

基于 MIKE21FM 的北京市南水北调配套工程 大宁水库突发性水污染事故模拟

于磊¹, 顾华¹, 楼春华¹, 王国强²

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 大宁水库库尾位于交通节点附近, 存在交通事故引发突发性水污染事故的风险。从风险防范与管理角度, 利用 MIKE21FM 模型, 以 5 t 硝基苯泄露为例, 考虑风、水库调度因素, 设定 5 个情景开展突发事故污染物扩散规律研究。结果表明: (1) 不同情景污染物扩散速度和超标水域面积相差较大。无风、不调度情景下, 库区水体接近静止, 污染物扩散速度最慢; 水库向大宁调压池输水 20 m³/s, 西北风 12.3 m/s 情景下, 污染物扩散速度最快。(2) 与常规调度相比, 风速和风向对污染物的扩散影响更大。同样风速情况下, 西北风较东北风更利于污染物的扩散。(3) 正常情况下(即风速不超过 2.56 m/s, 调水不超过 20 m³/s), 5 t 硝基苯泄露应急响应时间在 15 h 以上, 最不利情况下(风速为 20 年最大平均风速 12.3 m/s 且调水 20 m³/s), 应急响应时间为 4~9 h。根据研究结果, 一方面建议加强库尾交通疏导, 加固桥梁护栏, 降低交通事故发生概率; 另一方面, 建议在现有监测站点规划基础上, 新增库尾自动监测站一处。

关键词: 北京市南水北调配套工程; 大宁水库; 突发水污染事故模拟; MIKE21FM

中图分类号: X52; TV 68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0067-05

Simulation of Accidental Water Pollution in Dáning Reservoir of Beijing South to North Water Diversion Project Based on MIKE21FM

YU Lei¹, GU Hua¹, LOU Chur hua¹, WANG Guo qiang²

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China;

2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: There is risk of accidental water pollution caused by traffic accidents near the tail of Dáning reservoir, which is located near the traffic node. In this paper, the leakage of 5 tons of nitrobenzene was used as an example and five scenarios considering the effects of wind and reservoir regulation were developed to investigate the dispersion characteristics of pollutants based on MIKE21FM. The results showed that: (1) the differences of pollutant dispersion speed and overstandard water area were significant under different scenarios. The reservoir water was almost static and the pollutant dispersion speed was the slowest under the scenario without wind speed and reservoir regulation, while the pollutant speed was the highest under the scenario that the northwest wind speed was 12.3 m/s and the conveyance water rate from the reservoir to Dáning surge pool was 20 m³/s; (2) compared with reservoir regulation, wind speed and direction had higher impacts on the pollutant dispersion. Northwest wind was better for pollutant dispersion than northeast wind when both wind speeds were equal; and (3) the emergency response time for leakage of 5 tons of nitrobenzene was more than 15 hours under normal conditions (wind speed was no more than 2.56 m/s and conveyance water rate was no more than 20 m³/s), while for the emergency response time was about 4 to 9 hours under the worst conditions (northwest wind was 12.3 m/s and conveyance water rate was 20 m³/s). The results suggested that the traffic management near the tail of the reservoir needs to be strengthened and the bridge parapets should be reinforced in order to reduce the traffic accident probability, and an automatic monitoring station near the trail of reservoir may be better constructed besides the other monitoring stations determined by the former planning.

Key words: Beijing South to North Water Diversion Project; Dáning reservoir; simulation of accidental water pollution; MIKE21FM

收稿日期: 2013-03-13 修回日期: 2013-06-17 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1310.014.html>

基金项目: 北京市科委南水北调来水生态风险应对关键技术研究课题(Z121100000312097)

作者简介: 于磊(1984), 男, 山东栖霞人, 硕士, 主要从事水生态风险评价及环境影响评价方面的研究。E-mail: yulei_bnu@163.com

通讯作者: 顾华(1977), 男, 江苏南通人, 高级工程师, 主要从事水环境监测和评价方面的研究。E-mail: guhua@263.net

大宁调蓄水库工程作为北京市南水北调配套工程的重要组成部分,在调蓄来水、工程检修、事故应急供水方面发挥着至关重要的作用^[1]。由于水库库尾(库区北端)位于交通节点附近,车流量大,交通事故导致化学品泄漏引发水污染事故的风险相对较大。在当前突发性水污染事故频发的背景下^[2],考虑到南水北调水质安全的重要性及研究区地理位置的特殊性,开展突发性水污染事故应急等相关方面的研究是十分必要的。

