



主持人:任明迅

退塘还林红树林大型底栖动物群落结构变化及影响因素

尹连政^{1,2}, 秦永强³, 苏园园^{1,2}, 雷俊^{1,2}, 曾若菡^{1,2}, 黎平², 刁晓平¹

(1. 海南大学 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海口 570288; 2. 海南大学 生态与环境学院, 海口 570288;

3. 海南师范大学 生态与环境学院, 海口 570288)

摘要: 为揭示红树林修复过程中大型底栖动物群落变化特征及其与环境影响因子, 本研究于2022年12月(旱季)和2023年6月(雨季)随机选择5个不同修复阶段(2017—2021年)的红树林区域和1个原生红树林区域作为采样点, 通过五点采样法采集沉积物的样品, 按照《海洋调查规范: 海洋生物调查指南》(GB/T12763.6—2007)对沉积物中大型底栖动物进行调查。共获得并鉴定出大型底栖动物30种, 隶属4纲9目18科。原生区和修复区红树林均以腹足纲和软甲纲动物为主, 主要优势种有珠带拟蟹守螺(*Cerithidea cingulata*)、纵带滩栖螺(*Batillaria zonalis*)、红树林招潮蟹(*Uca rhizophorae*)等。与原生区红树林相比, 修复区红树林大型底栖动物的物种数、优势种数、栖息密度、生物量和多样性指数, 均随修复年限的增加呈上升的趋势, 表明通过生态修复使红树林生境的质量得到改善, 大型底栖动物群落结构和栖息密度存在明显的季节性差异, 大型底栖动物物种数和栖息密度旱季高于雨季; 而优势种数、生物量和多样性指数旱季却低于雨季。相关性分析结果表明沉积物pH和总氮是影响红树林大型底栖动物优势种分布的主要环境因子。研究结果显示退塘还林的红树林修复工程在一定程度改善了修复区域的生态环境质量, 大型底栖动物群落结构变化与修复年限呈现明显的相关性, 大型底栖动物的生物多样性得到恢复。本研究为红树林大型底栖动物多样性保护和红树林生态修复提供了科学依据。

关键词: 大型底栖动物; 群落结构; 生态修复; 红树林; 理化因子

中图分类号: S781.5

文献标志码: A

文章编号: 1674-7054 (2024) 06-0780-11

尹连政, 秦永强, 苏园园, 等. 退塘还林红树林大型底栖动物群落结构变化及影响因素[J]. 热带生物学报, 2024, 15(6): 781-791. doi:10.15886/j.cnki.rdswwb.20240009

红树林是生长在热带和亚热带地区海岸潮间带独特的生态系统^[1], 位于海陆交错带^[2], 不仅具有丰富的生物资源和物种多样性, 还可以起到防风消浪、固碳储碳等作用^[3-6]。由于气候变化和人类活动的影响, 全球红树林面临严重退化、生物多样性下降等问题, 现如今红树林已成为世界上最受威胁的生态系统之一^[7-10]。而伴随着红树林的消失, 许多国家沿海地区的人口和经济正面临巨大威胁^[5, 11-13], 红树林的保护和修复工作显得至关重要。为了更好地修复受损红树林, 我国在红树林主要分布区开展了大规模的红树林生态修复工作, 如广

东、海南、广西和福建等地区。据文献报道, 2010—2020年, 海南人工红树林增加了883.66 hm²^[7]。

大型底栖动物是红树林生态系统关键组成部分, 大多数的底栖生物处于食物链的中间环节, 在红树林生态系统的物质循环和能量流动过程中发挥着重要作用^[14-15]。由于大型底栖动物具有不易迁移、生存活动空间有限、食物来源狭窄及对栖息地环境变化敏感等特点, 其多样性和丰度的变化常常用来指示红树林生态系统生境的变化^[16-17]。红树林湿地的修复过程在一定程度上会改变生物的生存环境, 进而对大型底栖动物的群落结构产

收稿日期: 2024-01-15

修回日期: 2024-03-12

基金项目: 海南省自然科学基金面上项目(323MS010)

第一作者: 尹连政(1997-), 男, 海南大学生态与环境学院2021级硕士研究生。E-mail: 563922031@qq.com

通信作者: 刁晓平(1963-), 女, 教授。研究方向: 生态毒理学。E-mail: diaoxip@hainanu.edu.cn;

黎平(1989-), 女, 副教授。研究方向: 海洋生态学。E-mail: li.ping@hainanu.edu.cn

生不同程度的影响。因此,研究修复过程中红树林大型底栖动物的群落结构变化及其影响因素,对于更好地了解红树林的修复效果具有十分重要的意义^[18-19]。

海南陵水红树林湿地位于海南省陵水县南部海岸的新村港潟湖、清水湾与香水湾交接处,包括新村港潟湖北部鱼塘、滩涂、河口区域、浅海海域和潟湖,总面积为958.22 hm²,湿地率98.43%。该地区属典型的热带海洋季风气候,日照时间长,气温高,降水多,季风与海陆风明显。研究区有红树植物18种,含引入树种—桐花树(*Aegiceras corniculatum*),其中真红树植物11种、半红树植物5种、外来真红树植物2种;红树植物种数约占中国红树植物种数的50%。20世纪80年代,围塘养殖给陵水红树林带来毁灭性打击,不仅侵占了红树林的岸滩,其排放的养殖废水对红树林也具有致命伤害,在养殖塘排污口,可以看到红树林成片死亡^[20]。自2016年开始,海南省陵水开始实施红树林湿地生态修复工程,其中退塘还林是当地红树林修复的主要方式。本研究以陵水退塘还林修复区红树林为典型研究区域,通过调查不同修复阶段红树林中大型底栖动物的物种数、优势种数、栖息密度、生物量和多样性指数,揭示大型底栖动物群落结构的时空分布特征,阐明红树林修复过程中大型底栖动物群落结构的变化特征,解析影响大型底栖动物群落最主要的环境因子,为红树林的生物多样性恢复和湿地的保护及开发利用提供科学依据^[8-9,21-23]。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品处理方法 本研究分别于2022年12月(旱季)和2023年6月(雨季)采集了陵水2017年(S17)、2018年(S18)、2019年(S19)、2020年(S20)、2021年(S21)不同修复阶段的五个红树林区域和原生区(Sy)红树林的大型底栖动物,进行大型底栖动物的物种鉴定和定量分析。在每个修复区域设置4个25 cm×25 cm样方,沉积物深度挖至30 cm,将其置于0.5 mm孔径的网筛上进行冲洗和挑选,将挑选的底栖生物活体装入样品瓶,用浓度为75%的酒精固定后带回实验室进行分选,用于栖息密度、生物量等的测定。并对大型底栖动物进行鉴定分类、计数并称质量,分析其物种

