

陈行水库水质模型与自净规律研究

刘登国¹, 卢士强², 林卫青²

(1. 上海市环境监测中心, 上海 200030; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要 应用 WIN/DYNHYD + 和 WASP6 建立了陈行水库水动力模型和水质模型, 并对水质模型中水质参数进行率定和验证, 应用建立的陈行水库水质模型研究了陈行水库的自净规律。研究表明, 陈行水库的水温、水位、流场、水力停留时间对水库自净作用有很大影响, 在水温正常变化范围内, 水温越高, 水力停留时间越长, 陈行水库自净能力就越强, 并提出陈行水库运行管理建议。

关键词 陈行水库; 水质模型; 水动力模型; 自净规律; 水力停留时间

中图分类号: P342+.4; TP319 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2005)02-0040-06

Study on water quality model and self-purification of Chenhang Reservoir

LIU Deng-guo¹, LU Shi-qiang², LIN Wei-qing²

(1. Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract A hydrodynamic model and a water quality model applied to Chenhang Reservoir are established by use of the WIN/DYNHYD + and WASP6 modelling system, and the water quality parameters are calibrated and validated. The water quality model is used to analyze the self-purification mechanism of Chenhang Reservoir. It is concluded that water temperature, water level, flow field, and hydraulic residence time (HRT) have great influences upon the self-purification capacity of Chenhang Reservoir. Within the normal variation range of water temperature, the self-purification capacity is greater in the condition of higher water temperature and longer HRT. Suggestions for the management of Chenhang Reservoir are proposed.

Key words: Chenhang Reservoir; water quality model; hydrodynamic model; self-purification regularity; hydraulic residence time

陈行水库位于上海市宝山区罗泾乡陈行镇岸段, 地处长江口南支南港河段, 上游紧邻小川沙河, 下游紧邻宝钢水库, 利用滩地圈围而成。水库总库容为 914.53 万 m³, 水体面积达 140 hm², 水深平均 3~4 m, 最深处 6~7 m。水库供水能力达到 130 万 m³/d, 约占全市区自来水原水供应总量的 1/5, 该水库为月浦、闸北、吴淞、凌桥、泰和和大场等水厂供应原水。长江原水中 NH₃-N、非离子氨、TP 指标一般劣于Ⅲ类, 水库水质监测数据表明, 出水水质优于进水水质, 说明水库有一定的净化作用。建立水库水质模型是研究水库自净规律方法之一。

本文应用美国环保局 WASP6 (即水质分析模拟程序 6) 和 WIN/DYNHYD + 研究陈行水库中 NH₃-N、BOD、COD_{Mn} 等污染物的自净规律。NH₃-N、BOD、DO 用 WASP6 的 EUTRO 模块的 BOD-DO-NH₃ 系统; COD_{Mn} 用 WASP6 的 TOXI 模块。

1 WASP6 和 WIN/DYNHYD + 简介

由美国国家环保局暴露评价模型中心开发和维护的 WASP 模型系统是代表性的水质模型之一。WASP 模型系统是为分析池塘、湖泊、水库、河流、河口和沿海水域的一系列水质问题而设计的动态的多

作者简介: 刘登国(1976—), 男, 河北南宫人, 硕士, 从事环境监测和水污染防治工作, E-mail: ldg@semc.com.cn

箱式模型 ;WASP6 包含两个模块^[1]:模拟常规水质的 EUTRO 模块和模拟有毒物质污染的 TOXI 模块。WASP6 既可和 DYNHYD5 相连运行,也可和其他水动力程序如 RIVMOD、SED3D 相连运行,如果有已知水力参数,还可单独运行。

WASP 模型系统被广泛地用于水质预测,在国际上,Ambrose^[2,3]、Lung 等^[4,5]、Bierman 等^[6,7]、James 等^[8]、Wu 等^[9]、Kao 等^[10]、Daniel 等^[11];在国内,张祥志^[12]、周东风等^[13]、夏军等^[14]、廖振良等^[15]、贾海峰等^[16]都成功应用 WASP 模型系统解决了实际环境问题。

