

沱江三氯甲烷浓度异常事件中污染物趋势分析

任昶宇, 刘 强*, 张璐涛, 史 箴, 曹 阳, 俸 强, 席英伟

(四川省生态环境监测总站, 四川 成都 610091)

摘 要: 以“2·19”沱江下游段三氯甲烷浓度异常事件为例,“污染物”为主线,通过对特征污染因子、污染源的锁定及污染物扩散状况的研判建立应急监测工作方案,确定主要污染物为三氯甲烷,对三氯甲烷浓度变化趋势进行分析。结果表明:各监测断面三氯甲烷浓度随时间变化逐步降低,监测到饮用水源地污染物持续未检出。各断面随污染团下移三氯甲烷污染物通量呈下降趋势。单一断面通量浓度先升高后降低;相邻断面通量浓度平稳下降,衰减力度逐渐放缓。通过一维河流水质模型计算结果,表明监测数据合理。该实例可为相关突发水环境事件的应急监测工作提供技术参考。

关键词: 突发水环境事件; 应急监测; 三氯甲烷; 趋势分析

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2023)02-0059-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023020059

Pollution Trend Analysis of Trichloromethane Water Environmental Events in Tuojiang River / REN Changyu, LIU Qiang*, ZHANG Lutao, SHI Zhen, CAO Yang, FENG Qiang, XI Yingwei / (Ecological Environment Monitoring Station of Sichuan Province, Chengdu 610091, China)

Abstract: Taking the trichloromethane pollution event in the downstream section of ‘2·19’ Tuojiang River as an example, a work programme for emergency monitoring was established through the determination of major pollution factors, the determination of pollution sources and the judgement of pollutant dispersion. Determination of main pollutants as trichloromethane, the change trend of trichloromethane concentration in emergency monitoring was analyzed. The results show that the trichloromethane concentration in monitoring section decreased gradually with time and contaminants in drinking water sources have not been detected. The trichloromethane flux of each section decreased with the downward movement of the pollutant. The flux concentration of single cross section increased first and then decreased, adjacent sections decreased steadily and the attenuation gradually slowed down. The results of one-dimensional river water quality model show that the monitoring data are reasonable. This case can provide technical reference for emergency monitoring of relevant water environmental emergencies.

Key words: water environmental emergencies; emergency monitoring; trichloromethane; trend analysis

随着中国经济的不断发展,城镇化、工业化的快速推进,工业企业数量不断增加,极易在生产、排放、管理不当时产生大量环境污染物进入自然界,突发性环境污染事故问题愈发凸显^[1-4]。它们不同于一般的环境污染,由于其发生突然、扩散迅速、危害严重及污染物不明等特点,如果不妥善处理好这些,会使得生态环境遭到破坏,甚至威胁到人民的生命财产安全^[5-8]。突发水环境事件是最典型的一类突发性环境污染事故,污染物随水体流动时,污染源形态更多、污染物扩散更快、影响范围更广^[9-10]。根据

生态环境部发布的《中国环境状况公报》相关数据,近年来我国突发水环境事件数量呈上升趋势,对生态环境和人民健康造成了极大威胁^[11]。应急监测是应对此类事件的重要手段,如何围绕“污染物”开展监测,对科学决策起到十分重要的作用^[12-14]。因此,我们亟需在构建全面的应急监测体系^[15-16],完善应急监测预案^[17]的基础上,快速启动应急监测响应^[18-20],以“污染物”为主线,第一时间了解污染事故性质、确定特征污染因子、锁定污染来源、提出监测方案、通过分析污染趋势、保证数据准确来把控污

收稿日期: 2023-03-03

项目来源: 四川省生态环境保护科技项目(20022HB14)

作者简介: 任昶宇(1984-)男,四川成都人,工程师,主要研究方向为生态环境保护及监测, E-mail: 47527363@qq.com

通信作者: 刘 强, E-mail: liuq19900701@163.com

染发展态势。

2021年2月19日,A市某县某工业园发生一起含三氯甲烷工业废水泄漏事件造成沱江水污染,事故发生后相关部门立即启动环境突发事件响应,省监测站全程参与了此次沱江三氯甲烷污染事件的应急监测工作,协同A、B两市监测站及相关执法部门,在最短时间确定了特征污染因子,锁定了主要污染源,编制了科学有效的应急监测方案,对污染物开展了持续跟踪监测,参照《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)评价监测结果^[21-22]。在整体把控污染态势的同时,结合监测数据、污染物通量分析了河流中污染物变化趋势,利用一维河流水质模型验证了监测数据的准确性,多角度保证了应急监测的“快”与“准”,为决策部门对事故现场处置和原因分析提供了可靠的数据支撑,保障了下游饮用水源地水质持续达标。

