

突发环境事件应急能力评估研究

——以郑州市为例

晁 勳, 崔 岩*, 罗汝新, 张 权

郑州市生态环境应急与监控中心, 河南 郑州

收稿日期: 2025年2月14日; 录用日期: 2025年3月12日; 发布日期: 2025年3月20日

摘 要

突发环境事件应急能力评估是提升城市环境风险管理效能的重要基础。本研究以郑州市16个开发区、区(县、市)为研究单元,通过熵值法和层次分析法构建包含3个一级指标、12个二级指标的环境应急能力评估体系,系统分析郑州市应急能力格局、区域特征及影响因素的作用机理,结果表明:(1)郑州市环境应急能力呈由中心向外围增强的圈层结构,西部的巩义市、新密市及东北部金水区、郑东新区能力最强,东部的中牟县、航空港区处于中等水平,中部的二七区、管城区能力最弱;(2)各区域能力特征差异显著,中牟县与航空港区在污染源风险防控方面表现优异,管城区、二七区在敏感点密度与黄河排放量上处于劣势地位,新密市、巩义市在应急准备上具备显著优势;(3)环境应急能力受自然因素与社会经济因素交互驱动,主导因素为登记注册企业数与坡度,工业GDP与登记注册企业数的协同作用最为显著。本研究可为优化区域环境应急资源配置提供科学依据。

关键词

突发环境事件, 应急能力评估, 地理探测器, 郑州市

Research on Emergency Capability Evaluation of Environmental Emergency Incidents

—An Example from Zhengzhou City

Meng Chao, Yan Cui*, Ruxin Luo, Quan Zhang

Zhengzhou Ecological Environment Emergency and Monitoring Center, Zhengzhou Henan

Received: Feb. 14th, 2025; accepted: Mar. 12th, 2025; published: Mar. 20th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 晁勳, 崔岩, 罗汝新, 张权. 突发环境事件应急能力评估研究[J]. 自然科学, 2025, 13(2): 369-377.
DOI: 10.12677/ojns.2025.132038

Abstract

Assessing emergency capacity is an important basis for improving the efficiency of urban environmental risk management. This paper takes 16 districts in Zhengzhou City as the research units, and an evaluation system containing 3 first-level indicators and 12 second-level indicators was constructed based on the entropy method and analytic hierarchy process to systematically analyze the spatial pattern, regional characteristics of emergency capability and mechanism of influencing factors of emergency response capability in Zhengzhou City, the results showed that: (1) The environmental emergency capacity of Zhengzhou City showed a circle structure enhanced from the center to the periphery, the western Gongyi City, Xinmi City, Jinshui District and Zhengdong New District in the northeast were the strongest, the eastern Zhongmou County and Air Port District were at the medium level, and the central Erqi District and Guancheng District were the weakest; (2) There were significant differences in regional capacity characteristics. Zhongmou County and Hangkonggang District had excellent performance in pollution source risk prevention and control, Guancheng District and Erqi District were inferior in sensitive point density and Yellow River discharge, and Xinmi City and Gongyi City had significant advantages in emergency preparedness; (3) The environmental emergency capability is driven by the interaction of natural factors and socio-economic factors. The leading factors are the number and slope of registered enterprises, and the synergistic effect between industrial GDP and the number of registered enterprises is the most significant. This study can provide scientific basis for optimizing the allocation of regional environmental emergency resources.

Keywords

Environmental Emergency Incident, Emergency Capacity Assessment, Geodetector, Zhengzhou City

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,我国在环境应急管理工作方面取得显著成效,突发环境事件总量呈显著下降并趋于稳定态势[1]。然而,由于突发环境事件所固有的突发性强、危害性大、发生速度快及影响范围广等特性[2],其仍会不时对公共安全产生重大冲击与深远影响,诸如黑龙江3·28尾矿库泄漏次生重大突发环境事件、江西锦江流域铊污染重大突发环境事件等,均凸显了此类事件的严重性。突发环境事件不仅会带来治理费、赔偿金等直接经济损失,还会引发土壤污染、水源污染等长期环境问题,严重威胁社会稳定与可持续发展。在此背景下,开展突发环境事件应急能力评估显得尤为重要,其结果对于提升应急响应能力、降低灾害损失具有重要意义。

