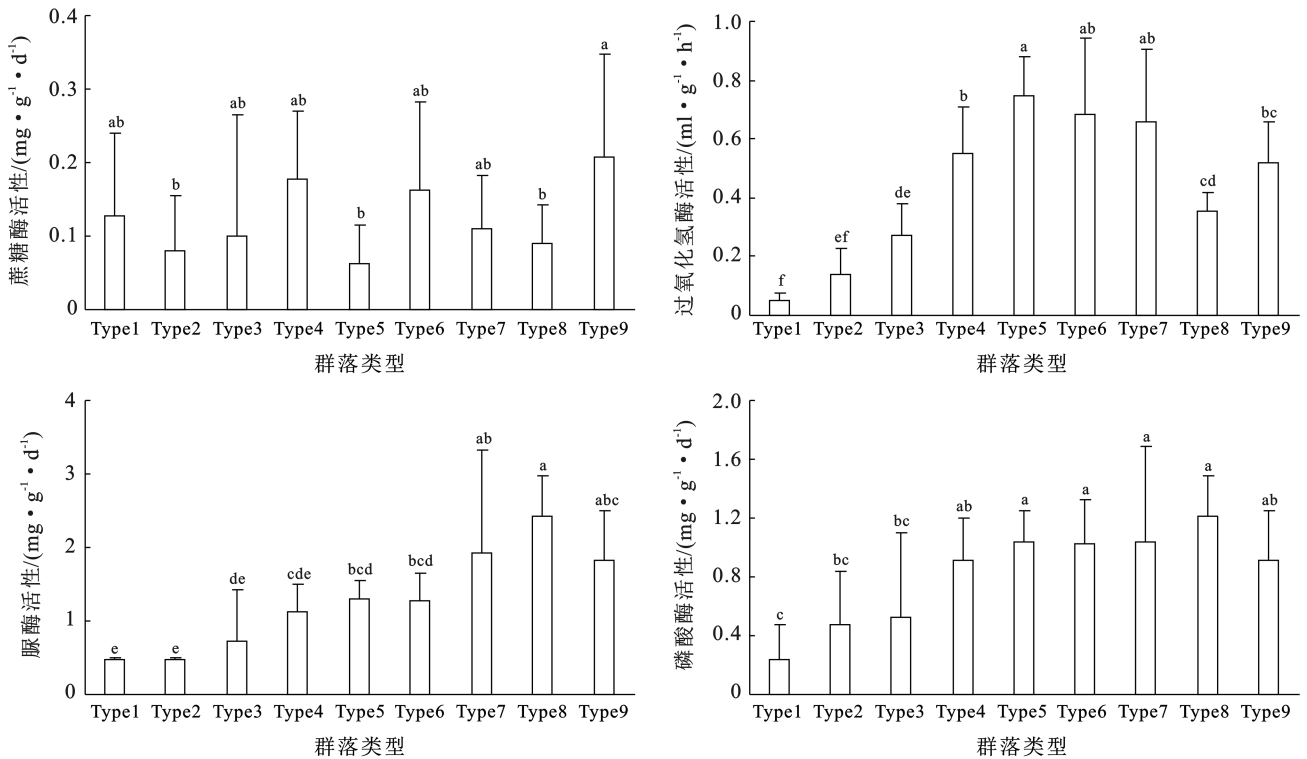


图 2 不同红树林优势群落土壤酶活性

Fig.2 Soil enzyme activity in different mangrove dominant communities

表 3 东寨港红树林湿地土壤酶活性的解释变量冗余分析
Table 3 Redundancy analysis of the soil enzyme activity in Mangrove Wetlands of Dongzhai port

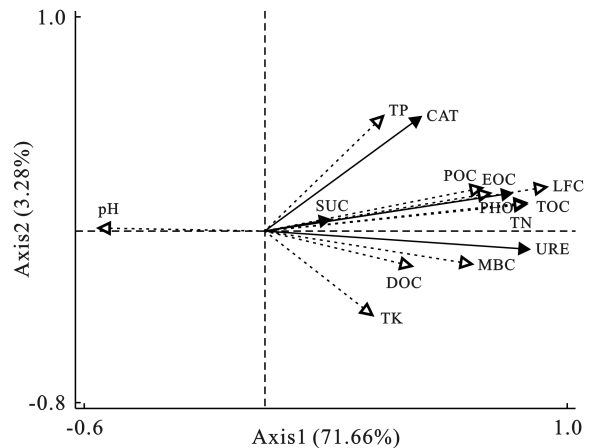
参数	第 1 轴	第 2 轴	第 3 轴
特征值	0.716 6	0.032 8	0.010 6
土壤酶活性—环境相关性	0.895 3	0.722 3	0.602 4
土壤酶活性累计解释量/%	71.66	74.94	76.00
土壤酶活性—环境累计解释量	93.91	98.21	99.60

