

## 以氯离子为例的北大港水库水质调控技术

张晨<sup>1</sup>, 高学平<sup>1</sup>, 朱慧芳<sup>2</sup>, 赵世新<sup>1</sup>

(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. 云南省水利水电勘察设计研究院, 昆明 650051)

**摘要:** 针对南水北调配套水库——北大港水库水质咸化问题, 采用数值模拟方法, 应用 EFDC 三维水动力水质模型形成水库水质模拟技术, 调控水库运行方式, 提高水库蓄水利用率. 以氯离子为模拟指标, 通过实测数据与模拟结果比较分析, 验证了模型的可靠性. 将北大港水库分为主库区和辅库区两部分, 利用该模拟技术调控水库运行方式, 对水库 3 种典型蓄供水方案进行水质模拟研究, 探讨底泥氯离子释放对水质的影响, 指出主辅库联合调度为较优的调控方案. 该套水库水质模拟技术可推广应用于其他南水北调配套水库.

**关键词:** 南水北调工程; 配套水库; 水质安全; 北大港水库; 底泥氯离子释放

**中图分类号:** X524      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0493-2137(2012)01-0006-07

## Control Technology of Water Quality for Chloride in Beidagang Reservoir

ZHANG Chen<sup>1</sup>, GAO Xue-ping<sup>1</sup>, ZHU Hui-fang<sup>2</sup>, ZHAO Shi-xin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. Yunnan Water Conservancy and Hydroelectric Survey Design and Research Institute, Kunming 650051, China)

**Abstract:** In view of water salinization of matching reservoir in the South-to-North Water Diversion, the simulation technology of reservoir water quality was developed by numerical simulation method in order to control operation mode of reservoir and improve water quality. Beidagang Reservoir is the regulating reservoir for water supply from Yellow River to Tianjin Diversion and South-to-North Water Diversion. Based on EFDC, the water quality model was applied with chloride as simulation index. Through comparison of simulated and measured data, it was confirmed that the model represented the hydrodynamic and water quality processes reasonably well. Beidagang Reservoir was divided into the main and auxiliary reservoir. Three operating conditions of the reservoir were simulated using the simulation technology. The effect of sediment chloride release on water quality was discussed. The results demonstrate that the operating solution of combining main and auxiliary reservoir is reasonably favorable. It provides reference basis and technical support for water quality safety of Beidagang Reservoir.

**Keywords:** South-to-North Water Diversion; matching reservoir; water quality security; Beidagang Reservoir; sediment chloride release

南水北调工程沿线水库众多: 中线有河北段的广阳水库、瀑河水库、岗南水库、黄壁庄水库、王快水库和西大洋水库等, 北京段的大宁水库, 天津段的王庆坨水库和北塘水库; 东线有山东段的洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖、东湖水库和双王城水库, 天津段的北大港水库. 这些配套水库的作用是调节南水北调来水、调丰补枯、检修和事故备用等, 保障供水稳

定. 水库水质安全对保障南水北调供水安全至关重要, 水库蓄水后是否存在水质污染等问题成为能否向受水区正常供水的关键.

在底泥吸附和释放机理等方面的研究中<sup>[1-2]</sup>, 考虑内源释放的数学模型有了长足发展<sup>[3-4]</sup>, 采用数值模拟方法研究底泥污染问题得到了广泛应用<sup>[5-6]</sup>. 本文针对北大港水库临海、底泥氯离子含量高和东部底

收稿日期: 2010-10-27; 修回日期: 2011-03-09.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAB04A15); 国家自然科学基金资助项目(50909070); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51021004).

作者简介: 张晨(1981—), 男, 博士, 讲师, emil@tju.edu.cn.

通讯作者: 高学平, xpgao@tju.edu.cn.

高程高等特点,采用数值模拟方法建立了一套水库水质模拟技术,并得到了实测数据的验证.利用该模拟技术对水库的蓄供水方案进行水质模拟研究,探讨底泥氯离子释放对水库水质的影响,以水质改善为目标调控水库运行方式,可为水库运行管理提供理论依据.

