

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.018

基于 EFDC 的闽江干流下游 DO 变化研究

张 鹏¹, 逢 勇^{1,2}, 石成春³, 罗 丹³, 谢蓉蓉⁴

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 福州市环境科学研究院, 福建 福州 350011; 4. 福建师范大学环境科学与工程学院, 福建 福州 350007)

摘要:建立了闽江下游河道水口坝下—金刚腿段二维 EFDC 水环境数学模型, 利用水文水质同步监测资料对模型进行率定, 模型计算了不同条件下闽江下游河道 DO 浓度变化规律。结果表明: 增加北港分流比, 削减闽侯城镇生活、畜禽养殖污染物的排放量和使福州市区排入北港的内河(光明港、白马河)水质达到Ⅴ类水标准内, 能够增加北港水体的 DO, 相反减小水口水库下泄流量则会导致 DO 降低。为确保闽江干流下游 DO 持续稳定达标, 应采取增加北港分流比、增加枯水期水口水库下泄流量、削减区域污染物排放量、减小枯水期闽江下游调水量等措施。

关键词:溶解氧; EFDC; 污染物削减; 径流量; 闽江干流

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)05-0091-06

Study of variation of dissolved oxygen in lower reaches of main stream of Minjiang River based on EFDC model

ZHANG Peng¹, PANG Yong^{1,2}, SHI Chengchun³, LUO Dan³, XIE Rongrong⁴

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Fuzhou Research Academy of Environmental Sciences, Fuzhou 350011, China;
4. College of Environmental Science and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A two-dimensional environmental fluid dynamics code (EFDC) model was established for the Shuikoubaxia-Jingangtui sections in the lower reaches of the Minjiang River. The parameters of the model were calibrated using synchronously monitored hydrological and water quality data. The model was used to predict the variation of the DO concentration in the lower reaches of the Minjiang River under different conditions. The results show that, to increase the split ratio of the North Channel, to decrease the domestic sewage and livestock wastewater from Minhou County, and to enable the water quality of the Guangming River and the Baima River to reach the grade V level could result in the increase of DO in the North Channel. In contrast, DO decreased when the discharge from the Shuikou Reservoir was reduced. In order to ensure that DO in the lower reaches of the main stream of the Minjiang River reaches the standard continuously, the following measures should be taken: increasing the split ratio of the North Channel and the discharge from the Shuikou Reservoir in the dry season, and decreasing the pollutant discharge and diverted water in the lower reaches of the Minjiang River in the dry season.

Key words: DO; EFDC; pollution reduction; runoff; main stream of Minjiang River

表征水体自净能力的 DO 不仅是衡量河流、水库等水体水质的指标之一, 也是衡量水体有机物分解和富营养化程度的重要指标, 对于维持健康的水生生态系统有着重要的意义^[1-2]。水体 DO 浓度降低

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07506-006); 福建省中青年教育科研项目(JA15141)
作者简介: 张鹏(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为水环境模拟与预测。E-mail: zhap2014@163.com

时,会对河流、海洋生态系统造成一定的危害,当 DO 质量浓度低于 4 mg/L 时,养殖鱼类会受到有害影响,当出现缺氧事件(DO 质量浓度小于 2 mg/L)^[3-4],且长时间持续时,水体生态系统中的浮游植物、浮游动物会受到致命的危害,沉降的有机物发生厌氧分解,导致水质恶化和水生态系统遭到破坏。引起河流水体缺氧的因素众多,例如,流域污染物排放量增加,蓝藻暴发,径流量减少,河道容积增大和强涨落潮以及由此引起的河道水体停留时间的增加^[5]。此外高温、过量硝化、底泥耗氧量等都会导致 DO 浓度降低。

近几十年来河口缺氧问题一直受到国内学者的关注,研究者^[1,6-9]通过分析长江口外缺氧区与跃层之间的关系,探讨了其在内陆架形成的生物化学机理和物理机制;张恒等^[10-11]通过实测资料分析了珠江低 DO 的分布与变化,发现含氮有机污染物大量排放,硝化反应耗氧增加是导致珠江缺氧的主要因素;李若华等^[12]通过钱塘江河口沿程实测水质资料分析,发现钱塘江河口富阳-闸口段存在低 DO 现象,并且富阳境内的污染源及支流浦阳江输入的污染负荷是造成该河段低氧的主要原因。由于河口地区低 DO 影响因素复杂,有限的资料不足以证明各类因子对 DO 的影响程度,随着水质模型的发展,越来越多河口低 DO 问题已经通过水质模型进行了研究^[13-16]。笔者以闽江干流下游为例,利用 EFDC 水环境数学模型,对径流量减少和污染物排放对 DO 的影响进行研究。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

