

DOI: 10.13671/j.hjkxb.2021.0361

陈仲晗, 徐娟, 刘帅帅, 等. 2022. 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, 42(3): 1-10

CHEN Zhonghan, XU Juan, LIU Shuaishuai, et al. 2022. Numerical analysis of dissolved oxygen budgets and hypoxia mitigation strategies for an urban tidal river[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 42(3): 1-10

城市感潮河流溶解氧收支及调控的模拟研究

陈仲晗, 徐娟, 刘帅帅, 蔡世斌, 赵庄明*

生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510655

摘要: 城市感潮河段受径流、潮汐动力及流域排污等多重影响, 易引发河道缺氧现象。通过建立潭江(开平段)二维水动力水质模型, 并采用拉格朗日粒子示踪、情景分析等手段, 研究水流运输、生化反应过程对溶解氧的影响, 进而探索提升关键断面溶解氧浓度的调控策略。结果表明: ①潭江干流上游水团输送比支流镇海水更快, 且同等增量下, 潭江干流流量变化对下游影响更大; 但对潭江干流开平市区下游新美断面污染贡献中, 镇海水对其总磷(TP)污染贡献较大, 而新昌水对其总氮(TN)污染贡献较大; ②新美断面、镇海水的娄冈断面及新昌水的公义断面均为耗氧断面; 水体有机物耗氧是本区域溶解氧消耗的主要过程, 占总消耗的 64.4%, 其次为底泥耗氧, 占总消耗的 32.5%; 水体中氧气的主要来源为浮游植物的光合作用, 占比约 64.6%; ③增加上游流量、下移城区排口位置或削减上游临近城区污染源均可提高下游溶解氧浓度; 与镇海水相比, 提高潭江干流流量的效果更为明显; 下移城区排口位置虽有效果但可操作性较弱。

关键词: 感潮河段; 溶解氧; 数值模拟; 拉格朗日粒子示踪; 调控策略

文章编号: 0253-2468(2022)03-0001-10

中图分类号: X52, X32

文献标识码: A

Numerical analysis of dissolved oxygen budgets and hypoxia mitigation strategies for an urban tidal river

CHEN Zhonghan, XU Juan, LIU Shuaishuai, QI Shibin, ZHAO Zhuangming*

South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655

Abstract: Urban tidal rivers are prone to hypoxia problems due to the influence of complex hydrological conditions and urbanization. A two-dimensional model MIKE 21 with Particle-Tracking and ECO Lab functions was built to study the influence of hydrodynamic and biochemical processes on dissolved oxygen (DO) dynamics in the Tanjiang River (Kaiping reach) and to further assess the efficiency of different management solutions for oxygenation using a scenario analysis. The results show that: ① the transport time is faster from the mainstream than from the Zhenhai branch and has a much more significant influence from the discharge. The main source of phosphorus in the Xinmei section is the Zhenhai branch, while the main source of nitrogen is the Xinchang branch. ② Net DO consumption is positive in the Xinmei, Lougang and Gongyi sections. During the simulation period, oxygen consumption mainly occurred through the mineralization of organic matter in the water column (64.4%) and in the sediment (32.5%). The amount of oxygen originating from primary productivity accounts for 64.6%. ③ The increase of river flow, reductions in urban sewage overflows, and the displacement of urban discharge downstream from the Xinmei section can improve DO levels in the Xinmei section but with variable efficiency. High river flows from the mainstream area can increase the DO concentration more efficiently than those from the Zhenhai branch. The downstream relocation of wastewater discharge from the city of Kaiping allows for better oxygenation levels despite the low feasibility of this strategy.

Keywords: tidal river; dissolved oxygen; numerical simulation; Lagrange particle tracking; control strategy

1 引言(Introduction)

随着全球气候变化和人类活动的加剧, 城市感潮河段水体缺氧现象时有发生, 且呈逐年恶化趋势(Du *et al.*, 2015; Schmidt *et al.*, 2017; Lajaunie-Salla *et al.*, 2019). 城市感潮河段缺氧成因较为复杂, 一方面受海洋潮流和河流淡水径流的共同作用, 咸淡水在感潮河段混合, 水文动力条件较为复杂(黄平等, 1992); 另一方面, 沿海地区的城市化进程较快, 生活污水和工业废水易携带大量有机物入河(Mallin *et al.*, 2006; Tomaso *et al.*, 2015). 因此, 对感潮河段复杂的水动力学及其物质输运过程进行研究, 可以明确感潮河段水体发生缺氧的机

收稿日期: 2021-06-12

修回日期: 2021-08-17

录用日期: 2021-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(No.42006138); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(No.PM-zx703-202002-042, PM-zx703-202004-140)

作者简介: 陈仲晗(1992—), 女, 博士, E-mail: chenzhonghan@scies.org; *责任作者, E-mail: zhaozhuangming@scies.org

理,为感潮河网生态环境的进一步改善提供科学依据。

溶解氧浓度变化的时间尺度较小,缺氧往往是一个累积性的结果,所以仅基于实测数据难以明确水环境中溶解氧动态平衡的各个过程特征及形成机理(许晓飞等,2015)。采用数值模拟计算可以综合考虑多种因素的影响,并捕捉短时间内溶解氧的变化规律,是在实地观测基础上研究感潮河段水动力学和物质输送规律的有力手段(Vincon-Leite *et al.*, 2018)。目前,已有研究采用数值模拟分析溶解氧变化的主要影响因子(Wang *et al.*, 2017; 郑静静等, 2018),或探究缺氧现象变化趋势(Katixa *et al.*, 2018; Bocaniov *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020)等,但对溶解氧的收支平衡及机理研究相对较少。因此,本研究以潭江(开平段)为研究对象,建立二维水动力水质模型,定量研究区域溶解氧的分布特征及收支平衡过程,探究城市感潮河网的缺氧成因,为流域管理措施的制定提供科学依据。

2 研究区域概况(The study area)

