

广东江门市主要淡水河流浮游动物群落结构特征

王 腾^{1,2}, 刘 永^{1,2}, 全秋梅^{1,3}, 林 琳¹, 肖雅元¹, 李纯厚^{1,2}, 李 鸿⁴

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室/广东珠江口生态系统野外科学观测研究站/广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458; 3. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 4. 湖南省水产科学研究所, 湖南 长沙 410153)

摘要: 为了解江门主要淡水河流浮游动物的群落结构特征, 该研究于 2016 年 12 月至 2017 年 10 月对江门市的西江、潭江和银洲湖进行了浮游动物群落结构调查。结果显示, 流域内共分布有浮游动物 157 种, 其中轮虫 74 种、原生动物 43 种、枝角类 21 种、桡足类 19 种。浮游动物年平均密度和生物量分别为 $1\,651\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中原生动物的密度最高 ($1\,164\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$), 轮虫和桡足类的生物量最高, 分别为 0.37 和 $0.31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。大型浮游动物种类数较历史水平出现较显著下降, 而小型浮游动物种类数较历史水平出现较大幅度上升。浮游动物密度较历史水平显著增加, 而生物量较历史水平显著减少。各采样点的 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 为 $1.05\sim 4.36$, Pielou 均匀度指数 (J') 为 $0.23\sim 1.15$ 。研究区域共有 30 种优势种, 以原生动物最多 (15 种); 优势种中有 10 种为富营养水体指示种, 全部为轮虫。优势种中富营养水体的指示种仅分布在潭江和银洲湖, 表明西江水体质量最优。

关键词: 浮游动物; 群落结构; 生物多样性; 潭江; 银洲湖; 西江

中图分类号: X 826

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Community structure characteristics of zooplankton in main freshwater rivers of Jiangmen City, Guangdong Province

WANG Teng^{1,2}, LIU Yong^{1,2}, QUAN Qiumei^{1,3}, LIN Lin¹, XIAO Yayuan¹, LI Chunhou^{1,2}, LI Hong⁴

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Observation and Research Station of Pearl River Estuary Ecosystem, Guangdong Province/Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China; 3. College of Fisheries and Life, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Hunan Fisheries Science Institute, Changsha 410153, China)

Abstract: In order to understand the community structure of zooplankton in the main freshwater rivers of Jiangmen, Guangdong Province, we investigated the zooplankton community structure in Tanjiang River, Yinzhou Lake and Xijiang River from December 2016 to October 2017. Altogether 157 species of zooplankton had been observed, including 74 species of rotifers, 43 species of pro-

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-04-27

资助项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费项目 (2018HY-XKQ01-7, 2020TD16); 国家重点研发计划项目 (2019YFD0901201); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项 (GML2019ZD0605); 广东省科技计划项目 (2019B121201001); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (2021SD04)

作者简介: 王 腾 (1986—), 男, 博士, 助理研究员, 从事海洋鱼类保护生物学研究。E-mail: wt3074589@163.com

通信作者: 李纯厚 (1963—), 男, 研究员, 从事水生生物学研究。E-mail: chunhou@scsfri.ac.cn

tozoa, 21 species of cladocers and 19 species of copepods. The annual average density and biomass of zooplankton were 1 651 and $0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The density of protozoa was the highest ($1\ 164 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$). And the highest biomass of rotifers and copepods was 0.37 and $0.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Compared with the historical level, the species number of large zooplankton had decreased significantly, while the small zooplankton had increased significantly. And the density of zooplankton increased significantly, while their biomass decreased significantly. The Shannon-Wiener diversity index H' was 1.05–4.36, and the Pielou index J' was 0.23–1.15. There were 30 dominant species in the survey area, and the number of protozoa was the largest (15 species). Among the dominant species, 10 were eutrophic indicator species, all of which were rotifers. Dominant species of the indicator species for eutrophic water were only distributed in Tanjiang River and Yinzhou Lake, indicating that Xijiang River water quality is the best.

Key words: Zooplankton; Community structure; Biodiversity; Tanjiang River; Yinzhou Lake; Xijiang River

浮游动物个体小、数量多、生长周期短、代谢旺盛,作为水体中的初级消费者将浮游植物、细菌、有机碎屑等转化为能被鱼类和其他水生动物利用的食物,其动态变化影响到以其为食的高级动物种群的生物量和分布,是水生态系统食物网结构的关键环节,对于整个生态系统的物质循环、能量流动和生物资源的补充等发挥着重要作用,也是水生态系统的重要组成部分^[1-4]。浮游动物对外界水环境的变化较为敏感,其种群结构、数量变化、优势种及污染指示种、物种多样性等均可作为水体营养化的重要标志,能够很好地反映水体营养状况^[5-8]。将浮游动物作为水环境检测和评价指标,可以弥补水体理化指标在水质评价上的不足^[9]。同时,部分浮游动物还能积累和代谢一定量的污染物质,起到净化水质的作用,在水质监测调控、水污染修复治理等方面的作用逐渐受到重视^[10]。

江门市水资源丰富,主要河流有西江、潭江及其支流和沿海诸小河。西江为珠江最大的主干支流,江门境内长 76 km,自北向南流经鹤山。近年来关于江门境内的西江和潭江的水质调查研究主要集中在水体理化指标^[11]、浮游植物群落结构^[12]、底栖动物多样性^[13]等方面,缺乏浮游动物群落结构等方面的调查研究。此外,西江引水工程于 2010 年 9 月建成通水,西江水作为饮用水输送到广州市,有效解决了广州市西北部水源水质型缺水问题^[14]。本文研究了江门境内主要淡水河流西江、潭江及银洲湖浮游动物的种类组成、密度、生物量、群落结构时空变化等特征,并运用浮游动物相关环境水质指标评价了调查区域的水质状况,可为江门流域乃至整个珠江流域的水环境治理、水环境健康可持续发展等提供理论参考和依据。