组成和优势种。样本的采集、保存和分选鉴定、栖息密度(个·m⁻²)、生物量(g·m⁻²)计算等均按照《海洋调查规范第6部分:海洋生物调查指南》(GB/T12763.6—2007)和《海洋监测规范第7部分:近海污染生态调查和生物监测》(GB/T17378.7—2007)进行。

采用便携式YSI多参水质分析仪(Pro DSS)现场测定调查区域水体的盐度、溶解氧(DO)、水温(WT);利用91卫图助手现场定位;用环刀取深度为0~5 cm的表层沉积物,混样后装入无菌聚乙烯袋中低温保存带回实验室,在生物公司进行pH、有机质(OM)、总氮(TN)、氨态氮(NH₃-N)和全磷(TP)的测定。

1.2 数据处理和统计分析 优势种在生态系统中发挥着重要作用,是生态系统中的主导者。优势种的存在和变化与生态系统的动态性密切相关^[24]。本研究采用物种优势度指数(*Y*)来确定大型底栖动物的优势种,计算公式为:

$$Y=(N_i/N) \times F_i$$

式中, N_i 为第*i*种的个体数, N 为总个体数, F_i 为第*i*种的出现频率, Y 值大于0.02的种类为优势种^[25]。运用Shannon多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson指数^[26]、Margalef丰富度指数^[25]分析大型底栖动物群落特征,计算公式如下:

$$\text{Shannon-Wiener 指数}(H'): H' = -\sum_{i=1}^S (P_i) (\ln P_i),$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}(J'): J' = H' / \ln(S),$$

$$\text{Simpson 指数}(C): C = \sum_{i=1}^S (P_i)_2,$$

$$\text{Margalef 丰富度指数}(D): D = (S-1) / \ln N.$$

式中: S 为总物种数; P_i 为物种*i*的个体数与全部物种个体数的比值。优势度值和多样性指数均在Excel中进行计算。

原始数据利用Microsoft excel软件进行计算,利用origin 2021软件进行显著性差异分析、单样本Wilcoxon符号秩检验、非参数检验分析(Kruskal-Wallis方差分析)和大型底栖动物与理化因子相关性heatmap的分析以及其他附图。多样性空间分布图利用ArcGIS 10.2绘制完成。

2 结果与分析

2.1 大型底栖动物群落组成及优势种 本研究于旱季(12月)与雨季(6月)进行了两次大型底栖动

物采样调查,共获得大型底栖动物 884 个,鉴定
得出大型底栖动物 30 种,隶属 4 纲 9 目 18 科。主要
以腹足纲为主,共 18 种(占总种数的 60%),其次是
软甲纲共 6 种(占 20%),多毛纲和双壳纲各 3 种,分
别占 10%。旱季调查获得 25 种,隶属 4 纲 8 目 16 科;
雨季调查获得 20 种,隶属 4 纲 7 目 12 科(表 1)。

表 1 旱季和雨季陵水红树林大型底栖动物的物种组成
Tab. 1 Species of benthic macrofauna in the mangroves of Lingshui in different seasons

编号 Number	属/种 Genus/Species	旱季 Dry season	雨季 Rainy season
SP1	节织纹螺(<i>Nassarius hepaticus</i>)	*	
SP2	西格织纹螺(<i>Nassarius siquijorensis</i>)	*	*
SP3	疣荔枝螺(<i>Reishia clavigera</i>)	*	
SP4	纵肋织纹螺(<i>Nassarius variciferus</i>)	*	
SP5	单齿螺(<i>Monodonta labio</i> Linnaeus)	*	
SP6	紫游螺(<i>Neritina violacea</i>)	*	
SP7	雨丝蜆螺(<i>Neritina turrita</i>)	*	
SP8	查加拟蟹守螺(<i>Cerithidea djadjariensis</i>)		*
SP9	沟纹笋光螺(<i>Terebralia sulcata</i>)	*	*
SP10	古氏滩栖螺(<i>Batillaria cumingi</i>)	*	*
SP11	海蜗牛(<i>Janthina janthina</i>)	*	
SP12	红树拟蟹守螺(<i>Cerithidea rhizophorarum</i>)	*	*
SP13	小翼拟蟹守螺(<i>Cerithidea microptera</i>)	*	*
SP14	斜肋齿蜷(<i>Sermyla riqueti</i>)	*	*
SP15	中华锉棒螺(<i>Rhinoclavis sinensis</i>)	*	*
SP16	中华拟蟹守螺(<i>Cerithidea sinensis</i>)		*
SP17	珠带拟蟹守螺(<i>Cerithidea cingulata</i>)	*	*
SP18	纵带滩栖螺(<i>Batillaria zonalis</i>)	*	*
SP19	红树林招潮蟹(<i>Uca rhizophorae</i>)	*	*
SP20	弧边招潮蟹(<i>Uca arcuata</i>)		*
SP21	南美白对虾(<i>Penaeus vanname</i>)	*	
SP22	双齿近相手蟹(<i>Perisesarma bidens</i>)	*	*
SP23	秀丽长方蟹(<i>Metaplex elegans</i>)	*	*
SP24	褶痕相手蟹(<i>Sesarma plicata</i>)	*	*
SP25	青蚶(<i>Barbatia obliquata</i>)	*	*
SP26	红树蚬(<i>Geloina coaxans</i>)		*
SP27	近江牡蛎(<i>Crassostrea rivularis</i>)	*	
SP28	沙蚕科 sp. A(<i>Nereididae</i> sp. A)	*	*
SP29	索沙蚕 sp. A(<i>Lumbrineris</i> sp. A)		*
SP30	小头虫 sp. A(<i>Capitella</i> sp. A)	*	

注:*代表在采样区内被检出。
Note: *indicates that it was detected in the sampling area.

