

论著 DOI: 10.16369/j.oh.er.issn.1007-1326.2023.02.016

· 应急管理 ·

基于事故模拟的液氯泄漏急性中毒风险管理和 应急策略研究

Study on risk management and emergency strategy of acute poisoning due to liquid chlorine leakage based on accident simulation

李敏嫣, 王建超, 张倩, 黄德寅

LI Minyan, WANG Jianchao, ZHANG Qian, HUANG Deyin

天津渤海化工集团有限责任公司劳动卫生研究所, 天津 300051

摘要:目的 利用某液氯充装泄漏事故调查报告验证危险气体区域定位软件(areal locations of hazardous atmospheres, ALOHA)模拟结果,并基于扩散模拟和风险评估结果提出应急策略。方法 基于风险评估的四步法,辨识液氯充装过程液氯泄漏的职业病危害因素,基于 ALOHA 软件模拟不同事故场景下室内外的氯气扩散情况,根据毒性水平划分应急疏散区域,选择氯气急性中毒致死的剂量-反应模型,表征不同暴露浓度、暴露时长的个人风险,评估其是否可容许,并根据不同的风险水平进行管理。结果 经验证,根据事故调查报告信息基于 ALOHA 模拟的氯气扩散情况与周边两家公司人员的实际伤亡情况基本相符;换气速率较低的建筑物内氯气浓度远低于室外;235 mg/m³ 氯气暴露低于 10 min,136 mg/m³ 氯气暴露低于 30 min,96 mg/m³ 氯气暴露低于 60 min,均为可容许的风险($< 1 \times 10^{-3}$)。结论 根据风险是否可容许,应采取不同的风险管理对策,对于不可容许的风险,应采取减少化学毒物的生产、使用、储存、运输的措施降低风险。基于 ALOHA 的扩散模拟结果,对厂区、化工园区和周边企业内人员密集场所的设置具有指导意义。发生事故泄漏时,对处于毒气已经扩散到下风向区域内的人员,应该先向垂直风向的方向撤离后再往上风向逃生,不具备呼吸防护条件时,可以关紧门窗在封闭的室内进行躲避并等待救援。

关键词: ALOHA 软件; 化学品泄漏; 事故模拟; 风险评估; 风险管理; 应急策略

中图分类号: R136.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-1326(2023)02-0200-06

引用: 李敏嫣, 王建超, 张倩, 等. 基于事故模拟的液氯泄漏急性中毒风险管理和应急策略研究[J]. 职业卫生与应急救援, 2023, 41(2): 200-205.

针对化学品泄漏事故,美国环保局(Environmental Protection Agency, EPA)推荐用危险气体区域定位软件(areal locations of hazardous atmospheres, ALOHA)模拟化学紧急事件的扩散区域,ALOHA 已广泛用于化学紧急事件的应急计划和响应^[1]。它允许输入真实的或可能的化学物质泄漏信息,生成估计的各种类型的危害区域。ALOHA 可以模拟有毒气体云、可燃气体云、沸腾液体膨胀蒸气爆炸(BLEVES)、喷射火灾、池火灾和蒸气云爆炸。软件中采用的数学模型包括高斯模型和重气模型,适用于事故场景下化学毒物扩散浓度的模拟。

目前 ALOHA 的模拟结果常用于不同场景下事故影响范围的模拟,用于急性中毒应急区域划分以确认安全防护距离,而指导应急疏散和应急救援的

较少。国外虽开展了利用真实事故信息进行模拟的研究^[1],但对其进行验证的案例较少,而现实事故的模拟往往对于事故经验的总结具有重要意义。国内化学品泄漏应急疏散与救援方面的研究和标准主要针对应急预案^[2-3]、个体防护和急性中毒的现场处置^[4-7],基于模拟结果讨论在撤离方向和室内避难适用情景的文章较少。在风险评估技术方面,目前危险化学品生产、储存装置风险评估技术缺少急性中毒致死的定量风险评估和相应的可容许风险的界限,缺少将风险评估结果用于风险管理对策的制定^[8-11]。

本文拟利用某次液氯充装泄漏事故调查报告验证 ALOHA 模拟结果,旨在根据不同的液氯充装泄漏事故场景模拟扩散区域,提出应急疏散和应急救援的指导性建议,提出室内避难的可行性,为厂区及周边人员密集场所的设置和间隔距离提供参考依据;旨在结合定量风险评估结果及其可容许

