

突发水污染风险评价与应急对策研究进展

李春晖, 田雨桐, 赵彦伟, 王烜

引用本文:

李春晖, 田雨桐, 赵彦伟, 等. 突发水污染风险评价与应急对策研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1161-1167.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0411>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于GIS的泾惠渠灌区地下水污染人体健康风险评价

徐斌, 张艳

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 992-1000 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1257>

中国硝酸盐脆弱区划分与面源污染阻控

马林, 卢洁, 赵浩, 柏兆海, 胡春胜

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2387-2391 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1369>

北京市平谷应急水源地周边农业土壤中重金属分布及风险评价

唐磊, 张会昌, 季宏兵, 冯金国, 姚俊, 闫广新

农业环境科学学报. 2015(10): 1897-1904 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.10.009>

近150年呼伦湖重金属污染历史及潜在生态风险

孙德尧, 臧淑英, 孙华杰, 张囡囡, 张科, 孙丽

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 137-147 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1146>

黄河呼和浩特段水体污染风险评估及其发生特性

冯利忠, 裴国霞, 吕欣格, 张琨, 王超

农业环境科学学报. 2015(7): 1349-1355 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.07.017>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李春晖, 田雨桐, 赵彦伟, 等. 突发水污染风险评价与应急对策研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1161–1167.

LI Chun-hui, TIAN Yu-tong, ZHAO Yan-wei, et al. Research progress on risk assessment and emergency countermeasures of sudden water pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1161–1167.



开放科学 OSID

突发水污染风险评价与应急对策研究进展

李春晖, 田雨桐, 赵彦伟, 王 焯

(北京师范大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要:突发水污染事故的频繁发生, 严重威胁着水生态环境, 使水生生物受到威胁, 社会经济遭受损失, 造成恶劣社会影响。因此在事故发生前进行风险识别与评价, 并采取应急预防控制措施是减小事故危害的重要手段。本文采用文献调研法综述了以突发水污染风险识别为前提的风险评价与应急对策的研究现状及发展趋势, 采取专家意见法提出环境风险受体量化分级依据。并采用类比法对突发水污染风险评价的方式进行归类, 依据环境风险特征对应急对策进行研究。归纳出突发水污染风险源包括固定污染源及移动污染源两种, 得出突发水污染风险评价包含3种方式: 定性评价法、半定量评价法及定量评价法, 构建了应急预案的预警指标体系, 并按照反应时间流程对应急预案进行了梳理。未来突发水污染风险评价与应急对策将进一步拓展风险源识别, 构建完善的评价技术规范体系。

关键词:突发水污染; 风险源; 风险受体; 风险评价; 应急预案

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)06-1161-07 doi:10.11654/jaes.2020-0411

Research progress on risk assessment and emergency countermeasures of sudden water pollution

LI Chun-hui, TIAN Yu-tong, ZHAO Yan-wei, WANG Xuan

(Key Lab of Water and Sediment Science of the Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The frequent occurrence of sudden water pollution accidents seriously threatens the aquatic environment, threatens aquatic organisms, suffers social and economic losses, and causes bad social impacts. It is an important way to reduce the harm of the accident by carrying out risk identification and evaluation before the accident and adopting emergency prevention and control measures. This research used the literature survey method to summarize the research status and development trend of risk assessment and emergency countermeasures based on the identification of sudden water pollution risk, and adopted the expert opinion method to put forward the quantitative classification basis of environmental risk receptors the analogy method was used to classify the sudden water pollution risk assessment method, and studied the emergency countermeasures according to the environmental risk characteristics. Summing up the sudden water pollution risk sources included fixed pollution sources and mobile pollution sources, it was concluded that sudden water pollution risk assessment included three methods: Qualitative evaluation method, semi-quantitative evaluation method and quantitative evaluation method. And an early warning index system for emergency plans was constructed, and the emergency plans were sorted out according to the response time flow. In the future, sudden water pollution risk assessment and emergency countermeasures will further expand the identification of risk sources and build a comprehensive evaluation technical specification system.

