

西江鱼类群落结构和环境影响分析

张迎秋¹, 黄稻田^{1,2}, 李新辉¹, 刘乾甫¹, 李 捷¹, 李跃飞¹, 杨计平¹, 朱书礼¹

(1. 中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广东 广州 510380; 2. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 2016—2018 年, 于珠江干流西江桂平至肇庆 6 个站点开展了季节性渔获物采集和环境监测, 共采集鱼类 12 目 29 科 99 种, 单次采集 10~45 种, 香浓威纳指数 (H') 为 0.90~2.93, 均匀度指数 (J') 为 0.30~0.89, 物种组成成为季节和空间的周转格局。相对重要性指数表明, 鲮 (*Cirrhinus molitorella*)、广东鲂 (*Megalobrama terminalis*) 和赤眼鳟 (*Squaliobarbus curriculus*) 为主要优势种。置换多因素方差分析表明鱼类群落时空差异显著, 夏—冬季间群落结构差异主要源于鲤 (*Cyprinus carpio*)、鲮、广东鲂和赤眼鳟质量百分比 ($W\%$) 差异; 桂平与梧州、肇庆的显著差异主要源于鲮、广东鲂和银鲈 (*Squalidus argentatus*) 的数量百分比 ($N\%$) 差异, 以及鲮、广东鲂、鲤、鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 的 $W\%$ 差异。冗余分析分别解释了鱼类 $N\%$ 和 $W\%$ 变异的 49.92% 和 49.61%, 主要影响因子为距河口距离、水温、透明度和径流量, 且鲮分布在低透明度的高温水域, 广东鲂和鲢分布在下游江段, 赤眼鳟分布在中上游江段, 鲤分布在高透明度的低温水域。

关键词: 鱼类群落; 物种多样性; 环境影响; 冗余分析; 珠江

中图分类号: S 932.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Fish community structure and environmental effects of West River

ZHANG Yingqiu¹, HUANG Daotian^{1,2}, LI Xinhui¹, LIU Qianfu¹, LI Jie¹, LI Yuefei¹, YANG Jiping¹, ZHU Shuli¹

(1. Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510380, China;

2. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: From 2016 to 2018, we seasonally collected fish and monitored the environmental factors at the six sites from Guiping to Zhaoqing in the West River, the main stream of the Pearl River. In total, we collected 99 species belonging to 12 Orders and 29 Families. The species number collected for each sampling ranged from 10 to 45, while the Shannon-Weiner index ranged from 0.90 to 2.93, and the evenness index ranged from 0.30 to 0.89. The species variation was agreed with patterns of seasonal turnover and spatial turnover. As revealed by the index of relative importance, *Cirrhinus molitorella*, *Megalobrama terminalis* and *Squaliobarbus curriculus* were the most dominant fish species. The permutational multivariate analysis of variance indicates that the fish community structure varied significantly among seasons and sites. The significant difference between summer and winter was mainly caused by the weight percentage variation ($W\%$) of *Cyprinus carpio*, *C. molitorella*, *M. terminalis* and *S. curriculus*. The significant difference between Guiping and lower reaches of Wuzhou and Zhaoqing was mainly caused by the number percentage ($N\%$) variation of *C. molitorella*, *M. terminalis* and *Squalidus argentatus*, and $W\%$ variation of *C. molitorella*, *M. terminalis*, *C. carpio*, *Hypophthalmichthys molitrix* and *Oreochromis niloticus*. Redundancy analysis explains 49.92% variation of fish $N\%$ and 49.61% of fish

收稿日期: 2019-07-18; 修回日期: 2019-09-30

资助项目: 广州市科技计划项目 (201707010448); 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项 (2018YFD0900902); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (2017HY-ZD0103)

作者简介: 张迎秋 (1986—), 女, 博士, 助理研究员, 从事鱼类生态学研究。E-mail: zyyq@prfri.ac.cn

通信作者: 李新辉 (1961—), 男, 研究员, 从事珠江鱼类生态学研究。E-mail: lixh@prfri.ac.cn

W%; the most important influencing variables are distance to estuary, water temperature, water transparency and runoff; *C. molitorella* distributes in water of low transparency and high temperature; *M. terminalis* and *H. molitrix* distributes in lower reach; *S. curriculus* distributes in middle and upper reach; *C. carpio* distributes in water of high transparency and low temperature.

Key words: Fish community; Species diversity; Environmental effects; Redundancy analysis; Pearl River

珠江是中国南方第一大河, 地处热带、亚热带季风气候区, 年径流量高于 $3.3 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 水资源总量居全国第二, 流域内海拔跨度大于 3 000 m, 地貌多样, 包括高原、山地、丘陵和三角洲平原等。异质多样化的生境, 孕育了珠江水系丰富的生物资源, 鱼类物种多样性在全球大河流域生态系统中排名第四, 特有种类数排名第二^[1]。截至 2015 年 7 月, 珠江水系记录鱼类达 650 种 (亚种, 包括河口鱼类)^[2], 特有鱼类约 126 种, 国家级水产种质资源保护品种约 25 种^[3], 是中国重要的淡水渔业生产基地和水生生物资源基因库。

珠江水系鱼类生态学研究基础薄弱, 陆奎贤^[4]于 1981—1983 年首次开展了珠江水系渔业资源全面性调查, 李捷等^[5]分析了 2005—2008 年西江河段鱼类多样性, 帅方敏等^[3]分析了 2015 年珠江水系鱼类空间格局。2015 年以来珠江水系渔业管理制度和水利水电工程建设已发生了重大调整, 例如珠江水系规划设立自然保护区约 30 个, 国家级水产种质资源保护区 20 个; 自 2017 年开始延长禁渔期, 每年 3 月 1 日—6 月 30 日在珠江流域实行全面禁渔^[6]; 浔江上游的大藤峡水利枢纽工程于 2015 年 9 月全面开工。2015 年以来珠江水系鱼类

群落时空格局尚处于空白状态。

西江作为珠江水系的干流和主体部分, 发源于云南曲靖市马雄山, 由南盘江、红水河、黔江、浔江和西江等河段组成, 全长 2 214 km。本研究选取了浔江和西江河段作为珠江水系鱼类群落研究的代表江段。2016—2018 年笔者研究团队在西江水域开展了鱼类种群和水环境调查, 通过分析鱼类群落时空格局和环境影响, 补充更新了西江鱼类群落动态信息, 服务珠江水系生态保护。

1 材料与方法

2016 年春季 (3 月) 和夏季 (6 月), 2017 年冬季 (2 月)、夏季 (7 月和 8 月) 和秋季 (10 月), 2018 年冬季 (1 月)、春季 (4 月)、夏季 (7 月) 和秋季 (10 月), 在西江桂平、濠江镇、梧州、郁南、德庆和肇庆江段开展了渔获物采样调查 (图 1), 通过在各站点收集 20 船次的渔获物, 采集渔具为三重刺网和地笼, 每种渔具分别收集 10 船次, 作业时间为 8~10 h; 在采样站点的干流中泓线区域, 利用 YSI 同步监测表层水体的水温、盐度、溶解氧含量、pH、氧化还原电位、溶解性固体总量、电导率等, 用透明度盘测定水体透明度, 采集表层水