2 陈行水库水动力模型

2.1 DYNHYD 基本方程

DYNHYD 基本方程(一维圣维南方程组)^[17]包括运动方程和连续性方程。

运动方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -U \frac{\partial U}{\partial x} + \alpha_{g,\lambda} + \alpha_f + \alpha_{w,\lambda} \quad (1)$$

$$\alpha_{g,\lambda} = -g \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2)$$

$$\alpha_f = 1 - \frac{gn^2}{R^{4/3}} |U|U \quad (3)$$

$$\alpha_{w,\lambda} = \frac{C_d \rho_a}{R \rho_w} W^2 \cos \theta \quad (4)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (5)$$

式中: U 为沿通道流速, m/s ; x 为沿通道的距离, m ; t 为时间, s ; λ 为通道角度($^\circ$); $\alpha_{g,\lambda}$ 为沿通道方向重力加速度, m/s^2 ; α_f 为阻力加速度, m/s^2 ; $\alpha_{w,\lambda}$ 为沿通道方向风加速度, m/s^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; n 为粗糙系数取值范围: $0.010 \sim 0.100$; R 为水力半径, m ; C_d 为滞后系数, 0.0026 ; ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; ρ_w 为水密度, kg/m^3 ; W 为高 10 m 相对运动水面的风速, m/s ; θ 为通道方向和风速方向的夹角; Q 为流量, m^3/s ; B 为通道宽, m ; H 为水位, m 。

2.2 水动力计算网格概化

根据水库特点,将水库概化为 17 个节点, 24 个通道,见图 1。节点主要参数:与 WASP6 连接段号、节点水位、节点面积、库底高程;通道主要参数:通道号、通道长、通道宽、水力半径、通道方向、曼宁系数、初始流速、连接通道的节点。节点和通道参数由水库的地形资料得到。

2.3 水动力模型率定和验证

2001 年 10 月份水动力模拟:开始模拟时间为 2001 年 10 月 1 日中午 12 时,截至 2001 年 11 月 1 日中午 12 时,时间步长为 15 s 。边界流量为流入流量

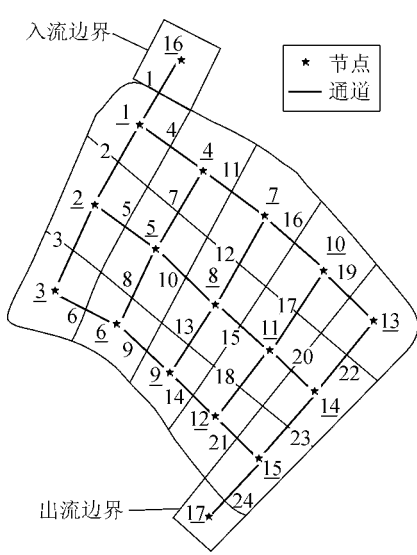


图 1 陈行水库节点和通道示意图

随时间序列函数变化、出流流量为常数。在 10 月份,水库主导风向为 NNE,风速为 4 m/s 。鉴于水库流速非常小,水库的水文监测资料只有进出水库流量,根据以往研究成果、经验与模型试算,水库糙率系数取为 $0.018 \sim 0.02$ 。

2.4 风速和风向对水库流场的影响分析

在无风条件下(2003 年 6 月),水库流量分布见图 2(a)。由图可知,水库流量分布受到水库地形的影响,水库内没有形成回流,流量分布近似均匀。

风对水库通道流量分布影响较大。冬天(1 月),风向是 NNW,风加速度为正加速度,水体主流向沿节点 1—2—3—6—9—12—15 流动,其他区域形成回流,见图 2(b)。夏天(6 月份),主导风是 ESE,风加速度为负加速度,水库主流向沿节点 1—4—7—10—11(13)—14—15,节点 1—2—3—6—9—12—15 形成回流,见图 3(a)。秋天(10 月),主导风向为 NNE,水库在外界流量和风作用下,形成流场,见图 3(b)。