不同红树林区域大型底栖动物物种数存在
差异,物种数依次为 Sy(17 种)>S17(15 种)>S19
(14 种)>S21(12 种)>S20(10 种)>S18(9 种)。总体呈
现修复年限越长,大型底栖动物物种数越多的趋势。

在纲水平上,各研究区域均以腹足纲和软甲纲为主,其次是双壳纲和多毛纲(图1)。不同红树林区域大型底栖动物物种组成存在差异,其中腹足纲出现最多的区域为S17(11种);而软甲纲出现最多的区域为Sy和S19(均为5种);双壳纲在S17和S18两个区

域均未采集到;多毛纲在Sy和S18均未被发现。但同时也有一些物种在各研究区域均有分布,如珠带拟蟹守螺(*Cerithidea cingulata*)、红树林招潮蟹(*Uca rhizophorae*)、纵带滩栖螺(*Batillaria zonalis*)等,其中,珠带拟蟹守螺在所有研究区域均为优势种。

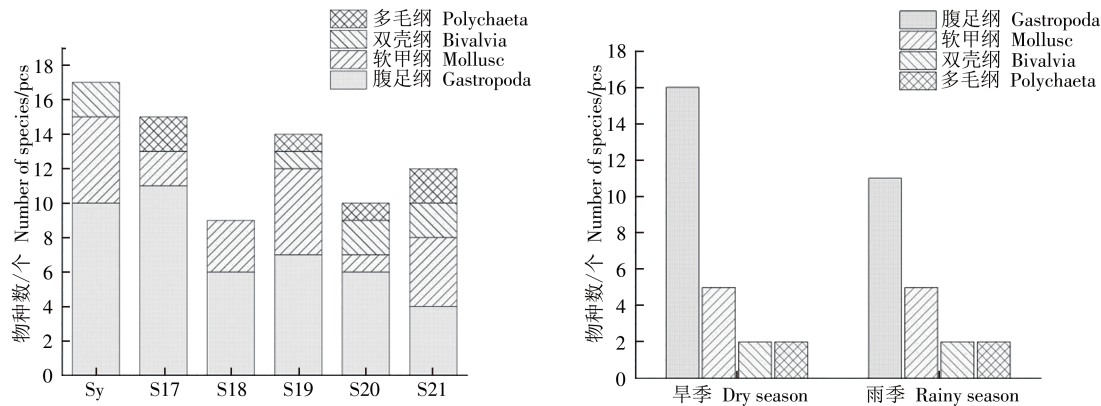


图1 不同修复区红树林大型底栖动物物种组成的时空变化

Sy、S17、S18、S19、S20、S21 分别表示原生区红树林区域和2017年、2018年、2019年、2020年、2021年开始进行修复的5个红树林区域。下同。

Fig. 1 Spatiotemporal variation of macrobenthic species composition in mangrove forests in different restoration areas

Sy, S17, S18, S19, S20 and S21 in the figure represent the native mangrove area and the five mangrove areas that were restored in 2017, 2018, 2019, 2020 and 2021, respectively.

在季节分布上,旱季的大型底栖动物物种数要高于雨季,均以腹足纲和软甲纲为主,其中旱季腹足纲物种数相对较高。旱季和雨季的软甲纲、双壳纲和多毛纲物种数相同,但物种组成不同。例如旱季双壳纲为青蚶(*Barbatia obliquata*)和近江牡蛎(*Crassostrea rivularis*),而雨季为青蚶和红树蚬(*Geloina coxans*)。

本次调查共获得优势种为11种,其中旱季7种,雨季9种,修复后区域中雨季优势种数要多于旱季。旱季出现频率最高的优势种为珠带拟蟹守螺,雨季出现频率最高的优势种为珠带拟蟹守螺、纵带滩栖螺、红树林招潮蟹。旱季S17采样点的优势种最多为5种,优势度最高的物种为古氏滩栖螺($Y=0.391$)。S18采样点最少2种,优势度最高的物种为纵带滩栖螺($Y=0.397$)。雨季S17、S18、S21采样点的优势种均为5种,其中S21采样点珠带拟蟹守螺的优势度最高($Y=0.345$)。雨季S20采样点优势种最少(3种),优势度最高的物种为纵带滩栖螺($Y=0.397$)。可以看出雨季优势种分布更为均匀,结构更为稳定(表2)。

2.2 大型底栖动物栖息密度和生物量 大型底栖

动物的平均栖息密度范围为 $170 \sim 597 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$,其中2017年修复区的大型底栖动物的平均栖息密度最高,其次是原生区,平均栖息密度最低为2021年修复区,呈现趋势为 $S17(597 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}) > Sy(555 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}) > S20(321 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}) > S19(320 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}) > S18(293 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}) > S21(170 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2})$ (图2)。不同季节上,雨季大型底栖动物的平均栖息密度($270 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$)低于旱季($484 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$)。雨季Sy区域和S17区域的栖息密度要高于其他修复区,而其他修复区之间没有显著差异。旱季Sy区域和S17区域的栖息密度高于其他样地,其中S17区域最高,而S21区域的栖息密度则为最低,不同区域之间存在显著性差异($P < 0.05$)(图2)。

不同修复区和原生区红树林中大型底栖动物的平均生物量范围为 $417 \sim 1133 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,其中原生区大型底栖动物的平均生物量最高,其次是修复区S17,平均生物量最低为S21。不同区域平均生物量呈以下趋势: $Sy(1133 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}) > S17(645 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}) > S19(553 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}) > S20(499 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}) > S18(496 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}) > S21(417 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2})$ (图3)。不同季节上,雨季红树林大型底栖动物的平均生物量($330 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)略高于旱季

表2 不同修复区红树林大型底栖动物物种优势度的时空变化

Tab. 2 Dominance variation of benthic macrofauna in different restored mangrove areas

