金晓玥,黄 菊,范中亚,等.闸控入海河流 DO 时空分布特征及其驱动因素 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3311-3320.
Jin X Y, Huang J, Fan Z Y, et al. Spatiotemporal distributions of dissolved oxygen and its driving factors in gate-controlled seagoing rivers [J]. China Environmenrtal Science, 2025,45(6):3311-3320.

闸控入海河流 DO 时空分布特征及其驱动因素

金晓玥[1,2],黄 菊[2*],范中亚[2],黄 露[2],罗千里[2],王 振[1**] (1.汕头大学,省市共建海洋灾害预警与防护广东省重点实验室,广东 汕头 515063；2.生态环境部华南环境科学研究所,广东省水与大气污染防治重点实验室,国家水环境模拟与污染控制重点实验室,广东 广州 510535)

摘要：本文以广东省黄江河为研究对象,基于沿程 3 个水质自动监测站数据,分析枯水年(2021 年)、丰水年(2023 年)黄江河挡潮闸闸上与闸下河段 DO 的时空分布特征,并采用统计学方法,研究了 DO 变化的驱动因素及相对贡献.结果表明:闸上河段因水环境相对稳定,西闸断面 DO 呈现枯水年((8.02±0.10) mg/L)>丰水年((7.26±0.08) mg/L)特征;而闸下河段因水质改善,DO 呈现枯水年((4.45±0.10) mg/L)<丰水年((7.33±0.09) mg/L)特征;枯、丰水年年内全河段 DO 均呈现汛期高、非汛期低的周期性变化规律.受闸坝作用及外源输入差异影响,闸上河段 DO 变化的主要驱动因素为降雨和水温,贡献度达到 44%~87%;闸下河段 DO 变化的主要驱动因素则是氨氮和高锰酸盐指数,贡献度达到 53%~75%.闸上“湖泊化”缓流河段 DO 更易受气候变化影响,尤其是暴雨径流引起的浮游植物流失是导致枯、丰水年 DO 差异的直接原因.而枯水年闸下感潮河段 DO 受外源污染输入及滞留影响显著,丰水年闸下河段耗氧物质的减少是 DO 提升的重要原因.

关键词：闸控；入海河流；溶解氧；枯丰水年；环境要素
中图分类号：X522 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)06-3311-10

Spatiotemporal distributions of dissolved oxygen and its driving factors in gate-controlled seagoing rivers. JIN Xiao-yue[1,2], HUANG Ju[2*], FAN Zhong-ya[2], HUANG Lu[2], LUO Qian-li[2], WANG Zhen[1**] (1.Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Disaster Prediction and Prevention, Shantou University, Shantou 515063, China；2.Guangdong Key Laboratory of Water and Air Pollution Control, National Key Laboratory of Water Environment Simulation and Pollution Control, South China Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510535, China). *China Environmenrtal Science*, 2025,45(6)：3311~3320

Abstract：This study analysed the spatiotemporal characteristics of dissolved oxygen (DO) concentrations upstream and downstream of sluices during dry and wet years, using data from three automated water quality monitoring stations and field measurements along the Huangjiang River in Guangdong Province. Multiple statistical methods were employed to identify the relative contributions of key influencing factors to DO variability across years under different precipitation conditions. Upstream DO concentrations were generally higher in dry years ((8.02±0.10) mg/L) than in wet years ((7.26±0.08) mg/L). In contrast, DO levels in the downstream tidal section increased from (4.45±0.10) mg/L (dry year) to (7.33±0.09) mg/L (wet year), primarily due to improved water quality. Periodic fluctuations were observed in both years, with higher DO levels during the flood season and lower levels during the non-flood season throughout the river channel. Influenced by the gate control and different external inputs, DO fluctuations upstream and downstream were driven by different factors. Rainfall and water temperature explained 44% to 87% of the DO variability upstream. While ammonia nitrogen, and COD_{Mn} were the most influential factors downstream, accounting for 53% to 75% of the variability. Furthermore, the “lacustrine” upstream section was especially sensitive to climate variations. In this area, the loss of phytoplankton biomass caused by stormwater runoff was a major factor contributing to DO difference during dry and wet years. While DO downstream is more easily influenced by water pollutants, especially the significant decrease in oxygen-demanding substances.

Key words：gate-controlled；seagoing river；dissolved oxygen；dry and wet year；key environmental parameter

水体中的溶解氧(DO)来源于大气中的氧气通过表面交换进入水体,以及水中植物和浮游生物的光合作用释放的氧气[1-3].水体低氧问题通常由高温、富营养化和水动力条件等因素导致,进而导致鱼类窒息死亡,对水生态系统结构与安全产生严重威胁[4-5].

河流 DO 分布特征会表现出明显的时空差异

收稿日期：2024-11-15
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2022YFC3202200);国家自然科学基金资助项目(42177264,42403057);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2023A1515110183)
* 责任作者, 工程师, huangju@scies.org; ** 教授, zhenwang@stu.edu.cn

性[6-8].在时间上,DO 含量呈现出明显的汛期−非汛期变化,这主要受到温度变化和生物活动强度影响[9-10].在空间上,上游水体 DO 通常高于下游水体[11].而影响河流 DO 时空分布的因素却错综复杂,从复氧和耗氧过程来看,大气复氧和光合作用是主要的氧气供应源,而有机物降解、硝化作用和生物呼吸则是主要的氧气消耗过程.当耗氧速率超过复氧速率时,DO 可能显著下降.不同区域水体耗氧机制存在差异,以珠江和长江下游为代表的工业化影响区域,水体盐度升高、流速减缓及人类活动加剧是溶解氧偏低的主要驱动因素[6];而在海河塘沽口等污染集中河段,以 NH_4^+−N 为代表的还原性污染物引发的化学耗氧过程则成为缺氧现象的核心成因[12].此外,气候、水文条件等因素也会对河流 DO 产生显著影响.强降雨和洪水过程会导致浮游植物量骤减,抑制水体复氧能力[13],极端降水事件更易触发溶解氧骤降[14].另外,闸坝建设会改变河流水文连通性,使闸上闸下河段水生态环境存在显著差异[15-18].其阻隔效应不仅会改变藻类群落功能,将以硅藻、绿藻为主的河流群落特征转变为以蓝藻、隐藻为主的湖泊群落特征[19-20]还会引发氮磷与溶解氧的耦合波动[21].现阶段国内外研究多关注水利设施(闸坝等)对河流水文、水体富营养化的影响,而对于不同降雨强度(枯、丰水年)下,闸控入海河流 DO 的变化及其影响因素的研究仍缺少关注,黄江河是广东省海丰县三大河系之一,属于典型的中小型闸控入海河流.本文以黄江河为研究对象,通过采集沿程水质自动站在线监测数据和补充监测数据,利用多元统计分析方法,探究枯、丰水年闸控河流 DO 的时空分布特征及驱动要素,以期为同类型小流域的水环境治理与管控提供参考.

