

企业内部生产单元层级环境风险事故模拟模型

张炜程¹, 杨瑞雯², 刘苗苗^{2*}

(1. 江苏金融租赁股份有限公司, 江苏 南京 210041; 2. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 江苏 南京 210023)

摘要:生产单元是企业内部环境风险防控的最小节点。生产企业内部存在风险节点数量繁多、属性差异大且互相存在联级放大效应等问题,使得企业环境风险一直存在较大的不确定性,给企业环境风险事故源头防控带来很大困难。传统的企业环境风险量化评估方法侧重整体的环境风险评估,精细度不足,缺乏对生产单元间相互影响等复杂情况的考量,评估结果准确性较低,且评估成本高、效率低。针对企业内部生产单元层级事故风险难以厘清的问题,梳理了上万条环境风险重点关注行业的历史环境事故,创新性地构建了考量“群发/链发”情况的事故情景与概率矩阵;考量企业生产单元与风险物质复杂属性、事故情景特性、周边扩散条件、环境风险受体等多维因素,集成设计了一套企业环境风险事故全过程模拟模型。通过从事事故情景构建到事故损害结果分析的全链路自动化模拟,实现对企业生产单元环境风险的量化评估,达到精准识别企业内高风险节点,提升企业风险防控能力的目的;最后,研究通过对比真实历史环境事故调查结果,验证模型模拟具有较高准确性。

关键词:企业环境风险;生产单元;环境风险事故模拟模型;“群发/链发”环境事故

中图分类号:X820.4

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2024)03-0037-06

Simulation Model of Environmental Risk Accidents in Enterprise Production Units

ZHANG Weicheng¹, YANG Ruiwen², Liu Miaomiao^{2*}

(1. *Jiangsu Financial Leasing Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210041, China*; 2. *State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China*)

Abstract: Production unit is the smallest node for enterprise environmental risk prevention and control. Enterprises face numerous risk nodes with diverse attributes and cascading effects, leading to significant uncertainties in environmental risks and posing great challenges to preventing and controlling the sources of environmental risk incidents in enterprises. Traditional methods of quantitative assessment of enterprise environmental risks mainly focus on assessing the overall environmental risks of the enterprise, with insufficient granularity, lack of consideration for the complex accidents resulting from interactions between production units, lower accuracy in assessment results, and high assessment costs and inefficiencies. This study addresses the difficulties in clarifying the hierarchical accident risks within internal production units faced by enterprises in environmental risk prevention and control. By reviewing thousands of environmental risk incidents in key industries of concern, an innovative accident scenario and probability matrix considering scenarios of “mass incidents/chain incidents” is developed. Taking into account multidimensional factors such as the complex attributes of risk substances in enterprise production units, accident scenario characteristics, surrounding diffusion conditions, and environmental risk receptors, a comprehensive simulation model of the entire process of environmental risk incidents in enterprises is designed. This model automates the full chain simulation of environmental incidents in internal production units from scenario construction to accident damage results, which realizes quantitative assessment of environmental risks in enterprise production units, accurately identify high-risk nodes within the enterprise and enhance the capability of enterprise risk prevention and control. Finally, by comparing the results of real historical environmental incidents investigations,

收稿日期:2023-12-16;修订日期:2024-04-11

基金项目:国家自然科学基金重点项目(72234003)

作者简介:张炜程(1993—),男,硕士,从事项目风险评审与保险工作。

* 通讯作者:刘苗苗 E-mail: liumm@nju.edu.cn

the high accuracy of the model simulation is verified.