3 讨论

3.1 不同红树植物群落土壤活性有机碳含量差异

红树林生态系统在全球碳循环中发挥着至关重要的作用^[30],大量的碳储存在群落中,特别是在它们的沉积物中^[31]。本研究发现东寨港红树林的 TOC 范围为 6.57~74.87 g/kg,不同红树植物群落类型间存在较大差异,其中最大值落在 Type 7 群落,说明该区土壤有机碳含量在区域尺度内变幅较大。正如赵泽阳等^[32]报道的结论相一致,海南岛北部红树林湿地有机碳含量区间差异较大,介于 0.88~134.00 g/kg(0—40 cm 土层)。其他研究也表明,东寨港不

同红树植物群落土壤有机碳含量和密度不同^[33]。至于不同植物群落对土壤有机碳含量的影响机制如何?有待进一步研究。



注:图中虚线带空心箭头代表解释变量(不同土壤因子);实线带实心箭头代表响应变量(不同土壤酶)。

图 3 土壤酶活性与理化因子 RDA 排序

Fig.3 Sequencing of soil enzyme activity and physicochemical factor RDA

活性有机碳是碳库的重要组成部分^[34],但对红树林生态系统中活性有机碳的动态知之甚少。已发现在一些陆地生态系统中活性有机碳与有机碳相关^[35]。本研究发现,东寨港红树林湿地土壤活性有机碳与有机碳之间没有明确的关系,但其活性有机碳含量在不同群落间的变化规律呈现出:土壤易氧化有机碳>土壤微生物生物量碳>可溶性有机碳>颗粒有机碳>轻组有机碳,且活性有机碳库的比例随 TOC 的变化趋势并不一致。这说明红树林湿地不同植物群落的土壤有机碳含量不是唯一影响活性有机碳库大小的因素。有研究发现,红树林土壤碳主要来源于微团聚体^[36],在生态系统发展过程中,新鲜枯枝落叶的分解可能导致土壤中高比例的不稳定碳^[37]。同时在滨海湿地中,土壤活性有机碳与有机碳之间存在解耦关系,这意味着土壤碳组分和环境条件之间存在复杂的相互作用^[38]。以上结果表明,红树植物群落发育过程中,土壤活性有机碳含量属于活跃波动状态,其活性特征直接反映了不同红树植物群落下土壤质量条件。

3.2 不同红树植物群落土壤酶活性差异

红树林生态系统是潮间带湿地。土壤酶活性对生态系统中物质形成和发展起到关键作用^[39-40]。有研究发现,土壤部分酶活性(蔗糖酶、磷酸酶)在湿地互花米草群落和蔗草群落中显著高于碱蓬群落和芦苇群落^[41];本研究也得出,东寨港红树林湿地 Type 8 群落(海莲+无瓣海桑+桐花树+秋茄)土壤脲酶和磷酸酶活性显著高于 Type 1 群落(红海榄),同时土壤过氧化氢酶和蔗糖酶在不同群落间也存在差异。说明土壤酶活性因植物群落不同而存在差异,表现为群落组成越丰富,其土壤酶活性越高,这与土壤有机质的积累有关。因为植被多样性的提高有利于提高土壤有机质的积累^[42-43],而有机质的积累有助于改善土壤结构及提高土壤酶活性^[44];此外,相关研究表明,引起土壤酶活性存在差异的原因归结于植物群落地表覆盖物和植物根系分泌物的不同,同时因红树林生态系统受涨潮和退潮因素的影响。

通过对 4 种酶活性之间进行相关性分析,结果显示,过氧化氢酶与磷酸酶、脲酶呈极显著正相关,磷酸酶与脲酶呈极显著正相关,蔗糖酶与其余 3 种酶不存在显著相关性,部分结论与陈小华等^[27]对清澜港红树林酶活性之间的相关性一致,但也存在一定差异性。以上说明,生境因子某种程度上影响了土壤酶活性的发生,不同元素的循环酶在反映土壤肥力状况方面发挥共性特征^[29]。比较 3 种水解酶发现,脲酶活性最高,磷酸酶次之,蔗糖酶最小,因此得出脲酶是该