优势种 Dominant species	各采样点优势度 Dominance of each sampling point											
	Sy		S17		S18		S19		S20		S21	
	旱季 Dry season	雨季 Rainy season	旱季 Dry season	雨季 Rainy season	旱季 Dry season	雨季 Rainy season	旱季 Dry season	雨季 Rainy season	旱季 Dry season	雨季 Rainy season	旱季 Dry season	雨季 Rainy season
沟纹笋光螺 (<i>Terebralia sulcata</i>)							0.021					
古氏滩栖螺 (<i>Batillaria cumingi</i>)	0.120	0.013	0.391						0.065	0.066	0.054	0.086
红树林招潮蟹 (<i>Uca rhizophorae</i>)	0.090		0.021	0.075		0.108	0.053	0.040			0.135	0.290
红树拟蟹守螺 (<i>Cerithidea rhizophorarum</i>)				0.067								
弧边招潮蟹 (<i>Uca arcuata</i>)				0.112		0.081		0.040				0.086
青蚶 (<i>Barbatia obliquata</i>)											0.054	
小翼拟蟹守螺 (<i>Cerithidea microptera</i>)				0.040		0.097						
秀丽长方蟹 (<i>Metaplex elegans</i>)									0.066			0.290
中华锉棒螺 (<i>Rhinoclavis sinensis</i>)			0.036			0.118						
珠带拟蟹守螺 (<i>Cerithidea cingulata</i>)	0.558	0.113	0.108		0.291		0.782	0.095	0.500	0.789	0.513	0.345
纵带滩栖螺 (<i>Batillaria zonalis</i>)	0.024	0.234	0.084	0.299	0.397	0.065		0.460	0.220			

注: Sy、S17、S18、S19、S20、S21 分别表示原生区红树林区域和2017年、2018年、2019年、2020年、2021年开始进行修复的5个红树林区域。下同。

Note: SY, S17, S18, S19, S20 and S21 in the figure represent the native mangrove area and the five mangrove areas that were restored in 2017, 2018, 2019, 2020 and 2021, respectively.

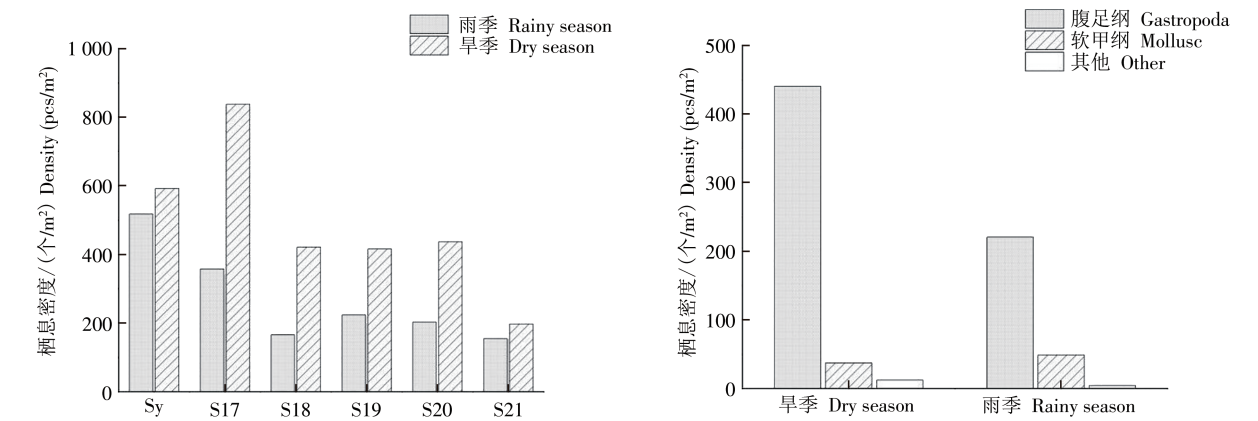


图2 不同修复区红树林大型底栖动物的栖息密度

Fig. 2 Density of benthic macrofauna in different mangrove restoration areas

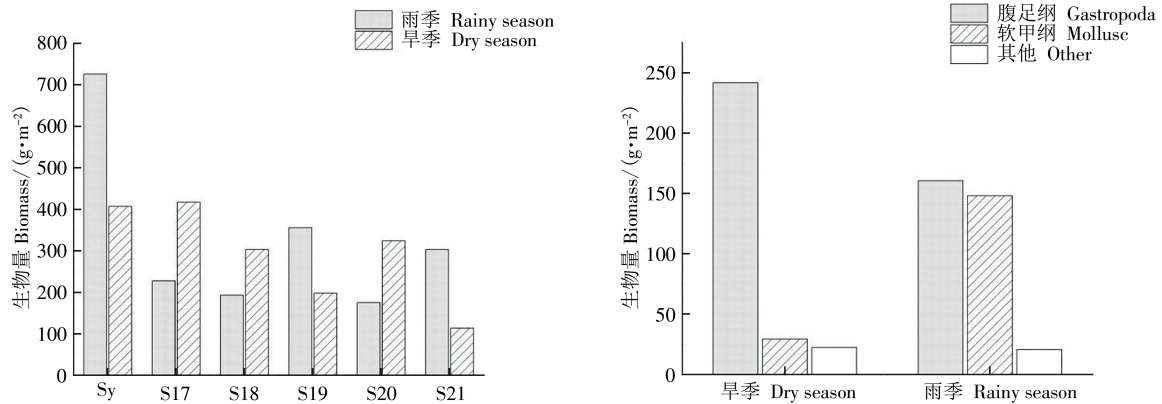


图3 不同修复区红树林大型底栖动物生物量

Fig. 3 Biomass of benthic macrofauna in different restored mangrove areas

($294 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)。这可能是因为雨季相比于旱季拥有更多的软甲纲个体,而软甲纲个体大于旱季,这使得雨季栖息密度较低,但是大个体增加了生物量。在雨季Sy区域的生物量要高于各修复区域,而修复区之间差异不明显;旱季Sy区域和S17区域的生物量要高于其他区域,而S21区域的生物量要低于其他修复区,不同区域之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

