

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0031

王家彪, 雷晓辉, 王浩, 等. 基于水库调度的河流突发水污染应急处置[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 01-06, 92. WANG J B, LEI X H, WANG H, et al. Emergency operation of reservoirs for sudden water pollution incidents in natural rivers[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 01-06, 92. (in Chinese)

基于水库调度的河流突发水污染应急处置

王家彪^{1,2}, 雷晓辉², 王浩^{1,2}, 廖卫红², 李宏亮³, 刘松⁴

(1. 清华大学, 北京 100084; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;
3. 广西水利电力勘测设计研究院, 南宁 530023; 4. 广西壮族自治区水利厅, 南宁 530023)

摘要:天然河流水污染事件频发, 如何运用水库应急调度降低污染损失具有重要意义。以突发水污染事件应急处置为目标, 分别构建了水污染溯源、浓度预测和水库应急调度模型, 并通过数值模拟的方式对水库调度方案进行优选, 最终建立了一套完善的水库应急调度技术体系。将技术运用于贺江2013年水污染事件应急处置分析, 结果表明, 模型重构的监测断面污染物浓度过程与实测过程较为接近, 优选的水库调度方案及其处置效果也与实际情况基本吻合。结果说明本文建立的水库应急调度关键技术体系可运用于指导河流突发水污染事件应急处置。

关键词: 突发水污染; 水库调度; 应急; 溯源

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0001-06

Emergency operation of reservoirs for sudden water pollution incidents in natural rivers

WANG Jiabiao^{1,2}, LEI Xiaohui², WANG Hao^{1,2}, LIAO Weihong², LI Hongliang³, LIU Song⁴

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Guangxi Water and Power Design Institute, Nanning 530023, China;
4. The Water Conservancy Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530023, China)

Abstract: Water pollution incidents occur frequently in the natural river systems. How to operate the reservoirs on rivers to minimize the pollution loss is surely of great significance to the emergency disposal. In this paper, we established several corresponding models for the sequential processes of source identification, prediction of contaminant concentration, and reservoir operation. Using numerical simulation method, we optimized the reservoir operation scheme. Eventually, we proposed a relatively complete technical system for emergency disposal and then applied it to the case of Hejiang pollution incident in 2013. Results showed that the simulated time series of contaminant concentration were similar to the measured series. The optimized scheme and its disposal result generally fit the actual situation. The results indicated that the proposed technical system of emergency disposal with reservoir operation is feasible and efficient for real sudden water pollution incidents in natural rivers.

Key words: sudden water pollution; reservoir operation; emergency; source identification

突发水污染事件具有不确定性、扩散性、危害性、处理艰巨性和影响长期性等特点, 且难以从根本上杜绝, 其污染物排放也无固定途径^[1-3]。对于突发水污染的应急处置通常可分为工程性措施和非工程

性措施两大类^[4]。在天然河流中, 若采用工程措施进行处置(吸附、混凝等), 不仅投入成本大, 而且一些化学药物的运用还存在负面影响。而通过水库应急调度的方式不仅能稀释河流污染物浓度, 还可加快

收稿日期: 2017-04-14 修回日期: 2017-09-25 网络出版时间: 2017-12-29
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171229.0854.002.htm>
基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0406004)

Fund: National Key Research and Development Program of China during the Thirteenth Five year Plan Period (2017YFC0406004)

作者简介: 王家彪(1990), 男, 江西人, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: waterwhu@foxmail.com

通讯作者: 雷晓辉(1974), 男, 北京人, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源与水力学方面研究。E-mail: rain_fields@qq.com

污染团的运移、弱化扩散作用,有效缩减水污染影响范围。如2005年广东北江镉污染事件中采用了“加大上游水库排量以稀释水体污染物、利用人工小洪峰加快污染物运移到下游处置区”的应急措施有效地控制了污染事故的恶化。2012年广西龙江发生的镉污染事件中,通过调度柳江上游大埔、麻石等水库水量进行冲污稀释,保证了下游柳州市供水安全。