### 1 北大港水库库区特点

图 1(a)为北大港水库现状工程布置示意.北大港水库是一座以蓄供水为主,兼有灌溉、养殖等综合效益的大(2)型平原水库.作为天津市引黄济津工程和南水北调东线调蓄水库,可调蓄水量为  $(4.5 \sim 5.0) \times 10^8 \text{ m}^3$ .北大港水库建于 1974 年,占地  $164 \text{ km}^2$ ,蓄水面积  $150 \text{ km}^2$ ,设计库容  $5.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,兴利库容  $4.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,库底平均高程 3.0 m(大沽高程,下同);属北温带半湿润大陆型季风气候,降水主要是集中在 7 月、8 月、9 月 3 个月份,多年平均降水量 533.3 mm,多年平均年蒸发量 1 159.9 mm.水库主要建筑物包括 5 座围堤和 13 座蓄供水建筑物,除姚塘子扬水站和马圈闸为蓄水建筑物外,其余均为供水建筑物.

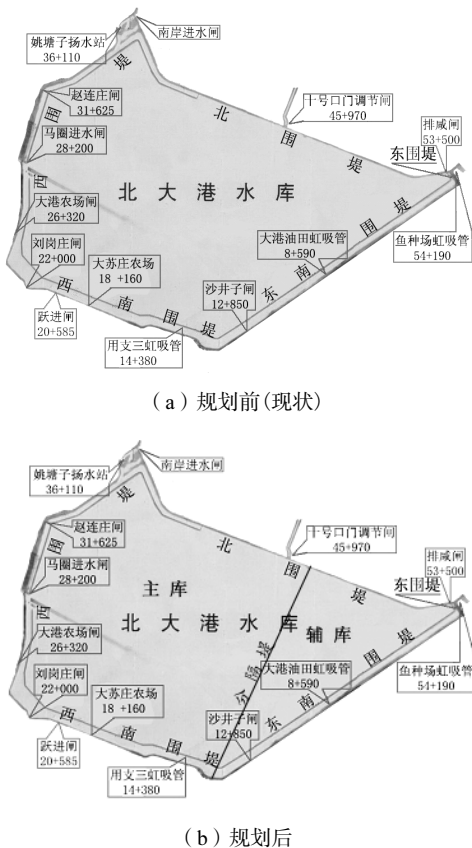


图 1 北大港水库工程布置示意

Fig.1 Project layout plan of Beidagang Reservoir

北大港水库一直存在着水量和水质两方面的问题<sup>[7]</sup>:一方面,蓄水保证率低,蓄水面积大,蓄水深度不足,水量蒸发、渗漏损失大,有限的水资源得不到充分的利用;另一方面,水质咸化问题突出,底泥含盐量高,内源污染严重.通过建设水库隔堤并加高围堤,将水库分为主库区和辅库区两部分,可以减小蓄水面积,抬高水位,优化水库调度,确保水库水质安全.根据水库现状,东围堤附近底泥氯离子含量较高,设置分隔堤于水库东侧,隔堤位置如图 1(b)所示.

### 2 控制方程及求解方法

将环境流体动力学模型 EFDC (environmental fluid dynamics code) 应用于北大港水库,该模型能够模拟水动力、水质及富营养化、泥沙及有毒物.国内外已有应用 EFDC 研究河流、湖泊、水库、河口海岸以及湿地等不同水体有关温度、盐度、水质、富营养、泥沙等水环境问题的相关报道<sup>[8-11]</sup>.