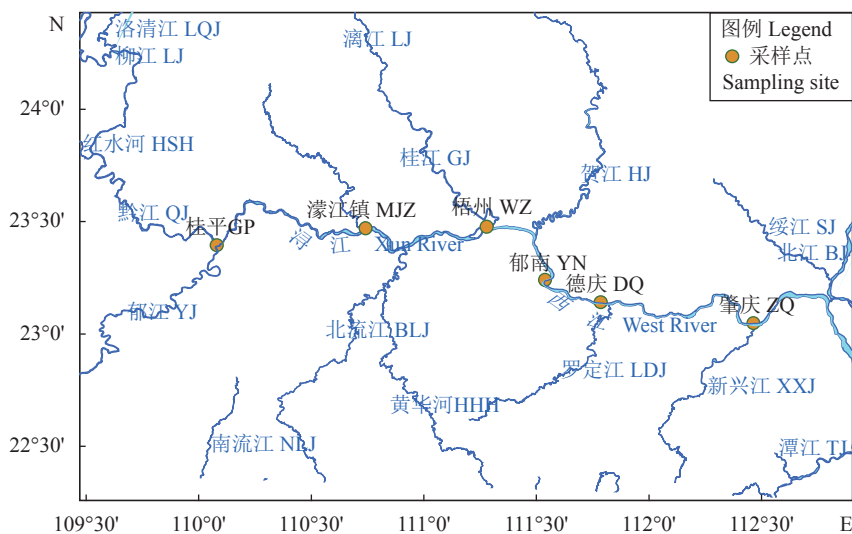


图1 西江鱼类种群采样和水环境监测站点

Figure 1 Sites for fish sampling and environment variables monitoring in West River

体在实验室测定叶绿素 *a* 含量；在电子地图上测定采样点至河口距离，从全国水雨情网站 (<http://xxfb.mwr.cn/>) 下载采样点的径流量数据。

在 PRIMER 6.0 中计算每次采样渔获鱼类的物种数 (*S*)、香浓威纳指数 (*H'*) 和均匀度指数 (*J'*)。其中 $H' = -\sum P_i \ln P_i$, P_i 为渔获鱼类中种 *i* 的个体数比例； $J' = H' / \log S$, *S* 为物种数。利用方差分析 (ANOVA) 和非参数检验方法比较分析了不同季节和站点的 *S*、*H'* 和 *J'* 的差异，分析过程在 R 软件中完成。群落间的物种组成表现为物种丢失或物种获得，若仅含 1 个过程，则物种数少的群落是另一个群落的嵌套子集，群落变化为群落嵌套；若包含 2 个过程，则群落间存在物种周转，群落变化呈现为物种周转^[7-8]。本研究分别分析了不同季节和不同站点间的群落变化过程。

通过相对重要性指数 (IRI) 确定鱼类物种的重要性， $IRI = (N\% + W\%) \times F\%$ ，其中 *N%* 为某物种个体数占渔获鱼类个体总数量的百分比例，*W%* 为某物种质量 (生物量) 占渔获鱼类总质量的百分比例，*F%* 为物种出现的站点数占调查总站数的百分比例。本研究中将 IRI>1 000 的物种定为优势种。

为去除稀有种影响，取出现频次 ≥3 的鱼类 *N%*、*W%* 数据，在 PRIMER 6 中利用置换多因素方差分析 (PERMANOVA) 比较了不同季节和站点中鱼类群落结构的变化，并利用百分比相似性分析 (SIMPER) 解析了导致群落结构差异的重要物种。对出现频次 ≥3 的鱼类 *N%*、*W%* 数据，在

Hellinger 转换后进行 DCA 排序，最长梯度长度均 <3，在环境相关性分析中适合选择冗余分析 (Redundancy analysis, RDA)^[9]。为分析重要鱼类物种的环境梯度要求，取最大值 >10% 的鱼类 *N%*、*W%* 数据，进行 RDA 分析。对环境因子数据进行了 log (*x*+1) 转换，为避免环境因子间的共线性，在 RDA 分析中去除具有最高膨胀因子 (VIF=14.88) 的电导率环境因子，并使用双终止原则前向选择^[10] 筛选出对物种分布具有重要影响的环境变量。

2 结果

2.1 物种组成多样性

2016—2018 年在西江桂平至肇庆江段，共采集鱼类 12 目 29 科 99 种 (附录，详见 <http://dx.doi.org/10.12131/20190142> 的资源附件)，其中鲤形目 3 科 52 种，鲤科 46 种，鲈科 4 种，条鲈科 2 种；鲇形目 7 科 16 种；鲇形目 7 科 15 种；鲱形目 2 科 2 种；胡瓜鱼目 1 科 2 种；合鳃鱼目 2 科 3 种；颌针鱼目 1 科 1 种；鳊形目 1 科 2 种；脂鲤目 2 科 2 种；鲟形目 1 科 1 种；鲴形目 1 科 2 种；鲈形目 1 科 1 种；杂交鲟 1 尾，未定种鱼类 2 尾。

每次采样鱼类物种数 *S* 为 10~45 (图 2)，时空差异不显著 (非参数检验， $P>0.05$)。 *H'* 为 0.90~2.93 (图 2)，时空差异不显著 (方差分析， $P>0.05$)。 *J'* 为 0.30~0.89 (图 2)，时空差异不显著 (非参数检验， $P>0.05$)。春季共采集鱼类 51 种，夏季共采集 77 种，秋季共采集 60 种，冬季共采集 44 种，相

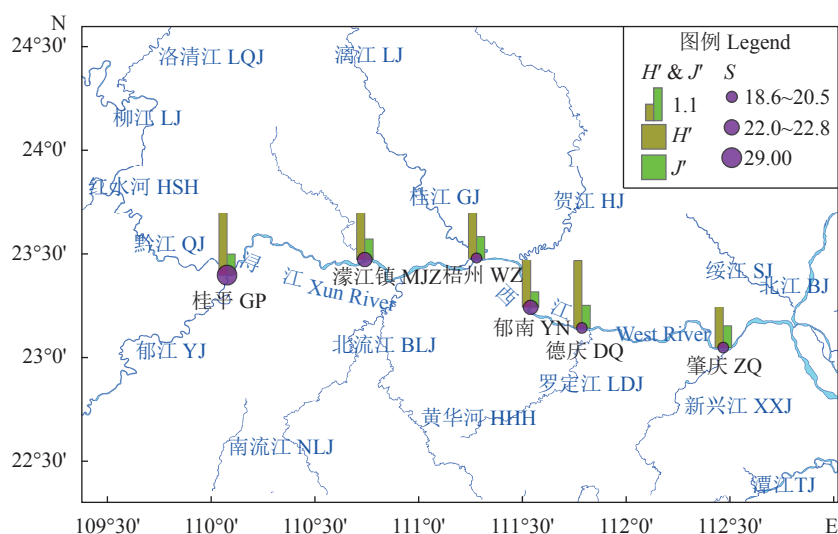


图2 西江平均鱼类物种数、香浓威纳指数和均匀度指数空间分布

Figure 2 Spatial distribution of average fish species number, Shannon-Wiener index and evenness index in West River

邻季节间群落变化包含了物种获得和物种丢失两个过程, 季节间鱼类群落呈群落周转格局。在桂平江段共采集鱼类 61 种, 在濠江镇共采集 51 种, 在梧州共采集 52 种, 在郁南共采集 39 种, 在德庆共采集 40 种, 在肇庆共采集 42 种, 相邻江段间群落变化包含了物种获得和物种丢失两个过程, 西江桂平至肇庆江段鱼类群落呈群落周转格局。