水库流速范围: $0 \sim 0.07\text{ m/s}$,流速数量级在 10^{-2} m/s 。

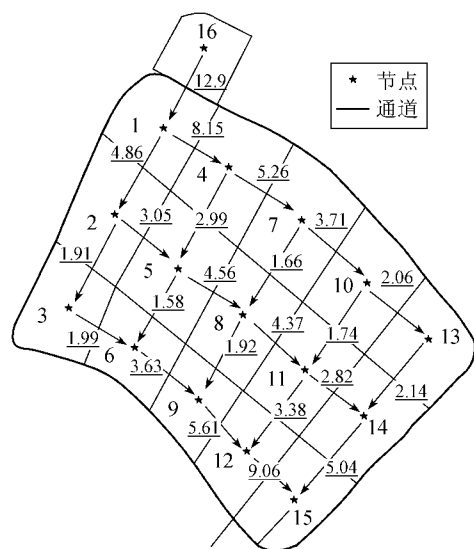
3 陈行水库水质模型

3.1 WASP6 的基本方程

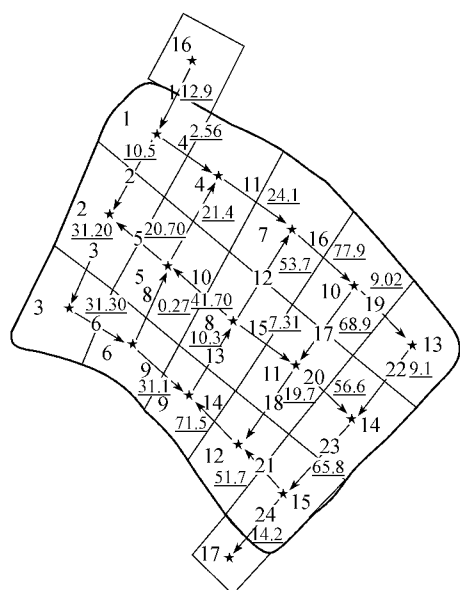
WASP6 的基本方程为污染物在水体中的一维对流扩散方程及特殊反应过程的方程^[1]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(AC) = \frac{\partial}{\partial x} \left(-UAC + EA \frac{\partial C}{\partial x} \right) + A(C_S_L + S_B) + AS_K \quad (6)$$

式中: C 为组分的浓度; t 为时间; S_L 为直接和分散的负荷率; S_B 为边界的负荷率; S_K 为总动力转化率; A 为断面面积; x 为水体纵向长度; U 为断面平



(a) 无风



(b) 有风

图2 6月6日水库流量分布

均流速; E 为纵向离散系数。

3.2 水质模型计算单元概化和模型输入

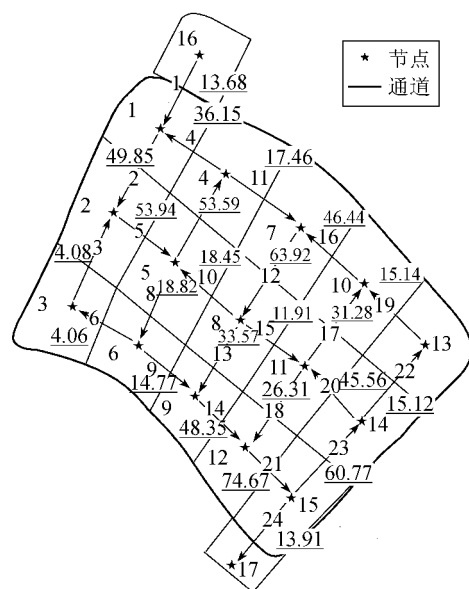
水库水质模型计算单元概化为15段,见图1。

用WASP6中的TOXI模块模拟 COD_{Mn} ,用EUTRO模块模拟BOD、DO、 NH_3-N ,连接WIN/DYNHYD+同步产生的水动力文本文件(*.HYD),时间步长为30min,水质模型含24个交换段,主要参数有交换段间的面积、特征混合长度、离散系数数值;上边界(长江引水)给出水质参数监测值;有关参数和常数:纵向离散系数值 E_X , COD_{Mn} 的总一级降解系数 K_C ,段温度乘子,段底泥需氧量SOD及其温度校正系数, NH_3-N 降解率 K_N 及温度校正系数, NH_3-N 浓度限制的半饱和常数 K_{NBOD} ,CBOD(BOD_5)降解率 K_1 及温度校正系数,CBOD浓度限