#### 2.1 控制方程

##### 1) 连续性方程

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_x Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_y Hv)}{\partial y} + \frac{\partial(mw)}{\partial z} = Q_H \quad (1)$$

##### 2) 动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(mHu)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Huu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hvu)}{\partial y} + \\ & \frac{\partial(mwu)}{\partial z} - (mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y})Hv = \\ & -m_y H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial x} - m_y (\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x}) \frac{\partial p}{\partial z} + \\ & \frac{\partial}{\partial z} (m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial u}{\partial z}) + Q_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(mHv)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Huv)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hv v)}{\partial y} + \\ & \frac{\partial(mwv)}{\partial z} + (mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y})Hu = \\ & -m_x H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial y} - m_x (\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y}) \frac{\partial p}{\partial z} + \\ & \frac{\partial}{\partial z} (m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial v}{\partial z}) + Q_v \end{aligned} \quad (3)$$

##### 3) 状态方程

$$\begin{aligned} \rho = & 999.843 + (6.794 \times 10^{-2} \theta - \\ & 9.095 \times 10^{-3} \theta^2 + 1.002 \times 10^{-4} \theta^3 - \\ & 1.120 \times 10^{-6} \theta^4 + 6.536 \times 10^{-9} \theta^5) \end{aligned} \quad (4)$$

4) 浓度输运方程

$$\frac{\partial(mH\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(m_yHu\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(m_xHv\Phi)}{\partial y} + \frac{\partial(mw\Phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( m \frac{1}{H} A_b \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + Q_\phi \quad (5)$$

式中:垂向  $\sigma$  坐标转换为  $z=(z^*+h)/H=(z^*+h)/(\xi+h)$ ,取值范围 $[0, 1]$ ,  $z^*$ 代表  $\sigma$  转换前实际垂向物理坐标,总深度  $H=h+\xi$ ,  $h$  为底床高程,  $\xi$  为自由水面高程,  $m$ ;  $u$  和  $v$  为曲线正交坐标系下  $x$  和  $y$  方向的流速分量,  $m/s$ ;  $w$  为  $\sigma$  坐标下垂向流速,  $m/s$ ;  $m_x$ 、 $m_y$  和  $m$  为 Jacobian 曲线正交坐标转换系数,  $m=m_xm_y$ ;  $Q_H$  为降雨、蒸发、地下水相互作用、取水或点源和非点源入流,  $m/s$ ;  $p$  为相对静水压力,  $p=\rho_0gH(1-z)$ ,  $kg \cdot m/s^2$ ;  $f$  为柯氏力参量,  $s^{-1}$ ;  $A_v$  为垂向紊流黏滞系数,  $m^2/s$ ;  $Q_u$  和  $Q_v$  为动量源汇项,  $m^2/s^2$ ;  $\rho$  为密度,  $kg/m^3$ ;  $\theta$  为温度,  $^\circ C$ ;  $A_b$  为垂向紊动扩散系数,  $m^2/s$ , 忽略相对垂向较小的水平紊动扩散系数;  $Q_\phi$  为源汇项,  $g/(m^2 \cdot s)$ ;  $\Phi$  为某种水质组分的浓度,  $mg/L$ .

垂向紊流黏滞系数  $A_v$  和垂向紊动扩散系数  $A_b$  可以通过求解紊动能  $q^2$  和紊动尺度  $l$  的紊动方程确定,  $q^2$  和  $l$  的紊动方程详见文献[11].

2.2 求解方法

对上述方程在交错网格上进行离散的数值方法,应用内-外模式分离法求解动量方程和连续性方程,采用空间交错网格. 外模式应用半隐式 3 层时间格式求解,用周期性的 2 层时间格式修正,求得自由表面水位变化;应用连续超松弛格式迭代求解水位变化的垂向平均速度场. 内模式则联合水平速度分量和垂向剪力项,应用分步格式求解,隐式求解垂向剪力项,显式求解其他项.

3 模型验证

利用引黄期间的实测数据对模型进行验证. 采用正交曲线网格,网格单元数为 4812,垂向分 2 层计算;选择氯离子作为水质模拟指标,以 2004 年 11 月 17 日—2005 年 2 月 25 日,共 102 d 的水位、流量及水质实测数据为计算条件,对北大港水库水质进行模拟. 前 71 d 为蓄水期,引黄水自马圈闸入库,无出流;后 31 d 为供水期,十号口门闸出流,无入流;表 1 为马圈闸入流和十号口门闸出流流量、氯离子浓度时间序列. 初始水位为 4.0 m,水体及底泥氯离子浓度初始分布如图 2 所示. 北大港水库糙率率定为 0.03,

底泥孔隙水氯离子向上覆水体垂向扩散系数取为  $1.22 \times 10^{-9} m^2/s$ . 冬季蒸发量较小,验证时可以忽略水库蒸发的影响.