2.2 鱼类优势种时空分布

鱼类 IRI 表明, 西江主要优势种为鲮 (*Cirrhinus molitorella*)、广东鲂 (*Megalobrama terminalis*)、赤眼鳟 (*Squaliobarbus curriculus*) 和鲤 (*Cyprinus carpio*) 等 (图 3)。优势种组成具有一定的季节波动性, 春季主要优势种为广东鲂、鲤、鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和赤眼鳟等, 夏季主要优势种为鲮、赤眼鳟和广东鲂等, 秋季主要优势种为鲮、赤眼鳟和草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 等, 冬季主要优势种为鲮、广东鲂和鲤等。鲮 IRI 在夏、秋和冬季均为物种间最高值: 鲮秋季 IRI 最高, 优势地位最高, 春季其 IRI 降低, 低于广东鲂和赤眼鳟。广东鲂在一年四季均为优势种, 且在冬季具有最高的 IRI。赤眼鳟 IRI 表现为夏季>冬季>秋季>春季。鲤在冬季具有较高的 IRI, 春季和夏季次之, 但秋季 IRI<1 000。草鱼、鲮 (*Hemiculter leucisculus*)、鲢和瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*) 的 IRI 仅在个别季节高于 1 000, 总体优势度偏低。

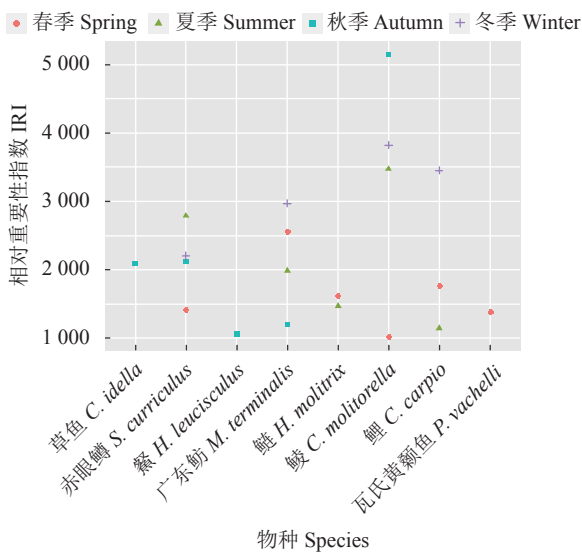


图3 西江鱼类优势种相对重要性指数季节动态变化
Figure 3 Seasonal index of relative importance variation of dominant fish species in West River

不同站点的鱼类优势种组成具有一定的差异 (图 4)。桂平江段主要优势种为鲮、鲤和尼罗罗非鱼; 濠江镇的主要优势种为赤眼鳟、鲤和鲮; 梧州江段的主要优势种为鲮、广东鲂和赤眼鳟; 郁南江段的主要优势种为鲮和广东鲂; 德庆江段的主要优势种为赤眼鳟、鲮和瓦氏黄颡鱼; 肇庆江段的主要优势种为广东鲂、鲢和鲤。

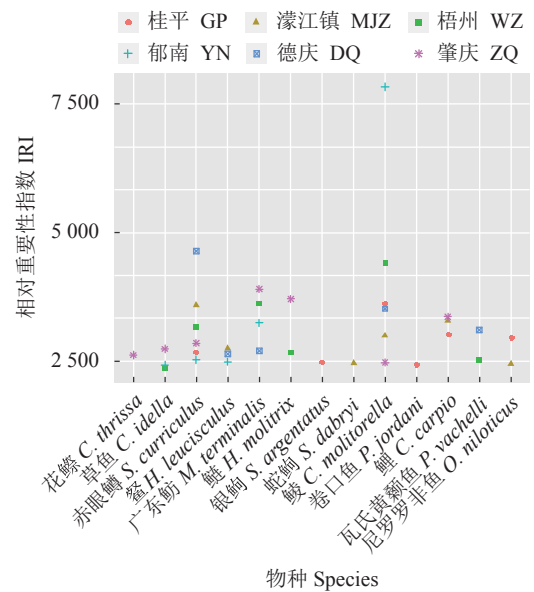


图4 西江鱼类优势种相对重要性指数空间动态变化
Figure 4 Spatial index of relative importance variation of dominant fish species in West River

优势种的 $N\%$ 和 $W\%$ 体现了时空分布差异 (表 1)。鲮 $N\%$ 在夏、秋、冬季为种间最高, 鲮 $W\%$ 在秋季为种间最高, 鲮 $N\%$ 和 $W\%$ 均在秋季达到峰值, 夏季次之, 春季最低, 其中夏、秋、冬季的郁南以及夏、秋季的梧州分布有较高资源量 ($N\%$ 和 $W\%$) 的鲮。广东鲂 $W\%$ 为冬季>春季>夏季>秋季, 其 $N\%$ 季节变化同样是冬季最高, 秋季最低。赤眼鳟 $W\%$ 在夏季最高, 尤其是德庆江段, 春季最低; 其 $N\%$ 在冬季最高, 春季最低。鲤 $W\%$ 在冬季的濠江镇和肇庆江段最高, 其次是春季的濠江镇和肇庆江段以及夏季的桂平江段, 秋季 $W\%$ 属季节间最低; 其 $N\%$ 在冬季最高, 秋季最低。

2.3 西江鱼类群落结构分析

PERMANOVA 分析表明不同站点间鱼类 $N\%$ 存在显著性差异 (表 2, $P<0.05$), 其中桂平与梧州和肇庆江段存在显著差异 (PERMANOVA 比对分析, $P<0.05$)。桂平—梧州间鱼类 $N\%$ 的差异主要体现在鲮、银鲮 (*Squalidus argentatus*)、瓦氏黄颡

表1 西江优势种鱼类的数量百分比、质量百分比、出现站位百分比和相对重要性指数
Table 1 N%, W%, F% and relative importance index of dominant fish species in West River

物种 Species	季节 Season	数量百分比 N%	质量百分比 W%	出现站位百分比 F%	相对重要性指数 IRI
鲮 <i>C. molitorella</i>	春季	7.54	4.78	83.33	1 026.92
	夏季	16.73	18.00	100.00	3 472.68
	秋季	25.88	25.53	100.00	5 140.18
	冬季	22.76	15.46	100.00	3 822.01
广东鲂 <i>M. terminalis</i>	春季	10.52	20.18	83.33	2 558.13
	夏季	10.74	15.80	75.00	1 990.54
	秋季	9.32	9.83	62.50	1 197.11
	冬季	12.29	24.83	80.00	2 969.70
赤眼鳟 <i>S. curriculus</i>	春季	8.14	6.10	100.00	1 424.15
	夏季	10.03	20.40	91.67	2 789.60
	秋季	11.14	10.13	100.00	2 126.82
	冬季	13.02	9.04	100.00	2 206.35
鲤 <i>C. carpio</i>	春季	7.20	14.00	83.33	1 766.70
	夏季	3.62	8.89	91.67	1 146.91
	秋季	2.99	7.60	87.50	926.81
	冬季	8.96	25.58	100.00	3 453.70
草鱼 <i>C. idella</i>	春季	0.90	7.83	50.00	436.81
	夏季	2.05	7.69	75.00	730.31
	秋季	4.87	16.04	100.00	2 090.89
	冬季	1.46	2.92	80.00	350.15
鲢 <i>H. molitrix</i>	春季	8.43	24.10	50.00	1 626.66
	夏季	5.52	16.62	66.67	1 476.20
	秋季	1.80	6.43	87.50	720.34
	冬季	0.88	7.59	80.00	677.74
鳙 <i>H. leucisculus</i>	春季	12.64	3.52	66.67	1 077.56
	夏季	9.82	1.40	58.33	654.81
	秋季	12.19	2.04	75.00	1 067.71
	冬季	6.22	1.67	80.00	631.27
瓦氏黄颡鱼 <i>P. vachelli</i>	春季	13.35	7.37	66.67	1 381.01
	夏季	7.64	5.79	66.67	895.24
	秋季	1.99	0.71	87.50	236.14
	冬季	7.95	2.08	80.00	802.65