基金项目:中央引导地方科技发展专项(19ZYPTYS00010)

作者简介:李敏嫣(1986—),女,硕士,高级工程师

通信作者:黄德寅,主任医师, E-mail: huang_deyin@126.com

性,提出风险管理控制措施。

1 对象与方法

1.1 研究对象

2020年8月29日17时28分许,芜湖市某化工有限公司(以下简称“R化工”)液氯工段在对液氯槽车充装液氯过程中,发生氯气泄漏。泄漏部位为液氯充装万向节液相管道连接处,管道的公称直径为50 mm,配套2个流体装卸用紧急脱离装置(拉断阀)。17时28分13秒,液氯充装万向节破裂发生氯气泄漏,并向充装区南面扩散。现场操作人员立即向上风口处疏散。泄漏发生后,现场有毒气体报警仪报警,17时28分45秒,液氯充装远程控制阀成功关闭,同时现场操作人员和驾驶员立即穿戴好正压式空气呼吸器。

17时30分左右,临近R化工厂区的某生物科技有限公司(以下简称“Q公司”)员工发现R化工厂区内有烟雾,立即通知Q公司人员撤离。共计12人受伤并留院治疗。17时38分,临近R化工厂区的另一家企业——某环保能源有限公司(以下简称“L公司”)人员发现泄漏,立即组织人员撤离。共计7人受伤住院治疗。

泄漏事故发生地点位于R化工厂区内的南端。通过地图测距可知,距离Q公司直线距离约为135 m,距离L公司直线距离约为410 m。事故时风向偏西风到西北风,周边两家公司位于下风向或侧风向上,受到泄漏扩散的氯气影响较大。

1.2 研究方法

1.2.1 危害辨识

通过工程分析,辨识可能发生事故的环节和可能发生泄漏造成急性中毒的化学毒物,收集现场调查资料、化学毒物特性的资料、模拟泄漏扩散的参数和信息。其中,化学毒物特性的资料包括:毒理学信息、理化性质、急性中毒评价指标、位置和时间参数、气象和地形参数、事故参数等。

1.2.2 暴露评价

采用ALOHA软件进行化学毒物急性中毒事故的暴露分析,预测空气中化学毒物的浓度。确定泄漏毒气影响区域,并根据急性中毒的判断标准确定相应的应急等级。可使用急性暴露指导水平(acute exposure guideline levels, AEGLs)、紧急响应计划指南(emergency response planning guidelines, ERPGs)、直接有害浓度(immediately dangerous to life or health, IDLH)作为急性中毒指标。

1.2.3 剂量-反应评价

在评价急性中毒事故的风险时,可基于概率变量 Y 计算对应的急性中毒致死概率 P ^[12]:

$$P = 0.5 \times \left[1 + \frac{Y-5}{|Y-5|} \operatorname{erf} \left(\frac{|Y-5|}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (1)$$

式中: P 为急性中毒致死概率; erf 为误差函数; Y 为概率变量,与接触毒物浓度及接触时间的关系见公式(2):

$$Y = A + B \ln(c^n t) \quad (2)$$

式中: A, B, n 均为取决于毒物性质的常数值,不同的毒物有不同的取值,氯气的这3个毒性参数分别为-8.29、0.92、2^[13]。可能导致急性中毒的物质的常见毒性参数可以通过查找美国化工安全工程师中心(Center for Chemical Process Safety, CCPS)、荷兰国家应用科学研究院(Netherlands Organization for Applied Scientific Research, TNO)等出版的相关指南^[13-14]获得; t 为接触毒物的时间(min); c 为毒物体积分数(以百万分之一为单位),其与理想气体质量浓度 c' (mg/m^3)的换算关系见公式(3):

$$c' = \frac{M}{22.4} \times c \times \frac{273}{T} \quad (3)$$

式中: M 为毒物的摩尔质量(g/mol); T 为环境的热力学温度(K)。

1.2.4 风险表征

将不同暴露浓度和暴露时长代入公式(1)和公式(2)的剂量-反应模型,计算急性中毒致死的个人风险。

2 结果

2.1 危害辨识结果

在液氯生产、使用、充装等过程中如果发生泄漏事故,可能发生氯气急性中毒,主要暴露途径为呼吸道吸入。

模拟泄漏事故场景:充装万向节断裂处向外发生20%管径泄漏^[15],假定泄漏主要发生在远程控制阀关闭前的32 s之内,计算泄漏量并按照瞬时泄漏考虑。液氯充装管径50 mm,流速约1.1 m/s,密度约为1370 kg/m^3 。即泄漏量为0.0028 m^3 。