关于水库应急调度的研究一直是流域管理的热点和难点。苏友华^[5]研究了崇左市各县区突发水污染时如何利用上游水库进行应急调度的调水方案与实施办法。辛小康等^[6]探讨了三峡水库应急调度措施对长江宜昌段水污染事故处置的有效性和可行性,研究表明水库调度对瞬排型水污染事故的处置作用明显。陶亚等^[7]探讨了包括工程应急调度、吸附拦截等在内的多种污染物应急处置措施其应用原理和处置效果。余真真等^[8]研究了小浪底水库应急调度对下游水污染事故的处置情况,结果表明水库应急调度降低了下游一定范围内的污染程度。

尽管如此,运用水库调度进行河流突发水污染应急处置仍存在诸多问题^[9],包括水污染事件信息掌握不足、水库调蓄功能发挥不充分、应急处置理论和技术不完善等。本文以天然河流突发水污染应急处置为目标,研究如何运用水库进行合理调度以实现突发水污染的快速处置、最大可能降低污染损失,完善水库应急调度理论和技术,并通过实例分析水库应急调度的可行性,以期为我国河流突发水污染应急处置提供理论指导和技术借鉴。

1 基本原理与模型构建

运用水库调度进行突发水污染应急处置主要通过污染物溯源、浓度预测和水库调度方案优选三个关键技术环节来实现。本文对这三个环节分别构建相应的数值计算模型。

1.1 河道水流计算模型

河道中污染物浓度预测离不开水流的计算。在重力、水压力、沿程阻力和惯性力作用下,由动量守恒原理推导水流运动方程见式(1),并在不可压缩假定下得到水流连续性方程见式(2),方程组可采用四点偏心隐格式(Preimann格式)差分方法求解^[10]。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 |u|}{R^{4/3}} Q = 0 \quad (2)$$

式中: x 为沿河道距离(m); t 为时间(s); A 为断面过流面积(m^2); Q 为断面过流流量(m^3/s); u 为断

面平均流速(m/s); q 为支流入流流量(出流为负)($m^3/(s \cdot m)$); Z 为河道水位(m); g 为重力加速度(m/s^2); n 为曼宁糙率系数; R 为水力半径(m)。

1.2 污染物浓度预测模型

河道中污染物的迁移扩散是三维非稳态问题,其过程不仅与水流变化有关,还受水温、风速等因素影响。实际计算中,模拟水质全过程并不可行,因此在构建水质模型时可对问题进行适当简化。当河道中污染物沿水平和垂向混合时间短、能快速混合至横向均匀时,近似认为污染物只随水流沿纵向发生对流扩散。考虑一级反应下的污染物对流扩散方程见式(3)。

$$\frac{\partial AC(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial QC(x,t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(DA \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right) - kAC(x,t) + \sum S \quad (3)$$

式中: $C(x,t)$ 为所计算的断面时刻污染物浓度(mg/L); D 为包括弥散作用在内的纵向扩散系数(m^2/s); k 为反应速率常数(s^{-1}); S 为源汇项($g/(m \cdot s)$),当河道中有污染物汇入时,此项不为0;其余同式(1)和(2)。

在水流计算基础上,方程(3)采用差分方法进行求解。特别的,在均匀紊流条件下可求得方程(3)解析解^[11],见式(4)。

$$C(x,t) = \frac{M_0}{A \sqrt{4\pi Dt}} \exp \left[- \frac{(x-ut)^2}{4Dt} - kt \right] \quad (4)$$

式中: u 为断面平均流速(m/s); m_0 为进入水体污染物强度(kg)。

在水污染应急调度过程中,可根据式(4)对不同调水方案下的河道污染物浓度变化情况进行快速预测。

1.3 污染物溯源模型

突发水污染溯源技术通过研究污染物在河渠中迁移转化规律,依据所观测的污染物浓度过程推测出污染物排放位置、排放时间以及排放强度。作为污染物浓度预测的反问题^[12],污染物溯源具有非线性和不稳定性特征^[13],计算内容更为复杂。本次研究考虑了一种基于概率密度函数的溯源方法,方法通过对污染物逆向位置概率密度与正向浓度之间关系进行回归分析,构建一个以污染物排放位置、排放时间和排放强度为参数的优化模型。