潭江发源于广东阳江牛围岭,自西向东经银洲湖出崖门口注入南海,多年平均流量为 $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。受潮汐顶托作用,中下游从合山水闸以下均为潮区,潮型为不规则半日潮,历年平均潮差上游大于下游,长沙站历年平均潮差为 1.40 m,石咀站为 1.33 m(梁毅等,2009)。开平市位于其中下游位置,潭江(开平段)为典型的感潮河段,且干流沿岸的城市化和工业化程度均较高,镇海水、新桥水等支流沿岸的种植业、养殖业较发达(唐廉等,2018;陈仲晗等,2020)。

《开平市潭江、牛湾断面水质达标 2018 年攻坚方案》显示,开平市区下游断面经常存在低氧现象。近年来河长制水质月报数据显示,潭江干流上游水质相对较好,溶解氧含量高,下游水质相对较差,溶解氧含量低。镇海水、址山河等支流水质相对较差,溶解氧在各支流上游较高,中下游含量较低,基本为 IV 类~劣 V 类水质,超标因子多为氨氮、总磷等。

3 研究方法(Research methods)

3.1 模型选取及原理

潭江(开平段)的河面与水深相比较为宽阔,流量垂向变化相对于平面两个方向较小,具有宽浅型水体的特征。潭江(开平段)水动力模型选用丹麦水力研究所(DHI)开发的基于深度平均的二维水动力水质模型 MIKE21,采用三角形网格来适应河流复杂的岸线。采用 EcoLab 模块定义该区域的主要水质生态过程,研究中主要考虑了溶解氧收支平衡过程、浮游植物的生长繁殖过程和营养盐循环过程,模拟了重要因子(氧、碳、氮、磷)在水柱内、水气界面、底泥与上覆水之间的交换过程(图 1)。

体现河流水流运动和污染物迁移路径的方法有水龄、水力滞留时间等。本文采用示踪剂传输时间(Travel time)来表征,其通常定义为一种给定浓度的保守型示踪剂从它的起始投放位置到某一观测位置出现浓度峰值所需要的时间。粒子示踪模型的主要原理是基于水动力模型实时计算的流速场结果,依靠粒子运动轨迹来清晰展现空间水流运动,进而反映污染物的空间分布和迁移路径(Razmi *et al.*, 2014; 李云良等, 2017)。本文通过水动力水质模型 MIKE21 耦合拉格朗日粒子示踪模型(PT model)来模拟计算(DHI, 2012),采用 Langevin 方程描述其动力过程,根据爱因斯坦对布朗运动的解释,求解结果可写为式(1)。

$$dX_t = a(t, X_t)dt + b(t, X_t)\xi_t dt \quad (1)$$

式中, a 为漂移项, b 为扩散项, ξ 为随机数。给定欧拉法下的某处位置和相应位置的物理量,采用递归法可求得运动到下一时刻的位置,离散格式为式(2)。

$$Y_{n+1} = Y_n + a(t, X_t)Y_n \Delta_n + b(t, X_t)Y_n \Delta W_n \quad (2)$$

式中, Y 为轨迹位置; $\Delta W_n = W_t - W_s \in N(\mu = 0, \sigma^2 = \Delta_n)$ 为服从标准高斯分布的维纳过程 W 的增量,维纳过程又称布朗运动过程,是一种在 $\tau_n \leq t < \tau_{n+1}$ 子区间上具有地理增量的连续时间随机过程。

本次模拟采用两种不同类型进行情景假设。第 1 种是采用流量控制手段,可从镇海水库或潭江干流上游水库调水,以增加上游来水量。第 2 种是污染控制手段,可削减开平中心城区的排污量或将开平中心城区排

污口移至下游位置.情景分析具体方案和对应改变边界如表 1 所示.

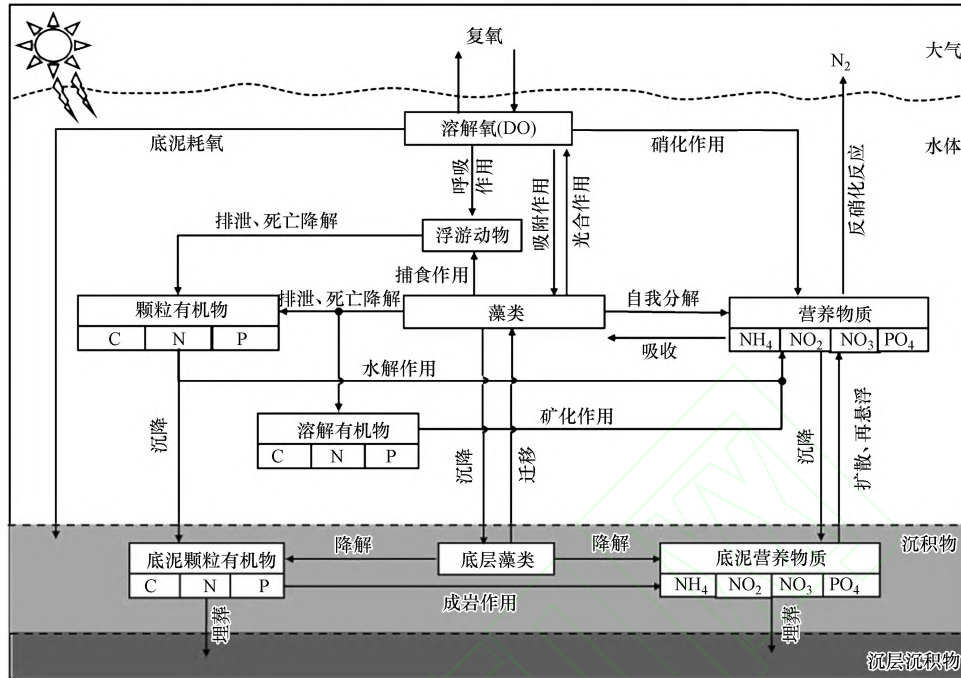


图 1 水质模型基本原理

Fig.1 Basic principles of water quality model

表 1 模型模拟情景措施方案

Table 1 Model simulation scenario measures

情景	措施方案	模拟条件调整
情景 1	流量控制手段	潭江干流+10 m ³ ·s ⁻¹
情景 2		镇海水+10 m ³ ·s ⁻¹
情景 3	污染控制手段	削减长沙街办、三埠街办排污量的 10%
情景 4		下移长沙街办、三埠街办的概化排口至新美断面下游 3 km