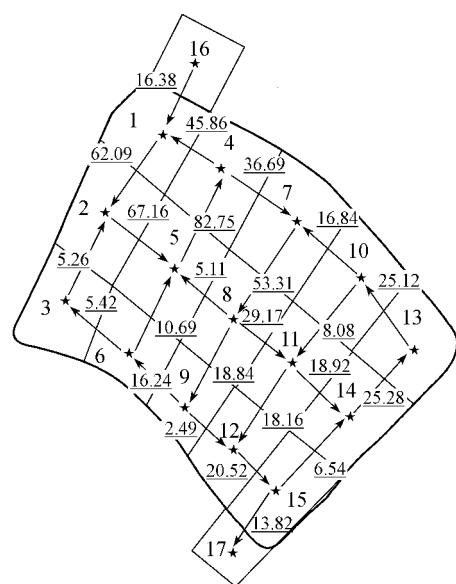
制的半饱和常数 C_{BOD} ,复氧系数 K_2 。

3.3 水质模型率定和验证结果

水质模型率定方法为试算法, K_1 、 K_N 的初值由水库水质参数实验得到;离散系数 E_X 由Fisher等(1979)提出横向混合系数的估算公式得到^[18];其余水质参数由文献[11,19]得到。利用2001年10月水库有代表性实测水质参数 COD_{Mn} 、DO、 BOD_5 、 NH_3-N 与模型计算值进行率定。模型率定结果见图4,率定水质参数值与实验值(估算值)比较见表1。由于 BOD_5 一些实测值低于 BOD_5 检测线,实测值随机变化大,误差大,进而使 BOD_5 验证结果较差,数值计算结果和实测值吻合尚可,所取水质参数数值可作为水库水质模型水质参数。



(a) 1月6日



(b) 10月5日

图3 水库流量分布(有风)