由 $\int C(x,t) dx = M_0$, 可对 $C(x,t)$ 归一化, 见下式:

$$c(x,t) = C(x,t)/M_0 \quad (5)$$

式中: $c(x,t)$ 为对应于 $C(x,t)$ 的单位质量污染物浓度值,具有 m^{-1} 的量纲,表示了污染物质 t 时刻出现在 x 断面的概率。

在河道中,以 $P(x, t')$ 表示由观测断面 x_d 判定的 t' 时刻污染源在 x_s 处的概率(即污染物由 x_s 断面经时间 $t_d - t'$ 运输到 x_d 断面的概率),则 $P(x_s, t')$ 满足对流扩散方程(3)的伴随状态方程以及归一化条件^[12] ($P(x, t')$ 也具有 m^{-1} 的量纲),见式(6)和式(7)。

$$-\frac{\partial P(x_s, t')}{\partial t} + \frac{\partial(QP(x_s, t')/A)}{\partial x} + D \frac{\partial^2 P(x_s, t')}{\partial x^2} = 0 \quad (6)$$

$$P(x_d, t_d) = 1 \quad (7)$$

式中: t' 为逆向计算时间点; t_d 为污染物浓度观测时间点(s); 式(7)表示的是: 污染物未发生输运($t' = t_d$)而出现在观测断面时, 污染源只能是在观测断面处。

类似于浓度预测, 在均匀紊流条件下, 可得到方程(6)解析解, 如下:

$$P(x, t') = \frac{1}{\sqrt{4\pi D(t_d - t')}} \cdot \exp\left[-\frac{(x_d - x_s - u(t_d - t'))^2}{4D(t_d - t')}\right] \quad (8)$$

结合式(5), 分别比较式(3)和(6)与式(4)和(8)可看出, $P(x_s, t')$ 与 $c(x, t)$ 形式完全一致。事实上, $P(x_s, t')$ 与 $c(x, t)$ 两者关系都可用图 1 进行确定, 图中箭头表示输运(移流项)方向。

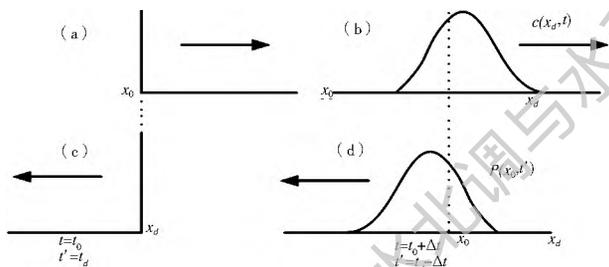


图 1 正向浓度输运与逆向位置概率输运过程^[14]

Fig. 1 Processes of forward concentration and backward probability transport

图 1 中, (a) 和 (b) 表示初始时间 t_0 和经过 Δt 时间后的污染物浓度分布, (c) 和 (d) 表示初始监测时间 t_d 以及往前追溯 Δt 的位置概率密度分布。当 $t - t_0 = t_d - t'$ 时, 污染物从源 x_0 经时间 $t - t_0$ 运动到断面 x_d 处的概率 $c(x_d, t)$, 与观测者位于断面 x_d 处判断污染物由断面 x_0 经时间 $t_d - t'$ 运动到断面 x_d 处的概率相等。即当 $t - t_0 = t_d - t'$ 时, 式(9)成立。

$$P(x_0, t') = c(x_d, t) \quad (9)$$

由图 1 和式(9)可看出, 正向浓度过程与逆向位置概率过程具有高度耦合性, 两者除了计算时间方向相反外, 其余完全一致。因此可基于这种耦合关系由 $P(x_s, t')$ 计算 $c(x_d, t)$, 构建优化模型实现溯源计算。

首先以计算浓度和观测浓度误差最小确定出模型目标函数如下^[14-16]:

$$\min \sum (M_0 \cdot P_i(x_0, t_0) - C_i)^2 \quad (10)$$

式中: x_0, t_0 和 M_0 即为所求污染物排放位置、时间和强度三参数; C_i 代表观测系列浓度值(mg/L)。

约束条件 x_0, t_0 和 M_0 的取值范围由先验信息给定, 一般是现场调查或由已有资料分析得出, 见式(11)和至(13):

$$x_{0\min} \leq x_0 \leq x_{0\max} \quad (11)$$

$$t_{0\min} \leq t_0 \leq t_{0\max} \quad (12)$$

$$M_{0\min} \leq M_0 \leq M_{0\max} \quad (13)$$

通过求解上述优化模型, 可实现污染物的快速溯源。

1.4 水库应急调度模型

基于水库调度的突发水污染应急处置其本质上是水库出库流量的分配问题。若以水库水资源量损失最小和处置历时最短为目标进行调度, 则目标函数如下:

$$G_1 = \min \left\{ \sum_{i=1}^n Q_i T \right\} \quad (14)$$

$$G_2 = \min \left\{ T \right\} \quad (15)$$

式中: G_1 为目标调水量(m^3); G_2 为目标调水历时(h); n 为参与应急调度的水库数目; Q_i 为流域第 i 个水库出库流量(m^3/s); T 为调水时间。