3.2 模拟区域及设置

模拟区域包括潭江干流义兴断面至石咀断面,全长约 60 km;流域内包含镇海水、蚬冈水、白沙水、新昌水、新桥水及址山河等 6 条支流.采用三角非结构网格对模型区域进行划分,在开平市区河段进行加密处理,共包含 7781 个网格、5484 个节点,地形数据来自于航道测绘(图 2).结合现场监测的流场及水质数据,模拟时

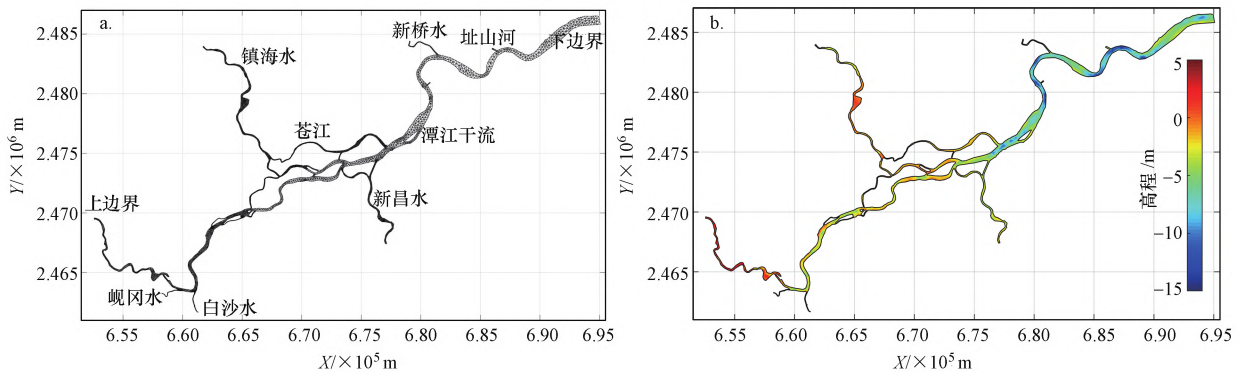


图 2 潭江(开平河段)研究范围(a.网格划分图,b.地形插值图)

Fig.2 Tanjiang (Kaiping River section) research area (a.grid division map, b.terrain interpolation map)

间为2019年10月28日00:00—2019年12月27日00:00,时间步长为600 s,共计8640个时间步长.水动力模型中,下游水位边界条件为石咀水文站逐时数据,潭江上游流量边界采用义兴断面的实测流量数据,镇海水、新昌水支流源汇项流量分别采用娄冈、公义断面的实测流量数据,其余蚬冈水、白沙水、新桥水、址山河支流源汇项流量采用多年平均流量数据.气象数据从中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)下载台山站点(No.59478)监测资料.水质模型中,以落潮时的实测数据作为边界条件输入,以区域内国控断面实测数据采用克里金插值作为初始条件;并收集开平市主要污水处理厂的排污量及排污口位置,同时测算开平市区(长沙街办、三埠街办)的工业源、农业源数据,均概化成点源形式输入模型(图3、表2).



图3 验证点、排污口概化等位置分布图

Fig.3 Location map of verification sites, generalization of sewage outlets, etc

表2 污染源概化位置及污染负荷

Table 2 Location and pollution load of generalization of sewage outlets.

主要污染源名称	概化位置		污染负荷/(t·a ⁻¹)			
	经度(E)	纬度(N)	COD	NH ₃ -N	TN	TP
开平市水口污水处理厂	112.79°	22.44°	524.84	36.19	144.28	2.80
开平市迳头污水处理厂	112.70°	22.34°	406.85	40.78	70.75	1.33
开平市新美污水处理厂	112.67°	22.38°	277.58	10.71	45.80	2.25
开平市赤坎污水处理厂	112.58°	22.32°	103.18	0.51	1.31	0.12
长沙街办工业、农业源	112.67°	22.38°	187.95	13.49	50.79	4.54
三埠街办工业、农业源	112.69°	22.36°	259.62	12.14	76.27	4.84

3.3 模型验证结果

采用2019年11—12月的长沙街道办测站常规水位监测数据及2019年11月4—8日的新美、牛湾断面连续实测流量数据进行验证;采用2019年11月6—8日11个采样点的水质监测数据及2019年11月4—8日的新美、公义、娄冈、牛湾断面连续实测水质数据进行验证,指标包括温度、盐度、溶解氧(DO)、叶绿素a(Chl-a)、氨氮(NH₃-N)、亚硝酸盐(NO₂-N)、硝酸盐(NO₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)和总有机碳(TOC),验证点位置

见图3.参考模型默认值及相关文献取值,采用实测数据率定并验证.实测值与模拟值对比的Target-Taylor示意图如图4所示.由图可知,模拟误差在可接受的范围内($r>0.54$, $|RMSE^*|<0.95$, $|Bias^*|<0.69$);水位、流量及 NH_3-N 与参照点的距离较近,说明其模拟误差相对较小;TP、 NO_2-N 与参照点的距离较远,说明其模拟误差相对较大.原因可能有两方面:一是在模拟时仅将污水处理厂排污纳入模型;二是仅以一次的实测值作为支流的水质边界条件.总的来看,验证结果显示模拟误差在可接受范围内,表明建立的潭江(开平段)水动力水质模型能较好地模拟该区域水文动力条件及污染物的迁移、转化、反应等过程.

