

# 基于多模态感知的危险废物环境风险评估与预警研究

方文<sup>1,2</sup>, 刘正<sup>1</sup>, 黄玉洁<sup>1</sup>, 毕军<sup>1,2\*</sup>

(1. 南京大学环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏南京 210023; 2. 南京信息工程大学 大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏南京 210044)

**【摘要】** 为了有效地防范化解危险废物的环境风险, 亟须构建风险的精细化评估与实时智能预警系统。然而, 危险废物特性复杂、全过程流转链条长, 传统的单一感知数据并不能满足环境风险评估和预警的需求。因此, 本文提出基于多模态感知的危险废物环境风险评估与预警方法, 采用物联网、大数据、人工智能等技术手段, 实现危险废物基础信息、环境要素、空间信息的多模态实时感知, 并通过感知信息的融合、分析, 进行准则判断或现象描述。围绕以上研究思路, 本文针对危险废物贮存环节及非法倾倒两个重要风险因子释放情景, 设计了基于多模态感知的风险评估与预警方法, 以期对危险废物环境风险的管控提供相应的服务与决策。

**【关键词】** 危险废物; 环境风险; 多模态感知

**【中图分类号】** X51; F205

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 1674-6252 (2022) 04-0013-06

**【DOI】** 10.16868/j.cnki.1674-6252.2022.04.013

## 引言

随着我国工业化与城市化进程的加快, 近年来我国危险废物(以下简称“危废”)的产量呈现快速增长的趋势<sup>[1]</sup>, 近五年的增长率约为15%~22%<sup>[2]</sup>。危废具有毒性、腐蚀性、易燃性、反应性和感染性<sup>[3]</sup>, 可能对环境造成严重危害, 进而产生环境风险。2021年5月25日, 国务院办公厅印发的《强化危险废物监管和利用处置能力改革实施方案》提出危废管理的总体要求为“坚持精准治污、科学治污、依法治污, 以持续改善生态环境质量为核心, 以有效防控危废环境与安全风险为目标”, 明确了危废环境风险防范的重要性。

近年来, 我国危废环境事件的发生造成了一定的环境风险<sup>[4]</sup>。危废环境风险的精确评估和实时预警是防止重大危废环境风险事件发生的重要前提<sup>[5]</sup>。然而, 危废处理的全过程包括产生、收集、贮存、利用处置多个环节, 流转链条长、处理技术多元<sup>[6]</sup>、污染特性差异显著<sup>[6]</sup>, 导致风险因子复杂<sup>[7]</sup>, 极大地增加了环境风险评估和预警的难度。

对危废流转全过程中的物品状态和环境信息进行多维度感知, 是实现危废环境风险评估和预警的重要基础。随着我国危废流转全流程信息化建设的推

进<sup>[8,9]</sup>, 部分物联网技术与设备已经被应用于危废全过程状态的感知, 如使用卫星定位危废的空间位置信息、利用射频识别(RFID)技术获取危废的品类信息等。然而, 单一的感知信息并不能满足危废环境风险评估和预警的需求。因此, 构建基于多模态感知的环境风险评估与预警系统是危废环境风险防范领域的重要内容。

## 1 危险废物全过程感知信息

基于多模态感知的环境风险评估与预警系统首先要进行危废全过程感知信息的采集和多模态感知数据的融合, 具体是指利用多种感知技术与设备, 例如RFID<sup>[10,11]</sup>、物性型传感器<sup>[12,13]</sup>、卫星定位<sup>[14]</sup>、遥感<sup>[15]</sup>等, 按照设定的协议, 将危废全过程中各种虚拟“物件”与互联网连接起来, 进行信息的相互传输, 从而实现对危废的智能化跟踪、监控。基于危废环境风险评估的需求, 多模态感知数据的类型主要包括基础信息、环境要素、空间信息三类。