国内外学者针对突发环境事件开展了广泛研究,内容涵盖时空演变、特征规律、能力评估及防范对策等多个方面:余光辉等分析了我国省域突发环境事件的变化规律,发现影响因素在不同时期和不同省域间存在时空异质性[3];李旭等强调,以企业非法超标排污为代表的人为因素是导致突发环境事件频发的主要原因[4];刘云熹等依据《突发事件应对法》构建了以北京市某区为研究对象的城市灾害事故应急能力评估量表[5];李胜探讨了突发环境事件面临的现实困境,并提出了相应的应对策略[6]。在研究方法

上, 早期研究主要依赖于问卷调查、实地调研、专家访谈等定性分析手段来评估城市应急能力, 之后, 随着邓云峰提出城市应急能力评估体系框架[7], 研究方法逐步多元化, 以层次分析法、熵值法、逼近理想排序法等为代表的定量方法被广泛应用于应急能力评估体系, 如暴雨-滑坡灾害链应急能力评估指标体系、城市灾害事故应急能力评估指标体系以及路网应急能力评估体系等[5] [8] [9]。

从上述文献来看, 目前有关环境应急能力评估的研究往往侧重于常规环境事件, 对突发环境事件的特殊性(如响应时效性、资源调配复杂性)关注不足, 这会导致构建的指标体系不够全面, 影响应急能力评估的科学性; 另外, 现有研究方法较为单一, 往往只是各项指标的简单叠加, 指标权重也多依赖主观赋值, 未能充分考虑到指标间的内部关联和相互影响。鉴于此, 本文以郑州市为研究对象, 首先采用熵值法和层次分析法综合构建突发环境事件应急能力评估指标体系, 然后对环境应急能力空间格局和能力特征展开剖析, 最后分析不同影响因素的作用机理, 以期为提升郑州乃至更广泛地区的环境应急管理水平提供有力支撑。

2. 研究区概括

郑州, 坐落于黄河中下游平原, 是国务院正式批复的国家中心城市之一。近年来, 其经济呈快速发展态势, 截至 2024 年底, 全市 GDP 总量达到 1.45 万亿元, 常住人口规模 1300 万人。然而, 人口的快速集聚在推动经济增长的同时, 也带来了环境污染加剧、环境风险源数量激增等一系列挑战。《郑州市 2024 年环境信息依法披露企业拟定名单》显示, 郑州市依法批露环境企业达 823 家, 环境风险源与交通尾气排放、城市扬尘等环境问题交织叠加, 使得郑州市环境应急管理工作面临复杂多变的局面, 鉴于此, 选择郑州市为研究对象, 具有高度的现实意义和代表性。

3. 数据与方法

3.1. 数据来源与处理

郑州市行政边界通过全国地理信息资源目录服务系统获取, 以《郑州市城市更新专项规划》中的地图为基准, 对边界进行调整, 工业 GDP、登记注册企业数、综合能源消费量、GDP、人口数据源于《郑州统计年鉴 2023》, DEM 数据、植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)下载于地理空间数据云, 路网数据采用开放街道地图(Open street map, OSM)道路数据集, 污染源企业源于国家级环保备案数据库, 避难所、物资库、敏感点、监控点位、企业废水排放量、历史事故率等数据源于郑州市本地综合性环保信息平台, 应急演练数据为郑州市突发环境事件应急演练专家打分均值, 高中及大学以上文化程度人口数据源于《郑州市第七次全国人口普查公报(第四号)》。

按照刘云熹等提出的突发环境事件应急能力理论框架[5], 结合专家访谈与文献分析法, 从风险源与敏感性评估、应急准备与响应能力、社会支持与恢复力 3 个维度出发, 构建包含 12 个指标的突发环境事件应急能力评估指标体系, 具体见表 1; 参考余光辉等研究成果[3], 选用坡度和 NPP 来表征自然因素, 选用工业 GDP、登记注册企业数、综合能源消费量来表征社会经济因素。

Table 1. Environmental emergency incident capacity assessment system

表 1. 突发环境事件应急能力评估体系

一级指标	二级指标	指标计算与描述	属性
风险源与敏感性评估	污染源风险值	基于 5 类污染源企业的行业风险系数加权计算	负向
	人口集聚度	各区县单位面积人口数量	负向
	敏感点密度	各区县环境敏感点的数量	负向