Keywords: sudden water pollution; risk source; risk identification; risk assessment; emergency plan

收稿日期: 2020-04-12 录用日期: 2020-04-28

作者简介: 李春晖(1976—), 男, 安徽临泉人, 教授, 从事水环境、水生态研究。E-mail: chunhui@bnu.edu.cn

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110001)

Project supported: The Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment(2018ZX07110001)

风险是某种不希望发生却可能发生的事件,可将其定义为因未知行为或状态产生的有负面效应的后果发生的可能性^[1]。风险评价包含类型较多,如健康风险评价、生态风险评价、环境风险评价和灾害风险评价等^[2]。突发水污染事件同时具备了瞬时突发性和后果严重性两大基本要素,是典型的环境风险事件^[3]。

突发水污染风险评价是对突发水污染事件造成的不利后果的可能性和危害程度进行评价^[4]。突发水污染事件有2种类型:一是短期内污染物因偶然原因大量排放而产生水污染,被称为突发水污染事故;二是长期污染物累积排放,达到临界点后骤然产生严重水污染,被称为累积水污染事故^[5]。突发水污染风险评价在水污染事故预警环节中占有重要位置^[6]。突发水污染应急预案是针对突发水污染事件发生后的应急机制,对应急人员掌握事件的发展趋势,最大化降低其不利影响有很大作用^[7]。

近年来我国突发水污染事故频繁发生,严重威胁着水生态环境,特别是严重污染了水源水质,使水生生物受到威胁,社会经济遭受损失,造成恶劣社会影响。突发水污染风险评估与应急对策是当前水环境应急管理的主要手段和重点内容,用于预测突发水污染事故,全面展示其影响范围和程度并对其进行应急决策支持^[8]。

一般而言,突发水污染风险研究包括:(1)突发水污染风险源识别,属于事故前预防,通过风险分析发现隐患,为风险预防提供科学依据;(2)突发水污染风险评价,属于事故后调研,通过数学建模,对污染物在水中造成的污染程度进行评价研究;(3)突发水污染应急管理,属于事故后管理,依据系统安全理论、风险分析评价和应急决策理论,通过事故模拟技术等,对突发水污染进行应急处理^[9]。本文将以前述突发水污染风险识别为前提对突发水污染风险评价与应急对策研究进行系统分析和总结,分析常用的方法和框架,总结存在的问题,以期管理者决策提供技术依据。

1 突发水污染风险识别

风险识别是指通过调查研究收集数据的过程中,使用某些方法系统地评价和分析潜在和现有的各种风险来源和风险因素,并识别风险的性质,找出风险的主要方面和引起风险的因素,而后评估其后果^[10]。

风险识别是环境风险评价的第一步,其识别出的风险对环境风险评价的结果产生直接的影响^[11]。突发水污染事故的环境风险识别是指可能导致突发水污染事故的风险源及可能遭受突发水污染损害的风险受体的识别^[12]。

1.1 突发水污染风险源识别

突发水污染事故的风险源有固定和移动污染源两种。固定源是在事故发生过程中,空间位置不发生变化,多为局部扩散,且主要是化学污染的污染源。移动源是在释放过程中其本身的空间位置也在改变,多是油品或化学性污染的污染源^[13]。

在两种类型突发水污染风险源识别方面,很多学者提出了相应的识别技术与方法。比如周娜^[14]提出了包括危险物质识别、危险设施(设备)识别、危险生产工艺识别、危险功能单元划分、危险类别识别、重大危险源识别、风险评价工作等级识别、风险评价范围识别等8项内容的“风险识别八步法”。李伟等^[15]将熵权法和属性理论相结合,建立了港口水域交通水环境风险评价的熵权属性识别模型,进而得出了各评价区域的风险等级和排序。卢蔚^[16]建立了包含“环境风险源筛选”和“风险分级”两步的分级方法用于识别移动型环境风险源并为其环境风险进行分级。这些识别技术基本上能满足现今阶段的突发水污染风险源识别要求。

1.2 突发水污染风险受体识别

风险受体是在环境风险发生时,周围可能遭受危害的因素总和。水污染风险受体主要考虑可能被污染的水质所影响的因素。突发水污染风险的受体需考虑与风险源的暴露关系,并结合与评价终点可能的效应关系进行选取。常见的风险受体有居住用地、水体、取水口、自然保护区、耕地及林地等。评价终点一般包含人员安全、财产安全、水质状态及敏感生态受体状态等因素。一般而言,风险源、风险受体及评价终点3者的关系如图1所示。