### 1.1 基础信息感知

危废的基础信息感知包括两个方面: 一是危废的品类信息感知, 二是危废的状态感知。现有危废的品

**资助项目:** 国家自然科学基金项目(71921003, 71761147002)。

**作者简介:** 方文(1990—), 女, 副研究员, 研究方向为固体废物风险管理与政策研究, E-mail: wenfang@nju.edu.cn。

**\* 责任作者:** 毕军(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为环境管理与政策分析, E-mail: jbi@nju.edu.cn。

类信息感知主要通过条形码/二维码技术实现,即基于条码识读器读取条形码/二维码包含的危废相关信息,主要包括危废类别、数量、所属单位、流转节点等关键参数信息,并将信息传输到计算机上。然而,由于条形码需要进行视距读取,读取效率低且无法进行实时监测。因此,近年来RFID技术被更广泛地应用于危废的感知。RFID技术是批量识别危废品类信息的重要手段,由RFID阅读器、电子标签及应用软件系统三个部分构成,通过RFID阅读器与电子标签之间进行远距离、非接触式的数据通信,将数据传送到软件系统中,达到识别目标、分析数据的目的。危废状态的感知主要是通过视觉传感器监测危废的实时状态,包括危废是否发生倾倒或泄漏、是否按规定存放、有无异常人员进入危废贮存区域等。现有应用大多在危废风险管控关键节点,如危废贮存仓库、危废运输车辆等,通过安装视觉传感器,进行实时图像的采集。

## 1.2 环境要素感知

环境要素感知是通过相关传感器设备,主要指物性型传感器(即通过传感器本身材料敏感性的物理变化实现信号的转换,包括温度、压力、湿度、浓度等),对危废所处环境的相关物理、化学要素进行采集,如压力传感器、温度传感器、烟气传感器等。由于不同危废的风险特性差异显著,对于环境要素的敏感度不同,因此须根据所存储、运输、处理的危废类型和特点安装不同的物性传感器。例如,针对易燃易爆危废的贮存装置或运输车厢,需安装温度与压力传感器,实时采集温度与压力信号。

## 1.3 空间信息感知

危废流转全过程的空间信息感知包含两个方面:一方面是对危废运输车辆的实时位置信息的采集;另一方面是对相关空间地理数据的采集。卫星定位是危废运输车辆实时位置信息采集的常用手段,主要用于危废的转移运输环节<sup>[7]</sup>,通过运输人员的手机终端或者危废运输车辆车载卫星定位设备,获取运输车辆的行动轨迹。空间地理数据的采集则是利用遥感卫星<sup>[16]</sup>、高分辨率卫星<sup>[17]</sup>、无人机设备<sup>[18]</sup>对危废产生、转移运输、处置利用等相关场所的空间遥感图像、近地面图像或是热图像等图像信息进行采集。

## 2 危险物流转全过程多模态感知数据的融合

多模态感知数据融合是指将不同信息来源的数据

在一定准则下加以分析、调整,以形成相对完整、一致、准确的描述或表征<sup>[19]</sup>。随着传感器技术的广泛使用,现行交互系统面临传输时延增加,信息来源复杂、计算资源紧张等诸多问题,造成决策精度和时间效率的下降。面对这些问题,多模态数据融合主要从提升运算效率,解决数据特征异构的角度出发,进行数据诊断、清洗与信息提取。

### 2.1 感知数据的自适应诊断、清洗与重构

多模态感知数据的融合首先需要对危废感知数据进行分类与整合,利用深度学习的相关算法,对数据质量的准确性、一致性、完整性方面进行建模,去除掉冗余、不可靠的数据,实现数据的筛选与重构。

首先,基于数据的周期波动规律,将数据进行区间分类,并按照数据的概率分布特征设定其阈值范围,开展数据的初步筛选。之后,充分挖掘数据的时空变化规律,识别离群数据的特征参数,采用基于孤立森林异常数据识别等模型对危废数据的离群点进行精细化剔除。最后,针对剔除的异常数据进行数据集补偿,使用具有高维模式识别能力的机器学习模型,如最小二乘支持向量机(LSSVM)进行数据重构。

