

文章编号: 1006-544X (2007) 02-0236-04

# 北大港水库水质咸化数学模型

赵文玉<sup>1</sup>, 刘国庆<sup>2</sup>, 刘景兰<sup>3</sup>, 张 华<sup>1</sup>, 陆燕勤<sup>1</sup>, 王启山<sup>4</sup>

(1. 桂林工学院 资源与环境工程系, 广西 桂林 541004; 2. 河南省有色金属地质矿产局 第五地质大队, 郑州 450042;  
3. 天津华北地质勘查局 地质研究所, 天津 300181; 4. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071)

**摘 要:** 根据模拟水池试验研究结果, 结合浅水库水质数学模型理论, 简化了北大港水库水质咸化数学模型. 采用2004年1~5月“引黄济津”工程实施期间的北大港水库水文、水质资料, 进行了水量和氯离子的物料衡算, 推出了水质咸化模型的数学表达式. 定量计算出传质作用氯离子浓度增加量占总增加量的90%以上, 蒸发浓缩作用在10%以下. 计算结果表明, 导致北大港水库水质咸化的主要因素是盐碱土的传质作用, 总趋势与模拟试验结果一致.

**关键词:** 水质咸化; 传质理论; 蒸发浓缩; 物料衡算

**中图分类号:** X143; P342

**文献标志码:** A

北大港水库是“引黄济津”工程和“南水北调”东线工程备用方案的调蓄水库, 进入北大港水库的水咸化引起了广泛的关注. 在对北大港水库水质咸化机理定性分析<sup>[1]</sup>和模拟试验研究的基础上<sup>[2]</sup>, 结合浅水库水质数学模型理论<sup>[3]</sup>, 建立了北大港水库水质咸化数学模型并进行了定量计算, 研究了北大港水库水质咸化的最主要因素和水质咸化模型的数学表达式.

## 1 水质咸化数学模型的简化

北大港水库属平原型浅水库, 根据模拟水池试验研究结果, 结合浅水库水质数学模型理论, 北大港水库水质数学模型可用完全混合零维模型进行描述<sup>[4]</sup>, 即

$$VdS/dt = W_1 - QS - KVS + P_s V. \quad (1)$$

式中:  $V$ —水库容积,  $m^3$ ;  $dS/dt$ —污染物浓度随时间的变化率,  $mg/(L \cdot d)$ ;  $W_1$ —外源污染负荷,  $g/d$ ;  $S$ —污染物浓度,  $mg/L$ ;  $Q$ —水库出流量,  $m^3/d$ ;  $K$ —自净系数,  $1/d$ ;  $P_s$ —水库内部的污染负荷,  $mg/(L \cdot d)$ .

根据北大港水库的实际情况, 当黄河水或长江水进入水库后, 蓄存1年期间内无进水和出水, 即

$Q = 0$ ; 另外, 北大港水库无河流汇入, 蓄水是通过泵提升, 放水开闸到人工沟渠; 水库为围坝, 周围农田沥水也不能进入水库, 因此无面源污染; 水库周围无大型企业, 也不允许工厂向水库排污, 因此也没有点源污染, 故无外源污染, 即  $W_1 = 0$ . 因此式(1)可以简化为

$$dS/dt = -KS + P_s. \quad (2)$$

以  $Cl^-$  为代表的无机盐离子不存在被降解的问题, 即  $K=0$ , 内部污染负荷进一步分为底质(底泥或土壤)溶出负荷和蒸发浓缩负荷, 则式(2)进一步简化为

$$dC/dt = P_s = P_r + P_z. \quad (3)$$

式中:  $C$ — $Cl^-$  浓度,  $mg/L$ ;  $P_r$ —底质(底泥或土壤)溶出  $Cl^-$  的污染负荷,  $mg/(L \cdot d)$ ;  $P_z$ —由蒸发浓缩作用造成的  $Cl^-$  污染负荷,  $mg/(L \cdot d)$ .

式(3)进一步变形如下

$$dC/dt = dC_1/dt + dC_2/dt. \quad (4)$$

式中:  $dC_1/dt$ —库底及库周土壤溶出作用使  $Cl^-$  浓度随时间的变化率, 即指  $P_r$ ,  $mg/(L \cdot d)$ ;  $dC_2/dt$ —蒸发浓缩作用使  $Cl^-$  浓度随时间的变化率, 即指  $P_z$ ,  $mg/(L \cdot d)$ .

对式(4)进行积分

$$C = (dC_1/dt + dC_2/dt)t + C_0 \quad (5)$$

式中： $C_0$ —水中氯离子初始浓度，mg/L； $t$ —一起始日至计算日天数，d.