Key words: Enterprise environmental risk; Production unit; Simulation of environmental risk accidents; Simulation of “multiple occurrences/chain reactions” environmental risk accidents

近年来,在我国经济飞速发展的同时,企业环境风险问题也持续受到关注。虽然国家针对各类环境问题展开了一系列环保行动,但企业数量多,企业内部环境风险节点复杂等多种因素,导致环境风险高位运行态势仍未得到彻底改变。其中,企业环境事故的风险尤其受到关注,以天津港火灾爆炸^[1]、江苏响水爆炸^[2]为代表的突发性环境事故,污水超标排放、场地土壤污染等长期累积性污染事件,都会对周边群众的安全、健康与生活环境造成严重影响,也给社会带来了极大的经济损失。因此,厘清企业环境事故风险,事前发现企业环境风险问题,准确判定应优先管控的风险节点对于企业环境风险管控和预防有重要意义。

在企业内部,生产单元是风险防控的最小节点,包括生产、贮存、运输、装卸、处置等多个环节。企业中各类生产单元的风险节点繁多,并且不同生产单元在环境风险事故发生过程中存在着网络级联和放大效应。多个历史重大、特大环境事故调查结果均显示企业内部的高风险设备、工段等生产单元是事故发生的原因和起点^[1-2]。企业环境风险事故模拟能够量化计算企业环境风险事故的影响,是精细化管控企业环境风险、准确识别风险节点的重要技术手段,也在环境污染责任保险等商业领域有着广泛应用需求^[3]。

然而,传统企业环境事故模拟评估方法^[4]一方面仅考虑单个风险节点的简单事故情景,事故源项分析维度不全,缺乏对复杂事故情景的模拟,对环境风险受体损伤情况分析较少,尤其缺乏定量的货币化损失计算,这都降低了事故模拟分析结果的可参考性,影响了对实际风险管控工作的指导性,对商业领域保险公司来说则面临着未知的经济损失风险。另一方面,现有评估方法在事故情景判定、模拟模型选择上缺乏标准化的判断方法,依赖专业人员人工判定,高昂的人工成本给相关企业造成了经济负担,也阻碍着企业环境风险评估的市场化应用。如何量化模拟企业内部生产单元层级的环境事故影响,快速高效地筛选优先控制的风险节点是国内外研究者面临的一大科学技术难题。构建一套科学、高效、使用门槛低且成本低的企业内

部生产单元层级的环境风险事故模拟模型对企业环境风险的源头防控和相关技术的市场化应用具有重要意义。

针对企业内部生产单元层级环境事故模拟难度大的问题,利用大数据分析、子树堆排序、空间模拟等技术方法,分析了全国上万条历史环境事故和工业企业内部生产单元风险节点的类型;结合国内标准要求与法律规范,构建了涵盖“群发/链发”复杂事故情景的环境事故情景库;耦合了 500 类风险节点,集成了涵盖事故模拟、污染扩散、损害赔偿评估在内的企业生产单元层级事故全过程模拟模型,实现了对企业环境事故全过程快速、准确、精细化的模拟,可以精准、有效地识别企业内高环境风险生产单元,为当前生态环境风险常态化管理^[5]、企业环境污染责任保险落地应用等需求提供了有效工具。

1 企业生产单元层级环境事故模拟模型框架

企业生产单元层级环境事故模拟模型框架见图 1。由图 1 可见,企业生产单元层级环境事故模拟模型是一套从环境风险事故发生到事故影响损害分析的全链路事故模拟模型,包括事故情景判断模型、事故模拟模型 2 个子模型。

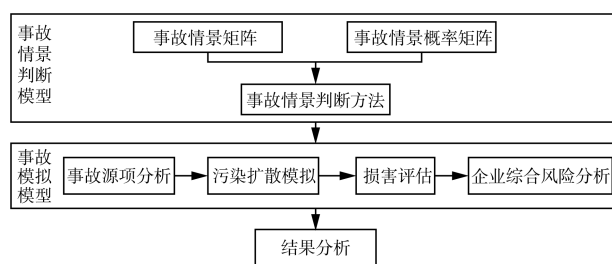


图 1 企业生产单元层级环境事故模拟模型框架

事故情景判断模型根据企业内每个生产单元的特征信息,基于标准化的条件,对企业内生产单元逐一进行事故情景判断,包括单一事故的基础事故情景和涉及多个风险节点的复合事故情景。其中,企业可能发生的所有环境事故情景矩阵,是基于对上万条国内公开环境事故统计分析而形成的,并一同形成事故发生概率矩阵。