表 1 马圈闸和十号口门闸边界条件

Tab.1 Boundary condition in Maquan and Shishaokoumen section

时间/d	马圈闸		十号口门闸	
	流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	氯离子浓度/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	氯离子浓度/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )
1	42.5	122.0	0	304.0
7	43.8	107.0	0	200.0
14	42.0	100.0	0	201.0
21	45.4	93.0	0	98.6
28	45.6	92.9	0	184.0
35	44.8	96.9	0	178.0
44	20.0	105.0	0	179.0
52	19.5	113.0	0	208.0
62	19.7	118.0	0	161.0
71	0	115.0	-14.8	116.0
77	0	116.0	-18.5	153.0
102	0	45.1	-17.1	179.0

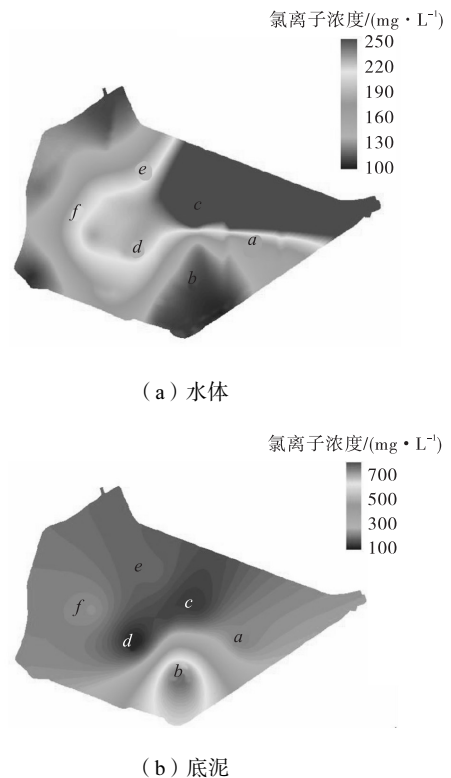


图 2 库区水体和底泥氯离子初始浓度分布  
Fig.2 Initial water and sediment concentration distribution of  $Cl^-$  in the reservoir

3.1 水位验证

十号口门闸水位模拟值与实测值比较如图 3 所示,水位过程线与实测水位变化趋势一致,计算值与实测值误差最大不超过 1.94%,模拟精度较好.

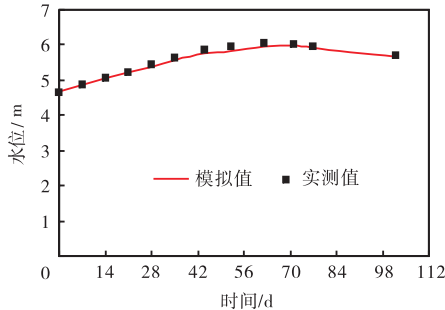
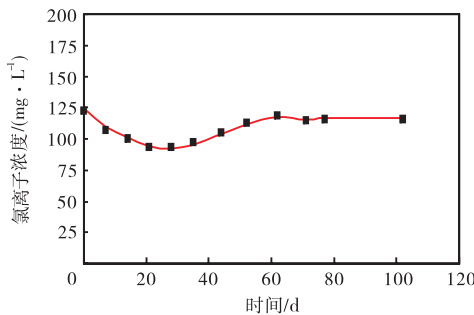


图3 十号口门闸水位模拟值与实测值比较

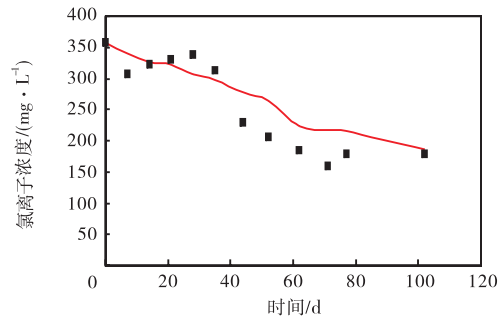
Fig.3 Comparison of simulated and measured data of water level in Shihakoumen section