闽江是福建省内最大的河流,闽江干流下游从水口电站至出海口,全长 118 km 左右,河道贯穿福

州市(图 1)。自淮安闽江干流分南、北两港,北港绕南台岛北面,穿过福州市区,经文山里、洪山桥、闽江大桥至马尾,河道相对窄深。南港绕南台岛南侧流经科贡、湾边接纳大樟溪、淘江经乌龙江大桥至马尾与北港汇合,河道宽浅。因此南港、北港分流在洪汛期南港多,枯水期北港多,但由于南港近年严重挖沙,枯水期北港分流已经越来越少^[17]。

目前闽江福州段的径流受上游水口电站运行的控制,水口水库在枯水期起不完全的季节性调节作用,为满足闽江下游生态需水,已确定水口水库最小下泄流量为 308 m³/s。随着闽江流域社会经济的快速发展,排入闽江的污染物逐年增大,并且受潮汐顶托影响,水口水库下泄流量较小时,河道内污染物来回荡,不能较快排出,导致闽江下游竹岐以下水体 DO 偏低,尤其以北港白马河、光明港等福州市区主要内河排污口附近最为严重,2011—2014 上半年的竹岐、西北区水厂取水口文山里自动水质监测资料显示 DO 质量浓度在高温枯水期会持续低于 5 mg/L,最低达到 2.50 mg/L,严重威胁北港多个水源地的供水安全。

闽江下游水体 DO 偏低可能存在以下原因:①福州市区内河(光明港、白马河)大量缺氧、厌氧的劣 V 类污水直接排入北港,北港横穿福州市区,使其接纳的污染负荷占闽江下游段 85% 的工业污染负荷及近 90% 的生活污染负荷^[18],污染物排放是导致北港 DO 浓度低最主要的原因之一;②北港上游来水受到闽侯城镇畜禽养殖的高可降解性污水污染,竹岐水质自动监测站高温枯水期 DO 持续不达标即可证明大量受污染物的水体流入北港,在一定程度上促使北港水质恶化;③北港分流比越来越小^[18],由于水口大坝的建立,上游来沙量急剧减小,下游河道冲刷严重,加之近年来南港航道不断疏浚,

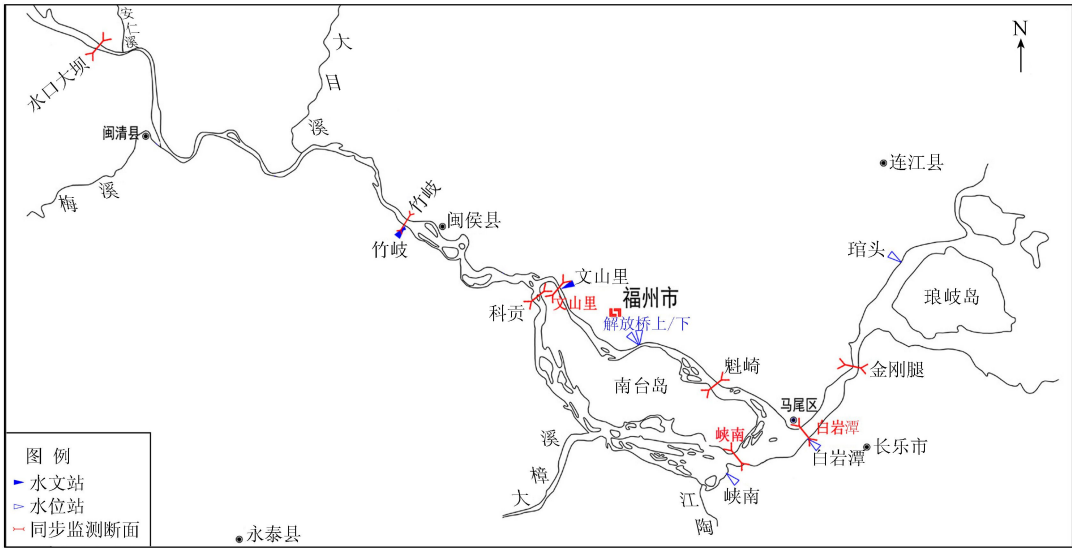


图 1 闽江下游河道及监测点位、水文站位置

北港分流比减小,导致北港水体交换时间增长,污染物受潮汐顶托作用,排不出去,水体耗氧量大于复氧量,水体缺氧越来越严重。未来随着福建省北水南调平潭及闽江口水资源配置(一闸三线)工程的进行,将对闽江干流调水 32 m³/s,闽江下游 DO 可能会进一步恶化。因此笔者通过建立闽江下游 EFDC 水环境数学模型,分析不同流量、分流比和污染物排放量条件下闽江下游河道 DO 变化规律,以期为保护闽江下游水源地水质健康提供措施。