事故模拟模型参考国家相关导则、国内外权威文献和技术方法^[5-21]集成形成。对企业内部生产单元从事事故发生源项、污染物在环境介质的扩散、事故造成的损害这一完整的环境事故影响链路进行精细化模拟,最后通过合成处理模拟结果进行企业综合风险分析,形成企业环境风险节点和企业整体环境事故风险的模拟分析结果,识别企业内高风险生产单元,指引企业内部精细化风险管理和防控工作。

2 企业生产单元层级环境事故模拟方法

2.1 事故情景判断

2.1.1 事故情景与概率矩阵构建

事故情景与概率矩阵(SR)包含所有可能发生的事事故情景与对应发生概率,基于对上万例国内历史环境事故文本分析和多部相关国家导则^[5,9]而形成。事故情景矩阵考虑了以企业厂区为代表的固定源、车辆运输为代表的道路移动源和管道运输为代表的管道移动源 3 类事故源,分为基础情景和复合情景 2 类事故情景。基础情景指以生产单元为单位的单一事故情景,情景清单详见图 2;复合情景指由一个企业生产单元的一项基础情景引发另一个关联生产单元发生事故(基础情景)的情况,复合情景关联发生关系详见表 1。须说明的是,考虑到移动源情景中,企业风险节点往往距离较远且关联关系无法预估,因此复合情景仅考虑厂区内生产单元之间互相影响的情况。

以风险节点 n 为例,其事故情景与概率矩阵 SR_n 具体形式如下:

$$SR_n = [sr_1 \quad sr_2 \cdots sr_j] \quad (1)$$

式中: sr_j ——环境风险节点 n 可能发生 j 种事故情景(包含基础和复合 2 类情景)及该情景发生的概率。

2.1.2 事故情景判断模型

对重点污染行业内生产单元类型进行了梳理分析,根据企业生产单元层级环境事故情景判断决策树(图 3)判别其可能发生的所有基础情景,随后再根据复合情景匹配关系、企业内其他生产单元可能发生的事故类型,以及与该生产单元的关联关系判断复合事故情景。事故情景判断根据企业行业类别、生产单元空间位置、风险物质属性等特征实现。

2.2 事故模拟

在明晰企业内部每个生产单元可能发生的环境

事故情景后,须对事故情景可能造成的损害进行定量模拟分析。事故模拟模型对企业内部所有生产单元可能发生的环境事故情景逐一进行事故源项分析、污染扩散模拟、事故损害评估的模拟分析。