3.2 水质验证

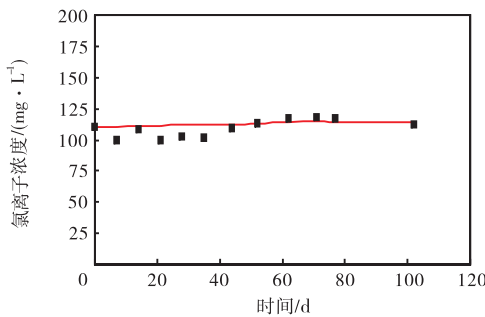
各水质监测点氯离子浓度模拟值和实测值比较



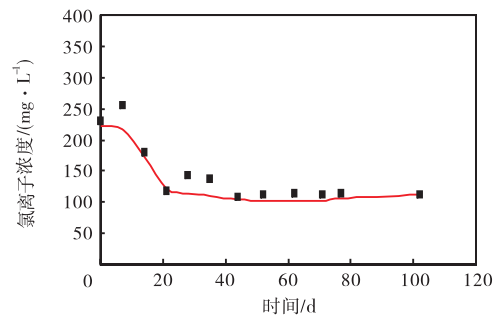
(a) 马圈闸



(b) 十号口门闸附近



(c) 姚塘子扬水站



(d) 库中心

— 模拟值 ■ 实测值

图4 库区各水质监测点氯离子浓度模拟值与实测值对比

Fig.4 Comparison of simulated and measured data of chloride concentration in water quality monitoring sections

3.3 底泥氯离子释放

底泥各采样点位置见图2,具体测量过程参见文献[14].各采样点氯离子释放速度和释放量如表2和图5所示,各采样点上覆水体底层流速见表3.由图表可知,模拟结束时(第102天),因点b底泥氯离子初始浓度及底泥、水体浓度差均远远高于其他各采样点,释放量最大为593 mg/kg;点f释放量次之,为151 mg/kg,超过a点的94 mg/kg,这是因为点f距进水口最近,流速最大,而点a虽然底泥、水体浓度差大于点f,但流速较小;然后依次为点e和点d,底泥氯离子释放量分别为15 mg/kg和11 mg/kg;点c底泥氯离子的吸附量为12 mg/kg.底泥氯离子释放量、释放速度与底泥、水体氯离子的浓度差及其上覆水体

如图4所示.由图可知,氯离子浓度过程线与实测浓度变化趋势基本一致,模拟精度较好.马圈闸为入口,氯离子浓度由初始的124.0 mg/L降至117.0 mg/L,相对误差在0.8%~2.1%;十号口门闸附近监测点氯离子初始浓度值最高,为357.0 mg/L,模拟结束时降至186 mg/L,降幅较大,相对误差在0~29.7%;姚塘子扬水站氯离子浓度由初始的110 mg/L升至结束时的114 mg/L,相对误差在0~25.3%;库中心监测点氯离子浓度由初始的222 mg/L降至结束时的111 mg/L,相对误差在1.8%~20.3%.

水质模拟误差精度在30%以内一般可以被视为较优<sup>[12-13]</sup>.

的流速成正比.