在水污染事故应急过程中发生时,管理部门迫切需要了解污染带的迁移状况以及污染物浓度在时间、空间两个维度上的变化,以便采取有效的应急措施^[3]。当前对于此问题的研究,受到区域特点、模型简化、数据限制等因素影响,多集中于河流水污染事故的模拟,大多采用一维模型^[4-5]。但一维模型只适用于河宽较窄的中小型河流,当研究区为较大河流或湖库时,一维模型已不能满足研究需要。MIKE21FM 是目前应用较为广泛的二维模型,在平面二维自由表面流数值模拟方面具有强大的功能。本文基于 MIKE21FM 开展大宁水库水污染事故的模拟分析,旨在探明污染物的时空变化规律,明确污染影响范围和程度,为后续水库风险应急管理提供依据。

1 水库概况

大宁水库位于北京市房山区大宁村北,京港澳高速公路(京石高速)杜家坎至赵辛店路段东侧,与南部的稻田水库、马厂水库组成永定河滞洪水库,见图 1。上游为小喇叭河,下游为小清河。南水北调总干渠永定河倒虹吸由大宁水库库区穿过,大宁调压池位于大宁水库副坝南侧,通过退水暗涵与之相连。改建后库区总库容为 4 611 万 m³,防洪库容 3 611 万 m³,正常蓄水位为 56.40 m。当水位低于 52.46 m,为向总干渠供水,需启用位于水库副坝北侧 130 m 处的抽水泵站。

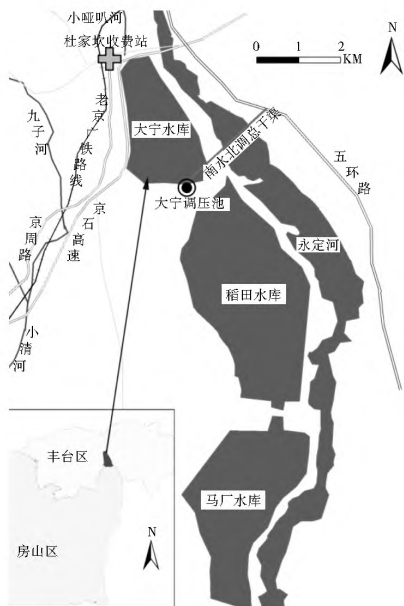


图 1 大宁水库地理位置

Fig. 1 Location map of Da'ning reservoir

大宁水库库尾正是京石高速、G107 等公路线及老京广正线、二七厂等铁路线交汇处,距杜家坎交通节点直线距离

不足 1 km。库尾处有公路桥梁 1 座,铁路桥梁 2 座,交通繁忙,车流量较大;水库坝前为大宁调压池,无正式公路,基本无外来车辆。因此在库尾发生交通事故并引发突发污染事故的可能性远大于坝前。

2 水质模型构建

2.1 模型选择与概述

大宁水库在 56 m 正常蓄水位时平均水深不足 10 m,不存在明显分层现象,采用平面二维模型可以满足研究需要。研究区边界不规则,采用传统矩形网格模拟可能会影响模拟结果。经模型比较,选择使用 MIKE21 软件包中的 MIKE21FM 模型。MIKE21 由丹麦水力研究所开发,在平面二维自由表面流数值模拟方面具有强大的功能,具有用户界面友好、前后处理功能强大、数值计算方法科学等诸多优点^[6],近年来在国内得以广泛应用。其研究对象涵盖海洋、河口、河流、湖库等水体,研究类型包括单纯的数值模拟^[7-8]、洪水淹没分析^[9-10]、温排水影响分析^[11-12]、水质模拟与预测^[13-14]等几类。但在突发事故模拟方面,相关应用并不多见。

2.2 模型地形文件构建

以分辨率为 30 m 的大宁水库 DEM 为数据源,在 ArcGIS 平台的支持下进行剪裁后导出成 xyz 格式;参照《北京市南水北调配套工程大宁调蓄水库工程初步设计报告》(以下简称“设计报告”),结合现场勘察结果,对地形数据进行初步修正;利用 MIKE Zero 中的 Mesh Generator 工具建立水库三角网格,导入修正后的 xyz 数据,形成模拟地形,见图 2。模型建立后,对不同水位下库容进行模拟,对照已有库容曲线,对地形数据进行进一步修正至相对误差低于 4%,以满足模型地形精度的研究需要。