依据突发水污染事件的危害特征和区域内具体风险管理目标确定风险评价受体。一般选择取水口(饮用水取水口、地下水源、农灌引水口等)、居住用地、农用地、水体和自然保护区等作为风险受体,以反映决策者所关注的人员财产安全、水质状态和敏感生态受体状态等评价终点^[17]。依据现有相关国家标准,结合专家判断法与经验法,本文确定了常见的各风险受体量化分级,如表1所示。

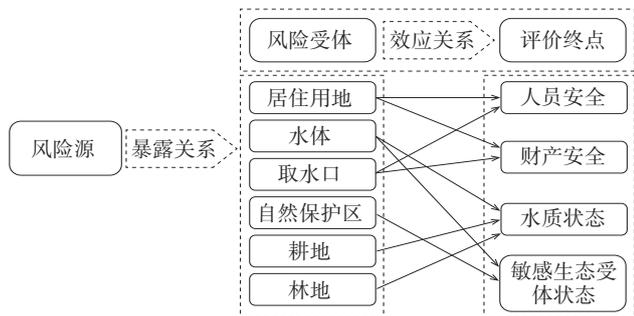


图1 流域突发水污染事故相对风险概念模型

Figure 1 Conceptual model of relative risk of sudden water pollution accidents in river basins

表1 流域常见风险受体量化分级依据

Table 1 Basis for quantitative classification of common risk receptors in river basins

风险受体 Risk receptor	等级标准 Grade standard	等级 Grade	划分依据 Division basis
饮用水取水口	服务人口数	I	≤5万人
		II	5万~10万人
		III	>10万人
农灌引水口	服务耕地面积	I	≤100 km ²
		II	100~200 km ²
		III	>200 km ²
居住用地	人口密度	I	≤3 500人·km ⁻²
		II	3 500~6 000人·km ⁻²
		III	>6 000人·km ⁻²
农用地	作物类别	I	绿肥作物
		II	经济作物
		III	粮食作物
水体	水环境功能类别	I	IV、V类水
		II	Ⅲ类水
		III	I、II类水
自然保护区	功能区	I	实验区
		II	缓冲区
		III	核心区

2 突发水污染风险评价

在20世纪70年代前后,只有少数发达国家开始研究环境风险评估。最具代表性的是美国“大型核电站重大事故的理论可能性和后果”研究报告^[18],由此形成了环境风险评价体系的基础框架。美国核管理委员会(Nuclear Regulatory Commission, NRC)于1975年构建了基于系统安全工程分析法的核电厂风险评价指南,在当时成为环境风险评价的技术性指导。21世纪后,环境风险评价得到进一步完善,例如 Anabela等^[19]建立了基于多目标分析,主要用于可能进入

水体的持久性、可生物累积性及有毒污染物质的风险源排查的水污染风险战略评价模型。

中国学者在环境风险评估研究中也取得了一些进展。刘杨华^[20]将危险源指数法和事故树分析法两种方法相结合,完成了化工企业的风险源评价。刘志国等^[21]提出了基于USNAS(U.S. National Academy of Science)健康风险评价理论的突发水污染应急健康风险评价指标体系,可为发生在水污染应急中的突发事件提供应急管理的依据。邵必林等^[22]将模糊思想与指数法相结合用于确定指数分值,将多个因素细化分层,解决了指数法过度依靠专家经验、受主观影响大的缺点。朱炜玉^[23]建立了基于蒙特卡罗模拟、层次分析法和风险矩阵的突发水污染事件实时动态预警模型,充分考虑突发水污染发生时的不确定性,同时实现对下游的风险等级评价。按照指标的量化程度,本文将已开发的环境风险评价方法分为定性评价法、半定量评价法和定量评价法3类^[24]。

2.1 定性评价法

定性评价法包括预先危险性分析、危险可操作性研究、故障类型和影响分析等。定性评价方法具有简单易操作、过程及评价结果直观的优点。缺点是容易受到评价者的主观影响,具有一定程度的局限性。如安慧等^[25]运用危险与可操作性研究方法和保护层分析方法对空间冲突的措施进行评价,结果表明危险可操作性研究法能有效地降低工程成本。

