

余姚果, 赵子昂, 陈喆, 等. 突发水污染事件风险分析: 以引江济淮工程(河南段)为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 291-298. YU Y G, ZHAO Z A, CHEN Z, et al. Risk of sudden water pollution incidents: A case study of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project(Henan section) [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 291-298. (in Chinese)

# 突发水污染事件风险分析

——以引江济淮工程(河南段)为例

余姚果<sup>1,2</sup>, 赵子昂<sup>3</sup>, 陈喆<sup>3</sup>, 蒋恒<sup>3</sup>, 郭深深<sup>3</sup>, 陈钊<sup>3</sup>

(1. 长江科学院, 武汉 430010; 2. 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 武汉 430010;  
3. 河南省引江济淮工程有限公司, 郑州 450003)

**摘要:** 从交通事故风险、污水排入风险以及其他风险等方面识别引江济淮工程(河南段)突发水污染事件的风险源, 建立适应性的风险评价指标体系、指标等级划分标准和风险等级评价模型, 综合评估 7 个评价河段突发水污染事件风险等级。结果表明: 2 个评价河段的风险等级为重大(Ⅱ级), 5 个评价河段的风险等级为较大(Ⅲ级)。从降低风险源危险性、提高风险控制有效性等方面提出突发水污染事件风险管控对策措施。本研究为降低引江济淮工程(河南段)突发水污染事件的发生概率和危害程度提供了支撑, 对发挥工程综合效益、保障受水区供水安全、维护良好的水生态环境具有重要意义。

**关键词:** 河南省; 引江济淮工程; 突发水污染事件; 风险评价; 风险管控

**中图分类号:** TV11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdk.2024.0031

引江济淮工程(河南段)属于引江济淮工程江西北送段中的一部分, 近期规划水平年 2030 年引水量 5.0 亿 m<sup>3</sup>, 远期规划水平年 2040 年引水量 6.34 亿 m<sup>3</sup>。引江济淮工程(河南段)对完善豫东地区水资源供水配置格局, 提高水资源利用效率和效益, 保障城乡供水安全, 缓解城市工业用水缺水, 改善河湖生态环境具有重要作用<sup>[1]</sup>。

引江济淮工程(河南段)主要由 2 条输水明渠(清水河段、鹿辛运河段)、4 个调蓄水库(试量、后陈楼、七里桥、新城调蓄水库)、3 条输水管线(后陈楼调蓄水库—七里桥调蓄水库、七里桥调蓄水库—新城调蓄水库、七里桥调蓄水库—夏邑永城出水池)等组成。虽然 4 个调蓄水库和 3 条输水管线突发水污染事件的风险极小, 但是 2 条输水明渠沿线交通运输业发达、平立交建筑多, 容易发生突发性水污染事件。引江济淮工程(河南段)执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准, 水质要求高, 一旦发生水污染事件, 将给受水区居民饮水

安全、工业用水保障和生态环境安全造成巨大的影响。因此, 开展引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险分析和管控对策研究, 对发挥工程综合效益、保障受水区供水安全、维护良好的水生态环境具有重要意义。

因此, 本研究在充分调研已有引调水工程突发水污染事件风险分析与管控对策基础上, 识别引江济淮工程(河南段)突发水污染事件的风险因素, 建立适应性的风险评价指标体系和评价模型, 综合评估突发水污染事件风险等级, 提出突发水污染事件风险监测和风险调控对策措施, 为引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险管理及应急管理提供支撑, 以期减小突发污染事件对经济、社会和环境造成的不利影响。

## 1 研究区概况

引江济淮工程(河南段)以豫皖省界为起点, 利用清水河通过 3 级泵站提水至试量闸上游; 一部分

收稿日期: 2023-09-07 修回日期: 2023-11-18 网络出版时间: 2024-03-14

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240313.0848.002>

基金项目: 复杂调水工程全生命周期风险分析与管控关键技术项目(HNYJJH/JS/FWKY-2021004)

作者简介: 余姚果(1997—), 女, 安徽安庆人, 助理工程师, 主要从事水资源调配与管理研究。E-mail: 17396157371@163.com

进入试量调蓄水库,供周口市的郸城县、淮阳县、太康县;一部分经鹿辛运河自流至鹿邑后陈楼调蓄水库,然后通过加压泵站和 3 条输水管线依次将水输

送至商丘市境内,供柘城县、夏邑县、梁园区和睢阳区、永城市等。工程主要由 2 条输水明渠、4 个调蓄水库、3 条输水管线以及若干节制闸和提水泵站等组成,工程概化图见图 1。