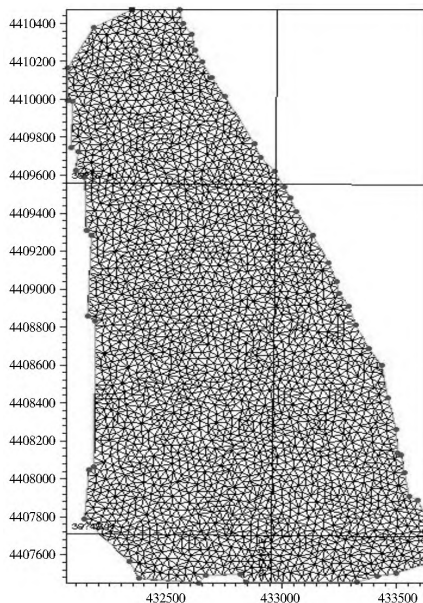


图 2 模型计算网格(5848 个)

Fig. 2 Computation grids of study area (total: 5848)

2.3 模拟情景及参数设定

按照污染物的性质,水污染事故可以分为,有毒有害物质泄漏事故、溢油事故、非正常大量排放废水事故、放射性污染事故。河西村截污工程完成后,库区上游居民生活废

水全部收集处理,小哑巴河工程完成后,流量小于 2 500 m³/s 的中小洪水全部下泄永定河下游,不进入大宁水库,故非正常大量排放废水事故发生的概率极小;大宁水库不承担水运功能,基本不会发生溢流事故;研究区周边无核设施,放射性污染事故不会发生;事故风险主要来自于交通事故引发的危险化学品的泄露。本文着重对有毒有害化学品泄露事故进行模拟。

情况设计:以装载 5 t 硝基苯的轻型卡车在库尾处发生事故引发泄露为例,考虑风速、水库调度等影响因素,设定 5 个情景进行模拟,见表 1。情景一是无外界影响因素下的污染物泄露模拟,情景二和情景三是存在风向对污染物扩散的影响;情景四是存在风和调度对污染物扩散的影响;情景五是最不利情况下的污染物扩散,最不利情况是指相对其他 4 个情景,该情景下污染物扩散对风险应急管理最为不利,本研究设定的情景是风速为 20 年平均最大风速且向大宁调压池供水 20 m³/s。

表 1 不同情景参数设定

Table 1 Parameters of different simulation scenarios

| 项目 | 情景一 | 情景二 | 情景三 | 情景四 | 情景五 |
|-----------------------------------|------|----------|----------|-------------------------------|-------------------------------|
| 泄露速度 / (kg · s ⁻¹) | 8.33 | 8.33 | 8.33 | 8.33 | 8.33 |
| 泄露时间 / min | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 外界因素(风速) / (m · s ⁻¹) | 无风 | 东南风 2.56 | 西北风 2.56 | 西北风 2.56 | 西北风 12.3 |
| 水库调度 | 无 | 无 | 无 | 向大宁调压池供水 20 m ³ /s | 向大宁调压池供水 20 m ³ /s |

参数设定:模拟时间定为 8 h;泄露速度根据伯努利方程计算^[15];泄露持续时间则根据泄露总量与泄露速度计算;风速分别设定为 2.56 m/s(多年平均风速)和 12.3 m/s(20 年平均最大风速即取 20 年为例,将每年的最大风速相加除以 20 的风速值);风向分别设定为春夏(东南 135°)和秋冬(西北 315°)主导风向;水库调度流量根据设计报告确定;初始水位设定为正常调蓄水位 56.4 m。

模拟时不考虑蒸发、降雨、库底渗漏、上游来水及污染物自身降解影响,但考虑柯氏力影响。由于缺乏实测数据,参照相关文献及模型自身推荐值^[6, 15]。糙率设定为 0.028 m^{-1/3} · s, 涡黏系数(Smagorinsky Formulation)为 0.5。