1 材料与方法

1.1 采样时间与采样点设置

2016 年 12 月,2017 年 3、7 和 9 月对江门境内主要河流进行了 4 次浮游动物群落结构调查研究。在潭江 (A1: 赤坎; A2: 荻龙桥; A3: 牛湾大桥)、银洲湖 (A4: 新会新港; A5: 下沙口; A6: 崖门炮台) 和西江 (A7: 中兴村; A8: 蓬江区大厂; A9: 江顺大桥) 水域共设置 9 个采样点,每个采样点采集 2 个浮游动物样品。采样点主要设置于主要支流汇合口、汇合后与干流充分混合处,主要排污口附近、河口区等河段设置采样断面。个别站点 A7,考虑到渔村对于渔船的使用实际情况,加上样点设置的均匀性,因此在这一位点设置站位; A1 站点为本次调查的最上游,刚好位于潭江最下游大坝之下; A2—A5, A7—A8 均为支流汇合口; A6 为重要河口区, A2 也是重要排污口区。具体采样位置见图 1,所有采样点均经 GPS 定位。

1.2 样品采集

1.2.1 浮游动物定性 以 25 号浮游生物网 (孔径 $64 \mu\text{m}$) 在水面下 0~0.5 m 水层呈“∞”字形捞取 3~5 min,并将滤取的样本放入标本瓶中,加 4% 甲醛溶液固定。

1.2.2 浮游甲壳动物定量 用 5 L 的有机玻璃采水器在表层和底层各采集 10 L 水样混合,再从混合样中取 10 L 用于大型浮游甲壳类的定量。10 L 样先用 13 号浮游生物网过滤,收集于 50 mL 的塑料瓶中,并用 4% 甲醛溶液保存。

1.2.3 原生动物和轮虫定量 轮虫和原生动物定量样品用 5 L 有机玻璃采水器在水面下 0.5 和 1.5 m 处水层各采集 5 L,混合后取 1 L,用鲁哥氏碘液固定,静置 48 h 后用虹吸管除去上清液,收集沉积物,浓缩至 50 mL 保存。

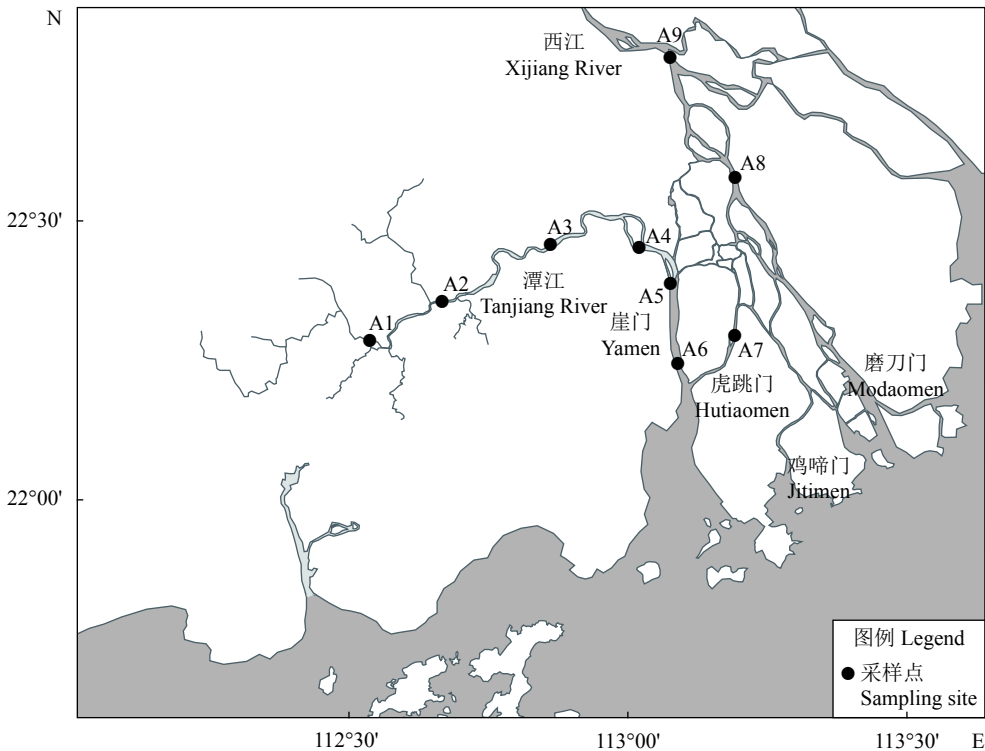


图1 江门流域浮游动物采样点分布图

A1. 赤坎; A2. 荻龙桥; A3. 牛湾大桥; A4. 新会新港; A5. 下沙口; A6. 崖门炮台; A7. 中兴村; A8. 蓬江区大厂; A9. 江顺大桥

Figure 1 Sampling sites of zooplankton in Jiangmen River Basin

A1. Chikan; A2. Dilong Bridge; A3. Niuwan Bridge; A4. Xinhui Port; A5. Xiashakou; A6. Yamen Fort;
A7. Zhongxing Village; A8. Pengjiang; A9. Jiangshun Bridge