### 2.2 感知信息的分析与现象描述

在完成数据的筛选与重构后,需要通过对多源信息进行汇总、分析,借助GIS平台、数据挖掘、机器学习、卫星识别、聚类分析等方法,进行准则判断或现象描述,为环境风险评估及预警提供相应的服务与决策信息。

本研究按照所感知信息的种类,将所获取的危废感知数据分为字段数据与图像数据,并针对这两类数据,利用不同的分析方法对危废状态进行描述。

危废相关的字段数据主要分为文本数据与数值数据(包含整数、浮点数、十进制数等)。文本数据属于非结构化数据,缺乏机器可理解的语义且无特定形式,需要先进行文本的预处理,预处理的过程包括构建本体字典、文本分词、词性标注等,对文本特征进行修剪;然后将文本表示成计算机可处理的形式,利用正则表达式、语义框架模型、嵌入式向量模型等方法,实现文本的特殊表示;最后在文本经过预处理和表示环节后,基于机器学习方法,进行文本的聚类、分类,采用逻辑回归、K近邻法、贝叶斯网络、决策树法、循环神经网络等开展文本的挖掘,提取有价值的信息。文本数据一般应用于知识图谱、情景数据库

构建等。

危废相关的图像数据包含视频与图片数据，主要来自视觉传感器、摄像头、卫星遥感影像等。视频图像处理主要包括目标检测、图像分割和图像识别。目标检测主要应用在背景中检测目标，如危废场所安全帽检测、易爆品区域越界检测等；图像分割是像素级的目标检测，能够精准地定位到目标在图像中的像素位置；图像识别是对整个图像的内容进行识别，如的相关应用场景上应用人脸识别，对危险废物进行物体识别等。根据危废流转全流程各环节场景的差异采用不同视频数据处理方法，如驾驶行为检测，通过对人脸图像特征的处理，判定是否存在疲劳驾驶现象，同时可对驾驶人员的驾驶行为进行预警，如抽烟、手脱离方向盘等；烟火检测，通过对视频信号的实时处理分析，可在视频火灾图像出现的几秒之内就能在图像上发现火焰或烟雾，同时发出火灾报警信号。

### 3 危险废物的环境风险评估与预警

在利用多模态感知技术进行数据采集与融合后，基于提取的信息进行危废环境风险评估与预警。该部分主要探讨危废环境风险的内涵和评估方法，以及如何利用多模态感知的信息进行风险评估与预警。

#### 3.1 危险废物全过程的环境风险

根据环境风险的产生原因，可将危废的环境风险分为两类：第一类为突发型环境风险，由于危废全过程的操作不合理以及违法行为（如非法倾倒）造成环境事故，如燃烧、爆炸等，进而造成危废的泄漏和污染物在环境中的迁移转化；第二类为累积型环境风险，在危废合法合规的处置利用过程中，由于技术手段、工艺类型等自身特点，导致污染物的释放，造成相应的环境和人体健康风险。

针对突发型环境风险，风险因子的无序释放大多与人员操作失误、企业管理水平不足有关，如危废在非法堆放的过程中污染物随着降雨向土壤、水体迁移，造成附近区域严重的环境风险。由于危废管理的对象复杂、流程广泛、手段多样，造成了该类环境风险较高的不确定性，增加了评估与预警的难度。由于多模态感知能够实时获取危废全过程的多维度数据，可以有效解决风险评估中的不确定性问题。因此，基于多模态感知的风险评估主要是针对突发型环境风险开展，旨在提前预测危废突发性环境事故的发生概率，耦合事故的环境损害结果，评估风险并进行