3 突发事件模拟与分析

3.1 各情景模拟结果

模拟结果见图 3 至图 5。

情景一(水库不调度、无风条件):污染物自泄露点向四周扩散,8 h 污染扩散面积(即硝基苯浓度 > 0 的水面面积)为 18.82 km²,平均扩散速度为 6.5 m²/s;超标水域面积(即硝基苯浓度 > 1.7 × 10⁻⁵ kg/m³)为 2.95 km²,占总水面面积的 1.0%;8 h 后,泄露点附近污染物浓度最高,为 1.28 kg/m³,超过标准 7.5 万余倍。在无风、不调度情况下,库区自身水体几乎静止,平均流速小于 1 × 10⁻⁴ m/s,污染物发生

泄漏后,扩散速度很慢。

情景二(水库不调度、东南风 2.56 m/s):污染物自泄露点向南扩散,受东南风影响,污染物逐步向库区西北侧堆积,8 h 污染扩散面积为 53.37 km²,平均扩散速度为 18.5 m²/s;超标水域面积 7.62 km²,占库区水面面积的 2.6%;受风影响,8 h 后泄露点西南约 290 m 处的西岸污染物浓度最高,为 0.113 kg/m³,超标 6 650 余倍。

情景三(水库不调度、西北风 2.56 m/s):污染物自泄露点向东南方向呈长条状扩散,8 h 污染扩散面积为 98.22 km²,平均扩散速度为 34.1 m²/s;超标水域面积 11.97 km²,约占库区水面面积的 4.0%;受风影响,污染物堆积作用比较明显,8 h 后泄露点东南 350 m 处的东岸浓度最高,为 0.149 kg/m³,超标 8 740 余倍。

情景四(水库向大宁调压池输水 20 m³/s,西北风 2.56 m/s):污染物扩散规律跟情景三基本一致,污染物扩散速度和面积较情景三略有增加;8 h 扩散面积为 100.25 km²,平均扩散速度为 34.8 m²/s;超标水域面积为 12.20 km²,约占库区水面面积的 4.1%。

情景五(水库向大宁调压池输水 20 m³/s,西北风 12.3 m/s):受大风影响,污染物扩散速度加快,平均扩散速度为 102 m²/s,6 h 污染物扩散至整个库区;8 h 后,超标水域面积为 59.32 km²,约占总水域面积的 21.7%;8 h 后距泄露点东南 2.3 km 处的东岸污染物浓度最高,为 0.011 kg/m³,超标 647 倍。