模拟泄漏事故发生时的气象条件:环境温度为31 $^{\circ}\text{C}$,1个标准大气压,风速和湿度取17时、18时的均值,分别为1.3 m/s和61%,风速测量点高度10 m,假定云层覆盖度3,大气稳定度为B,逆温层不存在,城市地表粗糙度。

下风向两家公司人员在泄漏开始后的2~10 min之内开始撤离,基本不存在暴露30~60 min的可能,而ERPG主要考虑暴露60 min情况,故对该次

事故考虑用 AEGL(10 min)模拟应急扩散区域。氯气的常见急性中毒指标[按照公式(3)换算为 31 ℃、1 个标准大气压下氯气的质量浓度]见表 1。

表 1 液氯毒性评价指标^[16-18] (mg/m³)

AEGL-1 (10 min)	AEGL-2 (10 min)	AEGL-3 (10 min)	AEGL-1 (30 min)	AEGL-2 (30 min)	AEGL-3 (30 min)	ERPG -1	ERPG -2	ERPG -3	IDLH
1.4	8.0	142	1.4	8.0	80	2.8	8.5	57	28

表 2 液氯泄漏扩散危害区域模拟结果

模拟泄漏事故场景			下风向最大扩散距离/km									
风速/(m/s)	泄漏时间/min	泄漏蒸发量/kg	ERPG-3	ERPG-2	ERPG-1	AEGL-3 (10 min)	AEGL-2 (10 min)	AEGL-1 (10 min)	AEGL-3 (30 min)	AEGL-2 (30 min)	AEGL-1 (30 min)	IDLH
1	1	178	0.74	1.5	2.3	0.53	1.6	3.0	0.66	1.6	3.0	0.96
	5	890	1.30	2.8	4.1	0.90	2.9	5.2	1.10	2.9	5.2	1.70
	10	1 780	1.60	3.5	5.2	1.00	3.6	6.6	1.40	3.6	6.6	2.20
2	1	178	0.96	1.9	2.8	0.68	1.9	3.5	0.85	1.9	3.5	1.20
	5	890	1.40	3.1	4.7	0.88	3.2	6.0	1.20	3.2	6.0	1.90
	10	1 780	1.40	3.7	5.7	0.88	3.8	7.4	1.20	3.8	7.4	2.10
4	1	178	1.10	2.3	3.4	0.75	2.4	4.3	0.98	2.4	4.3	1.50
	5	890	1.30	3.4	5.5	0.78	3.5	7.2	1.10	3.5	7.2	1.80
	10	1 780	1.30	3.4	6.0	0.78	3.6	8.3	1.10	3.6	8.3	1.80
6	1	178	1.20	2.7	4.0	0.80	2.8	5.2	1.10	2.8	5.2	1.70
	5	890	1.30	3.6	6.2	0.82	3.7	8.4	1.10	3.7	8.4	1.90
	10	1 780	1.30	3.6	6.4	0.82	3.8	9.1	1.10	3.8	9.1	1.90
8	1	178	1.10	2.6	4.0	0.70	2.7	5.2	0.95	2.7	5.2	1.60
	5	890	1.10	3.1	5.5	0.70	3.2	7.7	0.95	3.2	7.7	1.70
	10	1 780	1.10	3.1	5.5	0.70	3.2	7.9	0.95	3.2	7.9	1.70

结合表 2 可以看到, 由于风速影响大气稳定度, 同样的泄漏情况影响的区域范围, 并不是随风速增加而变大。例如泄漏持续 5 min 的 AEGL-3 (10 min) 影响范围在 1 ~ 8 m/s 不同风速下分别为 0.90 km、0.88 km、0.78 km、0.82 km、0.70 km 等。

考虑此次液氯泄漏事故案例为 20%管径破裂的情况, 按照实际泄漏时间 32 s 模拟不同风速(范围在 1 ~ 2.1 m/s)的氯气扩散范围, 模拟结果见表 3。