预警。

#### 3.2 危险废物环境风险的评估与预警方法

首先，构建环境风险事件的致因网络，识别关键致因要素。针对特定的危废突发型环境风险事件，如泄漏、爆炸等，通过文献及历史数据调研，分析危废环境事故的风险源、事故发展路径、风险防范节点等方面的信息，进一步地采用故障树<sup>[20,21]</sup>、决策树<sup>[22]</sup>、Bow-Tie<sup>[23,24]</sup>等方法建立风险致因网络。根据该致因网络中的节点要素，包括人员操作、仪器设备、环境条件、管理水平等，以节点对风险事件发生概率的影响水平作为筛选原则，结合历史事件中不同致因要素的发生频次以及专家意见，筛选关键致因要素，并围绕这些关键要素，开展多模态的感知数据采集。

第二，利用多模态感知数据和算法模型，对关键致因要素和节点的状态进行判断。例如，针对危废贮存是否合规的关键节点，基于贮存危废的基础信息感知，结合超期超量算法模型，判断该节点的状态。具体来说，以管理办法规定的危废贮存时间及相关企业的核定贮存量为依据构建模型，将感知的危废基础信息如危废入库时间、危废重量、危废种类等作为参数输入模型，判断贮存危废是否逾期、超量等。针对运输车辆是否正常行驶的节点，可以使用空间信息感知，结合停留时间阈值模型进行判断，分析危废运输车辆是否进行了非正常停留。归纳来说，需要依据关键致因要素的信息需求，进行算法模型的构建，通过多模态感知数据的信息提取，判断关键节点所处状态及相应概率。因此，针对节点状态判断的算法模型的准确性是决定风险评估预警精准度的关键。在算法模型的效果评估方面，需要进行现场实验验证。例如，针对贮存场所是否有不合规操作的判断，可以在视频监控的范围内进行一些人为干预的操作，检验图像视频识别算法的准确性，并基于人为干预实验的结果进行模型算法优化。

第三，根据节点的状态，计算风险事件的发生概率，进一步耦合事故的损害结果，评估风险并进行预警。基于构建的风险事件致因网络，采用贝叶斯网络<sup>[25]</sup>或者决策树的方法<sup>[26]</sup>，构建不同节点状态下风险事件的概率预测模型。同时，依据国家的相关导则，如《化工企业定量风险评价导则》等，进行损害后果计算，综合概率和后果得到环境风险水平并进行预警。