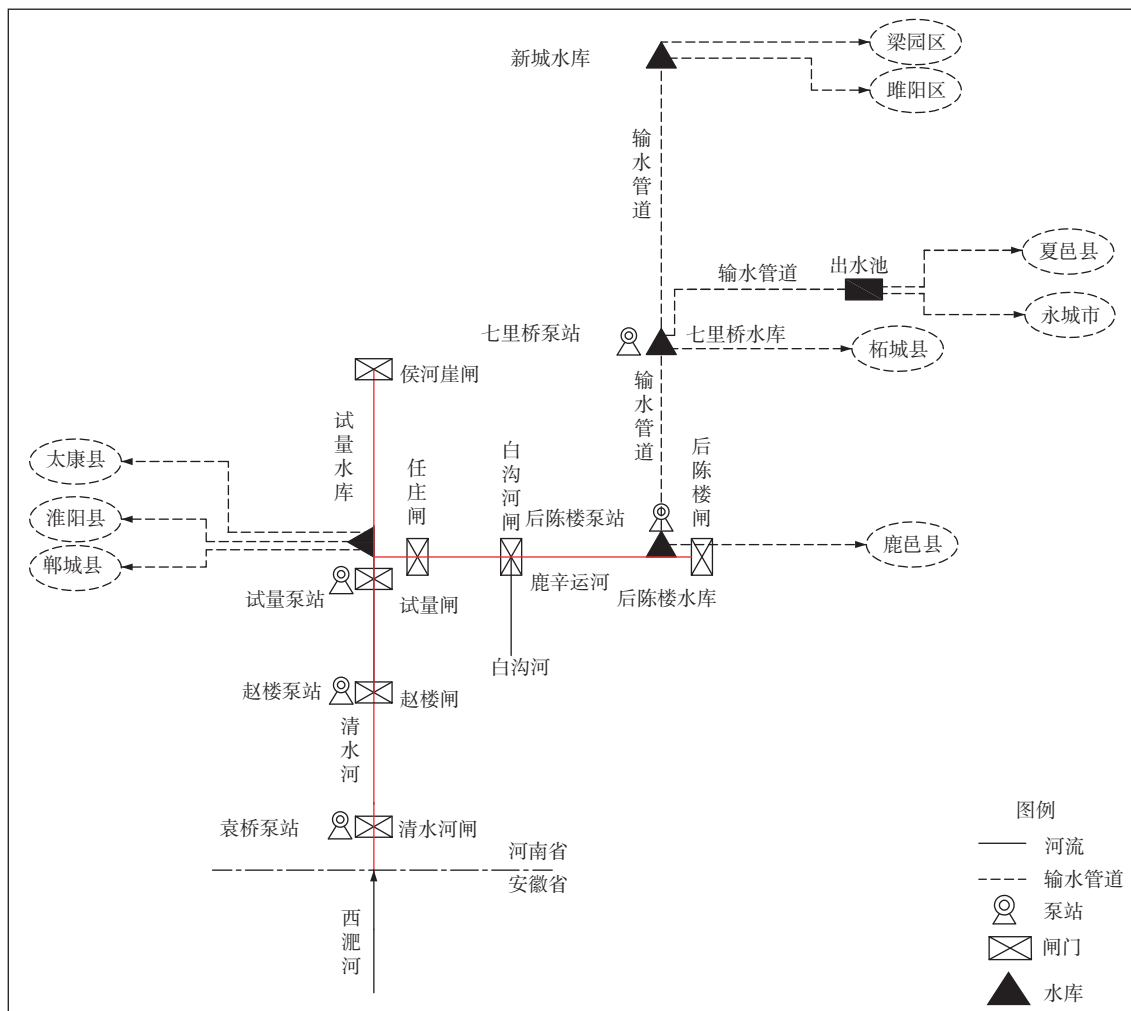


图 1 引江济淮工程(河南段)概化

Fig. 1 Generalization of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project( Henan section)

引江济淮工程(河南段)共设有 2 条输水明渠,分别为清水河和鹿辛运河。其中:清水河段总长 57.90 km,输水河段长度为 47.46 km,回水调蓄河段长度为 10.44 km;鹿辛运河段总长 16.27 km,输水河段长度为 16.26 km,回水河段长度为 0.01 km。引江济淮工程(河南段)共设有调蓄水库 4 座,分别是试量调蓄水库(调蓄库容 70 万 m<sup>3</sup>)、后陈楼调蓄水库(调蓄库容 256 万 m<sup>3</sup>)、七里桥调蓄水库(调蓄库容 143 万 m<sup>3</sup>)和新城调蓄水库(调蓄库容 163 万 m<sup>3</sup>)。

