

基于事故树的调水线路水质污染风险效应

刘建昌¹, 张微^{1*}, 王利民², 李黛青¹, 范秀英¹, 邓红兵¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 保定市水利水电勘测设计院, 保定 071000)

摘要:中尺度水体污染风险评价的方法尚处于探索阶段. 以连通保定市王快水库和西大洋水库向白洋淀补水项目为例, 提出按事件属性比例确定单事件概率的方法, 并使用故障树法分析了总体引水水体污染风险水平. 结果表明, 沿线污染源对引水水体存在较大风险, 现状风险概率为 0.373, 污染物一旦在项目运行期进入水体可给水体增加约 64.53 mg/L 的 COD、4.57 mg/L 的氨氮、0.066 mg/L 的挥发酚, 增加值较大. 按事件属性比例确定基本事件概率, 对不确定性水质风险评价具有较强的适用性.

关键词:调水工程; 水环境污染; 风险评价; 故障树

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)09-2532-06

Impact of Water Pollution Risk in Water Transfer Project Based on Fault Tree Analysis

LIU Jian-chang¹, ZHANG Wei¹, WANG Li-min², LI Dai-qing¹, FAN Xiu-ying¹, DENG Hong-bing¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Baoding Investigation and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Baoding 071000, China)

Abstract: The methods to assess water pollution risk for medium water transfer are gradually being explored. The event-nature-proportion method was developed to evaluate the probability of the single event. Fault tree analysis on the basis of calculation on single event was employed to evaluate the extent of whole water pollution risk for the channel water body. The result indicates that the risk of pollutants from towns and villages along the line of water transfer project to the channel water body is at high level with the probability of 0.373, which will increase pollution to the channel water body at the rate of 64.53 mg/L COD, 4.57 mg/L NH_4^+-N and 0.066 mg/L volatilization hydroxybenzene, respectively. The measurement of fault probability on the basis of proportion method is proved to be useful in assessing water pollution risk under much uncertainty.

Key words: water transfer project; water pollution; environmental risk assessment; fault tree analysis

目前环境风险研究应用较多的是有毒有害、易燃易爆危险品的风险评价, 为此我国专门出台了相应的导则^[1]. 部分学者对我国个别水源水质进行了健康风险评价, 量化了污染物对人体可能造成的危害^[2~4]. 水体污染风险水平衡量已有大量的研究基础^[5~9], 而对中尺度调水水体本身受污染的风险进行评价的应用还不成熟, 可供借鉴的案例不多见, 也一直被业界所忽视^[10~14]. 但在实际进行这类环境影响分析时, 如不考虑水质污染风险评价, 势必造成认识不足、防范措施不够的后果. 事故树或故障树分析法, 是安全系统工程的重要分析方法之一, 它能对各种系统的危险性进行辨识和评价, 不仅能分析出事故的直接原因, 而且能深入地揭示出事故的潜在原因, 虽然该方法在水质风险评价方面鲜有案例, 但在其他领域风险评价方面用途较多^[15~21]. 本文以调水线路受污染的风险为例, 探讨评价该类风险的理论、方法和步骤, 尝试采用故障树分析法, 定性 with 定量相结合地分析线路穿越区域各类污染物进入沿线水体

的可能性, 评价其引起的水质风险, 阐明水体污染发生的环节、潜在性及其风险大小, 提出减缓风险水平的措施, 以期为中尺度风险评价的理论和实践提供借鉴.

1 评价方法与步骤

1.1 事故树分析法步骤

风险是指遭受损失、损害、毁坏的可能性和程度^[1]. 水质风险是指在引水沿线涉及区域的尺度上描述和评估污染物排放对引水水体产生不利水质影响的可能性和大小. 水质风险系统具有影响因素多、时间长、不确定性大等特点, 是一个复杂的系统.

