

珠江中上游水环境状况分析与评价

刘乾甫^{1,2}, 杜浩^{1*}, 赖子尼², 帅方敏², 郭霞¹

(1. 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 中国水产科学研究院长江水产研究所, 武汉 430223;

2. 中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广州 510380)

摘要: 为了解珠江中上游水环境现状、水体的污染状况和主要污染因素, 本研究分别于2016年3月(平水期)、6月(丰水期)和9月(枯水前期)对广东省肇庆市以上的珠江中上游江段水体环境进行采样与测定, 选取透明度(SD)、pH、溶解氧(DO)、非离子氨(NH₃)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、总氮(TN)、总磷(TP)和叶绿素a(Chla)等10项指标, 采用限定值、单项污染指数和综合污染指数法进行水质评价和污染因素分析。结果显示: 水体污染主要为氮源污染, 17个采样点的TN和NO₃⁻-N含量在3个采样期的超标率均在90%以上, 最大超标倍数分别达到2.72倍(2016年9月, 鲁布革)和2.13倍(2016年9月, 八渡); 水体中还存在着NH₃、SD、TP和Chla等因子超标情况, 前3者污染状况主要受珠江流域水情期影响, Chla主要于上游筑坝库区鲁布革站位平水期和枯水前期检出超标; 水体磷污染主要以“点源污染”为主。基于水体综合污染指数P_j, 各采样点水体环境可分为3类: 第I类, 采样点水体流速快且远离居民区, P_j均值处于1~2之间, 呈“轻污染”、“轻度超警戒水平”状况; 第II类, 采样点全年水体TN和NO₃⁻-N含量较高, P_j均值处于2~3之间, 呈“中污染”等级、“中度超警戒水平”状况; 第III类, 包括石龙和藤县两个样点, 3个时期P_j变化较大, 丰水期P_j都大于3, 呈“重污染”、“严重超警戒水平”状况, 而在其他时期呈“轻-中污染”、“轻度-中度超警戒水平”状况。根据本研究结果, 建议在降雨量较少时期, 对于上游库区进行生态调控, 增加水体的流动性, 以减少“藻华”的发生; 5~8月主要降雨期, 要减少临河区域的林木砍伐、土地拓垦和田地施肥量及加强城镇生活垃圾的清理等, 以防泥沙和营养物质等被带入河流, 加重水体污染。本研究可为珠江中上游水体环境保护与管理提供数据支持。[中国渔业质量与标准, 2019, 9(4):36-47]

关键词: 珠江中上游; 水体环境; 污染指数; 水质评价; 污染因素; 总氮

中图分类号: S913

文献标志码: A

文章编号: 2095-1833(2019)04-0036-12

珠江是中国南方最大的水系, 干流全长2 214 km, 为中国第3大河流, 其径流量仅次于长江, 居全国第2位。珠江流域地势大体呈西高东低、北高南低趋势, 上游处于云贵高原与黔桂地区的高山峡谷, 平均海拔超过1 000米, 中游为山地与丘陵相间, 下游为珠江三角洲冲击平原。西江是珠江的主干流, 位于珠江干流的中上游地区, 自西向东流经中国云南、贵州、广西和广东四省(自治区), 其主要干支流有南盘江、北盘江、红水河、柳江、郁江、桂江、黔江、浔江及贺江等^[1]。珠江中上游属于热带—亚热带季风气候区, 常年温暖, 阳光充足, 雨量丰沛, 加上流域内山地较多, 河道狭窄, 水流湍急, 水体自然净化能力较强, 水生态环境状况良好, 在历史上一直是沿江城市居民

日常用水的主要来源。珠江中上游江段优质的水文地理环境也孕育了珠江流域众多珍稀特有经济鱼类资源。早期调查表明珠江中上游江段产卵场密集, 鱼类群落多样性丰富, 渔业资源量较高, 其特殊的水文地理、礁群流体环境为鱼类提供了良好的产卵、孵化及育肥等繁育场所^[2]。然而, 近年来, 随着河流的过度开发、珠江沿岸城镇化的发展, 以及流域内农业生产中投放的大量农药化肥原料被雨水带入河流, 西江渔业资源与环境受到了巨大的影响。多次调查数据表明, 由于受水坝阻隔等多种因素影响, 珠江渔业资源已呈现衰退趋势^[3-4]。前期关于珠江水系的环境调查研究主要集中于珠江下游的珠三角河网和珠江口区域^[5-6], 对于珠江中上游较多见的是从鱼类和浮

收稿日期: 2019-02-28; 接收日期: 2019-05-27

资助项目: 农业部淡水生物多样性保护重点实验室开放课题(LFBC0909); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2017HY-ZC0704); 珠江流域典型地区水产养殖产排污系数测算及技术管理项目(9020190002)

第一作者: 刘乾甫, 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为渔业资源与环境保护, liuqfwh@163.com

通信作者: 杜浩, 研究员, 研究方向为濒危水生动物种群监测与保护生物学, duhao@yfi.ac.cn

游生物群落角度进行渔业生物资源的调查研究,间接反应出环境的变化及其影响^[7-8],而对于其水体环境状况,尤其是水体主要污染因子及其污染程度均缺乏相应的监测分析。

为此,本研究分别于2016年3月(平水期)、6月(丰水期)和9月(枯水前期)对广东省肇庆市以上的珠江中上游江段的水体进行了调查取样与测定分析,并对测定结果进行了水环境状况的分析与评价,以期全面了解珠江中上游水环境现状、水体的污染状况和主要污染因素,并基于本研究的水体指标测定与分析结果,为珠江中上游水体环境保护与管理、珠江流域渔业资源保护与修复提供数据支撑和理论基础。

1 材料与方法

1.1 采样站位概况

于2016年3月(平水期)、6月(丰水期)、9月(枯水前期),分别开展对珠江中上游鲁布革、八渡、白层、大化、合山、石龙、武宣、桂平(大腾峡)、石咀(东塔产卵场)、平南、藤县、坝上(梧州长洲坝上)、梧州(梧州长洲坝下)、封开、郁南、德庆和肇庆等17个样点的野外调查采样工作。其中,鲁布革采样点处于珠江上游末端鲁布革水电站修筑后形成的万丰湖区域,八渡、白层位于南、北盘江流域,大化、合山、石龙和武宣位于红水河干流,其他样点均位于西江干流(图1)。