考虑到 4 个调蓄水库和 3 条输水管线突发水污染事件的风险极小,本研究仅对清水河段、鹿辛运河段 2 条输水明渠的突发水污染事件风险进行分析。根据节制闸的分布情况,将清水河段(A)进一步划

分为清水河闸至赵楼闸段(A<sub>1</sub>)、赵楼闸至试量闸段(A<sub>2</sub>)、试量闸至侯河崖闸段(A<sub>3</sub>)3 个河段,将鹿辛运河段(B)进一步划分为任庄闸至白沟河闸段(B<sub>1</sub>)、白沟河闸至后陈楼闸段(B<sub>2</sub>)2 个河段。

## 2 突发水污染事件风险识别

### 2.1 风险类型分析

结合国内外大型已建引调水工程突发水污染事件风险研究成果<sup>[2-3]</sup>,根据实地调研和资料整理分析,引江济淮工程(河南段)突发水污染事件的主要风险类型包括交通事故风险、污水排入风险以及其他风险等。

交通事故风险是指由于清水河段和鹿辛运河段

上的跨河桥梁和沿线公路发生交通事故,导致汽油、危化品和货物等进入输水明渠,从而造成的突发性水污染。污水排入风险是指清水河段和鹿辛运河段沿线周边的加油站、食品加工厂、建材厂、水泥厂以及混凝土搅拌厂等固定风险源由于突发事件导致废污水直接排入输水明渠或支流及上游污染水体汇入输水明渠,从而造成的突发性水污染;按照排入方式可以分为直接排入、支流汇入和上游汇入。其他风险包括对社会不满分子、生活绝望者、恐怖组织恶意向输水明渠投毒造成的突发性水污染。

## 2.2 风险识别结果

**交通事故风险。**根据实地调研和资料整理分析,引江济淮工程(河南段)输水明渠沿线共有跨河桥梁40座(清水河段24座、鹿辛运河段16座),清水河段和鹿辛运河段两岸大部分河段设有公路,可以通行车辆。虽然输水明渠沿岸设置了护栏,但是若发生交通事故,仍可能导致车辆上的汽油、危化品和货物等进入输水明渠,造成突发性水污染。

**污水排入风险。**引江济淮工程(河南段)输水明渠沿线布设有排污口14个,均采用涵管形式穿过河堤,全部位于清水河段。若工程周边污水处理厂、工业企业等发生突发事件导致未经处理达标的废污水通过排污口直接排入输水渠道,则会引起突发性水污染。

引江济淮工程(河南段)输水明渠沿线共有53个沟渠(清水河段38个、鹿辛运河段15个)汇入,每个沟渠均建有沟口闸。虽然所有沟口闸供水期间处于关闭状态,但是如果发生春汛、秋汛或者沟口闸发生故障,沟渠中的污染水体可能通过沟口闸排入输水明渠,引起突发性水污染。

## 3 突发水污染事件风险评估

### 3.1 指标体系构建

目前,突发水污染事件风险评价常用的指标体系构建框架有2种:一是从风险源、风险受体、风险控制角度出发构建<sup>[4-5]</sup>;二是采用“驱动力-压力-状态-影响-响应”模型(driving-pressure-state-impact-response, DPSIR)构建<sup>[6-7]</sup>。由于DPSIR模型能很好地反映经济运作与环境之间的相互关系,被广泛应用于突发水污染事件风险评价。本研究基于DPSIR模型框架构建引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险评估指标体系。

针对引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险源类型及特性、风险受体特性、风险控制措施等,根据DPSIR模型理论,研究建立了风险评估指标体系。指标体系共有3个层次,分别是目标层、准则层和指标层,见图2。目标层即引江济淮工程(河南段)突发水污染事件的风险等级评估。准则层反映了引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险因子以及受体影响与环境之间相互作用,包括驱动力、压力、状态、影响和响应。驱动力准则层设有指标包括沿线公路里程、跨河桥梁数量、固定风险源规模;压力准则层设有指标包括入河排污口数量、汇入支流情况;状态准则层设有指标包括输水水质状况、闸泵工程情况、水库调蓄能力;影响准则层设有指标包括受影响人口数量、社会经济影响;响应准则层设有指标包括防护栏安装比例、视频监控情况和应急处理能力等。各指标具体内涵见表1。