2.2 半定量评价法

半定量评价法是在一定经验的基础上,加入了分层次、分等级合理打分的环节,以最后的评分值或概率风险与严重度的乘积为依据进行分级评价^[26]。半定量评价法包括检查表法、作业条件危险性评价、层次分析法、故障树分析法、事件树分析法及日本省化工企业六阶段法等。该方法优点是简单实用、应用较广,但是评价结果仍会受到评价者一定程度的主观影响。20世纪70年代,由美国运筹学家Satty等^[27]提出的层次分析法(AHP-Analytic Hierachy Process)经过多年发展后被广泛用于多目标、多准则复杂问题的决策分析,这也正好符合风险源分级评价的特性。杨宇杰^[28]利用故障树的基本原理,充分考虑了随机性和模糊性,将模糊集理论结合故障树分析方法,建立了模糊事故树分析模型。周婕等^[29]分析了瑞典哥特堡市环境风险评价中采用的综合概率故障树法和客户损失时间指数方法及两种方法的应用价值。石春燕等^[30]以巢湖生态调水为例,将故障树分析应用于调水

线路的水质风险识别。事件树和故障树具有逻辑性强以及评价过程形象化的优点,擅长描述确定的逻辑关系,即需要上、下级事件之间有明确的因果关系。缺点是都无法描述具有多态性的事件,当系统复杂、影响因素增加时,统计数据的不确定性加大,方法存在一定程度的局限性。

2.3 定量评价法

对评价过程中涉及各个因素及其之间的相互关系进行赋值,再经过一定的规则和算法,从而得到最后评价价值的方法称为定量评价法。定量评价法的特点是得出的结果具体准确,但需要大量的样本数据,对数据的要求较高。袁业畅等^[31]根据《建设项目环境风险评价技术导则》要求,从风险识别、风险预测及评价、风险事故防范措施等方面论述了环境风险评价的基本概念及一般程序。汪立忠等^[32]从风险管理的角度,总结了国内外水污染突发事件的研究进展,提出了应对突发环境污染事件进行风险管理的方法,制定了有针对性和有组织的风险管理体系和计划。

根据国内外研究,本文总结常见的风险评价定量方法包括阈值评估法、环境事故指数法、时空累积分析法、人工神经网络法、模糊综合评价法、蒙特卡洛方法和美国环保部风险评价法,如表2所示^[33]。其中模糊综合评价法是用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。它具有结果清晰,系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决^[17]。刘明喆等^[34]以永定河山区为典型案例,采用层次分析法和模糊综合评价法评估了突发水污染风险等级。师博颖^[35]采用模糊综合评价法构建了水源地风险评价体系,划分了水源地风险等级,并基于绘制的水源地风险等值分布图提出污染源调整和水源地优化布设措施。

3 突发水污染事故应急对策

突发水污染事故应急对策是一个复杂的系统,其

中突发水污染风险应急预案是其最核心内容。应急预案通常是一个综合系统,能进行实时数据分析和解释结果,通常包括检测、特征描述、响应协调、信息交流和影响减缓等过程^[36]。包括以下几个步骤:首先对水体是否受到污染进行检测;其次对污染事件发生过程的子成分进行特征描述,包括对污染物类别、来源、浓度、时空分布特征和迁移转化规律的预测;最后由应急中心协调各方力量对水污染事件做出响应,信息交流代表水污染信息的传播。在该系统中,数据通过传感器传递到信息管理系统进行存储和分析,最终为决策者提供信息并协助应急响应决策^[37]。

欧美国家高度重视应急水污染的研究与应对系统开发。欧洲重点关注保护饮用水源污染的预警,主要集中在河流进水口位置的监测上^[38]。美国由于考虑国土安全的严峻形势,更加注重供水网络异常紧急情况应急预案的研究,开发了一系列软件来处理大量水质监测数据并检测异常水质或水污染事件^[39]。我国国务院于2005年4月印发了《国家突发公共事件总体应急预案》,2007年出台了用于改善饮用水安全状况的《全国城市饮用水安全保障规划(2006—2020)》,对突发水污染风险预案提出明确要求^[40]。2018年3月生态环境部发布了用于提高应急预案的针对性、实用性和可操作性的《集中式地表水饮用水水源地突发环境事件应急预案编制指南(试行)》^[41]。

3.1 突发水污染预警指标体系构建

针对突发水污染事件的环境风险特征,在综合应急对策发展现状的基础上,构建了预警指标集。该指标集为可能对水污染事件预警有关的指标集合^[42]。预警指标集中的指标分为警源指标和警兆指标两类。警源是指警情发生的根源。在水污染事件的研究中,警源即导致事故产生的自然或人为因素,主要包括生产过程中设备或工艺故障、危险物品的转移、人为影响因素等方面^[43]。警源指标除可用于警情综合评估外,还可在污染事件没有发生时进行环境风险评估,