在每个样点采样时，同时利用 YSI Pro Plus 型多功能水质仪现场测定水温、溶解氧、pH、电导率、盐度等理化指标。各采集点的理化性质见表 1。

1.3 浮游动物样品的鉴定及计数

所有样品尽量鉴定到种，不能完全确定的种类鉴定到属。采用 OLYMPUS BX53 显微镜进行浮游动物鉴定和计数。鉴定依据的主要文献有：《微型生物监测新技术》^[15]《中国淡水轮虫志》^[16]《中

国动物志 (淡水枝角类)》^[17]《中国动物志 (淡水桡足类)》^[18]。

计数按《淡水浮游生物调查研究方法》^[19]的方法进行，即轮虫取沉淀水样 1 mL 全片计数；原生动物取沉淀水样 0.1 mL 全片计数，计数 2 片并取平均值；枝角类和桡足类将经网滤缩后的样品全部计数，然后将所得数值换算成每升水中的个数。生物量计算按《淡水浮游生物调查研究方法》^[19]

表1 江门流域水体理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of water in Jiangmen River Basin

理化指标 Physical and chemical index	采样点 Sampling site								
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
水深 Depth/m	3.31	4.33	5.01	5.16	4.23	5.21	6.23	5.22	5.55
透明度 Water transparency/m	0.58	0.54	0.48	0.45	0.41	0.36	0.36	0.85	0.68
水温 Water temperature/℃	24.56	25.23	24.60	24.94	24.63	24.16	23.46	23.26	23.09
溶解氧 Dissolved oxygen/(mg·L ⁻¹)	4.72	3.94	3.43	5.36	5.61	6.24	6.99	7.09	7.01
盐度 Salinity	0.11	0.10	0.13	0.40	0.77	3.38	0.16	0.13	0.12
pH	6.90	6.76	6.77	7.42	7.51	7.38	7.82	8.28	8.20
电导率 Conductivity/(μs·cm ⁻¹)	154.68	144.26	176.08	722.59	1 479.40	4 984.49	288.30	227.41	221.69

进行。

1.4 数据分析

运用优势度 Y 计算出优势物种, 公式为:

$$Y = (n_i/N) f_i \quad (1)$$

式中 n_i 为第 i 种的个体数, N 为样品中浮游动物总个体数, f_i 为第 i 种的出现频率, $Y > 0.02$ 为优势种。

用 Shannon-Wiener 指数 (H') 和 Pielou 指数 (J') 计算浮游动物群落结构多样性和物种均匀度。

$$H' = - \sum \left(\frac{n_i}{N} \right) \left(\log_2 \frac{n_i}{N} \right) \quad (2)$$

$$J' = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (3)$$

式中 S 为物种总数。

1.5 数据统计

浮游动物生物密度、生物量的季节差异、位点、区域差异的判别用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 以 $P < 0.05$ 作为差异显著性判定标准。

2 结果

2.1 浮游动物的种类组成

在 2016—2017 年的 4 次采样调查中, 共鉴定浮游动物 157 种, 其中轮虫最多 (74 种), 占浮游动物种类数的 47.13%; 其他类群依次是原生动物 (43 种, 27.39%)、枝角类 (21 种, 13.38%)、桡足类 (19 种, 12.10%)。潭江浮游动物种类数最多 (133 种), 银洲湖次之 (98 种), 西江最少 (89 种)。江门 3 个区域均以轮虫种类数最多, 其次是原生动物, 潭江枝角类比桡足类多, 而银洲湖和西江则刚好相反 (图 2)。

从各个季节来看, 春季浮游动物种类数最多 (93 种), 冬季和夏季次之, 秋季最少 (72 种)。每个季节均以潭江浮游动物种类最多, 银洲湖次之, 西江最少 (仅春季除外, 西江比银洲湖多)。潭江在夏季和冬季种类数最多 (均为 72 种), 春季次之 (63 种), 秋季最少 (仅 57 种); 银洲湖夏季种类数最多 (59 种), 其次依次是秋季 (47 种)、冬季 (41 种) 和春季 (39 种); 西江则以春季最多 (50 种), 其次依次是秋季 (45 种)、冬季 (39 种) 和夏季 (37 种, 图 3)。

2.2 浮游动物的密度与生物量

浮游动物年平均密度为 $1\,651 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中原生动物为 $1\,164 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 轮虫 $397 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 枝角类

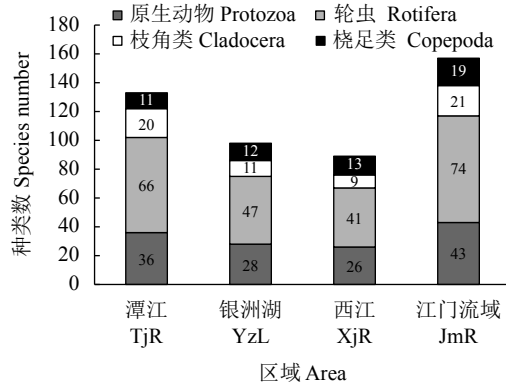


图2 江门流域各区域浮游动物各类群种类数

Figure 2 Abundance of each species of zooplankton in different areas in Jiangmen River Basin