1 事件概述

1.1 事件背景

根据水质自动监测异常快报,2021年2月18日4时起,国控水站-1(1[#]监测断面、A市入B市境)VOC在线监测设备自动监测数据显示三氯甲烷浓度异常升高。2月18日20时检出三氯甲烷浓度为 $0.064 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超标0.067倍,截至2月19日8时三氯甲烷浓度达 $0.095 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超标0.583倍,继续呈上升趋势,水站其他指标均正常。据了解,国控水站-1至B市沱江干流段无饮用水源地,沱江干流汇入长江后下游约2.5公里处有一饮用水源地(4[#]监测断面)。

省监测站于2月19日9时启动应急响应机制,在响应发出后半小时内出发赶往现场。途中联系正在开展相关工作的A、B两市监测人员,了解现场监测实况并指导开展应急监测。同时,省生态环境厅派出执法人员到A市开展拉网式排查。此次应急监测首要任务是确定污染源及特征污染因子,判断污染物扩散趋势对饮用水源地的影响,确保周边人民的生活饮用水安全。针对事件特点,应急小组及时对特征污染物、污染源进行锁定,对污染物浓度进行跟踪监测,结合监测数据、污染物通量、一维河流水质模型等多种方式准确掌握污染团移动情况,实时监控污染物浓度变化。

1.2 特征污染因子确定

特征污染因子是引发污染事故、造成重大污染

危害的关键性因素。2月18日0时起,国控水站-1发出数据异常提醒,三氯甲烷开始有检出(检出限 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),且其浓度逐步上升,18日20时开始超出标准限值,至19日8时三氯甲烷已达到 $0.095 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其余监测指标均无异常,具体数据变化见图1。专家组在排除自动监测设备故障的基础上,依据国控水站-1自动监测异常数据与临时实验室监测结果,初步判断发生跨市境输入型三氯甲烷水污染事件,确定了以三氯甲烷污染监测为主的整体线路。

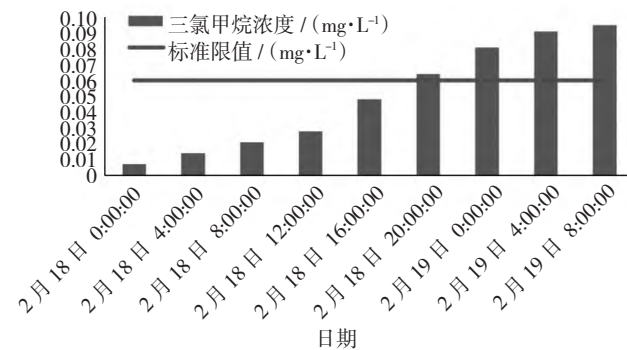


图1 三氯甲烷自动监测数据(18日0时~19日8时)

1.3 污染源锁定

特征污染因子确定后,B市生态环境局将有关情况及时通报给上游A市生态环境局。A市生态环境局接到通报信息后,立即启动应急响应,组织力量展开沿河污染源排查,对市域范围内可能涉及三氯甲烷的54家企事业单位进行拉网式摸排及快速采样分析,开展污染溯源。摸排中初步锁定国控水站-1上游约70公里某工业园区为污染源,经对园区排污口废水采样快速检测,三氯甲烷浓度大于 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,远超《地表水环境质量标准》中集中式生活饮用水地表水源地特定项目标准限值。经查,此事件是因该园区某公司在生产作业过程中,生产装置三氯甲烷泄漏造成沱江三氯甲烷浓度异常。来源锁定后立即责令涉事公司关闭排口闸门,将含三氯甲烷废水引至应急池临时储存,杜绝污染物继续流入沱江,为事件的成功处置起到了至关重要的作用。

1.4 监测方案编制

为实时监控污染物变化对沱江流域及下游饮用水源地的影响,指挥部决定于2月19日起在排污口下游B市开展应急监测工作。专家组汇总前期研判成果,在短时间内编制出指导性、权威性、统领性的应急监测方案,多角度保证了监测数据的“快”与

“准”。监测方案如下:

监测项目:三氯甲烷。

监测断面:监测断面4个。1#监测断面;2#监测断面用于准确掌握污染团移动,污染物浓度变化趋势;3#监测断面进一步监控污染物随河流稀释扩散后消减状况;4#监测断面用于评估饮用水源地污染风险。示意图见图2。