表 3 液氯泄漏扩散危害区域模拟结果

模拟泄漏事故场景			下风向最大扩散距离/m			
泄漏时间/s	泄漏蒸发量/kg	风速/(m/s)	AEGL-3 (10 min)	AEGL-2 (10 min)	AEGL-1 (10 min)	IDLH
32	3.9	1.0	96	493	912	300
		1.3	143	503	937	302
		2.1	144	588	1 100	334

根据此次液氯泄漏事故信息, 在风速 1.3 m/s 时结合 ALOHA 模拟的与泄漏源距离 135 m 与 410 m 的下风向两点氯气浓度变化情况见图 1。中心位置为泄漏源。

2.2 暴露评价模拟结果

为了研究毒物的扩散范围, ALOHA 考虑的 10 m 高处最小风速为 1 m/s。按照管径最大 100%泄漏估算, 泄漏速率约为 178 kg/min。用 ALOHA 模拟在不同风速下液氯泄漏扩散危害区域的范围(除风速条件外, 其他条件如地形、气象等均采用本事故案例数据)。模拟结果见表 2。

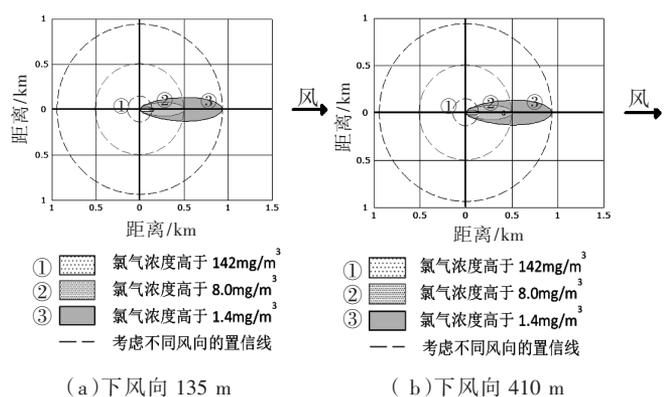
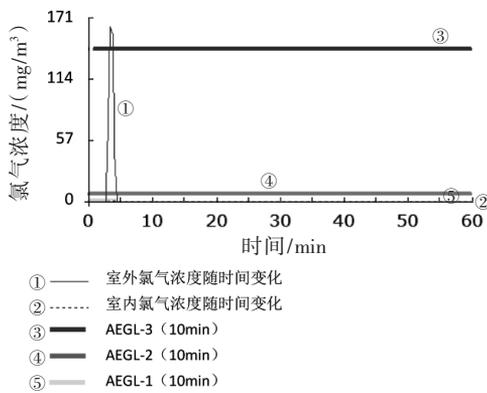


图 1 氯气泄漏危害区域与两家公司所处相对位置

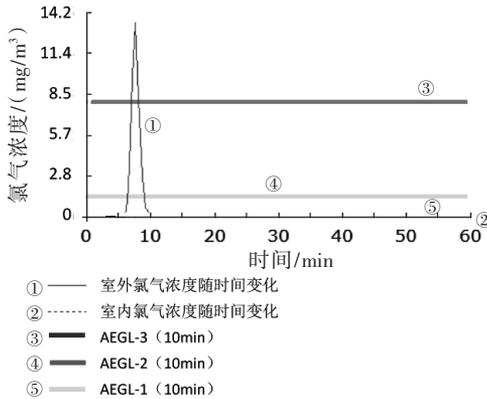
图 1 中①、②、③分别为 AEGL-3 (10 min)、AEGL-2(10 min)、AEGL-1(10 min)的影响区域范围。虚线为风向置信线, 将 95%的时间内预计蒸气云将继续存在的区域包围起来, 风速越低, 风向变化越大, 因此随着风速的减小, 风向置信线变得更远。本事故案例中, 泄漏点处的现场操作人员发现泄漏后立即向上风口处疏散, 加上立即穿戴了呼吸防护用品, 因此避免了伤亡。而从图 2 中可以看出, 当 Q 公司和 R 公司的人员发现有烟雾时, 氯气已经

扩散到了下风向这两家公司,处于该区域内的人员选择疏散路径时不应向毒气浓度更高的上风向疏散,也不应向毒气可能继续扩散的下风向疏散,而应该先向垂直风向的方向撤离后再往上风向逃生。