鱼、广东鲂、赤眼鳟、尼罗罗非鱼、银飘鱼 (*Pseudolaubuca sinensis*)、卷口鱼 (*Ptychidio jordani*)、粗唇鲃 (*Leiocassis crassilabris*) 和鳊 (*Parab-*

ramis pekinensis, 表 3, SIMPER 分析)。桂平—肇庆间鱼类 N% 的差异主要体现广东鲂、银鲷、鲮、鲤、鲢、黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)、花

表2 不同季节和站点间的鱼类数量百分比、质量百分比组成的PERMANOVA分析

Table 2 PERMANOVA analysis of fish number percentage and weight percentage variation among seasons and sites

方程 Function	变异源 Source	自由度 <i>df</i>	平方和 <i>SS</i>	均方 <i>MS</i>	伪 <i>F</i> Pseudo- <i>F</i>	<i>P</i> (蒙特卡罗检验) <i>P</i> (MC)
数量百分比 (季节+站点+季节×站点) <i>N</i> % (season+site+season×site)	季节	3	7 768.8	2 589.6	1.331 5	0.176
	站点	5	22 074	4 414.8	2.270 0	0.002
	季节×站点	11	23 407	2 127.9	1.094 1	0.321
	残差	11	21 393	1 944.8		
	总和	30	76 267			
质量百分比 (季节+站点+季节×站点) <i>W</i> % (season+site+season×site)	季节	3	10 173	3 391.1	2.219 7	0.013
	站点	5	18 012	3 602.5	2.358 0	0.004
	季节×站点	11	20 862	1 896.5	1.241 4	0.167
	残差	11	16 805	1 527.7		
	总和	30	69 358			

表3 西江鱼类数量百分比空间结构差异源的SIMPER分析

Table 3 SIMPER analysis of fish number percentage difference for spatial structure in West River

物种 Species	桂平—梧州 GP-WZ		物种 Species	桂平—肇庆 GP-ZQ	
	平均相异性 Av. Diss	贡献比 Contrib/%		平均相异性 Av. Diss	贡献比 Contrib/%
鲮 <i>C. molitorella</i>	10.09	13.48	广东鲂 <i>M. terminalis</i>	8.47	10.35
银鲃 <i>S. argentatus</i>	5.73	7.65	银鲃 <i>S. argentatus</i>	5.72	6.99
瓦氏黄颡鱼 <i>P. vachelli</i>	5.44	7.28	鲮 <i>C. molitorella</i>	5.63	6.89
广东鲂 <i>M. terminalis</i>	5.37	7.17	鲤 <i>C. carpio</i>	4.40	5.38
赤眼鲮 <i>S. curriculus</i>	4.24	5.66	鲢 <i>H. molitrix</i>	4.27	5.22
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	4.08	5.45	黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i>	4.17	5.10
银鲃 <i>P. sinensis</i>	3.92	5.25	花鲮 <i>C. thrissa</i>	4.09	5.00
卷口鱼 <i>P. jordani</i>	3.01	4.02	尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	4.05	4.96
粗唇鲮 <i>L. crassilabris</i>	2.66	3.56	赤眼鲮 <i>S. curriculus</i>	3.46	4.22
鳊 <i>P. pekinensis</i>	2.49	3.33	卷口鱼 <i>P. jordani</i>	3.09	3.77
鲫 <i>C. auratus</i>	2.26	3.01	鲈 <i>H. leucisculus</i>	2.98	3.64
斑鲮 <i>H. guttatus</i>	2.03	2.72	银鲃 <i>P. sinensis</i>	2.97	3.63
鲈 <i>H. leucisculus</i>	2.01	2.69	粗唇鲮 <i>L. crassilabris</i>	2.67	3.27

鲮 (*Clupanodon thrissa*)、尼罗罗非鱼、赤眼鲮、卷口鱼、鲈、银鲃和粗唇鲮 (表 3, SIMPER 分析)。

PERMANOVA 分析表明不同季节和不同站点间鱼类 *W*% 均存在显著性差异 (表 2, $P<0.05$)。PERMANOVA 比对分析表明夏—冬季间鱼类 *W*% 存在显著差异 ($P<0.05$), 主要源于鲤、鲮、广东

鲂、赤眼鲮、鲢、草鱼和尼罗罗非鱼 *W*% 的季节差异 (表 4)。桂平—梧州鱼类 *W*% 存在显著差异 (PERMANOVA 比对分析, $P<0.05$), 主要源于鲮、广东鲂、鲤、鲢、尼罗罗非鱼、草鱼、鳊 (*Elopichthys bambusa*) 和卷口鱼 *W*% 的空间差异 (表 4)。

2.4 群落环境影响分析

西江桂平至肇庆江段距河口 190~520 km, 水

表4 西江鱼类质量百分比时空结构差异源的SIMPER分析

Table 4 SIMPER analysis of fish weight percentage difference for spatial-temporal structure in West River

夏季—冬季 Summer—Winter			桂平—梧州 GP—WZ		
物种 Species	平均相异性 Av. Diss	贡献比 Contrib/%	物种 Species	平均相异性 Av. Diss	贡献比 Contrib/%
鲤 <i>C. carpio</i>	11.56	17.79	鲢 <i>C. molitorella</i>	10.26	14.49
鲢 <i>C. molitorella</i>	9.82	15.12	广东鲂 <i>M. terminalis</i>	8.84	12.48
广东鲂 <i>M. terminalis</i>	8.15	12.55	鲤 <i>C. carpio</i>	6.12	8.64
赤眼鳟 <i>S. curriculus</i>	6.54	10.06	鲢 <i>H. molitrix</i>	5.61	7.93
鲢 <i>H. molitrix</i>	5.78	8.89	尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	5.23	7.38
草鱼 <i>C. idella</i>	2.88	4.44	草鱼 <i>C. idella</i>	4.62	6.52
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	2.71	4.18	鳊 <i>E. bambusa</i>	3.65	5.16
瓦氏黄颡鱼 <i>P. vachelli</i>	2.16	3.32	卷口鱼 <i>P. jordani</i>	2.80	3.95
花鲮 <i>C. thrissa</i>	1.82	2.80	赤眼鳟 <i>S. curriculus</i>	2.51	3.55
银鲮 <i>X. argentea</i>	1.35	2.07	鳙 <i>A. nobilis</i>	2.47	3.49