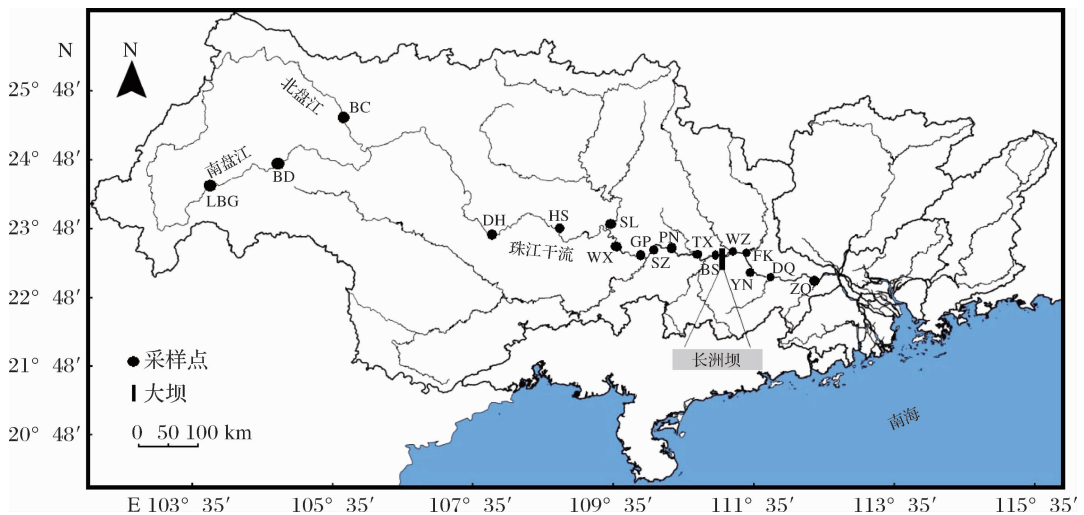


图1 珠江中上游采样点分布图

LBG, BD, BC, DH, HS, SL, WX, GP, SZ, PN, TX, BS, WZ, FK, YN, DQ及ZQ分别表示采样点鲁布革、八渡、白层、大化、合山、石龙、武宣、桂平、石咀、平南、藤县、长洲坝上、梧州、封开、郁南、德庆和肇庆。下同。

Fig.1 Sampling sites in the upper and middle reaches of the Pearl River

LBG, BD, BC, DH, HS, SL, WX, GP, SZ, PN, TX, BS, WZ, FK, YN, DQ and ZQ are, represented for sampling stations of Lubuge, Badu, Baiceng, Dahua, Heshan, Shilong, Wuxuan, Guiping, Shizui, Pingnan, Tengxian, Changzhoubashang, Wuzhou, Fengkai, Yunan, Deqing and Zhaoqing, respectively. The same below.

1.2 样品采集与分析

每次采样时,使用5 L有机玻璃采水器取表层水(0.5 m)水样,并使用萨氏盘现场测定水体透明度(secchi depth, SD, cm);使用YSI便携式多参数水质分析仪(美国,YSI公司)测定pH、溶解氧(dissolved oxygen, DO, mg/L)、氧化还原电位(oxidation reduction potential, ORP, mV)、电导率(conductivity, Cond, $\mu\text{S}/\text{m}$)和总可溶性固体(total dissolvable solid, TDS, g/L)等理化因子;取一定量水样,经WHATMAN GF/C滤膜过滤后分光光度法测定水体叶绿素a(Chla)含量($\mu\text{g}/\text{L}$)^[9];另取一定量水样按要求处理后经Skalar流动注射水质分析仪(荷兰,Skalar公司)测定氨氮(NH_4^+

-N)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)以及硅酸盐($\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$)等营养盐指标含量(mg/L);非离子氨(NH_3 , mg/L)根据已测指标 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、pH、水温及相应公式计算得出^[10]。

1.3 水体环境质量分析与评价

1.3.1 评价指标及其限值

在水体环境质量评价中,参照文献^[11-12]所列出的渔业水体中最最重要的水质参数,结合实际监测指标情况及富营养化指标参数,确定SD、pH以及DO、 NH_3 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、TN、TP和Chla含量等10项指标为水质评价指标。该研究中pH的限定范围取6.50~8.50,处于此区间内为合格; NH_3 的

限定值取 0.02 mg/L, 高于 0.02 mg/L 按超标计算; DO 的限定值采用 5.0 mg/L, 高于 5.0 mg/L 为合格, 低于 5.0 mg/L 按超标计算^[13]; SD 的限定值取 60 cm^[11], 以 SD 高于 60 cm 为合格, 低于 60 cm 按超标计算; Chla 的限定值取 10.00 μg/L, 高于 10.00 μg/L 水体达到富营养化状态水平, 视为不合格, 低于 10.00 μg/L 视为合格^[12]。NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 含量的限定值分别取 1.00 mg/L 和 0.15 mg/L^[14], 其余参数 NH₃、NH₄⁺-N、TN、TP 含量的限定值分别取 0.02 mg/L、1.00 mg/L、1.00 mg/L 和 0.20 mg/L^[15], 超过限定值均按超标计算。

1.3.2 评价方法

依据文献^[16], 采用单项污染指数和负荷比对监测参数进行单项评价, 采用综合污染指数对水体环境质量进行整体评价。单项污染指数计算公式见式(1)。

$$P_i = C_i / C_{i0} \quad \text{式(1)}$$

式(1)中: P_i 为水环境中污染物 i 的污染指数; C_i 为水环境中污染物 i 的实测值; C_{i0} 为水环境污染物 i 的限量标准值。 $P_i \leq 1$ 时, 表示水环境未受污染, 指

标合格, $P_i =$ 计算所得值; 当 $P_i > 1$ 时, 表示水环境受到污染, 指标不合格, $P_i = 1.0 + 5 \times \lg(\text{计算所得值})$ ^[17]。超标率的计算公式见式(2)。

$$\text{超标率} = \frac{\text{超标样本数}}{\text{监测样本数}} \times 100\% \quad \text{式(2)}$$

在单项污染指数评价的基础上, 采用兼顾单项污染指数最大值和平均值的综合污染指数 P_j 进行评价, 其计算公式见式(3)。

$$P_j = [(P_{i\max}^2 + P_{i\text{ave}}^2) / 2]^{0.5} \quad \text{式(3)}$$

式(3)中: $P_{i\max}$ 为最大单项污染指数, $P_{i\text{ave}}$ 为平均单项污染指数。

污染物负荷比的计算公式见式(4)。

$$Q_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i \times 100\% \quad \text{式(4)}$$

式(4)中: Q_i 为污染物 i 的负荷比; n 为参评指标总数, P_i 为水环境中污染物 i 的单项污染指数。

依据水体环境综合污染指数, 将水质状况分为 5 个等级^[18](表 1), 并对所研究的区域水体的污染程度和污染水平进行评价。

表 1 水质状况分级

Tab. 1 Grades of water environment

等级 Grade	综合污染指数 Comprehensive pollution index	污染程度 Degree of pollution	污染水平 Level of pollution
1	$P_j < 0.7$	清洁	清洁
2	$0.7 < P_j \leq 1.0$	尚清洁	标准限量内
3	$1.0 < P_j \leq 2.0$	轻污染	轻度超警戒水平
4	$2.0 < P_j \leq 3.0$	中污染	中度超警戒水平
5	$P_j > 3.0$	重污染	严重超警戒水平