## 2 水量衡算

通过分析知，北大港水库的“源”有蓄存水和雨水，“漏”有蒸发损失水、渗漏损失水、向天津市供水等。以下列出了与本次“引黄济津”工程施工期间相关的水文数据，数据来源于天津市水利局水文监测中心。

### 2.1 当月蒸发损失水的总体积

根据表 1 数据，由下式可计算出北大港水库当月蒸发损失水的总体积 ( $V_E$ )

$$V_E = E_v A \quad (6)$$

式中： $E_v$ —库区每月累积蒸发量，m； $A$ —水面面积，取  $A = 1.49 \times 10^8 \text{ m}^2$ 。

表 1 北大港水库库区 2004 年 1~5 月降雨量及蒸发量监测数据

Table 1 Data of rainfall and evaporation in Beidagang reservoir from January to May in 2004

月 份	1	2	3	4	5
当月累计降雨量/mm	0.0	18.0	9.5	22.2	44.6
当月累计蒸发量/mm	33.6	71.9	118.8	112.4	134.6
蒸发器类型	小口径蒸发器(20 cm)		601 型蒸发器		
月 份	1	2	3	4	5
折算为 601 型蒸发器 当月累计蒸发量/mm	23.5	50.3	83.16	112.4	134.6
折算为水面蒸发 当月累计蒸发量/mm	16.4	35.2	58.2	79.1	93.2

注:1. 小口径蒸发器(20 cm)折算为 601 型蒸发器的折算系数为 0.7;2. 601 型蒸发器对大水面蒸发量的折算系数为 0.7.

### 2.2 当月降雨补充水的总体积

根据表 1 数据，由式 (7) 可计算出北大港水库当月由于降雨补充的水的总体积 ( $V_R$ )

$$V_R = R_f A \quad (7)$$

式中： $R_f$ —库区当月累积降雨量，m.

### 2.3 每月向天津市供水的总体积

根据表 2 数据，由式 (8) 可计算出北大港水库每月向天津市供水的总体积 ( $V_S$ )

$$V_S = Q_s t \quad (8)$$

式中： $Q_s$ —十号口门供水月平均流量， $\text{m}^3/\text{d}$ ； $t$ —计算月当月实际天数，d.

表 2 北大港水库十号口门出水流量 (2004)

Table 2 Effluent flux of outlet No. 10 Beidagang reservoir in 2004

月 份	1	2	3	4	5
当月平均 流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	15.9	15.6	15.7	16.6	17.8

注:1. 北大港水库于 2004-01-06 下午 4 时开始向天津市供水,1 月平均流量计算天数为 26 d;2. 北大港水库于 2004-05-21 下午 4 时停止向天津市供水,5 月平均流量计算天数为 21 d.

### 2.4 当月损失水的总体积

根据表 3 数据，由式 (9) 可计算出北大港水库当月损失的水的总体积 ( $V_{L_0}$ )

$$V_{L_0} = (H_1 - H_2) A \quad (9)$$

式中： $H_1$ —计算月月初的水位，m； $H_2$ —计算月下月初的水位，m.

### 2.5 当月渗漏水的总体积

根据物料衡算原理，由式 (10) 可计算出北大港水库当月渗漏水的总体积 ( $V_{L_e}$ )

$$V_{L_e} = V_{L_0} - V_E + V_R - V_S \quad (10)$$

### 2.6 水量衡算结果汇总

将上述各种水源水漏计算结果汇总如表 4 所示，北大港库水库每月都有部分水渗漏，且随着水位的下降，渗漏量有下降的趋势。

表 3 北大港水库水位监测值 (2004)

Table 3 Water level in Beidagang reservoir in 2004

日 期	01-06	02-01	03-01	04-01	05-01	05-22
北大港水 库水位/m	6.53	6.24	5.93	5.60	5.21	4.93

表 4 北大港水库 2004 年 1~5 月各种水源水漏计算结果

Table 4 Calculation of all water source and leakage in Beidagang reservoir from January to May in 2004

$\text{m}^3$

水源水漏类型	2004-01	2004-02	2004-03	2004-04	2004-05
$V_{L_0}$	43 210 000	46 190 000	53 640 000	55 130 000	41 720 000
$V_E$	2 453 136	5 249 419	8 673 588	11 723 320	14 038 780
$V_R$	0	2 682 000	1 415 500	3 307 800	6 645 400
$V_S$	34 344 000	37 739 520	42 050 880	43 027 200	32 296 320
$V_{L_e}$	6 412 864	5 883 061	4 331 032	3 687 280	2 030 300

### 3 氯离子总量衡算及水质咸化数学模型

#### 3.1 原始数据及统计处理结果

根据天津市环保局环境监测站提供的十号口门供水期间(2004年1月6日至5月22日)氯离子监测数据作出图1。随着时间的推移,氯离子浓度总量的趋势增加。氯离子总量衡算特征值(指计算起点值或终点值)的确定采用统计方法,对初始日采用1月6日值,终止日采用5月22日值,以当月氯离子浓度平均值作为下月1日氯离子浓度,计算结果见表5。