监测时间及频次:4个断面初期监测频次为每2小时1次,中后期根据污染物浓度变化逐步减少为4小时、6小时、12小时1次。

样品采集、运输和分析:4个断面样品采集、样品运送均由B市监测站完成。样品送临时实验室分析。

质量控制与质量保证措施:每批样品(20个)添加一个中间校核点及有证标准物质,同时添加10%的平行样品进行分析;数据进行三级审核,层层上报,严格按照地表水和污水监测技术规范(HJ/T 91—2002)中质控要求,确保数据符合质量要求。

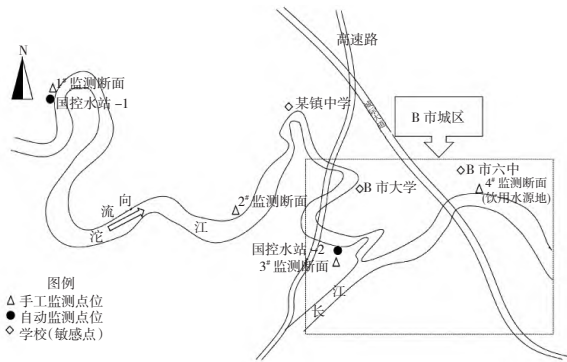


图2 监测断面布设示意图

2 结果与讨论

整体把控污染团流向和及时分析污染趋势是应急监测工作的核心内容。监测人员在4个监测断面进行不间断跟踪监测,根据各监测断面三氯甲烷浓度及变化情况判断污染团迁移、扩散状况,具体数据见表1。

2.1 三氯甲烷浓度变化趋势分析

结合表1可以看出,从开展监测工作开始,污染团就已到达1#监测断面,在19日17:00三氯甲烷浓度即达到了 $0.02793 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,随时间推移三氯甲烷浓度逐渐上升,19日21:00达到峰值($0.04824 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,未超过地表水标准限值 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),随后呈下降趋势,直至23日5:00开始持续未检出;污染团

表1 监测断面监测数据 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

监测日期	监测时间	1#监测断面	2#监测断面	3#监测断面	4#监测断面
2月19日	17:00	0.02793	未检出	未检出	未检出
2月19日	19:00	0.03845	0.0022	未检出	未检出
2月19日	21:00	0.04824	未检出	未检出	未检出
2月19日	23:00	0.03379	未检出	未检出	未检出
2月20日	1:00	0.02681	未检出	未检出	未检出
2月20日	3:00	0.02568	未检出	未检出	未检出
2月20日	5:00	0.02616	未检出	未检出	未检出
2月20日	7:00	0.02424	未检出	未检出	未检出
2月20日	9:00	0.02672	未检出	未检出	未检出
2月20日	11:00	0.01533	未检出	未检出	未检出
2月20日	13:00	0.01758	未检出	未检出	未检出
2月20日	15:00	0.01771	未检出	未检出	未检出
2月20日	17:00	0.02014	未检出	未检出	未检出
2月20日	19:00	0.01566	未检出	未检出	未检出
2月20日	21:00	0.01159	未检出	未检出	未检出
2月20日	23:00	0.01358	未检出	未检出	未检出
2月21日	1:00	0.01622	未检出	未检出	未检出
2月21日	3:00	0.01317	0.00469	未检出	未检出
2月21日	5:00	0.01786	0.00604	未检出	未检出
2月21日	7:00	0.01182	0.00424	未检出	未检出
2月21日	9:00	0.01023	0.00763	未检出	未检出
2月21日	13:00	0.00995	0.00936	未检出	未检出
2月21日	17:00	0.00934	0.00923	未检出	未检出
2月21日	21:00	0.00934	0.01531	未检出	未检出
2月22日	2:00	0.01014	0.01117	未检出	未检出
2月22日	6:00	0.00622	0.01420	0.00192	未检出
2月22日	10:00	0.00749	0.01746	0.00254	未检出
2月22日	14:00	0.00621	0.01913	0.00443	未检出
2月22日	18:00	0.00560	0.01960	0.00576	未检出
2月22日	22:00	0.00462	0.01640	0.00601	未检出
2月23日	5:00	未检出	0.01620	0.00962	未检出
2月23日	11:00	未检出	0.01460	0.01268	未检出
2月23日	17:00	未检出	0.01120	0.01155	未检出
2月23日	23:00	未检出	0.00850	0.00961	未检出
2月24日	11:00	未检出	0.00612	0.00853	未检出