1.3.3 统计分析方法

文章数据处理与作图使用 Excel 2007 软件, 采用 MATLAB 软件进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 水体理化环境状况

各采样区域水体 pH 变化范围为 7.03 ~ 9.04, 平水期、丰水期及枯水前期均值分别为 8.11、7.83 和 7.86(图 2a)。水体溶解氧含量变化范围为 5.84 ~ 9.57 mg/L, 3 个时期 DO 均值变化不大, 分别为 7.48(平水期)、7.58(丰水期)和 6.99 mg/L(枯水前期)(图 2b)。3 个时期水体 SD 差别较大, 丰水期最低, 最小值仅为 20 cm, 均值为 45 cm; 其次为平水期, SD 均值为 127 cm; 枯水前期 SD 最高, 变化范围为 75 ~

230 cm, 均值达到 149 cm(图 2c)。水体总磷含量呈现枯水前期明显高于平水期和丰水期的分布状况, 均值分别为 0.055 7(平水期)、0.095 4(丰水期)及 0.173 6 mg/L(枯水前期), 但部分样点在部分时期也会凸显出较高的总磷水平, 如 2016 年 3 月(平水期)梧州采样点 TP 含量达到 0.267 3 mg/L(图 2d)。水体总氮含量变化范围为 0.636 0 ~ 3.715 3 mg/L, 整个采样期大部分采样点总氮含量均高于 1.0 mg/L, 其中上游鲁布革、八渡及白层等采样区域的总氮含量高于中下游位点(图 2e)。水体氨氮含量在丰水期较平水期和枯水前期略高, 平水期、丰水期及枯水前期均值分别为 0.149 7、0.208 9 和 0.139 1 mg/L, 其中丰水期氨氮含量峰值达到 0.507 5 mg/L(桂平大藤峡)(图 2f)。水体 Chla 含量变化范围为 0.17 ~ 25.85 μg/L, 其中处于鲁布革水电站库区内水体 Chla 含量较高, 平水期和枯

水前期分别达到25.85 $\mu\text{g/L}$ 和17.72 $\mu\text{g/L}$,呈现富营养化状况,其余样点在整个采样期水体 Chla 含量大

都在10 $\mu\text{g/L}$ 以内,显示“贫营养—中营养”水体特征(图2g)。

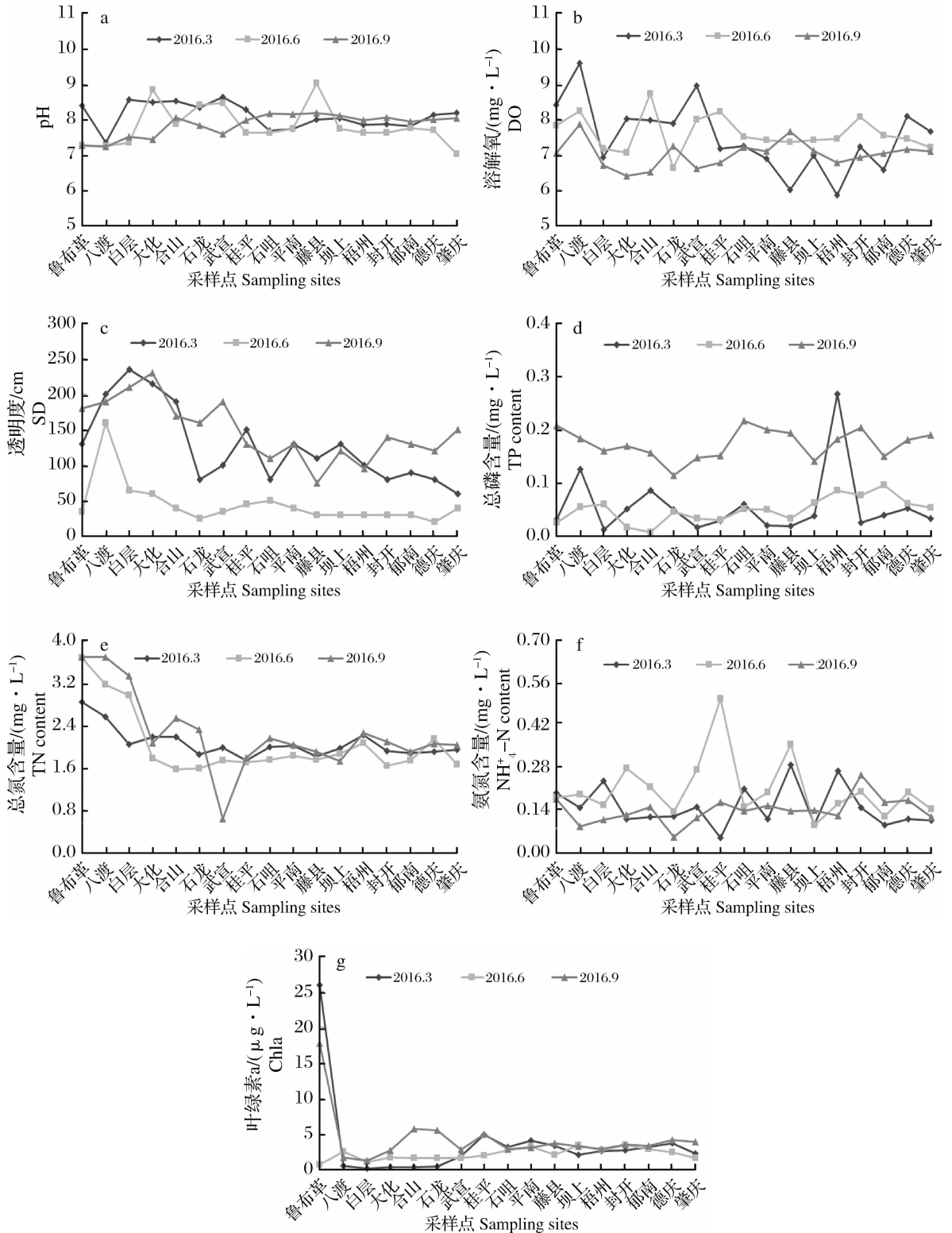


图2 珠江中上游主要水体理化指标变化

a: pH; b: 溶解氧(DO); c: 透明度(SD); d: 总磷(TP); e: 总氮(TN); f: 氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$); g: 叶绿素 a(Chla)。

Fig. 2 Changes of physical-chemical parameters in the upper and middle reaches of the Pearl River

a: pH; b: dissolved oxygen; c: secchi depth; d: total phosphorus; e: total nitrogen; f: ammonia nitrogen; g: chlorophyll a.

