

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.06.01

闽江口水质对边界条件的响应关系模拟研究

宋刚福^{1,2}, 范臣臣^{1,2}, 向波³, 张鹏^{1,2}, 王冰一^{1,2}, 梅书浩^{1,2}, 李明月^{1,2}

(1. 华北水利水电大学 环境与市政工程学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省水环境模拟与治理重点实验室, 河南 郑州 450046; 3. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要: 为探究闽江河口水质变化趋势及超标原因, 根据入海排污口详查成果, 构建闽江下游至河口二维非稳态水动力水质模型, 以主要污染物 COD_{Mn} 、无机氮和活性磷酸盐为指标, 预测不同水文与外源污染负荷对闽江口水质的影响, 阐明水质对水文和外源污染物的时空响应关系。结果表明: 闽江口水质对不同水文的响应存在显著的时空差异性。闽江口 COD_{Mn} 和无机氮水质受上游影响较大, 而活性磷酸盐所受影响相对较小; 受潮汐潮流的影响, 闽江口涨潮期水质大潮好于小潮, 涨潮好于落潮; 设置水口水库下泄水体水质为年内最好和下游污染物削减 30% 两种条件下, 均不能有效保障河口无机氮和活性磷酸盐水质稳定达标, 建议对水口水库下泄水总氮和总磷提出更严格的控制要求。

关键词: 水质响应; 时空变化; 数值模拟; 闽江口

中图分类号: TV213.4; X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)06-0001-09

Simulation of water quality response to boundary conditions in the Minjiang Estuary

SONG Gangfu^{1,2}, FAN Chenchen^{1,2}, XIANG Bo³, ZHANG Peng^{1,2},
WANG Bingyi^{1,2}, MEI Shuhao^{1,2}, LI Mingyue^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450046, China; 3. PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China)

Abstract: In order to study the change trend of water quality of the Minjiang Estuary and the reasons for it exceeding the seawater quality standard limit, a two-dimensional non-stationary hydrodynamic water quality model was constructed of the Minjiang River covering the downstream to the estuary based on the results of the detailed survey of the sewage outfalls. The main pollutants of COD_{Mn} , inorganic nitrogen and reactive phosphate were used as indicators to predict the effects of different hydrological and exogenous pollution loads on the water quality of the Minjiang Estuary, so as to elucidate the spatial and temporal response of water quality to the pollutants. The results show that the response of water quality of the Minjiang Estuary to different hydrology showed significant spatiotemporal variations. COD_{Mn} and inorganic nitrogen of the Minjiang Estuary were greatly affected by the upstream water quality, whereas the effect of reactive phosphate was relatively small; under the influence of the tidal currents, the water quality in the high tide period was better than that in the neap tide period, and that in tide rising was better than tide ebbing; when the discharge water quality of the Shuikou Reservoir was set as best in the year or 30% reduction of downstream pollutants, both conditions could not guarantee that the inorganic nitrogen and reactive phosphate concentrations of the estuary would meet the standards. Therefore, it is recommended that more stringent control requirements for total nitrogen and total phosphorus should be enforced on the discharge of the Shuikou Reservoir.

收稿日期: 2021-08-13; 修回日期: 2021-11-16

基金项目: 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2018GGJS077); 华北水利水电大学高层次人才科研启动项目(40768)

作者简介: 宋刚福(1977-), 男, 辽宁营口人, 博士, 教授, 研究方向为饮用水安全与评价及河流生态。

通讯作者: 张鹏(1988-), 男, 河南商丘人, 博士, 讲师, 研究方向为水体污染物迁移转化机理。

Key words: water quality response; spatiotemporal variation; numerical simulation; the Minjiang Estuary

1 研究背景

近年来,河口和近岸海域的水环境问题备受关注^[1-4]。河口作为径流与海洋生态系统的过渡带,具有流速复杂、水温分层等特征,是生态环境十分脆弱和敏感的水域^[5-6]。河口和海湾地区经济社会发展程度高,极大地增加了沿海径流的营养盐输入^[7],从而引发水体富营养化、有毒有害赤潮和生物多样性丧失等一系列水环境问题^[8-9]。根据近年来中国海洋环境公报,污染海域分布在河口、海湾等近岸海域,其主要超标因子为无机氮和活性磷酸盐。河口营养盐聚集已经成为我国沿海水域的主要环境问题^[10]。闽江作为福建省内最大的河流,也是福州市的母亲河^[11]。受较高陆源污染物通量输出的影响,闽江口近岸海域水环境存在超标现象^[12]。

目前,关于流域水质响应与时空变化趋势的分析多采用数值模拟方法^[13-15]。方艺辉^[16]通过建立闽江下游二维浅水水动力水质模型,计算了河床演变引发的水位、流速等水动力和水质变化特征。戴君等^[17]利用构建的 EFDC (the environmental fluid dynamics code) 水动力水质模型,结合情景分析法计算了松花江哈尔滨段各支流水质多情景变化下下游出口断面水质变化趋势。李添雨等^[18]利用 MIKE21 构建沙河水库二维水动力水质模型,计算分析沙河水库水量水质变化趋势,结合库区污染源分布情况,模拟了水位调控方案与水质改善方案。当前针对水质响应的模拟计算与时空变化分析多为湖库和内河,针对河口及近岸海域的研究较少。由于河流下游及河口区域的特殊位置,水文水质条件处于连续复杂的变化中,仅对河口区域开展水动力水质模拟并不能系统地

了解河口区域水文水质时空变化趋势^[19]。为探究闽江口水质对不同边界条件的响应关系,本文构建了包括闽江下游感潮河段、闽江河口及毗邻海域为一体的二维非稳态水动力水质模型,旨在揭示不同水文及外源污染负荷条件下闽江下游及河口区域水动力水质变化特征和内在响应规律,以期为闽江下游及河口水环境管理及改善决策提供科学依据。

