

利用潮间带大型底栖动物群落评估 茅尾海生态环境质量

甄文全^{①②} 张金凤^② 杨明柳^③ KWAN Kit Yue^{②*}

① 唐山师范学院海洋学院 唐山 063000; ② 广西北部湾海洋生物多样性养护重点实验室, 北部湾大学海洋学院, 北部湾海洋发展研究中心 钦州 535011; ③ 广西红树林研究中心, 广西科学院 北海 536000

摘要: 平陆运河是西部陆海新通道的一项重要工程, 茅尾海是平陆运河的重要支撑节点。本次调查潮间带大型底栖动物群落, 在评估茅尾海生态环境质量的同时, 又积累本海域大型底栖动物基线数据, 为平陆运河建设期、运营期的科学管理提供科学数据支撑。于 2020 年 10 月和 2021 年 1 月、4 月、7 月, 在钦州茅尾海东部岸线设置 4 个采样断面, 分别是仙岛公园、沙环村、滨海公园和康王庙村, 按照《海洋调查规范》(GB 12763.6-2007) 的要求对潮间带大型底栖动物进行采样调查和物种分类鉴定; 分析大型底栖动物群落组成、优势种组成及生物多样性指数。调查研究结果表明, 茅尾海潮间带大型底栖动物以节肢动物为主, 物种占比超过 41%, 个体数占比超过 87%, 优势种 ($I_{RI} > 1000$) 有麦克碟尾虫 (*Discapsuedes mackiei*)、台湾泥蟹 (*Ilyoplax formosensis*)、隆背大眼蟹 (*Macrophthalmus convexus*) 和四齿大额蟹 (*Metopograpsus quadridentatus*), 但优势种在 4 个断面分布不均, 仅麦克碟尾虫出现在各断面; 主要种 ($100 \leq I_{RI} < 1000$) 有 27 种, 其中仅扁平拟闭口蟹 (*Paracleistostoma depressum*)、背毛小头虫 (*Notodasus* sp.) 出现在各断面; 常见种 ($10 \leq I_{RI} < 100$) 有 19 种, 稀有种 ($I_{RI} < 10$) 有 8 种, 它们均分布不均; 辛普森多样性指数 (D) 和香农多样性指数 (H') 分别为 0.435 (0.183 ~ 0.704) 和 1.506 (0.747 ~ 2.256), 显著低于 2009 年相应指标, P 值分别为 0.004 和 0.048; Pielou 均匀度指数 (J) 均值为 0.475 (0.223 ~ 0.696), 与 2009 年的 Pielou 均匀度指数 (J) 没有显著差异 ($P = 0.109$)。综合丰度-生物量曲线 (ABC 曲线)、香农多样性指数 (H')、大型底栖动物污染指数 (I_{MP}) 推断茅尾海目前整体海域生态环境处于中等污染水平。综合上述指标, 认为目前茅尾海海域整体生态环境已属于中等程度污染。本次调查建立的茅尾海潮间带大型底栖动物数据库, 将为未来平陆运河的生态建设和科学运营提供支撑。

关键词: 大型底栖动物; 群落组成; 茅尾海潮间带; 生态环境质量

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2023) 03-390-12

Assessing Ecological Environmental Conditions of Maowei Sea, China Using Intertidal Macrobenthic Communities

ZHEN Wen-Quan^{①②} ZHANG Jin-Feng^② YANG Ming-Liu^③ KWAN Kit Yue^{②*}

基金项目 唐山师范学院科学研究基金项目成果 (No. 2023B19), 广西高校人文社会科学重点研究基地“北部湾海洋发展研究中心”项目;

* 通讯作者, E-mail: kityuekwan@bbgu.edu.cn;

第一作者简介 甄文全, 男, 副编审; 研究方向: 海洋动物多样性, 海洋污染监测; E-mail: 112670423@qq.com。

收稿日期: 2021-12-29, 修回日期: 2022-06-02 DOI: 10.13859/j.cjz.202303008

- ① *Ocean College of Tangshan Normal University, Tangshan 063000*; ② *Guangxi Key Laboratory of Beibu Gulf Marine Biodiversity Conservation, College of Marine Sciences, Beibu Gulf Ocean Development Research Centre, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011*;
③ *Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Science, Beihai 536000, China*

Abstract: [Objectives] During the 14th Five-Year Plan period, the Pinglu Canal in Guangxi will be a magnificent project for New International Land-Sea Trade Corridor in western China, and the Maowei Sea is a critical point of the Canal. Maoling River and Qin River flow toward the Maowei Sea. Land-sourced pollutants are inputted by these two rivers. The pollutants mainly include industrial wastewater and domestic sewage, as well as pesticides and fertilizers in agricultural irrigation areas, and nutrients and organic pollutants in surrounding shrimp-breeding pond. From 2010 to 2014, the water quality of the Maowei Sea was the worst, with pollution readings often reaching level four. The main factors that exceeded the state standard were inorganic nitrogen and active phosphate. The pH of some part of Maowei Sea also exceeded the state standard. Because the outlet to sea is narrow, and too much pollutants inputted, the routine tides from Beibu Gulf cannot effectively keep the water quality of the Maowei Sea at a healthy level. The community of macrobenthos in the Maowei Sea in 2009 was investigated, and it was believed that the Maowei Sea was in a clean to lightly polluted situation. Therefore, the present study aims to assess the ecological environmental level of the Maowei Sea using intertidal macrobenthic communities, and to collect the baseline data which would support the scientific management of the Pinglu Canal during construction and operation. **[Methods]** Intertidal macrobenthos were collected at four sampling sites along the eastern coastline of Maowei Sea, Qinzhou City, which included Sun Yat-Sen Park, Shahuan Village, Mangrove Park and Kangwangmiao Village, in October 2020 as well as in January, April and July 2021 (Fig. 1), according to the standard protocol for marine studies (GB 12763.6-2007). One sample line perpendicular to the shoreline is set for each site, and one sample is taken in the high tide zone, two samples are taken in the middle tide zone, and one sample is taken in the low tide zone. Then all animals from all samples mixed together, which represent the community of macrobenthos at the sampling site. Samplings were conducted once every season in every sample site for one year. All sites are outside mangroves or on bare beaches. The mud samples were filtered through sieves (mesh size: 0.5 mm) in the nearby tidal creeks. The macrobenthos samples in sediments were fixed in 5% formalin in the field. All specimens of macrobenthos were brought back to the laboratory. The collected macrobenthos were preserved in 75% ethanol for further examination in the laboratory. All specimens were identified by ourselves and some taxonomy experts. All specimens were weighed by electronic balance at 0.01 g accuracy. All specimens were counted and categorized to clarify the macrobenthic composition of each sampling site. Index of relative importance (I_{RI}) was calculated to clarify dominant species, main species, common species, and rare species. $I_{RI} = (p_i + w_i) f_i$, where p_i is the relative abundance of species i in the plot, w_i is the proportion of the weight of species i in the plot (%), and f_i is the percentage of the number of plot of species i in the total number of plots investigated (%). We defined $I_{RI} \geq 1000$ as dominant species, $100 \leq I_{RI} < 1000$ as main species, $10 \leq I_{RI} < 100$ as common species, and $I_{RI} < 10$ as rare species. Species with $I_{RI} \geq 100$ were considered as the important species in the fauna community. Simpson diversity index (D), Shannon diversity index (H'), Pielou evenness index (J) are used to scale the diversity of macrobenthos. Nonparametric Kruskal-Wallis and