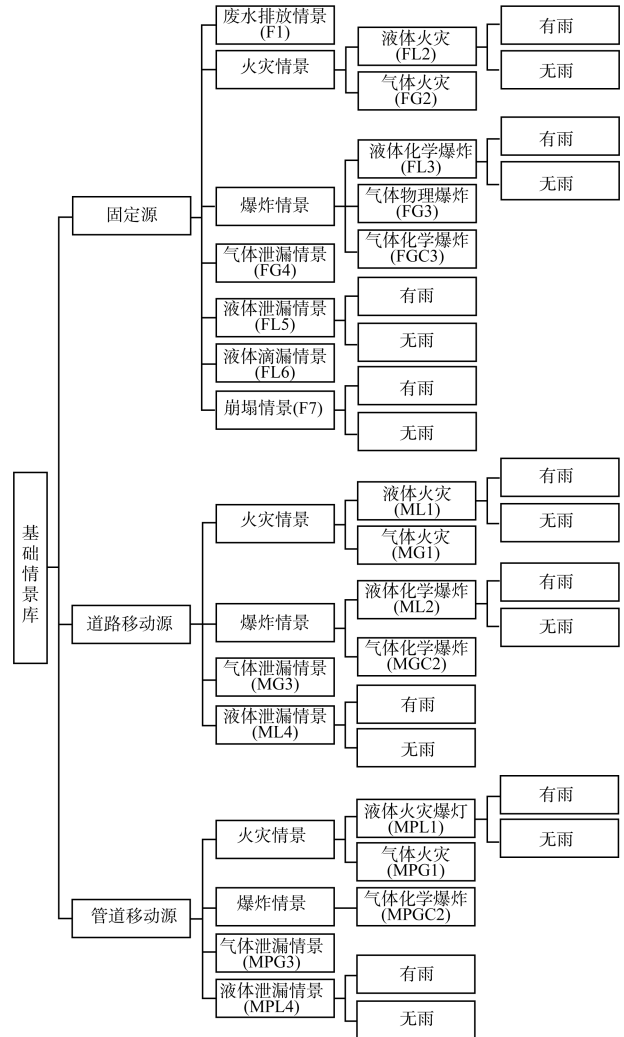


图 2 企业生产单元层级环境事故情景矩阵-基础情景

表 1 企业生产单元层级环境事故情景矩阵-复合情景

复合情景	F1	FL2	FG2	FL3	FG3	FGC3	FG4	FL5	FL6	F7
F1										
FL2		1	1	1	1	1	1	1		
FG2			1	1	1	1	1	1		
FL3				1	1	1	1	1		
FG3					1	1	1	1		
FGC3						1	1	1		
FG4							1			
FL5								1		
FL6									1	
F7										1