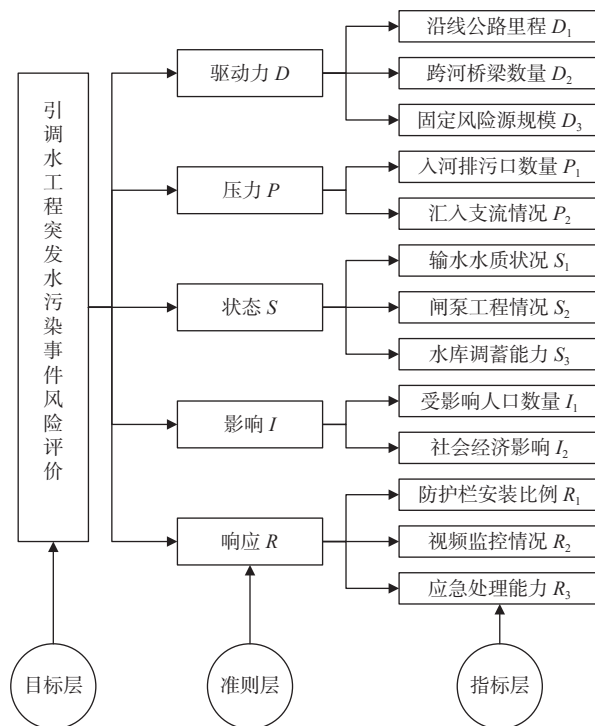


图2 突发水污染事件风险评估指标体系

Fig. 2 Risk assessment index system of sudden water pollution incidents

### 3.2 指标等级划分

参考《国家突发环境事件应急预案》对突发环境事件的分级方法,本研究将引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险分为I、II、III和IV共4个等级,风险程度由高到低依次为特别重大、重大、较大和一般,各等级风险指数分别为(0.75,1]、(0.5,0.75]、(0.25,0.5]、[0,0.25]。参考相关文献资料<sup>[8-9]</sup>,结合引江济淮工程(河南段)实际,进一步提出适用于其突发水污染事件风险评估的单项指标分级标准,见表1。

表 1 突发水污染事件风险评估的指标分级标准

Tab. 1 Index grading standards for risk assessment of sudden water pollution incidents

指标名称	指标描述	风险等级与风险指数			
		I 级	II 级	III 级	IV
		[0.75,1]	[0.50,0.75)	[0.25,0.50)	[0,0.25)
沿线公路里程( $D_1$ )	沿线公路长度与输水明渠长度比值/%	[100,200]	[50,100)	[25,50)	[0,25)
跨河桥梁数量( $D_2$ )	输水明渠上实际可通车的跨河桥梁数量/座	$\geq 30$	[20,30)	[10,20)	[0,10)
固定风险源规模( $D_3$ )	工业企业、有毒化学品仓库、污水处理厂等密集程度	高度密集	密集	较分散	分散
入河排污口数量( $P_1$ )	直接向输水明渠内排放污水的工业排污口、生活排污口以及混合排污口数量	工业排污口 $\geq 10$ 个;或工业生活混合排污口 $\geq 20$ 个;或生活排污口 $\geq 30$ 个	工业排污口6~9个;或工业生活混合排污口10~19个;或生活排污口20~29个	工业排污口2~5个;或工业生活混合排污口4~9个;或生活排污口10~19个	工业排污口 $< 2$ 个;或工业生活混合排污口 $< 3$ 个;或生活排污口 $< 10$ 个
汇入支流情况( $P_2$ )	汇入支流数量/个	$\geq 30$	[20,30)	[10,20)	[0,10]
	截污工程比例/%	[0,25)	[25,50)	[50,75)	[75,100]
输水水质状况( $S_1$ )	输水水质类别	I 类水	II 类水	III 类水	IV、V 类水
闸泵工程情况( $S_2$ )	每10 km闸泵工程数量/座	[0,0.5)	[0.5,1)	[1,2)	$\geq 2$
水库调蓄能力( $S_3$ )	事故段下游调蓄水库容积与事故段日输水量比值/d	[0,0.5)	[0.5,1)	[1,2)	$\geq 2$
受影响人口数量( $I_1$ )	受影响人口数量占工程受益人口总数的比值/%	[75,100]	[50,75)	[25,50)	[0,25)
社会经济影响( $I_2$ )	受水区范围内工业企业减产损失、服务业营收损失、农牧渔减产损失以及水污染事件应急处置费用等/万元	$\geq 10\ 000$	[5 000,10 000)	[1 000,5 000)	[0,1 000)
防护栏安装比例( $R_1$ )	防护栏安装长度与输水明渠长度的比值/%	[0,50)	[50,100)	[100,150)	[150,200]
视频监控安装情况( $R_2$ )	输水明渠上视频监控安装密集程度	分散	较分散	密集	高度密集
应急处理能力( $R_3$ )	应急预案、应急设备、应急队伍等方面情况	无应急预案;无应急队伍;无应急设备	有初步应急预案;有少量应急设备;有应急队伍但人数不足	有较完善应急预案;有较多应急设备;有较多应急人员	有完善应急预案;有足够应急设备;有健全的应急队伍且定期开展应急演练