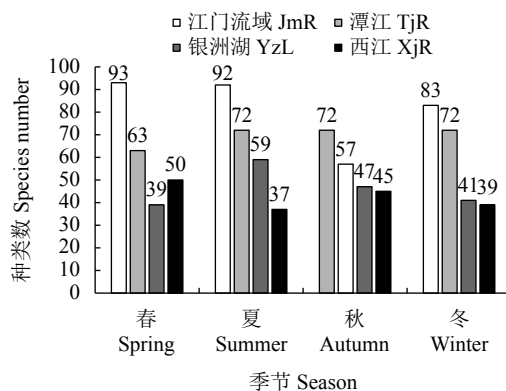


图3 江门流域不同季节浮游动物种类数

Figure 3 Seasonal variation of zooplankton species in Jiangmen River Basin

$9 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 桡足类 $81 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。潭江浮游动物年平均密度最高 ($3\,030 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$), 其次是银洲湖 ($1\,467 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$), 西江最低 ($456 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$)。就类群而言, 原生动物年平均密度在 3 个区域中均最高, 均占平均密度的 60% 以上 (图 4)。浮游动物年平均生物量为 $0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中原生动物为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 轮虫 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 枝角类 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 桡足类 $0.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。潭江浮游动物年平均生物量最高 ($1.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 其次是银洲湖 ($0.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 西江最低 ($0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。就类群而言, 轮虫年平均生物量在潭江最大, 而银洲湖和西江则是桡足类最大, 均占到 3 个区域生物量的 55% 以上 (图 4)。

浮游动物各季节平均密度存在显著性差异 ($F=3.186, P=0.037$), 整体表现为春季 ($3\,575 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$) > 冬季 ($1\,358 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$) > 秋季 ($853 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$) > 夏季 ($820 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$)。浮游动物各季节密度在区域方面也表现为一致规律 (仅银洲湖夏季比秋季密度略高)。原生动物平均密度各区域均是春季最多; 轮虫平均密度均

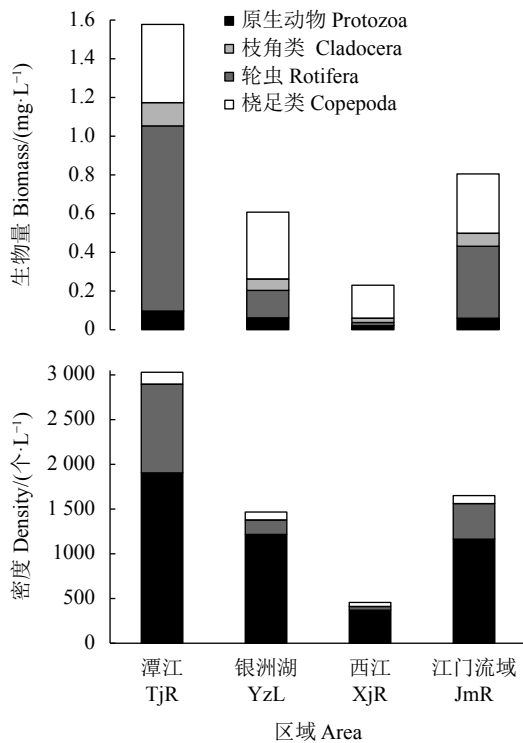


图4 江门流域各区域浮游动物密度和生物量

Figure 4 Density and biomass of zooplankton in different areas of Jiangmen River Basin

是秋季最多, 银洲湖除外(夏季最多); 枝角类、桡足类年平均密度均是冬季最多, 潭江的桡足类除外(夏季最多, 表1)。

浮游动物各季节平均生物量差异不显著 ($F=0.355, P=0.786$), 表现为秋季 ($1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 冬季 ($0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 春季 ($0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 夏季 ($0.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。浮游动物各季节生物量在区域方面也各有特点, 潭江浮游动物各季节平均生物量差异不显著 ($F=1.097, P=0.405$), 秋季 ($2.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 春季 ($1.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 夏季 ($1.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 冬季 ($1.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 银洲湖浮游动物各季节平均生物量差异也不显著 ($F=1.048, P=0.423$), 冬季 ($0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 夏季 ($0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 秋季 ($0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 春季 ($0.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 而西江的浮游动物各季节平均生物量差异极显著 ($F=34.186, P<0.001$), 冬季 ($0.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 秋季 ($0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 春季 ($0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 夏季 ($0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。原生动物平均密度各区域均是春季最高; 轮虫平均密度是潭江秋季最高, 银洲湖和西江则是夏季最高; 枝角类和桡足类年平均密度均是冬季最高, 枝角类银洲湖是秋季最高, 桡足类潭江是春季最高(表2)。

各采样点浮游动物密度不存在显著差异 ($F=1.546, P=0.188$), 整体为 $331 \sim 4696 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 而生物

量在各采样点差异显著 ($F=3.196, P=0.011$), 整体为 $0.17 \sim 1.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。浮游动物密度和生物量均表现为 A1 站点最高, A9 站点最低; 在区域方面, 也表现为一致的规律, 即浮游动物密度不存在显著差异 ($F=2.305, P=0.156$), 而生物量在各区域差异显著 ($F=12.447, P=0.003$), 潭江 (A1—A3) 从上游到下游依次降低, 西江则刚好相反 (A9—A7); 银洲湖生物量中间位点 A5 最高, 密度则是河口位点 A6 最高; 银洲湖和西江密度和生物量整体表现为向河口的方向增加。无论是密度还是生物量均表现为潭江各站点 > 银洲湖各站点 > 西江各站点(图5)。