2 研究区域概况与研究方法

2.1 区域概况

闽江下游水口水库至河口区域位于福州市境内,全长 117 km^[20]。下游河段在淮安分为南、北两支(北港和南港),北港穿福州城区,河道相对窄深;南港绕南台岛南面而过,中段大樟溪汇入,于罗星塔汇合后向东北方向流经闽安,在亭江又分为南北两支,绕过琅岐岛,分别从长门水道和梅花水道注入东海^[21]。研究区域属亚热带海洋季风气候,年平均气温 16~20℃,平均风速为 2.8 m/s,多年平均降水量为 1 617 mm。闽江年内丰平枯交替现象明显,全年径流量主要集中在汛期,4~9 月径流量占年净流量的 75% 左右。闽江口属山溪性强潮三角洲河口,潮汐呈正规半日潮型,平均潮差 4.1 m(琯头),潮汐沿江上溯逐渐衰减。

闽江河口内共有 3 个国家、省控水质考核点位,分别位于长门水道入海口(川石岛)、梅花水道入海口(梅花东)和闽江口外部海域(闽江口外)。其中,川石岛和闽江口外点位需满足海水二类水质标准,梅花东点位需满足海水一类水质标准。闽江下游至河口研究区域范围、水下高程、水文/位和考核断面分布见图 1。

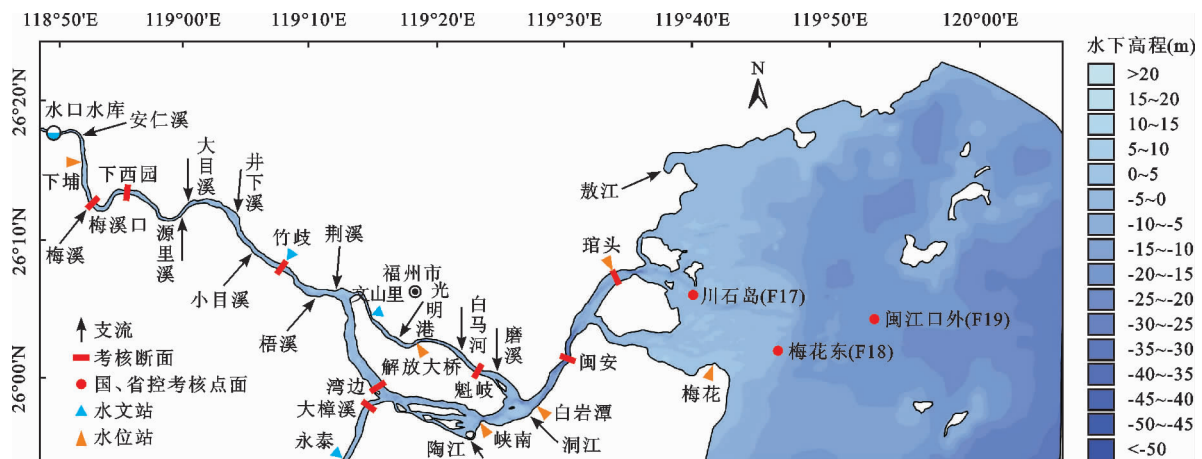


图 1 闽江下游至河口研究区域范围、水下高程、水文/位和考核断面分布

2.2 水动力水质模型构建

2.2.1 水动力基本方程 研究区域为受潮汐、潮流影响的沿海开阔水域,可采用二维非稳态水流连续

$$\frac{\partial \bar{h}\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{h}\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \tag{2}$$

式中: t 为时长, s ; x, y 为笛卡尔坐标系下的空间位置, m ; h 为总水深, m ; η 为水位, m ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; \bar{u} 和 \bar{v} 为不同方向上的平均流速, m/s , $h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz$, $h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz$; $f = 2\Omega \sin \varphi$ 为 Coriolis 因子 (Ω 为地球自转的角速度, φ 为地理纬度); S_{xx}, S_{xy} 和 S_{yy} 为 radiation 应力张量; P_a 为大气压, $kg/(m^3 \cdot s)$; Q 为源项; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ_0 为水的相对密度; (u_s, v_s) 为外界排放到环境水体的速率。

2.2.2 水质基本方程 污染物在二维非均匀流中的对流扩散基本方程^[22,24]:

$$\frac{\partial \bar{h}\bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}\bar{u}\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}\bar{v}\bar{C}}{\partial y} = h\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y}\right)\right] + S + S_k \tag{3}$$

式中: \bar{C} 为水深平均的污染物的浓度, mg/L ; E_x, E_y 为 x, y 方向的扩散系数, m^2/s ; \bar{u} 和 \bar{v} 为沿 x, y 方向的流速分量, m/s ; S_k 为动力转换项, $g/(m^2 \cdot s)$; S 为源(汇)项, $g/(m^2 \cdot s)$ 。

2.2.3 模型设置 根据研究区域实际地形图及相关实测资料,将模型划分成 53 751 个三角形网格,模型外海区域最深不超过 50 m;闽江河口在白岩潭至瑄头水文站总体水深较大,均在 10 m 以上,其中在瑄头、金刚腿水文站最深达到约 40 m;同时南港河道地形存在深坑,局部水深达到 30 m;北港宽深,最深约为 12 m,这些地形特征与闽江河道地形特征相符,所构