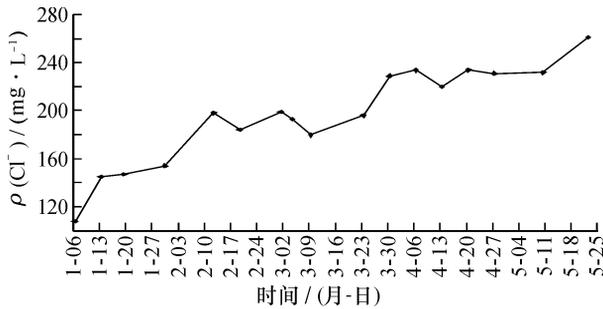


图1 北大港水库供水期间氯离子浓度变化图

Fig.1 Variation of chloride ion in Beidagang reservoir during water supplying

表5 北大港水库氯离子总量衡算的计算日氯离子浓度特征值(2004年)

Table 5 Eigen value of chloride ion on calculational day for mass balance in Beidagang reservoir in 2004 mg/L

计算日	01-06	02-01	03-01	04-01	05-01	05-22
$[\text{Cl}^-]$ 特征值	108	138.5	191	199.4	229.75	246.5

#### 3.2 蒸发浓缩作用与传质作用比重计算

如果不考虑传质作用,则可以用式(11)计算北大港水库只受蒸发浓缩作用后水体氯离子浓度

$$C_{Er} = M_0 / (V_t + V_{Lr}) \quad (11)$$

式中:  $C_{Er}$ —不考虑传质作用只考虑蒸发浓缩作用的水体氯离子浓度, mg/L;  $M_0$ —初始氯离子总量, g;  $V_t$ —在  $t$  天时水库中水的体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_{Lr}$ —在  $t$  天时水库渗漏损失水的体积,  $\text{m}^3$ 。

由于蒸发浓缩作用使水体氯离子浓度增加值和传质作用使氯离子浓度增加值可分别用式(12)和式(13)计算

$$C_{IEr} = C_{Er} - C_0, \quad (12)$$

$$C_{ISr} = C_t - C_{Er} \quad (13)$$

式中:  $C_{IEr}$ —蒸发浓缩作用使水体氯离子浓度的增加值, mg/L;  $C_{ISr}$ —传质作用使水体氯离子浓度的增加值, mg/L;  $C_0$ —水体初始氯离子浓度, mg/L;  $C_t$ —当日水体氯离子浓度, mg/L。

表6为上述各项的计算结果,可进一步计算出传质作用与蒸发浓缩作用使氯离子浓度增加值所占的百分比(图2)。其中,传质作用氯离子浓度增加量约占总增加量的90%以上,蒸发浓缩作用约占10%以下。显然,北大港水库中氯离子总量的增加主要是由于传质作用造成的。因此,在北大港水库向天津市供水期间,库底的传质作用是造成北大港水质咸化的主要原因。与模拟试验研究结果相比,虽然在具体百分比数值上略有差异,但总体趋势一致,均说明了盐碱土传质作用是造成该地区水质咸化的主要因素。

表6 北大港水库氯离子浓度数据处理结果

Table 6 Chloride ion data processing results in Beidagang reservoir mg/L

日期	天数/d	$C_t$	$C_{Er}$	$C_{IEr}$	$C_{ISr}$
2004-01-06	0	108	108.00	0.00	0.00
2004-02-01	26	138.5	108.71	0.71	29.79
2004-03-01	54	191	109.47	1.47	81.53
2004-04-01	85	199.40	111.66	3.66	87.74
2004-05-01	115	229.75	114.31	6.31	115.44
2004-05-22	136	246.5	116.74	8.74	129.76

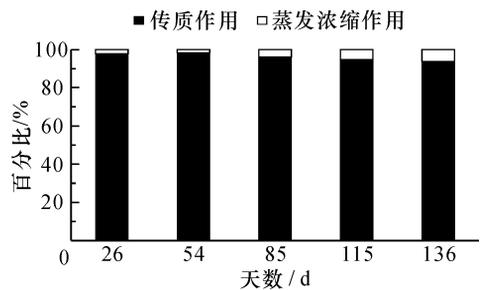


图2 北大港水库传质作用与蒸发浓缩共同作用的氯离子浓度增加所占百分比对比图

Fig.2 Comparison of increased chloride ion due to salinity transfer of saline soil and evaporation concentration in Beidagang reservoir

#### 3.3 北大港水库水质咸化数学模型

根据表6中数据蒸发作用和传质作用增加的氯离子浓度作散点图,由图3可看出,两种作用增加的氯离子浓度都随试验日期延长而增大,且呈正相关,相关系数均大于0.9。因此,可作出回归直线,回归直线的斜率  $k_1$ 、 $k_2$  是式(5)中  $dC_t /$

$dt$ 、 $dC_2/dt$  这 2 个参数，即  $dC_1/dt = 1.024 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ， $dC_2/dt = 0.055 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ，将此参数与初始条件  $C_0 = 108.0 \text{ mg}/\text{L}$  代入式(5)得 2003 ~ 2004 年北大港水库水质咸化模型数学表达式

$$C = 1.079 t + 108.0. \quad (14)$$

式中： $t$ —距计算起始日的天数，d.