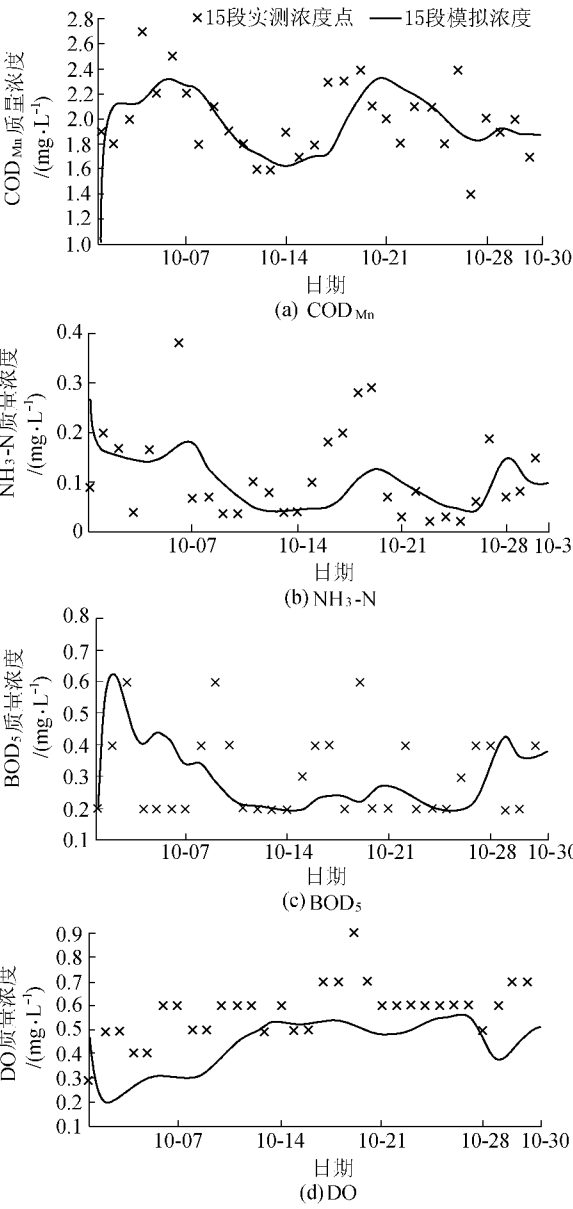


图4 水质参数率定
表1 率定结果与实验值的比较

类别	E_X/d^{-1}	K_C/d^{-1}	K_2/d^{-1}	K_1/d^{-1}	K_n/d^{-1}	$SOD/(g \cdot (m^2 \cdot d)^{-1})$
实验研究值	0.3~1.6	-	-	0.2~1.2	0.17~1.8	-
率定值	1.25	0.06	0.35	0.13	0.37	0.05

4 陈行水库污染物自净规律

根据水库特点和上海季节变化规律,应用水质模型研究水库自净规律,从水库水温、入库流量、水力停留时间和流场变化研究水库污染物自净规律。

4.1 水温对陈行水库自净的影响

水温对水库污染物自净能力的影响很大,在相同的边界条件下,水温高,污染物去除率大,水温低,污染物去除率低。

应用改进的 S-P 方程^[1],将 BOD 分成 CBOD

(BOD₅) 和 NBOD(NH₃-N) 并允许温度随时间变化。

$$CBOD : S_{k5} = -k_d \Theta_d^{T-20} C_5 - \frac{V_{s3}(1-f_{D5})}{D} C_5 \quad (7)$$

$$NBOD : S_{k1} = -k_n \Theta_n^{T-20} C_1 - \frac{V_{s3}(1-f_{D1})}{D} C_1 \quad (8)$$

$$DO : S_{k6} = k_2 \Theta_2^{T-20} (C_s - C_6) - k_d \Theta_d^{T-20} C_5 - \frac{64}{14} k_n \Theta_n^{T-20} C_1 - \frac{S_{SOD} T}{D} \Theta_s^{T-20} \quad (9)$$

式中: S_{ki} 为一段中*i*变量的源或汇项; C_5 为碳化BOD质量浓度,mg/L; k_d 为在20℃时CBOD降解速率,1/d; k_2 为复氧速率,1/d; Θ_d 为 k_d 的温度系数; V_{s3} 为有机物沉降速度; D 为平均段深度,m; f_{D5} 为CBOD溶解比例; Θ_2 为复氧速率温度系数; C_s 为DO饱和质量浓度,mg/L; S_{SOD} 为底泥需氧量,g/(m²·d); C_1 为NBOD质量浓度,mg/L; k_n 为在20℃时NBOD降解速率,1/d; Θ_n 为NBOD温度系数; f_{D1} 为NBOD溶解比例; Θ_s 为SOD温度系数。

水质模型中, CBOD溶解比例(f_{D5})为1, NBOD溶解比例(f_{D1})为1,即没有考虑沉淀项;没有源和汇。以下以NBOD为例。

$$\frac{\partial}{\partial t} (AC) = \frac{\partial}{\partial x} \left(-UAC + EA \frac{\partial C}{\partial x} \right) - k_n \Theta_n^{T-20} C_1 A \quad (10)$$

1月份温度为15℃,6月份为22.5℃, Θ_n 为1.08, k_n 为0.37 d⁻¹;1月份NBOD降解速率为0.37×1.08⁻⁵=0.252 d⁻¹,6月份NBOD降解速率为0.37×1.08^{2.5}=0.448 d⁻¹。在相同的边界条件下,夏天比冬天的水温高,夏天的污染物降解速率比冬天高,污染物去除率高。

应用水库2003年1月份水动力计算结果,边界条件相同,初始水位为5 m;水温分别为22.5℃和15℃;其他水质参数相同,模拟出CBOD、DO、NBOD。水温15℃时,CBOD、NBOD浓度高于对应同一位置水温22.5℃时的CBOD、NBOD浓度,见表2。