研究区域最活跃的水解酶。

3.3 土壤酶与土壤因子的相关性

土壤酶是生物地球化学循环和生态系统功能的关键组分^[45]。环境因子对红树林中土壤酶活性的影响目前还不是十分清晰。本研究中 4 种酶与土壤活性有机碳组分和全氮呈显著正相关,与海南岛五指山原始林、高海拔云雾林和山顶灌丛 3 种森林类型的研究结论一致^[46],有研究也得出不同植被类型间土壤 SOC 含量是土壤酶活性及化学计量比的主要影响因素^[47]。不同土壤酶活性的主要影响因子也存在差异,有研究发现,TN 和 SWC 是影响土壤蔗糖酶活性的主要因素,TN 和 RS 是影响土壤磷酸酶的主要因子^[41]。

孙毅等^[48]研究表明,土壤酶活性主要受到土壤理化性质、气候及区位的综合影响,其中土壤理化性质的影响最大。另外,还有研究指出土壤肥力、水分与盐度是滨海湿地盐生植物群落土壤酶活性的主要影响因子^[49]。本研究分析了土壤因子(含部分土壤活性有机碳组分和理化性质)与土壤酶活性的相关性,结果表明,东寨港红树林湿地土壤中脲酶与土壤因子呈极显著正相关(与 pH 值呈极显著负相关除外);磷酸酶与土壤大部分因子呈显著及极显著正相关(与 TK 无显著相关除外);过氧化氢酶与土壤活性有机碳各组分含量、TK 和 TP 呈极显著正相关(与 MBC 呈显著正相关除外);蔗糖酶与少部分土壤因子(TOC,POC,LFC)呈显著正相关。不同土壤酶适应的土壤环境存在差异,清澜港红树林土壤 SOC 与土壤脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性均呈极显著正相关,与土壤磷酸酶活性呈不显著相关^[27]。本研究中,土壤酶活性(过氧化氢酶、磷酸酶、脲酶)与 pH 值呈负相关,与李聪等^[50]研究结论基本相近,但陈小华等^[27]研究表明,土壤酶活性与 pH 值呈正相关,张攀等^[23]研究指出,pH 值是影响东寨港深层沉积物中微生物群落结构的主要环境因子。此外,该研究区土壤酶活性与土壤活性有机碳各组分含量间的关系较为紧密,相互之间存在促进作用,一定程度上可通过土壤酶活性的强度来反映出研究区域内土壤有机碳的存储潜力。

通过 RDA 分析结果表明,4 种土壤酶活性特征差异的解释量在不同土壤因子中表现为:LFC>TOC>POC>MBC,均达显著水平。综上所述,东寨港红树植物群落土壤酶活性受土壤 LFC,TOC,POC 和 MBC 的影响程度最为凸显。

4 结论

(1) 东寨港红树林湿地土壤总有机碳含量均值

为 34.45 g/kg,不同群落类型间存在显著差异。该区土壤活性有机碳表现为:土壤易氧化有机碳>土壤微生物生物量碳>可溶性有机碳>颗粒有机碳>轻组有机碳。

(2) 东寨港不同红树植物群落间 4 种土壤酶活性特征差异较大,土壤脲酶和磷酸酶活性在 Type 8 群落最高,Type 1 群落最低;土壤过氧化氢酶活性在 Type 5 群落最高,Type 1 群落最低;土壤蔗糖酶活性在 Type 9 最高,Type 5 最低。

(3) 不同土壤酶活性的主要影响因子存在差异,其中 4 种土壤酶活性与土壤活性有机碳各组分之间相关性显著。RDA 结果表明,LFC,TOC,POC 和 MBC 是东寨港红树林湿地土壤酶活性变化的关键因子。

[参 考 文 献]