体盐度 0.08~0.18, pH 7.03~8.28, 水温 17.5~29.7 ℃, 溶解氧 5.37~9.12 mg·L⁻¹, 氧化还原电位 10.4~399.4 mv, 透明度 20~150 cm, 溶解性固体总质量浓度 0.11~0.22 g·L⁻¹, 叶绿素 *a* 质量浓度 0.28~6.50 mg·L⁻¹, 径流量 2 033~22 585 m³·s⁻¹。水温、透明度和径流量季节变化显著 ($P<0.05$, Kruskal-Wallis 非参数检验, 图 5-A—C)。Kruskal-Wallis 多重比较检验表明, 夏季和秋季水温显著高于春季和冬季 ($P<0.05$, 图 5-A), 夏季透明度显著低于春季和冬季 ($P<0.05$, 图 5-B), 夏季径流量显著高于春季和冬季 ($P<0.05$, 图 5-C)。水温、透明度和径流量的空间变化见图 5-E—F, *t* 检验表明长洲坝水利枢纽上游(桂平和濠江镇)与下游(梧州、郁南、德庆和肇庆)间的径流量存在显著差异 ($P<0.05$)。而且透明度和径流量数据存在显著的幂函数关系(图 6), 两者的 log 对数存在显著的线性相关关系 ($P<0.001$)。水体透明度的波动变化, 受控于水文调度和河流径流量的变化。

鱼类 *N*%-环境因子的 RDA 分析(图 7-A)中, 所有环境因子共解释物种数据变异的 49.92%, 其中第一轴解释了 13.00%, 第二轴解释了 11.71%, 主要影响环境因子为距河口距离、水温、径流量、透明度和溶解性固体总量, 通过前进式筛选的环境因子为距河口距离和透明度 ($P<0.05$)。RDA 三序图上物种在环境变量轴上的投影, 反映了物种分布的环境梯度; 物种和原点的连线与环境变量轴之间的

夹角, 反映了物种多度和环境梯度间的相关性^[11]。重要物种 *N*%-环境因子的 RDA 分析表明, 瓦氏黄颡鱼、卷口鱼、粗唇鲃、尼罗罗非鱼、银鲮、银鲴和南方拟鲈 (*Pseudohemiculter dispar*) *N*% 与距河口距离正相关, 与径流量负相关, 主要分布在研究河段上游、低径流量、高透明度的低温水域(图 7-B); 鲤和黄颡鱼 *N*% 与 TDS 负相关, 分布在 TDS 含量低的水域; 花鲮、鲢和广东鲂 *N*% 与距河口距离负相关, 与径流量正相关, 分布在高径流量的下游江段; 鳊、黄尾鲮 (*Xenocypris davidi*)、草鱼和舌虾虎鱼 (*Glossogobius giuris*) 分布在研究河段偏下游的高径流量的高温水域; 鲢 *N*% 与 TDS 及水温正相关, 分布在 TDS 含量高的水域; 鲮 *N*% 与溶解性固体总量及距河口距离正相关, 分布在研究河段上游的 TDS 含量较高的水域; 赤眼鳟和翘嘴鲌 (*Culter alburnus*) 位于三序图的原点位置, 对环境条件具有较弱的选择倾向。

鱼类 *W*%-环境因子的 RDA 分析(图 7-C)中, 所有环境因子共解释物种数据变异的 49.61%, 其中第一轴解释了 15.30%, 第二轴解释了 13.01%, 主要环境影响因子为水温、透明度、径流量和距河口距离, 通过前进式筛选的环境因子为水温和距河口距离 ($P<0.05$)。重要物种 *W*%-环境因子的 RDA 分析表明, 鲢和草鱼 *W*% 与水温和径流量正相关, 它们分布在高水温、高径流量、低透明度、

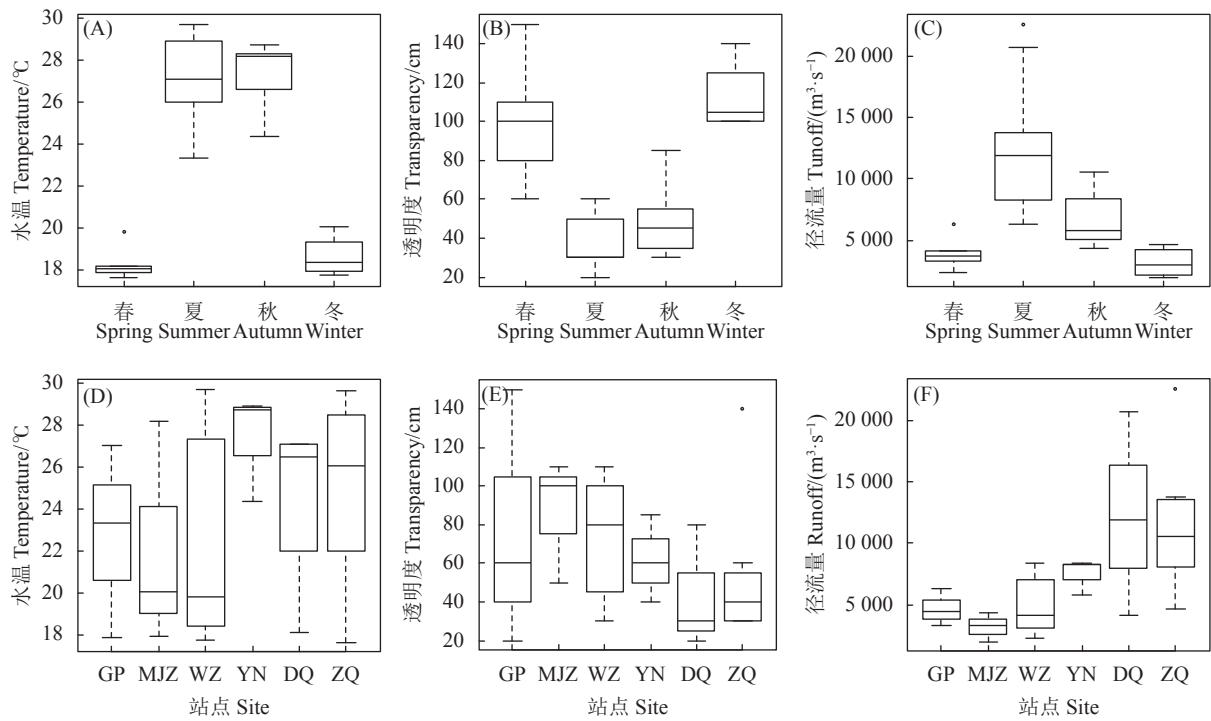


图5 季节和站点间水温、透明度和径流量的波动变化

Figure 5 Variation of water temperature, transparency and runoff among seasons and sites