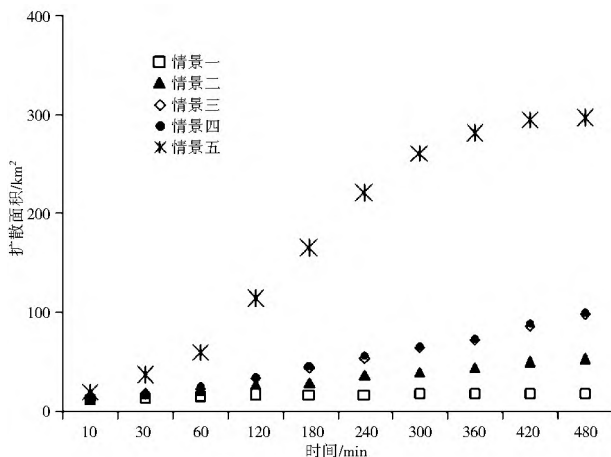


图 3 污染物扩散面积时间变化

Fig. 3 Variation of pollutant dispersion area with time

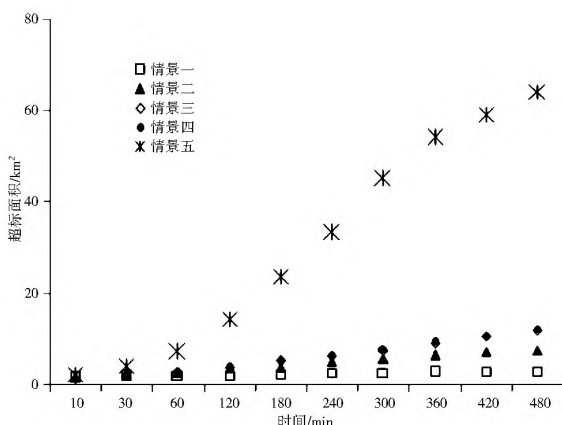


图 4 污染物超标面积时间变化

Fig. 4 Variation of pollutant overstandard area with time

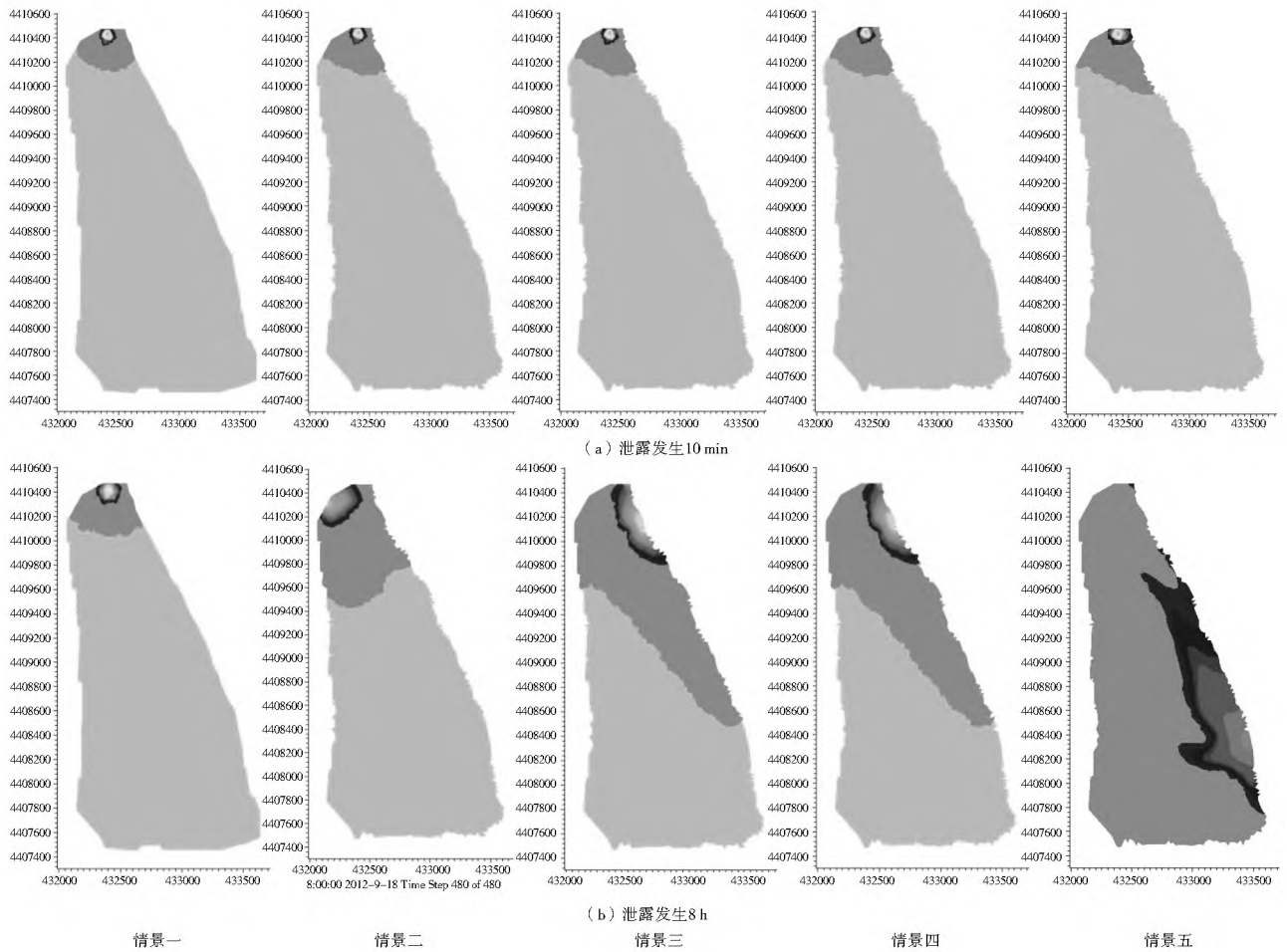


图 5 泄露发生后不同情景下库区硝基苯浓度分布(硝基苯标准为 $1.7 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$)

Fig. 5 Distributions of nitrobenzene concentration after leakage under different scenarios (the standard value of nitrobenzene concentration is $1.7 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$)