续表

	环境风险指数	污染源密度、历史事故率、敏感点距离的加权复合指标	负向
	黄河排放量	各区县黄河二级支流沿岸企业单位产值废水排放量	负向
应急准备与 响应能力	避难设施密度	各区县避难场所数量	正向
	应急物资储备	各区县应急物资库数量	正向
	监控网络密度	各区县监测站点数量	正向
社会支持与 恢复力	应急演练成效	各区县历次应急演练专家打分均值	正向
	路网可达性	各区县道路长度与面积之比	正向
	经济发展水平	各区县国民生产总值	正向
	人力资源素质	各区县高中及以上学历人口与总人口之比	正向

注：参考《企业突发环境事件风险分级方法》，将污染源企业划分为石油化工、有机化学制造，有色金属冶炼、电镀，危险废物处置、医疗垃圾清理，制药、农药生产，一般工业等五类，行业风险系数依次为 1.8、1.6、2.0、1.5、1。

3.2. 研究方法

3.2.1. 环境风险指数

$$R_i = \alpha \times \frac{S_i}{S_M} + \beta \times \frac{H_i}{H_M} + \gamma \times \frac{D_i}{D_m} \quad (1)$$

式中 S_i 为污染源密度， S_M 为 S_i 最大值， H_i 为近 5 年事故发生率， H_M 为 H_i 最大值， D_i 为最近敏感点距离， D_m 为 D_i 最小值，权重 α 、 β 、 γ 分别为 0.4、0.3、0.3。

3.2.2. 环境应急能力指标构建方法

本文将熵值法和层次分析法结合，从而构建突发环境事件应急能力评估指标体系，即分别通过熵值法和层次分析法计算出指标权重，然后对其进行加权融合，该方法可较大程度避免由于主观因素而产生的结果误差[10]，计算步骤如下：

(1) 设有 n 个研究单元， m 个指标， x_{ij} 为研究单元 i 的第 j 个指标， x_{ij} 标准化后得到 y_{ij} ，计算第 j 项指标的熵值 e_j ：

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_i y_{ij} \ln(y_{ij}) \quad (2)$$

(2) 计算客观权重 w_j ：

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_j 1 - e_j} \quad (3)$$

(3) 通过专家打分构建判断矩阵，采用特征向量法计算客观权重 w_a 。

(4) 采用乘法合成法平衡主客观权重，求得最终权重 w_z ：

$$w_z = \frac{w_j w_a}{\sum_j w_j w_a} \quad (4)$$

(5) 计算各区县得分：

$$H_i = \sum_j (w_z y_{ij}) \quad (5)$$

3.2.3. 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性、以及揭示其背后影响因素的一种统计学方法[11], 共包含 4 个探测器, 其中因子探测可用于探测某因子 X 在多大程度上解释属性 Y 的空间分异, 交互探测用于识别不同因子之间的交互作用, 即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加对因变量 Y 的解释力, 因子探测公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (6)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (7)$$

式中 L 为变量 Y 的分层, 下标 h 表示第 h 层, N 为全区的单元数, σ^2 为全区 Y 值的方差, SSW 为层内方差之和, SST 为全区总方差, q 值越大表示自变量 X 对 Y 的解释力越强, 反之则越弱。

交互探测通过比较 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 的关系, 进而将交互类型划分为双因子增强和非线性增强。

$$q(X_1 \cap X_2) > M(q(X_1), q(X_2)) \quad (8)$$

$$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2) \quad (9)$$

式中 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 表示两种因子 X_1 和 X_2 对 Y 的 q 值, $q(X_1 \cap X_2)$ 表示交互时的 q 值, $M(q(X_1), q(X_2))$ 表示 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$ 中的最大值。