Mann-Whitney analyses were performed on the macrobenthos biodiversity index data using SPSS 26.0. Then diversity of macrobenthic data was analyzed and compared to assess the overall environmental conditions of the Maowei Sea. Shannon's diversity index H' is used to assess environmental pollution, while $H' < 1$, heavy pollution; H' value of 1 to 2, moderate pollution; H' value of 2 to 3, mild pollution; $H' > 3$, clean. Meanwhile, macrozoobenthos pollution index (I_{MP}) assesses pollution level, while $I_{MP} < -6$, clean; $-6 \leq I_{MP} < 0$, light pollution; $0 \leq I_{MP} \leq 4$, moderate pollution; $I_{MP} > 4$, serious pollution. The multivariate analysis software PRIMER 6.0 was used to analyze the disturbance degree of macrobenthos community, and the abundance and biomass curve (ABC) was constructed. When the biomass dominance curve is above the abundance curve, W is positive, which means the community is not disturbed; on the contrary; when W is negative, it means that the community is severely disturbed and the biomass curve is below the abundance curve; When the curves overlap, the W value is close to 0, indicating moderate interference. **[Results]** Total of 3 084 macrobenthos individuals were collected from 4 sites in the intertidal zone of the Maowei Sea. According to the classification and identification, there are 6 phyla, 8 classes, 31 families, 51 genera and 58 species of macrobenthos in the Maowei Sea intertidal zone (Table 1). The average annual animal density is highest in Shahuan Village (6 340 ind/m²); and lower in Sun yat-sen Park (1 240 ind/m²), Mangrove Park (3 204 ind/m²) and Kangwangmiao Village (1 552 ind/m²). The macrobenthos composition in each sampling site is more than 50% arthropods, followed by annelids, about 10%, and molluscs, less than 2%. Small arthropods are the main group of macrobenthos in the intertidal zone of the Maowei Sea, accounting for 41.38% of the total species and 87.13% of the total individuals. However, the macrobenthos communities in the estuaries and intertidal zones of the Beibu Gulf in the past, were generally composed of molluscs, arthropods, and annelids in turn as the dominant groups. To date (Table 2), *Discapseudes mackiei*, *Ilyoplax formosensis*, *Macrophthalmus convexus*, *Metopograpsus quadridentatus* whose I_{RI} are more than 1000, are the dominant species, but dominant species were not evenly distributed in the four plots, and only *D. mackiei* appeared in each plot. 27 main species whose I_{RI} are more than 100 but less than 1 000 are listed in Table 2, *Paracleistostoma depressum*, *Notodasus* sp. appeared in each plot, however, the others were not evenly distributed in plots. 19 common species whose I_{RI} are more than 10 but less than 100 were found, and 8 rare species whose I_{RI} are less than 10 were found. According to Kruskal-Wallis analysis, the Simpson diversity index (D) and Shannon diversity index (H') values of Shahuan Village were all lower than other three sites (Table 3). The average indices of the Simpson diversity index (D) and Shannon diversity index (H') values were 0.435 (range 0.183 - 0.704), and 1.506 (range 0.747 - 2.256) respectively, in which the levels were significantly lower than those in 2009 ($P = 0.004$, and $P = 0.048$ for D and H' respectively). The Pielou evenness index (J) value was 0.475 (range 0.223 - 0.696) which was statistically similar to that in 2009 ($P = 0.109$). Overall consideration of abundance and biomass curve (ABC) (Fig. 2), Shannon diversity index (H') and macrozoobenthos pollution index (I_{MP}), environmental quality of the Maowei Sea is in moderate pollution. **[Conclusion]** Our results demonstrated that the intertidal areas of Maowei Sea were dominated by arthropods, which accounted for over 41% of the total species number and over 87% of the total abundance. The dominant species ($I_{RI} > 1 000$) included *D. mackiei*, *I. formosensis*, *M. convexus* and *M. quadridentatus*, but they were not evenly distributed in the four sites, and only *D. mackiei* appeared in each site. These biodiversity indices concluded that the

Maowei Sea is suffered from moderate pollution. The currently established intertidal macrobenthic database of Maowei Sea can support the ecological construction and scientific operation of the Pinglu Canal in future.

Key words: Macrobenthos; Community composition; Maowei Sea intertidal zone; Environmental pollution

我国“十四五”规划强调推进西部陆海新通道高质量建设，要全面形成南北贯通、陆海统筹、内外联动、协同高效的战略通道（国家发展和改革委员会 2021）。平陆运河是西部陆海新通道建设的一项重要工程，切合国家发展大战略，更利好于区域发展。该项目将最大限度利用钦江河段、拓宽河道出海。加强平陆运河沿线水域的基础生态学研究，实现生态惠民、生态利民、生态为民。钦州的茅尾海是以钦江和茅岭江为主要入湾径流的河口，区域面积约为 135 km²；茅尾海潮滩较多，生长着大片红树林，生态环境十分多样，这里生活着丰富的物种。根据钦州市海洋功能区划（2008 ~ 2020），茅尾海被划为增殖区；根据钦州市城市总体规划，茅尾海东部岸线为生活岸线，以及未来平陆运河的开通，都将对茅尾海内各种生物生存产生深远影响。