图2显示了下风向两个点位室内外氯气浓度的变化情况,其中①线为室外浓度,蓝色虚线为室内浓度。室内浓度均由ALOHA按照换气次数0.5次/h估算。③线、④线、⑤线分别为AEGL-3(10 min)、AEGL-2(10 min)、AEGL-1(10 min)。



(a)下风向135 m



(b)下风向410 m处

图2 不同点位室内外氯气浓度变化情况及与AEGL关系

针对本次事故泄漏,下风向135 m处的最大浓度出现在泄漏发生后的3~4 min内,此时间段内室外可以达到AEGL-3(10 min)的浓度,达到AEGL-2(10 min)的浓度约在泄漏发生后的2~5 min内。

下风向410 m处室外的最大浓度出现在泄漏发生后的7~8 min内,此时间段内可以达到AEGL-2(10 min)的浓度。

实际两家公司人员分别在2 min和10 min开始疏散撤离,发生了AEGL-2对应的“不可逆的或其他严重的、长时间的不良健康效应”,与事故实际

情况基本相符。验证了ALOHA模拟的扩散结果基本准确。

图2中下风向135 m处最大室外浓度为162 mg/m³,室内浓度为1.29 mg/m³;下风向410 m处最大室外浓度为13.4 mg/m³,室内浓度为0.167 mg/m³。表4给出了下风向135 m处不同建筑室内换气次数对应的室内最大氯气浓度(室外氯气最大质量浓度162 mg/m³)。可以看出,换气次数越少,室内氯气浓度越低。当不具备向室外疏散的条件时,在室内躲避并减少换气可以在一定时间内保证人员安全。

表4 不同室内换气次数的最大氯气质量浓度

室内换气次数/(次/h)	室内最大氯气质量浓度/(mg/m ³)
0.5	1.29
1	2.56
2	5.03
5	12.1
10	22.3

2.3 风险表征结果

计算不同氯气暴露浓度、不同暴露时长的急性中毒致死概率,即为急性中毒致死的个人风险,见表5。

表5 不同氯气暴露情况下急性中毒致死的个人风险

暴露时间	体积分数(25℃,1个标准大气压) ^①	质量浓度/(mg/m ³)	概率变量Y	个人风险(致死概率)
10 min	25	72	-0.25	7.65 × 10 ⁻⁸
	50	145	1.03	3.54 × 10 ⁻⁵
	75	217	1.77	6.25 × 10 ⁻⁴
	81 ^②	235	1.91	1.00 × 10 ⁻³
	100	290	2.30	3.49 × 10 ⁻³ ③
30 min	25	72	0.76	1.13 × 10 ⁻⁵
	47 ^②	136	1.92	1.00 × 10 ⁻³
	50	145	2.04	1.52 × 10 ⁻³ ③
	75	217	2.78	1.33 × 10 ⁻² ③
	100	290	3.31	4.58 × 10 ⁻² ③
60 min	25	72	1.40	1.59 × 10 ⁻⁴
	33 ^②	96	1.91	1.00 × 10 ⁻³
	50	145	2.67	1.00 × 10 ⁻² ③
	75	217	3.42	5.72 × 10 ⁻² ③
	100	290	3.95	1.47 × 10 ⁻¹ ③

注:① 体积分数以百万分之一为单位;② 为对应1 × 10⁻³可容许风险倒推的氯气浓度;③与1.00 × 10⁻³比较,属于不可容许的风险。

将化学毒物急性中毒事故致死的可容许个人风险水平设为1.00 × 10⁻³,结合表5可以看出,在235 mg/m³浓度下氯气暴露低于10 min,136 mg/m³浓度氯气暴露低于30 min,96 mg/m³浓度氯气暴露低于60 min,均为可容许的风险。

如果事故无法在短时间内控制,现场氯气浓度很高或人员无法及时疏散撤离,存在长时间高暴露的可能(例如,暴露于表5中 235 mg/m^3 浓度的氯气10 min以上),则风险即为不可容许的。

3 讨论

3.1 风险管理对策

事故模拟方法可以预测不同条件下毒物泄漏影响的范围,对泄漏点周围进行区域划分。结合定量风险分析,本研究可以预测在不同区域的不同氯气浓度下,暴露一定时间的急性中毒致死风险。通过模拟可以看出,风险的大小与毒气性质、泄漏点的方位和距离、泄漏量、气象条件、暴露时间和具备的防护条件等因素有关。

针对不同的急性中毒事故风险水平,可以选择采取不同的风险管理对策:

1) 生产工艺尽可能用先进代替落后,物料尽可能用无毒代替有毒,用低毒代替高毒,从根本上消除或降低风险;

2) 从模拟结果也可以看出,R化工的其他人员未受到泄漏事故的影响,而下风向另两家公司均有人员受伤的情况,因此厂区内各功能区和周边企业布局应考虑与高风险点位的方位和距离,尽量将非生产区域设置在当地全年最小频率风向的下风侧。ALOHA的模拟结果对于厂区、化工园区和周边企业内人员密集场所的设置等具有指导意义。

3) 如果急性中毒事故致死的风险是不可容许的风险,用人单位应采取减少化学毒物的生产/使用/储存/运输量的措施来降低风险,也就是控制可能的最大泄漏量。

4) 如果急性中毒事故致死的风险是可容许的风险,用人单位应从控制泄漏量、暴露时间和具备的防护条件等角度采取综合措施,尽可能地控制并降低风险。包括工程控制措施,提高密闭化、自动化程度,减少毒物泄漏的可能性和减少劳动者接触的机会;通过减少紧急切断和连锁反应的时间来控制泄漏量。在此基础上,通过迅速响应和合理制定疏散路径进一步控制人员的暴露时间,优化应急防护条件,这些往往需要提前制定好应急疏散和应急准备的策略,并加强演练。

3.2 应急策略

化学物质泄漏事故的应急疏散策略应包括:

1) 依据可能发生的事故场景,模拟不同毒物、不同事故规模和场景下的扩散情况;以AEGL-2或ERPG-2对应的阈值为基准,根据毒性水平划分疏

散区域;针对不同区域内的人员,分别制定相应的疏散方案和紧急医疗救治方案。

2) 以IDLH对应的阈值为基准,确定相应的呼吸防护区域范围。按GB/T 18664等标准规范的规定,参照超过IDLH浓度的范围,为在此区域内的劳动者选择合适的辅助逃生型呼吸防护用品,为进入此区域的应急人员、抢修人员等配备合适的呼吸防护用品。

3) 在可能发生化学品泄漏导致急性中毒的装置内设置风向标,并注意IDLH浓度范围内的周边企业、公路设施等至少也应有可以观察的风向标。对周边单位的人员开展联合应急演练,相邻或相近企业之间有应急通信和联系方式,确保能够接收到事故报警信息,确保配备足够的逃生防护用品并能够正确使用,在事故时安全撤离。

4) 泄漏发生现场的人员除采取相应措施外,应该向上风向撤离。上风向逃生的原则最适用于无风天气和位于上风方向的逃生者,也可以运用于处于侧风方向的逃生者。而对于毒气已经扩散到的下风向区域内的人员应该先向垂直风向的方向撤离后,再向上风向逃生。

5) 在针对本次案例的事故模拟分析中得知,事故发生后如果没有配备逃生用的呼吸防护用品,但能够即时收到警报,确认了泄漏量不大且已得到控制的情况下,可以选择立即撤离所处建筑设施。但当室外浓度已经达到不宜逃生的浓度时,由于室内的氯气浓度远低于室外,可以关闭建筑物通风设施和门窗,必要时用胶布封闭缝隙^[14],并在室内等待,直到室外氯气浓度低于AEGL-2或有救援时再离开。由此也可以看出,应急通信设备和及时共享信息在应急疏散中的重要性。

综合以上结论,化工园区预防急性中毒的风险管理应以风险评估结果作为基础,应急管理应以事故模拟作为基础。事故发生前,模拟并划分应急区域,设置安全防护距离,针对各区域做好应急预案和演练,配备相应级别的应急物资。事故发生后,尽可能详细地收集事故信息,形成事故报告,现实事故的模拟对于事故经验的总结具有重要意义,有利于对照自查和持续改进。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

- [1] JONES R W, LEHR D, SIMECEK-BEATTY, et al. ALOHA[®] (Areal locations of hazardous atmospheres) 5.4.4 technical