表2 突发水污染事件定量评价方法及特点

Table 2 Quantitative evaluation methods and characteristics of sudden water pollution incidents

名称 Name	特点 Features
阈值评估法	依赖以往事故信息记录,要求评估者有充足经验,具有时间延续性
环境事故指数法	风险分级的同时综合考虑了各方面因素,符合突发污染事故响应的快速原则,又较为准确
时空累积分析法	考虑因素全面,有效利用了不同时空信息,评价更加准确。缺点是所需资料全面,不易获得
人工神经网络法	具有良好的非线性信息处理能力,适宜于解决风险评价中多指标复杂性和不确定性的问题
模糊综合评价法	综合考虑了完整性、可操作性、有效性、快速性及合理性等因素,可对紧急规划进行合理和有效的分析及比较
蒙特卡洛方法	思想新颖、直观性强、简便易用,可以解决其他方法不能解决的问题,且易于在电脑上实现
美国环保部风险评价法	框架思路明确,实施性强,应用广泛

以对有可能发生的环境污染事件进行监控预警。警情发生前的先导现象称为警兆,反映警兆的基本指标包括生态影响、健康危害、环境污染、社会和经济影响等^[44]。本文归纳总结得到突发水污染事件预警指标集见表3。

表3 突发水污染事件应急指标体系
Table 3 Emergency indicator system for sudden water pollution incidents

目标层 Target layer	一级指标 A First level indicator A	二级指标 B Second level indicator B
突发水污染事件 预警指标体系	警源指标	事件类型 污染物类型 事件发生区域
	警兆指标	受影响人口数量 事件影响范围 事件影响持续时间 事件影响地区类别 最大水质超标倍数

3.2 突发水污染预警响应流程

发生紧急突发水污染事件后,突发水污染预警系统开始响应,一般而言,包括以下几个处理阶段:(1)报告阶段。事故发现者应尽快向水环境安全应急办公室报告突发水污染事故的发生时间、地点、事故源、主要污染物质、事故危害等初步情况,并进行污染源的初步判断、事故发生整体情况及已采取的应急措施等^[45]。(2)检测阶段。应急监测人员应携带必要检测器材及安全防护装备在最短时间内赶到事故现场,立即采用专业的设备控制和处理现场,减少污染物的产生和扩散^[46]。根据突发水污染事件类型,事故发生地气象、地形特点和污染物性质特征、扩散速度,确定污染物的大致扩散范围。针对污染来源和影响范围进行连续动态跟踪监测^[47]。(3)预测阶段。根据监测结果,运用水质预警模型,预测突发水污染事件的发展情况和污染物的变化情况,判断污染物质浓度、污染范围及可能的危害^[48]。(4)处理阶段。各有关部门应严格按事故应急分工采取措施,及时调查突发水污染事故的影响范围和危害程度,评估其所造成的损失,报告上级部门并公之于众^[49]。

4 结论与展望

国内外在突发水污染风险识别、评价与应急对策方面取得了一定的研究成果,但仍有不足之处,主要体现在:(1)对突发水污染风险源识别的研究大多从

单一情况进行,未考虑不同水体类型、不同水污染风险类型、不同背景的突发水污染情况,缺乏系统性研究。(2)在风险评价方法上,尽管有多种方法供选择,但不同污染类型或不同水体最合适技术体系和评价流程不明确,评价技术多种多样,难分优劣。(3)在突发水污染事故应急对策方面,多模拟预测了不同情景下污染物的削减趋势,但在应急措施细化等方面还存在不少问题,特别缺乏对事故后污染物在有效应急措施条件下的衰减趋势研究。

针对以上3点问题,本文提出以下应对措施:(1)未来可以针对不同的水体类型、不同受体、不同污染风险类型等建立细致的风险源识别体系。(2)未来应该进一步明确不同污染类型或不同水体最合适技术体系和评价流程,制定详细的评价技术规范。(3)未来在应急对策方面应进一步结合相关技术和管理形成系统化的操作规范体系。总之,应大力开展突发水污染风险评价与应急对策的研究,从而提高突发事故的应急与调控能力,有效降低水污染突发事件所造成的损失。

参考文献:

- [1] 周夏飞,曹国志,於方,等.长江经济带突发水污染风险分区研究[J].环境科学学报,2020,40(1):334-342.
ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, et al. Risk zoning of acute water pollution in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Journal of Environmental Science*, 2020, 40(1): 334-342.
- [2] 谢彦,杨洋洋,王昕喆,等.石油石化装置突发环境风险等级评估方法研究[J].安全·健康和环境,2019,19(12):30-35.
XIE Yan, YANG Yang-yang, WANG Xin-zhe, et al. Study on assessment method of emergency environmental risk level for petroleum and petrochemical devices[J]. *Safety, Health and Environment*, 2019, 19(12):30-35.
- [3] 段然,李玲,周欢.重庆市突发环境事件风险防控现状、问题与对策[J].环境保护与循环经济,2019,39(10):83-87.
DUAN Ran, LI Ling, ZHOU Huan. Current situation, problems and countermeasures of risk prevention and control of environmental emergencies in Chongqing [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2019, 39(10): 83-87.
- [4] 孔凡青,梁舒汀,崔文彦.海河流域突发水污染风险等级图绘制理论与设计[J].水利规划与设计,2019(10):138-141.
KONG Fan-qing, LIANG Shu-ting, CUI Wen-yan. Discussion on the design of deeply buried tunnel with high external water pressure[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2019(10): 138-141.
- [5] 王亚变,刘佳,薛丽洋,等.甘肃省突发环境事件应急体系建设研究[J].甘肃科技,2019,35(18):8-11,14.
WANG Ya-bian, LIU Jia, XUE Li-yang, et al. Research on the construction of emergency system for environmental emergencies in Gansu Province[J]. *Gansu Science and Technology*, 2019, 35(18): 8-11, 14.