在过去 40 多年，我国 18 000 多千米海岸线上的潮间带已萎缩 37%（Song et al. 2020），形势越来越急迫。潮间带生态学研究越来越受到人们关注。潮间带是典型的陆海交汇处一个相当狭窄但具很高生产力的区域，通常是鸟类、鱼类和甲壳类动物的食源地、产卵育幼地、栖息地或越冬地。潮间带生物是河口生态系统食物链中重要一环，涨潮时，鱼类游入浅滩；退潮时，滩涂上群鸟聚食（Herman et al. 1999）。大型底栖动物在潮间带生态系统中分解碎屑，参与物质循环和能量流动，对环境变化敏感，迁移能力有限易于采集，对水环境有较好的指示作用，是海洋环境评价的常用指标之一。作为最重要的初级消费者，大型底栖动物还是鱼类、鸟类等更高营养级消费者的重要食物来源。潮间带大型底栖动物群落的组成、分布、物种多样性等与流域生境有密切关系，尤其受人类

活动影响大。对茅尾海大型底栖动物进行调查研究，是了解、保护和持续利用这片海域的重要方面，具有重要的现实意义。

越来越多的研究证实，底栖无脊椎动物在评估污染物对水环境影响方面具有关键作用（任久长等 1992, Duft et al. 2007, Özdilek et al. 2019）。近十多年来，茅尾海周边土地利用变化较大，对茅尾海生态环境产生深远影响。但是，利用茅尾海潮间带大型底栖动物群落特征评价本海域生态环境质量的研究却很少报道。迄今为止，仅 2007 和 2008 年对茅尾海潮间带动物进行一次较系统调查（庄军莲等 2009），其他的调查资料（王宗兴等 2010, 王迪等 2011）多为钦州湾外湾底栖动物情况，偶有设一个调查断面在湾口。因此，对茅尾海潮间带大型底栖动物进行定量调查，研究其群落物种组成与数量、多样性指数，评估茅尾海生态环境质量，为本海域物种多样保护以及可持续利用提供科学依据。同时，收集茅尾海大型底栖动物基线数据并建立生物监测数据库，为将来平陆运河的生态建设和科学运营提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 调查断面与站位的设置

茅尾海约一半时间为全日潮，近一半时间为半日潮，且平均最大潮高 1.61 m，平均最低潮高为 -0.80 m，多年平均潮差 2.40 m（中国海湾志编纂委员会 1993）。在茅尾海潮间带设置 4 个断面（仙岛公园、沙环村、滨海公园、康王庙村）（图 1）。由于茅尾海东岸的潮间带较狭窄，不易区分高中低潮带，因此于全日潮日在每个断面设 1 条垂直于岸线的样线，距岸的远近划分 3 个采样区，即近岸区 1 个样、中间区 2 个样、近水区 1 个样，混合所得大型底

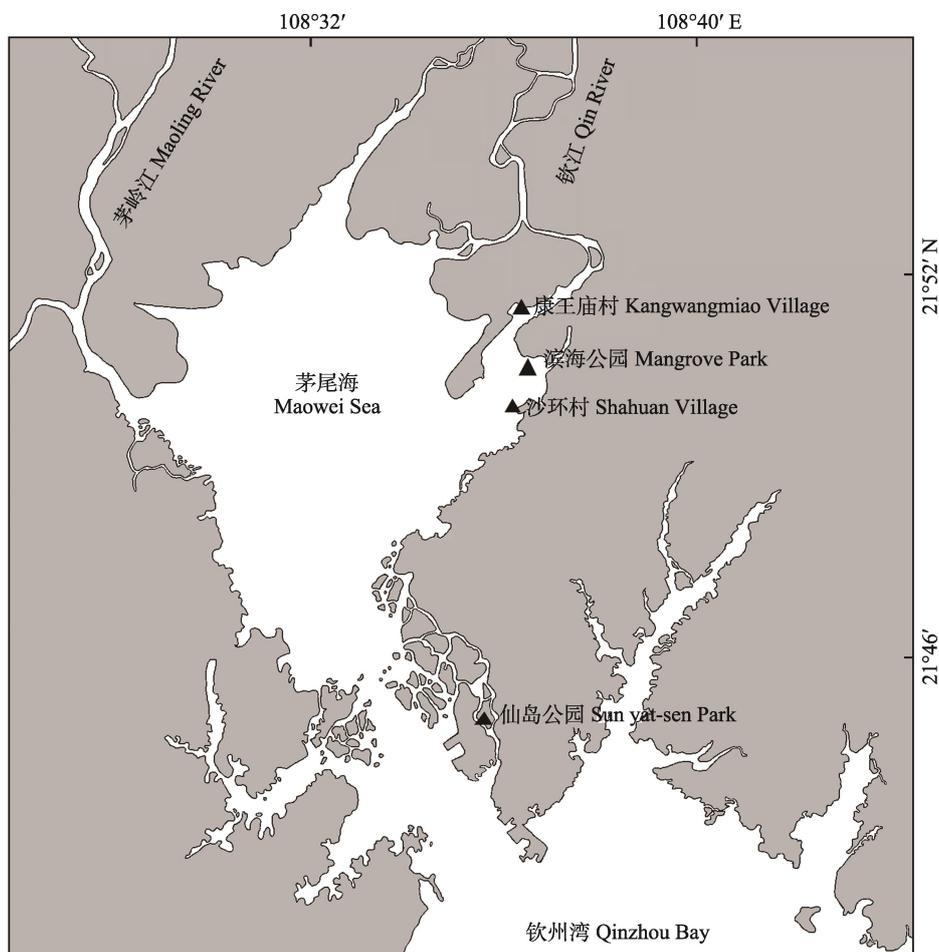


图 1 采样断面位置分布

Fig. 1 The location of sampling sites

栖动物样品作为该断面的数据。依据《海洋调查规范》(GB 12763.6-2007),自 2020 年 10 月到 2021 年 7 月,每个季度、每断面采集一次,调查一年。所有断面都在红树林外或裸滩上。仙岛公园是钦州港区居民游憩地,水上交通道围绕小岛约一半,低潮区有石质护堤,有多年积累的淤泥;与其他 3 个采样断面相隔远,主要是由于其间无适合的潮间带可设置断面,或潮水太高,或是人工岸线。沙环村是自然村落,居民以养蚝为生,经常去茅尾海上作业;此采样断面为自然岸线,泥沙质底。滨海公园是以红树林观赏为主的游憩地,红树林外缘为自然泥沙底质。康王庙村是采断面为自然岸线,为泥沙底质。