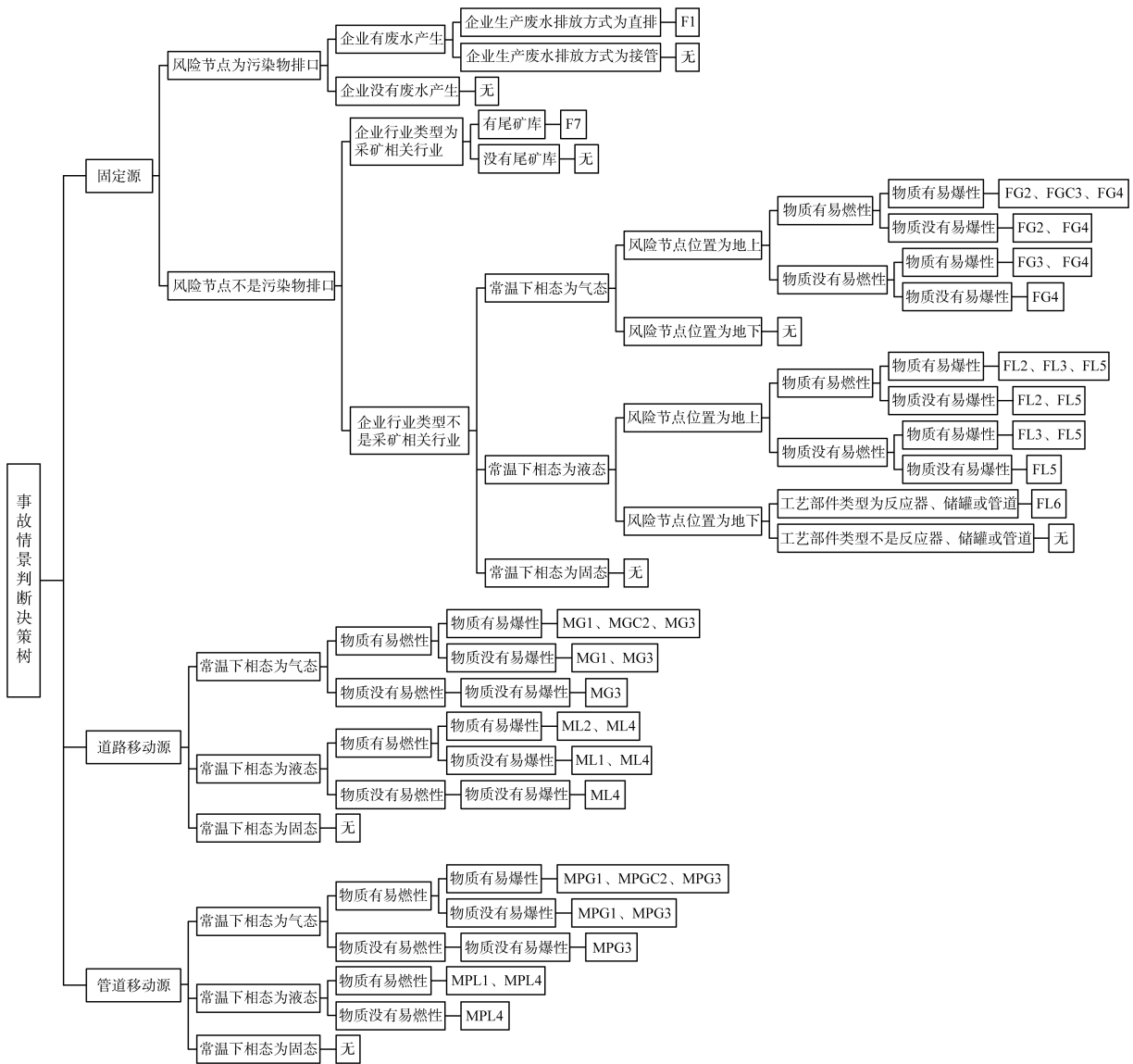


图 3 企业生产单元层级环境事故情景判断决策树

结合国内现行相关导则推荐的方法以及典型学术研究成果^[4-19], 构建了事故模拟模型矩阵(L)。不同事故情景的后果是基于环境风险节点的特征属性, 结合地理空间数据与统计数据计算得到。

2.2.1 事故源项分析模型

结合相关导则与学术研究成果^[5-12]中的源项计算方法与火灾爆炸等事故模拟模型, 对不同事故情景、生产单元类型下的风险物质或污染物泄露量、泄露时长、火球、热辐射、冲击波范围和强度等源项信息的计算模拟模型进行了集成。

2.2.2 污染扩散模拟模型

对于污染物在环境介质中的扩散情况, 梳理分

析了国内外环境事故经验与主流污染物扩散模拟模型^[13-15]的适用性, 考量企业风险特性、风险物质属性与环境受体多样性导致的扩散模拟复杂度高的问题, 选取帕斯奎尔(Pasquill)-吉福特(Gifford)大气污染扩散模拟模型、瞬时一维稳态混合模型等 11 类地表水扩散模拟模型, 土壤一维非饱和和溶质运移模型等 2 类土壤污染扩散模型, 共 14 种模型进行了综合集成, 并建立了“事故情景-扩散模拟模型”选择与匹配逻辑关系, 实现不同事故情景下污染物扩散路径、扩散范围与浓度梯度的模拟计算。

2.2.3 损害评估模型

对于事故对周边环境受体的损害程度, 利用国内外最佳可获取的人群活动模式、敏感区域分布、

土地利用类型与分布、生态系统服务价值分布、事故应急处置费用估值与环境介质清污费用估值等与损害评估有关的数据和方法^[16-21], 考量不同类别事故的突发风险与长期累积性风险。围绕事故情景可能带来的第三者人身损害、第三者财产损失、生态环境损害、应急处置与清污等 4 大类 69 项损害类型(表 2), 如应急处置与清污中的应急处置费用包括人群疏散安置、应急监控、消防、场地清理等 15 种具体损害项目, 参考国内外相关损害、损失价值的计算方法, 构建了货币化企业环境风险事故损害后果评价体系, 得到事故后果算法矩阵(L_n)。以企业内部环境风险节点 n 为例, 形式如下:

$$L_n = \begin{bmatrix} l_{1,1} & l_{1,2} & \cdots & l_{1,n} \\ l_{2,1} & l_{2,2} & \cdots & l_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{69,1} & l_{69,2} & \cdots & l_{69,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

表 2 企业内部环境风险节点事故后果类型

损失大类	损失类型	内含损害项目个数
人身损害	化学物质对人体长期影响造成的第三者人身损害	6
	化学物质对人体造成的突发性第三者人身损害	13
	环境风险事故直接对人体造成的物理性第三者人身损害	4
财产损失	环境风险事故对农田的损害	1
	环境风险事故对林地的损害	1
	环境风险事故对渔业的损害	1
	环境风险事故对建筑物的损害	8
	环境风险事故对物品的损害	3
	环境风险事故对车辆的损害	1
	环境风险事故造成的停工损失	12
生态损失	环境风险事故对生态系统服务价值的损害	1
应急处置与清污	环境风险事故带来的应急处置费用	15
	环境风险事故带来的土壤污染处理费用	1
	环境风险事故带来的土壤污染处理费用	2
合计	14	69