其他主要环境因子均值及其变化范围见表2,其中,NO₃⁻-N含量与TN变化趋势相近,PO₄³⁻-P含量与TP含量变化相似;枯水前期NO₂⁻-N均值要高于丰水期和平水期,但丰水期石咀样点(0.320 3 mg/L)和平水期藤县样点(0.132 1 mg/L)NO₂⁻-N含量凸显峰值;丰水期水体NH₃含量较高,均值达0.027 0 mg/L,最大值达到0.179 3 mg/L(藤

县);水体氧化还原电位呈现平水期>丰水期>枯水前期的变化规律;珠江中上游水体(N/P)较高,平水期和丰水期表现为明显的磷限制型(N/P>16),N/P均值分别为64.91和63.03,枯水前期氮磷比下降,均值为13.19。其他指标如水温、电导率、盐度及硅酸盐(SiO₃²⁻-Si)含量时空差异不大,或仅呈现一定季节变化(如水温)。

表2 珠江中上游各水情期水体理化因子均值及范围

Tab.2 Mean and range of physical-chemical parameters of each water regime in the upper and middle reaches of the Pearl River

n = 17

理化因子 Factors	平水期 Level period	丰水期 Wet season	枯水前期 Early dry season
水温(WT, °C)	17.78(16.20~19.60)	24.99(21.80~28.20)	27.37(21.91~30.14)
电导率(Cond, μS·m ⁻¹)	0.24(0.13~0.34)	0.27(0.18~0.39)	0.32(0.24~0.39)
盐度(Sal)	0.12(0.07~0.19)	0.13(0.08~0.19)	0.14(0.11~0.19)
氧化还原电位(ORP, mV)	146.15(117.40~180.50)	105.67(83.40~154.60)	89.51(52.90~104.40)
总可溶性固体(TDS, g·L ⁻¹)	0.17(0.10~0.26)	0.18(0.11~0.26)	0.20(0.14~0.26)
硝酸盐氮(NO ₃ ⁻ -N, mg·L ⁻¹)	1.72(0.58~2.46)	1.39(0.15~2.86)	1.85(0.29~3.13)
亚硝酸盐氮(NO ₂ ⁻ -N, mg·L ⁻¹)	0.01(0.00~0.13)	0.03(0.00~0.32)	0.08(0.03~0.25)
非离子氨(NH ₃ , mg·L ⁻¹)	0.01(0.00~0.03)	0.03(0.00~0.18)	0.01(0.00~0.03)
磷酸盐(PO ₄ ³⁻ -P, mg·L ⁻¹)	0.02(0.00~0.06)	0.03(0.00~0.05)	0.10(0.07~0.13)
硅酸盐(SiO ₃ ²⁻ -Si, mg·L ⁻¹)	2.76(1.95~3.75)	2.79(1.89~4.54)	3.56(2.61~4.10)
氮磷比(N/P)	64.91(8.38~168.76)	63.03(18.33~264.42)	13.19(4.31~20.91)

2.2 水质状况分析

整个调查期间珠江中上游各采样点监测数据统计结果见表3。从表中数据可以看出,选取的10个评测项目中,平水期、丰水期及枯水前期水体NO₃⁻-N和TN含量的平均值均超过限定值,而且样点超标率较高。平水期、丰水期枯水前期水体NO₃⁻-N超标率均达到94.12%,TN超标率分别为100%、100%和94.12%。NO₃⁻-N和TN含量均在枯水前期出现最高值,最大超标倍数分别为2.13倍和2.72倍。其次,超标较为严重的指标为透明度,主要出现在丰水期。平水期和枯水前期水体透明度均值分别为127 cm和149 cm,但丰水期水体泥沙含量增大,使得透明度明显下降,均值仅为45 cm,这一时期超标率

达到82.35%,最小值为20 cm。其他指标中,出现超标的因子主要有NH₃、NO₂⁻-N、TP和Chla。NH₃含量在3个水情期均有超标状况,超标率分别为17.65%、23.53%和5.88%,但最大超标倍数达到7.97倍(丰水期,藤县)。NO₂⁻-N含量在丰水期和枯水前期出现超标,TP在平水期和枯水前期出现超标,两者的超标率均小于25%,超标倍数也在1倍以内。珠江上游末端鲁布革站位,筑坝形成了库区,在平水期和枯水前期水体基本处于停滞状态,水体中浮游植物丰度远较其他样点高,两个水情期水体Chla含量分别为25.85 μg/L和17.72 μg/L,属于超标,显示该处水体呈富营养化状态;除鲁布革站位外,其他区域水体中Chla含量均未出现超标。

表3 珠江中上游水质状况分析结果
Tab.3 Analyzing results of water quality in the upper and middle reaches of the Pearl River

n = 17

参数 Parameters	平水期 Level period			丰水期 Wet season			枯水前期 Early dry season			限定值 Limits
	平均值	超标率	最大超标倍数	平均值	超标率	最大超标倍数	平均值	超标率	最大超标倍数	
	Average value	Rate of ultra standard	Multiple of max ultra standard	Average value	Rate of ultra standard	Multiple of max ultra standard	Average value	Rate of ultra standard	Multiple of max ultra standard	
pH	8.11	—	/	7.83	11.76%	0.06	7.86	—	/	6.50 ~ 8.50
DO(mg · L ⁻¹)	7.48	—	/	7.58	—	/	6.99	—	/	5.00
NH ₃ (mg · L ⁻¹)	0.01	17.65%	0.44	0.03	23.53%	7.97	0.01	5.88%	0.30	0.02
NH ₄ ⁺ - N(mg · L ⁻¹)	0.15	—	/	0.21	—	/	0.14	—	/	1.00
NO ₃ ⁻ - N(mg · L ⁻¹)	1.72	94.12%	1.46	1.39	94.12%	1.86	1.85	94.12%	2.13	1.00
NO ₂ ⁻ - N(mg · L ⁻¹)	0.01	—	/	0.03	5.88%	1.14	0.08	11.76%	0.64	0.15
TN(mg · L ⁻¹)	2.07	100%	1.85	2.05	100%	2.69	2.26	94.12%	2.72	1.00
TP(mg · L ⁻¹)	0.06	5.88%	0.34	0.05	—	/	0.17	23.53%	0.08	0.20
SD(cm)	127.00	—	/	45.00	82.35%	0.67	149.00	—	/	60.00
Chla(μg · L ⁻¹)	3.60	5.99%	1.59	2.18	—	/	4.28	5.88%	0.72	10.00