风险分析方法很多, 诸如类比法、加权法、因素

收稿日期: 2008-10-19; 修订日期: 2009-04-20

基金项目: 国家重点科技攻关项目(96-920-17-01-01); 亚州开发银行白洋淀流域生态系统综合管理与环境保护项目(GEF-TA4926-PRC)

作者简介: 刘建昌(1974~), 男, 博士, 主要研究方向为区域污染控制和生态系统管理, E-mail: amoytiger@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangw@rcees.ac.cn

图法、首推类比法^[1]、层次分析法^[22]、模糊数学法^[23]、统计和概率法^[24]、马尔柯夫过程^[25]等. 这些方法各有利弊, 可根据实际情况选取或组合使用. 故障树分析法既适用于定性分析, 又适用于定量评价, 具有应用范围广和简明形象的特点, 主要通过评估事件的发生概率以及在不同概率下事件后果的严重性, 决定适宜采取的对策^[26, 27]. 运用故障树分析法进行水质风险评价的过程参考文献^[1, 28, 29].

事故树分析方法应用于评价中尺度水体风险评价, 是将中尺度水体整体看作一个系统, 分析该水体相关因素对其产生的水环境污染事件发生的可能性组合. 应用事故树分析法研究调水项目水环境风险目前案例较少, 本文具有一定的探索性. 用该方法评价调水水体的污染风险, 描述事故的因果关系直观明了、思路清晰、逻辑性强, 既可定性分析, 又可定量分析等, 优势在于可以全面识别产生风险的因素、能比较各因素的重要程度、可以定量评价风险效应, 其缺点在于确定单因素的发生概率和单因素以何种方式组成总体事件, 难以精确衡量等.

1.2 事故树分析法基本公式

(1)基本事件结构重要度^[30]

$$I_{\varphi(i)} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^m \frac{1}{R_j} \tag{1}$$

式中, k 为事故树包含的最小割集数目, m 为包含第 i 个基本事件的最小割集数目, R_j 为包含第 i 个基本事件的第 j 个最小割集中基本事件的数目.

(2)基本事件概率重要度^[30]

$$I_{g(i)} = \frac{\partial g(q)}{\partial q_i} \tag{2}$$

式中, $g(q)$ 为事故树概率函数, q_i 为包含第 i 个基本事件的概率函数.

(3)顶上事件概率

与门结构的顶上事件的发生概率, 表示为^[31]:

$$P_T = \bigcap_{i=1}^n X_i = \prod_{i=1}^n P_i \tag{3}$$

或门结构的顶上事件的发生概率, 表示为^[19]:

$$P_T = \bigcup_{i=1}^n X_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \tag{4}$$

式中, X_i 为事件变量; P_T 和 P_i 为顶上事件及其下级事件的概率; n 为使顶上事件发生的下级事件个数; T 为总体事件, 也即顶上事件; 这里假设所有下级事件为独立且非互斥事件.

2 案例研究

2.1 研究区概况

白洋淀是华北地区最大的最重要的湿地生态系统, 在调节局部地区气候、为鸟类和各种水生动植物提供栖息地、补充周边地下水等方面有着不可替代的生态功能, 为生物地球化学循环的海陆过渡地带^[32]. 近年来受水资源不足和大规模经济活动影响, 白洋淀多次干淀和污染, 生态系统极其脆弱^[33]. 为缓解白洋淀湿地萎缩, 保定市政府拟通过连通王快水库和西大洋水库向白洋淀和保定市调水. 工程将引入Ⅱ类水, 解决白洋淀水资源不足和水质恶化问题. 线路穿越曲阳、唐县、顺平、清苑和保定市等多处县域城镇, 涉及新开挖河道、自然河道、城镇河道, 跨度长, 穿越区人口密度大, 沿线乡镇企业多, 而其沿线水体本身又兼具多方面功能, 是容易受到污染的对象. 线路走向如图 1 所示. 要确保调水水质, 必须充分认识沿线区域所排放的各类污染物进入调水水体的可能性和所造成的后果, 为项目风险管理提供支持.