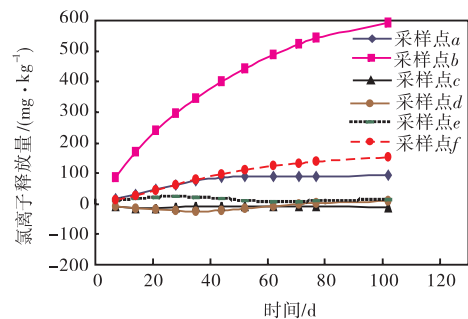


图5 各采样点底泥氯离子释放量过程线

Fig.5 Trend lines of sediment chloride release in monitoring sections

表 2 底泥各采样点释放速度

Tab.2 Release rate of sediment chloride in monitoring sections

时间/d	底泥氯离子释放速度/(mg·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )						底泥氯离子释放量/(mg·kg <sup>-1</sup> )					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
7	348	1 988	-158	-152	182	269	15	87	-7	-7	8	12
14	368	1 925	-152	-159	143	324	31	171	-13	-14	16	26
21	380	1 553	5	-125	54	429	48	239	-16	-19	20	44
28	350	1 299	147	-99	-39	425	63	296	-12	-23	22	62
35	290	1 119	76	-54	-92	365	76	345	-9	-26	21	78
44	173	995	20	82	-76	319	86	401	-7	-21	15	96
52	64	831	6	144	-11	265	89	442	-6	-14	10	110
62	8	715	-16	121	122	211	89	487	-6	-6	7	123
71	16	635	-35	100	219	167	90	523	-7	-1	7	133
77	16	524	-40	83	224	135	91	542	-7	2	9	138
102	22	320	-60	51	91	68	94	593	-12	11	15	151

注：表中负号代表底泥吸附水体氯离子。

表 3 底泥各采样点上覆水体底层流速

Tab.3 Bottom velocity in monitoring sections

时间/d	流速/(cm·s <sup>-1</sup> )					
	a	b	c	d	e	f
1	0.159	0.158	0.162	0.239	0.206	0.258
7	0.067	0.109	0.073	0.132	0.161	0.290
14	0.083	0.122	0.061	0.120	0.135	0.280
21	0.061	0.140	0.063	0.115	0.124	0.267
28	0.057	0.141	0.064	0.110	0.105	0.243
35	0.052	0.147	0.069	0.106	0.082	0.167
44	0.058	0.179	0.063	0.079	0.012	0.161
52	0.054	0.171	0.054	0.067	0.033	0.145
62	0.049	0.174	0.055	0.066	0.042	0.121
71	0.016	0.030	0.038	0.057	0.082	0.069
77	0.004	0.007	0.016	0.005	0.003	0.008
102	0.008	0.005	0.018	0.001	0.003	0.003

#### 4 各蓄供水方案水质模拟及结果分析

原方案：由引江期间的供需水量及水质状况可知<sup>[15-16]</sup>，马圈闸入流 43 d，流量 80 m<sup>3</sup>/s；十号口门闸出流 360 d，流量 12 m<sup>3</sup>/s；“引江水”入流氯离子浓度 40 mg/L，初始水位为 4.0 m；库内水体氯离子初始

浓度分布及底泥各点浓度分布如图 2 所示。

规划方案即分库方案：对北大港水库规划后 2 种典型蓄供水方案进行模拟，分析比较各方案供水水质（十号口门闸处氯离子浓度）及库内水质变化。考虑水库降雨和蒸发条件，年降雨量 533.3 mm，年蒸发量 1 159.9 mm。各方案具体情况如表 4 所示。

表 4 原方案和规划方案

Tab.4 Original and planning schemes

方案类别	方案规划内容
原方案	不分库调度，马圈闸入流 43 d，流量 80 m <sup>3</sup> /s；十号口门闸出流 360 d，流量 12 m <sup>3</sup> /s；“引江水”氯离子浓度 40 mg/L，库内水体氯离子初始浓度分布由各监测点实测数据差值得出，底泥氯离子初始浓度由各采样点实测数据差值得出；初始水位为 4.0 m，年降雨量 533.3 mm，年蒸发量 1 159.9 mm。
规划方案	1 仅运用主库调度，入流条件和初始条件与原方案相同。
	2 运用主辅库联合调度，第 1 个月供水的同时向辅库蓄水，流量 12 m <sup>3</sup> /s，其他条件与规划方案 1 相同。

##### 4.1 供水水质

各方案供水水质如图 6 所示。规划方案 2 第 1 个月主库中劣Ⅲ类水大部分流入辅库，故供水水质较原方案和规划方案 1 有所改善。由图 6 可知，第 2 个

月末，规划方案 2 十号口门闸处氯离子浓度为 154.9 mg/L，较原方案的 187.2 mg/L 降低了 17.3%，较规划方案 1 的 208.7 mg/L 降低了 25.8%；后 6 个月氯离子浓度约为 50.0 mg/L，与规划方案 1 相同，较原

方案的 80.0 mg/L 降低了 37.5%.