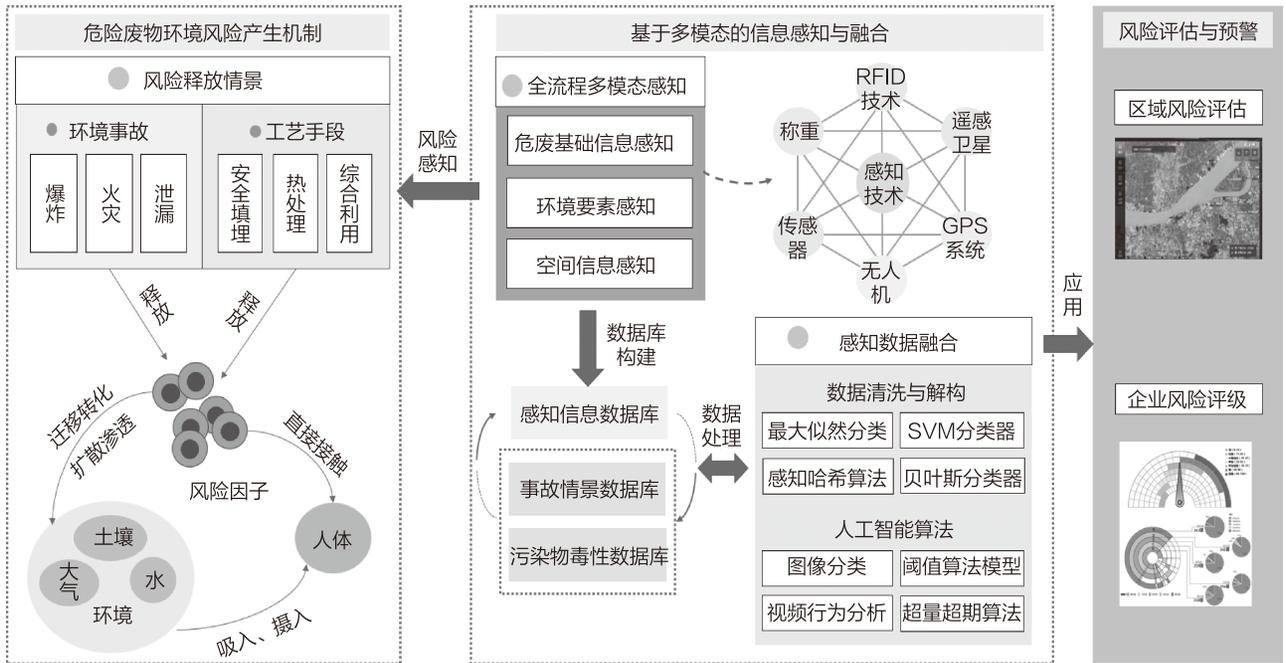


图1 危险废物全流程环境风险评估与预警

## 4 多模态融合的危险废物环境风险评估与预警案例

### 4.1 危险废物贮存环节风险预警系统

危废的不合理贮存与堆放是危废产生环境风险的潜在原因。《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》第八十一条规定：“收集、贮存危险废物，应当按照危险废物特性分类进行”。然而，由于危废种类复杂，从业人员专业知识有限，经常导致危废混合贮存、超期贮存，造成严重的环境风险。

为有效防控危废贮存的环境风险，本文结合多模态基础信息感知与环境要素感知技术，提出了基于多源数据的危废贮存环节风险预警系统。针对贮存过程环境风险的关键节点，包括危废贮存数量、贮存品类、贮存合规性、贮存环境等，通过多模态感知技术进行状态分析与判断。包括利用RFID技术获取危废的品类、数量、流转等信息；利用称重感知获取危废的重量信息；利用物性型传感器采集危废贮存环境的相关物理、化学要素；利用视觉传感器感知贮存场景的行为信息。

首先，基于RFID的动态实时数据采集，掌握危废的基础信息（来源、废物代码、化学成分、物理状态、数量、重量）和特性参数（腐蚀性、浸出毒性、急性毒性、易燃易爆性、相容性等），并基于危废相容性原则与分类存放原则，对危废的装卸过

程、厂内运输路径、贮存区域和位置进行远程控制和指导。同时，依靠重量传感器对贮存场所不同危废的数量进行更新与核实，结合超期算法和超量算法，对即将到达贮存期限和目标库存量的废物进行预警，降低企业超期超量贮存风险。此外，基于视觉传感器进行危废和场所的图像采集，结合预先设置的机器学习算法自动判定危废贮存的合规性，同时对人员的操作行为进行分析。基于危废种类、形态、物化性质等特性，在危废贮存装置上安装不同的物性型传感器，对危废贮存的环境参数（如温度、湿度）进行实时监测，根据设定的各类参数阈值的算法模型，进行风险预警。

### 4.2 危险废物非法倾倒高风险区域识别方法

非法倾倒是危废环境风险扩散的重要源头。当前，我国对于非法倾倒监管属于事件驱动型的监管，大部分危废非法倾倒事件是在造成恶劣后果或者监管部门定期巡查的过程中被发现，无法实现事前预警。为了提高监管效率，防范非法倾倒事件造成严重的环境风险，本文提出基于多模态的感知技术，针对非法倾倒风险的关键节点，包括车辆运输轨迹、地理空间位置等，进行状态分析与判断，支持可能发生非法倾倒的高风险区域的识别，为缩小监管范围、有效防范非法倾倒事件的发生提供辅助支撑。