注:表中“—”表示没有出现超标;“/”表示没有计算该数值。

2.3 水质评价

整个调查期间,珠江中上游的水质评价及水体污染等级结果见表4。结果表明,珠江中上游17个采样点的NO₃⁻ - N和TN的单项污染指数 P_i 均大于1,表明水体受到无机氮源物质的污染;NH₃和SD2项指标的单项污染指数在丰水期时大于1,主要是由于部分样点的NH₃浓度较高(石龙、藤县)和丰水期水体泥沙含量大SD下降。其余指标中,TP在枯水前期时单项污染指数 P_i 为0.87,污染程度为“尚清洁”,可能与部分样点的TP含量超标有关。平水期主要污染物质为TN和NO₃⁻ - N,污染负荷比分别为32.33%和27.02%;丰水期主要污染物质为TN、SD、NO₃⁻ - N和NH₃,其污染负荷比分别为26.06%、21.07%、17.19%和12.51%;枯水前期主要污染物质为TN、NO₃⁻ - N和TP,污染负荷比分别为29.66%、24.94%和9.70%。

从时间上看,平水期、丰水期和枯水前期珠江中上游水体综合污染指数 P_j 分别为1.82、1.76和1.89,根据表1的渔业水质分级,可以看到3个水情期水质均为“轻污染”等级,污染水平为“轻度超警戒水平”。对每个采样点的综合污染指数 P_j 分析结果见图3,由图可以看到,上游鲁布革、八渡、白层采样站位水体受

污染较为严重;中下游区域的石龙、武宣、藤县和德庆等样点在丰水期的水体综合污染指数 P_j 明显较另外两个时期高。

基于水体综合污染指数 P_j ,对珠江中上游各采样点的水体环境质量状况进行SOM(Self-organizing map)聚类分析,结果见图4。珠江中上游水体环境大致可以分为3类:第I类,武宣、桂平、石咀、平南、坝上、封开、郁南、德庆和肇庆等样点,参照图3可知,这些样点在3个水情期的水体综合污染指数 P_j 及其均值都处于1~2之间,显示整个调查期间水体环境质量状况比较稳定,处于“轻污染”等级、“轻度超警戒水平”状况;第II类,鲁布革、八渡、白层、大化、合山和梧州等样点,这些样点在3个水情期的水体综合污染指数 P_j 及其均值大都处于2~3之间,显示整个调查期间水体环境质量状况比较严重,呈“中污染”等级、“中度超警戒水平”状况;第III类,石龙和藤县两个样点,二者在3个水情期的水体综合污染指数 P_j 差别较大,处于1~5之间,丰水期水体环境质量状况比较严重,呈“重污染”等级、“严重超警戒水平”状况,而在其他时期略低,处于1~2之间,“轻污染”等级、“轻度超警戒水平”状况。

综上,所调查的珠江中上游大部分采样区域水体

大都呈现“轻污染”、“轻度超警戒水平”状况;(鲁布革、八渡和白层)水质受污染较严重,要劣于中下游

水质;但中下游部分样点(石龙、藤县和德庆)丰水期水体综合污染指数偏高,水质劣于其他时期(图4)。

表4 珠江中上游水质评价及污染等级

Tab.4 Assessment of major aquaculture pond water quality and pollution level in the upper and middle reaches of the Pearl River

n = 17

参数 Parameters	平水期 Level period		丰水期 Wet season		枯水前期 Early dry season	
	单项污染指数 P_i	负荷比/% Q	单项污染指数 P_i	负荷比/% Q	单项污染指数 P_i	负荷比/% Q
	Single pollution index	Duty ration	Single pollution index	Duty ration	Single pollution index	Duty ration
pH	0.58	7.29	0.63	6.58	0.33	3.67
DO(mg · L ⁻¹)	0.68	8.56	0.66	6.96	0.72	7.95
NH ₃ (mg · L ⁻¹)	0.51	6.44	1.19	12.51	0.56	6.20
NH ₄ ⁺ - N(mg · L ⁻¹)	0.15	1.89	0.21	2.19	0.14	1.54
NO ₃ ⁻ - N(mg · L ⁻¹)	2.15	27.02	1.64	17.19	2.25	24.94
NO ₂ ⁻ - N(mg · L ⁻¹)	0.07	0.93	0.25	2.58	0.58	6.43
TN(mg · L ⁻¹)	2.57	32.33	2.48	26.06	2.67	29.66
TP(mg · L ⁻¹)	0.30	3.72	0.25	2.58	0.87	9.70
SD(cm)	0.55	6.92	2.01	21.07	0.44	4.85
Chla(μg · L ⁻¹)	0.39	4.89	0.22	2.29	0.46	5.06
综合污染指数 P_j	1.82		1.76		1.89	
污染程度	轻污染		轻污染		轻污染	
污染水平	轻度超警戒水平		轻度超警戒水平		轻度超警戒水平	

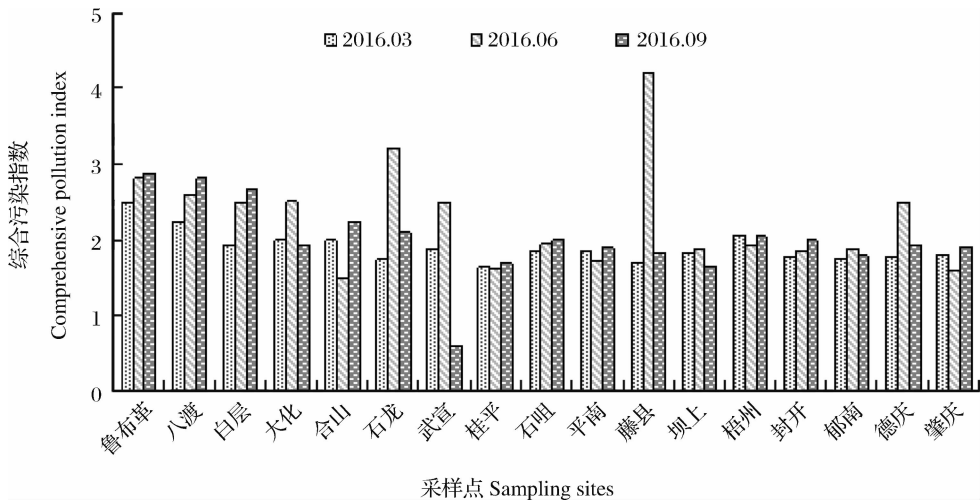


图3 珠江中上游各采样点的水体综合污染指数

Fig.3 Water comprehensive pollution index variation in the upper and middle reaches of the Pearl River

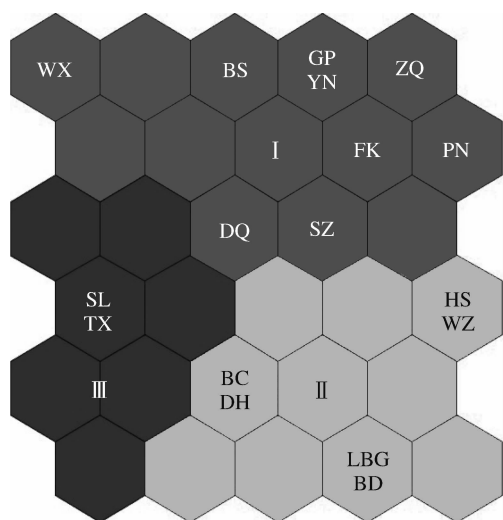


图4 基于水体综合污染指数的珠江中上游水体环境质量状况聚类分布图

Fig.4 Clustering graph of water quality based on water comprehensive pollution index in the upper and middle reaches of the Pearl River