水库调度过程中, 不仅受水库可用水量 and 河道水流演进的约束, 还要求控制断面处水质必须达标。

$$\text{水库供水量约束: } Q_i T \leq V_{i\max} \quad (16)$$

$$\text{水流水质联动约束: } C_k(t) = f(x_0, t_0, M, Q_1, \dots, Q_n) \quad (17)$$

$$\text{控制断面水质浓度约束: } C_k(t) \leq C_{k\max} \quad (18)$$

式中: $V_{i\max}$ 表示第 i 个水库最大可供水量(m^3); k 为流域水质控制断面编号, 取值 1, 2, ...; $C_k(t)$ 表示第 k 个控制断面处污染物计算浓度值(mg/L); $f(x_0, t_0, M, Q_1, \dots, Q_n, t, k)$ 表示水流水质联动约束下第 k 个控制断面处的浓度过程, 是浓度值与污染源参数(x_0, t_0, M)及调度水量 Q_1, \dots, Q_n 和变量 t, k 的一种抽象映射; $C_{k\max}$ 表示第 k 个控制断面处允许的最大污染物浓度值(mg/L)。

由此建立的优化调度模型其约束条件都具有非线性, 其中式(17)中水流水质联动约束很难通过具体表达式进行简化。因此, 模型可采用遗传算法(GA)或微分进化算法(DEA)进行求解^[14, 17]。尽管如此, 流域多水库调度时通常难以找出或无最优解, 此时可通过多组方案比选的方式寻找满意解^[18], 实现水库调度方案的优选。

2 关键技术体系

流域突发水污染后,需第一时间启动应急监测方案,对污染事件进行诊断。在确定污染物超标河段后,根据监测浓度和初步诊断结果,对水污染进行快速追踪溯源,并依据溯源结果到现场进行排查确认。然后,运用水污染快速预测模型预估污染可能波及的河段和控制断面处污染浓度变化过程,对整个污染事件进行重构。最后,根据水污染应急处置目标拟定多组水库调度方案并进行模拟计算,对不同方案的处置效果进行对比分析。在分析调度方案合理性时,还需对方案的可能影响进行评价,如发电效益损失。另外,在水污染应急处置中,流域启动水量调度时一般会配合以工程方法,如拦截吸附、混凝沉降等,在应急调度方案拟定时应予以考虑。

分别将所构建的计算模型运用于突发水污染应急处置各个环节,构建出一套完整的水库应急调度技术体系,并确立基于水库调度的突发水污染应急处置实现流程如图2所示。由于应急调度需实时决策,因此实现流程中存在动态调整与反馈修正的闭环过程,即根据控制断面处计算的浓度过程不断调整应急调水方案,直到断面处浓度达标。

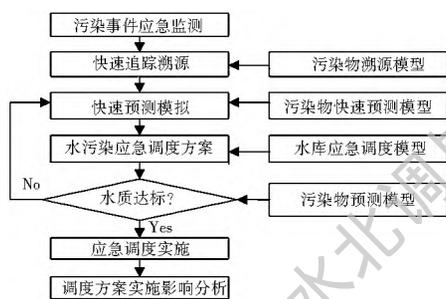


图2 突发水污染应急调度实现流程

Fig. 2 Implementation process flow of emergency operation for sudden water pollution incidents on rivers

3 应用实例

2013年7月,广西贺江流域发生镉污染事件,贺江干流近110 km河段受到污染波及,干流上合面狮水库整个库区水体被污染,应急处理经费高达几千万元。本文以贺江2013年水污染事件为应用实例,分析如何应用所构建的水库应急调度技术体系实现河流突发水污染的应急处置。

3.1 污染物溯源分析

根据实测资料,2013年7月7日6时监测到贺江支流马尾河河口处镉浓度严重超标,同时在贺江干流厦岛断面处(马尾河汇入口上游约2 km)并未检出镉超标情况。事发时具体监测断面布设见图3。