### 3.3 评价指标确定

通过收集资料、现场查勘等,在突发水污染事件风险识别基础上,整理得到各评价指标的定性描

述和定量表达,结合表 1 给出的指标分级标准,确定了引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险评估的各指标风险指数,见表 2。

表 2 突发水污染事件风险评估的指标风险指数

Tab. 2 The risk index of assessment index in sudden water pollution incidents

评价河段	评价指标												
	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$P_1$	$P_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$I_1$	$I_2$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
A	0.72	0.60	0.20	0.62	0.48	0.33	0.66	0.58	1.00	0.25	0.18	0.87	0.10
A <sub>1</sub>	0.73	0.10	0.12	0.08	0.32	0.33	0.42	0.58	1.00	0.25	0	0.83	0.10
A <sub>2</sub>	0.71	0.25	0.15	0.36	0.14	0.33	0.69	0.58	1.00	0.25	0	0.83	0.10
A <sub>3</sub>	0.72	0.25	0.13	0.29	0.03	0.33	0.30	0.58	1.00	0.25	0.93	0.90	0.10
B	0.87	0.40	0.25	0	0.19	0.33	0.28	0.18	0.63	0.16	0	0.83	0.10
B <sub>1</sub>	0.93	0.25	0.21	0	0.10	0.33	0.25	0.18	0.63	0.16	0	0.83	0.10
B <sub>2</sub>	0.77	0.15	0.24	0	0.09	0.33	0.11	0.18	0.63	0.16	0	0.83	0.10

### 3.4 指标权重确定

指标权重确定方法。目前指标权重确定方法主要有主观赋权法、客观赋权法和综合赋权法。常用的主观赋权法主要有德尔菲法<sup>[10]</sup>、层次分析法<sup>[11]</sup>、G1法<sup>[12]</sup>等方法;常用的客观赋权法主要有拉开档次法<sup>[13]</sup>、熵值法<sup>[14]</sup>、主成分分析法<sup>[15]</sup>等;综合赋权法包括基于单位化约束条件的综合赋权法、基于博弈论的综合赋权法、基于离差平方和的综合赋权法<sup>[16]</sup>等。

基于博弈论的综合赋权法的基本思想是在不同权重之间寻找一致或妥协,使得理想综合权重与各主、客观权重的偏差极小化,能最大程度保留各主、客观权重值的信息<sup>[17]</sup>。本研究采用基于博弈论的综合赋权法对指标权重进行计算,主要方法如下:

①采用 G1 法确定指标主观权重  $W_1^T = (\omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1m})$ ;

②采用熵值法确定指标客观权重  $W_2^T = (\omega_{21}, \omega_{22}, \dots, \omega_{2m})$ ;

③采用基于博弈论的综合赋权法对主观权重和客观权重进行综合集成。

首先,构建主观权重和客观权重的线性组合,表达式为

$$W = a_1 W_1^T + a_2 W_2^T \quad (1)$$

式中:  $a_1$  和  $a_2$  为指标权重向量集的线性组合系数。因此,寻找最满意的权重向量可归结为对上式中 2 个线性组合系数进行优化,优化的目的是使  $W$  与各个权重向量的离差极小化。由此,构建如下的最优化对策模型,表达式为

$$\begin{pmatrix} W_1 W_1^T & W_1 W_2^T \\ W_2 W_1^T & W_2 W_2^T \end{pmatrix} \begin{bmatrix} a_1^* \\ a_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 W_1^T \\ W_2 W_2^T \end{bmatrix} \quad (2)$$

基于上式求得线性组合系数  $a_1^*$  和  $a_2^*$ , 将其进行归一化处理得到  $a'_1$  和  $a'_2$ , 最后计算评价指标的最优综合权重:

$$W^* = a'_1 W_1^T + a'_2 W_2^T \quad (3)$$

根据表 2 给出的引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险评估各指标风险指数,采用基于博弈论的综合赋权法,得到突发水污染事件风险评估指标权重,见表 3。

### 3.5 风险等级确定

目前常见的突发水污染事件风险评价方法包括层次分析法<sup>[18-20]</sup>、模糊综合评价法<sup>[21-23]</sup>、贝叶斯网络法<sup>[24-26]</sup>、TOPSIS 排序法<sup>[27-29]</sup>、线性加权法<sup>[30]</sup>等。考虑到线性加权法能够对多个因素进行综合评价且