- [1] De Paula N M, da Silva K, Brugnari T, et al. Biotechnological potential of fungi from a mangrove ecosystem: Enzymes, salt tolerance and decolorization of a real textile effluent [J]. *Microbiological Research*, 2022, 254: 126899.
- [2] Bai Shijie, Li Jiangwei, He Zhili, et al. GeoChip-based analysis of the functional gene diversity and metabolic potential of soil microbial communities of mangroves [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97 (15): 7035-7048.
- [3] Fernandes S O, Gonsalves M J, Nazareth D R, et al. Seasonal variability in environmental parameters influence bacterial communities in mangrove sediments along an estuarine gradient [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 270: 107791.
- [4] 吴彬,张文主,田义超,等.北部湾典型红树林岛群生态系统的结构特征与碳储量研究[J].*Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(3): 458-465.
- [5] 刘双双,杨升,刘星,等.红树林对潮汐浸淹适应性研究进展[J].*世界林业研究*, 2022, 35(5): 25-30.
- [6] 乐易迅,胡敏杰,赖兴凯,等.泉州湾河口湿地不同植被恢复下沉积物磷形态和酶活性特征[J].*环境科学学报*, 2022, 42(5): 355-363.
- [7] 陈小花,陈宗铸,雷金睿,等.清澜港红树林湿地土壤酶活性与理化性质的关系[J].*林业科学研究*, 2022, 35(2): 171-179.
- [8] 陈小花,陈宗铸,雷金睿,等.清澜港红树林湿地典型群落类型沉积物活性有机碳组分分布特征[J].*生态学报*, 2022, 42(11): 4572-4581.
- [9] 陈小花,陈宗铸,雷金睿,等.东寨港不同植物群落土壤微生物量碳氮及养分特征[J].*林业资源管理*, 2021(6): 97-104.
- [10] Van de Broek M, Vandendriessche C, Poppelmonde D, et al. Long-term organic carbon sequestration in tidal marsh sediments is dominated by old-aged allochthonous inputs in a macrotidal estuary [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(6): 2498-2512.
- [11] Middleton B A, McKee K L. Degradation of mangrove tissues and implications for peat formation in Belizean Island forests [J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89(5): 818-828.
- [12] Chen Yimin, Xu Xin, Jiao Xiaoguang, et al. Responses of labile organic nitrogen fractions and enzyme activities in eroded mollisols after 8-year manure amendment [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 14179.
- [13] 马维伟,孙文颖,琼海湿地植被退化过程中有机碳及相关土壤酶活性变化特征[J].*自然资源学报*, 2020, 35(5): 1250-1260.
- [14] Kim J, Lee J, Yang Yerang, et al. Microbial decomposition of soil organic matter determined by edaphic characteristics of mangrove forests in East Asia [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 142972.
- [15] 吕晓波,钟才荣,张孟文,等.海南东寨港秋茄种群结构与数量动态变化特征研究[J].*广东农业科学*, 2023, 50(3): 39-48.
- [16] 吕晓波,钟才荣,张孟文,等.海南东寨港红海榄种群结构与数量动态变化特征[J].*热带生物学报*, 2023, 14(5): 490-498.
- [17] 张颖,朱忠礼,焦晨泰.基于分形的海南岛东寨港红树林景观空间结构变化研究[J].*遥感技术与应用*, 2022, 37(5): 1179-1189.
- [18] 闫璧滢,陈渝川,雷丽娟,等.海南东寨港红树林植物和沉积物真菌多样性及其药用活性[J].*中国抗生素杂志*, 2023, 48(2): 158-171.
- [19] 朱鹏光,甘义群,赖毅毅,等.海南东寨港红树林湿地沉积物氮形态空间分布特征及影响因素[J].*地质科技通报*, 2023, 42(1): 369-377.
- [20] 温汉辉,郭源,胡凡,等.东寨港红树林湿地沉积物中多环芳烃的空间分布特征及其来源解析[J].*安全与环境工程*, 2023, 30(2): 194-202.
- [21] 陈小花,陈宗铸,雷金睿,等.东寨港红树林中不同群落区表层土壤有机碳及其活性组分含量[J].*湿地科学*, 2022, 20(4): 499-506.
- [22] 刘路,何子文.东寨港红树林土壤细菌群落结构的季节性变化[C]//首届植物科学前沿学术大会摘要集(二).江苏南京,2022:94.
- [23] 张攀,谢先军,黎清华,等.东寨港红树林沉积物中微生物群落结构特征及其对环境的响应[J].*地球科学*, 2022, 47(3): 1122-1135.
- [24] 季一诺,赵志忠,吴丹,等.海南东寨港红树林沉积物中