1.2 EFDC 模型基本原理

EFDC 模型是模拟河流、湖泊、水库、河口、海洋和湿地等地表水系统的三维水质数学模型^[15,19],EFDC 模型垂向上采用 σ 坐标变换,能较好地拟合近岸复杂岸线和地形;采用修正的 Mellor-Yamada 2.5 阶湍流封闭模式较客观地提供垂向混合系数,避免人为选取造成的误差;动量方程内模主要是求解应力和速度的垂向分布;输移方程中的平流项模型采用 Smolarkiewicz 多维正定对流输移格式。以下为模型方程^[14]。

a. 动量方程。

$$\partial_t(mHu) + \partial_x(m_yHu) + \partial_y(m_xHv) + \partial_z(mwu) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hv = -m_yH\partial_x(g\xi + p) - m_y(\partial_x h - z\partial_x H)\partial_z p + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z u) + Q_u \quad (1)$$

$$\partial_t(mHv) + \partial_x(m_yHuv) + \partial_y(m_xHvv) + \partial_z(mwv) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hu = -m_xH\partial_y(g\xi + p) - m_x(\partial_y h - z\partial_y H)\partial_z p + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z v) + Q_v \quad (2)$$

$$\partial_t(m\xi) = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} \quad (3)$$

b. 连续方程。

$$\partial_t(m\xi) + \partial_x(m_yHu) + \partial_y(m_xHv) + \partial_z(mw) = 0 \quad (4)$$

$$\partial_t(m\xi) + \partial_x\left(m_yH\int_0^1 u dz\right) + \partial_y\left(m_xH\int_0^1 v dz\right) = 0 \quad (5)$$

c. 状态方程。

$$\rho = \rho(P, S_a, T) \quad (6)$$

d. 水质方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \partial_x(u\rho) + \partial_y(v\rho) + \partial_z(w\rho) = \partial_x\left(K_x \frac{\partial \rho}{\partial t}\right) + \partial_y\left(K_y \frac{\partial \rho}{\partial y}\right) + \partial_z\left(K_z \frac{\partial \rho}{\partial z}\right) \quad (7)$$

e. 温度和盐度输移方程。

$$\partial_t(mHT) + \partial_x(m_yHuT) + \partial_y(m_xHvT) + \partial_z(mwT) = \partial_z(mH^{-1}K_v\partial_z T) + Q_T \quad (8)$$

$$\partial_t(mHS_a) + \partial_x(m_yHuS_a) + \partial_y(m_xHvS_a) + \partial_z(mwS_a) = \partial_z(mH^{-1}K_v\partial_z S_a) + Q_s \quad (9)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为边界拟合正交曲线坐标 x 、 y 、 z

方向上的速度分量, m/s; m_x 、 m_y 分别为水平 x 、 y 坐标变换因子, m 为度量张量行列式的平方根, $m = m_x m_y$; A_v 为垂向紊动黏滞系数; K_v 为垂向紊动扩散系数; f 为科里奥利系数; ρ 为混合密度, kg/m³; ρ_0 为参考密度, kg/m³; H 为总水深, m; h 为未扰动的 z 坐标原点以下的水深, m; P 为压力, Pa; S_a 为盐度, PPT; T 为温度, °C; ξ 为自由的势能, J; Q_u 和 Q_v 分别为动量在 x 和 y 方向的源汇项; ρ 为质量浓度, mg/L; Q_T 为温度的源汇项。