1 数据与方法

1.1 研究区域与数据来源

黄江河发源于广东莲花山脉上腊烛山,干流河道总长 70.16km(其中公平水库以下黄江干流 42.6km),平均坡降 1.1‰,天然落差 1054.4m,流域面积约 1121km^2[22].黄江河处于南亚热带海洋性气候区,阳光充足,风力强劲,降雨主要集中在每年 5~9 月份,为汛期,其他月份为非汛期;全年平均气温均超过 20°C,且夏季温高雨多,冬季稍冷雨少[23].据统计,黄江河流域多年平均降雨量 2174.10mm,2021 年流域降雨量为 1751.44mm,较平均值少 19%,为枯水年份;2023 年流域降雨量为 3003.62mm,较平均值高 28%,为丰水年份.黄江河干流距离入海口 12km 处建有 1 座黄江西闸挡潮闸,将黄江河一分为二[23-25].从污染源分布来看,闸上河段汇水范围内以农业面源为主,水质相对较好;闸下河段污染源以支流输入的城市面源为主,水质相对较差.

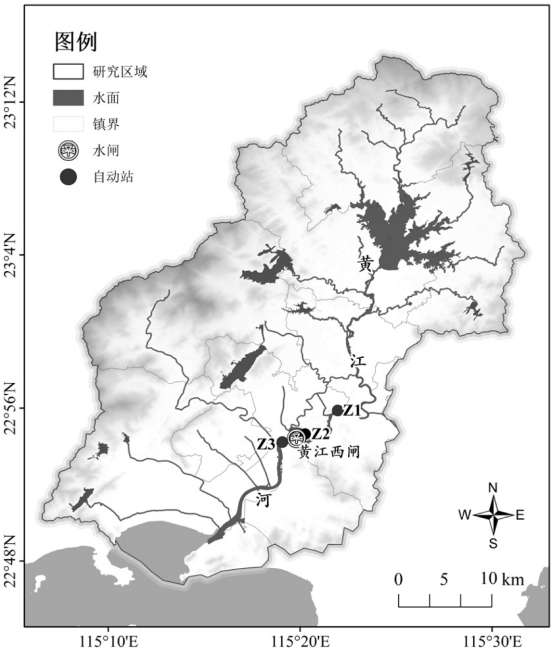


图 1 研究区域及采样点位

Fig.1 Maps of study area and the sampling sites

Z1,Z2,Z3 分别代表中游站,西闸站,西闸下游站

采用黄江河干流沿程自上而下的黄江中游自动站(中游站,Z1)、黄江西闸自动站(西闸站,Z2)、黄江西闸下游自动站(西闸下游站,Z3)3 个自动水质监测站逐时数据进行研究分析,其中中游站、西闸站分别位于黄江西闸挡潮闸上游约 7.7km、0.7km 河段,西闸下游站则位于黄江西闸下游 1.1km 河段,具体分布位置如图 1 所示.于课题组研发的黄江河水环境综合治理平台(https://www.sciestech.com:1004/)获取自动站逐时频次数据.由于站点维护调试等因素,获取数据时间段为 2021 年与 2023 年,包括 DO、氨氮、总氮、总磷、水温、pH、COD_{Mn}、电导率、浊度 9 项数据.降雨量数据来源于中国气象数据网(https://data.cma.cn/).

1.2 数据处理

1.2.1　基础数据处理　采用 R 语言(4.3.1)对自动站获取的逐时频次数据进行日均值计算,再使用箱型图(Box-plot)方法识别并删除超出 1.5 倍四分位距(IQR)范围的异常值;然后对筛选出的数据进行统计分析.因各数据集符合正态分布,数据均以均值±标准误差(SE)表示.DO 以及其他环境因素的时空变化特征采用双因素方差分析方法(Two-way ANOVA)分析,并进一步采用 Tukey's post hoc 检验各环境因素组间差异,采用 Origin 2021 软件绘图.

1.2.2　相关性系数　DO 与其他各环境因素之间的相关性采用 Pearson 相关性分析法在 R(4.3.1)软件中进行.

1.2.3　多元线性回归模型　使用 R(4.3.1)软件进行多元线性回归分析(Multiple Linear Regression)厘清各驱动因素对 DO 变化的贡献程度.首先,对各因素数据进行对数转换,然后分别计算了各自的回归系数、标准误差、t 以及贡献程度.

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots+\beta_pX_p+\varepsilon \quad (1)$$

式中:Y 是因变量(DO);$X_1,X_2,\ldots,X_p$ 是自变量(各环境要素);β_0 是截距,表示当所有自变量 $X_1,X_2,\ldots,X_p$ 都为零时,因变量 Y 的期望值;$\beta_1,\beta_2,\ldots,\beta_p$ 是自变量 $X_1,X_2,\ldots,X_p$ 的系数,表示它们对因变量 Y 的贡献程度;ε 是误差项,表示模型无法解释的随机误差或扰动.

2　研究结果与分析

2.1　DO 时空分布特征

2.1.1　DO 时间分布特征　根据双因素方差分析,黄江河 3 个站点断面枯、丰水年 DO 均呈现显著差异(P<0.05).中游站枯水年 DO((7.41±0.09)mg/L)较丰水年 DO((6.36±0.11)mg/L)高出 14%,西闸站枯水年 DO((8.02±0.10) mg/L)较丰水年((7.26±0.08) mg/L)高出 9%;而西闸下游站枯、丰水年 DO 变化呈相反,枯水年 DO((4.45±0.10) mg/L)显著低于丰水年((7.33±0.09) mg/L),变幅达 65%.从不同降水年份来看,黄江河闸上河段 DO 呈现枯水年高、丰水年低,而闸下河段 DO 呈现枯水年低、丰水年高的变化特征.