4. 结果与分析

4.1. 环境应急能力分异格局

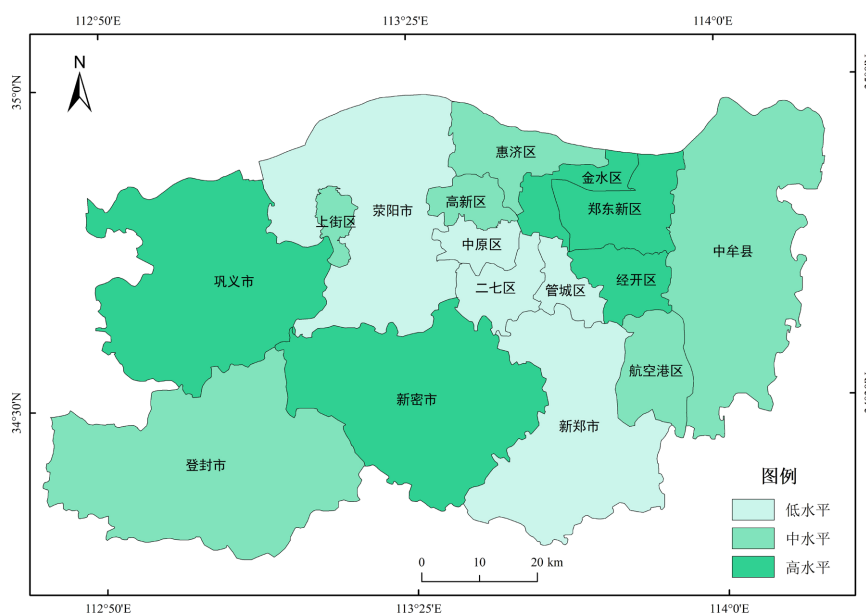


Figure 1. Spatial distribution of environmental emergency incident response capacity
图 1. 突发环境事件应急能力空间分布图

根据各开发区、区(县、市)的突发环境事件应急能力得分情况,采用 Jenks 自然断点法将其划分为低水平、中水平和高水平,并进行可视化表达。如图 1 所示,郑州市突发环境事件应急能力整体呈现出由中心向外围逐渐增强的圈层结构,分异特征明显,其中,巩义、新密等西部县级市和以金水区、郑东新区和经开区等为代表的东北部区域应急能力较强,得分均在 54 以上,显示出较高的风险防控和应急响应水平;相较之下,位于郑州市中部的荥阳市、中原区、二七区、管城区和新郑市,应急能力则相对较弱,得分一般在 38 至 41 之间,反映出这些区域在应急准备、资源调配及社会支持方面存在一定的不足;以中牟县、航空港区等为代表的东部区县和位于北部的上街区、惠济区和高新区以及位于西南的登封市的应急能力处于中等水平,得分在 42 至 53 分之间,表明这些区县虽显示出一定的应急响应潜力,但仍需进一步加强风险防控和应急准备。

4.2. 环境应急能力特征分析

进一步研究各开发区、区(县、市)的应急能力指标得分情况,以便揭示其在应对突发环境事件时的优势与不足,如表 2 所示,从风险源与敏感性评估来看,中牟县表现最优,除敏感点密度外、其余各项指标得分均在 8 分以上,航空港区各项指标得分也相对均衡,显示出较强的风险防控能力;相较之下,管城区、二七区和荥阳市在环境风险指数、敏感点密度和黄河排放量等指标上具有明显劣势,这些地区工业活动密集、人类社会活动频繁,突发环境事件发生概率较高,需进一步加强环境风险源企业的监管和防控。

在应急准备与响应能力方面,新密市和巩义市整体较为优秀,各项指标分值均在 5 分以上,表明这些区域在应急准备方面较为充分,能够在突发环境事件发生时迅速调配资源,为应急救援提供有力保障;与之对应,管城区、中原区和航空港区的缺点则更为突出,在避难设施密度、应急物资储备、监控网络密度及应急演练成效四项指标上的得分均低于 3 分,反映出这些地区在应急响应能力方面尚需加强。

就社会支持与恢复力而言,金水区在路网可达性、经济发展水平和人力资源素质方面占据显著优势,指标得分均在 6 分以上,在突发环境事件发生后能够迅速调动资源、恢复社会秩序,为应急管理和恢复工作提供有力支持;对比而言,登封市、新密市和中牟县经济发展水平较低、路网可达性较差,这在一定程度上限制了其社会支持与恢复力的发挥,需加强基础设施建设,提升经济发展水平,优化人口素质,以提高突发环境事件应对能力。

Table 2. Environmental emergency incident capacity index score
表 2. 突发环境事件应急能力指标得分

	污染源 风险值	人口集 聚度	敏感点 密度	环境风 险指数	黄河 排放量	避难设 施密度	应急物 资储备	监控 网络 密度	应急演 练成效	路网可 达性	经济 发展 水平	人力资 源素质
高新区	8	5	7	4	4	2	1	0	6	6	2	8
管城区	8	3	4	0	2	0	1	0	3	7	3	7
金水区	8	0	0	6	8	3	1	0	6	9	9	9
巩义市	2	8	3	5	3	10	8	9	6	0	4	2
新郑市	7	8	1	4	2	0	5	2	2	3	3	4
登封市	4	8	3	7	2	3	8	7	7	0	2	1
二七区	8	4	0	0	4	2	2	1	3	6	3	7
新密市	0	8	3	7	5	5	10	10	6	0	3	1

