

高盐度底泥水库工程布置及运行对供水安全的影响

高学平¹, 吴登将¹, 孙博闻¹, 张晨¹, 韩丽君²

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;
2. 天津市水利勘测设计院, 天津 300072)

摘要:为保障高盐度底泥水库供水氯离子质量浓度达标(小于250 mg/L),在水库闸门工程布置及水库正常运行期间对高盐度底泥这一氯离子释放源对水库水质的影响进行研究。以天津市北塘水库为例,针对水库闸门布置方案比选及水库在运行期间的水质咸化问题,考虑高盐度底泥氯离子释放,建立三维水动力水质模型进行数值模拟。结果表明:引水、供水闸门的空间布置直接影响供水水质,引水闸位于西南角同时开启3个供水闸的方案为较优方案,该方案下基本无死水区域,供水水质在供水8 d后达标;在水库静置期,底泥氯离子释放速率与底泥含盐量呈正相关,在最不利情况下,水库氯离子在底泥释放55 d后浓度超标。

关键词:高盐度底泥水库;工程布置;供水安全;氯离子质量浓度;水库水污染;北塘水库

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)05-0050-05

Effects of layout and operation of reservoir with high-salinity sediment on water supply safety//GAO Xueping¹, WU Dengjiang¹, SUN Bowen¹, ZHANG Chen¹, HAN Lijun²(1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China*; 2. *Tianjin Water Conservancy Survey and Design Institute, Tianjin 300072, China*)

Abstract: In order to ensure that the chloride ions concentration of the water from a reservoir with high-salinity sediment reaches the standard (less than 250 mg/L), the effects of high-salinity sediment, the main source of chloride ions, on the water quality of the reservoir were studied during the periods of layout design of reservoir gates and operation of the reservoir, using the Beitang Reservoir in Tianjin City as an example. To determine the optimal layout of gates from alternative schemes and to simulate the water salinization in the operation period of the reservoir, a three-dimensional hydrodynamic and water quality model was established, with the release of chloride ions from the high-salinity sediment considered. The results show that the water quality is directly influenced by the spatial layout of the inflow and outflow gates. It is put forward that the scheme with the inflow gate located in the southwestern corner and with the three outflow gates open at the same time is the optimal scheme, in which there is nearly no static region and the water quality will reach the standard after eight days. In the static period of the reservoir, the release rate of chloride ions from the sediment is positively correlated with the salt content in the sediment, and the concentration of chloride ions in the reservoir will exceed the standard at the 55th day after the release under the most unfavorable conditions.

Key words: reservoir with high-salinity sediment; project layout; water supply safety; mass concentration of chloride ions; water pollution in reservoir; Beitang Reservoir

近年来,水污染已成为我国普遍存在的环境问题,水污染尤其是城市供水水库的污染将会直接威胁居民的日常生活用水安全,影响居民的生活质量。随着水污染研究的深入,沉积底泥作为污染物释放源越来越受到人们的重视。污染物通过废水排放、大气沉降、雨水淋溶与冲刷进入水体,最后沉积到底泥中并逐渐富集,使底泥受到严重污染^[1]。沉积底泥内可溶解的污染物与上覆水存在相互传递的物理作用,若底泥污染物浓度高于上覆水污染物浓度,则污染物由底泥向上覆水体释放,因此对于已污染的底泥环境,应该将底泥作为一个污染释放源予以考虑。地处滨海城市的水库,由于受到地域及人类活动的影响,导致含盐量较高的海水长期倒灌侵蚀,使得水库底泥严重盐碱化,例如位于天津市滨海新区的北塘水库,其局部底泥氯离子质量分数高达 $1\,400\times 10^{-6}$ ^[2]。而海水入侵具有较强的后效作用,高盐度

底泥一旦形成,很难在短期内恢复。当前,作为城市或地区居民生活饮用水的供水水库,其出库闸供水的水体氯离子质量浓度应保持在 250 mg/L 以内(参照 GB3838—2002《中华人民共和国地表水环境质量标准》),因此高盐度底泥作为氯离子释放源对水库水质安全的威胁将长期存在。