图3 2013年贺江水污染监测断面布设示意图

Fig. 3 Layout of pollution monitoring sections during the 2013 Hejiang pollution incident

根据监测数据,首先由所建立的污染物溯源模型和浓度预测模型对污染事件进行溯源和重构,计算结果见图4。

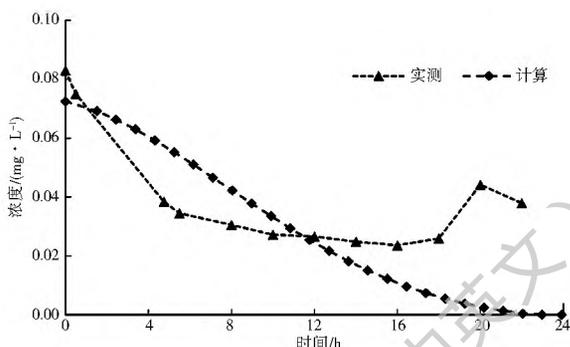


图4 马尾河口断面镉浓度重构过程

Fig. 4 Simulated Cd concentration time series in the Mawei River estuary section

由图4可看出,通过污染物溯源模型和浓度预测模型还原的马尾河口污染物浓度过程与实际过程基本一致,无论是浓度峰值还是峰现时间都很接近。尽管计算的浓度过程未能反映出实测过程中的第二峰值,但两者具有相同的变化趋势。考虑到应急调度方案的拟定主要受峰值和峰现时间以及浓度变化趋势影响,模型溯源结果可用于调度方案分析。

3.2 应急调度方案优选

根据《贺江重金属污染处置应急调水方案》,拟定合面狮水库按300 m³/s的流量下泄污水,并通过联合调用龟石水库2.484亿m³和爽岛水库1.173

亿 m³ 有效库容进行补水和稀释, 尽可能降低下游水体污染程度, 控制下游信都超标 2.5 倍(标准 0.005 mg/L) 以内, 封开江口镇(贺江河口) 超标 1.5 倍以内。为此, 需通过模型分析确定出满足合面狮污水处置要求的龟石水库和爽岛水库调水量及调水时长(图 5)。受篇幅限制, 本文仅探讨上游龟石水库按 180 m³/s 的固定流量进行放水时下游爽岛水库的最优调水方案。

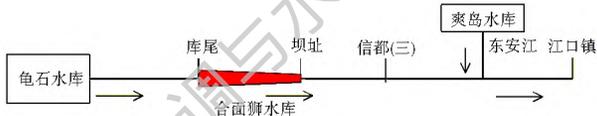


图 5 合面狮水库污染水体应急处置示意图
Fig. 5 Schematic of emergency disposal for the polluted water in Hemianshi Reservoir

由于合面狮库区为狭长型河道, 水流和水质计算都可采用一维模型。假定应急处置前合面狮库区污染物浓度已混合均匀。根据图 5 中所示信息, 计算出调水处置 10 d (1 旬) 后合面狮库区范围内浓度变化见图 6。

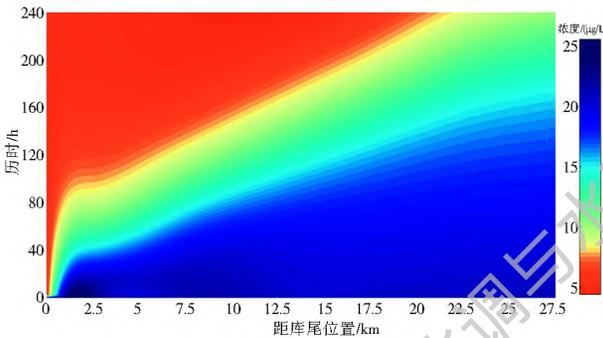


图 6 调水处置 10 d 后合面狮库区镉浓度变化过程
Fig. 6 The change process of Cd concentration in Hemianshi Reservoir ten days after the water transfer

从图 6 可看出, 实施应急处置 10 d 后水库坝前(图 6 中区域右边界最上端) 浓度已稀释到 0.012 mg/L, 超标约 1.4 倍, 库区范围有一半以上河段浓度降到了 0.005 mg/L。可见上游水库的补水有力稀释了库区污染水体, 降低了出库污水的浓度。