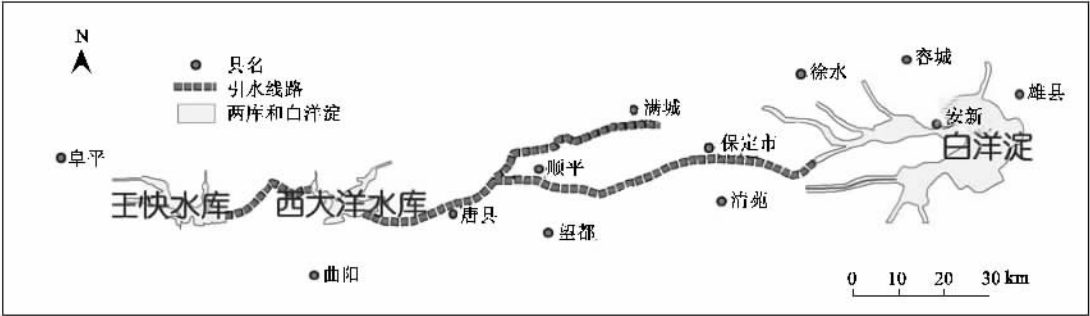


图 1 调水线路

Fig.1 Map of water transfer line

2.2 系统识别和约简

水质风险是一个十分复杂的系统, 这里将研究

对象定为调水线路水体及其相关因素组成的系统, 为便于计算, 对该系统进行如下约简: ①因调水线路

只有在调水时才会有水,这里把调水水体当作一条恒定河流,期间不考虑蒸发、降水、入渗和中途补给,即流速、流量不变化(事实上变化也不大);②将该调水线路水体当作整体来衡量其水质风险,调水线路在唐县分为2条,只是相机补水,是在不向白洋淀补水时为一亩泉地下水体进行补充;③不考虑污染源的空间分布,只作污染源数量和排放污染负荷的考虑;④各基本事件的发生概率与发生后果无关,发生的后果在计算效应时计算等.

2.3 故障树编制和分析

基于系统状况分析,确立顶上事件为“全段水质风险”,将其逐层分析,建立故障树(图2).基本故障事件主要涉及过量施肥、近期产生径流、河堤未阻隔等因素.污染物进入沿线水体的过程复杂,有些基本事件并非完全独立,但看作为独立事件;有些事件的逻辑关系并非简单的“或”或“并”的关系,但为了便于计算进行了相应的简化;在保证多数基本事件科学性的前提下,事件关系的确定带有一定的经验性和假设性^[34,35].