f. EFDC 模型中 DO 平衡方程。

模型中水体 DO 的源、汇项包括藻类光合作用和呼吸作用、硝化作用、溶解性有机碳的异养呼吸作用、COD 的氧化作用、表层复氧、底部沉积物耗氧和外部载荷。动力学方程^[15-16]为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{DO}}{\partial t} = & \sum_{x=c,d,g} \left\{ [1.3 + 0.3(1 - P_{N_x})] P_x - \right. \\ & (1 - F_{CDx}) \left(\frac{\rho_{DO}}{K_{HRx} + \rho_{DO}} \right) B_{Mx} \left. \right\} A_{OCR} B_x - \\ & A_{ONT} N_{it} \rho_{NH_4} - A_{OCR} K_{HR} \rho_{DOC} - \\ & \left(\frac{\rho_{DO}}{K_{HCOd} + \rho_{DO}} \right) K_{COD} \rho_{COD} + K_R (\rho_{DOS} - \rho_{DO}) + \\ & \frac{S_{OD}}{\Delta Z} + \frac{W_{DO}}{V} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: x 为 c 、 d 、 g , 分别为蓝藻、硅藻及绿藻; P_{N_x} 为藻团体吸收氮的优先度 ($0 < P_{N_x} < 1$); P_x 为藻类每天产生率, d⁻¹; F_{CDx} 为在溶氧足够的情况下藻类 x 进行基础代谢(以释放可溶有机碳的形式)的比例; K_{HRx} 为藻类 x 排泄产生可溶性有机碳所需的 DO 半饱和系数, g/m³; B_{Mx} 为藻类基础代谢率, d⁻¹; B_x 为藻类生物量, g/m³; A_{OCR} 为呼吸作用过程中溶解性氧转化成碳的比率, 2.67 g/g; A_{ONT} 为单位质量的氨氮消耗的 DO 质量, 4.33 g/g; N_{it} 为硝化速率, d⁻¹; K_{HR} 为可溶性有机碳的异氧呼吸速率, d⁻¹; K_{HCOd} 为 COD 被氧化时 DO 半饱和系数, g/m³; K_{COD} 为 COD 的氧化率, d⁻¹; K_R 为大气复氧系数, d⁻¹; ρ_{DOS} 为饱和溶解氧质量浓度, g/m³; S_{OD} 为沉积物需氧量, g/(m² · d); W_{DO} 为外界溶解氧负荷, g/d。

1.3 地形概化

本研究根据 2011 年实测闽江河道地形,建立水口坝下至金刚腿的 EFDC 水环境模型,模型全长 99 km。EFDC 模型采用二阶精度的空间有限差分格式求解控制方程,变量布置采用交错网格。网格边长 200 m,宽 100 m,共划分 5 241 个网格,模型计算时间步长 $t=10$ s。

1.4 参数率定

二维水环境模型参数采用 2013 年 12 月 7 日

10:00至8日10:00逐时实测潮位、流量、水质进行率定点位分布如图1所示。模型主要开边界有上游流量、支流大樟溪流量、风场、潮位和水质。上边界的下泄流量、水质和水温为水口水库断面实测值;下边界的潮位、水质及水温为金刚腿断面实测值;支流边界的流量、水质和水温为大樟流永泰站实测值;风场资料采用福州市实测日均风速、风向作为输入条件。

由表1可见,潮位率定5个断面,最大平均误差为14 cm;流量率定3个断面,最大平均相对误差为21%;盐度率定2个断面,最大平均相对误差19%。率定得到主要参数如下:河道主槽部分糙率的取值范围定为0.010~0.015;水平涡粘系数采用Smagorinsky公式,率定得到Smagorinsky系数为0.12;风拖曳系数在0.0010~0.0015之间。

由表1还可见:DO率定5个断面,最大平均相对误差为8%;COD率定5个断面,最大平均相对误差25%;NH₄⁺率定5个断面,最大平均相对误差23%。模型主要率定参数见表2。

表1 各监测断面参数率定结果

断面	潮位平均 误差/cm	平均相对误差/%				
		流量	盐度	DO	COD	NH ₄ ⁺
竹 岐	12			4	14	17
文山里	11	21		7	17	17
魁 岐			19	8	15	14
科 贡	14	21		6	25	13
峡 南	14		16	6	14	23
白岩潭	11					
金刚腿		14				

表2 模型主要率定参数

参数	取值	参数	取值
反硝化半饱和常数 (g/m ³)	0.10	耗氧可溶性有机碳呼吸 的反硝化速率比	0.50
最大硝化速率 (g/m ³)	0.07	硝化氧半饱和常数 (g/m ³)	1.00
硝化氮半饱和和常 数(g/m ³)	1.00	有氧呼吸的半饱和常数 (g/m ³)	1.00
有机氮的最低水解 率(d ⁻¹)	0.005	每单位质量的氮氮消耗 的DO的质量(g/g)	4.33
呼吸作用过程中溶 解性氧转化成碳的 比率(g/g)	2.67	复氧的温度速率常数	1.024
COD降解的氧半饱 和常数	1.50	COD的降解速率(d ⁻¹)	0.10
COD降解的温度速 率常数	0.041		

2 结果与讨论

径流量减少和污染物排放是导致闽江下游水体DO恶化的主要原因。根据已建立闽江下游水动力水质模型,本次研究设立6种方案,所有方案水温均设

置为夏季时平均水温28~29℃,模型方案具体设置条件见表3。由于下游潮位、盐度和水质受上游下泄流量的影响,下游计算潮位条件利用Pawlowicz等^[20]提出的T_tide1.3程序对白岩潭和琯头2012年和2013年的逐时潮位资料进行调和分析,得到白岩潭和琯头的调和常数;根据地理插值法中两点法内插出金刚腿的调和常数,并利用T_predic.m对金刚腿的潮位进行计算。下游盐度、水质边界为非强迫条件,根据多次监测资料的类比得到。风场资料取相应时间的福州市内实测日均风速、风向。