3 讨论

3.1 珠江中上游水体中的主要污染因子及影响分析

进行流域水生态环境质量调查与评价研究可为流域环境管理提供基础数据,并协助管理者开展流域保护措施提供重要技术支持^[19]。由本研究监测结果可知,珠江中上游水体主要受到氮源物质污染。3个采样时期,17个采样点的TN和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 超标率均在90%以上,最大超标倍数分别达到2.72倍和2.13倍。氮元素是生物生长及含氮物质合成的必需元素。水体氮源来自大气溶解、固氮生物(细菌、藻类)合成、雨水径流携带汇入及水体的含氮物质分解等途径^[20-21],但是过高的氮物质含量也是水体富营养化的表现,一旦其他条件适宜,可能会导致藻华的出现^[20]。为此,《渔业水质标准》中对渔业水体TN含量作了限定要求^[13];同时,《地表水环境质量标准》也根据TN含量进行了水质分类,TN含量越高,水质等级越低。因此,自然水体中过高的N含量也是水质较差的表现^[14]。

除TN和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 污染因素外,在珠江中上游河流水体中还存在着 NH_3 、SD和TP等因子超标状况。水体中 NH_3 的含量与水体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量、水温、

pH、气温和大气压强等多个因子相关,在自然水体中目前尚难以控制。但由于 NH_3 对鱼卵和仔稚鱼具有一定的毒性^[22],应尽量控制蛋白质含量高的物质大量进入水体,因为高蛋白物质分解会使 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高,并可产生 NH_3 ^[21]。本研究中,丰水期石龙及藤县站水体中 NH_3 含量极高,超标倍数达3.65和7.97倍。这可能是由于采样站点分别位于石龙码头和藤县角咀码头,物运繁忙,泊船较多,加之河岸附近即为农贸肉菜市场,日常产生有生活垃圾和污水污染物;而2016年6月采样时恰逢雨季,阴雨天气时间持续达一个月,强降雨带入大量陆地有机杂质进入河流,水体中有机质的发酵分解形成大量 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 NH_3 ,造成了这一时期 NH_3 含量凸显高值。珠江中上游河流水体SD超标主要出现于丰水期,由于丰水期降雨量大,大量泥沙进入水体,导致水体SD下降。丰水期属于珠江流域的禁渔期,为大多数鱼类产卵繁殖期。研究显示,鱼类产卵繁殖对水体流量、水温、含沙量和涨水历时等水文因素均有适宜范围,水体保持一定比例的泥沙含量对于维持产卵场的河床结构和鱼卵孵化具有重要意义^[23-24];但丰水期水体泥沙含量过高、过于浑浊也会使鱼类窒息,为此,渔业水质标准中对水体悬浮颗粒物含量也作了限值规定^[13]。目前关于泥沙含量高造成的SD下降与渔业资源消长的动态变化关系目前尚无深入研究,但是对于丰水期珠江中上游水土流失较为严重的现象,建议有关部门采取相应的防控措施。在珠江中上游水体中,TP也是超标因子之一,主要表现为平水期和枯水前期时样品中TP含量较高,TP含量超标尤其在人类活动较多的样点更为突出;但是,在丰水期,17个样点中磷含量普遍较低,说明丰水期间随大量地表水汇入珠江中的磷较少,且水量增大对水体中磷含量具有稀释作用,表明珠江中上游水体磷污染目前主要限于“点源污染”,不同于其他区域的地表径流的“面源污染”^[25-27]。

3.2 珠江中上游水体环境状况的时空差异

本研究中得到的平水期、丰水期和枯水前期珠江中上游水体环境综合污染指数 P_i 分别为1.82、1.76和1.89,均呈“轻污染”、“轻度超出警戒水平”状态,但3个时期的主要污染因素及其污染负荷比不同。平水期,主要是TN和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 超标严重;枯水前期TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP是最主要的污染物质;丰水期,除去TN外,SD是最主要的污染因素,这个时期水体SD的污染负荷比为21.07%,超标率达到82.35%,2项

指标都远远高于其他2个时期。不同于湖泊和水库等,河流水体SD下降的主要由非生物因素(包括泥沙等固体悬浮颗粒物)引起^[28]。本研究中,丰水期水体Chla含量较低,并且采样时遇有强降雨,SD显著降低主要是由于雨水径流将大量泥沙带入造成水体浑浊度加大导致。此外,丰水期水体NH₃含量明显高于其他时期,也是主要的污染物质。以上分析表明丰水期是珠江中上游水体环境较差的时期。

本研究中基于水体综合污染指数(P_j),将珠江中上游各采样点的水体环境质量分为3大类,第I类,包括:武宣、桂平、石咀、平南、坝上、封开、郁南、肇庆和肇庆,这些样点在3个时期 P_j 及其年均值大都处于1~2之间,水体环境质量状况比较稳定,呈“轻污染”、“轻度超警戒水平”状况,属于环境质量较好的一类。采样时期,通过对周边环境、水文流体状况观察发现这类样点常年具有水体流速快、采样区域离居民地较远的环境特征。水体流速快,加快了营养物质的输出,使得污染物质不易在该水域大量富集^[29]。第II类包括鲁布革、八渡、白层、大化、合山和梧州等样点,该类样点主要处于上游(梧州除外),这些样点在3个水情期的 P_j 及其均值大都处于2~3之间,呈“中污染”、“中度超警戒水平”状况。在鲁布革样点,由于水坝的阻隔,非强降雨时期,水体几乎处于静滞状态,水体呈严重营养化特征,浮游植物大量繁殖,肉眼表现有“藻华”现象,并且Chla含量出现超标;此外,监测结果显示鲁布革、八渡、白层、大化、合山和梧州样点,全年水体TN和NO₃⁻-N含量及均值均高于2.0 mg/L和1.5 mg/L,是主要的污染物质,造成较为严重的环境污染状况。第III类,包括石龙和藤县两个样点,3个水情期 P_j 差异较大,丰水期 P_j 都大于3,呈“重污染”、“严重超警戒水平”状况,而其他时期呈“轻-中污染”、“轻度-中度超警戒水平”状况。研究发现两个样点与其他样点的主要差异在于丰水期部分指标,如:NH₄⁺-N和NH₃显著增高,并超出限值。