底泥污染物空间上一般呈现不均匀分布^[3-4],高盐度底泥水库受到库底地形、底泥地质及水生生物活动等因素的影响,导致水库底泥含盐量在空间上分布不均匀,将高盐度底泥作为氯离子释放源,水库中局部底泥含盐量高则氯离子释放速率快^[5-6]。在水库水体流通性很小的情况下,氯离子容易在水库高含盐量底泥区域堆积,在未修建水库闸门前,水库入库闸、出库闸空间布置的设计应该考虑底泥含盐量的空间分布,否则可能导致水库局部高盐度底泥区域水质变差;在水库开始运行后,可能面临不可预知的突发情况,如来水水源中断、水库安全定期检修等,这些突发情况会导致水库引水、供水中断从而使库区水体呈静置状态,库区水体的氯离子质量浓度在静置状态下会逐渐上升^[7-8],可能导致水库水体的氯离子质量浓度不达标。

笔者以天津市北塘水库为例,基于环境流体力学模型(EFDC)建立了底泥氯离子扩散模型,模型中氯离子作为保守物质在底泥和上覆水之间进行物质交换,利用该模型模拟水库不同工程布置下的引水、供水过程及水库在静置期的水质咸化过程,研究高盐度底泥对水库工程布置及运行的影响,给出了最优工程布置方案和水库静置期氯离子超标时间,为水库在建筑物的布置及日后运行管理提供科学依据。

1 北塘水库概况

北塘水库位于天津市滨海新区塘沽区北塘镇西北约 2 km,为一中型平原水库,呈不规则多边形,占地面积 7.4 km²,为南水北调调引水库,目前有 4 个引水、供水闸门,分别为④号、⑤号、⑥号和⑦号闸门。为满足水库的调蓄及事故备用要求,拟新建若干入库闸、出库闸,①号、②号和③号闸门是备选新建闸门(未建成)。图 1 为北塘水库工程布置示意图。

天津市水利科学研究所与南开大学在 2004 年北塘水库处于干涸期时对水库底泥进行检测,结果表明库区西侧属于重度盐渍化水平,库区南侧、北侧和东侧属轻度盐渍化水平,库中心底泥属非盐渍化水平。河海大学在 2005 年水库引潮白河水入库后再次对水库底泥进行检测,检测结果与天津市水利科学研究所在水库干涸时检测的结果相近^[2]。图 2 为河海大学对北塘水库底泥氯离子质量分数分布检测结果。

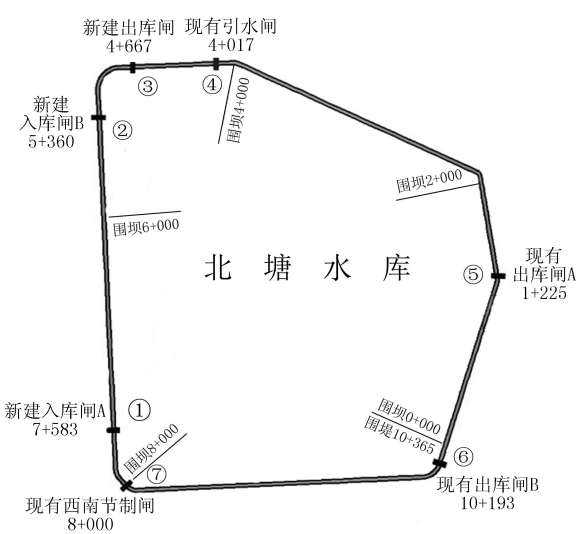


图 1 北塘水库工程布置(单位:m)