2.3 浮游动物的优势种

江门主要淡水流域浮游动物优势种共 27 种, 全部是原生动物和轮虫, 分别有 15 和 12 种(表3), 潭江、银洲湖和西江浮游动物优势种分别为 15、14 和 13 种。没有任何一个种在各个区域全年均是优势种, 裂痕龟纹轮虫 (*Anuraeopsis fissa*) 在潭江有 3 个季节成为种, 王氏拟铃壳虫 (*Tintinnopsis wangi*) 在银洲湖和西江分别有 3 个季优势种。季节方面, 夏季优势种最多 (14 种), 其次依次是春季 (11 种)、冬季 (10 种) 和秋季 (9 种)。从水体营养类型指示种来看, 优势种中, 富营养水体指示种均为轮虫, 分别是曲腿龟甲轮虫 (*Keratella valga*)、螺形龟甲轮虫 (*K. cochlearis*)、无棘龟甲轮虫 (*K. cochlearis tecta*)、美洲龟甲轮虫 (*K. americana*)、镰状臂尾轮虫 (*Brachionus falcatus*)、角突臂尾轮虫 (*B. angularis*)、前节晶囊轮虫 (*Asplanchna priodonta*)、水轮虫 (*Epiphanes* sp.)、长肢多肢轮虫 (*Polyarthra dolichoptera*) 和懒轮虫 (*Rotaria tardigrada*)。优势种为富营养水体指示种仅分布在潭江和银洲湖, 潭江在夏、秋、冬季均有分布, 分别是秋、冬季各 4 种, 夏季 1 种; 银洲湖仅夏、秋季有分布, 分别是 7 和 4 种。

2.4 浮游动物多样性指数和均匀度指数

各采样点的 H' 介于 $1.05 \sim 4.36$, J' 介于 $0.23 \sim 1.15$ (图6)。 $H'<1.0$ 表示水体重污染, $1.0<H'<3.0$ 表示水体中度污染, $H'>3.0$ 表示水体轻污染或无污染。 J' 小于 0.3 表示水体重污染, $0.3<J'<0.5$ 表示水体中度污染, $0.5<J'<0.8$ 表示水体轻污染或无污染。 H' 和 J' 均表明 A3 站点全年轻污染或无污染, 其他站点均存在一定程度的污染。 H' 表明潭江 (A1—A3) 污染程度较低, 仅 A1 和 A2 站点部分季

表2 江门流域不同季节浮游动物及各类群的密度和生物量
Table 2 Seasonal variation of density and biomass of zooplankton and their taxas in Jiangmen River Basin

季节 Season	类群 Taxa	密度 Density/(个·L ⁻¹)				生物量 Biomass/(mg·L ⁻¹)			
		潭江 TjR	银洲湖 YzL	西江 XjR	江门流域 JmR	潭江 TjR	银洲湖 YzL	西江 XjR	江门流域 JmR
春 Spring	原生动物 Protozoa	5 758.33	2 816.67	6 16.67	3 063.89	0.29	0.14	0.03	0.16
	轮虫 Rotifera	1 125.00	33.33	8.33	388.89	0.45	0.03	0.01	0.16
	枝角类 Cladocera	6.13	1.07	0.13	2.44	0.06	0.01	0.00	0.02
	桡足类 Copepoda	278.83	61.40	12.47	117.57	0.91	0.22	0.05	0.40
	浮游动物 Zooplankton	7 168.30	2 912.47	637.60	3 572.79	1.71	0.41	0.10	0.74
夏 Summer	原生动物 Protozoa	558.33	400.00	200.00	386.11	0.03	0.02	0.01	0.02
	轮虫 Rotifera	833.33	383.33	50.00	422.22	1.02	0.45	0.03	0.50
	枝角类 Cladocera	2.00	10.40	0.33	4.24	0.02	0.07	0.00	0.03
	桡足类 Copepoda	8.33	12.07	0.60	7.00	0.07	0.10	0.01	0.06
	浮游动物 Zooplankton	1 402.00	805.80	250.93	819.58	1.13	0.64	0.05	0.61
秋 Autumn	原生动物 Protozoa	166.67	391.67	191.67	250.00	0.01	0.02	0.01	0.01
	轮虫 Rotifera	1 350.00	225.00	83.33	552.78	2.12	0.08	0.02	0.74
	枝角类 Cladocera	9.58	7.92	1.77	6.42	0.12	0.08	0.02	0.07
	桡足类 Copepoda	21.67	86.67	22.35	43.56	0.11	0.32	0.10	0.18
	浮游动物 Zooplankton	1 547.92	711.25	299.12	852.76	2.37	0.50	0.14	1.00
冬 Winter	原生动物 Protozoa	1 137.50	1 258.33	470.83	955.56	0.06	0.06	0.03	0.05
	轮虫 Rotifera	654.17	0.00	20.83	225.00	0.24	0.00	0.01	0.08
	枝角类 Cladocera	42.52	10.42	10.65	21.20	0.28	0.07	0.07	0.14
	桡足类 Copepoda	165.98	169.52	133.89	156.46	0.53	0.74	0.53	0.60
	浮游动物 Zooplankton	2 000.17	1 438.28	636.21	1 358.22	1.11	0.87	0.63	0.87

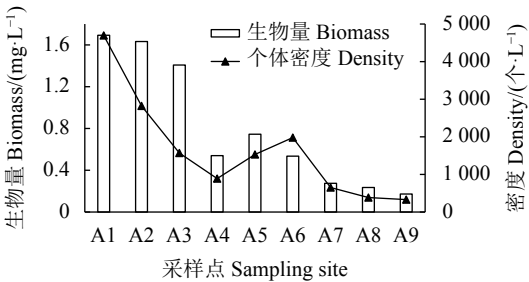


图5 江门流域不同采样点浮游动物的密度和生物量

Figure 5 Density and biomass of zooplankton at different sampling sites of Jiangmen River Basin