续表

中牟县	8	8	5	9	9	0	1	1	9	2	1	1
惠济区	8	7	3	6	7	1	1	0	4	4	1	7
上街区	8	6	7	6	4	4	0	1	4	5	0	5
荥阳市	6	8	2	2	0	0	6	3	7	2	2	2
中原区	8	2	3	2	4	2	1	0	0	7	3	7
郑东 新区	8	6	4	5	8	0	1	1	7	7	6	9
经开区	7	7	8	4	4	2	2	3	5	7	5	4
航空 港区	8	6	9	7	6	0	0	1	1	4	5	0

4.3. 环境应急能力影响因素

将各影响因素按 Jenks 自然断点法分为 5 类、确保类间差异最大化，而后导入地理探测器之中，求得因子探测的 q 值，如表 3 所示，从 q 值来看，登记注册企业数(0.489)和坡度(0.473)是影响郑州市环境应急能力的主导因素，登记注册企业数作为社会经济活动的重要指标，其高值区域往往伴随着较高的工业活动和潜在的环境风险，坡度则揭示了自然地理条件对应急能力分布的制约作用，坡度较大的区域可能面临更多的地质灾害和地形限制，不利于应急物资的快速调配和人员的及时疏散；工业 GDP (0.301)、NPP (0.179)和综合能源消费量(0.195)也对环境应急能力产生了一定影响，工业 GDP 的增长往往伴随着工业活动的扩张，增加了环境风险；NPP 作为自然生产力指标，其变化可能影响生态系统的稳定性和恢复力，进而影响环境应急的社会支持与恢复力；综合能源消费量则反映了能源消耗水平和污染排放强度，是影响环境应急能力的重要因素之一。

Table 3. Single factor detection analysis
表 3. 单因子探测结果分析

	影响因素	q 值	排序
自然因素	坡度	0.473	2
	NPP	0.179	5
社会经济因素	工业 GDP	0.301	3
	登记注册企业数	0.489	1
	综合能源消费量	0.195	4

交互探测结果显示，相较于单因子 q 值，不同影响因素的双因子 q 值均得到显著提高，说明影响因素的交互作用有效增强了对环境应急能力的解释，如表 4 所示，NPP 与工业 GDP、NPP 与登记注册企业数、NPP 与综合能源消费量、工业 GDP 与综合能源消费量等 4 类影响因素的交互作用为非线性增强，其余影响因素为双因子增强，其中交互作用最强的为工业 GDP 与登记注册企业数(0.839)，这一结果反映了社会经济活动的密集程度与环境应急能力之间的紧密联系，工业 GDP 的增长往往伴随着工业活动的扩张和登记注册企业数的增加，这不仅带来了潜在的环境风险，也对环境应急管理和响应能力提出了更高的要求；交互作用最弱的为坡度与工业 GDP (0.549)，这可能是由于坡度作为自然地理条件，主要影响应急物资的快速调配和人员的及时疏散，而工业 GDP 则更多地反映了社会经济活动的规模和强度，两者虽然都对环境应急能力产生影响，但其作用机理相对独立，因此交互作用较弱。

Table 4. Interactive factor detection analysis
表 4. 交互探测结果分析

	坡度	NPP	工业 GDP	登记注册企业数	综合能源消费量
坡度	0.473				
NPP	0.685	0.179			
工业 GDP	0.549	0.724 ^N	0.301		
登记注册企业数	0.748	0.759 ^N	0.839	0.489	
综合能源消费量	0.637	0.743 ^N	0.694 ^N	0.761	0.195

注：右上角标 N 的交互类型为非线性增强，其余为双因子增强。

5. 结论与讨论

5.1. 结论

本研究以郑州市 16 个开发区、区(县、市)为研究对象，从风险源与敏感性评估、应急准备与响应能力、社会支持与恢复力三方面出发，通过熵值法和层次分析法构建突发环境事件应急能力评估指标体系，然后对郑州市应急能力空间格局和能力特征进行分析，最后研究了不同影响因素的作用机理，主要结论如下：