3.2 各情景对比分析

对比无风和有风情景下污染物扩散结果可知,无风时污染物以泄露点为圆心辐射状扩散,扩散范围较小;有风时污染物不仅扩散速度增加,而且在库区边界制约下,污染物易堆积,从而出现狭长污染带,不利于后期污染清除。对比情景二和情景三可知,同样风速情况下,与东北风相比,西北风更利于污染物的扩散,可见风向也是影响污染物扩散的关键因素之一。情景三、情景四污染物扩散速度相差不大,说明与风速相比,常规调度由于调水量较小,对库区水体流动的影响较弱,对污染物扩散影响不大。情景五与情景四对比可知,风速由 2.56 m/s 提高至 12.3 m/s ,污染物扩散速度增加 190%,超标面积增加 390%。

各情景的污染物扩散面积与超标面积相差较大,在泄露发生后的不同时段,前者约是后者的 5~11 倍。若以污染物到达泵站取水口的时间来确定应急响应时间,则偏于保守;若以泵站取水口处污染物浓度超标的时间确定响应时间,则偏于宽松;介于两者之间的数值作为应急响应时间较为合理。表 2 模拟结果表明,正常情况下(前四种情景),偏宽松的应急响应时间皆在 48 h 以上,保守应急响应时间为 15 h 左右;即使在最不利情况下(情景五),应急响应时间也在 4~9 h。由此说明,库尾发生污染事故,应急响应时间较为充分,有利于提高应急决策和处理措施的科学性和有效性。

表 2 不同模拟情境下的应急响应时间

Table 2 Emergency response times under different simulation scenarios

| 情景 | 偏保守的应急响应时间 | 偏宽松的应急响应时间 |
|----|------------|------------|
| 一 | > 48 h | > 48 h |
| 二 | 31.33 h | > 48 h |
| 三 | 17.67 h | > 48 h |
| 四 | 15.33 h | > 48 h |
| 五 | 4 h | 12 h |

4 结论及建议

(1) 情景一(无风、不调度)的水体基本处于静止状态,污染物以泄露点为圆心成辐射状缓慢扩散,8 h 后超标水域面积百分比仅为 1.0%;情景二(水库不调度、西北风 2.56 m/s)中,受风影响污染物逐步向库区西北侧堆积,8 h 后超标水域面积百分比为 2.6%;情景三(水库不调度、西北风 2.56 m/s)中,污染物自泄露点向东南方向呈长条状扩散,堆积效应明显,8 h 后超标水域面积百分比为 4.0%;情景四(水库向大宁调压池输水 $20 \text{ m}^3/\text{s}$,西北风 2.56 m/s)的污染物扩散规律跟情景三基本一致,8 h 后超标水域面积百分比为 4.1%;情景五(水库向大宁调压池输水 $20 \text{ m}^3/\text{s}$,西北风 12.3 m/s)的污染物扩散速度大大提高,8 h 后超标水域面积百分比约为 22%。

(2) 各情景下, 受风影响污染物都会出现堆积现象, 形成狭长的污染带, 不利于污染物清除; 与东南风相比, 西北风更利于污染物的扩散; 与库区常规调度相比, 风对污染物扩散速度和扩散方向影响更大; 在风速增加 380% 的极端情况下, 污染物扩散速度和超标面积分别增加 190% 和 390%。

(3) 若以取水口处水质不受影响为目标, 正常情况下(风速不超过 2.56 km/s, 调水不超过 20 m³/s), 5 t 左右的化学品泄露应急响应时间在 48 h 以上, 保守应急响应时间在 15 h 左右; 最不利情况下(风速 12.3 m/s, 调水 20 m³/s), 应急响应时间在 4~9 h。

根据《北京市南水北调配套工程水质监测站网布设规划》, 取水泵站处规划建设一座自动监测站, 从风险管理角度, 建议在库尾增加一处自动监测站。同时应加强库尾交通监管, 疏导来往车辆, 加固桥梁护栏, 降低因交通事故引发污染的概率。

参考文献(References):