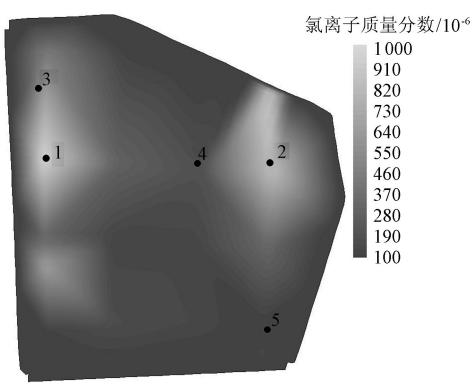


图 2 水库底泥氯离子质量分数分布

2 基于 EFDC 的底泥氯离子扩散模型

为了模拟水库引水、供水过程及静置期水库水质咸化过程,结合水库的特征和国内外水质模拟的水平,选择了在国内外应用广泛的 EFDC。EFDC 是美国环保局(USEPA)推荐的三维水动力模型,集水动力模块、水质预测模块、泥沙输运模块和污染物运移模块为一体,在水动力模拟^[9]、底泥氯离子释放模拟^[10]、水库分层水温模拟^[11]、河道海湾模拟^[12]等方面都有成功的应用。

2.1 底泥污染物释放方式分析

在底泥-水界面污染物迁移扩散领域,已有相关研究成果^[13-15]。底泥污染物释放不仅与底泥污染物浓度有关,还与上覆水体的流场有关。较大的流速能够引起底泥的悬浮,并加速溶解于孔隙水和吸附于悬浮泥沙上的污染物向上覆水体释放。式(1)为泥沙起动速度计算公式^[16],该式适用于无黏性均匀泥沙。

$$U_c = 1.14 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D \left(\frac{h}{D} \right)^{\frac{1}{6}}} \quad (1)$$

式中: U_c 为泥沙起动速度,m/s; h 为水深,m; D 为土颗粒粒径,m; ρ_s 为土颗粒的密度,kg/m³; ρ 为水的

密度,kg/m³;g为重力加速度,m/s²。
北塘水库土颗粒平均粒径为0.05×10⁻³ m,土颗粒的密度为2 650 kg/m³,根据公式(1)计算得出北塘水库在不同水位下底泥起动速度,见表1。

表1 北塘水库底泥起动速度

水位/m	水深/m	$U_c/(cm \cdot s^{-1})$
2.8	0.8	16.4
4.1	2.1	19.3
7.0	5.0	22.3

北塘水库死水位、供水低水位、设计高水位分别为2.8 m、5.6 m、7.0 m,根据水库设计的闸门引水、供水流量,库区内水体最大流速不超过10 cm/s,结合表1可知,水库运行过程中,不会引起底泥的扬动,底泥污染物释放主要以底泥孔隙水污染物向上覆水体扩散为主。

2.2 底泥污染物释放控制方程

底泥-上覆水界面上由于浓度差而发生分子扩散,根据费克第二定律可以得到底泥和上覆水体中溶质随时间的变化。式(2)为底泥污染物扩散控制方程^[17]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}$$
 (2)

式中:c为溶质的质量浓度,mg/L;D_m为底泥孔隙水污染物向上覆水体扩散系数,m²/s;t为扩散时间,s;y为污染源的距,米。利用量纲分析法求解式(2),式(3)为其基本解。

$$c = \frac{M}{\sqrt{4\pi D_m t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4D_m t}\right)$$
 (3)

式中M为底泥污染物总质量,mg。

2.3 模型建立与模型参数的确定

基于EFDC的水动力水质三维模型,采用正交曲线网格,以水动力模块为基础,对底泥污染物释放模型进行耦合,假定底泥为无黏性均匀泥沙,仅考虑底泥污染物的分子扩散而不考虑底泥起动悬浮。模型水动力参数:水库死水位为2.8 m,水库底部为平底,库底高程为2.0 m,死水位水深为0.8 m;底泥氯离子质量分数分布沿用河海大学检测的数据(图2);南水北调通水后,北塘水库水源将由丹江口水库引水,其水体氯离子质量浓度为25.0 mg/L,不考虑气象条件、人为条件对模拟结果的影响。模型其他参数:网格单元数为2 302,垂向分10层计算,时间步长为10 s,糙率系数为0.03;底泥释放源厚度为1 m,底泥孔隙水污染物向上覆水体扩散系数为1.22×10⁻⁹ m²/s^[17]。