表3 模型各方案具体设置条件

方案	平均下泄流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	北港分流比	污染物情况
1	481(现状流量)	保持现状(20%)	保持现状,不削减
2	481(现状流量)	增至50%左右	保持现状,不削减
3	481(现状流量)	保持现状(20%)	闽侯污染物削减50%
4	481(现状流量)	保持现状(20%)	白马河、光明港水质达标
5	481(现状流量)	增至50%左右	闽侯污染物削减50%,白马河、光明港水质达标
6	308(最小生态流量)	保持现状(20%)	保持现状,不削减

2.1 现状流量下各计算方案的DO变化分析

对比方案1和方案2(图3)可知水口电站下泄径流量相同条件下,北港分流比由原来的96 m³/s(现状20%)增加为233 m³/s(增至50%)时,北港的魁岐断面水体DO增加了0.72 mg/L(表4);对比方案1和方案3(图3)可知对南北港上游闽侯的甘蔗街道、竹岐乡、荆溪镇、上街镇等区域的城镇生活、畜禽养殖等污染物削减50%(COD削减量为3600 t,NH₃-N削减量为350 t),魁岐断面水体DO增加了0.27 mg/L(表4);对比方案1和方案4(图3)可知使福州市区排入北港的内河(光明港、白马河)水质达到Ⅴ类水标准(削减COD为15000 t,NH₃-N为3000 t),魁岐断面水体DO增加了1.42 mg/L(表4);方案1和方案5(图3)的对比可知,既增大北港分流比又削减闽侯污染物和福州市区排入北港的内河(光明港、白马河)污染物,魁岐断面水体DO增加最大,为1.74 mg/L(表4),增大后DO值可达地表水Ⅱ类标准(6 mg/L)。由此可见对福州市区污染物进行削减,对水体DO增大效果非常明显,主要是因为闽江下游80%的污染物排入北港,而通过光明港、白马河这两个内河排入北港的污染物约占85%以上,因此光明港和白马河水质达标对北港水体DO改善作用非常大。

竹岐断面DO变化较小,只有在方案3和方案5(图2)下削减闽侯污染物时DO有所增加,增加了0.20 mg/L左右(表4)。

表 4 5 种方案模型计算的断面 DO 质量浓度

方案	mg/L			
	ρ_{DO}		ρ_{DO} 相比方案 1 的增量	
	竹岐断面	魁岐断面	竹岐断面	魁岐断面
1	5.43	4.99	-	-
2	5.43	5.71	0.00	0.72
3	5.63	5.26	0.20	0.27
4	5.43	6.41	0.00	1.42
5	5.65	6.73	0.22	1.74

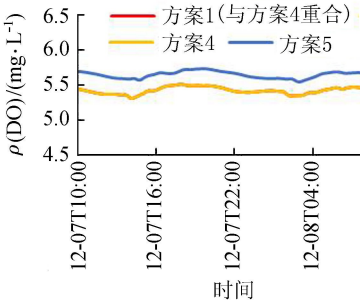
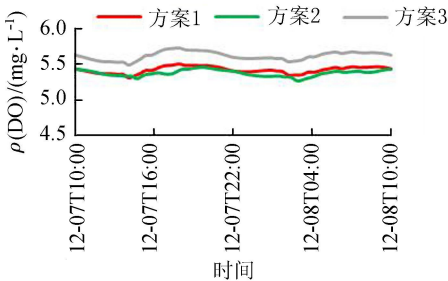


图 2 5 种方案计算的竹岐断面 DO 变化比较

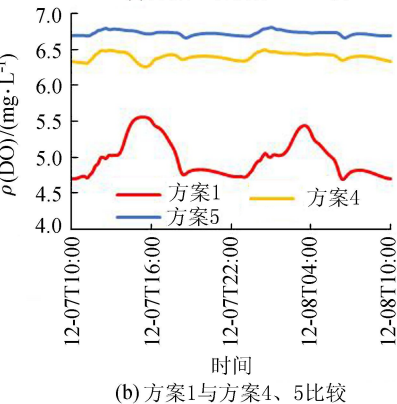
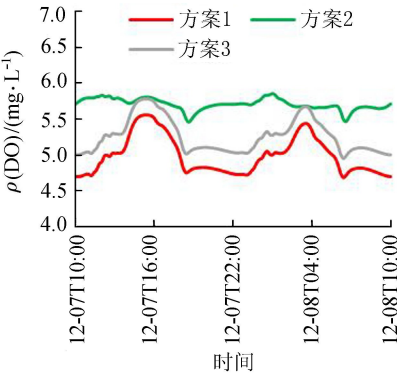