节达到中度污染；银洲湖（A4—A6）和西江（A7—A9）污染较为严重，全年大部分站点均处于中度污染，A9更是全年均达到中度污染状态。银洲湖冬季和春季全部站点达到中度污染状态，其他季节仅个别站点达到污染级别；西江是夏季和春季全部站点、秋季2个站点达到中度污染状态，其他

季节仅个别站点达到污染级别。J表明潭江除了A1 站点部分季节水体中污染或重污染外，其他站点全年水体轻污染或无污染；银洲湖和西江春季污染较为严重，所有调查站点都指示污染，银洲湖A6 站点甚至达到重污染，其他季节仅有个别站点达到污染级别。

3 讨论

本研究调查区域处于西珠江口内河区域，浮游动物组成以轮虫种类数最多，这一结果不仅与国内众多河流结果相似^[20-22]，也与河口的研究一致^[23-24]。在河流及河口生境中，轮虫通常占据浮游动物的主体部分，河流、河口的理化环境与水文条件波动较大，而轮虫为孤雌生殖，且个体小、繁殖快、生命周期短，能够在短时间内快速适应这种动态环境波动变化，成为这一区域的主要优势物

表3 各区域浮游动物优势种及优势度

Table 3 Dominant species and dominance of zooplankton in different areas

种类 Species	春 Spring			夏 Summer			秋 Autumn			冬 Winter			指示种 Indicator species
	潭江 TjR	银洲湖 YzL	西江 XjR	潭江 TjR	银洲湖 YzL	西江 XjR	潭江 TjR	银洲湖 YzL	西江 XjR	潭江 TjR	银洲湖 YzL	西江 XjR	水体营养类型 Nutritional types of water
原生动物 Protozoa													
雷殿拟铃壳虫 <i>Tintinnopsis leidyi</i>	0.41												
长筒拟铃壳虫 <i>T. longus</i>		0.76	0.07										
王氏拟铃壳虫 <i>T. wangi</i>					0.32	0.24		0.45	0.25	0.10	0.70	0.29	
淡水薄铃虫 <i>Leprotintinnus fluviatile</i>			0.17	0.23	0.04	0.09			0.06				
褐砂壳虫 <i>Diffugia avellana</i>		0.07	0.20			0.10							O
瓶砂壳虫 <i>D. urceolata</i>		0.02											O
球砂壳虫 <i>D. globulosa</i>						0.02							O
角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i>	0.06	0.03								0.15		0.04	
尖尾裸藻 <i>Euglena oxyuris</i>			0.10							0.03			
尾裸藻 <i>E. caudata</i>			0.04										
棒形裸藻 <i>E. clavata</i>						0.03							
长尾扁裸藻 <i>Phacus longicauda</i>		0.06	0.04							0.02			
旋回侠盗虫 <i>Strobilidium gyrans</i>												0.09	O
单环桎纤毛虫 <i>Didinium balhianii</i>			0.03										
钟虫 <i>Vorticella</i> sp.										0.15			
轮虫 Rotifier													
曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>					0.08					0.03			E
螺形龟甲轮虫 <i>K. cochlearis</i>										0.03			E
无棘龟甲轮虫 <i>K. cochlearis tecta</i>					0.02					0.08			E
美洲龟甲轮虫 <i>K. americana</i>					0.02			0.02					E
镰状臂尾轮虫 <i>Brachionus falcatus</i>					0.03		0.04	0.02					E
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>					0.05								E
罗氏异尾轮虫 <i>Trichocerca rousseleti</i>				0.09			0.04		0.06				O
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	0.05			0.08			0.03						O
前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>							0.06						E
水轮虫 <i>Epiphanes</i> sp.							0.05						E
长肢多肢轮虫 <i>Polyarthra dolichoptera</i>				0.17	0.05		0.49	0.05		0.04			E
懒轮虫 <i>Rotaria tardigrada</i>					0.03								E

注: O. 寡营养型; E. 富营养型

Note: O. Oligotrophication; E. Eutrophication

种^[20,23]。同时,本研究还发现了原产地为美洲的外来物种——美洲龟甲轮虫,该物种在我国华南地区 3 个省的湖泊或水库中均有检出,由于对这类小型生物通常缺少历史记录,对其扩散的时间和来源并不清楚^[25],该物种有何危害需要持续关注。

本研究结果表明大型浮游动物枝角类和桡足类的种类数较历史水平出现较显著下降,而小型浮游动物轮虫的种类数较历史水平出现较大幅度上升。20 世纪 80 年代初期,珠江三角洲的大型浮游动物约 75 种^[26-27],2000 年后下降到珠江八大内河口的

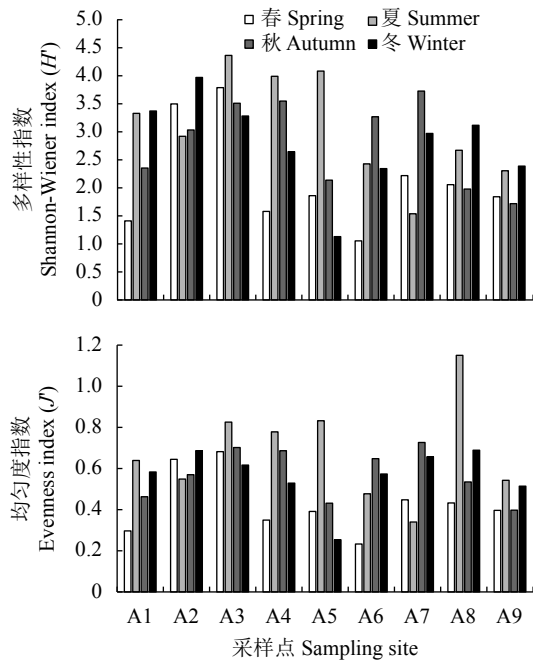


图6 江门流域各采样点浮游动物的生物多样性指数和物种均匀度指数

Figure 6 Shannon-Wiener index and Pielou evenness index of zooplankton at different sites in Jiangmen River Basin