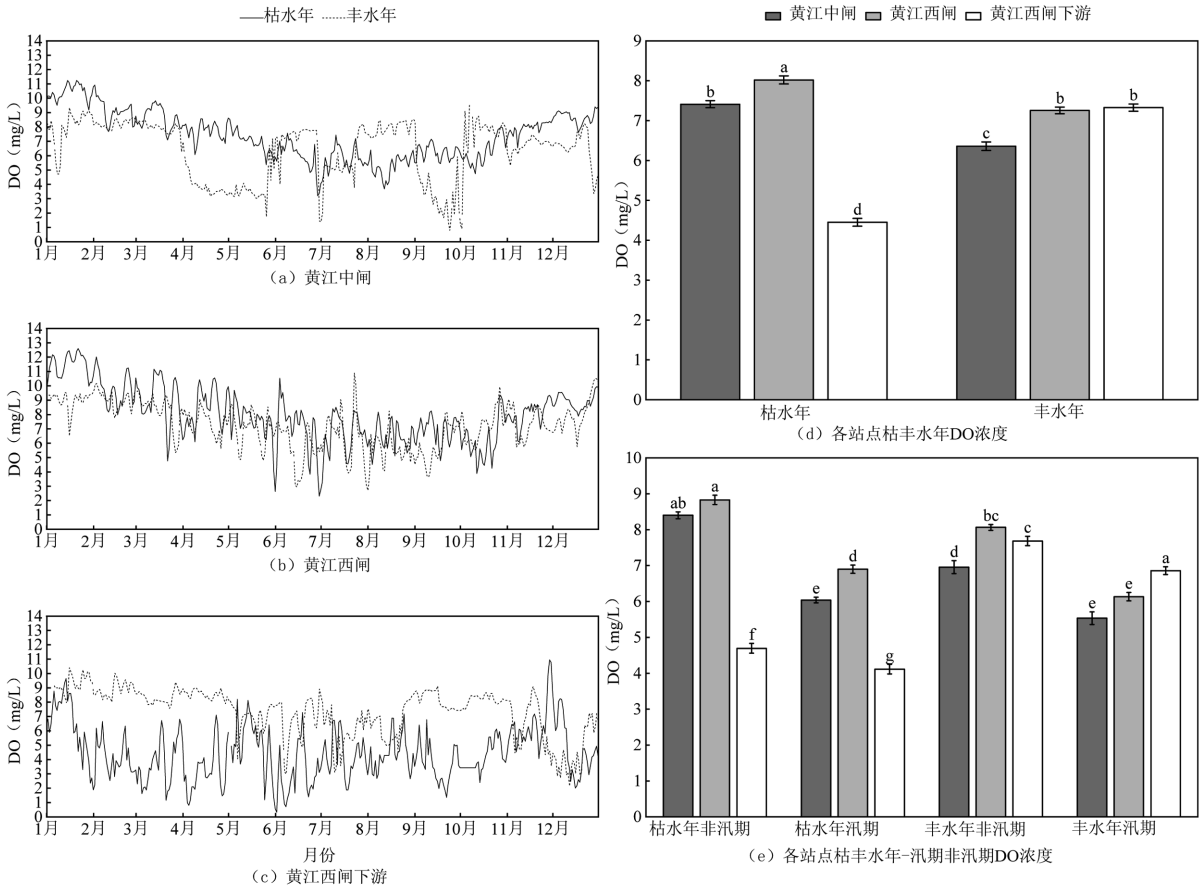


图 2　各站点 DO 枯、丰水年均值变化与汛期-非汛期变化

Fig.2　Average of dissolved oxygen in the dry-wet year and stage

柱状图上字母标记表示组内及组间显著性差异,相同字母表示无显著性差异,不同字母表示存在显著性差异

从不同水期来看,因全年 80%的降雨量集中在汛期,在年内黄江河 DO 呈现明显的汛期低、非汛期高的变化特征.由图 2e 可知,各站点非汛期 DO 均显著高于汛期(P<0.05).其中,枯水年非汛期中游站、西闸站、西闸下游站 3 个站点 DO 均值分别为(8.40±0.40),(8.83±0.13),(4.69±0.14) mg/L,比枯水年汛期(6.04±0.08),(6.90±0.11),(4.11±0.13) mg/L 高出 2.36,1.93,0.58mg/L;丰水年非汛期 3 个站点 DO 均值分别为(6.96±0.19), (8.06±0.81), (7.69±0.13)mg/L,比丰水年汛期(5.53±0.18), (6.13±0.12), (6.86±0.11) mg/L 高出 1.44,1.93,0.83mg/L.相较丰水年,枯水年汛期与非汛期的 DO 变化差值更大.

2.1.2 DO 空间分布特征 枯水年黄江河沿程各断面 DO 年均值呈现西闸断面((8.02±0.10) mg/L)>中游断面((7.41±0.09) mg/L)>西闸下游断面((4.45±0.10) mg/L)特征(闸上>闸下);而丰水年呈现中游断面((6.36±0.11) mg/L)<西闸断面((7.26±0.08) mg/L)<西闸下游断面((7.33±0.09) mg/L)特征(闸上<闸下),枯、丰水年沿程 DO 变化趋势相反.枯水年汛期与非汛期沿程 DO 均呈现闸上>闸下特征,丰水年非汛期沿程各站点 DO 接近,差值不大,而汛期则呈现闸上<闸下特征.

2.2 各环境要素的时空分布特征

如图 3 所示,中游站、西闸站枯水年氨氮浓度分别为(0.06±0.01)、(0.03±0.01)mg/L,丰水年增加到(0.19±0.01)、(0.09±0.01)mg/L,增幅分别为 14%、67%,而西闸下游站枯水年氨氮浓度为(0.97±0.006)mg/L,丰水年下降至(0.26±0.01)mg/L,降幅为 73%.总体而言,相较于枯水年,丰水年闸上水体氨氮、总氮和浊度显著增加(P<0.05),增幅为 14%~70%,COD_{Mn} 浓度显著下降(P<0.05),降幅为 10%~20%;闸下水体氨氮、总磷、COD_{Mn} 和电导率显著下降(P<0.05),降幅分别 73%、82%、31%和 36%,浊度和总氮显著上升(P<0.05),增幅分别为 76%和 21%.各环境要素(除温度、pH 值外)均展现出显著的时空差异性.