2.4 模型的验证

北塘水库当前水体为潮白河汛期补水,水位高程5.6 m,水体静置约1 a,引潮白河补水水体氯离子

质量浓度为200 mg/L,用已建立的模型对水库静置1 a后的水体进行模拟,另外对北塘水库4个取样点(A、B、C、D)水体进行取样,用硝酸银滴定法测定其氯离子质量浓度。图3为水库水体氯离子质量浓度分布模拟结果(含4个取样点),图4为取样点氯离子质量浓度模拟值与实测值的对比。需要说明的是,在模型参数选取上存在系统偏差,例如初始条件设置中,将初始水体氯离子质量浓度统一设为250 mg/L,库区内所有底泥释放源厚度统一设置为1 m。结果表明,实测水体氯离子质量浓度和模拟结果误差在10%左右,而水质模拟误差30%以内一般可以视为较优^[18-19],因此,本模型精度可靠。

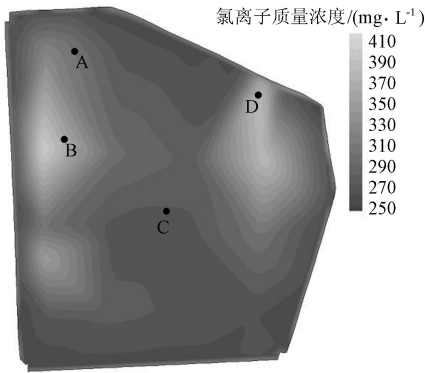


图3 水库水体氯离子质量浓度分布模拟结果

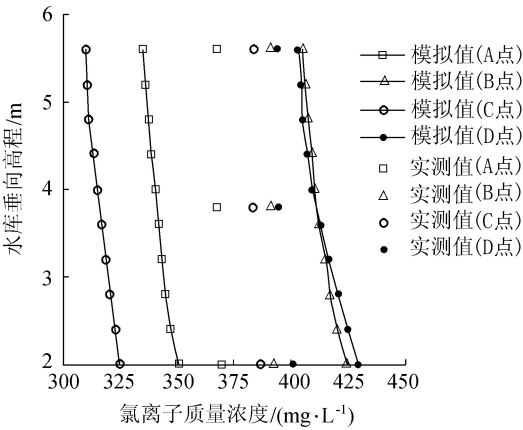


图4 取样点氯离子质量浓度模拟值与实测值对比

3 水库工程布置及引水、供水方案模拟结果

3.1 工程布置及引水、供水预备方案

如图1所示,①号、②号和③号闸门是备选新建闸门(未建成),结合现有闸门并考虑改造费用预算、水库供水需求以及方便水库管理,拟定引水、供水预备方案,见表2。

3.2 各方案模拟结果及分析

方案1采用⑤号、⑥号闸同时出流,对比方案2、方案3,虽然单个闸门出流流量减半,但从整个库区角度看,库区流场最为均匀,基本无死水区,对库

表 2 引水、供水预备方案运行情况

方案编号	新建闸门	引水过程	供水过程
1	①号、③号	①号闸入流 16 d	保持入流;③号闸出流 1.8 m³/s,⑤号闸出流 1.2 m³/s,⑥号闸出流 1.2 m³/s,运行 112 d
2	①号、③号	①号闸入流 16 d	保持入流;③号闸出流 1.8 m³/s,⑤号闸出流 2.4 m³/s,运行 112 d
3	①号、③号	①号闸入流 16 d	保持入流;③号闸出流 1.8 m³/s,⑥号闸出流 2.4 m³/s,运行 112 d
4	②号	②号闸入流 16 d	保持入流;⑦号闸出流 1.8 m³/s,⑥号闸出流 2.4 m³/s,运行 112 d
5	①号	①号闸入流 16 d	保持入流;⑦号闸出流 1.8 m³/s,⑥号闸出流 2.4 m³/s,运行 112 d