总体上,不同修复年限的红树林中大型底

栖动物的栖息密度和生物量差异较大,栖息密度和生物量随修复年限的增加呈逐渐上升趋势。

2.3 大型底栖动物的物种多样性 在雨季大型底栖动物的Shannon多样性指数(H')、Simpson指数(C)、Margalef丰富度指数(D)最高的区域为Sy,分别为2.78、0.80和2.84;最低的区域为S20,分别为1.46、0.48和1.59(图4)。Pielou均匀度指数(J')最高的区域为S21(0.71),最低的区域为S20(0.39)。

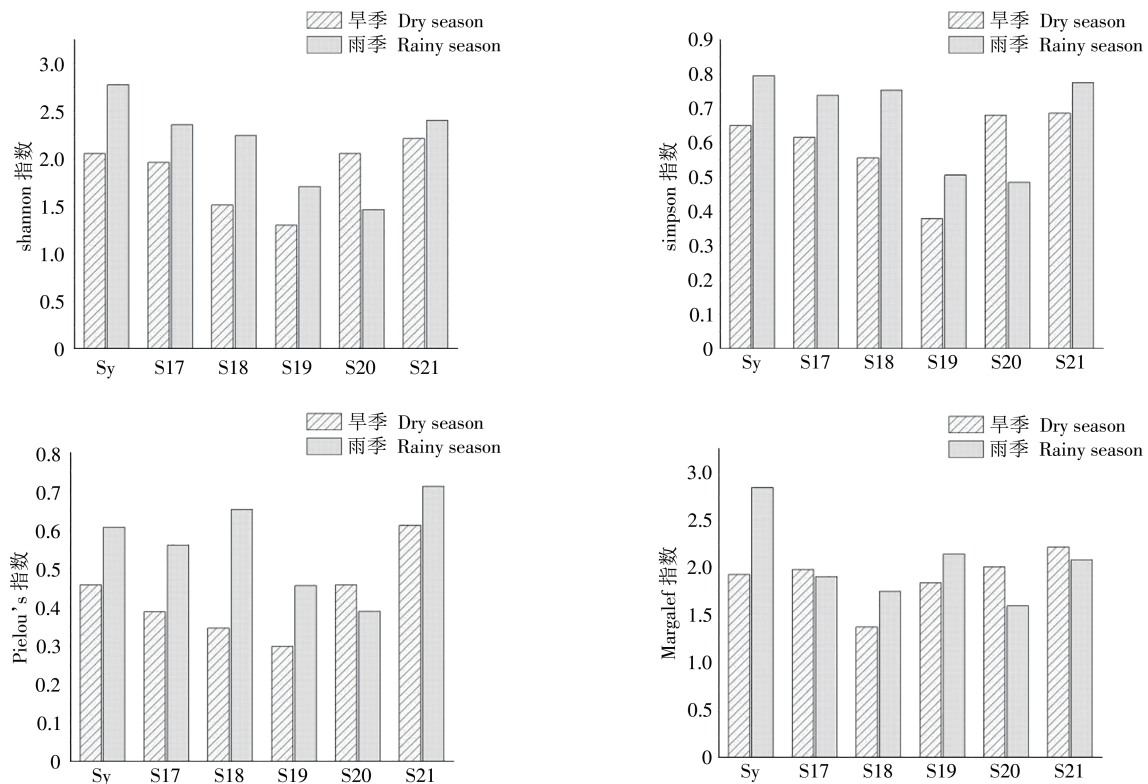


图4 不同修复区红树林大型底栖动物的多样性指数

Fig. 4 Diversity index of benthic macrofauna in different mangrove restoration areas

通常情况下,Shannon 多样性指数(H')和 Simpson 指数(C)值越大表明多样性越高;而 Pielou 均匀度指数(J')值越大,物种分布越均匀;Margalef 丰富度指数(D)值越大,表明物种多样性越高^[27]。在旱季, H' 、 C 、 J' 、 D 最高的区域均为 S21,分别是 2.21、0.69、0.61 和 2.22; H' 、 C 、 J' 最低的区域均为 S19,分别是 1.30、0.38 和 0.30。 D 最低的区域为 S18 的 1.37。总体上,原生区和修复区红树林的大型底栖动物生物多样性在雨季均高于旱季。而原生区大型底栖动物的多样性要高于修复区。

2.4 大型底栖动物与理化因子的关系 与原生区相比,不同修复区红树林沉积物和水体的理化参数有所差异。2017 年修复区沉积物中的有机质、总氮、全磷以及水体溶解氧均高于其他红树林修复区。在雨季,修复区沉积物中有机质和总氮含量显著高于原生区。总体上,旱季红树林沉

积物中 pH 值、有机质、全磷、总氮均高于雨季,而雨季铵态氮、水温和水体溶解氧要高于旱季($P < 0.05$)。(表 3)。

为进一步阐明大型底栖动物优势物种分布与理化因子的关系,本研究进行了相关性 heatmap 分析(图 5)。结果显示,珠带拟蟹守螺与沉积物 pH 呈显著正相关($P < 0.05$),与沉积物总氮呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。中华铰棒螺与沉积物 pH、全磷、总氮和水体盐度呈显著正相关($P < 0.05$)。小翼拟蟹守螺与水体盐度和沉积物总氮呈显著正相关($P < 0.05$),与沉积物 pH 呈极显著正相关($P < 0.01$);而近江牡蛎则与水温 and 沉积物铵态氮呈显著负相关($P < 0.05$)。结果表明,沉积物 pH 和总氮是影响陵水红树林大型底栖动物群落结构的主要理化因子,其次是水体盐度、水温以及沉积物全磷和铵态氮。

表 3 不同修复区红树林的理化参数

Tab. 3 Physicochemical parameters of mangrove forests in different restoration areas