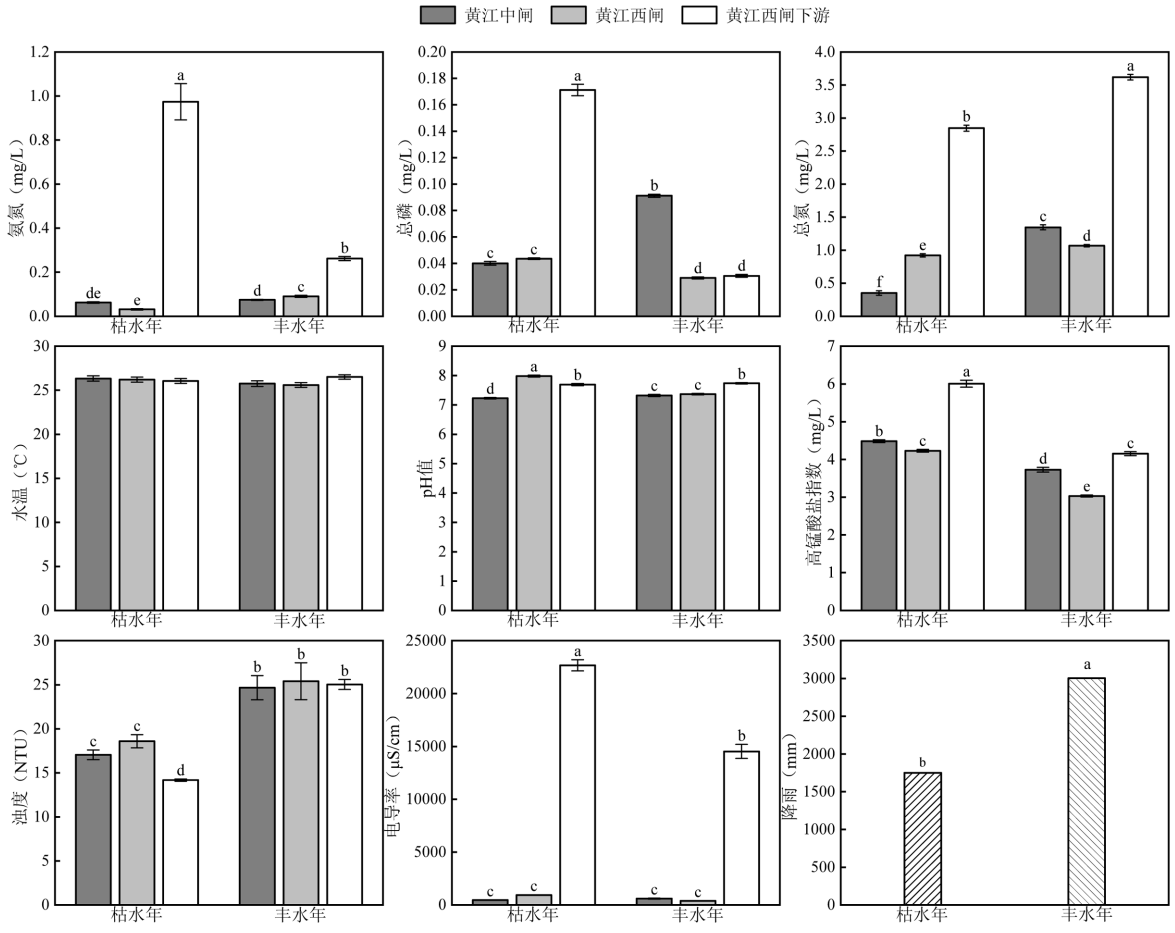


图 3 各站点各环境要素枯、丰水年均值变化

Fig.3 Average of environmental parameters in the dry and wet years

柱状图上字母标记表示组内及组间显著性差异,相同字母表示无显著性差异,不同字母表示存在显著性差异

2.3　DO 特征变化的环境影响要素

2.3.1　DO 与环境要素的相关性　当 r>0.3 时,DO 与其影响因素存在相关关系[26].根据图 4 可知,黄江河 DO 与降雨、氨氮、水温和浊度呈显著负相关,与 pH 值和电导率呈显著正相关.闸上水体 DO 与各指标的相关性比闸下水体更显著,如西闸站枯水年 DO 与 pH 值、电导率和 COD_{Mn} 的相关性系数分别为 0.69、0.61 和 0.38,且均在 P<0.001 水平下显著,而西闸下游站 DO 与 pH 值的相关性不显著,与电导率的相关性在 P<0.01 水平下显著.同样丰水年西闸站 DO 与各指标的相关性也基本强于西闸下游站.研究表明[27],在感潮河段,晴天和小雨时潮汐运动对 DO 的影响会占主导地位,但随着丰水年降雨增多,大量淡水注入河口、海湾等近岸水域,影响潮汐涨落过程中的水量交换,潮汐对 DO 作用有所减弱,闸下水体 DO 与其他指标的相关性有所增强.

表 1　丰枯水年 DO 与其他因素均值

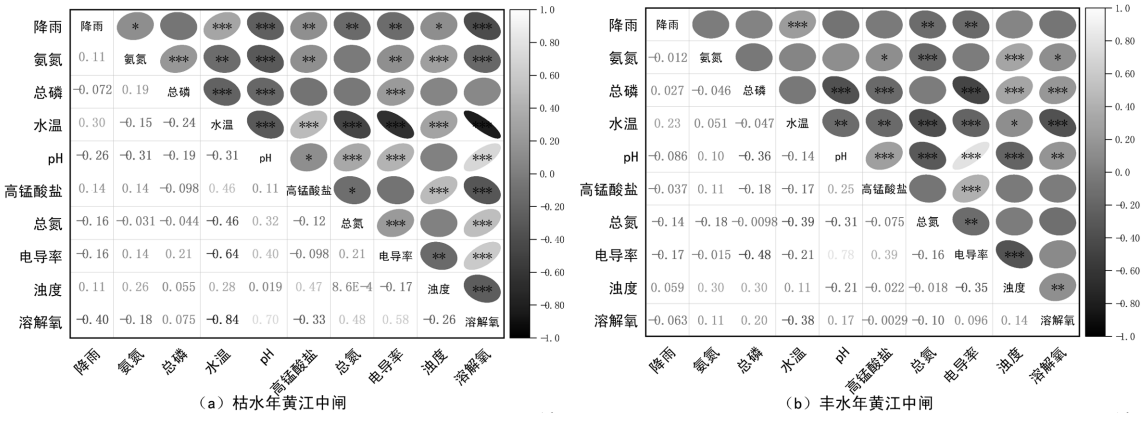
Table 1　Average of DO and environmental parameters in wet and dry years

站点	年份	DO (mg/L)	总氮 (mg/L)	氨氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	COD_{Mn} (mg/L)	水温 (℃)	pH 值	电导率 (μS/cm)	浊度 (NTU)	降雨 (mm)	降雨天数 (d)	降雨天数 (>10mm) (d)
黄江中游	2021	7.41	0.35	0.06	0.04	4.50	26.33	7.23	462.58	17.05	1751.44	132	58
	2023	6.36	1.24	0.19	0.09	3.93	26.06	7.40	573.26	35.60	3003.62	120	71
黄江西闸	2021	8.02	0.92	0.03	0.04	4.26	26.21	7.98	940.62	18.59	1751.44	132	58
	2023	7.26	1.07	0.09	0.03	3.04	25.60	7.37	490.83	25.40	3003.62	120	71
黄江西闸下游	2021	4.45	2.85	0.97	0.17	6.00	26.05	7.69	22673.12	14.17	1751.44	132	58
	2023	7.33	3.62	0.26	0.03	4.15	26.51	7.74	14523.44	25.04	3003.62	120	71

表 2　各站点丰枯水年多元线性回归模型

Table 2　Multiple Linear Regression for each site in wet and dry years

参数	黄江中游枯水年		黄江中游丰水年		黄江西闸枯水年		黄江西闸丰水年		黄江西闸下游枯水年		黄江西闸下游丰水年	
	贡献度(%)	P	贡献度(%)	P	贡献度(%)	P	贡献度(%)	P	贡献度(%)	P	贡献度(%)	P
降雨	42.73	<0.001	3.14	0.032	34.44	<0.001	31.08	<0.001	6.49	0.001	2.30	0.014
氨氮	2.28	<0.001	4.29	0.012	12.74	<0.001	23.52	<0.001	27.10	<0.001	4.13	0.001
总磷	0.28	<0.001	18.34	<0.001	4.23	<0.001	2.20	<0.001	2.84	0.022	0.14	0.542
水温	43.14	<0.001	48.21	<0.001	25.23	<0.001	13.29	<0.001	37.54	<0.001	8.44	<0.001
pH 值	10.84	<0.001	12.98	<0.001	21.03	<0.001	19.06	<0.001	0.23	0.509	6.31	<0.001
COD_{Mn}	0.18	0.004	1.73	0.111	0.26	0.035	0.18	0.022	23.15	<0.001	52.03	<0.001
总氮	0.07	0.080	7.19	0.001	0.002	0.857	0.41	0.001	0.0003	0.981	18.58	<0.001
电导率	0.22	0.001	2.41	0.060	0.15	0.105	10.12	<0.001	2.73	0.025	0.75	0.158
浊度	0.26	0.001	1.72	0.111	1.91	<0.001	0.15	0.037	0.003	0.932	7.32	<0.001