- [6] 仇国宏. 突发环境事件预警等级的首次判别方式[J]. 能源与节能, 2019(12): 71-72.
QIU Guo-hong. First judging method of the early warning level of emergent environmental incidents[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2019(12): 71-72.
- [7] 王文琪, 吴婧, 张一心. 基于多源流框架的生态环境风险防范体系研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(9): 1132-1136.
WANG Wen-qi, WU Jing, ZHANG Yi-xin. Study on ecological environmental risk prevention system based on Multiple-streams Framework[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(9): 1132-1136.
- [8] 郇环, 马雄飞, 廉新颖, 等. 突发水环境污染事故应急防控体系怎么建? ——以天津滨海工业带为例[J]. 环境经济, 2019(16): 38-43.
HUAN Huan, MA Xiong-fei, LIAN Xin-ying, et al. How to build an emergency prevention and control system for sudden water pollution accidents? Take Tianjin Binhai Industrial Belt as an example[J]. *Environmental Economy*, 2019(16): 38-43.
- [9] 杨宇. 行政区域环境风险评估与管理——以平潭综合实验区为例[J]. 能源与环境, 2019(4): 72-74, 78.
YANG Yu. Environmental risk assessment and management in administrative areas: Taking Pingtan comprehensive experimental area as an example[J]. *Energy and Environment*, 2019(4): 72-74, 78.
- [10] 梁时军, 黄银春, 尹鹏. 南充某化工园区环境风险防控措施研究[J]. 绿色科技, 2019(14): 171-175.
LIANG Shi-jun, HUANG Yin-chun, YIN Peng. Study on environmental risk prevention and control measures of a chemical industry park in Nanchong[J]. *Green Technology*, 2019(14): 171-175.
- [11] 连亚妮. 黄河包头段水污染风险识别与防控研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 3-12.
LIAN Ya-ni. Study on risk identification and prevention and control of water pollution in Baotou section of the Yellow River[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019: 3-12.
- [12] 陈森阳. 饮用水水源地突发环境事件防范对策探讨[J]. 厦门科技, 2019(3): 17-20.
CHEN Sen-yang. Countermeasures for the prevention of sudden environmental events in drinking water sources[J]. *Xiamen Science and Technology*, 2019(3): 17-20.
- [13] 李林子. 突发性水污染事故影响的预测预警体系研究[D]. 南京: 南京大学, 2011: 5-9.
LI Lin-zi. Study on the forecasting and warning system of the accidental water pollution[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011: 5-9.
- [14] 周娜. 风险识别“八步法”[J]. 环境保护与循环经济, 2010, 30(3): 60-63.
ZHOU Na. Eight-step method for risk identification[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2010, 30(3): 60-63.
- [15] 李伟, 贾立校. 基于熵权属性识别模型的港口水域交通环境风险评价[J]. 南通航运职业技术学院学报, 2010, 9(3): 72-76.
LI Wei, JIA Li-xiao. Risk assessment of port traffic environment based on attribute recognition of entropy coefficient model[J]. *Journal of Nantong Vocational College of Shipping*, 2010, 9(3): 72-76.
- [16] 卢蔚. 区域重点行业环境风险源分析与管理策略研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2018: 2-7.
LU Wei. Analysis of environmental risk sources and management strategies of regional key industries[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018: 2-7.
- [17] 张珂, 刘仁志, 张志娇, 等. 流域突发性水污染事故风险评价方法及其应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(4): 675-684.
ZHANG Ke, LIU Ren-zhi, ZHANG Zhi-jiao, et al. A method of environmental risk assessment for abrupt water pollution accidents in river basin[J]. *Journal of Applied Basic and Engineering Sciences*, 2014, 22(4): 675-684.
- [18] USAEC. Theoretical possibilities and consequences of major accidents in large nuclear power plants[R]. Washington D.C.: Division of Civilian Application. 1957: 243-251.
- [19] Anabela R, Isabel F, Isolina G, et al. A risk assessment model for water resources: Releases of dangerous and hazardous substances[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 140(1): 51-59.
- [20] 刘杨华. 基于安全理论的突发水污染事故环境风险源识别研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 11-16.
LIU Yang-hua. Research on environmental risk source identification of sudden water pollution accident based on safety theory[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 11-16.
- [21] 刘志国, 徐韧, 蔡芃, 等. 沿岸化学品风险源环境风险评价与分级方法研究——以上海市为例[J]. 海洋通报, 2015, 34(4): 475-480.
LIU Zhi-guo, XU Ren, CAI Peng, et al. Research on environmental risk assessment and classification technology for coastal chemicals: A case study of Shanghai[J]. *Marine Bulletin*, 2015, 34(4): 475-480.
- [22] 邵必林, 马维平, 张志霞. 基于模糊指数法的油气管道风险评价研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006(6): 804-808.
SHAO Bi-lin, MA Wei-ping, ZHANG Zhi-xia. Research on oil and gas pipeline risk evaluation based on fuzzy index method[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 2006(6): 804-808.
- [23] 朱炜玉. 基于数据驱动模型的突发水污染预警技术与应急管理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 3-6.
ZHU Wei-yu. Study on data-driven based early warning technology and emergency management of sudden water. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 3-6.
- [24] 卢静. 危险废物集中处置企业环境风险评价研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2012: 4-7.
LU Jing. Research on environmental risk assessment of enterprises for centralized disposal of hazardous waste[D]. Beijing: Central University for Nationalities, 2012: 4-7.
- [25] 安慧, 王思桦, 赵琦. 基于HAZOP-LOPA的水利工程空间冲突风险评价[J]. 人民长江, 2016, 47(7): 68-71.
AN Hui, WANG Si-hua, ZHAO Qi. Hazop-LOPA-based spatial conflict risk assessment of hydraulic engineering[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(7): 68-71.
- [26] 毛智杰. 基于人工神经网络的输电网安全评价方法研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2009: 12-14.
MAO Zhi-jie. Studies on safety assessment approach using artificial neural network for transmission grid[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2009: 12-14.
- [27] Satty T L, Tran L T. On the invalidity of fuzzifying numerical judg-