仙岛公园和康王庙村采样断面以软质泥为主,沙环村和滨海公园采样断面以稍硬的泥沙底为主。水质以冬春季为透光度高、夏秋季透光度下降,尤其是大雨过后水为浑浊状态。目前这 4 个断面的生态环境条件各自相对稳定。

1.2 采样方法

定量采样器面积为 25 cm × 25 cm、深度为 30 cm。在采样断面把采样器踩入泥沙,使采样器上沿与潮间带泥沙表面平齐;挖出采样器;将采样器内泥沙放进水桶内,做好标记;在水中,经孔径为 0.5 mm 的筛子反复淘洗,拣出滞留网上肉眼可见所有动物。将动物样品放入盛有 5% 甲醛样品盒内保存,加标签后带回实

实验室。采样人员均经过培训合格。

1.3 样品处理与鉴定

样品带回实验室后，按断面、潮带对样品进行分类清洗，并将样品转置于 75%乙醇溶液中长期保存。在实验室内进行物种分类鉴定，样品称重（湿重）、计算和资料分析均按照海洋生物调查规范（GB 12763.6-2007）的要求进行。标本保存于北部湾大学海洋动物标本馆。

1.4 数据处理与分析

按断面、采样时间、物种数、个体数、生物量（湿重）对数据进行系统整理。用 SPSS 26 对茅尾海潮间带大型底栖动物生物多样性指数数据进行非参数 Kruskal-Wallis、Mann-Whitney 分析。应用的生物多样性指数有：Simpson 多样性指数 $D=1-\sum p_i^2$ ，Shannon 多样性指数 $H'=-\sum p_i \log_2 p_i$ ，Pielou 均匀度指数 $J=H'/\log_2 S$ ，相对重要性指数（index of relative importance, I_{RI} ） $I_{RI}=(p_i+w_i)f_i$ ，式中， p_i 是断面内物种 i 的相对丰度，即 $p_i=n_i/N$ ， n_i 是断面内物种 i 的个体数量， N 是断面内所有物种的个体数量， w_i 是断面内物种 i 重量的占比（%）， f_i 是物种 i 出现的断面次数占调查总断面次数的百分比（%）。我们规定 $I_{RI} \geq 1000$ 的为优势种， $100 \leq I_{RI} < 1000$ 的为主要种， $10 \leq I_{RI} < 100$ 的为常见种， $I_{RI} < 10$ 的为稀有种。将 $I_{RI} \geq 100$ 的种类视为动物群落的主要种类。

用 Shannon 多样性指数（ H' ）对环境污染进行评价（蔡立哲等 2002）： $H' < 1$ 时，重度污染； $1 \leq H' \leq 2$ 时，中度污染； $2 < H' \leq 3$ 时，轻度污染； $H' > 3$ 时，清洁。

使用多元分析软件 PRIMER 6.0 对大型底栖动物群落受干扰程度进行分析，构建丰度-生物量比较曲线（abundance and biomass curves, ABC）。当生物量优势曲线在丰度曲线之上时， W 为正，意味着群落未受干扰；相反， W 是负值，则意味着群落受到严重干扰，生物量曲线在丰度曲线之下；两条曲线重叠时， W 值接近 0，意味着中度干扰（刘旭东等 2021）。

大型底栖动物污染指数（macrozoobenthos pollution index, I_{MP} ）（蔡立哲 2003）： $I_{MP}=10^{(2+k)} \left[\sum (A_i - B_i) \right] / S^{(1+k)}$ ，式中， I_{MP} 为大型底栖动物污染指数， A_i 和 B_i 分别是丰度和生物量优势度大小顺序的第 i 个累积百分优势度的数值， S 为全部物种数， k 为常数， $k=|\sum (A_i - B_i)| / \sum (A_i - B_i)$ ，当 $\sum (A_i - B_i)$ 为正数时， $k=1$ ； $\sum (A_i - B_i)$ 为负数时， $k=-1$ 。 $I_{MP} < -6$ ，清洁； $-6 \leq I_{MP} < 0$ ，轻度污染； $0 \leq I_{MP} \leq 4$ ，中度污染； $I_{MP} > 4$ ，严重污染。

2 结果

2.1 茅尾海潮间带大型底栖动物群落组成与优势种

在茅尾海潮间带 4 个断面共采集大型底栖动物 3 084 只个体，其群落组成见表 1。经分类鉴定，茅尾海潮间带大型底栖动物共有 6 门 8 纲 31 科 51 属 58 种。其中，节肢动物门 24 种，环节动物门 15 种，软体动物门 13 种，脊索动物门 2 种，纽形动物门 3 种，星虫动物门 1 种。根据物种个体相对数量的频率，对所有大型底栖动物进行了排序，截取相对重要指数值排序前 10 位的物种列于表 2，其中有 7 种是节肢动物。对全年数据分析得知，各采样断面的大型底栖动物群落中节肢动物均超过 80%；环节动物次之，10%左右；软体动物较低，2%左右。因此，节肢动物是茅尾海潮间带大型底栖动物群落的主要类群。

麦克碟尾虫、台湾泥蟹、隆背大眼蟹、四齿大额蟹的 I_{RI} 值大于 1 000，为优势种；但优势种在 4 个断面分布不均，仙岛公园有 1 个优势种，沙环村有 4 个优势种，滨海公园和康王庙村各有 2 个优势种；麦克碟尾虫在 4 个断面都是优势种，其 I_{RI} 值明显高，较其他优势种更有优势（表 2）。主要种（ $100 \leq I_{RI} < 1000$ ）有 27 种，其中仅有扁平拟闭口蟹、背毛小头虫在各断面均有出现，而其他 12 个主要在各断面中出现几率不同，在仙岛公园有 9 种，

表 1 茅尾海潮间带大型底栖动物群落的组成

Table 1 The macrobenthic community compositions in intertidal zone of Maowei Sea, Beibu Gulf, China

采样断面 Sampling site	软体动物 Mollusca		节肢动物 Arthropoda		环节动物 Annelida		其他 Others	
	物种数 Number of species	个体数占比 Percentage (%)						
仙岛公园 Sun yat-sen Park	5	3.87	10	81.94	9	11.61	5	2.58
沙环村 Shahuan Village	5	0.50	9	94.70	8	4.23	3	0.57
滨海公园 Mangrove Park	3	0.37	8	88.51	8	10.11	1	1.01
康王庙村 Kangwangmiao Village	4	3.09	14	86.86	10	9.28	1	0.77