在21日3:00到达2#监测断面,三氯甲烷开始有检出,三氯甲烷浓度峰值出现在22日18:00,随时间推移呈逐步下降趋势;3#监测断面三氯甲烷从22日

6:00 开始有检出,浓度峰值出现在 23 日 11:00,随时间推移也呈逐步下降趋势;4# 监测断面三氯甲烷持续未检出。4 个监测断面的污染团的浓度峰值呈下降趋势:1# 监测断面 > 2# 监测断面 > 3# 监测断面 > 4# 监测断面(未检出),最主要的原因是污染团从排放口排入河流后,在随水流向下游迁移的同时,不断与周围的洁净水体相互混合,很快便得到稀释,致使污染物浓度逐渐降低;三氯甲烷的亨利系数为 $2.88 \times 10^{-3} \text{ atm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$,其化学特性属高挥发性有机物,在环境水体中,挥发是有机污染物的重要迁移途径,当污染团在向下游迁移过程中,因污染物挥发导致污染物浓度逐渐降低;另外,这与地理位置关系、河流汇入等方面也密不可分。4# 监测断面位于沱江干流汇入长江后的下游,三氯甲烷浓度持续未检出即是最直接的证明。4# 监测断面为当地重要饮用水源地之一,该监测断面三氯甲烷持续未检出表明本次污染事故未对饮用水源地产生影响,不会对当地人民的饮水安全产生威胁。

此外,三氯甲烷污染持续时间较长、污染物扩散较慢(1# 监测断面从 19 日 17:00 至 23 日 5:00 均有检出;2# 监测断面、3# 监测断面分别在 21 日 3:00、22 日 6:00 开始有检出,至 24 日仍有检出)。究其原因,主要有以下两个方面:(1) 事故发生于初春季节,当地环境温度基本维持在 15°C 左右,温度太低一定程度上影响了三氯甲烷的挥发速率。(2) 污染物输移率对污染扩散影响较大^[25],它与断面水流速度成正相关,见公式(1)。查阅 2# 监测断面流量测验统计(见表 2) 断面平均流速最大监测值仅为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,断面流速较慢与污染物扩散缓慢有直接联系。

$$F_A = UCA \quad (1)$$

式中: F_A 为断面 A 上的污染物输移率, $\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$; U 为断面 A 的平均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; C 为断面 A 的平均浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; A 为断面 A 的过水截面积。

表 2 2# 监测断面流量测验统计

施测号数	断面流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	断面最大流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	断面平均流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	备注
1	128	0.16	0.060	—
2	81.6	0.16	0.100	部分信号间断
3	60.2	0.16	0.055	部分信号间断
4	72.5	0.20	0.051	河心洲右未测流
5	112	0.16	0.081	—

2.2 三氯甲烷污染物通量变化趋势分析

三氯甲烷泄漏后形成云状污染团,浓度呈高斯分布,1# 监测断面至 3# 监测断面中仅有一条小型支流汇入,忽略其影响,假设断面流量稳定,结合表 2,计算 1# 监测断面、2# 监测断面、3# 监测断面污染物通量,分析三氯甲烷归趋。计算公式为公式(2):

$$M = \int_T C(T) \cdot Q(T) \quad (2)$$

式中: M 为该断面的三氯甲烷污染物通量; $C(T)$ 为该断面三氯甲烷污染物浓度随时间变化函数; $Q(T)$ 为该断面流量随时间变化函数。对公式进行积分简化,在对应时段内用加权平均法^[13]求得公式(3):

$$M = \Sigma \left(\frac{1}{N} \Sigma_T C \times Q \right) \times T \times 3600 \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中: M 为该断面的三氯甲烷污染物通量; C 为该断面实测三氯甲烷污染物浓度; Q 为该断面流量; T 为三氯甲烷污染物通过的时间; N 为不同时间内三氯甲烷污染物监测值个数。

表 3 计算结果显示,随污染团下移各断面三氯甲烷污染物通量总体呈下降趋势。污染物在经过 1# 监测断面时其污染特点是峰值大,浓度高,通量浓度峰值出现在 19 日,达到了 $3.33 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$,随后逐步下降。2# 监测断面由于污染团扩散,污染高峰明显下降,通量浓度峰值出现在 22 日,为 $1.48 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$,较上一断面通量浓度流失率为 55.6%。3# 监测断面污染高峰继续下降,通量浓度峰值出现在 23 日,仅为 $0.98 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$,较上一断面通量浓度流失率为 33.8%。由此可见,单一断面通量浓度变化趋势为先升高后降低;相邻断面间通量浓度呈平稳下降趋势,但衰减力度逐渐放缓。