根据得到的出库水流浓度过程, 分别计算爽岛水库调水 100 m³/s、150 m³/s、180 m³/s 以及 250

m³/s、300 m³/s 时合面狮下游信都和江口镇 10 d 后对应浓度过程见图 7 和图 8。其中, 由于东安江汇入断面在信都下游, 因此信都断面浓度过程不受爽岛水库调水量的影响。

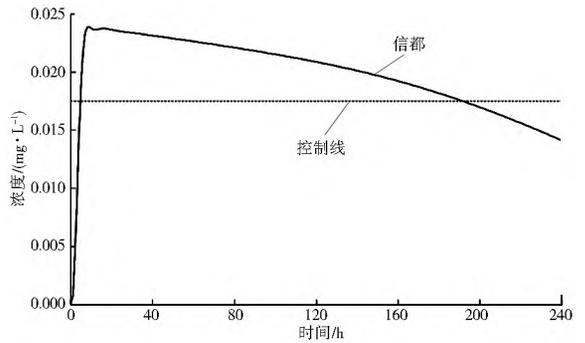


图 7 信都断面镉浓度变化过程

Fig. 7 The change process of Cd concentration in Xindu Section

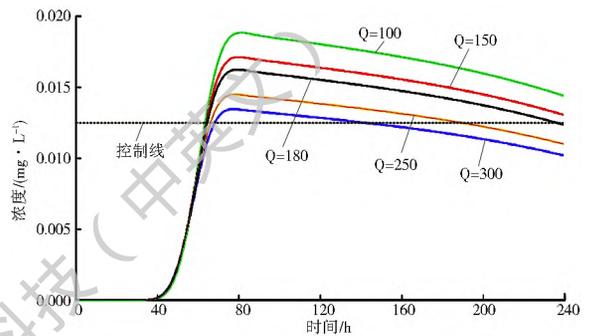


图 8 江口断面镉浓度变化过程

Fig. 8 The change process of Cd concentration in Jiangkou Section

从图 7 和图 8 中可看出, 上游龟石水库按 180 m³/s 的流量放水 7.5 d 后可满足信都超标 2.5 倍以内的控制要求。而爽岛水库若按同样流量进行调水, 则大约需 10 d 的时间才能满足江口超标 1.5 倍以内的控制要求, 但在调水流量为 250 m³/s 时可将调水时间缩短到 7.5 d。因此, 初步确定调水方案为龟石水库放水 180 m³/s, 爽岛水库对应调水 250 m³/s, 应急处置 7.5 d 后能满足下游信都和江口断面水质控制要求。

为进一步确定各水库间调水关系, 尽可能节约水资源, 对爽岛水库不同调水流量下允许的调水时长和调水 10 d 后的江口水质进行分析, 并计算出对应调水方案下所需的处置时间和耗水量, 结果见表 1。

表 1 爽岛水库调水方案分析

Tab. 1 Analysis about the water transfer schemes for Shuangdao Reservoir

调水流量 / (m ³ · s ⁻¹)	允许调水时长/d	调水 10 d 后江口镉浓度 / (mg · L ⁻¹)	超标倍数 / (0.005 mg · L ⁻¹)	江口浓度控制	
				最短处置时间/d	对应消耗水量/ 亿 m ³
100	13.6	0.014 4	1.88	> 10.0	> 0.864
150	9.10	0.013 0	1.60	> 10.0	1.173
180	7.50	0.012 3	1.46	9.8	1.173
250	5.40	0.011 0	1.20	7.9	1.173
300	4.50	0.010 2	1.04	5.9	1.173

从表1中可看出,在爽岛调水流量为 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 时,应急处置所需时间和有效库容允许的调水时间最为接近,但此时允许调水时间只有4.5 d,而根据图7,在龟石水库补水 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 情况下信都断面至少要7.5 d才能满足水质控制要求,加之流量过大有可能带来洪水问题, $300\text{ m}^3/\text{s}$ 的调水方案并不可行。相比而言,在爽岛调水流量为 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 时,虽然应急处置所需时间比有效库容允许的调水时间多2.3 d,但分析图8可发现,在合面狮污水开始下排的64 h以内江口浓度并没有超控制线,而这64 h的时长正好与调水 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 方案超出的允许调水时长接近,这说明如果爽岛水库在起调时间上适当滞后的话,采用 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 调水方案是可行的。事实上可给出一种可行方案:控制爽岛水库起调后的出库水流刚好滞后合面狮开始排污后2.5 d流入贺江干流,按 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 的方案调度爽岛水库有效库容用完后可结束合面狮水库应急处置任务。