表2 污染物水库去除率 %

水温/℃	去除率/%	
	NBOD	CBOD
15	36.3	54.9
22.5	41.8	65.2

4.2 入库流量、停留时间对陈行水库自净的影响

水库自净能力随入库流量变化明显:入库流量越大,水库水位越高,水库自净能力越好。水库自净能力表现为在相同边界流量变化下,水库初始水位越高,出水口的DO浓度也越高,出水口的CBOD浓度、NBOD浓度越低,水库自净能力越大。水库水位

系列分为 4 m、4.5 m、5 m、6 m、7 m、7.2 m ,分别在 1 月份和 6 月份建立水库水质模型 ,模拟 DO、CBOD、NBOD 等参数的变化 ,部分结果见图 5 和图 6。

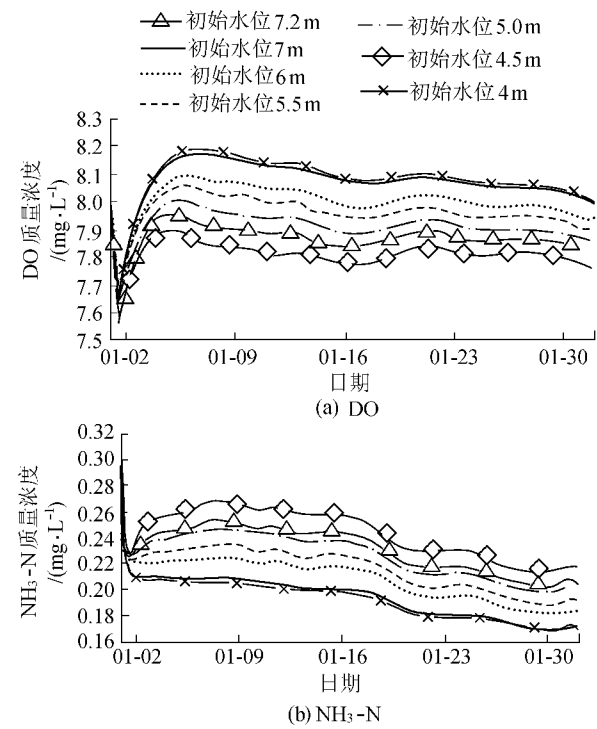


图 5 2003 年 1 月不同水位下第 15 段水质变化趋势

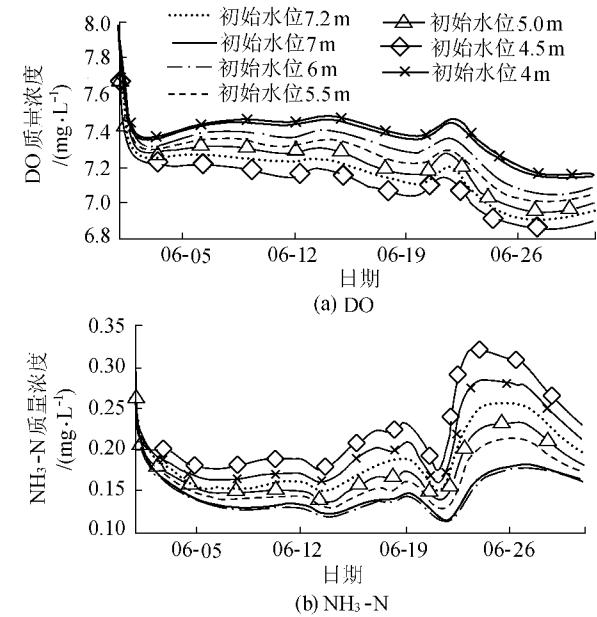


图 6 2003 年 6 月不同水位下第 15 段水质变化趋势

4.3 水力停留时间和流场对水库污染物自净能力的影响

水力停留时间能影响水库的混合过程、污染物的迁移转化 ,水力停留时间长 ,污染物的相对去除率高 ,水库自净能力强。2003 年 1 月和 6 月平均入流量分别为 14.69 m³/s 和 14.24 m³/s ,根据不同水位库容得出总水力停留时间和 NH₃-N 去除率见表 3 ,流