注:各方案初始水位均为 2.8 m;入流流量均为 6.4 m³/s;蓄水 16 d 后达供水低水位 4.1 m,开始供水;供水 112 d 后达设计高水位 7.0 m,停止引水。

区内水体交换最为有利;方案 4 采用②号闸为引水闸,与供水闸相隔较远,故流场也较为均匀;方案 5 中,入库①号闸与出库⑦号闸紧靠,导致库区北部区域出现大面积死水区,死水面积达到整个库区的 68%。

表 3 为各方案开始供水时刻出库闸出流水体氯离子质量浓度及其达标所需时间(氯离子质量浓度小于 250 mg/L 时达标),表中 c_0 为开始供水时刻出库闸出流氯离子质量浓度, T 为供水氯离子质量浓度达标所需时间。方案 1、方案 2、方案 3 中的③号闸附近在开始供水时刻水体氯离子质量浓度在 302.2 mg/L 左右,在水库开始供水 8 d 后氯离子质量浓度达标,方案 4 则在 15 d 后达标;方案 5,由于入库①号闸与出库⑦号闸紧靠,在引水过程完成后,⑦号闸附近区域水质已接近入流水质,氯离子质量浓度为 25.0 mg/L,出库⑥号闸附近区域水体已得到充分稀释,氯离子质量浓度为 122.8 mg/L,故在开始供水后,方案 5 氯离子质量浓度在标准范围之内,可库区东北部及西部底泥含盐度较高,底泥释放氯离子速率快,库区北部大面积区域氯离子残余量较高,从整个过程看,方案 5 没有完全发挥水库的调度功能,库区水体没能进行充分的交换。综上,认为方案 1 为较优的推荐方案。

表 3 出库闸出流氯离子质量浓度及达标所需时间

方案 编号	$c_0/(mg \cdot L^{-1})$				T/d			
	③号闸	⑤号闸	⑥号闸	⑦号闸	③号闸	⑤号闸	⑥号闸	⑦号闸
1	302.2	262.6	160.3	×	8	8	0	×
2	302.2	265.1	×	×	8	6	×	×
3	302.1	×	120.9	×	8	×	0	×
4	×	×	265.1	221.2	×	×	15	0
5	×	×	122.8	25.0	×	×	0	0

注:×代表该方案下不由此闸门供水。

4 水库静置期水质咸化模拟结果

为确定北塘水库在静置状态下水库水质能够保持在标准范围内的最大静置时间,对北塘水库在静置期的水质咸化过程进行模拟。在水库长期正常运行后,整个库区水体氯离子质量浓度和南水北调水源氯离子质量浓度相近,均取 25 mg/L,如图 2 所示,按底泥氯离子含量高低取 1、2、3、4、5 这 5 个观测点,5 个底泥观测点在静置状态下的氯离子释放总量(累计)和当日释放速率列于表 4 中。

从表 4 可以看出,各个观测点底泥氯离子释放总量不同,初始底泥氯离子含量高的观测点释放总量大,相同静置时间下,底泥释放总量由大到小依次为观测点 1、观测点 2、观测点 3、观测点 4、观测点 5,观测点 1 静置 240 d 后释放总量为 1749.9 g/m²,观测点 5 静置 240 d 后释放总量为 90.6 g/m²。由当日释放速率可以看出,初始底泥氯离子含量高的观测点当日释放速率大,同一观测点当日释放速率随着静置天数的增加不断减小,静置 200 d 左右底泥氯离子释放速率趋近于零。