- 重金属的分布及其生物有效性[J].应用生态学报, 2016,27(2):593-600.
- [25] 辛琨,颜葵,李真,等.海南岛红树林湿地土壤有机碳分布规律及影响因素研究[J].土壤学报,2014,51(5):1078-1086.
- [26] 李翠华,蔡榕硕,颜秀花.2010—2018年海南东寨港红树林湿地碳收支的变化分析[J].海洋通报,2020,39(4):488-497.
- [27] 陈小花,陈宗铸,雷金睿,等.清澜港红树林湿地土壤酶活性与理化性质的关系[J].林业科学研究,2022,35(2):171-179.
- [28] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [29] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [30] Marchand C. Soil carbon stocks and burial rates along a mangrove forest chronosequence (French Guiana) [J]. Forest Ecology and Management, 2017,384:92-99.
- [31] Stringer C E, Trettin C C, Zarnoch S J, et al. Carbon stocks of mangroves within the Zambezi river delta, Mozambique [J]. Forest Ecology and Management, 2015,354:139-148.
- [32] 赵泽阳,赵志忠,付博,等.海南岛北部地区红树林湿地土壤有机碳分布规律及影响因素[J].广东农业科学,2018,45(12):49-55.
- [33] 黄星.红树林土壤有机碳、重金属特征对红树林景观格局变化的响应:以海南东寨港和广西钦州湾为例[D].上海:华东师范大学,2017.
- [34] Dungait J A J, Hopkins D W, Gregory A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance [J]. Global Change Biology, 2012,18(6):1781-1796.
- [35] Sharma V, Hussain S, Sharma K R, et al. Labile carbon pools and soil organic carbon stocks in the foothill Himalayas under different land use systems [J]. Geoderma, 2014,232/233/234:81-87.
- [36] Zhang Yaohong, Ding Weixin, Luo Jiafa, et al. Changes in soil organic carbon dynamics in an Eastern Chinese coastal wetland following invasion by a *C₄* plant *Spartina alterniflora* [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010,42(10):1712-1720.
- [37] Sun Huimin, Jiang Jiang, Cui Lina, et al. Soil organic carbon stabilization mechanisms in a subtropical mangrove and salt marsh ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2019,673:502-510.
- [38] Cui Lina, Sun Huimin, Du Xuhua, et al. Dynamics of labile soil organic carbon during the development of mangrove and salt marsh ecosystems [J]. Ecological Indicators, 2021,129:107875.
- [39] Marx M C, Wood M, Jarvis S C. A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001,33(12/13):1633-1640.
- [40] 万忠梅,宋长春.土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J].土壤通报,2009,40(4):951-956.
- [41] 习盼,徐驰,刘茂松.盐城滩涂湿地土壤酶活性特征及其影响因素[J].浙江农业科学,2020,61(10):2150-2155.
- [42] 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.
- [43] 任奕炜,钟小瑛,衣华鹏,等.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[J].林业科学研究,2023,36(2):161-168.
- [44] 陈模芳,赵熙洲,孔维勋,等.不同土地利用方式下土壤理化性质及酶活性的特征[J].北方园艺,2023(7):87-94.
- [45] Zuccarini P, Asensio D, Sardans J, et al. Effects of nitrogen deposition on soil enzymatic activity and soil microbial community in a Mediterranean holm oak forest [J]. Geoderma, 2023,430:116354.
- [46] Wang Xiaofang, Li Jialing, Xing Guitong, et al. Soil organic carbon distribution, enzyme activities, and the temperature sensitivity of a tropical rainforest in Wuzhishan, Hainan Island [J]. Forests, 2022,13(11):1943.
- [47] 王晶晶,黄刚,吕坤,等.热带-亚热带森林不同植被类型的土壤酶活性及化学计量特征[J].应用与环境生物学报,2023,29(2):423-431.
- [48] 孙毅,和润莲,何光熊,等.滇西并流河谷区土壤酶活性化学计量学特征与环境因子的关系[J].应用生态学报,2021,32(4):1269-1278.
- [49] 莫雪,陈斐杰,游冲,等.黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析[J].环境科学,2020,41(2):895-904.
- [50] 李聪,吕晶花,陆梅,等.滇东南典型常绿阔叶林土壤酶活性的海拔梯度特征[J].林业科学研究,2020,33(6):170-179.