及动量方程表示^[13,22-23]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \tag{1}$$

建的模型水深能够较好地反映闽江实际地形。

模型边界水动力条件采用水口水库逐日流量数据,水质边界采用常规水质监测断面值确定;开边界潮位利用俄勒冈州立大学开发的全球潮汐模型 TPXO 6.2 计算并校正后得到,水质边界采用闽江口外部海域考核点位浓度监测值。闽江下游各支流均以概化排污口的形式入江,支流流量根据水文站、降雨量以及各支流流域面积换算得到,水质边界根据污染物入江量进行合理均匀分配获取,点源按全年平均分配,面源根据降雨量按不同水期比例分配。风场、气温、相对湿度等大气边界条件数据来自中国气象网;日降雨、蒸发数据和水温来自水文年鉴。模型计算时间步长为 30 s,初始水位设为 3 m。

2.2.4 模型率定与验证

(1)水动力率定及验证。模型采用 2016 年 1 月(枯水期)竹岐、文山里水文站及下浦、峡南、白岩潭、瑄头水位站水文数据进行参数率定,得到区域模型 Smagorinsky 系数为 0.28;风拖曳系数模型范围内取 0.001 0~0.001 5;底部糙率系数范围为 0.018~0.035。采用 2016 年 4 月(平水期)水文数据进行参数验证,各水文站流量、潮位和水温验证结果及误差见图 2、3 和表 1。为使构建的水环境模型能够更好地反映研究时段闽江口水文变化规律,采用 2019 年 11 月(枯水期)闽江口瑄头点位和闽江口川石岛点位的逐时潮位数据进行补充验证,其结果见图 4。

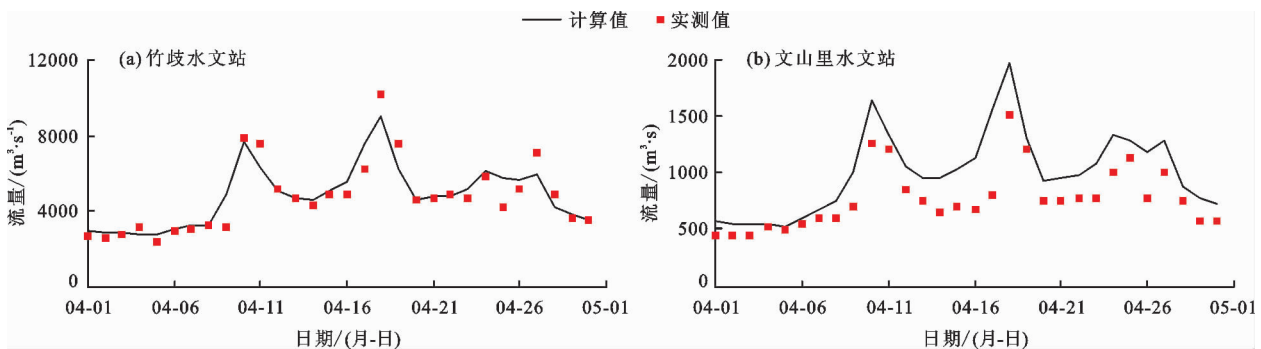


图 2 2016 年 4 月闽江下游水文站流量验证结果对比图

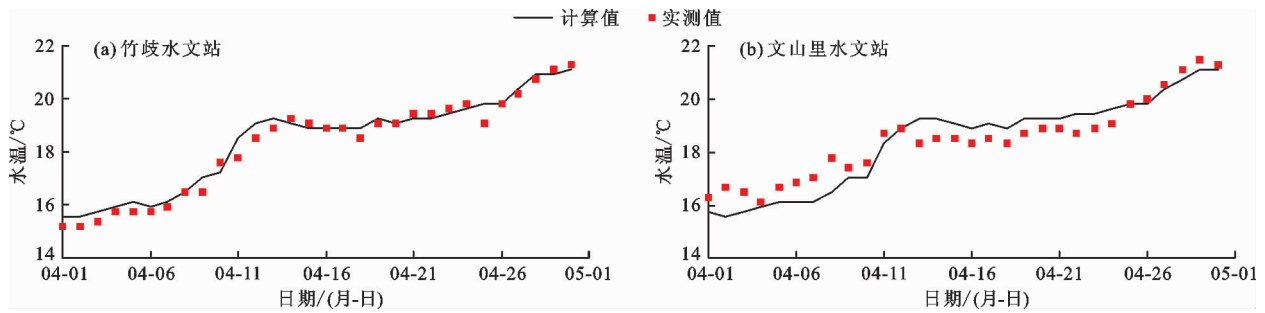


图3 2016年4月闽江下游水文站水温验证结果对比图

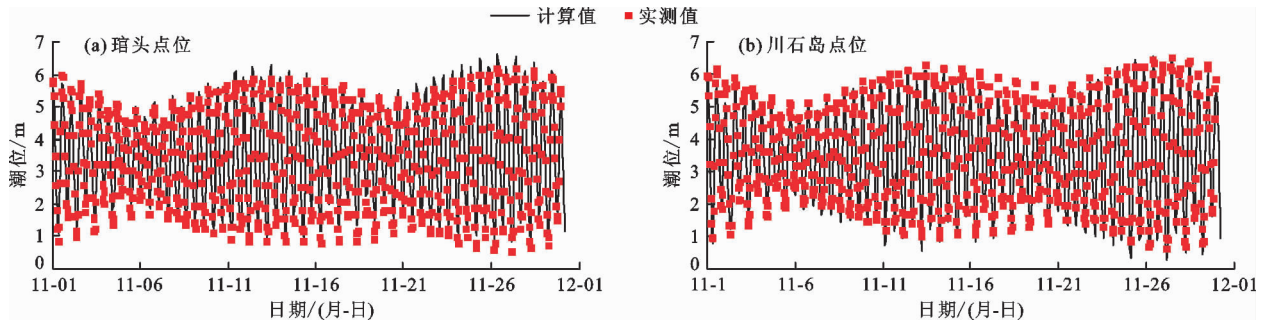


图4 2019年11月闽江下游至河口水文/水位站潮位补充验证结果

表1 各水文/水位站流量、潮位和水温验证误差结果

验证项目	水位站	平均绝对误差/m	平均相对误差/%
流量	竹歧		14.16
	文山里		13.06
潮位	文山里	0.25	
	峡南	0.20	
	白岩潭	0.22	
	瑄头	0.22	
水温	下浦		0.61
	竹歧		1.47
	文山里		2.93