2.3 企业综合风险分析

综合事故情景与概率矩阵(SR)和事故后果算法矩阵(L), 即可得到企业内部某个环境风险节点的事故综合损失矩阵(R)。该矩阵为企业内部一个环境风险节点可能引发的所有事故的概率和对应的损失的乘积, 表征该风险节点的风险期望。以企业内部环境风险节点 n 为例, 其事故综合损失矩

阵 $R_n = r(i, j)$ 的具体形式如下:

$$R_n = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,n} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{14,1} & r_{14,2} & \cdots & r_{14,n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} l_{1,1} \times sr_1 & l_{1,2} \times sr_2 & \cdots & l_{1,n} \times sr_n \\ l_{2,1} \times sr_1 & l_{2,2} \times sr_2 & \cdots & l_{2,n} \times sr_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{69,1} \times sr_1 & l_{69,2} \times sr_2 & \cdots & l_{69,n} \times sr_n \end{bmatrix}$$

式中: i ——事故情景与概率矩阵(SR); j ——事故后果算法矩阵(L)。

将待评估企业中所有环境风险节点的风险属性矩阵(R)计算后得到企业环境风险矩阵(TR), 该矩阵包括待评估企业每个风险节点的风险水平, TR 矩阵中所有风险节点风险期望之和表征该企业的整体事故风险水平, 具体公式如下:

$$TR = [R_1 \quad R_2 \cdots R_n] \quad (4)$$

通过对比排序企业内部每个风险节点的损失矩阵(R), 即可识别企业内部应优先管控的高风险节点。横向对比高风险节点的源项类型、污染扩散途径、损害类型, 可识别其主要风险因素来源, 为企业风险防控提供量化、精准的建议信息。

3 企业生产单元层级环境事故模拟结果验证

选取 2018 年 11 月 3 日河南兰考县鑫宏保温材料较大丙烷爆燃事故^[22], 2018 年 11 月 28 日河北张家口中国化工集团盛华化工公司重大氯乙烯爆燃事故^[23], 2018 年 4 月 9 日甘肃平凉柴油罐车泄漏次生重大突发环境事件^[24] 3 起事故作为对比案例。通过对比真实事故损失结果与模拟损失结果, 验证模型准确性。

验证分为以下 4 步: (1) 在模型事故库中匹配案例事件调查报告描述的事故, 作为验证模拟的事故情景; (2) 提取事件调查报告描述的企业与事故源信息, 包括企业名称、坐标、风险物质、生产单元等; (3) 根据企业和事故源信息作为验证模拟的输入数据, 分别对其进行事故情景的源项模拟、扩散模拟和损害评估; (4) 将模拟结果与真实案例事故调查报告的损害情况对比, 考量包含人身损害、财产损失、生态环境损失等在内的综合经济损失金额。模拟结果与真实事故损失鉴定结果对比见表 3。由表 3 可见, 本模型的事故情景模拟的损失与

真实损失的偏差为 6%~17%, 模拟结果准确性高, 结果具有显著可靠性。须说明的是, 由于本模型的损失结果基于人口等环境受体的网格分布统计数据计算, 真实事件发生时, 人群临时聚集^[25] 等偶然因素可能导致事故损失显著偏离模拟结果, 这是模拟模型无法预测的误差, 因此在选取真实事件样本验证模型时, 去除了极端特殊情况。

表 3 模拟结果与真实事故损失鉴定结果对比

事故名称	事故真实损失/ 万元	模拟损失/ 万元	偏差/ %
河南兰考丙烷爆燃	850.0	901.1	6.01
河北张家口氯乙烯爆燃	4 148.9	4 694.5	13.15
甘肃平凉公路柴油泄漏	601.3	701.6	16.68