另外,根据水利厅下发的《贺江重金属污染处置应急调水方案》,事发后拟定的调水方案之一是:合面狮按 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 下泄污水,龟石按 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 放水,而爽岛水库调则按 $181\text{ m}^3/\text{s}$ 调水。根据水利厅《信息简报》第8期,截止7月14日18时贺江流域镉指标全线达标。从资料中可看出,本文研究的调度方案和处置效果都与实际情况较为吻合。

4 结论

本文从我国日益严峻的河流水污染问题出发,研究了基于水库调度的河流突发水污染应急处置问题。论文首先构建了污染物溯源、预测和水库调度模型,建立了一套较为完善的水库应急调度技术体系。将技术运用于2013年贺江水污染事件中合面狮水库的污水应急处置,经分析得出了在“合面狮水库按 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下泄污水、龟石水库按 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 下放清水”情况下的爽岛水库调水方案:控制爽岛起调后的出库水流刚好滞后合面狮开始排污后2.5 d流入贺江干流,按 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 调度爽岛水库 1.173 亿 m^3 有效库容用完。所得出的调度方案和处置效果与实际情况较为吻合。通过实例应用,一方面论证了天然河流运用水库调度进行突发水污染处置的可行性,另一方面也说明本文研究的技术体系可用于指导实际突发水污染事件的应急处置。

参考文献(References):

[1] 徐兴东.流域突发性水污染事故风险应急防范系统研究[D].

- 兰州:兰州大学,2008.(XU X D. Study on the risk prevention systems for basin sudden water pollution accidents [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. (in Chinese))
- [2] 李青云,赵良元,林莉,等.突发性水污染事故应急处理技术研究进展[J].长江科学院院报,2014,31(4):6-11.(LI Q Y, ZHAO L Y, LIN L, et al. Review of emergency treatment technologies for sudden water pollution accidents[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(4): 6-11. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2014.04.002.
- [3] 陆曦,梅凯.突发性水污染事故的应急处理[J].中国给水排水,2007,23(8):14-18.(LU X, MEI K. Emergency treatment of sudden water pollution accident[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(8): 14-18. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2014.04.002.
- [4] 徐月华.南水北调东线一期工程南四湖突发水污染仿真模拟及应急处置研究[D].济南:山东大学,2014.(XU Y H. Simulation and emergency disposal research on sudden water pollution of Nansi Lake for the first stage of the Eastern Route of the South to North water Diversion Project [D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese))
- [5] 苏友华.崇左市突发性水污染事件应急调水分析[J].企业科技与发展月刊,2011,20:115-117.(SU Y H. The Analysis of emergent water dispatch for sudden water contamination events in Chongzuo[J]. Enterprise Science And Technology & Development, 2011, 20: 115-117. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-0688.2011.20.042.
- [6] 辛小康,叶闽,尹炜.长江宜昌江段水污染事故的水库调度措施研究[J].水电能源科学,2011,29(6):46-48.(XIN X K, YE M, YIN W. Research on reservoir operation measure of water pollution accident in Yichang Segment of Yangtze River[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(6): 46-48. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2011.06.015.
- [7] 陶亚,任华堂,夏建新.突发水污染事故不同应对措施处置效果模拟[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(2):203-213.(TAO Y, REN H T, XIA J X. Effect analysis of different emergency measures for accidental water pollution[J]. 2013, 21(2): 203-213. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2013.02.002.
- [8] 余真真,张建军,马秀梅,等.小浪底水库应急调度对下游水污染事件的调控[J].人民黄河,2014,36(8):73-75,100.(YU Z Z, ZHANG J J, MA X M, et al. Control ranges of emergency dispatches in Xiaolangdi reservoir for downstream water pollution incidents[J]. Yellow River, 2014, 36(8): 73-75, 100. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2014.08.022.
- [9] 郝丽娟,蔡中跃.应对突发性水污染事故存在的问题和建议[J].北京水务,2007(2):34-35.(HAO L J, QI Z Y. Question and advice of facing accident water pollution[J]. Beijing Water, 2007(2): 34-35. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-4637.2007.02.016.
- [10] 王船海,李光焱.实用河网水流计算[M].南京:河海大学出版社,2003,9.(WANG C H, LI G C. Practical flow calculation of river network [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2003, 9. (in Chinese))