简单易行,本研究采用线性加权法评价引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险等级。

表 3 突发水污染事件风险评估指标权重

Tab. 3 Index weight of risk assessment in sudden water pollution incidents

指标名称	综合权重
$D_1$	0.097
$D_2$	0.071
$D_3$	0.063
$P_1$	0.113
$P_2$	0.074
$S_1$	0.015
$S_2$	0.044
$S_3$	0.071
$I_1$	0.071
$I_2$	0.068
$R_1$	0.168
$R_2$	0.133
$R_3$	0.012

基于指标风险指数(表 2)及其综合权重(表 3),引江济淮工程(河南段)各评价河段突发水污染事件风险评价价值计算为

$$D_i = \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} \omega_j \quad (4)$$

式中:  $D_i$  为第  $i$  个评价河段的突发水污染事件风险评价价值;  $\omega_j$  为第  $j$  个指标的综合权重;  $\gamma_{ij}$  为第  $i$  评价河段第  $j$  个指标风险指数。

根据计算得到的各评价河段突发水污染事件的风险评价价值,参照风险评估分级标准确定引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险等级,见表 4。结果表明,除清水河段全段(A)及其子河段试量节制闸至侯河崖段(A<sub>3</sub>)突发水污染事件风险等级为重大(Ⅱ级)外,其他评价河段的突发水污染事件风险等级均为较大(Ⅲ级)。

### 3.6 评估结果分析

风险评估结果表明引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险等级均在Ⅲ级及以上。主要原因有 2 个方面:(1)清水河段和鹿辛运河段两岸绝大部分设有公路,各评价河段的沿线公路里程风险指数均为特别重大(见表 2);(2)清水河段和鹿辛运河段现状安装的视频监控数量较少、分布较散,各评价河段的视频监控安装情况风险指数均为特别重大(见表 2)。

表 4 突发水污染事件风险评估结果

Tab. 4 Risk assessment results of sudden water pollution incidents

评价河段	风险评价价值	风险等级
A	0.541	Ⅱ级
A <sub>1</sub>	0.382	Ⅲ级
A <sub>2</sub>	0.423	Ⅲ级
A <sub>3</sub>	0.555	Ⅱ级
B	0.340	Ⅲ级
B <sub>1</sub>	0.325	Ⅲ级
B <sub>2</sub>	0.297	Ⅲ级

同时,清水河段及其子河段试量节制闸至侯河崖段突发水污染事件风险等级为重大,比其他河段的风险等级高。主要原因有 2 个方面:(1)清水河段上跨河桥梁数量、污水排污口数量和汇入支流数量远大于鹿辛运河段,增加了污水排入引起突发水污染事件的风险;(2)试量节制闸至侯河崖段为清水河段上的回水调蓄段,工程设计时未考虑安装防护栏,增加了交通事故导致突发水污染事件的风险。

#### 4 突发水污染事件风险管控

为降低引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险,从降低风险源危险性方面、提高风险控制有效性方面提出以下管理措施。

降低风险源危险性方面:在清水河子河段试量节制闸至侯河崖段补充安装防护栏,在清水河段和鹿辛运河段跨河桥梁以及重点公路段设置限速、禁止超车等警示标志,并提示所属水域功能,定期对跨河桥梁进行检修并对路面进行维护修理,保障桥梁安全运行,降低交通事故引起的突发水污染事件风险;封堵清水河段上的 14 个入河排污口,严禁工业企业污水和生活污水直接排入输水渠道,降低污水直接排入引起的突发水污染事件风险。加强对清水河段和鹿辛运河段上节制闸和沟口闸的巡查维护,保证闸门正常运行使用,降低支流污水汇入引起的突发水污染事件风险。

提高风险控制有效性方面:在清水河段和鹿辛运河段的重点河段设置远程视频监控点,引入人工智能识别,自动分析和预警车辆翻车入渠和人为投毒等事故;在清水河段和鹿辛运河段的重点河段设置自动水质监测站,加强输水渠道水质监测;对于监控设备做到定期检查和维修,确保监测结果准确;加强引江济淮工程(河南段)信息化建设,提高突发水污染事件应急模拟能力,及时掌握突发水污染事

件影响范围和影响程度;制定突发水污染事件应急预案,配备专业救援队和救援设备,定期开展突发水污染应急演练。

#### 5 结论

本研究在识别引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险源基础上,综合评价突发水污染事件风险等级,提出风险管控措施,为保障引江济淮工程(河南段)输水安全提供了支撑。

引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险源主要包括公路交通事故风险、污水排入风险和其他风险。