3.3 珠江中上游水体污染程度与防控措施分析

本研究结果显示,珠江中上游大部分采样区域水体具有较高的TN和NO₃⁻-N含量,大都呈“轻污染”、“轻度超警戒水平”状态;而在珠江上游区域水质状况长时期呈“中污染”、“中度超出警戒水平”状况。这可能与珠江干支流末端建设有水电站,使得水体由“河流连续统”变成了“梯级水库连续统”或半静

水型湖泊有关^[30-32]。一般来说,河流发源于高山峡谷,河道狭窄、水势湍急,上游河道两岸人口不多,工、农业生产较少,河流物质运输快,自净能力强^[33]。而建坝蓄水后营养物质输出减弱,并在库区水体和底泥中蓄积,导致水体逐步呈富营养化状态^[34-35],严重时将出现藻华。建坝库区的水环境恶化问题,得到了很多生态学家的关注,同时需考虑防控措施,如:在长时间的高温少雨期,应注意加大库区的排水量,进行生态调控,增加水体流动性^[36-37]。本研究中发现的突出问题是丰水期水体污染程度较重,污染因子也较多。丰水期强降雨过后,水体呈浑浊的泥浆色、透明度大幅降低、污染负荷升高,表明该流域水土流失比较严重,暴雨形成的地表径流裹挟了大量泥沙进入水体,因此对于流域内的林木砍伐也要加强管制。有研究显示,雨水的汇入会对营养盐和污染物质起到一定稀释作用,使得水体环境得到改善^[38]。但本研究发现强降雨对珠江中上游水体中营养物质的稀释作用较小,丰水期水体中TN和NO₃⁻-N含量并未较其他时期显著减少,其依然是水体中最主要的污染物。这说明雨水径流裹挟的泥沙、固液废物进入水体时,也带入了大量的营养物质。珠江中上游沿岸大都为中小农业县市,农业生产以甘蔗种植为主,种植过程中需施加大量氮肥^[39]。在雨季,这些富含于土壤中的氮不可避免会被带入河流,显见,对于邻近珠江干支流农田土地进行有效规划,是降低流域内农业大面积氮源汇入水体的有效措施^[40]。5~8月是珠江流域主要的雨水期,在此段时期,应尽量减少临河山坡、田地的拓垦并减少施肥量,以免大量泥沙和营养物质输入水体。此外,在珠江中游,出现某一时期水质污染大幅加重的状况,如:丰水期石龙和藤县站点的水体单项污染指数(P_i)和综合污染指数(P_j)明显高于其他时期。分析认为可能是由于:一方面,采样时恰逢暴雨,水体SD远低于限值,其污染负荷大幅升高,综合污染指数也随之升高;另一方面,这两个样点分别临近石龙农贸市场和藤县肉菜市场,强降雨及径流将一些富含蛋白质类物质带入水体,并进一步发生降解,形成了新的污染物质,如NH₄⁺-N和NH₃,使得水体评价时 P_j 增大,污染状况加重。

综合分析,珠江中上游水体中较高的TN和NO₃⁻-N含量、上游筑坝造成水体流动性减弱,以及丰水期强降雨后径流带入的泥沙、污染物质是导致珠江中上游水体环境污染的重要因素。筑坝形成的静水库区环境有利于营养盐蓄积,为藻类的大量繁殖提供了

有利条件;强降雨造成水体透明度显著下降,也将周边区域内的污染物质带入了水体。对于上游库区,建议在适宜藻类生长的高温少雨时期进行生态调控,加大库区水体的下泄量,增加水体的流动性。此外,珠江流域雨水丰沛,5~8月是主要的雨水期,在此段时期,要注意加强对周边生态环境的保护,如:减少林木砍伐,尽量减少临河山坡、田地的拓垦和施肥量,加大周边城镇生活垃圾的清理等,以防止大量泥沙、垃圾和营养物质等被雨水径流带入河流,加重水体污染。

致谢:本研究的野外调查取样中,得到了李跃飞、杨计平、武智等同事的热情帮助,并得到了仲恺农业工程学院本科毕业生黄志鹏同学在室内样品处理与分析方面的鼎力相助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 谢铮. 珠江鱼类组成与水资源保护[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017: 1-9.
- [2] 陆奎贤. 珠江水系渔业资源[M]. 广州: 广东科技出版社, 1990.
- [3] 李跃飞, 李新辉, 杨计平, 等. 珠江干流长洲水利枢纽蓄水后珠江鳊鱼(*Elopichthys bambusa*)早期资源现状[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 917-924.
- [4] 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.
- [5] 杨婉玲, 赖子尼, 王超, 等. 珠江中下游表层水体COD_{Mn}时空分布特征及水环境评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4): 643-648.
- [6] Zeng Y, Lai Z, Yang W, et al. Distribution of heavy metals in surface sediments from the Pearl River outlets, South China: five-year monitoring program[J]. Fresenius Environ Bull, 2018, 27(1): 574-583.
- [7] 王崇, 憨雪莹, 常秀岭, 等. 红水河干流梯级水库秋季浮游植物群落结构特征与水质评价[J]. 水产学杂志, 2015, 28(5): 42-47.
- [8] 武智, 李新辉, 李捷, 等. 红水河岩滩水库鱼类资源声学评估[J]. 南方水产科学, 2017, 13(3): 20-25.
- [9] 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.
- [10] 邹玲媛. 承完成. 非离子氨(UA)水质评价指标及换算方法[J]. 水产科学, 2002, 21(2): 42-43.
- [11] 刘曼红, 于洪贤, 刘其根, 等. 淡水养殖池塘水质评价指标体系研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(24): 14569-14572.
- [12] 常会庆, 车青梅. 富营养化水体的评价方法研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(32): 10407-10409.
- [13] 国家环境保护局. 渔业水质标准: GB 11607—1989[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [14] 国家环境保护局. 地表水环境质量标准: GHZB1—1999[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
- [15] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 农业部环境监测总站. 农用水源环境质量监测技术规范: NY/T 396—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [17] 祁萍, 王梅, 吴尼尔, 等. 宁夏主要养殖池塘水质评价[J]. 中国渔业质量与标准, 2013, 3(3): 106-109.
- [18] 刘乾甫, 赖子尼, 杨婉玲, 等. 珠江三角洲地区密养淡水鱼塘水质状况分析与评价[J]. 南方水产科学, 2014, 10(6): 36-43.
- [19] 阴琨, 王业耀. 水生态环境质量评价体系研究[J]. 中国环境监测, 2018, 34(1): 1-8.
- [20] 孔繁翔, 高光. 大中型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 549-595.
- [21] 阳立平, 曾凡棠, 黄海明, 等. 氮在环境介质中的迁移转化研究进展[J]. 水资源保护, 2014, 30(5): 1-8.
- [22] 刘建魁, 刘立志, 赵文, 等. 非离子氨和氨氮对不同规格史氏鲟幼鱼的急性毒性及安全浓度评价[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(2): 175-178.
- [23] 郭文献, 王鸿翔, 徐建新, 等. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 22-26.
- [24] 邹家祥, 翟红娟. 三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 136-140.
- [25] 孙杨, 韩龙喜. 典型暴雨农业面源总磷入库水质影响过程[J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 18-22.
- [26] 乔继平, 代俊峰. 河流污染的点源和非点源负荷分割研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(6): 17-20.
- [27] 温美丽, 杨龙, 方国祥, 等. 新丰江水库上游氮磷污染的时空变化[J]. 热带地理, 2015, 35(1): 103-110.
- [28] Wang L, Cai Q, Tan L, et al. Phytoplankton development and ecological status during a cyanobacterial bloom in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Sci Total Environ, 2011, 409: 3820-3828.
- [29] Schalk T, Effenberger J, Jehmlich A, et al. Methane oxidation in vertical flow constructed wetlands and its effect on denitrification and COD removal[J]. Eco Eng, 2019, 128: 77-88.
- [30] Johnson L, Simenstad C. Variation in the flora and fauna