由表1和图2可知,各点位流量平均相对误差最大的为14.16%,各点位潮位平均绝对误差最大值为25 cm,表明各站点模拟水文要素与实测值吻合较好,所构建的水动力模型能够较好地反演闽江下游及河口区域的水动力情况。

水温影响河口温跃层和生物降解,是模拟水动力和水质的关键参数。由表1和图3可知,各断面水温相对误差均在2.93%以内,表明各站点模拟水温与实测值吻合较好,模型非常准确地模拟了水口至闽江口水温的时空变化过程。

(2)水质参数率定及验证。在水动力模型模拟的基础上,对水质参数进行率定和验证。率定采用2019年闽江口5月份(丰水期)川石岛(F17)、梅花东(F18)和闽江口外(F19)3个考核点位的监测浓

度值。选取 COD_{Mn} 、无机氮和活性磷酸盐作为水质模拟污染物指标,率定得到各污染因子的降解系数为: COD_{Mn} 为 $0.06 \sim 0.18 d^{-1}$;无机氮为 $0.07 \sim 0.15 d^{-1}$;活性磷酸盐为 $0.03 \sim 0.1 d^{-1}$ 。采用2019年8月水质数据进行参数验证,验证误差结果见表2。由表2可知,闽江口3个考核点位平均相对误差均小于20%,表明所构建的水质模型适用于该地区的水质模拟。

表2 水质因子验证相对误差结果

水质因子	川石岛 (F17)	梅花东 (F18)	闽江口外 (F19)
COD_{Mn}	17.30	4.60	1.41
无机氮	11.38	8.81	6.58
活性磷酸盐	10.95	15.83	10.95

3 结果与分析

3.1 下泄径流量对闽江口水质的影响

为探究闽江河口与上游流量的响应关系,选取闽江2019年5月(丰水期)水口水库不同下泄流量条件模拟闽江河口水质变化及分布规律,方案1设置年内丰水期(5月)水口水库下泄流量月均值为 $2981 m^3/s$,方案2设置枯水期(11月)流量月均值为 $392 m^3/s$,两方案具体设置见表3。两方案下河口3个点位各水质因子浓度预测结果见表4,闽江口各水质因子浓度场分布见图5。

表3 不同水文水质条件的设置方案

名称	水口水库下泄流上游水质条件/(mg·L ⁻¹)下游至河口				
	量/(m ³ ·s ⁻¹)	COD _{Mn}	总氮	总磷	污染物削减
方案1	2981	1.75	0.90	0.077	现状污染物
方案2	392	1.75	0.90	0.077	现状污染物
方案3	11月实测流量	2.80	1.72	0.106	现状污染物
方案4	11月实测流量	1.75	0.90	0.077	现状污染物
方案5	年内实测流量		年内现状		无削减
方案6	年内实测流量		年内现状		削减30%

表4 年内水口水库不同下泄流量方案下河口点位各水质因子浓度预测结果 mg/L

点位	方案1			方案2		
	COD _{Mn}	无机氮	活性磷酸盐	COD _{Mn}	无机氮	活性磷酸盐
川石岛(F17)	0.89	0.88	0.021	0.54	0.47	0.016
梅花东(F18)	0.75	0.51	0.016	0.49	0.30	0.013
闽江口外(F19)	0.68	0.46	0.012	0.65	0.45	0.012