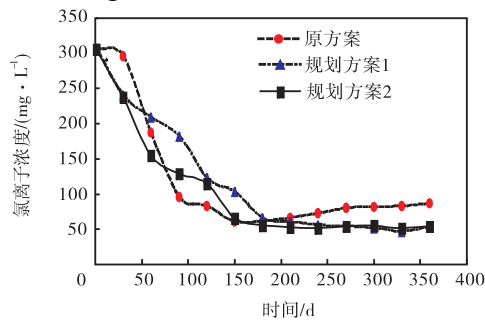


图6 各方案供水水质比较

Fig.6 Comparison of water quality of water supply on each scheme

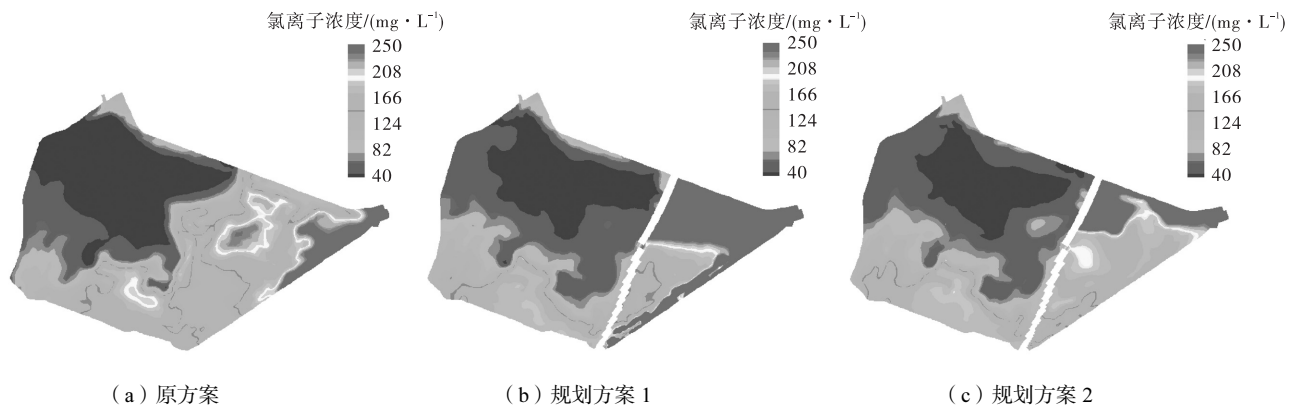


图7 各方案第240天库内氯离子浓度分布

Fig.7 Cl<sup>-</sup> concentration distribution of schemes on day 240 in reservoir

## 5 结论

(1) 应用 EFDC 三维水动力水质模型, 考虑底泥内源污染, 形成了一套模拟技术, 研究水库运行时水质变化规律; 通过对北大港水库的水位及水质模拟结果与实测值的比较, 验证了模型的可靠性。

(2) 应用此模拟技术对北大港水库水质咸化进行研究, 通过 3 种典型蓄供水方式下水质模拟结果比较可以看出, 主辅库联合调度方案的库内水质及供水水质均优于其他两种方案。

(3) 该套水库水质模拟技术可推广应用于其他南水北调配套水库, 研究水库水质安全, 为南水北调安全输水提供技术支撑。

### 参考文献:

- [1] Wang H, Apan A, Gulliver J S. Modeling of phosphorus dynamics in aquatic sediments(I): Model development [J]. *Water Research*, 2003, 37(16): 3928-3938.
- [2] 李剑超, 褚君达, 丰华丽. 河流底泥冲刷悬浮对水质影响途径的实验研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(2): 137-140.