（a）枯水年黄江中闸　　（b）丰水年黄江中闸

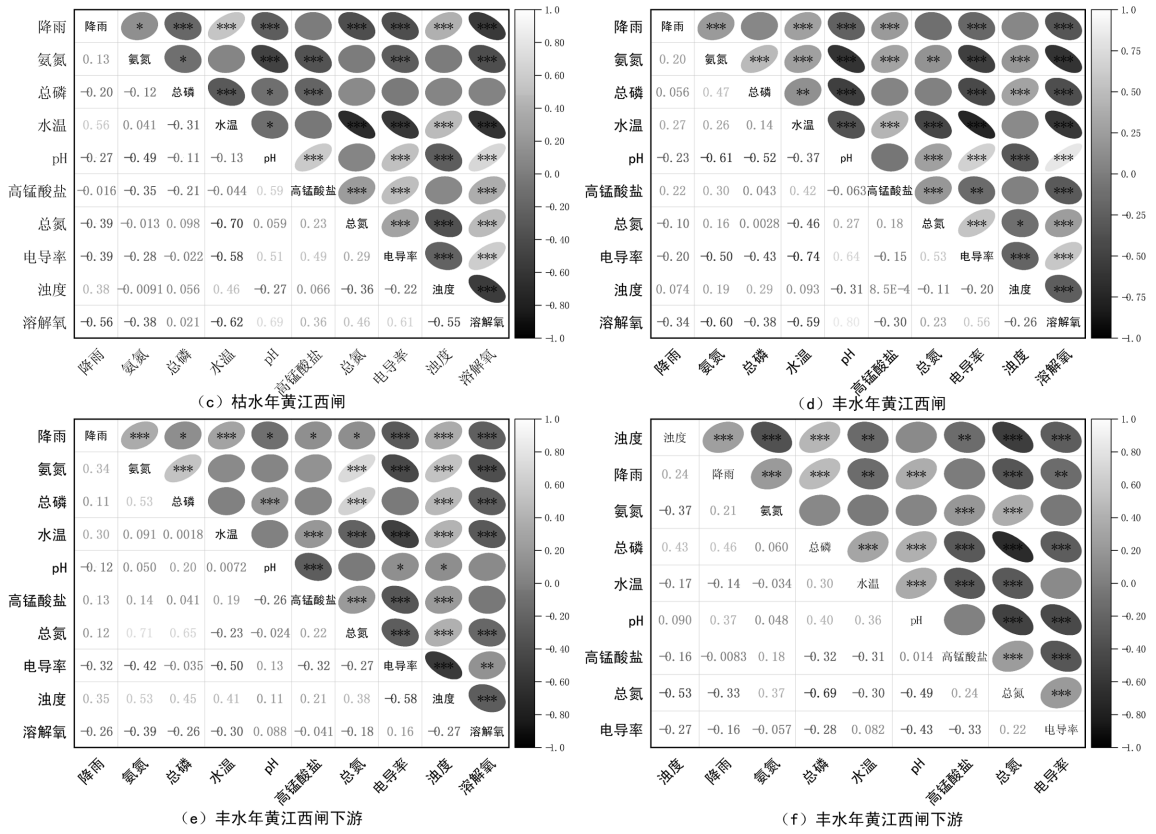


图 4 DO 与各要素之间的相关性系数

Fig.4 Correlation coefficient between DO and environmental parameters

2.3.2 各环境要素对DO变化的贡献程度 采用线性回归分析量化各驱动因素对 DO 变化的贡献程度.如表 2 所示,在闸上河段,枯水年降雨、水温和 pH 值对中游站断面和西闸站断面 DO 的贡献程度最大,分别为 42.73%、43.14%、10.84%和 34.44%、25.23%、21.03%,而在丰水年降雨、水温对闸上水体 DO 的综合贡献程度有所减弱,总磷、氨氮等对 DO 的综合贡献程度有所增强.

对于闸下河段水体,枯水年水温、氨氮、高锰酸盐指数对 DO 的贡献程度最大,分别为 37.54%、27.1%、23.15%,丰水年则是 COD_{Mn}、总氮贡献程度最大,分别为 50.03%、18.58%.在闸下河段,降雨对水体 DO 变化的贡献程度远小于闸上河段,氨氮、COD_{Mn}等耗氧物质对闸下水体DO变化贡献程度较为突出,并且随着氨氮、总磷浓度显著下降,丰水年 COD_{Mn}和总氮对 DO 变化的贡献程度显著增大.

3 讨论

黄江西闸挡潮闸在充分发挥御咸蓄淡作用时,也将黄江河一分为二,使得闸上河段呈现“湖泊化”缓流水体特征,而闸下河段则为感潮河段,受径流、潮汐及下游支流污染物输入影响,水环境状态多变.这导致闸上和闸下河段 DO 特征变化的驱动因素存在显著差异.

3.1 枯、丰水年闸上河段DO特征变化驱动因素分析

3.1.1 降雨 降雨期间河流水体 DO 浓度会有所下降[28-30],徐闯等[26]发现不同降雨强度下潭水河 DO 总体下降幅度为 2.01%~9.26%.在该研究中,降雨量的增加促使丰水年闸上河段 DO 较枯水年下降 9%~14%.根据统计(表 3),枯、丰水年流域内降雨天数分别为 132,120d,其中小雨天数分别为 74,49d,中雨天数分别为 42,37d,大雨天数分别为 11,20d、暴雨天数分别为 4,9d,大暴雨天数分别为 1,5d.对应晴天、小雨、中雨、大雨、暴雨及大暴雨降雨事件期间西闸断面 DO 均值分别为 8.47, 7.02, 6.10, 5.91, 5.80, 5.10mg/L,水体 DO 浓度随降雨量增大而减小,这与余香英等[31]的研究结果一致.小雨对 DO 浓度影响较小,大雨及暴雨事件频次是黄江河闸上水体 DO 呈现枯水年高、丰水年低特征的直接驱动因素.

表 3　枯丰水年黄江西闸站不同降雨程度下 DO 浓度

Table 3　DO under different rainfall at the Huangjiang West Sluice station in wet and dry years

项目	晴天	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
枯水年天数(d)	157	74	42	11	4	1
期间西闸断面 DO(mg/L)	9.07	7.03	6.35	6.22	6.16	5.06
丰水年天数(d)	175	49	37	20	9	5
期间西闸断面 DO(mg/L)	7.93	7.01	5.81	5.61	5.44	5.09
枯丰水年西闸断面平均 DO(mg/L)	8.47	7.02	6.10	5.91	5.80	5.10
枯丰水年西闸断面平均浊度(NTU)	17.74	19.62	27.50	27.77	31.31	33.57

降雨径流会导致大量耗氧污染物质冲刷入河,进一步降低水体中 DO 浓度[32].丰水年西闸站断面氨氮浓度较枯水年增加 71%(表 1),其对 DO 的贡献程度由 12.74%上升到 23.52%(表 2).丰水年中游站断面总磷浓度较枯水年增加 56%,其对 DO 的贡献程度达到了 18.34%,仅次于水温的影响(表 2).此外,径流冲刷作用会导致河水浊度升高,抑制水生植物的光合作用,导致 DO 下降.研究表明,当浊度达到 30~50NTU 时,水生植物光合产氧受到严重抑制[2,33-37].在该研究中,西闸断面水体浊度随降雨强度的增加逐步升高而 DO 浓度随之逐渐降低.另外,研究表明水体中 60%以上的氧气来源于浮游植物的光合作用[38],但降雨径流会导致水体浮游植物大量流失,藻类密度急剧下降,光合复氧能力减弱,致使 DO 浓度持续偏低.He 等[39]研究发现在降雨事件前水体叶绿素 a 浓度为 250μg/L,但降雨期间叶绿素 a 浓度下降到 200μg/L.在该研究中,降雨开闸泄洪事件前西闸断面浮游植物生物量为 3.55mg/L,叶绿素 a 浓度为 26μg/L,DO 浓度为 6.50mg/L;降雨开闸泄洪事件期间(持续 24d)浮游植物生物量减少至 0.57mg/L、叶绿素 a 降低为 6μg/L,DO 平均浓度降至 5.31mg/L,降雨泄洪事件结束闭闸 7d 后,浮游生物量上升至 3.67mg/L、叶绿素 a 浓度上升至 22 μg/L, DO 浓度提升至 6.02mg/L,基本恢复雨前水平.综上所述,丰水年降雨量增加,尤其是大雨和暴雨频次的增多,导致闸站调度频繁,浮游植物生物量流失加剧,直接导致水体 DO 浓度长时间偏低.