场变化导致水库各段水力停留时间的变化见图 7。1 月份和 6 月份 ,第 3 段和第 13 段的水力停留时间相对其他段的水力停留时间长 ;1 月份 ,第 3 段内污染物浓度最低 ,1 月份水库的库最大去除率位于第 13 段内。6 月份 ,虽然第 3 段和第 13 段的水力停留时间长 ,在水库流场的影响下 ,第 15 段内污染物浓度最低 ,第 15 段内库去除率最高。

表 3 水力停留时间和 NH₃-N 去除率

水位/m	2003 年 1 月		2003 年 6 月	
	水力停留时间/d	NH ₃ -N 去除率/%	水力停留时间/d	NH ₃ -N 去除率/%
4.0	3.64	51.2	3.75	55.2
4.5	4.12	53.7	4.25	59.4
5.0	4.60	54.9	4.75	62.9
6.0	5.57	58.5	5.75	67.7
7.0	6.54	61.3	6.74	70.9
7.2	6.73	61.8	6.95	71.4

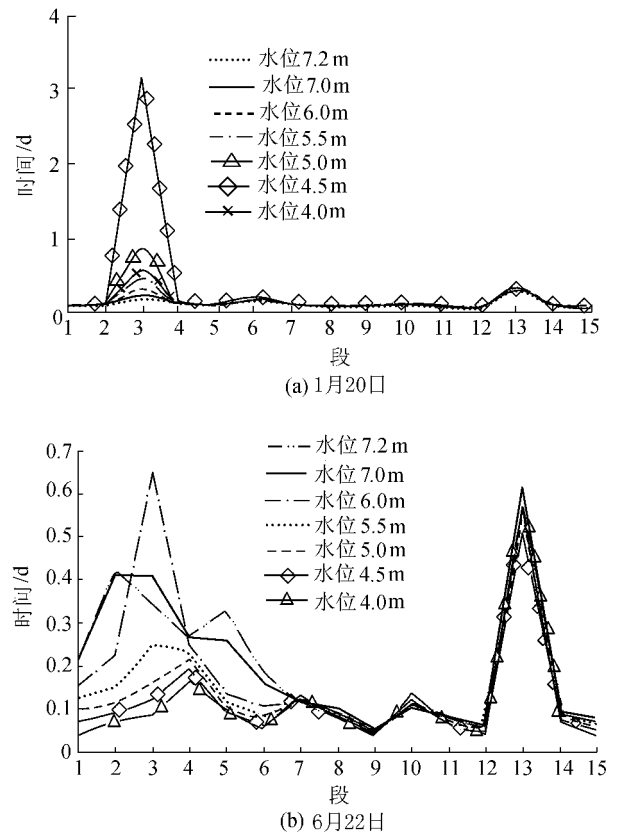


图 7 各段水力停留时间

综上所述 ,总水力停留时间越长 ,水库自净能力越强 ,段水力停留时间长 ,该段污染物浓度不一定最低 ,段污染物的浓度还与该段所处位置、水库地形、水库流场等因素有关。

5 水库运行管理建议

5.1 水库避污运行

研究表明 :当取水口的 NH₃-N 为地表水Ⅲ类水

质标准或优于Ⅲ类水质标准时(GB 3838—2002《地表水环境质量标准》),通过水库污染物自净降解,水库出水口可以达到Ⅱ类或Ⅰ类标准。当水库高水位运行时,取水口的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在Ⅳ类水质标准情况下,水库出水口也可以达到Ⅱ类水质标准。

5.2 水库水量调控和最佳停留时间

为充分利用水库自净能力,将流量调控与水库库容综合考虑,使水库水力停留时间控制在可行范围内,水力停留时间太小,污染物去除率不高;水力停留时间太长,水库可能发生水体富营养化,宝钢水库就曾因水力停留时间过长而出现部分水体的富营养化。因而,综合考虑污染物的去除率和运行库容,建议水库尽量采用高水位5.5 m以上运行,水力停留时间控制在7~10 d比较合理。