- ments in the Analytic Hierarchy Process[J]. *Math Compute Model*, 2007(46): 962-975.
- [28] 杨宇杰. 事故树和贝叶斯网络用于溃坝风险分析的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008: 33-37.
YANG Yu-jie. Research on dam failure risk analysis using Bayesian network and fault tree[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008:33-37.
- [29] 周婕, 苏云, 张勇. 欧盟城市饮用水供应链风险管理与评价及其借鉴[J]. *安全与环境学报*, 2012, 12(2):138-142.
ZHOU Jie, SU Yun, ZHANG Yong. Enlightenment on the risk management and risk assessment of water source and water supply system in European countries[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(2): 138-142.
- [30] 石春燕, 胡功宇, 华祖林, 等. 基于故障树的生态调水水质风险识别[J]. *环境保护科学*, 2013, 39(6):19-24.
SHI Chun-yan, HU Gong-yu, HUA Zu-lin, et al. Environmental risk identification of water quality in ecological water transfer project based on fault tree analysis[J]. *Environmental Protection Science*, 2013, 39(6): 19-24.
- [31] 袁业畅, 何飞, 李燕, 等. 环境风险评价综述及案例讨论[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(增刊1): 455-463.
YUAN Ye-chang, HE Fei, LI Yan, et al. A view of environmental risk assessment and the case discussion[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 36(Suppl 1): 455-463.
- [32] 汪立忠, 陆雍森. 毒物排放对污水处理厂的风险评价方法和模型[J]. *上海环境科学*, 1999(10): 442-444.
WANG Li-zhong, LU Yong-sen. Risk assessment on effect of toxic chemical discharged on municipal wastewater treatment plant and model[J]. *Shanghai Environmental Science*, 1999(10): 442-444.
- [33] 白莹. 黄河突发性水污染事故预警及生态风险评价模型研究[D]. 南京: 南京大学, 2013: 3-9.
BAI Ying. Water pollution accident warning model development and ecological risk assessment research along Yellow River Basin[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013: 3-9.
- [34] 刘明喆, 孔凡青, 张浩, 等. 基于层次分析法和模糊综合评价的突发水污染风险等级评估[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(1): 53-56.
LIU Ming-zhe, KONG Fan-qing, ZHANG Hao, et al. Risk grade assessment of sudden water pollution based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Hydropower and Energy Science*, 2019, 37(1): 53-56.
- [35] 师博颖. 长江江苏段饮用水源地健康评价与风险管控[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018: 10-13.
SHI Bo-ying. Health assessment and risk management of drinking water sources in Jiangsu reach of the Yangtze River[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018: 10-13.
- [36] Shi B, Jiang J P, Liu R T, et al. Engineering risk assessment for emergency disposal projects of sudden water pollution incidents[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(17): 14819-14833.
- [37] Zhang H, Li W J, Miao P P, et al. Risk grade assessment of sudden water pollution based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(1): 469-481.
- [38] 邓素华. 湖南省某机械制造企业铸造车间生产事故统计分析与安全评价[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017: 8-10.
DENG Su-hua. Production accident in casting workshop of a machine building enterprise in Hunan Province statistical analysis and safety evaluation[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017: 8-10.
- [39] 王青青, 吴昊, 王腊春, 等. 突发污染事故对水源地的影响研究: 以长江南京段为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(12):1557-1563.
WANG Qing-qing, WU Hao, WANG La-chun, et al. Study on the impact of sudden pollution on water resources: A case study of Nanjing section of Yangtze River[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(12): 1557-1563.
- [40] Lin L. Simulation of sudden benzene leakage water pollution events [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 208(1): 26-28.
- [41] Xiao Y, Huang S L, Zhou J G, et al. Risk assessment of upper-middle reaches of Luanhe River Basin in sudden water pollution incidents based on control units of water function areas[J]. *Water*, 2018, 10(9): 1268.
- [42] Meng Q, Nan J, Wang Z B, et al. Study on the efficiency of ultrafiltration technology in dealing with sudden cadmium pollution in surface water and ultrafiltration membrane fouling[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(16):16641-16651.
- [43] Zhang Y L, Xiao M, Zheng W H. Study on sudden water pollution incidents of Guangdong Huanggang River[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 99/100: 131-135.
- [44] Cai F, Zhao S H, Chen G C, et al. A method research on environmental damage assessment of a truck rollover pollution incident[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(5): 1902-1910.
- [45] Yang H D, Shao D G, Liu B Y. A new traceability method for sudden water pollution accidents[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 807-809: 1570-1574.
- [46] 张钧. 江河水源地突发事故预警体系与模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2007: 4-5.
ZHANG Jun. Research on the early-warning system and models of abrupt accidents in water source areas of rivers[D]. Nanjing: Hohai University, 2007: 4-5.
- [47] Wang H T, Jia X B, Liu D M, et al. Emergency treatment measures for sudden pollution incidents in source water with some contaminants: A review[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 781-784: 1950-1953.
- [48] 刘璐瑶. 引汉济渭水源地突发水污染事故预警与应急调控研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018: 14-17.
LIU Lu-yao. Early warning and emergency disposal research on sudden water pollution water source area from the Han to the Wei River [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018: 14-17.
- [49] Pan F H, Wang Y B, Zhang X X. Emergency measure of soft isolation controlling pollution diffusion response to sudden water pollution accidents[J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2019, 80(7):1238-1248.