据静置模拟结果,第 1 天底泥氯离子释放速率最大,若在水库静置期均取此释放速率作为库区底泥氯离子释放速率,则这一情况应为水库静置期水质咸化最不利情况,此时底泥氯离子释放速率为 3.7~64.3 g/(m²·d)。根据公式(4)得到最不利情况下水体氯离子质量浓度随时间的变化,视静置模拟结果为一般情况,则最不利情况与一般情况下水体氯离子质量浓度-时间关系如图 5 所示。

$$c_{cl} = \frac{\sum (k_{max} S_a) t_s}{V} + c_s \tag{4}$$

表 4 观测点底泥氯离子释放总量(累计)与当日释放速率

观测点	不同静置时间的释放总量/(g·m ⁻²)					当日释放速率/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)				
	1 d	60 d	120 d	180 d	240 d	第 1 天	第 60 天	第 120 天	第 180 天	第 240 天
1	64.3	1310.7	1641.0	1726.3	1749.9	64.3	10.0	2.6	0.7	0.2
2	55.0	1122.5	1404.6	1476.9	1495.9	55.0	8.5	2.2	0.5	0.2
3	29.9	605.1	756.0	794.9	805.4	29.9	4.6	1.2	0.3	0.1
4	10.6	210.2	262.6	275.5	279.0	10.6	1.6	0.4	0.1	0.0
5	3.7	68.8	85.8	89.9	90.6	3.7	0.5	0.1	0.0	0.0

式中: c_{cl} 为库区水体氯离子质量浓度,mg/L; c_s 为库区水体氯离子初始质量浓度,mg/L; k_{max} 为单个网格底泥释放速率,g/m²; S_a 为单个网格面积,m²; t_s 为静置天数,d; V 为库区水体总体积,m³。

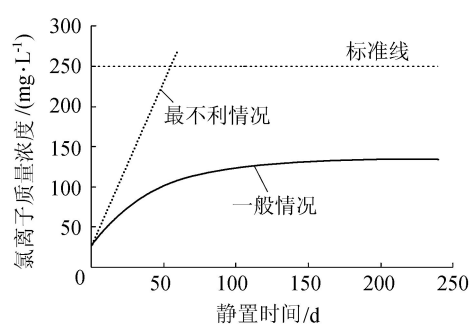


图5 最不利情况与一般情况水体氯离子质量浓度-时间关系

从图5可以看出,对于一般情况,随着静置时间的增加,水体氯离子质量浓度不断增加,浓度增长速度逐渐减小,静置至200 d时,氯离子质量浓度增长速度趋近于零,浓度保持在135 mg/L左右;对于最不利情况,水体氯离子质量浓度呈线性增加,在第55天氯离子质量浓度超过250 mg/L。

5 结 论

本文基于EFDC建立了底泥氯离子扩散模型,以天津市北塘水库为例,主要研究了高盐度底泥作为氯离子释放源对水库工程布置及水库运行期的影响,得到以下结论:①对于类似高盐度底泥水库,在引水、供水闸的空间布置上,需要从库区流场及供水水质的角度分析比较各闸门备选布置方案的优劣,同时考虑底泥含盐量在空间上分布的不均匀性,避免引水闸门和供水闸门紧靠布置,导致局部高盐度底泥区域氯离子堆积残留,最终影响供水水质;②在水库运行期间,不可忽略高盐度底泥作为氯离子释放源的影响,底泥氯离子释放速率与底泥含盐量呈正相关,以最大底泥氯离子释放速率作为整个静置期底泥释放速率,可以得出最不利情况下水库水体氯离子质量浓度的超标时间,为水库后续正常供水提供依据。

参考文献:

[1] 许炼烽,邓绍龙,陈继鑫,等.河流底泥污染及其控制与修复[J].生态环境学报,2014,23(10):1708-1715. (XU Lianfeng, DENG Shaolong, CHEN Jixin, et al. River sediment pollution and its control and restoration[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(10): 1708-1715. (in Chinese))

[2] 姜翠玲,束龙仓,姚琪,等.天津市南水北调配套工程北

塘水库水质安全可行性研究报告[R].南京:河海大学,2006:31-34.