3.1.2　水温　水温对闸上水体 DO 变化的贡献程度为 13.29%~48.21%.通常水温升高会使 DO 的饱和度下降[40].流域内汛期水温高(平均 30.71℃)、非汛期水温低(平均 22.79℃),同时叠加期间降雨作用,促使水体 DO 年内呈现汛期高、非汛期水低变化规律.根据双因素分析,枯、丰水年闸上河段水温无显著差异,未发生明显变化,年平均值均在 26℃左右(图 3).由此可知,水温对年内不同水期 DO 的变化影响显著,但对枯、丰水年 DO 的分布特征差异影响较小.

3.1.3　pH 值　在该研究中,pH 值与闸上水体 DO 呈显著正相关,贡献程度为 10.84%~21.03%.研究表明,pH 值与 DO 浓度之间存在协同变化,当 pH 值较低时,H^+离子的活性增加,促使其与 O_2 结合成水分子,导致 DO 浓度因水体稀释而降低,当 pH 值较高时,H^+离子活性较低,从而减少了与 O_2 的结合[41].同时,水生生物的呼吸作用和光合作用促使水体 pH 值与 DO 密切关联.水生植物在白天进行光合作用时,会增加水体 DO 含量,吸收二氧化碳,使水体碳酸平衡向左移动,导致水体 pH 值升高.而在夜间,水生植物和动物都进行呼吸作用,消耗氧气,释放二氧化碳,使得水体 DO 降低,同时二氧化碳的增加会使碳酸平衡向右移动,水体 pH 值降低[42-43].pH 对 DO 的变化贡献显著,主要是因为其与 DO 的强关联性.pH 值并非是枯、丰水年 DO 变化的主要外部驱动因素.

综合来看,闸上河段 DO 与降雨、水温呈显著负相关,且降雨与水温对 DO 的综合贡献程度达 44%~87%,说明降雨、气候等外界环境因素的改变易促使闸上水体 DO 发生变化.另外,大雨、暴雨径流引起的耗氧物质输入、浊度增加及浮游植物流失对 DO 的影响作用大,持续时间长是驱动丰水年闸上水体 DO 浓度降低的直接因素.

3.2　枯、丰水年闸下河段 DO 特征变化驱动因素分析

3.2.1　电导率　枯、丰水年闸上河段水体电导率无显著变化,但闸下河段水体电导率有显著下降.枯水年闸下河段电导率与 DO 呈显著负相关(表 2),对 DO 的贡献程度为 2.7%,而丰水年受降雨淡水汇入影响,闸下河段电导率从 22673μS/cm 降至 14523μS/cm(表 1),电导率对 DO 的贡献程度随之下降至 0.7%.研究表明,温度不变情况下,盐度每增加 100×10^{-6},DO 降低约 1%[44-45].根据换算公式, 30℃下,电导率从 22673μS/cm(盐度 11270×10^{-6})降至 14523μS/cm (盐度 5000×10^{-6}),饱和溶解氧可提升约 74.8%.在该研究中,闸下感潮河段 DO 浓度从枯水年 4.45mg/L 上升到丰水年 7.33mg/L,提升 65%.丰水年降雨对河水盐度的稀释促进闸下河段水体 DO 的提升.

3.2.2　耗氧污染物质因素　如表 2 和图 4 所示,闸

下河段 DO 浓度受营养盐(氨氮、总磷、总氮)和 COD_{Mn} 负面影响显著.枯水年 DO 与氨氮的负相关性最强(r=−0.39),丰水年 DO 与 COD_{Mn} 的负相关性最强(r=−0.43).根据多元线性回归模型结果,闸下河段 COD_{Mn} 对 DO 的贡献程度最为显著,且丰水年贡献程度由枯水年的 23.15%上升至 52.03%,这与丰水年氨氮、总磷浓度的大幅下降,促使有机质成为主要耗氧物质有关[38,46].闸下河段水质受其支流污染汇入影响显著,随着支流水环境的改善,丰水年黄江河闸下河段氨氮、总磷、COD_{Mn} 浓度相对于枯水年,分别减少 73%,82%,33%,干流水质同步得到改善.支流排口输入的耗氧物质减少,促使闸下水体 DO 即使在丰水年不利环境下,其浓度仍能大幅度提升,这说明水环境质量的改善对 DO 提升至关重要.综上所述,闸下感潮河段 DO 受降雨径流、潮汐动力及支流排污等多重影响,其中氨氮、COD_{Mn} 等耗氧污染物质是影响 DO 浓度最主要的因素,综合贡献度达 53%~75%,并且随着氨氮浓度显著下降,COD_{Mn} 和总氮的贡献度显著提升.枯水年降雨径流量小,闸站排水频率低,咸潮盐度对 DO 作用更为明显,叠加水环境质量差,耗氧物质多,感潮河段污染滞留作用强等因素[47],导致枯水年闸下水体 DO 浓度远低于闸上水体.而随着丰水年的到来,大量淡水注入河口,对潮汐涨落过程中水量交换产生影响,从而潮汐对 DO 作用有所减弱,这与薛弘涛[27]和 Julian 等[36]的研究结果一致.同时降雨稀释及水环境改善作用,促使闸下水体 DO 浓度在丰水年不降反升.

4 结论

4.1 枯、丰水年黄江河 DO 时空分布特征存在显著差异.闸上河段DO呈现枯水年>丰水年特征;而闸下感潮河段因水质显著改善,DO 呈现枯水年<丰水年变化特征.年内 DO 均呈现汛期高、非汛期低变化特征.

4.2 闸上河段 DO 更易受气候变化影响,降雨、水温对 DO 变化的综合贡献度达 44%~87%.径流冲刷浮游植物流失是造成枯、丰年闸上水体 DO 特征差异的直接原因.丰水年闸下水体氨氮、COD_{Mn} 等耗氧物质浓度的显著下降是 DO 上升的重要原因.

4.3 相较于枯水年,闸下感潮河段 DO 在丰水年多种负面因素影响下,其仍能有大幅提升,说明水环境质量的改善对河流 DO 的提升至关重要.