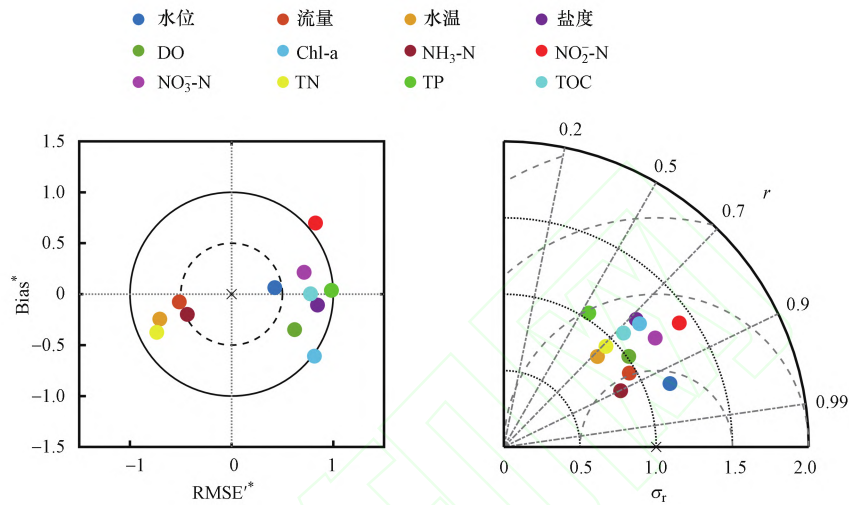


图4 水动力水质模型验证的Target-Taylor示意图(\times 为参照点)

Fig.4 Target (left panel) and Taylor (right panel) diagrams illustrating the model skills for the hydrodynamic and biochemical fields

3.4 模拟结果与分析

在模拟时段内,开平市区内主要河段DO、TN、TP、Chl-a平均浓度的模拟结果如图5所示.潭江干流上游DO浓度较高,在进入开平市区内,DO浓度开始缓慢上升,在新美断面附近达到区域最高浓度后开始下降,之后越往下游DO浓度越低,支流的DO浓度较低.潭江干流上游的TN浓度较低,经开平市区后开始升高,在开平市区段,尤其是南侧水体达到极大值,镇海水、新桥水、新昌水等支流的TN浓度相对较高,可能是开平市内潭江河道TN的主要来源.潭江干流上、下游的TP浓度均普遍较低;但镇海水TP浓度明显较高,从而导致开平市区河段,尤其是北部苍江水的TP浓度较高;此外,新昌水、新桥水的TP浓度也较高,支流的磷主要来源于农业源.潭江干流上游的Chl-a浓度较低,长沙测站附近Chl-a浓度开始上升,下游Chl-a浓度相对较高;在支流上,镇海水、新昌水、新桥水上游Chl-a浓度普遍较高,这与氮、磷污染源的输入有关.

4 结果与讨论(Results and discussion)

4.1 重点断面拉格朗日粒子输移分析

为研究潭江来水和镇海水来水对潭江干流下游水质的影响,分别在潭江干流、镇海水抛点,统计分析不同流量情境下,潭江干流上新美、牛湾等重点断面的拉格朗日粒子输移情况.从结果可以看出(表3),粒子从到达各站点到完全通过需要一定的时间,流量越小,输移所需要的时间越长,且越往下游,流量的影响越大;与镇海水相比,来自潭江干流上游的水团输送得更快,且同等增量下,潭江干流的流量变化对下游的影响更大.对长江江苏段水流输运时间的类似研究也表明(王文才等,2019),受下游潮汐的影响,越靠近下游水体输运越慢;水体输运时间在相对较小的径流量下受流量影响较大.由此可见,下游潮汐作用对感潮河流中的污染物迁移产生阻滞作用,越靠近下游区域,其阻滞作用越为明显,因此,污染物在感潮河流中下游,尤其是支流汇入区的滞留时间相对较长(何振强等,2017).