[3] 李爽,张祖陆.南四湖表层底泥重金属空间分布及污染程度评价[J].水资源保护,2012,28(4):6-11. (LI Shuang, ZHANG Zulu. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Nansihu Lake[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 6-11. (in Chinese))

[4] 赵大勇,马婷,曾巾,等.南京玄武湖富营养化及重金属污染现状[J].河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):83-87. (ZHAO Dayong, MA Ting, ZENG Jin, et al. Study on eutrophication and heavy metal pollution of Xuanwu Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2012, 40(1): 83-87. (in Chinese))

[5] ZHU L Q, JIANG C L, WANG Y H. A risk assessment of water salinization during the initial impounding period of a proposed reservoir in Tianjin, China[J]. Environment Science, 2013, 15(9): 1743-1751.

[6] 姜翠玲,裴海峰.北塘水库底泥盐分释放的影响因子研究[J].环境科学与技术,2007,30(10):1-4. (JIANG Cuiling, PEI Haifeng. Impact factors on salt release from beitang reservoir sediment[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(10): 1-4. (in Chinese))

[7] 朱红伟,张坤,钟宝昌,等.泥沙颗粒和孔隙水在底泥再悬浮污染物释放中的作用[J].水动力学研究与进展: A辑,2011,26(5):631-641. (ZHU Hongwei, ZHANG Kun, ZHONG Baochang, et al. Effects of particles and pore water in release of pollutants due to sediment resuspension[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(5): 631-641. (in Chinese))

[8] 邓伟明,徐晓梅,陈春瑜,等.滇池表层沉积物中氨氮的释放特征[J].环境科学研究,2015,28(4):524-531. (DENG Weiming, XU Xiaomei, CHEN Chunyu, et al. Study on release characteristics of ammonium in the surface sediments of Dianchi Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(4): 524-531. (in Chinese))

[9] 龚然,徐进,徐力刚,等.基于EFDC城市景观湖泊水动力模拟研究[J].环境工程,2015,33(4):58-62. (GONG Ran, XU Jin, XU Ligang, et al. Study on hydrodynamics in urban landscape lake based on EFDC[J]. Environment Engineering, 2015, 33(4): 58-62. (in Chinese))

[10] 张晨,高学平,朱慧芳,等.以氯离子为例的北大港水库水质调控技术[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2012,45(1):6-12. (ZHANG Chen, GAO Xueping, ZHU Huifang, et al. Control technology of water quality for chloride in Beidagang Reservoir[J]. Journal of Tianjin University (Science and Tehnology), 2012, 45(1): 6-12. (in Chinese))

(下转第80页)

- [5] 韩曾萃,潘存鸿,史英标,等. 人类活动对咸水入侵的影响[J]. 水科学进展,2002,13(3): 333-336. (HAN Zengcui, PAN Cunhong, SHI Yingbiao, et al. Impact of human activities on salt water intrusion in estuaries[J]. Advances in Water Science,2002,13(3): 333-336. (in Chinese))
- [6] 赵渭军,韩继静,史英标,等. 杭州市抗咸二期取水工程氯度研究[J]. 中国农村水利水电,2007(5): 26-29. (ZHAO Weijun, HAN Jijing, SHI Yingbiao, et al. Study on the chlorinity of the second-stage salinity-resisting and water-intake project in Hangzhou City[J]. China Rural Water and Hydropower,2007(5): 26-29. (in Chinese))
- [7] 史英标,潘存鸿,程文龙,等. 钱塘江河口段盐度时空分布与预测模型[J]. 水科学进展,2012,23(3): 409-418. (SHI Yingbiao, PAN Cunhong, CHENG Wenlong, et al. Temporal-spatial variation and numerical forecast model of salt water intrusion of the Qiantang Estuarine Reach[J]. Advances in Water Science,2012,23(3): 419-428. (in Chinese))
- [8] 韩曾萃,程杭平. 钱塘江江水含盐度计算的研究[J]. 水利学报,1981,12(6): 46-50. (HAN Zengcui, CHENG Hangping. Study on the salinity calculation of the Qiantang Estuary[J]. Journal of Hydraulics Engineering,1981,12(6): 46-50. (in Chinese))
- [9] 潘存鸿,张舒羽,史英标,等. 涌潮对钱塘江河口盐水入侵影响研究[J]. 水利学报,2014,45(11): 1301-1309. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yinbiao, et al. Study on saltwater intrusion in Qiantang Estuary affected by tidal bore[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(11): 1301-1309. (in Chinese))
- [10] 史英标,李若华,姚凯华. 钱塘江河口一维盐度动床预报模型及应用[J]. 水科学进展,2015,26(2): 212-220. (SHI Yingbiao, LI Ruohua, YAO Kaihua. 1-D movable bed numerical forecast model of salinity of the Qiantang River Estuarine Reach and its application[J]. Advances in Water Science,2015,26(2): 212-220. (in Chinese))
- [11] 韩曾萃,程杭平,史英标,等. 钱塘江河口咸水入侵长历时预测和对策[J]. 水利学报,2012,43(2): 232-240. (HAN Zengcui, CHENG Hangping, SHI Yingbiao, et al. Long-term predictions and countermeasures of saltwater intrusion in the Qiantang Estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(2): 232-240. (in Chinese))
- [12] 曾剑,孙志林,潘存鸿,等. 钱塘江河口径流长周期特性及其对河床的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2010,44(8): 1584-1588. (ZENG Jian, SUN Zhilin, PAN Cunhong, et al. Long periodic feature runoff and its effect on riverbed in Qiantang Estuary[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2010,44(8): 1584-1588. (in Chinese))