引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险评估结果表明,除了清水河段及其子河段试量节制闸至侯河崖段的突发水污染事件风险等级均为重大(Ⅱ级)外,其他 5 个评价河段的突发水污染事件风险等级均为较大(Ⅲ级)。

为降低引江济淮工程(河南段)突发水污染事件风险,需要进一步降低风险源危险性以及提高风险控制有效性。

#### 参考文献:

- [1] 左其亭,杨振龙,路振广,等.引江济淮工程河南受水区水资源利用效率及其空间自相关性分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(1):39-47. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0005.
- [2] 肖伟华,庞莹莹,张连会,等.南水北调东线工程突发性水环境风险管理研究[J].南水北调与水利科技,2010,8(5):17-21. DOI: 10.3969/SP.J.1201.2010.05017.
- [3] 熊雁晖,漆文刚,王忠静.南水北调中线运行风险研究(一):南水北调中线工程风险识别[J].南水北调与水利科技,2010,8(3):1-5. DOI: 10.3969/SP.J.1201.2010.03001.
- [4] 靳春玲,王运鑫,贡力.基于模糊层次评价法的黄河兰州段突发水污染风险评价[J].安全与环境学报,2018,18(1):363-368. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2018.01.068.
- [5] 周宏伟,黄佳聪,高俊峰,等.太湖流域太浦河周边区域突发水污染潜在风险评估[J].湖泊科学,2019,31(3):646-655. DOI: 10.18307/2019.0304.
- [6] 田洁.黄河流域河谷型城市突发水污染事故风险评价研究[D].兰州.兰州交通大学,2022. DOI: 10.27205/d.cnki.gltcc.2022.000366
- [7] 周一,靳春玲,贡力,等.内陆河流域突发水污染安全评价:以黑河流域张掖段为例[J].水利水电技术(中英文),2023,54(5):126-135. DOI: 10.13928/j.cn-

- ki.wrahe.2023.05.012.
- [8] 杨星,崔巍,穆祥鹏,等.南水北调中线总干渠Ⅲ级水污染应急处置水力调控方案研究[J].*南水北调与水利科技*,2018,16(2):21-28. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0034.
- [9] 马梦含.长距离输水工程突发水污染事件风险评价[D].兰州.兰州交通大学,2021. DOI: 10.27205/d.cnki.gltcc.2021.000947
- [10] 陈扬.太湖流域河网-湖泊水环境安全评价体系构建:基于德尔菲法的研究[J].*科学技术创新*,2018(26):7-8. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1328.2018.26.005.
- [11] 陈铭瑞,靳燕国,刘爽,等.明渠突发水污染事故段及下游应急调控[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2022,20(6):1188-1196. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0117.
- [12] 王妍.基于G1法的节水型社会指标体系评估探析[J].*水利规划与设计*,2018(6):55-57. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2018.06.017.
- [13] 陈沅江,袁红.基于拉开档次法-TOPSIS的煤尘抑制剂优选决策模型[J].*水土保持通报*,2018,38(3):162-166,173. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.026.
- [14] 刘引鸽,史鹏英,张妍.渭河干流陕西段河流水质污染风险评价[J].*水资源与水工程学报*,2015,26(3):51-54. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.03.11.
- [15] 秦天玲,候佑泽,郝彩莲,等.基于主成分分析法的武烈河流域水质评价研究[J].*环境保护科学*,2011,37(6):102-105. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6216.2011.06.026.
- [16] ZHAO J T, ZHANG X J, QI L J, et al. A comprehensive post evaluation of the implementation of water-saving measures in Xiangtan, Hunan Province, China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(8): 4505. DOI: 10.3390/SU14084505.
- [17] 刘婧怡,王炎,汤家道,等.基于博弈论综合权重法的场地地下水环境污染风险评价[J].*安全与环境工程*,2023,30(1):221-230. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20220100.
- [18] ZHANG X J, QIU N, ZHAO W R, et al. Water environment early warning index system in Tongzhou District[J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(3): 2699-2714. DOI: 10.1007/s11069-014-1456-1.
- [19] LONG Y, XU G, MA C, et al. Emergency control system based on the analytical hierarchy process and coordinated development degree model for sudden water pollution accidents in the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(12): 12332-12342. DOI: 10.1007/s11356-016-6448-0.
- [20] SUN K, HE W B, SHEN Y F, et al. Ecological security evaluation and early warning in the water source area of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 868: 161561. DOI: 10.1016/J.SCI-TOTENV.2023.161561.
- [21] 崔玉荣,戴志清,刘喜峰,等.基于模糊证据推理的南水北调工程突发事件风险评价[J].*水力发电*,2021,47(4):102-107. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2021.04.021.
- [22] 吴钢,蔡井伟,付海威,等.模糊综合评价在大伙房水库下游水污染风险评价中应用[J].*环境科学*,2007(11):2438-2441. DOI: 10.3321/j.issn:0250-3301.2007.11.005.
- [23] 匡佳丽,唐德善.基于熵权模糊综合模型的水污染风险评价:以鄱阳湖流域为例[J].*人民长江*,2021,52(9):32-37,45. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.09.006. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.09.006.
- [24] 傅婕,曹若馨,曾维华,等.基于贝叶斯网络的流域水环境承载力超载风险评价:以北运河流域为例[J].*环境科学学报*,2023,43(3):516-528. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2022.0230.
- [25] 李强,李子阳,王长生,等.长距离输水隧洞盾构法施工风险事件路径预测[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2022,20(5):999-1009. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0099.
- [26] ZHU Y Y, CHEN Z, ASIF Z A. Identification of point source emission in river pollution incidents based on Bayesian inference and genetic algorithm: Inverse modeling, sensitivity, and uncertainty analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285(15): 117497. DOI: 10.1016/J.ENVPOL.2021.117497.
- [27] 魏媛媛.基于熵权-TOPSIS法的安徽省水资源承载力评价研究[D].南京.南京工业大学,2022. DOI: 10.27238/d.cnki.gnjhu.2022.000071.
- [28] 孟定华,朱诗洁,毛劲乔.基于TOPSIS法的鄱阳湖水环境评价研究[J].*水电能源科学*,2023,41(3):44-47. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.2022.1166.
- [29] 王杰,李占玲.基于熵权的TOPSIS综合评价法在大气环流模式优选中的应用[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2020,18(2):14-21. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0023.
- [30] 王富强,马尚钰,赵衡,等.基于AHP和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2021,19(1):67-74. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0006.