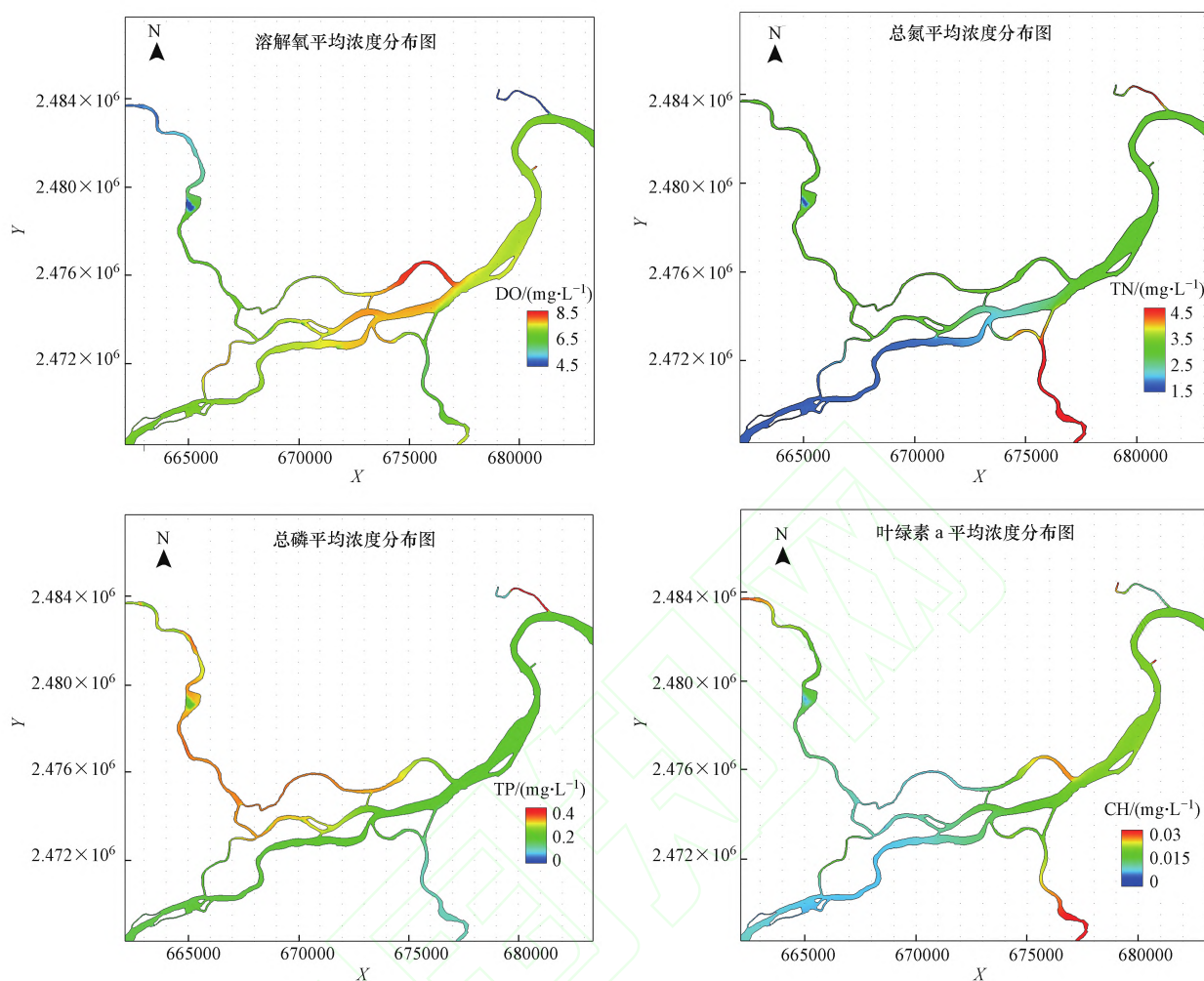


图5 潭江(开平段)DO、TN、TP及Chl-a浓度空间分布

Fig.5 The spatial distribution map of the concentration of DO, TN, TP and Chl-a in Tanjiang (Kaiping section)

表3 不同流量控制手段情景、释放位置下拉格朗日粒子从释放至到达相应断面的输移时间

Table 3 The transport time of Lagrangian particles at different flow rates scenarios and release positions from release to reaching the corresponding section

粒子释放位置	情景	输移时间/d	
		新美	牛湾
潭江干流释放	原情景	2.80	11.20
	情景1	1.75	6.75
	情景2	2.58	8.46
镇海水释放	原情景	3.92	12.20
	情景1	2.83	8.83
	情景2	3.58	14.70

注:抛点位置距离新美断面约15.5 km,距离牛湾断面约36.8 km.

4.2 溶解氧收支平衡分析

利用模型可计算潭江干流上游述成里断面、下游新美断面、镇海水的娄冈断面及新昌水的公义断面的TN、TP及TOC的净通量,进而定量分析各区域的污染物贡献.由模拟期间内的平均通量可知(图6),镇海水对下游新美断面的TP污染贡献较大,新昌水对下游新美断面的TN污染贡献较大,开平市区内TOC的消耗量较大.15 d内,新美断面下游随涨潮携带约 567.98×10^4 t TOC、 1243.79×10^4 t TN及 62.13×10^4 t TP,随落潮携带 769.71×10^4 t TOC、 1697.20×10^4 t TN及 83.66×10^4 t TP至下游,新美断面的污染主要来源于上游汇入河流及市区污染排放.

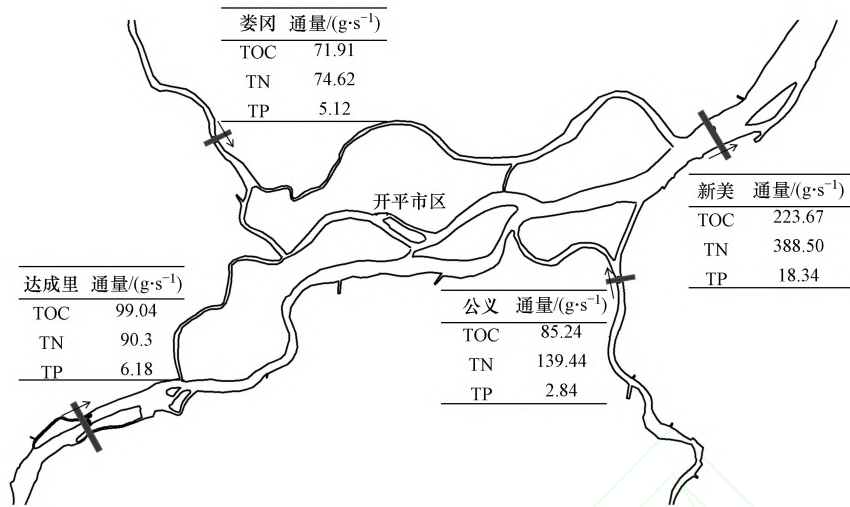


图6 模拟期间关键断面DO、TOC、TN及TP的平均通量

Fig.6 The average flux of DO, TOC, TN and TP at key sections during the simulation

除关注上、下游的污染物迁移情况,还可利用模型研究水体中影响溶解氧平衡的生化循环过程的速率.溶解氧的来源主要是大气复氧和浮游植物新陈代谢作用产氧.流速较大的开平市内河段的复氧速率相对较高,镇海水的其他生化过程导致其溶解氧浓度较低,形成较大的浓度梯度,因此,复氧速率也相对较高.开平市河段的初级生产力较高,而潭江上游、镇海水及新昌水的初级生产力较低,尽管镇海水、新昌水的Chl-a浓度并不低,但光合效率的产能不高,从模拟结果来看,两处水体的颗粒物浓度较高,使得浮游植物对光能的利用率低.溶解氧的消耗途径主要是沉积物耗氧、水体有机物耗氧和硝化反应耗氧.各支流附近的城市开发较为落后,存在大面积的种植、养殖等现象,河段底泥中累积的有机物含量较高,一旦水体扰动增强,底泥耗氧的速率明显增加.水体有机物耗氧的空间分布与底泥耗氧速率的分布规律类似.水体中的有机物来源主要为外源排放、底泥释放、生物排泄死亡的分解等.由实测值可知,镇海水、新桥水、公义水等支流的TOC浓度均较高.潭江下游的硝化反应耗氧速率较低,而开平市区内河段及镇海水的硝化反应耗氧速率较高.硝化反应速率主要受到温度、铵盐含量的影响,开平市区的生活污染源集中排放量较大,镇海水流域面积较大,承担了较大比例的氨氮污染源.