(收稿日期:2015-09-07 编辑:郑孝宇)

(上接第54页)

- [11] 高学平,张少雄,张晨. 糯扎渡水电站多层进水口下泄水温三维数值模拟[J]. 水力发电学报,2012,31(1): 195-201. (GAO Xueping, ZHANG Shaoxiong, ZHANG Chen. 3-D numerical simulation of water temperature released from the multi-level intake of Nuozhadu Hydropower Station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(1): 195-201. (in Chinese))
- [12] 史莹,江春波,陈正兵,等. 弯曲河道对水流流态影响数值模拟[J]. 水利学报,2013,44(9): 1050-1057. (SHI Ying, JIANG Chunbo, CHEN Zhengbing, et al. Numerical simulation of flow pattern in meandering rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(9): 1050-1057. (in Chinese))
- [13] 轩晓博,逢勇,李一平,等. 金属矿区重金属迁移对水体影响的数值模拟[J]. 水资源保护,2015,31(2): 30-35. (XUAN Xiaobo, PANG Yong, LI Yiping, et al. Numerical simulation of influence of heavy metal migration on water in metallic mining areas[J]. Water Resources Protection,2015,31(2): 30-35. (in Chinese))
- [14] 王流通,刘凌,钱宝,等. 盐城大纵湖疏浚前后沉积物-水界面环境化学变化[J]. 水资源保护,2013,29(2): 33-37. (WANG Liutong, LIU Ling, QIAN Bao, et al. Changes in environmental chemistry at water-sediment interface before and after dredging of Dazong Lake in Yancheng City[J]. Water Resources Protection,2013,29(2): 33-37. (in Chinese))
- [15] 沈乐. 重污染河道疏浚对菹草水生态环境的影响[J]. 水资源保护,2012,28(3): 32-37. (SHEN Le. Impacts of dredging of seriously polluted rivers on water ecological environment of Potamogeton crispus[J]. Water Resources Protection,2012,28(3): 32-37. (in Chinese))
- [16] 王兴奎,邵学军. 河流动力学基础[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [17] 金腊华,徐峰俊. 水环境数值模拟与可视化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [18] ZOU R, CARTER S. Integrated hydrodynamic and water quality modeling system to support nutrient total maximum daily load development for Wissahickon Creek, Pennsylvania[J]. Journal of Environmental Engineering,2006,32(4): 555-566.
- [19] FU G B, BARBER M E, CHEN Shulin. Impacts of climate change on regional hydrological regimes in the Spokane River Watershed[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2007,12(5): 452-461.

(收稿日期:2015-09-22 编辑:骆超)