(下转第92页)

- ments of a regional climate model with improved surface runoff generation scheme [J]. *Journal of Nanjing University*, 2005, 41(6): 603-611. (in Chinese)
- [20] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测 [J]. *地球物理学报*, 2004, 47(4): 590-596. (JIANG D B, WANG H J, LANG X M. East Asian climate change trend under global warming background [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(4): 590-596. (in Chinese))
- [21] 任朝霞, 杨达源. 近 50a 西北干旱区气候变化趋势及对荒漠化的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2008(04): 91-95. (REN Z X, YANG D Y. Climate change and surface runoff change impact on desertification in the arid area of Northwest China in recent 50 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008(04): 91-95. (in Chinese))
- [22] 唐道来, 徐利岗. 气候变化背景下新疆地区降水时空变化特征分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(3): 73-76, 79. (TANG D L, XU L G. Characteristics of spatio-temporal variability of precipitation in Xinjiang Region under the background of climate change [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, 21(3): 73-76, 79. (in Chinese))
- [23] ZHANG W, YAN H, CHENG P, et al. Peatland development and climate changes in the Dajuhu basin, central China, over the last 14, 100 years [J]. *Quaternary International*, 2016, 425: 273-281. DOI: 10.1016/j.quaint.2016.06.039.
- [24] BINGS S, ZHEN L, LU H, et al. Pollen record of the centennial climate changes during 9u20137 cal ka BP in the Changjiang (Yangtze) River Delta plain, China [J]. *Quaternary Research*, 2017, 87(2): 275-287. DOI: 10.1017/qua.2017.1.
- [25] JIA X, SUN Y, WANG L, et al. The transition of human subsistence strategies in relation to climate change during the Bronze Age in the West Liao River Basin, Northeast China [J]. *Holocene*, 2016, 26(5): 781-789. DOI: 10.1177/0959683615618262.
- [26] LAMBERS J H. Ecology. Extinction risks from climate change [J]. *Science*, 2015, 348(6234): 501. DOI: 10.1016/b978-0-12-374182-0.00017-0.
- [27] STANTON J C, SHOEMAKER K T, PEARSON R G. Warning times for species extinctions due to climate change. [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1066. DOI: 10.1111/gcb.12721.

(上接第6页)

- [11] 余常昭. 环境流体力学导论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992. (YU C Z. Introduction to environmental fluid mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992. (in Chinese))
- [12] NEUPAUER R M, WILSON J L. Adjoint method for obtaining backward in time location and travel time probabilities of a conservative groundwater contaminant [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(11): 3389-3398. DOI: 10.1029/1999WR900190.
- [13] SUN A Y, PAINTER S L, WITTMAYER G W. A robust approach for iterative contaminant source location and release history recovery [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, 88(3-4): 181-196. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2006.06.006.
- [14] 王家彪, 雷晓辉, 廖卫红, 等. 基于耦合概率密度方法的河渠突发水污染溯源 [J]. *水利学报*, 2015, 46(11): 1280-1289. (WANG J B, LEI X H, LIAO W H, et al. Source identification for river sudden water contamination based on coupled probability density function method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(11): 1280-1289. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150405.
- [15] CHENG W P, JIA Y. Identification of contaminant point source in surface waters based on backward location probability density function method [J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(4): 397-410. DOI: 10.1016/j.advwatres.2010.01.004.
- [16] GHANE A, MAZAHARI M, MOHAMMAD V S J. Location and release time identification of pollution point source in river networks based on the Backward Probability Method [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 180: 164. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.05.015.
- [17] 范海燕. 自适应遗传算法在水库防洪优化调度中的应用 [D]. 南京: 河海大学, 2008. (FAN H Y. Application of Adaptive Genetic Algorithm in the optimal flood control operation of reservoirs [D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [18] 刘宁. 对潼关高程控制及三门峡水库运用方式研究的认识 [J]. *水利学报*, 2005, 36(9): 1019-1028. (LIU N. On the control of Tongguan elevation and operation mode of Sanmenxia Reservoir [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005, 36(9): 1019-1028. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2005.09.001.