为进一步描述各个反应过程速率对水体中溶解氧含量的影响,本文参考碳、氮循环的计算方法(Han *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2019),计算了水体中主要涉氧生化循环的溶解氧净生产速率(Net DO),即各个主要生化过程速率的总和.若溶解氧净生产速率为正值,则表明此断面以产氧过程为主;若溶解氧净生产速率为负值,则表明此断面以耗氧过程为主.模拟期间内,潭江(开平段)的溶解氧净生产速率如图7所示.对比各个耗氧过程可知,水体耗氧是本区域的主要氧消耗过程,约占总耗氧量的64.4%,其次为底泥耗氧,约占总耗氧量的32.5%,水体中氧气的主要来源为浮游植物的光合作用,占比约为64.6%.这一点与很多其他地区的研究结论相似.例如,合肥市南淝河中,水体有机物耗氧占比约70%,硝化反应耗氧占比约20%,底泥耗氧占比不到10%(Huang *et al.*, 2017);山东半岛南部的乳山湾河口,水体耗氧约占总耗氧量的79%,底泥耗氧占21%(赵晨英, 2017);新加坡的Upper Peirce水库中水体有机物矿化分解耗氧量占67%,而底泥耗氧占27%(胡鹏等, 2019).

选取5个关键断面(2#新美断面、3#公义断面、4#娄冈断面、8#曙光桥、10#南娄断面),提取出各断面溶解氧的生产、消耗、转换速率进行分析,结果如图8所示.从结果来看,潭江干流开平市区上游南娄断面的溶解氧净生产率为正;而下游的新美断面、镇海水的娄冈断面和新昌水的公义断面为重点耗氧断面.尽管目前来看,开平市区北侧苍江的曙光桥断面的溶解氧净生产率为正,但高浓度的浮游植物死亡后会产生大量的有机质,进而消耗水体中的溶解氧,存在严重缺氧的隐患.

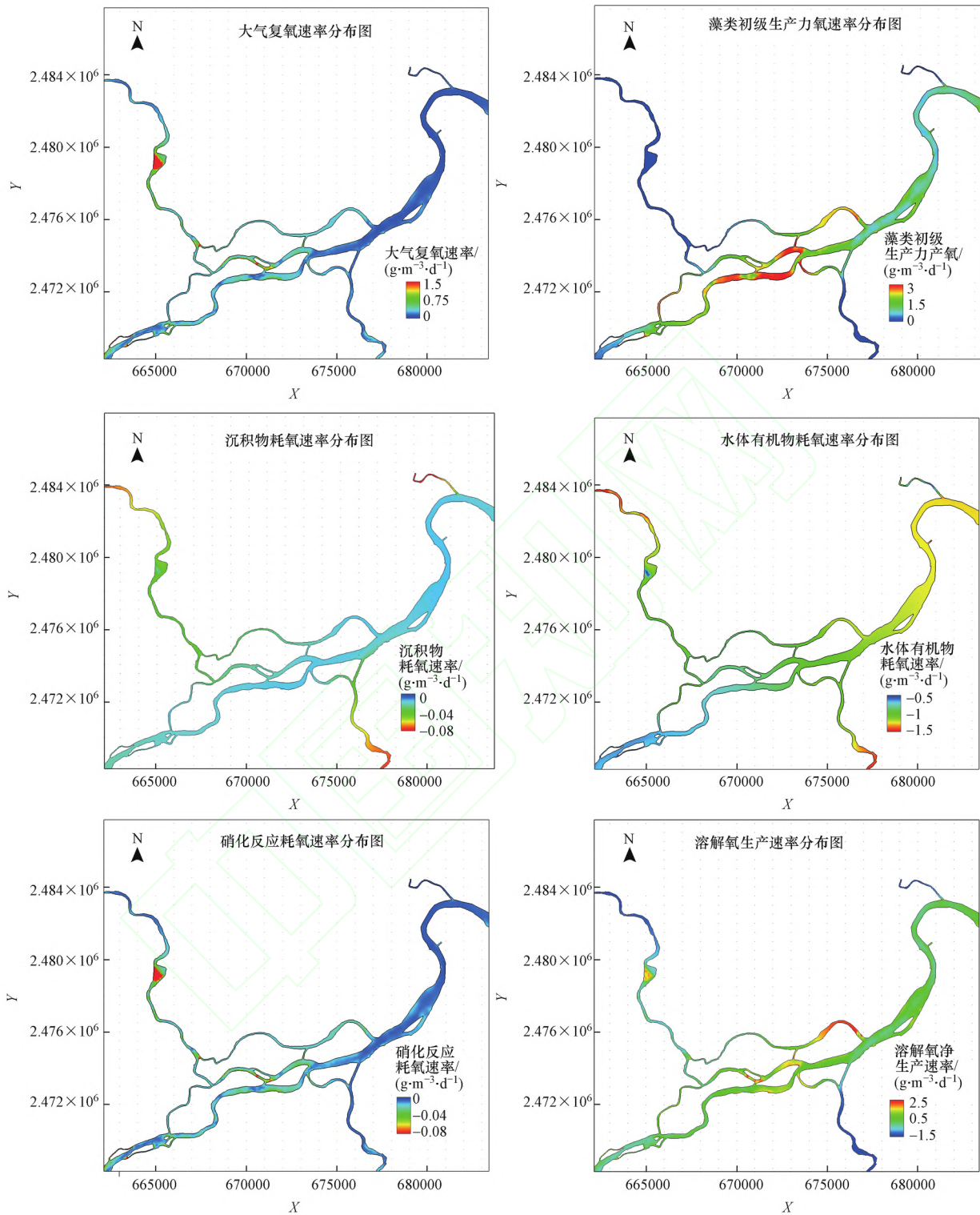


图7 模拟期间溶解氧收支速率及净生产速率分布图

Fig.7 Distribution diagram of dissolved oxygen budget and net production rate during the simulation period