图 3 5 种方案计算的魁岐断面 DO 变化比较

2.2 现状流量与最小生态流量计算方案的 DO 变化分析

方案 6:水口电站下泄流量为 $308\text{ m}^3/\text{s}$,其他条件不变时,相比方案 1,北港平均分流量由原来的 $96\text{ m}^3/\text{s}$ 减小为现在的 $60\text{ m}^3/\text{s}$,北港魁岐断面水体 DO 降低了 0.18 mg/L (图 4),同时由图 4 可以看出,涨潮时魁岐断面 DO 与原方案相比变化不大,主要是涨潮时下游高 DO 盐水的稀释,落潮时该断面水体 DO 相比原方案下降很明显;竹岐断面 DO 变化较小,减小水口电站下泄流量时 DO 稍有降低,降低了 0.12 mg/L 。未来福建省北水南调平潭及闽江口水资源配置(一闸三线)工程从闽江干流调水 $32\text{ m}^3/\text{s}$ 时,闽江下游 DO 肯定会进一步恶化,因此有必要减小枯水期闽江调水量。

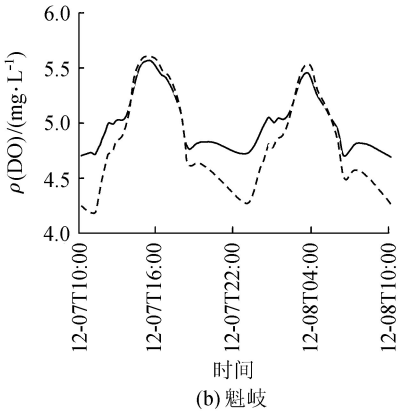
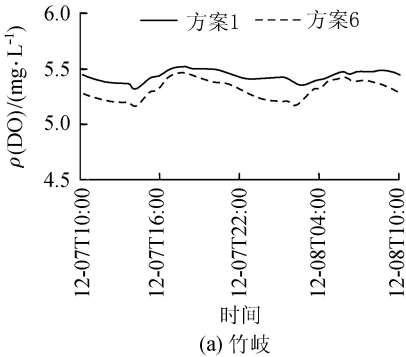


图 4 方案 1 和方案 6 计算的竹岐、魁岐断面 DO 变化

以上计算结果可知方案 3、方案 4 和方案 5 在水口水库下泄流量为 $481\text{ m}^3/\text{s}$ 时,均能够保证污染最严重的魁岐断面 DO 到达地表水Ⅲ类水标准。因此为保证北港 DO 达标,综合考量各种因素,建议采取以下措施:削减闽侯城镇、畜禽养殖的高可降解性污水排放和加大力度治理福州市区污水排放,改善内河水质;进一步发挥水口水库调蓄能力,做好丰水期蓄水,枯水期泄水;停止南港挖砂工作,不能一味地为满足通航能力不断进行南港疏浚拓宽,考虑在南北港分流口建立分流坝增大北港分流比;减小枯水期闽江下游调水量,建议福建省北水南调平潭及闽江口水资源配置(一闸三线)工程设置水库做好

蓄水工作,保证枯水期福清、平潭地区居民用水。

3 结 论

a. 现状流量($481\text{ m}^3/\text{s}$)下,通过增加北港分流比、削减闽侯城镇生活、畜禽养殖污染物的排放量和使福州市区排入北港的内河(光明港、白马河)水质达到Ⅴ类水标准,能够增加北港水体的DO。

b. 最小生态流量($308\text{ m}^3/\text{s}$)与现状流量($481\text{ m}^3/\text{s}$)相比,减小水口水库下泄流量会导致北港水体DO降低。同时北港魁岐断面涨潮时由于下游高DO水的稀释,DO与现状流量方案相比变化不大,落潮时上游污染物的排放导致该断面DO下降明显。

c. 为确保闽江干流下游DO持续稳定达标,需要弱化闽江下游南港航道功能,增加北港分流比;改变水口水库性质定位,不仅考虑发电,也要兼顾下游的生态调度;对闽侯畜禽养殖和福州市区城镇生活污染物排放量进行削减;减小枯水期闽江下游调水量。各项措施相互结合,确保闽江下游水体DO持续稳定达标。

参考文献:

[1] 韦钦胜,王保栋,陈建芳,等. 长江口外缺氧区生消过程和机制的再认知[J]. 中国科学(地球科学),2015,45(2):187-206. (WEI Qincheng, WANG Baodong, CHEN Jianfang, et al. Recognition on the forming-vanishing process and underlying mechanisms of the hypoxia off the Yangtze River estuary [J]. Scientia Sinica (Terroe), 2014,45(2): 187-206. (in Chinese))

[2] 罗丹. 闽江下游水体溶解氧变化及其成因初探[J]. 海峡科学,2015(6):64-68. (LUO Dan. A primary study of changes on dissolved oxygen and its causes in Minjiang River downstream[J]. Straits Science,2015(6): 64-68. (in Chinese))

[3] DAI Minhan, GUO Xianghui, ZHAI Weidong, et al. Oxygen depletion in the upper reach of the Pearl River estuary during a winter drought[J]. Marine Chemistry, 2006,102: 159-169.

[4] CHEN Chungchi, GONG Gwoching, SHIAH Fuhkwo. Hypoxia in the East China Sea: one of the largest coastal low-oxygen areas in the world[J]. Marine Environmental Research,2007,64: 399-408.

[5] ZHANG Peng, PANG Yong, PAN Hongche, et al. Factors contributing to hypoxia in the Minjiang River Estuary, Southeast China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12: 9357-9374.

[6] 李道季,张经,黄大吉,等. 长江口外氧的亏损[J]. 中国科学(D辑),2002,32: 686-694. (LI Daojin, ZHANG

Jing, HUANG Daji, et al. Loss of oxygen in Yangtze Estuary[J]. Science in China (Series D),2002,32: 686-694. (in Chinese))

[7] 张莹莹,张经,吴莹,等. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究[J]. 环境科学,2007,28: 1649-1654. (ZHANG Yingying, ZHANG Jing, WU Ying, et al. Characteristics of dissolved oxygen and its affecting factors in the Yangtze Estuary[J]. Environmental Science,2007, 28: 1649-1654. (in Chinese))

[8] 林军,闫庆,朱建荣,等. 长江口外海域夏末温跃层与底层水低氧现象研究[J]. 水产学报,2014(10): 1747-1757. (LIN Jun, YAN Qing, ZHU Jianrong, et al. Analysis of thermocline and hypoxia off the Changjiang Estuary in late summer[J]. Journal of Fisheries of China, 2014,38(10):1747-1757. (in Chinese))

[9] ZHU Zhuoyi, ZHANG Jing, WU Ying, et al. Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) estuary: oxygen depletion and organic matter decomposition[J]. Marine Chemistry,2011,125: 108-116.

[10] 张恒. 珠江河口夏季溶解氧收支模拟研究[D]. 广州: 中山大学,2009.

[11] YIN Kedong, LIN Zhifeng, KE Zhiyuan. Temporal and spatial distribution of dissolved oxygen in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters[J]. Continental Shelf Research,2004,24: 1935-1948.

[12] 李若华,曲璐,高亮,等. 钱塘江河口低溶解氧现象及形成机理初探[J]. 人民长江,2013(21): 100-103. (LI Ruohua, QU Lu, GAO Liang, et al. A primary study of phenomenon of low dissolved oxygen and formation mechanism in Qiantang River Estuary[J]. Yangtze River, 2013(21): 100-103. (in Chinese))

[13] 刘夏明,李俊清,豆小敏,等. EFDC模型在河口水环境模拟中的应用及进展[J]. 环境科学与技术,2011(增刊1): 136-140, 360. (LIU Mingxia, LI Junqing, DOU Xiaomin, et al. The application and advance of environmental fluid dynamics code (EFDC) in estuarine water environment [J]. Environmental Science & Technology,2011(sup1): 136-140,360. (in Chinese))

[14] XIA Meng, CRAIG P M, SCHAEFFER B, et al. Influence of physical forcing on bottom-water dissolved oxygen within caloosahatchee River Estuary, Florida[J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, 136(10): 1032-1044.

[15] XIA Meng, CRAIG P M, WALLEN C M, et al. Numerical simulation of salinity and dissolved oxygen at perdido Bay and Adjacent Coastal Ocean [J]. Journal of Coastal Research,2011,27(1): 73-86.

[16] 张恒,李适宇. 生化过程对夏季珠江口底层缺氧影响的模拟研究[C]//中国环境科学学会. 2009年学术年会论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社,2009: 376-382.