5.3 实施预处理

采用人工调控加药(如混凝剂聚合氯化铝、聚合氯化铁和氯水等)使药剂和长江引水充分混合,聚合氯化铝、聚合氯化铁等絮凝剂加速水体中颗粒物沉降,降低水体浊度;氯水能杀死大肠杆菌等细菌,从而提高出水水质。

6 结 论

应用WIN/DYNHYD+和WASP6建立了陈行水库水动力模型和水质模型,应用水质模型研究了水库的自净规律。研究表明,水温越高,水力停留时间越长,则水库自净能力越强,提出水库的最佳水力停留时间和合理的运行水位。

参考文献:

[1] Tim A W, Ambrose R B, Martin J L, et al. WASP Version 6.0 Draft: User's Manual[EB/OL]. <http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/wasp.htm>. 2001.

[2] Ambrose R B. Modeling volatile organics in the Delaware Estuary[J]. J Environ Eng, 1987, 113(4): 703~721.

[3] Ambrose R B. Hydrodynamic and water quality modelling of the Lower Don River[A]. Russia. In: Peterson N E, Allan R J, Tsirkunov V V. Hydrological, Chemical and Biological Processes of Transport of Contaminants in Aquatic Environments[C]. International Association of Hydrological Sciences, UK: Wallingford, Oxfordshire, 1994. 251~260.

[4] Lung W S, Martin J L, McCutcheon S C. Eutrophication and mixing analysis of embayments in Prince William Sound[J]. Alaska. J Environ Eng, 1993, 119(5): 811~824.

[5] Lung W S, Larson C E. Water quality modeling of the upper Mississippi River and Lake Pepin[J]. J Environ Eng, 1995, 121(20): 691~699.

[6] Bierman V J Jr, James R T. A preliminary modeling analysis of water quality in Lake Okeechobee, Florida: diagnostic and sensitivity analysis[J]. Water Res, 1995, 29(12): 2767~2775.

[7] Bierman V J Jr, Hinz S C, Zhu D W, et al. A preliminary mass balance model of primary productivity and dissolved oxygen in the Mississippi River Plume: Inner Gulf Shelf Region[J]. Estuaries, 1994, 17(4): 886~899.

[8] James R T, Bierman V J Jr. A preliminary modeling analysis of water quality in Lake Okeechobee, Florida: calibration results[J]. Water Res, 1995, 29(12): 2755~2766.

[9] Wu R S, Sue W R, Chen C H, et al. Simulation model for investigating effect of reservoir operation on water quality[J]. Environmental Software, 1996, 11(1-3): 143~153.

[10] Kao J J, Lin W L, Tsai C H. Dynamic spatial modeling approach for estimation of internal phosphorus load[J]. Water Res, 1998, 32(1): 47~56.

[11] Daniel L T. Spatial and temporal hydrodynamic and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA) coastal plain[J]. Ecological Modeling, 1999, 114: 137~173.

[12] 张祥志. WASP4在太浦河水质管理中的应用[J]. 环境导报, 1996(5): 5~7.

[13] 周东风, 杨金海. 应用WASP5水质模型划分水库水源保护区[J]. 山西水利科技, 1998(4): 10~11.

[14] 夏军, 奚明. 水体富营养化综合水质模型及其应用研究[J]. 上海环境科学, 2000(1): 302~304.

[15] 廖振良, 林卫青, 徐祖信. WASP5系统及其述评[J]. 上海环境科学, 2001(1): 3~6.

[16] 贾海峰, 程声通, 杜文涛. GIS与地表水水质模型WASP5的集成[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001(8): 125~128.

[17] Robert B A, Wool T A, Martin J L. The Dynamic Estuary Model Hydrodynamics Program, Dynhyd5 Model Documentation and User Manual Environmental Research Laboratory[R]. US EPA Athens, GA, 1993.

[18] Fisher H B. Mixing in Inland and Coastal Waters[M]. New York: Academic Press, 1979. 483.

[19] George I B, William B M, Donald B P, et al. Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling (Second Edition)[R]. EPA/600/3-85/040 1985.

(收稿日期: 2003-12-16 编辑: 高渭文)