- documentation [M]. Seattle, Washington: Emergency Response Division, NOAA, 2013.
- [2] 中华人民共和国卫生部. 卫生部关于印发《卫生部突发中毒事件卫生应急预案》的通知[A/OL]. (2011-05-12)[2022-07-07]. http://www.gov.cn/gzdt/2011-05/20/content_1867813.htm.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则:GB/T 29639—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 呼吸防护用品的选择、使用与维护:GB/T 18664—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [5] 中华人民共和国卫生部. 卫生部办公厅关于印发突发中毒事件卫生应急处置技术方案的通知:卫办应急发〔2011〕94号[A]. 2011-07-07.
- [6] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 突发中毒事件卫生应急处置技术规范 总则:WS/T 679—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [7] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 突发中毒事件卫生应急处置人员防护导则:WS/T 680—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [8] 葛及, 郭迪. 基于风险矩阵法的化工企业综合安全评价模型及其应用[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5):21-24.
- [9] 胡馨升. 化工园区事故风险评估方法及应用研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2018.
- [10] 张艳辉, 陈晓春. 改进的 HAZOP 风险评价方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(7):174-178.
- [11] 周洋. 化工企业储罐系统风险评估模型研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- [12] 克劳尔(CROWL D A), 卢瓦尔(LOUVAR J F). 化工过程安全理论及应用(原著第2版)[M]. 蒋军成, 译. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [13] Center for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for consequence analysis of chemical releases [M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1999.
- [14] TNO. Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials (the Green Book) [M]. Voorburg, The Netherlands: The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, 1992.
- [15] 刘茂. 事故风险分析理论与方法 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [16] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Final AEGLs (188) [DB/OL]. (2012-06-27) [2022-07-07]. <https://www.epa.gov/aegl/access-acute-exposure-guideline-levels-aegls-values#chemicals>.
- [17] AIHA (r) Guideline Foundation. 2016 ERPG/WEEL handbook [M]. Fairfax, VA: American Industrial Hygiene Association Press, 2016.
- [18] Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Chemical listing and documentation of revised IDLH values [EB/OL]. (2019-10-08) [2022-07-07]. <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html>.

收稿日期:2022-07-15

(上接第199页)

- [6] 王玉伟, 高永. 基于综合赋权法的无人机飞行质量综合评价方法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(5):1-4.
- [7] 舒正平, 周盛华. 装备维修保障效能评估指标权重组合赋权法的研究[J]. 兵工自动化, 2010, 29(12):9-11.
- [8] JOSE C, GRACE K S V. A new approach for accurate path prediction using multiple prediction system [J]. Mater Today: Proc, 2020, 24(Pt 3):1749-1757.
- [9] 刘欣. 基于多指标的网络节点重要性综合评价研究 [D]. 上海:上海大学, 2019.
- [10] 曾照凯, 朱东升, 郭潇迪, 等. 基于 TOPSIS 法的烟幕对空防御方向策略选择[J]. 兵工自动化, 2019, 38(4):49-52.
- [11] 侯汉平, 耿劭卿. 基于混合决策的城市固定避难所选址优化 [J/OL]. 安全与环境学报:1-13. [2022-12-21]. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1824.
- [12] 侯克鹏, 王黎蝶. 基于改进的 FAHP-CRITIC 法与云理论的露天矿边坡危险性评估模型 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6):2443-2451.
- [13] MELUCCI M. Weighted rank correlation in information retrieval evaluation[J]. Lect Notes Comput Sci, 2009, 5839:75-86.
- [14] HWAN C L, YOON K P. Multiple attribute decision making methods and applications a state-of-the-art survey [M]. Belin, New York: Springer-Verlag, 1981.
- [15] OPRICOVIC S, TZENG G H. Extended VIKOR method in comparison without ranking methods [J]. Eur J Oper Res, 2007, 178(2):514-529.
- [16] KAMNITUI N, GENEST C, JAWORSKI P, et al. On the size of the class of bivariate extreme-value copulas with a fixed value of Spearman's rho or Kendall's tau [J]. J Math Anal Appl, 2019, 472(1):920-936.
- [17] 邱学军. 城市防空空中需掩护目标的重要性层次分析[J]. 现代防御技术, 2002(1):6-10.
- [18] 刘朋, 刘建林, 冯硕. 城市反空袭作战中对次生化危害的防护初探 [C]//中国化学会. 第三届全国“公共安全领域中的化学问题”学术研讨会论文集:公共安全中的化学问题研究进展(第二卷). 蓬莱:中国化学会, 2011:369-372.
- [19] 王洪德, 廖倩雯. 天然气瞬时泄漏扩散规律及其影响因素研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(2):51-55.

收稿日期:2022-08-26