4 讨论与总结

通过构建企业内部生产单元层级事故情景与概率矩阵, 集成构建环境事故全链路精细化模拟模型, 实现了对企业内部高环境风险生产单元与风险因素的精准识别分析, 有效解决了企业内部生产单元层级环境事故风险评估的难题, 解决了传统企业环境事故模拟评估考量维度不全、成本高、效率低的问题, 提升了环境事故模拟的准确性和效率。该模型为企业环境风险防控常态化工作提供了一种更好的科学评估模型工具, 具有重要的实际应用价值和推广意义。

通过对比历史真实环境风险事故调查结果的事事故损失情况, 对本研究中模拟模型的准确性进行了验证, 结果显示模拟结果与真实事件事故调查报告显示的损失偏差为 6%~17%, 模拟准确性良好。同时, 研究提出了模拟模型无法预测真实条件下偶发性情况导致损失结果偏离的问题。此随机性误差无法完全避免, 但是可通过接入更新或实时的周边环境数据降低周边风险受体状态变化导致的模拟结果偏差, 这也为本技术未来的发展方向提出了一种可能性, 即通过与管理部的大数据平台合作, 真正意义上实现该技术的自动化运行, 同时最大程度地保障模拟结果的准确性。

[参考文献]

[1] 国务院事故调查组. 天津港“8·12”瑞海公司危险品仓库特别重大火灾爆炸事故调查报告[R/OL]. (2016-02-05) [2023-12-14]. <https://www.gov.cn/foot/2016-02/05/5039>

788/files/460731d8cb4c4488be3bb0c218f8b527.pdf.

- [2] 国务院事故调查组. 江苏响水天嘉宜化工有限公司“3·21”特别重大爆炸事故调查报告[R/OL]. (2019-11-05) [2023-12-14]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/2019tbzdsgcc/201911/P020230911313797857117.pdf>.
- [3] 刘苗苗, 朱天元, 李若琦, 等. 我国推进环境污染责任保险的系统性风险及对策[J]. 中国环境管理, 2020, 12(2): 44-49.
- [4] 生态环境部. 建设项目环境风险评价技术导则: HJ/T 169—2018[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [5] 新华社. 习近平在全国生态环境保护大会上强调: 全面推进美丽中国建设 加快推进人与自然和谐共生的现代化[R/OL]. (2023-07-18) [2024-03-08]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202307/content_6892793.htm.
- [6] 环境保护部. 污染场地风险评估技术导则: HJ 25.3—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [7] 中华人民共和国公安部. 石油天然气工程设计防火规范: GB 50183—2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 消防给水及消火栓系统技术规范: GB 50974—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [9] 国家安全生产监督管理总局. 化工企业定量风险评价导则: AQ/T 3046—2013[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013.
- [10] 傅智敏, 黄金印, 臧娜. 爆炸冲击波伤害破坏作用定量分析[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(6): 390-395.
- [11] AUTHORITY R P. Risk analysis of six potentially hazardous industrial objects in the Rijnmond Area[M]. Springer Netherlands, 1982.
- [12] 环境保护部. 尾矿库环境应急预案编制指南: 环办[2015]48号[EB/OL]. (2015-5-19) [2023-12-14]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201505/t20150525_302245.htm.
- [13] 环境保护部. 环境空气质量标准: GB 3095—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [14] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 地表水环境: HJ 2.3—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2019.
- [15] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 土壤环境(试行): HJ 964—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2019.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市用地分类与规划建设用地标准: GB 50137—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [17] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [18] 中华人民共和国最高人民法院. 最高人民法院关于审理人身损害赔偿案件适用法律若干问题的解释[EB/OL]. (2002-04-24) [2023-12-14]. <https://flk.npc.gov.cn/detail2.html?ZmY4MDgxODE4MWQ4MjNjNTAxODFmZmQxYjM5YjVlNTQ>.
- [19] 中华人民共和国农业部. 农业环境污染事故损失评价技术导则: NY/T 1263—2007[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [20] 环境保护部. 环境损害鉴定评估推荐方法(第 II 版): 环办[2014]90号[EB/OL]. (2014-10-24) [2023-12-14]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201411/t20141105_291159.htm.

(下转第 48 页)