样点 sample	理化指标 physicochemical properties	Sy	S17	S18	S19	S20	S21	
雨季 Rainy season	沉积物 Sediment	pH	8.30±0.08bc	8.53±0.05a	8.40±0.00ab	8.33±0.05b	8.13±0.05cd	8.00±0.08d
		有机质 OM	2.74±0.45b	6.07±0.97ab	6.24±1.73ab	6.49±2.13ab	7.92±0.22a	5.01±0.15ab
		铵态氮 NH+4-N	4.73±0.21c	5.75±0.22b	4.83±0.21c	7.61±0.09a	4.82±0.09c	2.76±0.12d
		全磷 TP	306.00±63.69a	285.33±3.86a	262.00±44.32a	265.67±25.63a	316.33±10.34a	204.67±36.48a
		总氮 TN	0.01±0.00b	0.04±0.00a	0.02±0.00ab	0.02±0.00ab	0.03±0.00ab	0.02±0.00ab
	水体 Water	水温 T	36.30±0.21	36.10±0.05	34.58±0.36	35.42±0.25	35.61±0.17	35.52±0.06
		盐度 PSU	32.56±0.13	32.74±0.02	32.64±0.02	30.40±0.04	31.73±0.00	32.43±0.03
		溶解氧 DO	9.23±0.07	9.24±0.07	8.90±0.22	10.52±0.18	9.58±0.21	11.33±0.16
旱季 Dry season	沉积物 Sediment	pH	8.93±0.06a	8.80±0.00b	8.87±0.06ab	8.50±0.00c	8.90±0.00a	8.80±0.00b
		有机质 OM	16.10±0.17b	18.43±0.15a	13.77±0.12c	8.09±0.04e	12.07±0.40d	7.27±0.13f
		铵态氮 NH+4-N	0.52±0.02bc	0.67±0.05b	1.19±0.09a	0.43±0.03c	0.56±0.06bc	1.04±0.07a
		全磷 TP	871.33±2.89c	938.33±2.08a	882.00±5.57b	395.33±3.51f	552.00±2.65d	517.00±2.65e
		总氮 TN	0.75±0.02c	0.90±0.03a	0.82±0.02b	0.40±0.02d	0.43±0.01d	0.33±0.00e
	水体 Water	水温 T	21.60±0.10	23.30±0.20	23.70±0.10	23.37±0.15	21.47±0.06	21.33±0.06
		盐度 PSU	32.69±0.06	33.03±0.08	33.32±0.11	33.14±0.10	33.14±0.02	33.05±0.09
		溶解氧 DO	8.12±0.03	10.67±0.36	8.32±0.15	9.65±0.30	7.34±0.27	8.58±0.03

注: $P < 0.05$ 。 Note: $P < 0.05$ 。

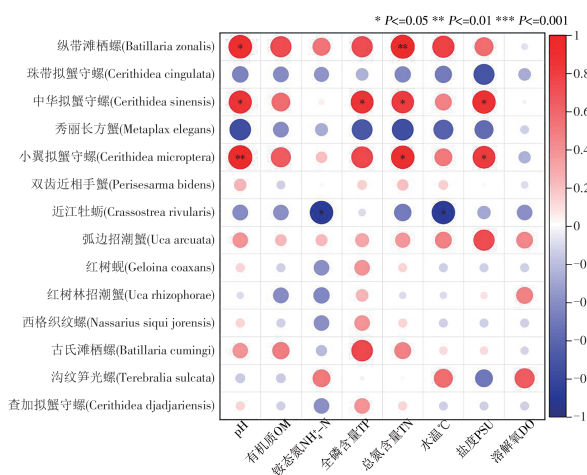


图5 大型底栖动物优势种与理化因子的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between dominant species of benthic macrofauna and physicochemical factors

3 讨论

3.1 不同修复年限红树林大型底栖动物群落结构变化 本文研究了大型底栖动物群落组成及优势种的时空变化,结果显示原生区和修复区红树林的大型底栖动物均以腹足纲和软甲纲动物为主,其次是双壳纲和多毛纲,这与郑梓琼等^[27-29]的研究结果一致。原生区的大型底栖动物物种数显著高于修复区,且修复区物种数和优势种数随着修复年限的增加呈上升趋势,表明退塘还林工程的实施对红树林生态系统中的底栖动物物种恢复有积极作用。通常底栖动物优势种群结构对群落结构的稳定性有巨大作用,优势种数目越多且数值越小,表明群落结构越复杂、越稳定^[26, 30]。随修复年限的增加,优势物种数随之增加,这说明群落结构更加稳定,且得到了有效修复。然而,修复区S18物种数较低且群落组成相对单一,优势种个体数也较低,表明该修复区的环境质量较差,需要重点关注。原因是S18靠近水泥厂,受人类活动干扰较大,该区域水体溶解氧明显低于其他区域,不利于大型底栖动物生存。表明退塘还林过程中,周围人类活动对修复区生态质量的影响不容忽视。

栖息密度可用于描述某一物种在一个生态系统中的空间占用情况,生物个体在一个特定空间中的分布情况,生物量用来描述生态系统中生物的总量,既生态系统中生物的总生产力。栖息密

度和生物量常作为评价海洋生物生态状况的依据^[31]。研究发现原生区和不同修复阶段的红树林大型底栖动物的栖息密度及生物量存在较大差异,总体上随修复年限的增加呈逐渐上升的趋势。其中修复年限最长的S17的大型底栖动物的生物量和栖息密度是最接近原生区水平,而修复年限最短的区域S21的生物量和栖息密度都处于最低水平,这与上述物种数及优势种的分析结果一致。再次表明随着退塘还林修复时间的增加,红树林生境质量正在逐渐变好。

研究结果显示大型底栖动物生物多样性指数的变化与修复年限存在一定的相关性。除S21外,修复区红树林的大型底栖动物多样性指数随修复年限的增加呈逐渐升高的趋势,表明随着退塘还林修复时间的增加,红树林的生态质量逐渐转好。物种多样性可以反映一个地区生态质量的优劣程度,还可以作为红树林修复的重要评价标准^[32]。

在季节分布上,旱季大型底栖动物物种数和栖息密度都高于雨季,可能是因为雨季温度较高(雨季水温比旱季高约14℃),沉积物中有机质含量降低。高温会加速有机体的代谢效率,促进水体和沉积物中有机质等物质分解,进一步导致大型底栖动物的栖息环境恶化,其群落结构的稳定性受到影响^[33]。此外,大型底栖动物在秋季(即旱季)大量繁殖,导致旱季物种数升高^[25, 34]。雨季优势种数、生物量和多样性指数高于旱季。这可能是因为雨季比旱季拥有更多的软甲纲个体,软甲纲数量增加的原因可能是雨季比旱季光照更少且盐度较低^[35]。而软甲纲拥有更大的个体,这使得雨季在拥有较低栖息密度的前提下,拥有更高的生物量。旱季单一物种的大量繁殖影响到其他物种的生存进而也导致生物多样性降低。