2.3 模型计算与监测数据比对分析

假设排污口从泄漏初始至成功截流期间为连续稳定排放源强,污染物在 1# 监测断面已充分混合,仅考虑到污染物在纵向发生输移变化,污染物在水体中的降解过程近似符合一级反应动力学规律^[26]。采用一维河流稳态水质模型,见公式(4),计算出监测断面污染团峰值浓度,结果见表 4。比对发现监测数据中 2# 监测断面三氯甲烷实测浓度峰值为 $0.01960 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,模型计算浓度峰值为 $0.01956 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 3# 监测断面三氯甲烷实测浓度峰值 $0.01268 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,模型计算浓度峰值为 $0.01198 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 4# 监测断面三氯甲烷实测浓度持续未检出,污染团从该断面上游 2 km 处沱江段直接汇入长

表3 监测断面三氯甲烷污染物通量计算结果统计

日期 月.日	1#监测断面				2#监测断面				3#监测断面			
	平均浓度 (mg·L ⁻¹)	时间 h	通量浓度 (g·s ⁻¹)	通量 t	平均浓度 (mg·L ⁻¹)	时间 h	通量浓度 (g·s ⁻¹)	通量 t	平均浓度 (mg·L ⁻¹)	时间 h	通量浓度 (g·s ⁻¹)	通量 t
2.19	0.03710	7	3.33	0.084	—	—	—	—	—	—	—	—
2.20	0.02010	24	1.83	0.158	—	—	—	—	—	—	—	—
2.21	0.01224	24	1.11	0.096	0.00807	21	0.73	0.055	—	—	—	—
2.22	0.00671	24	0.61	0.053	0.01632	24	1.48	0.128	0.00413	18	0.37	0.024
2.23	0.00036	5	0.06	0.001	0.01262	24	1.15	0.099	0.01086	24	0.98	0.085
2.24	—	—	—	—	0.00612	11	0.56	0.022	0.00853	11	0.78	0.031
总计	—	—	—	0.392	—	—	—	0.304	—	—	—	0.140

江主流,流量、流速等条件均出现较大变化,模型计算结果难以代表实际浓度状况。由此可见,监测结果与模型计算结果高度吻合,能较好地描述本次事件中三氯甲烷随空间和时间的迁移变化规律。

$$C = C_0 \exp\left(1 - k_1 \frac{70}{86400u}\right) \quad (4)$$

式中: C 为下游某一点的污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_0 为完全混合断面的污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; u 为河水的流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; k_1 为污染物降解的速率常数 ($1 \cdot \text{d}^{-1}$); x 为下游某一点到排放点的距离, m 。

表4 监测断面三氯甲烷峰值浓度模型计算结果统计

名称	距1#监测断面 km	断面平均 流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	三氯甲烷峰 值浓度模型 计算结果 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	备注
1#	0	0.060	0.04824	三氯甲烷降解 速率常数 $0.3 \cdot \text{d}^{-1}$
2#	14.3	0.055	0.01956	
3#	32.5	0.081	0.01198	
4#	37.1	—	—	

3 结论

此次沱江下游段三氯甲烷污染是一起典型的突发性水环境污染事件,在线监测设备起到了很好的预警监视作用。以“污染物”切入点,结合自动监测异常数据与现场监测结果,确定了以三氯甲烷污染监测为主的整体线路;拉网式摸排涉事企业、及时对污染源成功截流为事件的后续处置起到了至关重要的作用;针对性强的监测方案编制为监测工作的部署及开展提供了指导性依据;精准的污染趋势分析较好地把控了污染态势发展。

监测数据表明:1#监测断面、2#监测断面、3#监测断面三氯甲烷浓度先上升后下降,4#监测断面三氯甲烷浓度持续未检出。总体而言,三氯甲烷浓度为1#监测断面 > 2#监测断面 > 3#监测断面 > 4#监测断面,污染未对饮用水源地产生影响。污染物的稀释、挥发和扩散是三氯甲烷浓度降低的主要原因。随污染团下移各断面三氯甲烷污染物通量呈下降趋势。单一断面通量浓度先升高后降低;相邻断面通量浓度平稳下降,衰减力度逐渐放缓。一维河流水质模型计算与监测数据比对吻合度较高,监测数据能较好地描述本次事件中三氯甲烷随空间和时间迁移变化规律。