- of tidal freshwater forest ecosystems along the columbia river estuary gradient: controlling factors in the context of river flow regulation[J]. *Estuar Coast*, 2015, 38(2): 679-698.
- [31] Ellis L, Jones N. A Test of the Serial Discontinuity Concept: Longitudinal trends of benthic invertebrates in regulated and natural rivers of northern Canada[J]. *River Res Appl*, 2016, 32(3): 462-472.
- [32] Latrubesse E, Arima E, Dunne T, et al. Damming the rivers of the Amazon basin[J]. *Nature*, 2017, 546: 363-369.
- [33] Wang Y, Xia Z, Wang D. A transitional region concept for assessing the effects of reservoirs on river habitats: a case of Yangtze River, China[J]. *Ecohydrology*, 2012, 5(1): 28-35.
- [34] Heckmann T, Haas F, Abel J. et al. Feeding the hungry river: Fluvial morphodynamics and the entrainment of artificially inserted sediment at the dammed river Isar, Eastern Alps, Germany [J]. *Geomorphology*, 2017, 291: 128-142.
- [35] Cochrane S, Matricardi E, Numata I, et al. Landsat-based analysis of mega dam flooding impacts in the Amazon compared to associated environmental impact assessments: Upper Madeira River example 2006—2015 [J]. *Remote Sens Environ*, 2017(7): 1-8.
- [36] Lian J, Yao Y, Ma C, et al. Reservoir operation rules for controlling algal blooms in a tributary to the impoundment of Three Gorges Dam[J]. *Water*, 2014(6): 3200-3223.
- [37] Wagner T, Erickson L. Sustainable management of eutrophic lakes and reservoirs[J]. *J Environ Protec*, 2017(8): 436-463.
- [38] Bhatt A, Karanjekar R, Altouqi S, et al. Estimating landfill leachate BOD and COD based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: Exploration of a MARS statistical approach[J]. *Environ Technol Inno*, 2017(8): 1-16.
- [39] 谢金兰, 李长宁, 何为中, 等. 甘蔗化肥减量增效的栽培技术[J]. *中国糖料*, 2017, 39(1): 38-41.
- [40] 周广飞. 农业种植中氮磷肥施用对水体富营养化的影响[J]. *农业工程技术*, 2017(2): 37-37.

Analysis and assessment of water environmental quality of the upper and middle reaches of the Pearl River

LIU Qianfu^{1,2}, DU Hao^{1*}, LAI Zini², SHUAI Fangmin², GUO Xia¹

(1. Key Lab of Freshwater Biodiversity Conservation Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Wuhan 430223, China; 2. Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Guangzhou 510380, China)

Abstract: In order to understand the status of water environment in the upper and middle reaches of the Pearl River, it was carried out to survey and measure its water quality, mainly upper the Zhaoqing section, during the three periods of March, June and September 2016, which respected the level period, wet season and early dry season of a year. Ten parameters including pH, dissolved oxygen(DO), non-ionic ammonia(NH₃), ammonia nitrogen(NH₄⁺-N), nitrate nitrogen(NO₃⁻-N), nitrite nitrogen(NO₂⁻-N), total nitrogen(TN), total phosphorus(TP), secchi depth(SD) and chlorophyll a (Chla) were selected and assessed by limit value, single pollution index and duty ratio. Water quality of each study area was assessed by comprehensive pollution index. The results showed that the main pollutants were nitrogen nutrient, primarily NO₃⁻-N and TN. The pollution load of these two pollutants were above 90% among the 17 sampling sites in three periods, and the multiple of max ultra standard of TN was 2.72 at Lubuge in September, 2016, and the multiple of max ultra standard of NO₃⁻-N was 2.13 at Badu in September, 2016. Besides, NH₃, transparency, TP and chlorophyll a were over-standard in many sites. NH₃, transparency and TP were obviously varied with the hydrologic period, and the Chla was mainly over-standard in the level period and early dry season of the river terminal dammed region at Lubuge site. The phosphorus pollution was primarily presented as the Point Source Pollution (PSP) in the upper and middle region of the Pearl River. Basing on water comprehensive pollution index (P_j), the environmental condition of 17 sampling sites was clustered in three groups. P_j values in cluster I, sampling sites being large water flow rate and distant from residential area, were in the range of 1-2, while the

corresponding water quality levels were “light pollution” and “lightly exceeded the alert level”. P_j values in cluster II, sampling sites being higher TN and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content in the whole year, were in the range of 2 – 3, while the corresponding water quality levels were “moderate pollution” and “moderately exceeded the alert level”. Only Shilong and Tenxian sites were grouped in the cluster III, and their P_j values were varied more widely ranges during the three investigation periods than the other two groups. The P_j values of cluster III was over 3 in the wet season, which showed the water quality levels were “heavy pollution” and “heavily exceeded the alert level”; comparatively, it was in the range of 1 – 2 in level period and early dry season, which showed the water quality levels were “light pollution” and “lightly exceeded the alert level” in these times. According to this study, it was suggested that: 1) ecological regulation should be considered in the upper terminal dammed area in little rainfall periods to reduce the occurrence of algal blooms; 2) in the main flush period of the Pearl River Basin, mainly during May to August of a year, deforestation, land reclamation and fertilization should be reduced, as well as the municipal waste solids and waters near the river should be promptly removed, to prevent the sands being brought to river and polluting the water environment. The study will provide data supports for protecting and managing the water environment of the upper and middle reaches of the Pearl River. [Chinese Fishery Quality and Standards, 2019, 9(4): 36 – 47]

Key words: the upper and middle reaches of the Pearl River; water environment; pollution index; water quality assessment; pollution factor; total nitrogen(TN)

Corresponding author: DU hao, duhao@yfi.ac.cn

(责任编辑:刘露)