基本事件概率的确定方法是各个基本事件某种

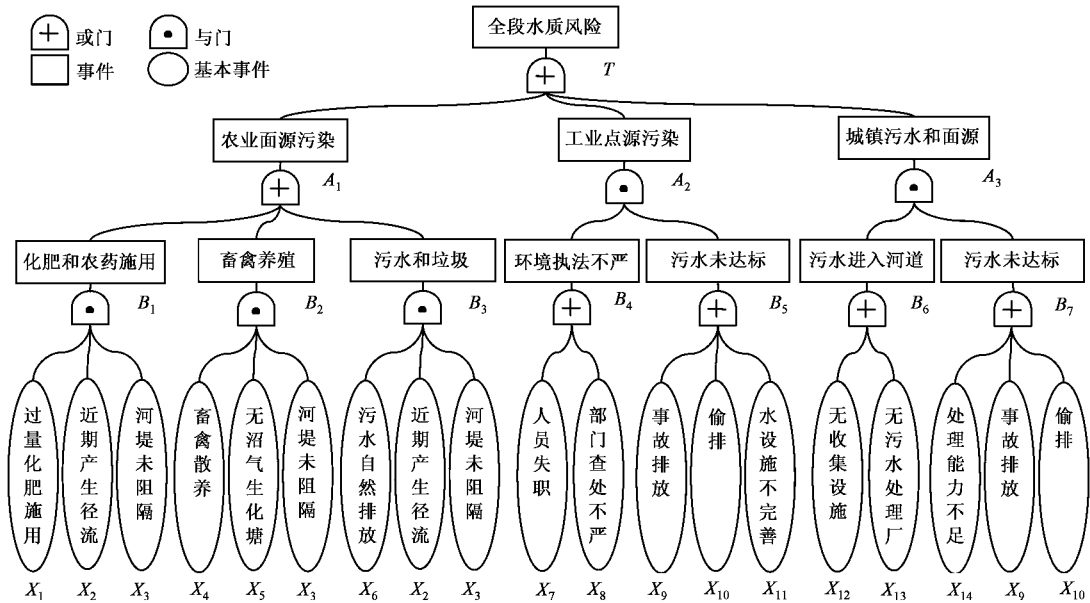


图2 污染物进入引水水体的水质风险概率故障树

Fig.2 Fault tree of pollution risk in water body of the transfer line

属性占总样本总量的比例,这里称之为属性比例法.数据来源有历史资料、气象数据、走访调查、统计年鉴、文献资料、专家意见、土地利用等.利用地理信息系统叠加沿线地形图、工程规划图和地理位置等图件,根据基本事件涉及的面积、长度、区域、人口、时间等方面的比例进行确定.如过量施用化肥这一事件的概率,是通过过量施肥的农田面积,除以研究区总农田面积得出的;而过量施肥面积是通过地理信息系统平台,将施用氮肥折纯量>275 kg/hm²的农田面积统计求和得出.概率确定结果见表1.

在各基本事件发生概率确定以后,根据故障树结构和计算原理,进行故障树分析.水质污染风险的逻辑表达式为:

$$\begin{aligned} &+ X_7 X_{10} + X_7 X_{11} + X_8 X_9 + X_8 X_{10} \\ &+ X_8 X_{11} + X_{12} X_{14} + X_{12} X_9 + X_{12} X_{10} \\ &+ X_{13} X_{14} + X_{13} X_9 + X_{13} X_{10} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)表明最小割集数为14,即水质污染事故的可能路径有14个.按照式(1)算得基本事件结构重要度 $I_1 = I_4 = I_5 = I_6 = 0.024$, $I_2 = 0.048$, $I_3 = I_{11} = I_{14} = 0.071$, $I_7 = I_8 = I_{12} = I_{13} = 0.107$, $I_9 = I_{10} = 0.143$.所以对引水河产生污染风险的结构重要度顺序 $I_9 = I_{10} > I_7 = I_8 = I_{12} = I_{13} > I_3 = I_{11} = I_{14} > I_2 > I_1 = I_4 = I_5 = I_6$.

据式(2)算得基本事件概率重要度 $I_1 = I_6 = 0.012$, $I_2 = 0.104$, $I_3 = 0.071$, $I_4 = 0.044$, $I_5 = 0.036$, $I_7 = I_8 = 0.750$, $I_9 = I_{10} = 1.850$, $I_{11} = 0.350$, $I_{12} = 0.100$, $I_{13} = 0.200$, $I_{14} = 1.500$.所以对引水河产生污染风险的概率重要度顺序为 $I_9 = I_{10} > I_{14} > I_7 = I_8$

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^3 A_i = \left(\sum_{i=1}^3 B_i \right) + \left(\prod_{i=4}^5 B_i \right) + \left(\sum_{i=6}^7 B_i \right) \\ &= X_1 X_2 X_3 + X_4 X_5 X_3 + X_6 X_2 X_3 + X_7 X_9 \end{aligned}$$