表 2 茅尾海潮间带大型底栖动物群落的主要种类

Table 2 The important species of macrobenthos in the intertidal zone of Maowei Sea, Beibu Gulf, China

序号 Number	物种 Species	相对重要性指数 index of relative importance, I_{RI}			
		仙岛公园 Sun yat-sen Park	沙环村 Shahuan Village	滨海公园 Mangrove Park	康王庙村 Kangwangmiao Village
1	麦克碟尾虫 <i>Discapseudes mackiei</i>	6 798	10 251	10 832	5 154
2	台湾泥蟹 <i>Ilyoplax formosensis</i>	673	1 400	2	2 435
3	隆背大眼蟹 <i>Macrophthalmus convexus</i>	2	1 407	1 690	103
4	四齿大额蟹 <i>Metopograpsus quadridentatus</i>	1	1 510	1	495
5	扁平拟闭口蟹 <i>Paracleistostoma depressum</i>	779	315	613	222
6	双齿围沙蚕 <i>Perinereis aibuhitensis</i>	204	102	776	97
7	湛江枝吻纽虫 <i>Polydendorrhynchus zhanjiangensis</i>	79	486	758	1
8	谭氏泥蟹 <i>Ilyoplax deschampsii</i>	1	5	2	639
9	日本大眼蟹 <i>Macrophthalmus japonicus</i>	591	1	1	40
10	岩虫 <i>Marphysa sanguinea</i>	546	128	0	1
11	背毛小头虫 <i>Notodasus</i> sp.1	308	103	528	108
12	彩拟蟹守螺 <i>Iridona iridescens</i>	513	28	2	27
13	短指和尚蟹 <i>Mictyris brevidactylus</i>	1	0	475	0
14	宽身大眼蟹 <i>Macrophthalmus abbreviatus</i>	1	0	1	382
15	小头虫 <i>Capitella</i> sp.2	346	1	2	13
16	双齿相手蟹 <i>Parasesarma bidens</i>	1	0	1	343
17	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	1	43	2	329
18	悦目大眼蟹 <i>Macrophthalmus erato</i>	1	0	1	279
19	四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>	269	0	1	0
20	齿大眼蟹 <i>Macrophthalmus dentatus</i>	259	1	2	40
21	紫游螺 <i>Neripteron violaceum</i>	1	0	0	225
22	彩虹明樱蛤 <i>Tellina iridescens</i>	194	1	17	0
23	印度小头虫 <i>Barantolla</i> sp.1	35	65	109	190
24	绒螯近方蟹 <i>Hemigrapsus penicillatus</i>	1	0	0	178
25	棕蚶 <i>Barbatia amygdalumtostum</i>	1	47	0	178
26	刺镜蛤 <i>Dosinia aspera</i>	176	0	1	0
27	腺带刺沙蚕 <i>Neanthes glandicincta</i>	2	114	80	161
28	丝异须虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	67	79	113	142
29	秃毛小头虫 <i>Baldia</i> sp.1	1	21	2	131
30	明秀大眼蟹 <i>Macrophthalmus definitus</i>	1	0	129	0
31	孤边招潮蟹 <i>Tabuca arcuata</i>	1	0	1	108

I_{RI} 数值为四舍五入。 I_{RI} value are rounded off in the table.

表 3 茅尾海 4 断面大型底栖动物多样性指数比较

Table 3 The biodiversity index of intertidal macrobenthos among 4 sample sites in Maowei Sea, Beibu Gulf, China

采样断面 Sampling site	物种数 Number of species	密度 Density (ind/m ²)	辛普森多样性指数 Simpson diversity index (<i>D</i>)	香农多样性指数 Shannon diversity index (<i>H'</i>)	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index (<i>J</i>)
仙岛公园 Sun yat-sen Park	29	1 240	0.581 ^a	1.985 ^a	0.612 ^a
沙环村 Shahuan Village	25	6 340	0.183 ^b	0.747 ^b	0.223 ^b
滨海公园 Mangrove Park	20	3 204	0.271 ^{ab}	1.037 ^{ab}	0.370 ^{ab}
康王庙村 Kangwangmiao Village	29	1 552	0.704 ^a	2.256 ^a	0.696 ^a
均值 Mean			0.435	1.506	0.475

标注不同字母表示数值之间有显著差异, $P < 0.05$ 。Significance ($P < 0.05$) is represented by different lowercase letters.

在沙环村有 4 种, 在滨海公园有 6 种, 在康王庙村有 13 种。常见种 ($10 \leq I_{RI} < 100$) 有 19 种, 稀有种 ($I_{RI} < 10$) 有 8 种 (表 2)。

2.2 茅尾海潮间带大型底栖动物多样性指数

从年均动物密度来看, 沙环村最高, 为 6 340 ind/m²; 仙岛公园、滨海公园和康王庙村较低, 分别为 1 240 ind/m²、3 204 ind/m² 和 1 552 ind/m²。比较 4 个采样断面之间大型底栖动物多样性指数 (表 3), 经 Kruskal-Wallis 分析, 沙环村的辛普森多样性指数 (*D*)、香农多样性指数 (*H'*) 和 Pielou 均匀度指数 (*J*) 均较低, 沙环村的辛普森多样性指数 (*D*) 显著低于仙岛公园和康王庙村的辛普森多样性指数 (*D*); 沙环村的香农多样性指数 (*H'*) 显著低于仙岛公园和康王庙村的香农多样性指数 (*H'*); 沙环村的 Pielou 均匀度指数 (*J*) 显著低于仙岛公园和康王庙村的 Pielou 均匀度指数 (*J*)。

仙岛公园和滨海公园香农多样性指数 (*H'*) 介于 1~2, 判断为中度污染; 沙环村香农多样性指数 (*H'*) 小于 1, 判断为重度污染; 康王庙村香农多样性指数 (*H'*) 介于 2~3, 判断为轻度污染。四个断面的香农多样性指数 (*H'*) 平均介于 1~2, 判断茅尾海整体环境为中度污染。计算得大型底栖动物污染指数 I_{MP} 为 1.79, 依此再次判断茅尾海环境为中度污染。