4.3 溶解氧调控策略研究

上游来水会影响物质的迁移,污染物排放会影响区域有机质耗氧过程,因此,可通过调节上游流量或调整城市排污策略来影响关键断面的溶解氧浓度(Schmidt *et al.*, 2017; Katixa *et al.*, 2018; 胡鹏等, 2019)。根据前文的研究,本次设定4种调控策略:一是从镇海水库调水,增加镇海水的流量;二是从潭江干流上游水库调

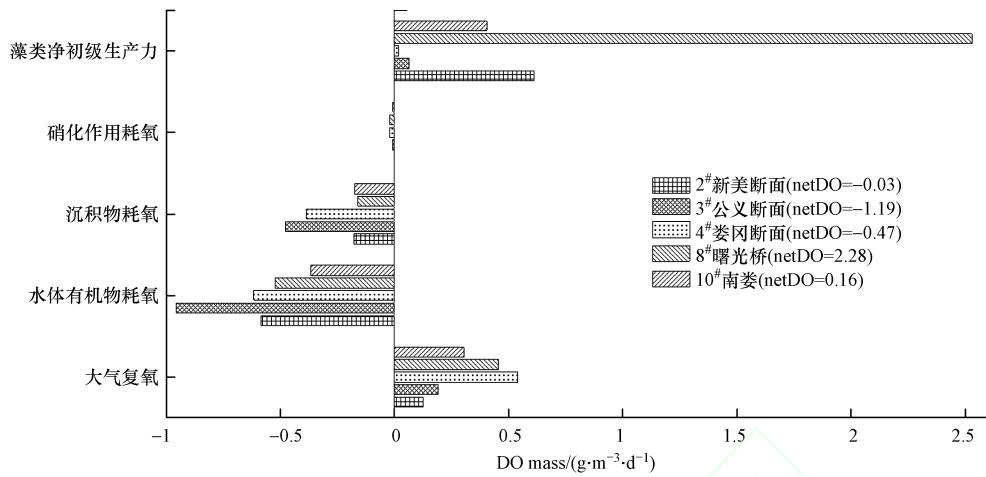


图8 关键断面处溶解氧的产生、消耗速率图

Fig.8 Diagram of the production and consumption rate of dissolved oxygen at key sections

水,增加潭江干流的流量;三是削减开平中心城区的排污量;四是开平中心城区排污口移至新美断面下游(图3).对比各情景下新美断面的溶解氧平均浓度可知(图9),与原情景相比($6.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),增加潭江干流流量对提高下游新美断面溶解氧浓度的效果更为明显($6.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),这与拉格朗日粒子输移分析的结论一致;下移排口位置及削减上游临近城区污染源对下游溶解氧的影响也较为明显,主要可减少新美断面的有机物含量,降低其有机物耗氧量.对同样具备感潮属性的Garonne河的研究表明(Lajaunie-Salla *et al.*, 2019;胡鹏等, 2019),削减污染物对溶解氧的提升是区域性、暂时性的,下移排污口的效果明显但成本较高,并在水位较低时提高来水量,增氧效果更为明显,在流速较缓时增加上游来水量的增氧效果更为明显.

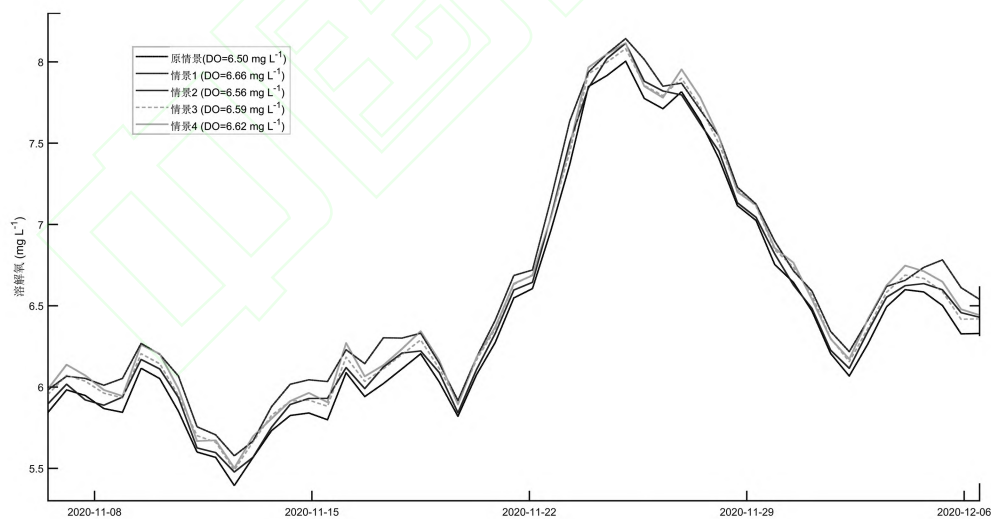


图9 各调控情景下新美断面处溶解氧变化趋势

Fig.9 Change trend of dissolved oxygen at Xinmei section under various control scenarios

5 结论(Conclusions)

1) 拉格朗日粒子输移分析表明,受潮汐的影响,下游区域的水体输送耗时更长;与镇海水相比,来自潭江干流上游的水团输送得更快,且同等增量下,潭江干流的流量变化对下游的影响更大.