- [1] 北京市南水北调工程建设委员会办公室. 北京市南水北调配套工程总体规划[M]. 北京: 北京水利水电出版社, 2008. (Beijing South to North Water Diversion Project Construction Committee Office. The Overall Planning of Beijing South to North Water Diversion Project[M]. Beijing: Beijing Water Conservancy and Hydropower Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 王威, 王金生, 滕彦国, 等. 由交通事故引发的突发环境事件的特征分析及防治对策[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 52-55. (WANG Wei, WANG Jinsheng, TENG Yanguo, et al. Characteristic Analysis and Prevention Measures of Abrupt Environmental Incidents Caused by Traffic Accidents[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 52-55. (in Chinese))
- [3] 张波, 王桥, 孙强, 等. 基于 SD-GIS 的突发水污染事故水质时空模拟[J]. 武汉大学学报, 2009, 34(3): 348-351. (ZHANG Bo, WANG Qiao, SUN Qiang, et al. Spatiotemporal Simulation of Water Quality Based on SD-GIS Accidental Water Pollution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(3): 348-351. (in Chinese))
- [4] 刘国东, 宋国平, 丁晶. 高速公路交通污染事故对河流水质影响的风险评价方法探讨[J]. 环境科学学报, 1999, 19(5): 572-575. (LIU Guodong, SONG Guoping, DING Jing. An Investigation to the Risk Assessment of Water Quality in River Affected by Traffic Pollution Accidents on an Expressway[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(5): 572-575. (in Chinese))
- [5] 张波, 王桥, 李顺, 等. 基于系统动力学模型的松花江水污染事故水质模拟[J]. 中国环境科学, 2007, 27(6): 77-815. (ZHANG Bo, WANG Qiao, LI Shun, et al. Simulation of Water Quality For Songhua River Water Pollution Accident Using a One-dimensional Water Quality Simulation Model Based System Dynamics[J]. China Environmental Science, 2007, 27(6): 81-815. (in Chinese))
- [6] 王领元. 应用 MIKE 对河流一、二维的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (WANG Lingyuan. The Numerical Simula-

tion of 1-D and 2-D River on MIKE[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))

- [7] 王圆圆, 黄细彬. 分期导流束窄河道泄流物理试验及数值模拟研究[D]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 97-100. (WANG Yuanyuan, HUANG Xiabin. Research on Hydrology and Pollution Characteristics of Urban Pavement Runoff[D]. Water Resources and Power, 2012, 30(12): 97-100. (in Chinese))
- [8] 谢亚力. 钱塘江河口区沿江围涂对杭州湾风暴潮影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006. (XIE Yali. The Effects Of Regular Tiation And Reclamation In Qiantang Estuary On Storm Surge At Hangzhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. (in Chinese))
- [9] 刘绍青. 济南市城区洪水淹没模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2009. (LIU Shaqing. Study on The Flooding in Undation Simulation of Jinan[D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese))
- [10] 修海峰, 吴联志. 基于 MIKE II 的平原河网洪水演进水动力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 151-154. (XIU Haifeng, WU Lianzhi. Hydrodynamic Research of Flood Routing in The Plain River Network Based on MIKE II[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 151-154. (in Chinese))
- [11] 王庆改, 戴文楠, 赵晓宏, 等. 基于 Mike21FM 的来宾电厂扩建工程温排水数值模拟研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3): 332-336. (WANG Qinggai, DAI Wenan, ZHAO Xiaohong, et al. Numerical Model of Thermal Discharge from Laibin Power Plant Based on Mike21FM[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(3): 332-336. (in Chinese))
- [12] 徐梦佳, 于磊, 赵彦伟, 等. 水库温排水增温模拟及其对富营养化影响分析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1180-1188. (XU Mengjia, YU Lei, ZHAO Yanwei, et al. The Simulation of Reservoir Water Warming by Thermal Discharge and Research on Reservoir Eutrophication[J]. Journal of Agricultural Environment Science, 2012, 31(6): 1180-1188. (in Chinese))
- [13] 洪晓瑜. 太湖水环境数学模型建立及排污总量控制研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (HONG Xiaoyu. Mathematics Model Building of the Water Environmental in Taihu Lake and the Study of the Total Discharge Quantity Control[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [14] 李娜, 叶闵. 基于 MIKE21 的三峡库区涪陵段排污口 COD 扩散特征模拟及对下游水质的影响[J]. 华北水利水电学院学报, 2011(1): 128-131. (LI Na, YE Min. COD Diffusion Simulation Based on MIKE21 in Sewage Outfall of Peiling Section of the three Gorges Reservoir Area and Its Impact on Downstream Water Quality[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011(1): 128-131. (in Chinese))
- [15] 环境保护部环境工程评估中心. 环境影响评价技术方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012. (Assessment Center of Environmental Engineering of EPD. Technical Methods of Environmental Impact Assessment[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012. (in Chinese))