生物多样性指数除受物种数量及其密度的影响外, 还与多种环境因素有关。仙岛公园和

康王庙村的大型底栖动物辛普森多样性指数 (*D*)、香农多样性指数 (*H'*)、Pielou 均匀度指数 (*J*) 明显高于沙环村, 可能是由于仙岛公园位于茅尾海海水进出口以及康王庙村位于钦江入海的河口区域有关, 这样的潮间带水动力条件好, 而沙环村断面上人为活动较频繁, 更加导致生物多样性指数明显下降。

2.3 茅尾海潮间带大型底栖动物丰度-生物量比较曲线 (ABC 曲线)

利用 PRIMER 6.0 软件对大型底栖动物群落受干扰程度进行分析 (图 2), 物种数累积到 30 种时, 物种丰度和生物量进入平台期, 说明样本量充分; 丰度曲线起点在 81% 处、生物量曲线起点在 16% 处, 表明优势种是个体较小

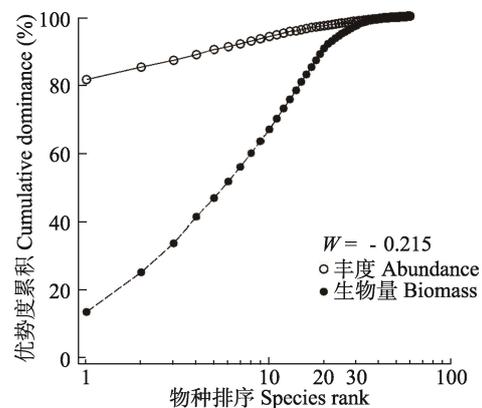


图 2 物种丰度-生物量比较 (ABC)

Fig. 2 Species abundance and biomass curve (ABC)

的种类; W 值为负, 且丰度曲线起点远高于生物量曲线起点, 仅在曲线尾部靠近, 生物量优势度曲线一直在丰度优势度曲线之下, 表明茅尾海大型底栖动物群落处于极不稳定状态, 应该是受到严重干扰。

3 讨论

3.1 潮间带大型底栖动物群落组成的变化

以往北部湾海域各河口和湾口潮间带的大型底栖动物群落组成一般依次以软体动物、节肢动物、环节动物为优势类群(庄军莲等 2009, 何斌源等 2013, 赖廷和等 2019)。然而, 本次调查所获大型底栖动物在科、属、种的数量均有所降低; 茅尾海潮间带的大型底栖动物优势种类群不再是软体动物, 而是节肢动物, 与长江口的崇明岛大型底栖动物群落组成类似(安传光等 2008)。这可能与潮间带节肢动物中活动能力强、对盐度变化适应能力强的蟹类和耐污能力强的原尾虫类数量较多有关; 也可能是过度捕捞一些经济型贝类所致, 如彩虹明樱蛤 (*Moerella iridescens*)、文蛤 (*Meretrix meretrix*)、青蛤 (*Cyclina sinensis*) 等。2009 年茅尾海潮间带大型底栖动物总数为 81 种(庄军莲等 2009), 而现在只有 58 种。海豆芽 (*Lingula unguis*) 一般生活在水质条件较好的环境, 在本次调查并未发现。然而, 社会经济更发达的珠江河口潮间带大型底栖动物群落多年来仍是软体动物占第一位(周细平等 2019)。因此, 不同时间、不同地点的潮间带大型底栖动物群落组成与变动情况, 较难比较出一种一致性结果, 也鉴于大型底栖动物的活动性差的特点, 需要加强本地大型底栖动物群落的长期性研究。

生境的改变和人为干扰被认为是生物多样性下降、密度和生物量锐减的主要原因。包括水质在内的环境质量变差会致使一些物种数量减少甚至区域性灭绝, 进而使大型底栖动物群落组成简单化、优势种变少。有些研究表明, 围海活动会降低海洋生物多样性(李纯厚等

2005)。茅尾海东岸城市化推进不断改变着岸线本质, 硬质的混凝土、大石块的岸线长度有所增加, 可能会挤占潮间带大型底栖动物的生存空间。然而, 茅尾海是近江牡蛎的天然育苗场, 沿岸与水下礁石有利于牡蛎着生, 也有利于对虾、石斑鱼的野外自然繁育。所以, 在茅尾海区域增加的石质岸线的综合生态与经济效应, 仍需进一步研究。

3.2 潮间带大型底栖动物优势种与指示物种

本研究中发现节肢动物是目前茅尾海潮间带大型底栖动物的最主要类群, 其物种数占总物种数的 41.38%, 其个体数占总个体数的 87.13%。本次调查显示, 麦克碟尾虫成为茅尾海潮间带大型底栖动物群落的唯一优势种, 并且在 4 个采样断面大量出现, 其个体数占本断面所有大型底栖动物总个体数 50% 以上。这与历史资料(庄军莲等 2009) 明显不同。因此, 目前茅尾海潮间带大型底栖动物群落的优势种单一化、个体小型化现象极为明显, 主导群落的种类越少, 群落的多样性水平越低(杜飞雁等 2008)。

虽然在茅尾海首次发现麦克碟尾虫, 但是麦克碟尾虫在我国沿海红树林区域并不罕见, 并且在一些地区一定季节会成为优势种, 如广东珠海鹤洲(王卉等 2013)、淇澳-担杆岛(Wang et al. 2010)。广东横琴岛麦克碟尾虫在红树林人工恢复区全年均是优势种, 在自然河道内全年内均不是优势种(罗章凤等 2017)。这表明, 麦克碟尾虫较易适应变动环境, 容易出现在一些底质被经常搅动的环境, 如裸滩、河口等。在本研究的 4 个断面中仅有麦克碟尾虫 1 个优势种, 暗示茅尾海整体环境处于较大的扰动状态。

本研究中, 沙环村和滨海公园的麦克碟尾虫密度明显高于淇澳-担杆岛的麦克碟尾虫密度 ($1\,432\text{ ind/m}^2$) (Wang et al. 2010)。从采集记录看, 麦克碟尾虫遍布茅尾海潮间带以及支流近海区域。麦克碟尾虫是一个广温性和广盐性种类, 可以在 $3\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、盐度 $5.1\text{‰}\sim 18.5\text{‰}$