对危废非法倾倒风险区域识别主要运用了多模

态的空间信息感知技术,包括基于卫星定位设备感知危废的位置信息、基于遥感卫星获取区域性遥感图像、基于无人机或是高分辨率的近地面卫星图像。首先,根据车载卫星定位装置读取危废运输车辆的实时位置,基于危废的位置与行动轨迹数据,构建关于运输车辆异常停留时间阈值的算法,标记车辆异常停留地点为可疑的非法倾倒区域。其次,由于部分危废非法倾倒事件是由不受危废管理部门监管的运输企业或个人来完成的,无法通过卫星定位来获取其位置信息。针对这种情况,本研究提出,采用空间地理数据进行分析,选择合适的遥感卫星对整体区域内遥感图像进行采集,通过不同遥感影像的光谱特征判断该区域是否存在非法倾倒。基于与已知危废非法倾倒区域光谱特征的近似程度为准则,通过分类算法(如最大似然分类)识别可能的非法倾倒点位。最后,针对高可疑的非法倾倒区域,使用无人机或者高分辨率卫星拍摄近地面图像,提取相关图像特征,利用计算机视觉算法(如感知哈希算法)对比不同时间点的图像特征,最终判断危废运输车辆异常停留区域是否发生了非法倾倒,或者通过图像分类算法(如SVM分类器),将拍摄的图像与已知的非法倾倒场所的图像进行对比,对图像进行自动分类,判断危废非法倾倒的区域。

## 5 小结与展望

随着我国工业化的持续推进,危废的产量呈现快速增加的态势,造成潜在的环境风险,构建危废全过程的环境风险评估与预警系统,是防范化解危废环境风险的重要内容。针对危废环境风险较高的复杂性和不确定性,本文提出了基于多模态感知数据的危废环境风险评估与预警方法,借助物联网、人工智能等技术方法,通过融合危废的基础信息感知、环境要素感知、空间信息感知数据,实现危废流转全流程环境风险的精准评估与实时预警。为实现以上目标,亟须推进危废流转全流程信息感知的智能化、标准化、协同化、规范化,制定统一的多模态感知系统和数据采集与对接标准,同时,强化感知数据的分析与应用,使用人工智能算法进行风险评估与预警,并优化相关管理政策,加速推进基于多模态感知数据的环境风险评估与预警技术的发展。