3.2 理化因子对大型底栖动物群落结构的影响 理化因子对大型底栖动物的群落结构有着重要影响,而理化因子本身也会随着时间和空间的不同而存在巨大差异^[36]。本研究,不同修复年限的红树林中理化因子存在显著差异。如,2017年修复区沉积物中的有机质、总氮、全磷和溶解氧均高于其他红树林区。相关性分析结果表明,沉积物pH和总氮是影响陵水红树林大型底栖动物群落结构的主要理化因子,其次是水体盐度、水温以及沉积物全磷和铵态氮。本研究结果与赵

晨辉等^[37]的研究结果一致,即在夏、秋、冬季中,盐度、水温和含氮营养盐是影响大型底栖动物群落结构的主要理化因子。而不同底栖动物对理化因子的响应有较大差别,对某些物种呈正响应的理化因子,可能对其他物种不能产生影响或者呈负响应^[26]。从季节上,旱季的沉积物pH值、有机质、全磷和总氮均高于雨季,而雨季铵态氮、水温和水中溶解氧要高于旱季。而水分也是影响生物生长和发育的重要理化因子,(雨季)降水量占全年的77%~85%^[38],大量降水导致红树林沉积物中营养物质含量被稀释,从而影响底栖动物生长。研究表明,水温不仅可以通过影响浮游植物和浮游动物的生长而间接影响底栖动物的摄食效率,还可直接影响耐受性差的底栖动物的活动能力,进而影响其生长速率。此外,盐度变化对狭盐性物种(包括底栖动物、鱼类和浮游植物)的分布具有胁迫限制作用^[39],从而影响大型底栖动物群落结构。含氮无机化合物对大型底栖生物具有一定的毒性效应,对海洋大型底栖动物的生长速率、繁殖和代谢均会产生影响。本研究表明pH是影响大型底栖动物生存的重要的理化因子,只有在pH适宜的情况下大型底栖动物才可以表现出较高的丰富度^[40],因此维持pH的稳定对于退塘还林过程中红树林的修复至关重要。

4 结 论

陵水退塘还林红树林修复区域共鉴定出大型底栖动物30种,隶属4纲9目18科。原生区和修复区红树林均以腹足纲和软甲纲动物为主,主要优势种有珠带拟蟹守螺、纵带滩栖螺、红树林招潮蟹等。大型底栖动物总体上以腹足纲为主,随着修复年限的增长大型底栖动物的优势种和生物多样性也发生相应的变化。红树林底栖动物群落结构有明显的季节性差异,旱季大型底栖动物物种数和栖息密度都高于雨季;而优势种数、生物量和多样性指数旱季却低于雨季。不同修复年限的红树林区域的环境因子有显著差异,沉积物pH和总氮是影响红树林大型底栖动物优势种分布的主要环境因子。综上所述:陵水退塘还林的红树林修复工程在一定程度上改善了修复区域的生态环境质量,促进了红树林生物多样性的恢复性增加,研究结果为科学评价红树林生态系统的修复提供了

科学依据。

参考文献:

- [1] GIRI C, OCHIENG E, TIESZEN L L, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(1): 154–159.
- [2] NAGELKERKEN I, BLABER S J M, BOUILLON S, et al. The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: a review [J]. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 155–185.
- [3] MAROIS D E, MITSCH W J. Coastal protection from tsunamis and cyclones provided by mangrove wetlands—a review [J]. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2015, 11(1): 71–83.
- [4] BARBIER E B. A global strategy for protecting vulnerable coastal populations [J]. *Science*, 2014, 345(6202): 1250–1251.
- [5] BARBIER E B. The protective service of mangrove ecosystems: a review of valuation methods [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 109(2): 676–681.
- [6] GEDAN K B, KIRWAN M L, WOLANSKI E, et al. The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm [J]. *Climatic Change*, 2011, 106(1): 7–29.
- [7] 方发之, 黎肇家, 桂慧颖. 海南红树林现状调查与研究 [J]. *热带林业*, 2022, 50(1): 42–49.
- [8] 吴后建, 刘世好, 贺东北, 等. 中国红树林监测研究进展与展望 [J]. *湿地科学与管理*, 2022, 18(1): 69–72.
- [9] 张乔民, 隋淑珍. 中国红树林湿地资源及其保护 [J]. *中国林业*, 2005(10): 13.
- [10] ALONGI D M. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 76(1): 1–13.
- [11] ALONGI D M, CHRISTOFFERSEN P, TIRENDI F. The influence of forest type on microbial-nutrient relationships in tropical mangrove sediments [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1993, 171(2): 201–223.
- [12] ALONGI D M, SASEKUMAR A, TIRENDI F, et al. The influence of stand age on benthic decomposition and recycling of organic matter in managed mangrove forests of Malaysia [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, 225(2): 197–218.
- [13] COCHARD R. On the strengths and drawbacks of tsunami-buffer forests [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(46): 18571–18572.
- [14] 马骏, 付荣恕. 大型底栖动物生态学研究进展 [J]. *山东农业科学*, 2010, 42(2): 78–81.
- [15] 徐姗姗, 陈作志, 黄小平, 等. 底栖动物对红树林生态系统的影响及生态学意义 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(4): 812–820.