(下转第102页)

c. 通过实验室的试验与计算可以确定,在太湖风速小于 4 m/s 时播撒絮凝剂,产生的风浪作用使絮体发生再悬浮的几率较小。

参考文献:

[1] 陆桂华,马倩. 太湖水域“湖泛”及其成因研究[J]. 水科学进展, 2009, 20 (3): 438-442. (LU Guihua, MA Qian. Analysis on the causes of forming black water cluster in Taihu Lake[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 438-442. (in Chinese))

[2] ANDERSON D M. Turning back the harmful red tide[J]. Nature, 1997, 388: 513-514.

[3] 潘纲,代立春,李梁,等. 改性当地土壤技术修复富营养化水体综合效果研究: I. 水质改善的应急与长期效果与机制[J]. 湖泊科学, 2012, 24 (6): 801-810. (PAN Gang, DAI Lichun, LI Liang, et al. Eutrophication control using modified local soil/sand induced ecological restoration technology: I. Effect and mechanism on short and long term improvement of water quality[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 801-810. (in Chinese))

[4] 丁艳青,朱广伟,秦伯强,等. 波浪扰动对太湖底泥磷释放影响模拟[J]. 水科学进展, 2011, 22 (2): 273-278. (DING Yanqing, ZHU Guangwei, QIN Boqiang, et al. Experimental study on the effect of wave disturbances on the phosphorus dynamics in shallow lakes[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 273-278. (in Chinese))

[5] 代立春,潘纲,李梁,等. 改性当地土壤技术修复富营养化水体的综合效果研究: III. 模拟湖泛水体的应急治理效果[J]. 湖泊科学, 2013, 25 (3): 342-346. (DAI Lichun, PAN Gang, LI Liang, et al. Eutrophication control using modified local-soil-induced ecological restoration technology: III. The emergency mitigation effect on the black spots[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(3): 342-346. (in Chinese))

[6] 申秋实. 藻源性湖泛致黑物质的物化特征及其稳定性研究[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2011.

[7] JACKSON G A, LOCHMANN S E. Modeling coagulation of algae in marine ecosystems [J]. Environmental Particles, 1993, 2: 387-414.

[8] HILL P S. Controls on floc size in the sea [J]. Oceanography Society, 1998, 11: 13-18.

[9] 刘秉涛. 壳聚糖复合剂在水处理中的净化效能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[10] 王成林,陈黎明,潘维玉,等. 适宜太湖蓝藻水华形成的风场辐散特征及其形成机制[J]. 中国环境科学, 2010 (9): 1168-1176. (WANG Chenglin, CHEN Liming, PAN Weiyu, et al. Divergence characteristics and formation mechanism of wind field appropriate for the

cyanobacteria bloom in Taihu Lake [J]. China Environmental Science, 2010 (9): 1168-1176. (in Chinese))

[11] WANG J, PANG Y, LI Y, et al. The regularity of wind-induced sediment resuspension in Meiliang Bay of Lake Taihu[J]. Water Science & Technology, 2014, 70 (1): 167-174.

[12] 秦伯强,胡维平,高光,等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报, 2003, 48 (17): 1822-1831. (QIN Boqiang, HU Weiping, GAO Guang, et al. The conceptual model of the dynamic mechanism and suspended sediment in Taihu Lake[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (17): 1822-1831. (in Chinese))

[13] HUANG Y, XU L, HAN R, et al. Using chitosan-modified clays to control black-bloom-induced black suspended matter in Taihu Lake: deposition and resuspension of black matter/clay flocs [J]. Harmful Algae, 2015, 45: 33-39.

[14] LICK W. The flocculation, deposition, and resuspension of fine-grained sediments [M]. Boca Raton, Fla. : Lewis Publishers, 1994: 35-57.

[15] QIAN J, ZHENG S. Experimental study on sediment resuspension in Taihu Lake under different hydrodynamic disturbances [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23 (6): 826-833.

(收稿日期: 2015 - 11 - 20 编辑: 彭桃英)

(上接第 96 页)

[17] 罗进洲. 基于 SMS 及 RS 的闽江福州段水污染控制研究 [D]. 福州: 福州大学, 2004.

[18] 张鹏,石成春,逢勇,等. 闽江下游径流量和北港分流比变化及其对水龄的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26 (5): 40-45. (ZHANG Peng, SHI Chengchun, PANG Yong, et al. The evolution of split ratio of North Channel and its impact on water age in Minjiang River downstream [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(5): 40-45. (in Chinese))

[19] LI Yiping, TANG Chunyan, WANG Chao, et al. Improved Yangtze River diversions: are they helping to solve algal bloom problems in Lake Taihu, China? [J]. Ecological Engineering, 2013, 51: 104-116.

[20] RICH P, BOB B, STEVE L. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE [J]. Computers & Geosciences, 2002, 28 (8): 929-937.

(收稿日期: 2015 - 11 - 23 编辑: 徐 娟)