## 参考文献

[1] 储成君,王依,臧宏宽,等.危险废物环境管理的问题与对策思

- 考[J].环境保护,2016,44(19):59-61.
- [2] 国家统计局,环境保护部.中国环境统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2013.
- [3] 孙绍锋,胡华龙,郭瑞,等.我国危险废物鉴别体系分析[J].环境与可持续发展,2015,40(2):37-39.
- [4] 黄启飞,王菲,黄泽春,等.危险废物环境风险防控关键问题与对策[J].环境科学研究,2018,31(5):789-795.
- [5] 韦炜.危险废物的环境风险评估及处理技术现状[J].资源节约与环保,2018(9):73.
- [6] 余志元,李二平,邱亚群,等.我国危险废物的处理现状和发展方向[C]//2016中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷).海口:中国环境科学学会,2016:5.
- [7] 王琪,黄启飞,闫大海,等.我国危险废物管理的现状与建议[J].环境工程技术学报,2013,3(1):1-5.
- [8] 陈阳,何艺,郑洋.危险废物环境风险全过程防控管理现状及建议[J].环境与可持续发展,2017,42(6):30-33.
- [9] 刘宏博,吴昊,田书磊,等.“十四五”时期危险废物污染防治思路探讨[J].中国环境管理,2020,12(4):56-61.
- [10] 郑洋,蒋文博,李克,等.规范危险废物管理推进“无废城市”建设[J].环境保护,2019,47(9):26-29.
- [11] 陈文穗,江世雄,涂承谦.基于“大、云、物、移”与物联网技术的危险废物智能化管理[J].中国新技术新产品,2019(18):10-11.
- [12] 张兆昆.基于物联网技术的危险废物安全管理系统初探[J].资源节约与环保,2017(11):108-110,117-117.
- [13] 潘腾,张弛,陆大根,等.基于物联网的杭州市危险废物智能监管平台设计与应用[J].中国环境管理,2016,8(2):121-125.
- [14] 符志军.大数据在危废运输车辆GPS监控中的应用[J].无线互联科技,2020,17(10):152-153.
- [15] 王晨,殷守敬,孟斌,等.京津冀地区非正规垃圾场地遥感监测分析[J].高技术通讯,2016,26(S1):799-807.
- [16] SILVESTRI S, OMRI M. A method for the remote sensing identification of uncontrolled landfills: formulation and validation[J]. International journal of remote sensing, 2008, 29(4): 975-989.
- [17] SEROR N, PORTNOV B A. Identifying areas under potential risk of illegal construction and demolition waste dumping using GIS tools[J]. Waste management, 2018, 75: 22-29.
- [18] REITZ B C, CROUSE G L JR. Unmanned aircraft collaboration for traffic deconfliction in the national airspace system[J]. Journal of aerospace information systems, 2013, 10(1): 2-20.
- [19] 马茜,谷峪,张天成,等.一种基于数据质量的异构多源多模态感知数据获取方法[J].计算机学报,2013,36(10):2120-2131.
- [20] 赵振宇,刘伊生,杨华春.故障树法引入工程项目风险管理研究[J].现代电力,2002,19(2):95-99.
- [21] HAUPTMANN S U. A decision-making framework for protecting process plants from flooding based on fault tree analysis[J]. Reliability engineering & system safety, 2010, 95(9): 970-980.
- [22] KANG M, KIM M, LEE J H. Analysis of rigid pavement distresses on interstate highway using decision tree

- algorithms[J]. KSCE journal of civil engineering, 2010, 14(2): 123-130.
- [23] KHAKZAD N, KHAN F, AMYOTTE P. Dynamic risk analysis using bow-tie approach[J]. Reliability engineering & system safety, 2012, 104: 36-44.
- [24] AQLAN F, ALI E M. Integrating lean principles and fuzzy bow-tie analysis for risk assessment in chemical industry[J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2014, 29: 39-48.
- [25] POLLINO C A, WOODBERRY O, NICHOLSON A, et al. Parameterisation and evaluation of a Bayesian network for use in an ecological risk assessment[J]. Environmental modelling & software, 2007, 22(8): 1140-1152.
- [26] DEY P K. Project risk management using multiple criteria decision-making technique and decision tree analysis: a case study of Indian oil refinery[J]. Production planning & control, 2012, 23(12): 903-921.

## Environmental Risk Assessment and Early Warning of Hazardous Waste Base on Multi-mode Sensor

FANG Wen<sup>1,2</sup>, LIU Zheng<sup>1</sup>, HUANG Yujie<sup>1</sup>, BI Jun<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key Lab of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In order to effectively mitigate the environmental risk of hazardous waste, a refined risk assessment and real-time intelligent warning system is needed. However, the characteristics of hazardous waste are complex and the chain of circulation in the whole process is long, data obtained from single type of sensor cannot provide sufficient information for environmental risk assessment and warning. In this paper, we proposed the concept of using multi-mode sensor to accomplish hazardous waste environmental risk assessment and warning. Through combining the Internet of Things, big data, and artificial intelligence techniques, the hazardous waste basic information, environmental conditions, and information about location and geographic data can be accessed. Then the information obtained from multi-mode sensor should be processed using artificial intelligence methods to make judgments or phenomenon descriptions, thereby supporting environmental risk assessment and warning. According to this concept, we designed two multi-sensor based risk assessment case aiming at warning the risk during hazardous waste storage and illegal dumping.

**Keywords:** hazardous waste; environmental risk; Multi-mode sensor