的环境中生存 (Wang et al. 2010)。麦克碟尾虫个体小, 数量大, 耐污力强, 对环境变化敏感, 可能是一种较好的指示环境污染的潜在物种。

台湾泥蟹、谭氏泥蟹、扁平拟闭口蟹以及几种大眼蟹成为茅尾海潮间带主要物种, 它们均是潮间带挖洞穴潜藏的小型蟹类 (安传光 2008), 对底质的物质循环有一定的正向作用。此外, 本研究中发现 5 属 5 种小头虫。小头虫属于世界性分布、生活史明确、生命周期短、实验室内易养殖, 从 1916 年就开始作为海洋污染的指示物种 (Reish 1960)。小头虫耐污染能力强, 也耐低氧, 对环境变化敏感, 是世界范围内公认的海洋环境污染指示生物 (Seaver 2016)。小头虫在国内也成为评价水质或有机污染物的工具 (蔡文倩 2015)。然而针对茅尾海生态环境评估与监测中还未开展小头虫种群或群落的相关研究。

3.3 大型底栖动物的多样性指数指示环境污染程度

大型底栖动物对环境变化敏感且脆弱, 是河口生态系统的重要组成部分, 群落变动能反映环境变迁 (Dittmann 2000)。本研究中的茅尾海 4 个采样断面的辛普森多样性指数 (D)、香农多样性指数 (H') 均明显低于 2009 年相应指数 (庄军莲等 2009), 说明目前茅尾海生态环境质量较 2009 年显著下降。因此, 推断茅尾海生态环境在过去的十年间受到较为严重干扰。

有些学者建议用 Shannon 指数评价海域水质环境受污染程度 (蔡立哲等 2002)。据此标准, 2009 年沙环村 ($H' = 3.06$) 属于清洁级, 背风湾 (附近是仙岛公园) ($H' = 1.94$) 为中度污染, 大铜锣石 (附近是滨海公园) ($H' = 2.88$) 为轻度污染, 南定坪 (背对面是康王庙村) ($H' = 3.68$) 为清洁级 (庄军莲等 2009)。然而, 目前仙岛公园 ($H' = 1.985$) 和滨海公园 ($H' = 1.037$) 已是中度污染, 沙环村 ($H' = 0.747$) 已是重度污染, 康王庙村 ($H' = 2.256$) 为轻度污染, 对应各调查点的污染程度均呈加重状态。经 Mann-Whitney 检验分析, 与 2009 年相应多

样性指数 (庄军莲等 2009) 相比, 香农多样性指数 (H') 显著降低 ($P = 0.048$)。因此, 判断茅尾海海水质量整体上较十年前污染加重。

有研究表明, 随着水体的富营养化增加, 底栖动物群落会逐渐被小个体的耐污种类所主导, 且具有趋于简单化的演替趋势 (蔡永久等 2010)。2020 年度广西海洋环境质量报告 (广西壮族自治区海洋环境监测中心站 2021) 中也指出, 茅尾海水域 pH、无机氮和活性磷酸盐超二类水质因子水平; 60 个近岸监测点位监测表明, 茅尾海处于轻度富营养化水平。本研究表明, 茅尾海水域已对大型底栖动物产生了显著影响, 在以往的钦州湾外湾大型底栖动物群落调查已有所体现 (黄驰等 2017)。十年前茅尾海还处在比较健康状态 (张文主等 2014), 而目前茅尾海整体处于中度以上污染水平。

北部湾是半封闭式海湾, 海流弱、水交换速度差, 污染物不易消纳, 生态环境相对脆弱。茅尾海是钦州湾的内海, 海水稀释污染物的能力更弱。茅尾海存在比较明显的环境污染和生态破坏等问题。茅尾海由于承接了茅岭江、钦江两条河流中的污染物、工业废水和生活污水以及农业灌溉区农药、化肥, 周边虾塘养殖区等营养盐和有机污染物的大量输入 (Yang et al. 2019), 所以即使有潮汐带来的清洁海水也不能有效地使茅尾海水环境质量处于健康水平。2010 至 2014 年茅尾海水质最差, 经常出现四类或劣四类水质, 主要超标因子是无机氮和活性磷酸盐, 部分海域 pH 超标 (谢华 2018)。另有研究表明, 钦州海域海水在北部湾区域处于高位水平, 个别重金属对贝类的污染已达中等为害水平, 并且重金属污染没有明显的季节性 (徐轶肖等 2019)。输入性污染物造成茅尾海水环境污染的同时, 也造成了生物多样性在一定程度上减少和栖息地环境质量的下降。

3.4 底栖动物多样性在环境监测与评价中的价值

茅尾海素以生产大蚝闻名全国, 本水域生态环境质量直接关系养蚝产业的生存与发展。钦州产贝类已经受到重金属一定程度上的污染

(徐轶肖等 2019)。物理或化学监测法可以确定污染物的浓度、来源以反映环境质量状况,但这些物理、化学指标并不能直接反映污染物对水生生物的影响,也不能解释污染物与水生生物的协同或拮抗作用(计叶等 2019)。

生物监测法能综合地反映环境因素的联合作用,甚至比理化监测更敏感。水环境中污染物常以不同的化学形式存在,其流动性、潜在毒性、生物利用度有明显差异(Jia et al. 2015)。污染物进入生态环境后,在生物种群和群落水平上,会引起种群数量密度、结构和物种比例的变化,引起群落中优势种群、生物量、物种多样性的改变。动物避免污染伤害的主要方式为逃离和耐受,当达到耐受极限时,动物或离开原栖息地或死亡,同时引起栖息地动物群落的变化。所以,以生物对环境反应的视角,研究底栖动物群落可为环境质量的监测和评估提供依据。另外,通过大型底栖动物群落监测,还可分析污染物的动物利用度,可以直接反映污染物的效应,从而反映出其潜在的风险。例如,利用生物富集效应,可检测出二噁英类高毒性污染物的含量(张欣然 2019)。进行生物监测还能更加深入地研究水体或环境质量对生物的组织、器官等的影响,能够更加真实的反映出当地的生态环境状况,为环境治理提供科学依据。

致谢 感谢刘勳伶高级工程师、吴旭文博士、张均龙博士、曾宥维博士对部分底栖动物的鉴定;感谢北部湾大学海洋学院生物制药专业的曾子豪、韦鹏飞、苏佳、熊嘉、陈宇凤、胡棕梁、黄君萱、李泽鑫、刘靖楠、叶亭廷、严文清等同学进行野外采样工作;感谢王俊杰博士、王薛平博士、黄星博士在数据处理方面的帮助。