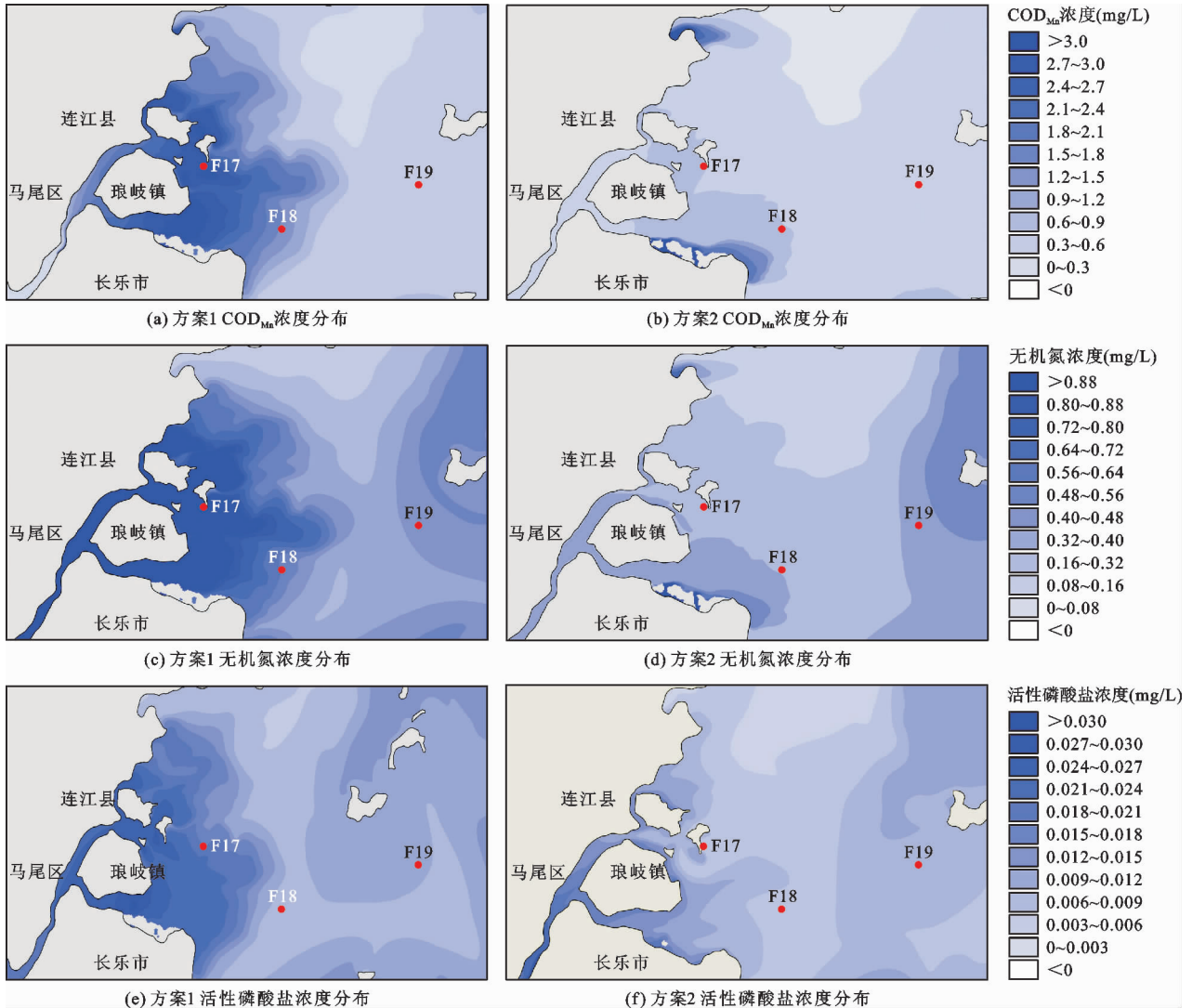


图5 方案1和方案2条件下闽江口COD_{Mn}、无机氮和活性磷酸盐浓度场分布

对比表4及图5中两种方案的模拟结果可知,方案1由于入海河流量较大,单位时间内随径流进入河口区的污染物通量增多,影响的水域面积大,河口整体污染情况高于外部海域,污染带自径流呈现明显浓度梯度向外海扩散^[25]。其中,3个水质点位无机氮水质均超标,F18活性磷酸盐水质超标。方案2由于河口区受径流影响较小,河口区域受上游污染物通量的影响不及方案1,闽江口COD_{Mn}、无机

氮和活性磷酸盐的水质改善比分别为26.14%、29.98%和14.19%,而活性磷酸盐浓度几乎无变化,各点位水质改善程度依次为F17>F18>F19,受较好外海水质的影响,闽江口水质整体提升明显,但三点位无机氮水质依然超标。

总体而言,在丰水期条件下,闽江口COD_{Mn}和无机氮水质受上游流量影响较大,而活性磷酸盐受影响相对较小。

3.2 外海潮汐对闽江口水质的影响

为探究闽江河口与潮汐潮流的响应关系,模拟选取2019年5月大、小潮涨落不同时期条件下,河口各点位水质因子浓度变化及浓度场分布,结果见图6、7。受潮汐潮流的影响,闽江口大潮F17点位

潮差为6.01 m,小潮期为4.81m,涨潮期受海水上溯的影响,污染则多回溯至闽江下游河段,闽江口水质整体较好,而落潮期水流湍急,受上游水质及陆源和径流等影响较大,闽江口水质对比涨潮期好于落潮期,大潮期好于小潮期。