45 种^[28], 2014—2015 年进一步呈现下降趋势, 磨刀门调查到的种类数为 33~38 种^[29], 与本研究调查到的 40 种持平, 说明目前大型浮游动物种类数仅为历史水平的一半左右。小型浮游动物轮虫在 20 世纪 80 年代初, 珠江三角洲仅为 38 种^[26], 2000 年之后出现明显上升, 2009—2010 年仅磨刀门就高达 56 种^[30], 2012 年珠江三角洲河网调查为 53 种^[31], 本研究又进一步升高, 多达 74 种, 也表明目前小型浮游动物轮虫的种类数达到了历史水平的 2 倍左右。这一升一降形成的原因主要有两方面: 1) 轮虫适应力极强, 能够快速应答水体环境和水文条件的改变, 且生活史周期短, 繁衍速度快^[23]。珠江口水系不仅富营养化程度较以往明显增加, 而且拦河筑坝也显著改变了下游的水文条件。研究表明, 随着富营养化程度的增加, 轮虫的食物来源更为丰富和多样, 轮虫的丰度与水体的营养盐浓度呈正相关^[32]。2) 过度捕捞和外来种的入侵, 导致肉食性鱼类数量减少, 同时间本项目组调查这一区域鱼类组成, 优势鱼类是鲮 (*Cirrhinus molitorella*)、麦瑞加拉鲮 (*C. mrigala*, 外来种)、罗非鱼 (外来种)、赤眼鳟 (*Squaliobarbus curriculus*)、广东鲂 (*Megalobrama hoffmanni*)、多辐翼甲鲮 (*Pterygoplichthys multiradiatus*, 俗称清道夫, 外来种)、鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和鳙 (*H. nobilis*) 等, 这些鱼

类大部分食性包含浮游动物, 而鱼类在同等能量消耗下会优先选择捕食大个体的浮游动物^[33], 从而直接导致大型浮游动物减少。由于鱼类控制大型浮游动物数量的下行效应, 造成小型浮游动物轮虫和原生动物缺乏捕食者而出现大量繁殖。

与历史研究对比, 浮游动物密度较历史水平显著增加, 而生物量较历史水平显著减少。20 世纪 80 年代初期, 在珠江三角洲调查的浮游动物密度为 $107.19 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[26]; 2000 年后, 珠江八大内河口的浮游动物密度为 $1.43 \sim 154.45 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[28], 变化不明显; 2010 年后呈现逐年显著增加趋势, 2012 年珠江三角洲河网浮游动物轮虫密度高达 $248.5 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[31], 2014—2015 年在磨刀门调查的浮游动物密度为 $1501 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[29], 而本研究结果较 2014—2015 年进一步增加, 达 $1651 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 为历史水平的 15 倍之多。在 20 世纪 80 年代初, 珠江三角洲浮游动物生物量为 $1.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[26], 2000 年后出现显著下降, 珠江八大内河口的浮游动物生物量下降到仅为 $0.0063 \sim 0.2773 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[28]; 2010 年后出现一定幅度的升高, 2014—2015 年在磨刀门调查的生物量升高至 $0.541 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[29], 本研究结果较这一水平进一步增加, 达 $0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。总体而言, 目前浮游动物生物量仅为历史水平的一半, 而密度显著增加, 说明水体中大型浮游动物的个体数量较历史水平出现下降, 而小型浮游动物的个体数量较历史水平出现上升。

优势种为富营养水体指示种仅西江全年没有分布, 表明西江水质最好; 潭江优势富营养指示种从夏季到冬季逐渐增加, 银洲湖则刚好相反, 冬季为 0, 这表明水体富营养化从夏季开始, 并逐渐由银洲湖转移到上游的潭江, 春季又恢复到无污染状态。冬季仅潭江有富营养水体指示种, 这可能是枯水期造成上游水体流量大幅减小, 而入河污染物持平, 因此全年潭江水体受污染时间最长, 银洲湖次之。银洲湖夏季富营养水体指示种远多于潭江, 且全年远多于其他季节和区域, 说明银洲湖夏季污染最为严重, 原因可能是丰水期导致下游河口污染的聚集。整体而言, 潭江污染最为严重, 其次是银洲湖, 西江水质最好。这一结果与理化数据刚好吻合, 根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002), 潭江全年的溶解氧为 $4.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属于 IV 类水质, 银洲湖全年的溶解氧为 $5.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属于 III 类水质, 西江全年的溶解氧为 $7.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

属于Ⅱ类水质(表1)。而根据 H' 和 J' , 潭江水质最好、西江次之、银洲湖最差。多样性指数与这两种方法的评价结果存在差异, 这支持了水环境污染状况评价不能只采用某个标准, 而应该整合多个标准综合分析, 结果才能更准确、更客观^[34]。这一结论也支持了麦戈等^[35]的研究, 其发现 Shannon-Wiener 浮游植物、浮游动物的多样性指数分析结果不能有效地反映珠江三角洲典型城市污染河道——佛山水道重污染区域的污染状况差异, 所分析结果与实际污染状况有较大差距。因此仅仅依靠浮游动物多样性指数评价水质可能不够全面, 需要结合水体理化指标等进行综合分析和评价。