## Risk of sudden water pollution incidents: A case study of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project ( Henan section )

YU Yaoguo<sup>1,2</sup>, ZHAO Ziang<sup>3</sup>, CHEN Zhe<sup>3</sup>, JIANG Heng<sup>3</sup>, GUO Shenshen<sup>3</sup>, CHEN Zhao<sup>3</sup>

( 1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Hubei Key Laboratory of Water Resources & Eco-Environmental Sciences, Wuhan 430010, China; ; 3. Henan Water Diversion Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China )

**Abstract:** The Henan section of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project is listed as one of the ten major water conservancy projects. The main functions are urban and rural water supply and improvement of water ecological environment. The water diversion volume of the project is 500 million m<sup>3</sup> in 2030 and 634 million m<sup>3</sup> in 2040. The Henan section is mainly composed of two open channels, four storage reservoirs, and three water pipelines. Although the risk of sudden water pollution incidents in four storage reservoirs and three water pipelines is very small, the transportation industry along the two open channels (i.e., Qingshui River section and Luxin Canal section) is developed and there are many cross buildings, which are prone to sudden water pollution incidents. Once a water pollution incident occurs, it will have a huge impact on drinking water security, industrial water security, and the ecological environment security of the residents in the water receiving area. Therefore, it is of great significance to carry out the risk analysis of sudden water pollution incidents to give full play to the comprehensive benefits of the project, ensure the safety of water supply in the water receiving area, and maintain a good water ecological environment.

The risk factors of sudden water pollution incidents in the Henan section were identified based on an investigation of the existing research results of risk analysis and control countermeasures of sudden water pollution incidents in water transfer projects, and an adaptive risk assessment index system was established. The classification criteria and risk level evaluation model comprehensively evaluated the risk levels of sudden water pollution incidents in seven evaluation sections, and risk monitoring and risk control measures for sudden water pollution incidents were proposed.

The results showed that: (1) The risk sources of sudden water pollution incidents in the Henan section are road traffic accident risk, sewage discharge risk and other risks. (2) Except that the risk level of sudden water pollution incidents in the Qingshui River section and its sub-reaches from the Shiliang controlling gate to the Houheya controlling gate is significant (grade II), the risk level of sudden water pollution incidents in the other five evaluation reaches is large (grade III). (3) To reduce the risk of sudden water pollution incidents in the Henan section, it is necessary to further reduce the risk of risk sources and improve the effectiveness of risk control.

Support is provided for reducing the occurrence probability and harm degree of sudden water pollution incidents in the Henan section of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project, and is of great significance for giving full play to the comprehensive benefits of the project, ensuring the safety of water supply in the water-receiving area, and maintaining a good water ecological environment.

**Key words:** Henan Province; Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project; sudden water pollution incident; risk assessment; risk management and control