参考文献:

[1] 付雅君,曹升乐,杨裕恒.基于溶解氧平衡法的南四湖生态需水量研究 [J]. 人民黄河, 2018,40(4):79-82.
Fu Y J, Cao S L, Yang Y H. Study on water demand for the lake ecosystems based on dissolved oxygen balance method [J] Yellow River, 2018,40(4):79-82.

[2] Kirk J T. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge university press, 1994:26-45.

[3] Bernhardt E S, Savoy P, Vlah M J, et al. Light and flow regimes regulate the metabolism of rivers [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022,119(8), e2121976119.

[4] 余欣欣,郑国栋,陈 杰,等.低氧胁迫对鱼类影响的研究进展 [J]. 水产科学, 2024,43(2):333-340.
Yu X X, Zheng G D, Chen J, et al. Advance in research on effects of hypoxic stress in fish [J]. Fisheries Science, 2024,43(2):333-340.

[5] 林峰艺,陈兴伟,刘继辉,等.闽江水口水库溶解氧的时空分布规律 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2023,18(3):63-70.
Lin F Y, Chen X W, Liu J H, et al. Spatial and temporal distribution of dissolved oxygen in Shuikou reservoir of Min River [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2023,18(3):63-70.

[6] 黄炜惠,马春子,李文攀,等.我国地表水溶解氧时空变化及其对全球变暖的响应 [J]. 环境科学学报, 2021,41(5):1970-1980.
Huang W H, Ma C Z, Li W P, et al. Spatial-temporal variations of dissolved oxygen and their response to global warming in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,41(5):1970-1980.

[7] 杨艾琳,杨 芳,李少斌,等.福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制 [J]. 环境科学, 2022,43(11):4950-4960.
Yang A L, Yang F, Li S B, et al. Spatiotemporal characteristics of dissolved oxygen and control mechanism of hypoxia (low oxygen) in the watershed-coastal system in Fujian Province [J]. Environmental Science, 2022,43(11):4950-4960.

[8] 李文攀,张亚捷,谭 伟,等.我国地表水溶解氧现状及其标准研究 [J]. 环境保护, 2023,51(15):46-51.
Li W P, Zhang Y J, Tan W, et al. Status of dissolved oxygen in surface water in China and related standard research [J]. Environmental Protection, 2023,51(15):46-51.

[9] 黎 睿,汤显强,胡艳平,等.四湖总干渠溶解氧季节性异常特征与成因分析 [J]. 中国环境科学: 1-9.doi:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250227.001.
Li R, Tang X Q, Hu Y P, et al. Seasonal abnormal characteristics and cause analysis of dissolved oxygen in Sihu Main Channel [J]. Chinese Journal of Environmental Science: 1-9. doi:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250227.001.

[10] 吴林妮,韦钦胜,冉祥滨,等.南黄海-长江口海域溶解氧分布和低氧、酸化特征及其控制因素 [J]. 中国环境科学, 2021,41(3):1311-1324.
Wu L N, Wei Q S, Ran X B, et al. Distribution of dissolved oxygen and characteristics of hypoxia and acidification and their control factors in the South Yellow Sea - Yangtze River Estuary area [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2021,41(3):1311-1324.

[11] 吴青梅,罗慧东,孙国萍,等.典型感潮内河涌水质污染特征调查研究 [J]. 环境科学学报, 2011,31(10):2210-2216.
Wu Q M, Luo H D, Sun G P, et al. Investigation on polluted water

quality of the typical tidal urban river [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011,31(10):2210−2216.

[12] 龚松柏,高爱国,倪冠韬,等.中国部分河口及其近海水域缺氧现象研究 [J]. 水资源保护, 2017,33(4):62−69.
Gong S B, Gao A G, Ni G T, et al. Progress in research of hypoxia in estuaries and coastal areas in China [J]. Water Resources Protection, 2017,33(4):62−69.

[13] 熊津晶,余香英,杜顺韬,等.广东榕江地都断面溶解氧变化规律及其影响因素研究 [J]. 环境污染与防治, 2024,46(9):1251−1257.
Xiong J J, Yu X Y, Du S T, et al. Study on the variation of dissolved oxygen and its influencing factors in Didu section of Rongjiang River, Guangdong [J]. Environmental Pollution & Control, 2024,46(9):1251−1257.

[14] 于洪贤,王　尚,马成学.夏季大兴凯湖(中国一侧)沿岸带浮游植物群落的动态变化 [J]. 水产学杂志, 2014,27(3):1−5.
Yu H X, Ma W S, Ma C X. The Dynamic Variations in Phytoplankton Community in Daxingkai Lake (on Chinese Side) Coastal Zone in Summer [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2014,27(3):1−5.

[15] Tomaso D J, Najjar R G. Long−term variations in the dissolved oxygen budget of an urbanized tidal river: The upper Delaware Estuary [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015,120(6):1027−1045.

[16] Wilding T K, Brown E, Collier K J. Identifying dissolved oxygen variability and stress in tidal freshwater streams of northern New Zealand [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012,184(10): 6045−6060.

[17] 马　克,涂新军,陈晓宏.闸控河网区水闸运行的水流水质响应模拟 [J]. 水文, 2021,41(6):66−72.
Ma K, Tu X J, Chen X H. Simulation of water quantity and quality response of sluice operation in sluice−controlled river network area [J]. Journal of China Hydrology, 2021,41(6):66−72.

[18] 米庆彬,窦　明,郭瑞丽.水闸调控对河流水质—水生态过程影响研究 [J]. 水电能源科学, 2014,32(5):29−32.
Mi Q B, Dou M, Guo R L. Research on impact of sluice regulation on river's water quality and water ecological process [J]. Water Resources and Power, 2014,32(5):29−32.

[19] Descy J−P, Darchambeau F, Lambert T, et al. Phytoplankton dynamics in the Congo River [J]. Freshwater Biology, 2017,62(1):87−101.

[20] 胡　俊,舒卫先,韦翠珍,等.基于浮游植物群落的纵向连通性初步研究 [J]. 生态环境学报, 2018,27(1):79−86.
Hu J, Shu W X, Wei C Z, et al. Study on the longitudinal connectivity based on community structure of phytoplankton [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018,27(1):79−86.

[21] 王　钟.闸控重污染小流域水文水质及污染物通量变化特征研究 [D]. 宜昌:三峡大学, 2019.doi:10.27270/d.cnki.gsxau.2019.000310.
Wang Z. Study on the variation characteristics of hydrology water quality and pollutants fluxes in small heavily polluted watersheds with gate control [D]. Yichang: Sanxia University, 2019.doi:10.27270/d.cnki.gsxau.2019.000310.

[22] 徐智健,罗千里,黄　露,等.华南中小型闸控入海河流氮磷化学计量学特征及其影响因素研究 [J]. 环境科学研究, 2025,38(2):304−317.
Xu Z J, Luo Q L, Huang L, et al. Stoichiometric characterization of nitrogen and phosphorus and its response of small−to−medium−sized sluice−controlled rivers entering the sea in South China [J]. Research of Environmental Science, 2025,38(2):304−317.

[23] 李　丹,范中亚,罗千里,等.华南中小型闸控入海河流 DOM 特征及藻源影响 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):911−922.
Li D, Fan Z Y, Luo Q L, et al. Characteristics and algal source effects of dissolved organic matter in small and medium−sized gate−controlled seagoing rivers in South China [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):911−922.