参考文献:

- [1] 刘建康, 黄祥飞, 林婉莲, 等. 东湖生态学研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 51-53.
- [2] 杨宇峰, 黄祥飞. 浮游动物生态学研究进展 [J]. 湖泊科学, 2000, 12(1): 81-89.
- [3] BAIRD M E, WALKER S J, WALLAC B B, et al. The use of mechanistic descriptions of algal growth and zooplankton grazing in an estuarine eutrophication model[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2003, 56(3/4): 685-695.
- [4] 高子涵, 张健, 皮杰, 等. 湖南省大通湖浮游动物群落结构及其与环境因子关系 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 733-740.
- [5] KARR J R. Defining and measuring river health[J]. Freshw Biol, 1999, 41(2): 221-234.
- [6] HESSEN D O, FAFENG B A, SMITH V H, et al. Extrinsic and intrinsic controls of zooplankton diversity in lakes[J]. Ecology, 2006, 87(2): 433-43.
- [7] TASEVAKA O, JERSABEK C D, KOSTOSKI G, et al. Differences in rotifer communities in two freshwater bodies of different trophic degree (Lake Ohrid and Lake Dojran, Macedonia)[J]. Biology, 2012, 67(3): 565-572.
- [8] 刘歆璞, 王丽卿, 张宁, 等. 青草沙水库后生浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1238-1248.
- [9] 林青, 由文辉, 徐凤洁, 等. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2014, 34(23): 6918-6929.
- [10] 许木启. 从浮游动物群落结构域功能的变化看府河-白洋淀水体的自净效果 [J]. 水生生物学报, 1996, 20(3): 212-219.
- [11] 叶雅. 西江流域水质现状及 2005-2014 年水质变化趋势分析 [J]. 广东水利水电, 2016(8): 18-22.
- [12] 蔡端波, 杨丽坤, 张伟, 等. 潭江浮游植物调查及水质监测 [J]. 河北大学学报 (自然科学版), 2012, 32(4): 410-415.
- [13] 王宏伟, 邢清朝, 李开明, 等. 潭江底栖动物多样性调查及完整性分析 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(S1): 144-148.
- [14] 袁永钦, 匡科, 沈军. 广州市西江引水工程水质预警系统研究与实践 [J]. 中国给水排水, 2011, 27(6): 1-5.
- [15] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 1-524.
- [16] 王家楫. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 1961: 1-288.
- [17] 蒋蔓治, 堵南山. 中国动物志 (淡水枝角类)[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 79-273.
- [18] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志 (淡水桡足类)[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 53-420.
- [19] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 1-414.
- [20] 吴利, 李源玲, 陈延松. 淮河干流浮游动物群落结构特征 [J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 932-940.
- [21] 李学军, 鲍战猛, 高彩凤, 等. 北运河浮游动物调查及水质评价 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1559-1564.
- [22] 刘盼盼, 王龙, 王培, 等. 沙颍河流域浮游动物群落结构空间变化特征与水质评价 [J]. 水生生物学报, 2018, 42(2): 373-381.
- [23] HOLST H, ZIMMERMANN H, KAUSCH H, et al. Temporal and spatial dynamics of planktonic rotifers in the estuary during spring[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 1998, 47(3): 261-273.
- [24] XIAO R, WANG Q, ZHANG M X, et al. Plankton distribution patterns and the relationship with environmental gradients and hydrological connectivity of wetlands in the Yellow River Delta[J]. Ecohydrol Hydrobiol, 2020, 20(4): 584-596.
- [25] 喻婧怡, 温展明, 韩博平, 等. 美洲龟甲轮虫的分类特征及与我国热带地区常见龟甲轮虫的比较 [J]. 水生生物学报, 2017, 41(2): 448-453.
- [26] 珠江水系渔业资源调查编委会. 珠江水系渔业资源调查报告 第一分册 江河 [R]. 广州: 珠江水产研究所, 1985: 276-319.
- [27] 杞桑, 赵慧玲. 珠江广州河段浮游动物 (主要为枝角类与桡足类) 的生态调查 [J]. 暨南理医学报 (理科专版), 1984(1): 59-72.
- [28] 高原, 赖子尼, 王超, 等. 珠江口浮游动物分布特征研究 [J]. 中国水产科学, 2008, 15(2): 260-268.
- [29] 高原, 赖子尼, 杨婉玲, 等. 2014-2015 年珠江春季禁渔前后浮游动物群落变化 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(9): 1562-1569.
- [30] 王庆, 侯磊, 陈实, 等. 珠江口磨刀门轮虫群落结构特征与水质生态学评价 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 824-833.
- [31] 高原, 李新辉, 赖子尼, 等. 珠江三角洲河网浮游轮虫的群落结构 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2114-2122.
- [32] 王庆, 杨宇峰. 珠江广州河段轮虫群落结构的初步研究 [J]. 水生生物学报, 2007, 31(2): 233-239.
- [33] HALL D J, THRELKELD S T, BURNS C W, et al. The size-efficiency hypothesis and the size structure of zooplankton communities[J]. Ann Rev Ecol Syst, 2003, 7(1): 177-208.
- [34] 唐俊, 向建国, 谷庞华, 等. 微山湖浮游动物群落结构及水质评价 [J]. 水产学杂志, 2014, 27(2): 32-37.
- [35] 麦戈, 利锋, 吴昌华, 等. 城市污染河道浮游生物和底栖动物变异多元分析 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40(22): 11371-11374.