参 考 文 献

- Dittmann S. 2000. Zonation of benthic communities in a tropical tidal flat of north-east Australia. *Journal of Sea Research*, 43(1): 33–51.
- Duft M, Schmitt C, Bachmann J, et al. 2007. Prosobranch snails as test organisms for the assessment of endocrine active chemicals-an overview and a guideline proposal for a reproduction test with the freshwater mudsnail *Potamopyrgus antipodarum*. *Ecotoxicology*, 16(1): 169–182.
- Herman P M J, Middelburg J J, van de Koppel J, et al. 1999. Ecology of estuarine macrobenthos // Nedwell D B, Raffaelli D G. *Advances in Ecological Research*. London: Academic Press, 195–240.
- Jia A, Escher B I, Leusch F D L, et al. 2015. *In vitro* bioassays to evaluate complex chemical mixtures in recycled water. *Water Research*, 80: 1–11.
- Özdilek Ş Y, Demir N, Gürkan S E. 2019. Assessment of pollution biomarker and stable isotope data in *Mytilus galloprovincialis* tissues. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2): 60–69.
- Reish, D J. 1960. The use of marine invertebrates as indicators of water quality. // Pearson E A. *Waste Disposal in the Marine Environment*. New York: Pergamon Press, 92–103.
- Seaver E C. 2016. Annelid models I: *Capitella teleta*. *Current Opinion in Genetics & Development*, 39: 35–41.
- Song S, Wu Z F, Wang Y, et al. 2020. Mapping the rapid decline of the intertidal wetlands of China over the past half century based on remote sensing. *Frontiers in Earth Science*, 8(16): 1–12.
- Yang B, Zhou J B, Lu D L, et al. 2019. Phosphorus chemical speciation and seasonal variations in surface sediments of the Maowei Sea, northern Beibu Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 141: 61–69.
- Wang C F, Ren X Q, Xu R L. 2010. Composition, abundance, and diversity of the Peracarida on different vegetation types in the Qi'ao-Dan'gan island mangrove Nature Reserve on Qi'ao Island in the Pearl River estuary, China. *Zoological Studies*, 49(5): 608–615.
- 安传光, 赵云龙, 林凌, 等. 2008. 崇明岛潮间带夏季大型底栖动物多样性. *生态学报*, 28(2): 577–586.
- 蔡立哲, 马丽, 高阳, 等. 2002. 海洋底栖动物多样性指数污染程度评价标准的分析. *厦门大学学报: 自然科学版*, 41(5): 641–646.
- 蔡立哲. 2003. 大型底栖动物污染指数(MPI). *环境科学学报*, 23(5): 625–629.

- 蔡文倩, 朱延忠, 刘静, 等. 2015. 海洋生物环境指示作用的研究进展. 广西科学, 22(5): 532-539.
- 蔡永久, 姜加虎, 张路, 等. 2010. 长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性. 湖泊科学, 22(6): 811-819.
- 杜飞雁, 王雪辉, 李纯厚, 等. 2008. 大亚湾大型底栖动物物种多样性现状. 南方水产, 4(6): 33-41.
- 广西壮族自治区海洋环境监测中心站. 2021. 2020 年度广西海洋环境质量报告. 4.16. [EB/OL]. [2021-12-29]. http://xxgk.beihai.gov.cn/bhshjbhj/tszl_84510/hbxxgk/hyhjilzcx/202102/t20210207_2376413.html.
- 国家发展和改革委员会. 2021. 关于印发《“十四五”推进西部陆海新通道高质量建设实施方案》的通知. [EB/OL]. [2021-08-17]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202109/t20210902_1295952_ext.html.
- 何斌源, 赖廷和, 王欣, 等. 2013. 廉州湾滨海湿地潮间带大型底栖动物群落次级生产力. 生态学杂志, 32(8): 2104-2112.
- 黄驰, 江志坚, 张景平, 等. 2017. 钦州湾春季和秋季大型底栖动物群落结构特征. 渔业研究, 39(4): 272-282.
- 计叶, 吴雨蒙, 许秋瑾. 2019. 水环境的生物监测方法及其应用. 环境工程技术学报, 9(5): 616-622.
- 赖廷和, 何斌源, 黄中坚, 等. 2019. 防城河口湾潮间带大型底栖动物群落结构研究. 热带海洋学报, 38(2): 67-77.
- 李纯厚, 贾晓平, 杜飞雁, 等. 2005. 南海北部生物多样性保护现状与研究进展. 海洋水产研究, 26(3): 73-79.
- 刘旭东, 汪进生, 孙立娥, 等. 2021. 渤海山东近岸海域大型底栖动物的群落结构及多样性分析. 海洋环境科学, 40(6): 929-936, 946.
- 罗章凤, 方展强. 2017. 珠海横琴岛芒洲湿地红树林人工恢复期大型底栖动物群落结构研究. 热带海洋学报, 36(3): 61-72.
- 任久长, 许崇任, 蔡晓明, 等. 1992. 浮选剂污染河段大型底栖无脊椎动物的群落特征及其对水质的评价. 环境科学学报, 12(2): 150-156.
- 王迪, 陈丕茂, 马媛. 2011. 钦州湾大型底栖动物生态学研究. 生态学报, 31(16): 4768-4777.
- 王卉, 钟山, 方展强. 2013. 珠海鹤洲水道沿岸红树林湿地大型底栖动物群落特征. 生态学报, 33(21): 6913-6924.
- 王宗兴, 孙丕喜, 姜美洁, 等. 2010. 钦州湾秋季大型底栖动物多样性研究. 广西科学, 17(1): 89-92.
- 谢华. 2018. 广西省近岸海域海水环境质量与入海陆域污染影响对策研究. 环境科学与管理, 43(3): 30-36.
- 徐轶肖, 张腾, 赵鹏, 等. 2019. 北部湾贝类重金属污染特征及健康风险评价. 环境科学与技术, 42(增刊 2): 38-44.
- 张文主, 吴彬. 2014. 广西茅尾海湿地生态系统健康评价. 钦州学院学报, 29(8): 6-10, 33.
- 张欣然. 2019. 探究生物检测对生态文明建设的意义——以水体污染之二噁英类化合物为例. 化工管理, (20): 23-25.
- 中国海湾志编纂委员会. 1993. 中国海湾志-第十二分册-广西海湾. 北京: 海洋出版社, 158.
- 周细平, 李贞, 吴培芳, 等. 2019. 珠江河口区大型底栖动物群落结构. 生物多样性, 27(10): 1112-1121.
- 庄军莲, 何碧娟, 许铭本. 2009. 广西钦州茅尾海潮间带生物生态特征. 广西科学, 16(1): 96-100.