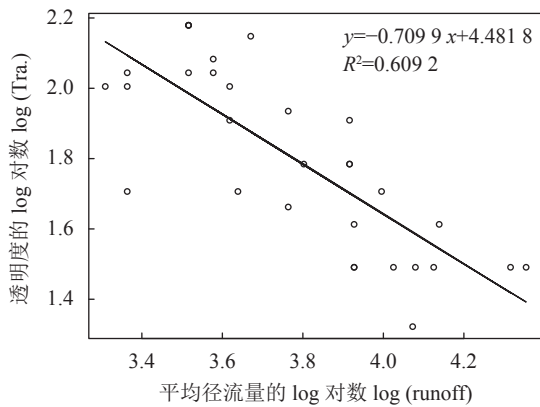


图6 透明度和径流量的幂函数关系

Figure 6 Power function relationship between transparency and average runoff

叶绿素含量高的水域；广东鲂和鲢 $W\%$ 与距河口距离负相关，倾向于分布在下游江段的高溶氧水域(图 7-D)；鲤 $W\%$ 与水温 and 径流量负相关，倾向于分布在高透明度的低温水域；瓦氏黄颡鱼和赤眼鲮 $W\%$ 与距河口距离正相关，倾向于分布在研究河段的偏上游水域；鲮、麦鲮 (*Cirrhinus mrigala*) 和花鲮分布在中等偏高的水温和径流量的环境梯度中；花鲈、鳊、鳙和海南鲃分布在低径流量、低温的下游水域；粗唇鲮、卷口鱼和尼罗罗非鱼分布在中游江段的低温水域。

3 讨论

3.1 物种多样性呈降低趋势

西江作为珠江水系的干流部分，具有郁江、柳江、北流河、桂江、贺江、罗定江和新兴江等支流汇入，年净流量占珠江总径流量的 70% 以上，西江水生态系统在很大程度上代表了珠江水生态系统。

在西江桂平至肇庆江段共采集鱼类 12 目 29 科 99 种，鲤科鱼类物种数占 46.5%，采集到濒危鱼类花鳗鲡 (*Anguilla marmorata*) 1 尾和易危物种花鲮和长臀鲮 (*Cranoglanis boudierius*) 多尾，未采集到鲟形目、赤鲟 (*Hemistrygon akabei*)、鲃 (*Tenualosa reevesii*) 和舌鲃 (*Cynoglossidae*) 等名贵珍稀物种，确证了其在西江的濒危状态。20 世纪 80 年代西江分布鱼类 136 种^[4-5]，李捷等^[5] 于 2005—2008 年在西江梧州至肇庆江段采集鱼类 13 目 29 科 96 种，本研究在上述同一江段采集鱼类 11 目 24 科 76 种，没有采到银鱼科种类和鲃形目种类，西江鱼类物种多样性呈降低趋势。部分种类未被采集到，也反映了渔获物采样调查的随机性，今后应增加调查站点和调查频次。

研究江段外来物种入侵严重，本研究共采集到外来物种 5 目 8 科 8 种，分别为条纹鲮脂鲤 (*Prochi-*

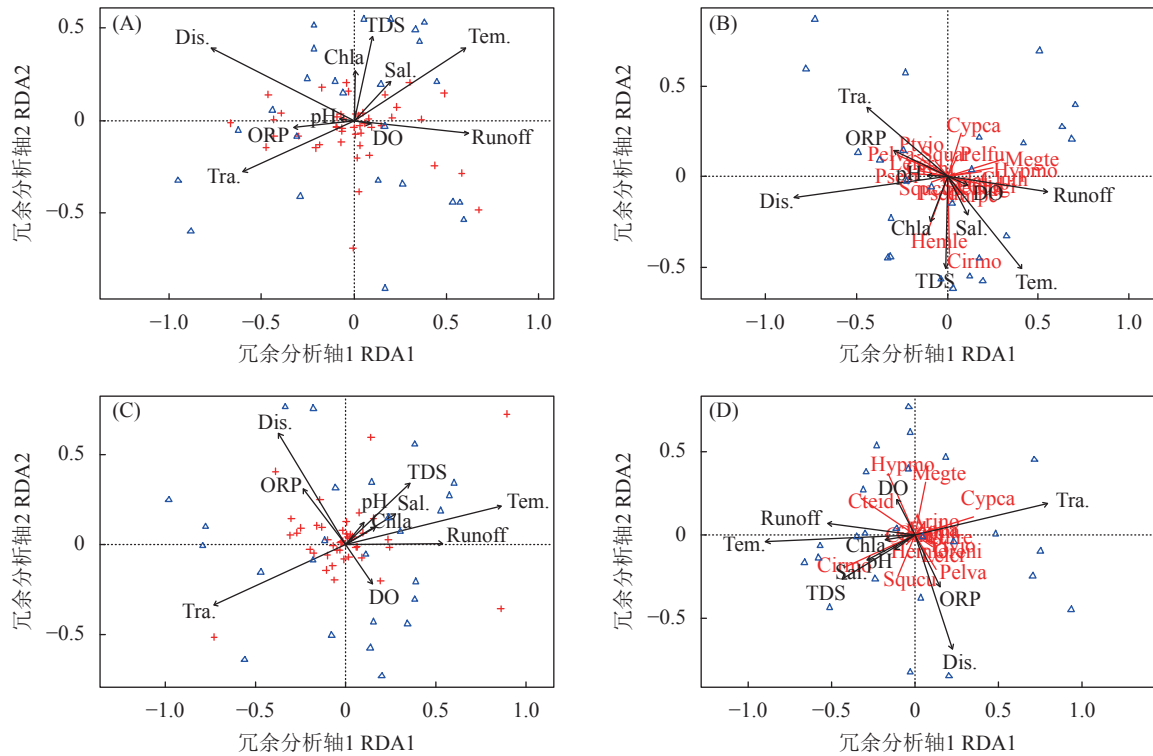


图7 西江鱼类数据-环境变量RDA分析图

鱼类 N% (A、B) 和鱼类 W% (C、D) (Δ 代表采样点, + 代表物种); 黑色箭头代表环境变量: Chl a. 叶绿素 a 含量; Dis.. 采样点至河口的距离; DO. 溶解氧含量; ORP. 氧化还原电位; Runoff. 采样前一个月内的平均径流量; Sal.. 盐度; Tra.. 透明度; TDS. 溶解性固体总量; Tem.. 水温; 红色字母为物种学名缩写, Cluth. 花鲮; Cteid. 草鱼; Eloba. 鳊; Squcu. 赤眼鳟; Psesi. 银鲈; Parpe. 鳊; Hemle. 鳊; Psedi. 南方拟鳊; Megte. 广东鲂; Culal. 翘嘴鲮; Culre. 海南鲮; Xenar. 银鲮; Xenda. 黄尾鲮; Arino. 鲮; Hypmo. 鲮; Squar. 银鲮; Otsa. 纹唇鱼; Cirmo. 鲮; Cirmr. 麦鲮; Ptyjo. 卷口鱼; Cypca. 鲤; Pelfu. 黄颡鱼; Pelva. 瓦氏黄颡鱼; Leicr. 粗唇鲮; Latma. 花鲮; Oreni. 尼罗罗非鱼; Glogi. 舌虾虎鱼; Rhigi. 子陵吻虾虎鱼