- [16] 周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等. 深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的比较研究 [J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6511–6519.
- [17] DOLBETH M, CARDOSO P G, GRILO T F, et al. Long-term changes in the production by estuarine macrobenthos affected by multiple stressors [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 92(1): 10–18.
- [18] 赵小雨, 蔡立哲, 饶义勇, 等. 考洲洋人工种植红树林湿地大型底栖动物群落环境响应 [J]. 生态学报, 2023, 43(13): 5505–5516.
- [19] 陈国贵, 王文卿, 谷宣, 等. 漳江口红树植物群落周转对大型底栖动物群落结构的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4310–4317.
- [20] 史伟. 海南陵水红树林湿地资源现状及保护对策 [J]. 中南林业调查规划, 2021, 40(2): 51–54.
- [21] 周细平, 徐帅良, 吴培芳, 等. 九龙江口海门岛红树林湿地大型底栖动物群落生态研究 [J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(1): 21–29.
- [22] 李旭林, 郑康振, 周炎武, 等. 红树林恢复对潮滩表层沉积物氮素的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3163–3172.
- [23] 曹启民, 郑康振, 陈耿, 等. 红树林生态系统微生物学研究进展 [J]. 生态环境, 2008, 17(2): 839–845.
- [24] 张多鹏, 刘洋, 李正飞, 等. 长江上游支流赤水河流域底栖动物物种多样性与保护对策 [J]. 生物多样性, 2023, 31(8): 60–72.
- [25] 张葵, 周连凤, 陈威, 等. 雅砻江下游大型底栖无脊椎动物群落结构及与环境因子的关系 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(4): 1857–1866.
- [26] 李亚芳, 杜飞雁, 谷阳光, 等. 雷州半岛东南部海域春季大型底栖动物群落特征及其与环境因素的关系 [J]. 南方水产科学, 2016, 12(6): 33–41.
- [27] 郑梓琼, 唐以杰, 戚诗婷, 等. 深圳福田红树林大型底栖动物多样性研究 [J]. 湿地科学与管理, 2020, 16(3): 69–73.
- [28] 马坤. 海南东寨港红树林湿地大型底栖动物多样性的研究 [D]. 海口: 海南大学, 2011.
- [29] 陈国贵, 王文卿, 谷宣, 等. 闽三角红树林底栖软体动物共存格局及机制 [J]. 湿地科学与管理, 2021, 17(1): 9–13.
- [30] 杜飞雁, 王雪辉, 贾晓平, 等. 大亚湾海域大型底栖生物种类组成及特征种 [J]. 中国水产科学, 2011, 18(4): 877–892.
- [31] 龙诗颖, 修玉娇, 李瑶, 等. 黄河三角洲水质对底栖动物群落结构的影响 [J]. 环境科学学报, 2022, 42(1): 104–110.
- [32] 刘开珍. 大亚湾大型底栖动物数量长期变化研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- [33] 鲍思敏, 张凯, 丁城志, 等. 澜沧江下游补远江大型底栖动物群落结构的时空分布及其影响因素 [J]. 湖泊科学, 2024, 36(2): 536–550.
- [34] 张宇航, 彭文启, 彭帅, 等. 永定河流域大型底栖动物功能摄食类群时空分布及生态评价 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3433–3440.
- [35] 顾凯利. 海南东寨港红树植物群落间蟹类的分布特点及影响因素 [D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [36] 张坤, 崔玉洁, 陈圣盛, 等. 长江一级支流黄柏河大型底栖动物时空分布特征及其与环境因子的关系 [J]. 淡水渔业, 2022, 52(5): 3–16.
- [37] 赵晨辉, 王永生, 贾胜华, 等. 汕头东部近岸海域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 海洋环境科学, 2023, 42 (06): 853–863.
- [38] XU Y, DU A, WANG Z, et al. Effects of different rotation periods of *Eucalyptus* plantations on soil physiochemical properties, enzyme activities, microbial biomass and microbial community structure and diversity [J]. Forest Ecology and Management, 2020, 456: 117683.
- [39] 吕巍巍. 围垦及盐度淡化对长江口潮间带大型底栖动物影响的研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [40] 孙叶, 刘永, 李纯厚, 等. 珠江口大型底栖动物群落结构特征及影响因素 [J]. 南方水产科学, 2023, 19(5): 39–47.

Changes and influencing factors of macrobenthic community structure in mangrove forests returning ponds to forests

YIN Lianzheng^{1,2}, QIN Yongqiang³, SU Yuanyuan^{1,2}, LEI Jun^{1,2}, ZENG Ruohan^{1,2},
LI Ping², DIAO Xiaoping¹

(1. State Key Laboratory of Marine Resources Utilization in the South China Sea, Hainan University, Haikou, Hainan 570288;
2. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou, Hainan 570288; 3. College of Ecology and Environment, Hainan Normal University, Haikou, Hainan 570288, China)

Abstract: Due to the influence of human activities such as pond aquaculture, the mangrove forests in Lingshui,

Hainan Province have been seriously encroached. Since 2016, Lingshui has started to implement the ecological restoration project of mangrove wetlands by returning the ponds for aquaculture to the forests. In order to understand the characteristics of macrobenthic community changes and their relationship with environmental factors during mangrove restoration, surveys were made of benthic macrofauna in mangrove forests at five different restoration stages (2017—2021) and one natural mangrove area in December 2022 (dry season) and June 2023 (rainy season), respectively. A total of 30 species of benthic macrofauna belonging to 4 classes, 9 orders and 18 families were collected and identified. The main dominant species in both natural and restored mangrove forests are gastropods and mollusks, such as the pearl-banded crab snail, the longitudinal-banded beach snail, the mangrove fiddler crab, etc. The number of species, habitat density, biomass and diversity index of mangrove macrobenthos in the mangrove restoration area showed an increasing trend with the increase of the restoration period, indicating that the community structure of benthic macrofauna was becoming more and more stable and the quality of mangrove habitats has been improved in the return-pond-to-forest restoration project. Moreover, in terms of seasonal distribution, the number of macrobenthic species and habitat density were higher in the dry season than in the rainy season; whereas the number of dominant species, biomass, and diversity indices were lower in the dry season than in the rainy season. Correlation analysis showed that pH and total nitrogen content of the sediment were the main environmental factors affecting the distribution of mangrove macrobenthos. All the results showed that the mangrove restoration project of returning ponds to forests had improved to some extent the eco-environment quality of the mangrove restoration area and that the community structure of the benthic macrofauna was obviously correlated with the restoration time, but it will take a long time to recover to the level of natural mangrove forests. These results can provide basic information for conservation of mangrove benthos microfauna diversity and ecological restoration of the mangroves.

Keywords: benthic macrofauna; community structure; ecological restoration; mangrove; physiochemical factors

(责任编辑:钟云芳)