(1) 郑州市突发环境事件应急能力整体呈由中心向外围逐渐增强的圈层结构特征，西部巩义、新密等县级市及东北部金水区、郑东新区等区域综合得分最高，展现出较强的风险防控与应急响应水平；中部二七区、管城区等核心区域能力薄弱，应急资源调配与社会支持存在明显短板；东部中牟县、航空港区及北部上街区等处于中等水平，需进一步强化风险源管控与应急准备。

(2) 郑州市各区域环境能力特征差异显著，中牟县与航空港区在污染源风险值、环境风险指数等方面较为占据优势，管城区、二七区在敏感点密度与黄河排放量等指标上处于劣势地位，新密市、巩义市在避难设施密度、物资储备等指标上表现优秀，金水区在路网可达性与经济发展水平上表现优异，登封市、新密市受基础设施与人口素质的限制较为明显。

(3) 郑州市环境应急能力受自然因素与社会经济因素的交互驱动，因子探测结果表明，登记注册企业数与坡度是影响环境应急能力的主导因素，反映出背后的社会经济活动强度与地形制约效应；交互探测结果显示，工业 GDP 与登记注册企业数交互效果最强，凸显了经济活动密集区环境风险与应急需求的协同增强。

5.2. 讨论

本文着眼于郑州市突发环境事件应急能力空间格局、区域特征及影响因素的研究，研究结果表明，郑州市不同区域的突发环境事件应急能力差异显著，在风险源与敏感性评估、应急准备与响应能力、社会支持与恢复力 3 个维度上各有优劣，这可能会导致突发环境事件发生时部分地区难以有效应对。鉴于此，本文提出一系列提升策略，以期提升郑州市环境应急管理水平的提供部分参考：

(1) 重点强化敏感点防护与快速响应：针对金水区、中原区等人口稠密区存在的敏感点防护薄弱、应急资源调度效率不足等问题，建议生态环境局联合街道办事处建立“1 公里应急响应圈”，即以敏感点为中心划定辐射范围，配置微型应急物资储备站(含防毒面具、应急通讯设备)，由社区网格员负责日常维护。

(2) 优化企业风险联防联控机制：航空港区、经开区等工业集聚区的核心问题在于工业企业集聚导致风险源叠加、跨部门协同处置能力不足，建议应急管理局组织实施企业分级管控，按照行业风险系数强

制要求高风险企业定期开展应急演练,检查企业应急预案,收集危险品库存数据,整合周边救援力量。

(3) 加强生态屏障与风险预警能力:荥阳市、登封市等由于地形条件的限制容易出现监测盲区,引发次生突发环境事件的概率较大,建议自然资源规划局协同水利局开展“生态修复 + 风险预防”工程,即在河流源头区种植净水植物(如芦苇、香蒲),同时设置生物毒性预警浮标,在水质异常时自动触发报警,为及时开展后续处置工作争取时间。

参考文献

- [1] 魏清伟, 邴永鑫, 陈思莉, 等. 我国突发环境事件演变态势、应对经验及防控建议[J]. 环境工程学报, 2021, 15(7): 2223-2232.
- [2] 陈思莉, 张胜, 潘睿, 等. 危化品道路运输次生突发环境事件特征分析及防范对策[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3193-3198.
- [3] 余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 等. 中国 1991-2018 年突发环境事件时空特征及影响因素[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 572-582.
- [4] 李旭, 吕佳佩, 裴莹莹, 等. 国内突发环境事件特征分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(2): 401-408.
- [5] 刘云熹, 时德轶, 张鹏, 等. 城市灾害事故应急能力评估指标体系构建研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(1): 179-186.
- [6] 李胜. 突发环境事件的协同治理: 理论逻辑、现实困境与实践路径[J]. 甘肃社会科学, 2022(3): 180-187.
- [7] 邓云峰, 郑双忠, 刘功智, 等. 城市应急能力评估体系研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(6): 33-36.
- [8] 王伟, 石雨欣, 宋月, 等. 暴雨-滑坡灾害链应急能力评估——以粤港澳大湾区为例[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(4): 95-105.
- [9] 王冠妍, 孙健, 王绪亭, 等. 韧性视角下的高速公路突发事件应急能力评估研究[J]. 交通工程, 2023, 23(6): 15-20.
- [10] 李云晶, 李博, 郝桂媛, 等. 2023-2024 年冬春季黑龙江典型城市冰雪环境质量综合评价[J]. 中国环境监测, 2024, 40(S1): 65-73.
- [11] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.