Figure 7 RDA plot of fish data and environmental variables in West River

Fish N% (A, B) and fish W% (C, D) (Δ . Sampling site, +. Species); black arrows represent environmental variables: Chl a. Chl a contents; Dis.. Distance between sampling site and the Pearl River estuary; DO. Dissolved oxygen; ORP. Oxidation-reduction potential; Runoff. Mean daily runoff during the month before the sampling day; Sal.. Salinity; Tra.. Water transparency; TDS. Total dissolved solids; Tem.. Water temperature; red letters indicate species, Cluth. *C. thrissa*; Cteid. *C. idella*; Eloba. *E. bambusa*; Squcu. *S. curriculus*; Psesi. *P. sinensis*; Parpe. *P. pekinensis*; Hemle. *H. leucisculus*; Psedi. *P. dispar*; Megte. *M. terminalis*; Culal. *C. alburnus*; Culre. *C. recurviceps*; Xenar. *X. argentea*; Xenda. *X. davidi*; Arino. *A. nobilis*; Hypmo. *H. molitrix*; Squar. *S. argentatus*; Otsa. *Osteochilus salsburyi*; Cirmo. *C. molitorella*; Cirmr. *C. mrigala*; Ptyjo. *P. jordani*; Cypca. *C. carpio*; Pelfu. *P. fulvidraco*; Pelva. *P. vachelli*; Leicr. *L. crassilabris*; Latma. *Lateolabrax maculatus*; Oreni. *O. niloticus*; Glogi. *G. giuris*; Rhigi. *Rhinogobius giurinus*

lodus lineatus)、短盖巨脂鲤 (*Piaractus brachipomus*)、麦鲮 (*C. mrigala*)、革胡子鲇 (*Clarias gariepinus*)、斑点叉尾鲷 (*Ictalurus punctatus*)、豹纹翼甲鲶 (*Hypostomus plecostomus*)、食蚊鱼 (*Gambusia affinis*) 和尼罗罗非鱼 (*O. niloticus*)。在全球范围内, 伴随河流生境受干扰程度加剧, 例如水坝拦截加强了原分离生态系统的联系, 促进了外来物种的成功定殖^[12], 生物入侵已成为影响河流生物群落和生态系统的重要因素^[13]。入侵种通过食物竞争、捕食关系和栖息地竞争等, 导致土著种群生态位萎缩甚至种群灭绝^[14]。故西江土著鱼类的保护和管理, 一定程度上应从控制外来生物入侵着手。

3.2 鱼类群落的时空结构

西江桂平至肇庆江段鱼类物种组成和群落结构呈现出显著的时空演替。物种组成时空分布变化明显, 为季节和空间的群落周转格局, 同张东等^[15]研究的河流中、下游间的分类群变化趋势一致。优势种组成和群落结构均存在显著季节差异, 鱼类优势度的季节更替以鲮最为显著, 夏、秋、冬季鲮为第一优势种, 而在春季鲮优势度较低; 夏—冬季间群落结构的季节差异, 主要源于鲤、鲮、广东鲂、赤眼鳟、鲢、草鱼和尼罗罗非鱼 W% 的差异。

河流生态系统是一个具连续性和异质性特点的线性结构^[16-17], 沿着这一线性结构理化环境梯度的

改变, 鱼类区系组成和群落结构往往发生空间演替^[18]。本研究中圆筒体形的鲤科种类银鲃、蛇鲃和卷口鱼是近上游桂平和濠江镇江段的特有优势种, 侧扁体形的鲱形目种类花鲮是下游肇庆江段的特有优势种。与本研究类似, 欧洲河流上、下游间的鱼类区系和体形特征也发生了有规律的变化: 从上游至下游“鲑科—鲤科”的变化^[18], 以及从上游圆筒体形至中下游的侧扁体形的变化^[8]。桂平江段与梧州、肇庆江段群落结构的显著差异, 主要源于鲮、广东鲂、银鲃等物种的空间分布差异。流域内鱼类群落空间变化与环境变化密切相关, 连续性变化的环境条件下, 群落多呈嵌套式空间格局, 但跳跃式变化的环境条件, 会导致群落呈周转格局^[8]。因此, 本研究中桂平江段较高的物种多样性, 以及桂平—肇庆江段间鱼类分类群的周转格局, 一定程度上由环境条件的非连续性跳跃变化引发。

3.3 影响鱼类群落的主要环境因子

物种组成和群落结构的时空动态主要由环境因子(人类干扰、气候和水文因子等)在时空尺度上的异质性引起^[3]。本研究中 RDA 分析表明影响鱼类分布的主要因子为距河口距离、水温、透明度和径流量。

距河口距离通过影响鲮、广东鲂、银鲃、鲤、鲢、尼罗罗非鱼等鱼类在不同江段间的分布, 导致了桂平江段与梧州和肇庆江段间的群落结构差异。桂平与梧州江段间的长洲水利枢纽被推测为重要影响因素。水坝通过改变河流水文状况和河流连通性等影响鱼类群落^[12]。2007 年 8 月长洲水利枢纽开始下闸蓄水^[19], 限制了洄游性鱼类广东鲂的生殖洄游, 其上溯洄游路线已受到严重干扰, 2012 年以来, 每年的 6—7 月在梧州江段形成大规模的广东鲂渔汛, 而长洲坝上游的桂平和濠江镇江段的广东鲂的分布受到限制。长洲坝也改变了西江水文状况, 将部分河段由动态环境转变为静态环境, 桂平江段形成了低径流量的缓流库区, 由于鲤具有中等水深和缓流静水区的倾向性^[20], 吸引了鲤聚集于桂平江段并形成优势种。笔者发现自 2004 年底长洲水利枢纽初步截流以来, 其下游鲤种群资源量显著低于上游江段。长洲水利枢纽阻隔引起的河流水文状况的改变和栖息地的片段化, 是导致桂平与梧州、肇庆江段鱼类群落结构差异的重要因素。

水温是决定河流生态环境的重要因子, 影响其

他环境因子, 另外作用于鱼类的分布、生长、繁殖和迁移分布等^[21]。河流水温的季节性波动显著影响了水生物种的分布(河流连续性理论^[17]), 如高温促使鱼类生理需氧量增加同时又降低水体中溶氧饱和度, 导致鱼类分布受限或死亡^[16]。多数鱼类存在特定的适宜温度范围, 适宜温度范围和河流水温共同决定了鱼类的时空分布^[22]。鲮的季节性分布与其适温范围密切相关, 鲮适宜水温为 22~26 °C^[23], 本研究中夏、秋季平均水温分别为 (27.86±1.62) °C 和 (27.57±1.65) °C, 适宜于鲮繁殖产卵和广泛分布^[24]; 冬、春季平均水温分别为 (18.25±0.87) °C 和 (17.92±0.18) °C, 不利于鲮的广泛分布, 但冬季郁南江段分布有大量鲮, 初步推测郁南江段是鲮的越冬场。冬季鲤优势度较高, 源于其较强的耐低温能力, 其适宜温度为 0~30 °C, 甚至可耐受 0~4 °C 达数月之久^[25]。RDA 分析表明鲤、广东鲂、鲮和赤眼鳟具有不同的水温分布梯度(图 7), 鲮分布在较高水温, 赤眼鳟和广东鲂次之, 鲤在低水温环境中具有较高的 $N\%$ 、 $W\%$ (图 7-B、D)。因此, 水温的季节性波动显著影响了鱼类物种的 $N\%$ 、 $W\%$ 和 IRI, 导致了群落结构的季节性差异。