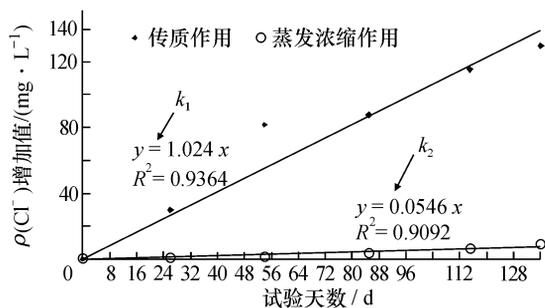


图 3 北大港水库传质作用与蒸发浓缩作用氯离子浓度变化率计算图

Fig. 3 Calculation of  $dC_{\text{tr}}(t)/dt$  and  $dC_{\text{ev}}(t)/dt$  by linear regression method in Beidagang reservoir

## 4 结 论

1) 根据浅水库水质数学模型理论，结合模拟水池试验研究结果，北大港水库水质咸化模型可用完全混合零维模型描述，并将水质咸化模型简化为（以氯离子为代表）

$$C = (dC_1/dt + dC_2/dt)t + C_0.$$

2) 通过对搜集的北大港水库水文、水质数据

进行水量和氯离子的物料衡算可知，传质作用氯离子浓度增加量占总增加量的 90% 以上，蒸发浓缩作用占 10% 以下，充分说明北大港水库水质咸化的主要原因是由于库底盐碱土的传质作用造成的，总的趋势与模拟试验研究结果一致。

3) 根据上述数据，可计算出氯离子浓度随时间的变化率，可得出 2003 ~ 2004 “引黄济津”工程实施期间北大港水库水质咸化模型数学表达式

$$C = 1.079 t + 108.0.$$

受条件所限，未对北大港水库全年水质变化的模型予以研究，所得水质咸化模型仅适用于“引黄济津”工程的北大港水库蓄满水后到供水结束这段时间内水库水质变化预测。建议今后进一步研究时，应多年连续监测水文、水质数据，在大量数据的基础上，建立北大港水库全年水质咸化模型。

## 参考文献：

[1] 赵文玉, 王启山, 赵玉明, 等. “引黄水”在北大港水库蓄存期水质咸化机理分析及防治措施 [J]. 南水北调与水利科技, 2004, 2 (6): 24 - 26.  
 [2] 赵文玉, 王启山, 吴国平, 等. 引黄水在北大港水库蓄存期水质咸化的研究 [J]. 水科学进展, 2005, 16 (6): 763 - 766.  
 [3] 郑彤, 陈春云. 环境系统数学模型 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.  
 [4] 陈眉, 程晓如. 东湖截污工程对改善西南湖区水质的预测研究 [J]. 中国给水排水, 2003, 19 (3): 37 - 39.

## Water Salinization Mathematical Model in Beidagang Reservoir

ZHAO Wen-yu<sup>1</sup>, LIU Guo-qing<sup>2</sup>, LIU Jing-lan<sup>3</sup>, ZHANG Hua<sup>3</sup>, LU Yan-qin<sup>2</sup>, WANG Qi-shan<sup>4</sup>

(1. Department of Resources and Environmental Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. The Fifth Team of Henan Bureau for Non-Ferrous Geology and Mineral Resources, Zhengzhou 450042, China; 3. Geological Institute of North China Geological Exploration Bureau of Tianjin, Tianjin 300181, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** Based on the conclusion from the simulation trial experiment and the water mathematical model in shallow reservoir, the water salinization mathematical model is predigested in Beidagang reservoir. With the data of hydrology and water quality in Beidagang reservoir during the project of Yellow River water transfer for Tianjin from January to May in 2004, the material balance of water quantity and  $\text{Cl}^-$  is calculated and the mathematical expression of water salinization is deduced in Beidagang reservoir. It is quantitatively calculated that over 90% of increased  $[\text{Cl}^-]$  is due to the salinity transfer of the saline soil and the other 10% is due to evaporation concentrating. It is obvious that the former is an important factor from the simulation experiment.

**Key words:** water salinization; mass transfer theory; evaporation concentrating; mass balance