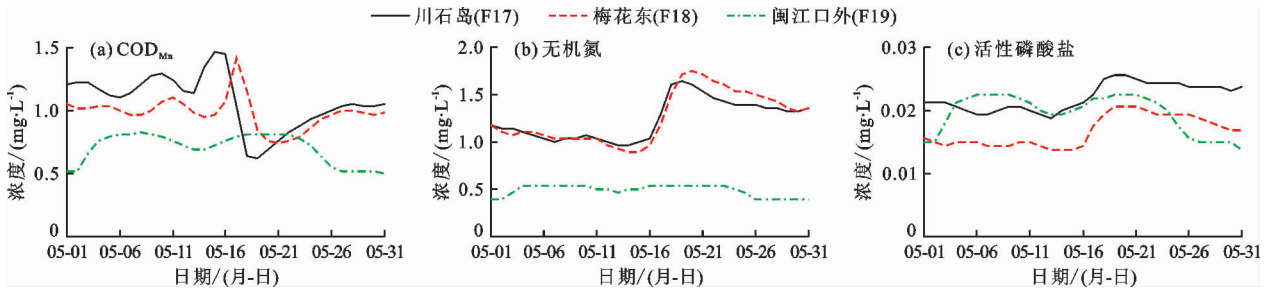


图6 2019年5月闽江口各点位COD_{Mn}、无机氮及活性磷酸盐浓度变化

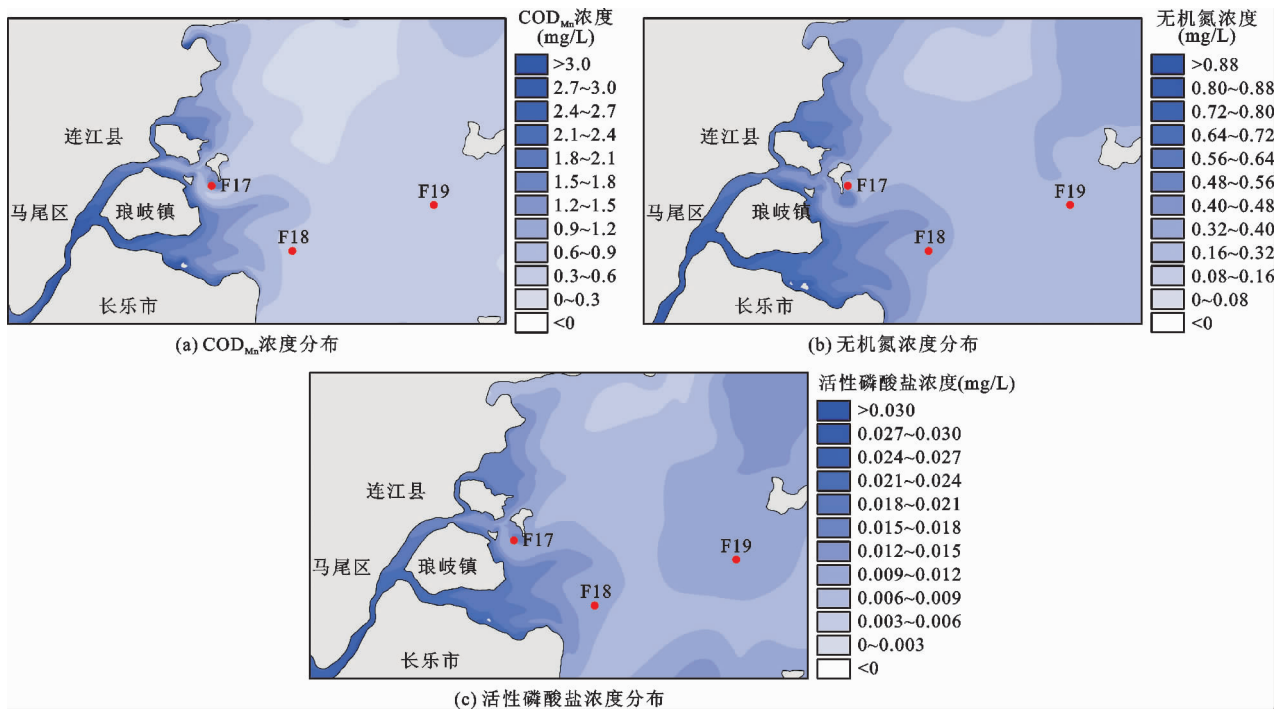


图7 2019年5月闽江口COD_{Mn}、无机氮及活性磷酸盐浓度场分布

3.3 下泄水质对闽江口水质的影响

为探究闽江口不同水质与水口水库下泄水质的响应关系,在2019年11月水文条件下,水口下泄水分别选用年内水质最差时段(枯水期)和水质最好时段(丰水期)浓度(表3中方案3和4),模型输入设置方案3枯水期水质COD_{Mn}浓度为2.80 mg/L,总氮浓度为1.72 mg/L,总磷浓度为0.106 mg/L;设置方案4 COD_{Mn}浓度为1.75 mg/L,总氮浓度为0.90 mg/L,总磷浓度为0.077 mg/L,对比分析两种方案对闽江河口水质变化的影响,两种方案河口各点位水质因子浓度变化及方案3闽江口各水质因子浓度

场分布分别见图8、9。由图8、9中的模拟结果可知,较好的上游水质对闽江口F17和F18点位的水质有提升作用,而F19点位水质提升不明显,是由于F17和F18点位邻近闽江长门水道和梅花水道两个主要出水口,水质受径流影响较大,而F19点位离岸较远,主要受外海水质的影响;无机氮、COD_{Mn}和活性磷酸盐对水质的改善比分别为22.34%、9.37%和4.02%,各水质因子中,无机氮提升最为明显。

3.4 下游污染物削减对闽江口水质的影响

为探究闽江口不同水质与下游污染物排放的响应关系,设置两种模拟方案(表3中方案5和6):设

置方案 5 为现状污染源条件,其范围包括上游水口水库以上河段、水口至闽安段和闽江口区域内;对于方案 6,根据福建省近岸海域环境功能规划和福州市地表水环境功能区划的要求,结合闽江下游城镇生活污水污染物的处理情况,假定在水口水库至闽安和

闽江河口区域计算的污染源等比例削减 30% 的条件下,计算 1 年的结果,然后对比分析两种方案对闽江口水质的影响,其中丰水期(5 月)、平水期(8 月)、枯水期(11 月)闽江口各点位的各水质因子预测结果见表 5。