[24] 徐婷婷,郑锐滨,班远冲,等.汕尾市海丰县黄江河流域水环境综合治理研究 [J]. 中国给水排水, 2023,39(22):137−143.
Xu T T, Zheng R B, Ban Y C, et al. Research on comprehensive management of water environment in Huangjiang River Basin of Haifeng County, Shanwei City [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(22):137−143.

[25] 张晓芒.汕尾:“黄江河模式”打通“两山”转化新路径 [J]. 环境, 2024, (7):41−42.
Zhang X M. Shanwei: "Huangjiang River model" opens a new path of "two mountains" transformation [J]. Environment, 2024,(7):41−42.

[26] 徐　闯,余香英,许泽婷,等.潭江干流溶解氧时空格局及其调控因素研究 [J]. 环境科学学报, 2024,44(7):222−230.
Xu C, Yu X Y, Xu Z T, et al. Study on the spatiotemporal pattern of dissolved oxygen and its control factors in the mainstream of Tanjiang River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024,44(7):222−230.

[27] 薛弘涛,余香英,陈晓丹,等.深圳河口溶解氧变化规律及其影响因素研究 [J]. 环境生态学, 2023,5(11):88−94.
Xue H T, Yu X Y, Chen X D, et al. Research on the variation of dissolved oxygen and its influencing factors in Shenzhen River estuary [J]. Environmental Ecology, 2023,5(11):88−94.

[28] Blaszczak J R, Delesantro J M, Urban D L, et al. Scoured or suffocated: Urban stream ecosystems oscillate between hydrologic and dissolved oxygen extremes [J]. Limnology and Oceanography, 2019, 64(3):877−894.

[29] Wenner E, Sanger D, Arendt M, et al. Variability in dissolved oxygen and other water−quality variables within the national estuarine research reserve system [J]. Journal of Coastal Research, 2009, (10045):17−38.

[30] Williams R J, White C, Harrow M L, et al. Temporal and small−scale spatial variations of dissolved oxygen in the Rivers Thames, Pang and Kennet, UK [J]. Science of the Total Environment, 2000,251:497−510.

[31] 余香英,王　刚,邹富桢,等.基于逐 4h 尺度的粤西典型流域降雨径流污染特征分析 [J]. 环境污染与防治, 2023,45(7):910−916,922.
Yu X Y, Wang G, Zou F Z, et al. Pollutant characteristics of rainfall runoff in a typical basin in Western Guangdong based on a 4h time step resolution [J]. Environmental Pollution & Control 2023,45(7): 910−916,922.

[32] 薛芮芸,苏营营,方鹿跃,等.基于网格化水质自动监测的平原河网区汛期水污染特征研究与成因解析 [J]. 环境工程技术学报:1−11.
Xue R Y, Su Y Y, Fang L Y, et al. A study on characteristics and causes of flood season water pollution in a plain river network area based on grid online monitoring of water quality [J]. Journal of Environmental Engineering Technology:1−11.

[33] Paerl H W, Hall N S, Hounshell A G, et al. Recent increases of rainfall and flooding from tropical cyclones (TCs) in North Carolina (USA):

implications for organic matter and nutrient cycling in coastal watersheds [J]. Biogeochemistry, 2020,150:197−216.

[34] Meerhoff M, Audet J, Davidson T A, et al. Feedback between climate change and eutrophication: revisiting the allied attack concept and how to strike back [J]. Inland Waters, 2022,12(2):187−204.

[35] Irvine K, Richey J, Holtgrieve G, et al. Spatial and temporal variability of turbidity, dissolved oxygen, conductivity, temperature, and fluorescence in the lower Mekong River–Tonle Sap system identified using continuous monitoring [J]. International Journal of River Basin Management, 2011,9(2):151−168.

[36] Julian J, Doyle M, Stanley E. Empirical modeling of light availability in rivers [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2008, 113(G3).

[37] Izagirre O, Agirre U, Bermejo M, et al. Environmental controls of whole−stream metabolism identified from continuous monitoring of Basque streams [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2008,27(2):252−268.

[38] 陈仲晗,徐 娟,刘帅帅,等.城市感潮河流溶解氧收支及调控的模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2022,42(4):204−213.
Chen Z H, Xu J, Liu S S, et al. Numerical analysis of dissolved oxygen budgets and hypoxia mitigation strategies for an urban tidal river [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(4):204−213.

[39] He T, Li J, Xie L, et al. Response of chlorophyll−a to rainfall event in the basin of the South China Sea: Statistical analysis [J]. Marine Environmental Research, 2024,199:106576.

[40] 夏 威,张 萌,周 憋,等.大型深水湖库溶解氧时空变化及驱动因素:以江西仙女湖为例 [J]. 湖泊科学, 2023,35(3):874−885.
Xia W, Zhang M, Zhou M, et al. Spatio−temporal dynamic of dissolved oxygen and its influencing factors in lake Xiannv Jiangxi, China [J]. Journal of Lake Science, 2023,35(3):874−885.

[41] Zang C, Huang S, Wu M, et al. Comparison of relationships between pH, dissolved oxygen and chlorophyll for aquaculture and non−aquaculture waters [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011,219(1):157−174.

[42] 汪伯伦,陈 然,罗 毅,等.横江流域pH值时空变化特征与浮游植物关系研究 [J]. 环境科学与管理, 2024,49(5):107−112.
Wang B L, Chen R, Luo Y, et al. Relationship between pH spatio−temporal variation and phytoplankton in Hengjiang River Basin [J]. Environmental Science and Management, 2024,49(5):107−112.

[43] Peng X, Lin Q, Liu B, et al. Effect of submerged plant coverage on phytoplankton community dynamics and photosynthetic activity in situ [J]. Journal of Environmental Management, 2022,301:113822.

[44] Lewis E L, Perkin R. Salinity: Its definition and calculation [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1978,83(C1):466−478.

[45] Onabule O A, Mitchell S B, Couceiro F. The effects of freshwater flow and salinity on turbidity and dissolved oxygen in a shallow Macrotidal estuary: A case study of Portsmouth Harbour [J]. Ocean & Coastal Management, 2020,191:105179.

[46] 徐 闯,刘广州,陈晓宏.珠江流域东江(东莞段)溶解氧时空变化及其影响因素 [J]. 湖泊科学, 2022,34(5):1540−1549.
Xu C, Liu G Z, Chen X H. Spatiotemporal variations and influencing factors of river dissolved oxygen in Dongguan section of Dongjiang River, Pearl River Basin [J]. Journal of Lake Science, 2022,34(5): 1540−1549.

[47] 王文才,杜 薇,范中亚,等.基于 EFDC 模型的长江江苏段水流输运时间研究 [J]. 人民长江, 2019,50(5):70−75.
Wang W C, Du W, Fan Z Y, et al. Study on transport timescale in Jiangsu reach of Yangtze River based on EFDC model [J]. Yangtze River, 2019,50(5):70−75.

作者简介: 金晓玥(1999−),女,山东淄博人,汕头大学硕士研究生,从事流域水生态环境治理研究.22xyjin@stu.edu.cn.