表 1 引水线路水质风险基本事件发生概率确定

Table 1 Probability of basic event for pollution risk on the transfer line

编号	基本事件	概率	因素属性比例法确定概率	数据源 ¹⁾
X_1	过量施用化肥	0.30	过量施肥面积占总农田面积比例	▽◇
X_2	近期内产生径流	0.15	施肥(污水排放)前后一周内浇地和降雨天数与施肥周期总天数之比	△▽
X_3	河堤未阻断	0.08	高于引水渠堤的长度比例	◇○
X_4	畜禽散养	0.45	散养量与总养殖量之比	▽◎
X_5	无沼气生化塘	0.55	有处理设施户数与总户数之比	▽◎
X_6	村庄污水自然排放	1.00	自然排放村庄与全部村庄之比	▽
X_7	管理人员失职	0.20	引水渠内超标排污口数与总排污口数之比	▽○
X_8	地方部门查处不严	0.15	引水渠内非法排污口数与总排污口数之比	▽○
X_9	事故排放	0.05	事故排放吨数与总量之比	▽○
X_{10}	偷排	0.10	偷排吨数与总量之比	▽○
X_{11}	水设施不完善	0.60	无污水处理设施企业数比例	▽○
X_{12}	无收集设施	0.70	无污水收集设施城镇个数与总城镇数之比	▽○
X_{13}	无污水处理厂	0.80	无个污水处理厂城镇个数与总城镇数之比	▽○
X_{14}	污水处理能力不足	0.05	污水处理厂未处理污水的比例	▽○

1)△气象数据,▽走访调查,◇GIS 统计,◎统计数据(2005),○部门报告

$> I_3 > I_{11} > I_{13} > I_2 > I_{12} > I_4 > I_5 > I_1 = I_6$.

据式(3)和式(4)通过各层事件概率计算可得顶上事件概率为 0.373,即调水水体整体发生水质污染的风险概率为 0.373.这说明影响水体水质下降的因素较多,污染发生的可能性较大.调水水体整体污染的风险概率,与水体整体污染的源强相作用,即可估算出这种可能性条件下产生的风险效应,即危害程度.

2.4 风险效应衡量

2.4.1 风险衡量方法

辨识系统所面临的风险概率之后,应对风险水平进行衡量,以确定危害后果.衡量风险水平时考虑 2 个方面:损失发生的概率和损失的严重性.风险水平表示为^[1, 34, 35]:

$$R = f(P, C) \tag{6}$$

式中, R 表示风险水平, P 表示危害概率,而 C 则表示损失严重性.本研究是评价引水水体受外来污染物的量对引水水质的影响,所以假设其风险水平函数是污染物进入引水沿线水体的可能性(概率)与相应的污染物进入水体量的乘积,即:

$$R = f(P, C) = P \times C \tag{7}$$

式中, R 表示可能进入水体的污染物源强,概率 P 表示污染物进入引水水体的概率, C 则表示污染物的可能量.

2.4.2 可能进入引水线水体的污染源估算

根据保定市水利局和环保局污染源统计资料^[36, 37],汇总出该引水项目涉及区域有可能进入沿线水体的污染源排放量.2005 年的沿线污染排放量结果如表 2 所示.

表 2 2005 年可能进入引水工程的沿线主要污染物排放情况

Table 2 Emission of main pollutants to the channel water body in 2005

地段	涉及县域	污水入河量 $\times 10^4/\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	主要污染物入河量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$		
			COD	氨氮	挥发酚
两库连通段	阜平县全部	1 714.31	702.69	26.73	0.06
	曲阳县 1/3 城镇	261.79	581.04	4.59	6.93
	唐县 2/3 城镇	523.58	1 162.09	9.17	13.87
	小计	2 499.67	2 445.82	40.49	20.86
西大洋水库至保定段	唐县 1/3 城镇	261.79	581.04	4.59	6.93
	望都县 1/3 城镇	66.8	42.75	13.43	0.01
	顺平县全部城镇	226.87	771.37	20.42	0.11
	满城县 2/5 城镇	3 687.06	8 861.23	447.85	0.49
	小计	4 242.53	10 256.4	486.28	7.54
保定至白洋淀段	满城县 1/5 城镇	1 843.53	4 430.61	223.93	0.25
	保定市区全部	4 617.43	7 394.32	1 077.25	1.62
	清苑县 1/2 城镇	283.59	686.96	146.23	0.14
	安新县 1/6 城镇	34.81	5.22	0.26	0
	小计	6 779.37	12 517.11	1 447.66	2.01
总引水工程	合计	13 521.57	25 219.33	1 974.43	30.41