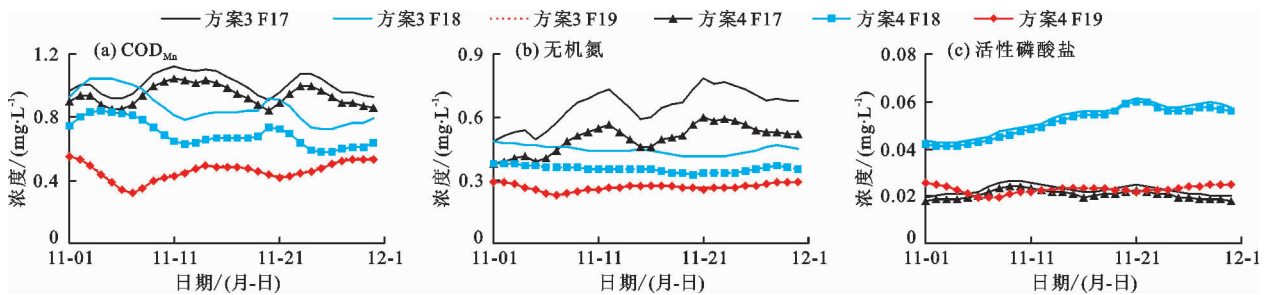


图 8 2019 年 11 月方案 3、4 条件下 COD_{Mn}、无机氮和活性磷酸盐浓度变化

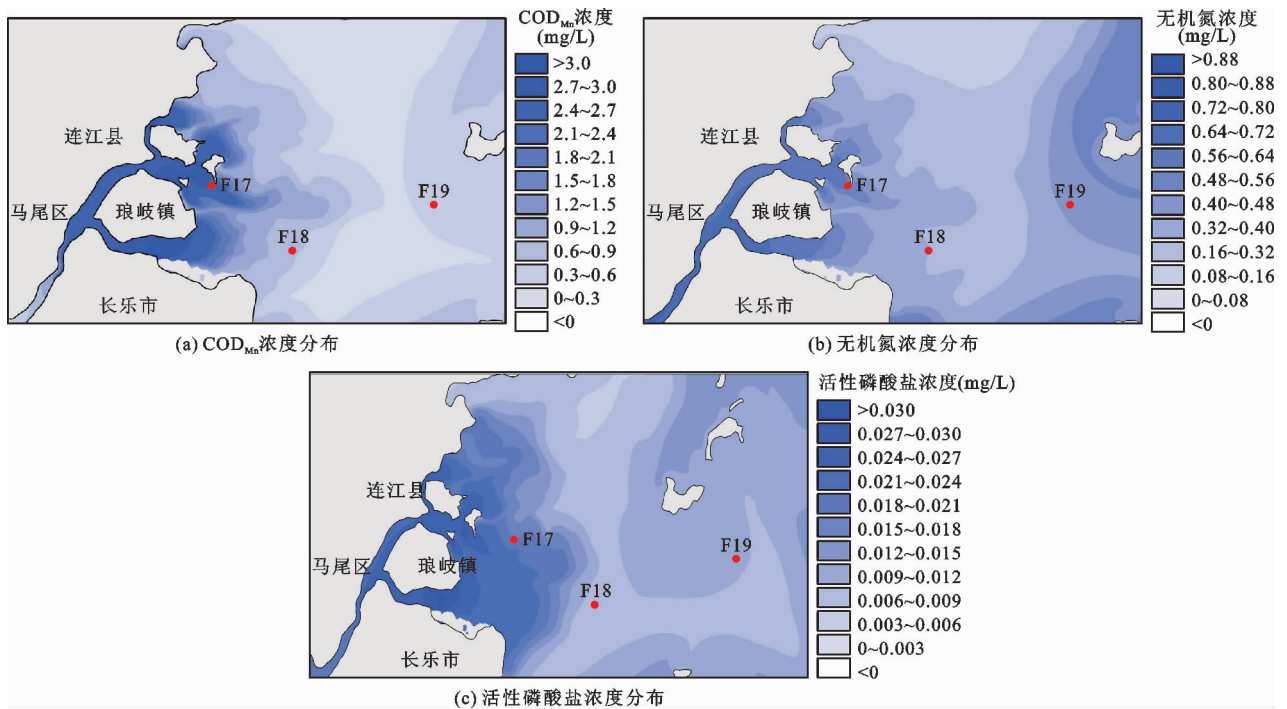


图 9 方案 4 条件下闽江口 COD_{Mn}、无机氮及活性磷酸盐浓度场分布

表 5 闽江口在方案 5、6 条件下年内不同时期各水质因子预测结果

水质因子	点位	mg/L						水质目标
		丰水期(5 月)		平水期(8 月)		枯水期(11 月)		
		方案 5	方案 6	方案 5	方案 6	方案 5	方案 6	
COD _{Mn}	川石岛 (F17)	0.95	0.86	1.06	0.97	0.69	0.62	3
	梅花东 (F18)	0.79	0.74	1.06	1.00	0.49	0.46	2
	闽江口外 (F19)	0.79	0.79	0.61	0.61	0.52	0.52	3
无机氮	川石岛 (F17)	0.796	0.716	0.419	0.377	0.927	0.834	0.3
	梅花东 (F18)	0.685	0.651	0.231	0.220	0.522	0.497	0.2
	闽江口外 (F19)	0.484	0.483	0.139	0.138	0.469	0.469	0.3
活性磷酸盐	川石岛 (F17)	0.030	0.026	0.025	0.022	0.034	0.030	0.030
	梅花东 (F18)	0.017	0.015	0.018	0.017	0.031	0.029	0.015
	闽江口外 (F19)	0.012	0.012	0.013	0.013	0.023	0.023	0.030

分析表5可知,污染物等比例削减30%后,闽江口水质在丰水期、平水期和枯水期的改善比例分别为6.24%、5.25%和5.48%;各水质因子中活性磷酸盐提升最大,为6.76%,无机氮最小,为5.06%。污染物削减后,年内各点位COD_{Mn}月均浓度值均能满足水质目标,活性磷酸盐仅在平水期和枯水期的F18点位超标,而无机氮除平水期F19点位不超标外,其他点位在年内不同时期均超标。

4 讨论

(1)水口水库下泄水对河口区COD_{Mn}和无机氮影响最大,与王军等^[22]的研究结果一致。由此可见,改善入海河流水质对河口水质提升具有明显的促进作用^[9,27]。

(2)闽江口为强潮三角洲河口,大潮潮差比小潮潮差大1.2 m,不同潮期对河口水质的影响不同,大潮期海面涨落的幅度大,河口水质受外海海水上溯的影响,浓度较低、稀释程度高,因而整体水质相比落潮期好。

(3)水口水库至闽安和闽江口区域所占污染权重并不大^[22],设置的污染物削减30%条件并不能有效保障闽江口水质稳定达标。这是由于河流、湖泊的水质标准与海水水质标准不衔接所引起的^[22,28-29],建议统筹闽江全流域总氮和总磷控制管理^[26],根据河口区年内水质变化趋势,分季节分区域重点管控^[25],同时进一步针对闽江下游开展行业排污口管控以及小流域综合治理^[12],以改善河口区水质。

5 结论

(1)本文以闽江河口水质超标为背景,构建了闽江下游至河口区域的二维非稳态水动力水质模型,率定和验证的水位绝对误差均在0.25 m内,流量平均相对误差均在15%内,水温平均相对误差均小于3%,各水质因子参数平均相对误差均在20%内,所构建的模型能够较好地反演闽江下游至河口的水动力水质情况。