参考文献:

- [1] 张胜,叶春.以习近平生态文明思想为指导在污染防治攻坚战中守住环境安全底线[J].环境保护,2019,47(22):44-46.
- [2] 徐亮,宋兴伟,梁宵.VOCs走航系统在响水环境应急监测中的探索应用[J].环境科学与技术,2020,43(07):66-71.
- [3] 张秦铭,郭峰,吴卫东.以嘉陵江钼浓度异常事件为例探讨《重特大突发水环境事件应急监测工作规程》在应急监测中的应用[J].中国环境监测,2022,38(03):207-212.
- [4] 薛炳刚.我国化工园区产业发展存在的问题及对策思考[J].中国石油和化工经济分析,2011(10):54-57.
- [5] 郁建桥,宋兴伟,徐亮,等.江苏响水爆炸事件环境应急监测工作几点思考[J].中国环境监测,2021,37(02):148-156.
- [6] 潘海婷,于磊,罗鑫,等.气体中毒窒息事故的环境应急监测[J].中国环境监测,2021,37(02):157-162.
- [7] 王玉祥,丁金美,杨文武,等.突发性水环境应急监测

- 中快速定性未知有机污染物及案例分析[J]. 环境监控与预警 2019, 11(03): 23-26.
- [8] 王东, 范龙, 王彬洁. 四川省 2010~2019 年突发环境事件时空分布特征分析[J]. 四川环境 2021, 40(02): 204-207.
- [9] 宋永会, 袁鹏, 彭剑峰, 等. 突发环境事件风险源识别与监控技术创新进展: I. 环境风险源识别技术与应用[J]. 环境工程技术学报 2015, 5(5): 347-352.
- [10] 齐于顺, 刘仁志, 张启月, 等. 长江干流铜陵段突发水污染情景模拟分析[J]. 环境工程技术学报 2022, 12(2): 607-614.
- [11] 刘恩光, 赵彦龙, 宁增平, 等. 突发性水体重金属污染应急处理处置技术研究进展[J]. 地球与环境 2022, 50(2): 281-290.
- [12] 刀谓, 滕恩江, 吕怡兵, 等. 我国环境应急监测技术方法和装备存在的问题及建议[J]. 中国环境监测, 2013 29(04): 169-175.
- [13] 刘砚华, 魏复盛. 关于突发性环境污染事故应急监测[J]. 中国环境监测, 1995(05): 59-62.
- [14] 陈英. 突发性环境污染事故应急监测预案的研究[D]. 南京: 江苏大学 2007.
- [15] 徐彭浩, 吴敏华, 徐建宏. 突发性环境污染事故应急系统及其响应程序[J]. 中国环境监测, 1998(05): 33-36.
- [16] 饶清华, 曾雨, 张江山, 等. 突发性环境污染事故预警应急系统研究[J]. 环境污染与防治 2010, 32(10): 97-101.
- [17] 刘耀龙, 陈振楼, 毕春娟. 中国突发性环境污染事故应急监测研究[J], 环境科学与技术 2008, 31(12): 116-120+144.
- [18] Duan J, Mao S S, XIE P H et al. Key emergency response technologies for abrupt air pollution accidents in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022. DOI: 10.1016/j.jes.2022.03.030.
- [19] Backhouse J, Dhillong. Structures of responsibility and security of information systems [J]. *European Journal of Information Systems*, 1996, 5(1): 2-9.
- [20] Farajs, Xiaoy. Coordination in fast-response organizations [J]. *Management Science* 2006, 52(8): 1155-1169.
- [21] 闫振广, 刘征涛. 辽河流域六价铬和无机汞应急水质标准研究[J]. 中国工程科学 2013, 15(3): 26-32.
- [22] 符志友, 张衍燊, 冯承莲, 等. 我国水环境风险管理进展、挑战与战略对策研究[J]. 环境科学研究 2021, 34(7): 1532-1541.
- [23] 吕天峰, 许秀艳, 梁宵, 等. 便携式 GC-MS 在应急监测中的应用[J]. 中国环境监测 2010, 26(06): 36-41.
- [24] 张先宝, 刘晔. 便携式 GC-MS 在应急监测工作中的应用[J]. 分析测试学报 2007(S1): 206-207.
- [25] 张秋燕. 河流中污染物输移扩散规律的模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2006.
- [26] 薛梅. 河流中污染物质的通量与残量分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2006.