## 4.2 库内水质

各方案第 240 天库区水体氯离子浓度分布如图 7 所示. 规划方案库内氯离子浓度小于 60 mg/L 的面积及其占整个蓄水区面积的比例均明显大于原方案, 这是由于规划方案通过隔堤将辅库区隔离, 辅库区底泥释放的氯离子被控制在辅库区范围内, 不再影响主库区水质。

综上所述, 从供水水质和库内水质的模拟结果可以看出, 规划方案 2 运用主辅库联合调度方案可改善北大港水库水质, 提高了水库蓄水利用率。

Li Jianchao, Chu Junda, Feng Huali. Experimental investigation of impact way of scouring and suspending of river bottom sediment on water quality[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(2): 137-140 (in Chinese).

- [3] 褚君达, 徐惠慈. 河流底泥冲刷沉降对水质影响的研究[J]. *水利学报*, 1994, 25(11): 42-47.  
Chu Junda, Xu Huici. Impact of sediment erosion and deposition on water quality in river[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, 25(11): 42-47(in Chinese).
- [4] Srinivasu P D N. Regime shifts in eutrophied lakes: A mathematical study[J]. *Ecological Modeling*, 2004, 197(2): 115-130.
- [5] Chen Xinjian, Sheng Y P. Three-dimensional modeling of sediment and phosphorus dynamics in Lake Okeechobee, Florida: Spring 1989 simulation [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131(3): 359-374.
- [6] Portielje R, Lambertus L. Estimation of sediment-water exchange of solutes in Lake Veluwe, the Netherlands [J]. *Water Research*, 1999, 33(1): 279-285.
- [7] 郭磊, 高学平, 张晨. 北大港水库水质模拟[J].

- 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 11-16.
- Guo Lei, Gao Xueping, Zhang Chen. Analysis and simulation of water quality of Beidagang Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 11-16(in Chinese).
- [ 8 ] Hamrick J M. Three-dimensional variable resolution hydrodynamic and transport modeling of the Chesapeake Bay system[C]//*Proceedings of the National Conference on Hydraulic Engineering*. USA, 1993(2): 2110-2115.
- [ 9 ] 张 晨, 高学平, 张少雄. 于桥水库三维水质模拟及预测[C]// 水力学与水利信息学进展. 西安, 2009: 70-78.
- Zhang Chen, Gao Xueping, Zhang Shaoxiong. Simulation and prediction of three-dimensional water quality modeling of Yuqiao Reservoir[C]// *Advance in Hydraulics and Hydroinformatics in China*. Xi'an, China, 2009: 70-78(in Chinese).
- [ 10 ] Zhang Chen, Gao Xueping. Numerical simulation of non-point pollution by flood flow of Yuqiao Reservoir [C]// *Proceedings of 9th International Conference on Hydroinformatics*. Tianjin, China, 2010: 259-266.
- [ 11 ] 乾爱国, 段杰辉, 纪 平. 内陆核电站低放射性废水排放的三维计算[J]. 水利学报, 2007, 28(12): 1495-1499.
- Qian Aiguo, Duan Jiehui, Ji Ping. Three-dimensional modeling of radionuclide effluent flow in reservoir for nuclear power station[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 28(12): 1495-1499(in Chinese).
- [ 12 ] Fu Guobin, 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.
- [ 13 ] Zou Rui, 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, 132(4): 555-566.
- [ 14 ] 朱慧芳. 北大港水库水质安全研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2009.
- Zhu Huifang. Research on Water Quality Safety of Beidagang Reservoir[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2009(in Chinese).
- [ 15 ] 赵玉明. 北大港水库水质管理运行问题的研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2004.
- Zhao Yuming. Research on the Problem of Water Quality Management of Beidagang Reservoir[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2004(in Chinese).
- [ 16 ] 张宇龙, 王启山, 贺兰晔, 等. 北大港水库调蓄“引江水”水质变化[J]. 城市环境与城市生态, 2005, 18(2): 24-26.
- Zhang Yulong, Wang Qishan, He Lanwan, et al. Water quality of south-to-north transfer water in Beidagang Reservoir[J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2005, 18(2): 24-26(in Chinese).