2) 各断面的污染物计算通量结果表明,镇海水对下游新美断面TP的污染贡献较大,新昌水对下游新美

断面 TN 的污染贡献较大,开平市区内 TOC 的消耗量较大;新美断面的污染主要来源于上游汇入河流及市区污染排放.

3) 溶解氧的主要产生与消耗过程速率的计算结果表明,水体耗氧是本区域溶解氧消耗的主要过程,占总消耗的 64.4%,其次为底泥耗氧,占总消耗的 32.5%;水体中氧气的主要来源为浮游植物的光合作用,占比约 64.6%.新美断面、公义断面、娄冈断面为重点耗氧断面.

4) 调控情景分析结果表明,增加潭江干流流量对提高下游溶解氧浓度的效果更为明显,下移排口位置及削减上游临近城区污染源对下游溶解氧的影响也较为明显,可通过减少新美断面的有机物含量来降低其耗氧量.

参考文献(References):

- Bocaniov S A, Lamb K G, Liu W, *et al.* 2020. High sensitivity of lake hypoxia to air temperatures, winds and nutrient loading: Insights from a 3D lake model[J]. *Water Resources Research*, 56(12):e2019WR027040
- 陈仲晗, 赵庄明, 蔡世斌, 等. 2020. 城市感潮河流二氧化碳释放的影响因素分析[A]. 中国环境科学学会. 2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷)[C]. 北京: 中国环境科学学会. 3:7
- Chen Z, Huang P, Zhang Z. 2019. Interaction between carbon dioxide emissions and eutrophication in a drinking water reservoir: A three-dimensional ecological modeling approach[J]. *Science of the Total Environment*, 663:369-379
- Danish Hydraulic Institute (DHI). 2012. Mike 21 & Mike 3 Flow model FM Particle Tracking Module Scientific Documentation[R]. Denmark: DHI
- Du J, Shen J. 2015. Decoupling the influence of biological and physical processes on the dissolved oxygen in the Chesapeake Bay[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 120(1):78-93
- 黄平, 陈铤成. 1992. 典型感潮内河涌水质污染特征调查研究[J]. *环境科学学报*, 12(3):341-348
- 胡鹏, 杨庆, 杨泽凡, 等. 2019. 水体中溶解氧含量与其物理影响因素的实验研究[J]. *水利学报*, 50(6):679-686
- Han H J, Los F J, Burger D F, *et al.* 2016. A modelling approach to determine systematic nitrogen transformations in a tropical reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 94:37-49
- 何振强, 方诗标, 陈永明, 等. 2017. 钱塘江感潮河段污染物迁移扩散数值分析[J]. *环境科学学报*, 37(5):1668-1673
- Huang J, Yin H, Steven C, *et al.* 2017. Modelling dissolved oxygen depression in an urban river in China[J]. *Water*, 9(7):520
- Katixa L S, Aldo S, Sabine S, *et al.* 2018. Future intensification of summer hypoxia in the tidal Garonne River (SW France) simulated by a coupled hydro sedimentary-biogeochemical model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 25:31957-31970
- 李云良, 姚静, 李梦凡, 等. 2017. 鄱阳湖换水周期与示踪剂传输时间特征的数值模拟[J]. *湖泊科学*, 29(1):32-42
- Lajaunie-Salla K, Sottolichio A, Schmidt S, *et al.* 2019. Comparing the efficiency of hypoxia mitigation strategies in an urban, turbid tidal river via a coupled hydro-sedimentary - biogeochemical model[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(11):2551-2564
- 梁毅, 陈鸿文. 2009. 长沙水文站洪水预报方法探讨[J]. *广东水利水电*, (1):25-27+52
- Mallin M A, Johnson V L, Macpherson E. 2006. Part 2: Eutrophication of freshwater and marine ecosystems II Factors contributing to hypoxia in rivers, lakes, and streams[J]. *Limnology & Oceanography*, 51(1):690-701
- Razmi A M, Barry D A, Lemmin U, *et al.* 2014. Direct effects of dominant winds on residence and travel times in the wide and open lacustrine embayment: Vidy Bay (Lake Geneva, Switzerland)[J]. *Aquatic Sciences*, 76:59-71
- Schmidt S, Bernard C, Escalier J M, *et al.* 2017. Assessing and managing the risks of hypoxia in transitional waters: A case study in the tidal Garonne River (South-West France)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4):1-9
- 唐廉, 胡晓辉, 权冠中, 等. 2018. 潭江流域水质时空分布特征及其与土地利用的相关性分析[J]. *地球与环境*, 46(4):364-372
- Tomaso D J, Najjar R G. 2015. Long-term variations in the dissolved oxygen budget of an urbanized tidal river: The upper Delaware Estuary[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 120(6):1027-1045
- Vincon-Leite B, Casenave C. 2018. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 651(Pt.2):2985-3001
- 王文才, 杜薇, 范中亚, 等. 2019. 基于 EFDC 模型的长江江苏段水流输运时间研究[J]. *人民长江*, 50(5):70-75
- Wang B, Hu J, Li S, *et al.* 2017. A numerical analysis of biogeochemical controls with physical modulation on hypoxia during summer in the Pearl River Estuary[J]. *Biogeosciences*, 14(12):1-31
- Wang Y, Shen J. 2020. A modeling study on the influence of sea-level rise and channel deepening on estuarine circulation and dissolved oxygen levels in the tidal James River, Virginia, USA[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11):950
- 许晓飞, 王晓娟, 刘凤霞, 等. 2015. 感潮河段盐度和缺氧水体时空分布规律研究[J]. *环境科学学报*, 35(9):2900-2909
- 赵晨英. 2017. 乳山湾近海与黄渤海溶解氧, 有机碳, 氮和磷的循环与收支的关键过程研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所
- 郑静静, 刘桂梅, 高姗, 等. 2018. 风和径流量对长江口缺氧影响的数值模拟[J]. *海洋学报*, 40(9):1-17