根据式(6)可以计算出沿线污染物可能进入水体的源强(风险水平),污染水排放量5 043.55万 t,其中 COD、氨氮和挥发酚现状年排放量分别为 9 406.81、736.46 和 11.34 t.

2.4.3 风险危害效应评估

为便于计算污水进入水体的总体效应,假设:①不考虑水量损失,引水总量按 2.0 亿 t 考虑,水质按 II 类水功能区标准考虑;②这些污染物排入引水河道(渠)迅速混合,为完全混合模式;③在混合的时间内不考虑降解、沉降和其它生化反应;④污水和整体河道(渠)均为连续恒定排放.使用河流完全混合模式估算其总水质效应,即^[38]:

$$c = (c_p Q_p + c_h Q_h) / (Q_p + Q_h) \tag{8}$$

式中, c 表示完全混合后混合水中污染物的浓度, mg/L; Q_p 表示污水流量, m³/s; c_p 表示污水中污染物的浓度, mg/L; Q_h 表示河水流量, m³/s; c_h 表示河水中污染物的浓度, mg/L.

据式(8)算出污染物风险源强对整个水体水质的影响,结果见表 3.考虑保定市 GDP 增长速度和技术进步因素,按污染物排放量增加 10% 计算^[36,37],预测 2010 年污染物增加引起的水质效应也列入表 3 中.

表 3 污染源对总沿线水质的风险效应/mg·L⁻¹

Table 3 Risk impact of the channel water pollution/mg·L⁻¹

项目	主要污染物入河浓度贡献量(风险后果)		
	COD 增加	氨氮增加	挥发酚增加
2005 年风险效应	49.54	3.34	0.047
2010 年风险效应	64.53	4.57	0.066
II 类水质标准	15	0.5	0.002
III 类水质标准	20	1.0	0.005
V 类水质标准	40	2.0	0.1

风险污染物现状年(2005 年)可给水体增加约 49.54 mg/L 的 COD、3.34 mg/L 的氨氮、0.047 mg/L 的挥发酚,项目运行期(2010 年后)会更高,对照水质标准发现增加值较大.所以风险源强一旦进入水体,其水质贡献影响即处于较高的风险效应水平. COD 会超过 III 类水质,对下游保定市饮用水补给和白洋淀水体会有较大的影响,应考虑实施减缓措施以降低风险概率.

2.4.4 顶上事件概率变化影响水质效应的情景分析

针对沿线水质污染风险水平较高的现状及趋势,应构建一系列管理措施,减缓其相应的基本事件概率,从而减少水体水质风险(顶上事件)的概率.顶

上事件发生概率的变化引起的风险效应情景见表 4.可知,在实施相应减缓管理措施后,顶上事件风险概率发生变化,风险引起水体的污染程度随之变化.风险概率越低引起的水体污染效应越小,污染效应在随概率降低到一定程度后降低减慢,表现出较大的边际性.如果风险总概率从 0.373 降至 0.05 以下,污染水平将达到 III 类水体的要求(可接受水平).