径流量和流速也是影响鱼类分布和繁殖产卵的重要环境因子。本研究中长洲坝上、下游江段间径流量的显著差异, 以及对应站点间鱼类群落结构的显著差异, 表明长洲坝已改变了西江水文环境, 并作用于了鱼类分布。水坝拦截引起的水位、流速和径流量等水文状况的改变, 是水坝影响鱼类群落的最广泛性作用机制^[12]。另外, 四大家鱼的繁殖产卵对径流量具有一定的水文需求, 易雨君^[26]模拟的四大家鱼栖息地适合度模型显示, 日流量涨幅在 $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时具有较高的家鱼产卵场适合度; 珠江鲮大量繁殖的基础水文需求为持续 2 d 以上高于 $5 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的径流量^[27]。本研究中草鱼、鲢和鳙在夏、秋季具有较高的 $W\%$, 同时夏、秋季具有持续整月的高于 $5 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的径流量(图 5-B), 日流量涨幅高于 $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的月均天数分别为 8.9 d 和 5 d, 该水文条件满足了家鱼产卵需求, 适于草鱼、鲢和鳙的分布和繁殖。

透明度与水深、径流量、水体理化因子以及水生植物生物量密切相关^[28], 并作用于鱼类的分布、摄食和繁殖活动^[3]。与多数江河鱼类群落和湖泊鱼类群落研究一致^[3,28-29], 透明度对西江鱼类分布具有重要影响。透明度对鱼类分布的影响, 与径流量

关系密切,涨水引起营养盐浓度增大,但也会导致水体透明度降低^[30]。本研究中水体透明度的波动变化,受控于水文调度和河流径流量的变化,两者协同影响鱼类分布(图6)。

综上,2016—2018年在西江桂平至肇庆江段共采集鱼类12目29科99种,与前期调查比较,鱼类多样性降低,外来种增多。鱼类群落物种组成变化为季节和空间的周转格局;物种优势度时空变化显著,优势种鲮、广东鲂、赤眼鳟和鲤的优势度均具有明显的季节和空间变化(图3、图4);群落结构时空差异显著,主要表现为夏—冬季间的群落结构差异,以及桂平和梧州、肇庆江段间的群落结构差异;影响物种分布的主要环境因子为距河口距离、水温、透明度和径流量。西江鱼类群落空间断裂显著,一定程度上是长洲水利枢纽的拦截阻隔所致,应加强水坝过鱼通道管理等工作,以提高西江上、下游的连通性。

参考文献:

- [1] XING Y C, ZHANG C G, FAN E Y, et al. Freshwater fishes of China: species richness, endemism, threatened species and conservation[J]. Divers Distrib, 2016, 22(3): 358-370.
- [2] 李新辉, 陈方灿, 梁沛文. 珠江水系鱼类原色图集(广东段)·前言[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 1.
- [3] 帅方敏, 李新辉, 刘乾甫, 等. 珠江水系鱼类群落多样性空间分布格局[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3182-3192.
- [4] 陆奎贤. 珠江水系渔业资源·前言[M]. 广州: 广东科技出版社, 1990: 1.
- [5] 李捷, 李新辉, 贾晓平, 等. 西江鱼类群落多样性及其演变[J]. 中国水产科学, 2010, 17(2): 298-311.
- [6] 农业部. 农业部关于发布珠江、闽江及海南省内陆水域禁渔期制度的通告[EB/OL]. (2017-02-24). [2019-06-01]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201702/t20170224_5495607.htm.
- [7] BASELGA A. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity[J]. Global Ecol Biogeogr, 2010, 19(1): 134-143.
- [8] 陈兵, 孟雪晨, 张东, 等. 河流鱼类分类群和功能群的纵向梯度格局——以新安江流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 1-17.
- [9] LEGENDRE P, ALLAGHER E D. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data[J]. Oecologia, 2001, 129(2): 271-280.
- [10] BLANCHET F G, LEGENDRE P, BORCARD D. Forward selection of explanatory variables[J]. Ecology, 2008, 89(9): 2623-2632.
- [11] BORCARD D, GILLET F, LEGENDRE P. Numerical ecology with R[M]. New York: Springer, 2011: 154-195.
- [12] TURGEON K, TURPIN C, GREGORY-EAVES I. Dams have varying impacts on fish communities across latitudes: a quantitative synthesis[J]. Ecol Lett, 2019, 22(9): 1501-1516.
- [13] SIMBERLOFF D, MARTIN J L, GENOVESI P, et al. Impacts of biological invasions: what's what and the way forward[J]. Trends Ecol Evol, 2013, 28(1): 58-66.
- [14] BRITTON J R, RUIZ-NAVARRO A, VERREYCKEN H A. Trophic consequences of introduced species: comparative impacts of increased interspecific versus intraspecific competitive interactions[J]. Funct Ecol, 2018, 32(2): 486-495.
- [15] 张东, 宛凤英, 储玲, 等. 青弋江鱼类分类群和功能群的 α 和 β 多样性纵向梯度格局[J]. 生物多样性, 2018, 26(1): 1-13.
- [16] JACKSON D A, PERES-NETO P R, OLDEN J D. What controls who is where in freshwater fish communities: the roles of biotic, abiotic, and spatial factors[J]. Can J Fish Aquat Sci, 2001, 58(1): 157-170.
- [17] VANNOTE R L, MINSHALL G W, CUMMINS K W, et al. The river continuum concept[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1980, 37(1): 130-137.
- [18] HUET M. Profiles and biology of western European streams as related to fish management[J]. Trans Am Fish Soc, 1959, 88(3): 155-163.
- [19] 谭细畅, 陶江平, 黄道明, 等. 长洲水利枢纽鱼道功能的初步研究[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(4): 58-62.
- [20] BUTLER S E, WAHL D H. Common carp distribution, movements, and habitat use in a river impounded by multiple low-head dams[J]. Trans Am Fish Soc, 2010, 139(4): 1121-1135.
- [21] CAISSIE D. The thermal regime of rivers: a review[J]. Freshw Biol, 2006, 51(8): 1389-1406.
- [22] GORDON W, LIN P. A species tolerance index of maximum water temperature[J]. Water Qual Res J Can, 1996, 31(4): 875-893.
- [23] FROESE R, PAULY D. FishBase[EB/OL]. 2019. <https://www.fishbase.se/summary/Cirrhinus-molitorella.html>.
- [24] FAO. Cultured aquatic species information programme: *Cirrhinus molitorella*[DB/OL]. [2019-06-1]. http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Cirrhinus_molitorella/en.
- [25] 常玉梅, 匡友谊, 曹鼎臣, 等. 低温胁迫对鲤血液学和血清生化指标的影响[J]. 水产学报, 2006, 30(5): 701-706.
- [26] 易雨君. 长江水沙环境变化对鱼类的影响及栖息地数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 2008: 161.
- [27] 帅方敏, 李新辉, 李跃飞, 等. 珠江东塔产卵场鳊繁殖的生态水文需求[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6071-6078.
- [28] GUO C B, CHEN Y S, LIU H, et al. Modelling fish communities in relation to water quality in the impounded lakes of China's South-to-North Water Diversion Project[J]. Ecol Model, 2019, 397: 25-35.
- [29] SHUAI F M, LI X H, CHEN F C, et al. Spatial patterns of fish assemblages in the Pearl River, China: environmental correlates[J]. Fund Appl Limnol, 2017, 189(4): 329-340.
- [30] CAMARGO A M, ESTEVES F A. Influence of water level variation on fertilization of an oxbow lake of Rio Mogi-Guaçu, state of São Paulo, Brazil[J]. Hydrobiologia, 1995, 299(3): 185-193.