(2)闽江口水质对不同水文的响应存在显著的时空差异性。闽江口COD_{Mn}和无机氮水质受上游影响较大,而活性磷酸盐所受影响相对较小。闽江口水质在涨潮期优于落潮期,涨潮期大潮优于小潮。

(3)外源负荷对闽江口水质变化具有不可忽视的影响。即使在闽江水口水库下泄水质年内最好或下游污染物削减30%的条件下,年内各水质因子浓

度虽均有所降低,但无机氮和活性磷酸盐依然时有超标。因此,建议在全流域实施水环境综合整治,尤其是提出总氮和总磷的总量控制要求,以改善闽江口及其近岸海域水质。

参考文献:

- [1] 李共国,屠霄霞,王佩儿,等.杭州湾滩涂河口饶足类群落丰度和生物量与水质参数的通径分析[J].湿地科学,2017,15(6):766-773.
- [2] 李若华,周维,姚凯华,等.基于氧平衡的钱塘江河口水质模型研究及应用[J].中国农村水利水电,2017(9):86-89+92.
- [3] 陈洪森,魏伟伟,叶春,等.大型水生植物混合腐解对入湖河口水质的影响及适宜生物量研究[J].环境科学研究,2021,34(3):589-598.
- [4] 李若华,朱军政,尤爱菊,等.基于潮汐时变特征的水质时空双重达标控制标准[J].海洋环境科学,2016,35(2):295-300.
- [5] 王晓锋,袁兴中,陈槐,等.河流CO₂与CH₄排放研究进展[J].环境科学,2017,38(12):5352-5366.
- [6] 张伟,金秉福,岳伟,等.黄河口和长江口沉积绿帘石地球化学特征及物源意义[J].矿物岩石地球化学通报,2020,39(3):576-586.
- [7] 康婧,蒋云钟,甘治国,等.河口海岸生态环境研究现状及发展趋势[J].水利水电技术,2012,43(2):22-25.
- [8] 李俊龙,郑丙辉,张铃松,等.中国主要河口海湾富营养化特征及差异分析[J].中国环境科学,2016,36(2):506-516.
- [9] 刘静,刘录三,郑丙辉.入海河口区水环境管理问题与对策[J].环境科学研究,2017,30(5):645-653.
- [10] 陆双龙,张建兵,蔡芸霜,等.基于文献计量学的我国入海河口营养盐研究状况分析[J].海洋环境科学,2021,40(2):309-316.
- [11] 王春晓,卢毅敏.闽江流域水质时间序列变化趋势识别及特征分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):63-69.
- [12] 张鹏,逢勇,石成春,等.闽江下游水质变化趋势分析[J].水资源保护,2018,34(1):64-69.
- [13] 宫雪亮,孙蓉,芦昌兴,等.基于MIKE21的南四湖上级湖水量水质响应模拟研究[J].中国农村水利水电,2019(1):70-76+82.
- [14] 谢培,高峰,王书航,等.入湖河流对千岛湖水水质影响研究——以COD_(Mn)为例[J].环境工程技术学报,2019,9(6):692-700.
- [15] 高芮,唐晓先,蒋晨韵,等.巢湖水源地水质对入湖河流的响应研究[J].环境保护科学,2018,44(1):103-107.
- [16] 方艺辉.闽江河口水环境数值模拟与决策支持系统[D].福州:福建师范大学,2018.
- [17] 戴君,刘硕,韩金凤,等.污染负荷多情景变化下河流水质响应关系研究[J].中国环境科学,2018,38(2):

- 776 - 783.
- [18] 李添雨,李振华,黄炳彬,等. 基于 MIKE21 模型的沙河水库水量水质响应模拟研究[J]. 环境科学学报,2021, 41(1):293 - 300.
- [19] 乔飞,郑丙辉,雷坤,等. 长江下游及河口区水动力特征[J]. 环境科学研究,2017,30(3):389 - 397.
- [20] 潘红澈,逢勇,罗缙,等. 基于 EFDC 的咸潮上溯对闽江下游水源地的影响[J]. 水资源与水工程学报,2015, 26(6):71 - 76.
- [21] 龚松柏. 闽江下游及河口区碳和 COD 的输运与转化[D]. 厦门:厦门大学,2018.
- [22] 王军,朱天依,逢勇,等. 闽江口近岸海域无机氮污染源分析研究[J]. 四川环境,2020,39(6):15 - 23.
- [23] BELIBASSAKIS K A, KARATHANASI F E. Modelling nearshore hydrodynamics and circulation under the impact of high waves at the coast of Varkiza in Saronic - Athens Gulf [J]. *Oceanologia*, 2017, 59(3): 350 - 364.
- [24] JIA Peng, WANG Qinggai, LU Xuchuan, et al. Simulation of the effect of an oil refining project on the water environment using the MIKE 21 model [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, 103: 91 - 100.
- [25] 侯昱廷,高爱国,林建杰,等. 闽江下游及河口溶解无机氮的季节分布及组成[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版),2019,38(2):134 - 141.
- [26] 杨玉波. 闽江河口陆源入海排污口现状及氮磷排放调查[J]. 海洋开发与管理,2020,37(3):36 - 40.
- [27] 喻一,宋芳,赵志杰,等. 深圳河河口近10年典型污染物通量变化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020,56(3):460 - 470.
- [28] 李天深,蓝文陆. 钦州湾水质自动监测的周年变化特征[J]. 广西科学,2014,21(4):396 - 402.
- [29] 黎明民,庞碧剑,蓝文陆,等. 河口混合区划定及营养盐标准限值构建[J]. 中国环境监测,2020,36(3):74 - 82.