表 4 项目运行后(2010 年)顶上事件概率变化对水质的风险效应情景/mg·L⁻¹

Table 4 Scenarios of pollution risk impact resulted from different probability of top risk event after 2010/mg·L⁻¹

顶上事件 概率情景	主要污染物入河浓度贡献情景		
	COD 增加浓度	氨氮 增加浓度	挥发酚 增加浓度
0.373	64.53	4.57	0.066
0.300	57.22	3.97	0.057
0.200	45.66	3.02	0.042
0.100	31.84	1.88	0.024
0.050	23.85	1.23	0.014
0.010	16.85	0.65	0.004
0.005	15.93	0.58	0.003
0.001	15.19	0.52	0.002

从前述故障树结构重要度和概率重要度运算结果看,基本事件“事故排放”、“偷排”、“管理人员失职”和“地方部门查处不严”等因素对顶上事件概率起较大作用,要降低总概率应着重减少这些基本事件的发生概率.

3 结论

(1)企业和污水处理厂的“事故排放”、“偷排”,各执法机构的“管理人员失职”、“地方部门查处不严”等基本事件或因素对顶上事件概率起较大作用,要有效降低其污染风险效应,可从这些事件或因素入手寻找到有效的管理措施或途径.

(2)引水沿线现状污染源对引水河道的水质风险水平较高,风险概率为 0.373,污染物在项目运行期一旦进入水体可给水体增加约 64.53 mg/L 的 COD、4.57 mg/L 的氨氮、0.066 mg/L 的挥发酚,增加值较大.通过情景分析可知,顶上事件概率为 0.05 以下时,污染效应才能达到可接受的水平(III 类水体功能).

(3)在实施单事件风险管理措施后,顶上事件风险概率发生变化,风险引起水体的污染程度随之变化.风险概率越低引起的水体污染效应越小,污染效应在随概率降低到一定程度后降低减慢,表现出较大的边际性.必须实施综合的减缓管理措施,并对这些

单事件管理措施按照其组成总体事件的逻辑关系进行系统优化,才能达到最佳费效比的风险控制效果。

(4)就水质污染风险而言,从资料的收集、风险因素的识别、评价方法选择、参数确定、多种风险因素的综合评价,这些过程不可避免都带有一些客观的或主观的不确定性。根据基本事件涉及的面积、长度、数量、时间等方面属性的比例来确定基本事件的发生概率,在系统不确定性较大的情况下,不失为一个有效的水质风险定量评价方法。

参考文献:

- [1] HJ/T 169-2004, 建设项目环境风险评价技术导则[S].
- [2] 钱家忠,李如忠,汪家权,等.城市供水水源地水质健康风险评估[J].水利学报,2004,(8):90-93.
- [3] 曾光明,卓利,钟政林,等.水环境健康风险评估模式[J].水科学进展,1998,9(3):212-217.
- [4] 吴义锋,薛联青,吕锡武.基于未确知数学理论的水质风险评估模式[J].环境科学学报,2006,26(6):1047-1052.
- [5] 贺锡泉.非突发性环境风险研究[J].中国环境科学,1990,10(3):218-223.
- [6] 曾光明,卓利,钟政林,等.突发性水环境风险评估模型事故泄漏行为的模拟分析[J].中国环境科学,1998,18(5):403-406.
- [7] 陈小红,涂新军.水质超标风险率的CSPPC模型[J].水利学报,1999,(12):1-5.
- [8] 胡国华,夏军,赵沛伦.河流水质风险评价的灰色-随机风险率方法[J].地理科学,2002,22(2):249-253.
- [9] 李黎武,施周.基于模糊事件概率理论的水质风险率计算方法[J].水利学报,2007,38(4):417-421,426.
- [10] 冯玉国.水环境质量评价的灰色局势决策法[J].环境科学学报,1994,14(4):426-430.
- [11] Soldán P. Toxic risk of surface water pollution—six years of experience [J]. *Environment International*, 2003, 28(8): 677-682.
- [12] Foster J A, McDonald A T. Assessing pollution risks to water supply intakes using geographical information systems (GIS) [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2000, 15(3): 225-234.
- [13] Giupponi C, Eiselt B, Ghatti P F. A multicriteria approach for mapping risks of agricultural pollution for water resources: The Venice Lagoon watershed case study [J]. *Journal of Environmental Management*, 1999, 56(4): 259-269.
- [14] 许新宜,尹宏伟,姚建文.南水北调东线治污及其输水水质风险分析[J].水资源保护,2004,(2):1-2,8.
- [15] Sadiq R, Kleiner Y, Rajani B. Water quality failures in distribution networks-Risk analysis using fuzzy logic and evidential reasoning [J]. *Risk Analysis*, 2007, 27(5): 1381-1394.
- [16] Lindhe A, Rosen L, Norberg T, *et al.* Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems [J]. *Water Research*, 2009, 43: 1641-1653.
- [17] Paolo B, Jason K L, Anthony M, *et al.* Construction of event-tree/fault-tree models from a Markov approach to dynamic system reliability [J]. *Reliability Engineering System Safety*, 2008, 93(11): 1616-1627.
- [18] Yuge T, Yanagi S. Quantitative analysis of a fault tree with priority AND gates [J]. *Reliability Engineering System Safety*, 2008, 93(11): 1577-1583.
- [19] Kaiser B, Gramlich C, Förster M. State/event fault trees—A safety analysis model for software-controlled systems [J]. *Reliability Engineering System Safety*, 2007, 92(11): 1521-1537.
- [20] Needham D M, Jones S A. A software fault tree key node metric [J]. *Journal of Systems and Software*, 2007, 80(9): 1530-1540.
- [21] Shalev D M, Tiran J. Condition-based fault tree analysis (CBFTA): A new method for improved fault tree analysis (FTA), reliability and safety calculations [J]. *Reliability Engineering System Safety*, 2007, 92(9): 1231-1241.
- [22] Saaty T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process [J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, 48: 9-26.
- [23] 张跃,邹寿平,宿芬.模糊数学方法及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1992.146-212.
- [24] 龚光鲁.概率论与数理统计[M].北京:清华大学出版社,2006.167-187.
- [25] 王洪德,马云东.基于Markov过程理论的矿用通风机系统可靠性研究[J].安全与环境学报,2004,4(2):57-59.
- [26] Lloyd D K, Lipow M. Reliability: management, methods, and mathematics [M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1962. 291-299.
- [27] Khan F I, Husain T. Risk assessment and safety evaluation using probabilistic fault tree analysis [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2001, 7(7): 1909-1927.
- [28] Macdonald D M, Mackay S. Guide to fault tree analysis [M]. *Practical Machinery Safety*, Cape Town, South Africa, 2004. 257-261.
- [29] 陈能汪,洪华生,张珞平.流域尺度氮流失的环境风险评估[J].环境科学研究,2006,19(1):10-14.
- [30] 王洪德.用事故树法分析矿井内因火灾引起CO中毒事故[J].辽宁工学院学报,2002,22(3):24-26.
- [31] 王显政.新编安全评价手册[M].北京:煤炭工业出版社,2005.
- [32] 陈明,陈建国,王建芬.环渤海沿岸沼泽化、盐渍化和沙漠化的演化及其与全球变化的关系[J].第四纪研究,1991,(2):113-122.
- [33] Liu C L, Xie G D, Huang H Q. Shrinking and drying up of Baiyangdian lake wetland: a natural or human cause [J]. *Chinese Geographical Science*, 2006, 16(4): 314-319.
- [34] 胡二邦.环境风险评估实用技术和方法[M].北京:中国环境科学出版社,2000.
- [35] 国家安全生产监督管理局.危险化学品安全评价[M].北京:中国石化出版社,2003.
- [36] 保定市环保局.保定市环境质量报告书[R].2001-2005.
- [37] 保定市水利局.保定市水资源质量评价[R].2004.
- [38] GB 3839-83,制定地方水污染物排放标准的技术原则与方法[S].