

卜梦雅,费波,张钢锋.基于模糊层次分析法的VOCs泄漏检测与修复效果评估体系研究[J].环境工程技术学报,2023,13(1):135-142.

BU M Y,FEI B,ZHANG G F.Research on the evaluation system of VOCs leak detection and repair effect based on fuzzy analytic hierarchy process[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 135-142.

基于模糊层次分析法的VOCs泄漏检测与修复效果评估体系研究

卜梦雅,费波,张钢锋*

上海市环境科学研究院

摘要 基于模糊层次分析法(FAHP),从国内现有泄漏检测与修复(LDAR)相关标准和技术指南中筛选出项目建立、现场检测、泄漏修复与复测、台账管理4个层面14项评估指标,构建LDAR实施效果评估的层次结构模型,通过对专家、企业、第三方服务商3类群体代表发放30余份问卷调查,进而计算指标权重,以解决国家日益重视挥发性有机物(VOCs)管控形势下,如何科学评估LDAR实施质量的难题。结果显示,LDAR实施效果评估中一级指标排序依次为泄漏修复与复测(0.305)、项目建立(0.281)、现场检测(0.245)和台账管理(0.169),14项二级指标权重排序中泄漏修复及时性权重最高、免于检测合规性权重最低。研究在权重值的基础上建立一套系统的LDAR实施效果评估体系,并将其应用于制药、塑料制品、合成树脂、涂料油墨制造的10家企业,得出制药行业整体实施效果偏好,合成树脂与涂料油墨行业实施水平相当,塑料制品企业在落实LDAR工作的合规性略低。

关键词 VOCs;泄漏检测与修复(LDAR);模糊层次分析法(FAHP);效果评估

中图分类号: X511 **文章编号:** 1674-991X(2023)01-0135-08 **doi:** 10.12153/j.issn.1674-991X.20210525

Research on the evaluation system of VOCs leak detection and repair effect based on fuzzy analytic hierarchy process

BU Mengya, FEI Bo, ZHANG Gangfeng*

Shanghai Academy of Environmental Sciences

Abstract Based on the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), 14 evaluation indicators in four levels, including project establishment, on-site inspection, leak repair and retesting, and account management, were selected from the existing LDAR-related standards and technical guidelines in China, and a hierarchical structure model for LDAR implementation effect evaluation was constructed. By distributing more than 30 questionnaires to representatives of 3 types of groups: experts, enterprises, and third-party service providers, and then calculating the index weights, in order to solve the problem of how to scientifically assess the quality of LDAR implementation under the situation that the country pays more attention to the control of volatile organic compounds (VOCs). The results showed that the primary indicators in the assessment of LDAR implementation effectiveness were leak repair and retesting (0.305), project establishment (0.281), site inspection (0.245) and account management (0.169), and the 14 secondary indicators were ranked with the highest weight of leak repair timeliness and the lowest weight of compliance with exemption from inspection. The study established a systematic LDAR implementation effect assessment system based on the weight values and applied it to 10 enterprises in pharmaceutical, plastic products, synthetic resin and coating ink manufacturing, and concluded that the overall implementation effect of the pharmaceutical industry is preferred, the synthetic resin and coating ink industries have comparable implementation levels, and the compliance of plastic products enterprises in implementing LDAR work is slightly lower.

Key words VOCs; leak detection and repair (LDAR); fuzzy analytic hierarchy process (FAHP); effect evaluation

收稿日期:2021-09-21

基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目(19DZ1205000, 20DZ1204000)

作者简介:卜梦雅(1994—),女,硕士,主要从事工业废气治理及绿色发展研究,bumengya@163.com

* 责任作者:张钢锋(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事大气污染控制政策及技术研究,gf.zh@foxmail.com

目前我国大气环境面临细颗粒物(PM_{2.5})污染形势依然严峻和臭氧(O₃)污染日益突显的双重压力。特别是在夏季, O₃已成为部分城市空气质量超标的首要因子^[1-3]。研究表明, 大气中的 VOCs 在紫外光照射条件下可与氮氧化物(NO_x)发生光化学反应, 是形成 O₃ 和 PM_{2.5} 的关键前体物^[4]。随着我国大气环境精细化管理水平的不断提高, VOCs 污染防治工作引起广泛关注^[5], 抓好 VOCs 治理已成为现阶段我国打赢蓝天保卫战的重要举措^[6]。

泄漏检测与修复(leak detection and repair, LDAR)是工业企业 VOCs 无组织管控的有力抓手^[7], 也是实现 VOCs 治理精细化的重要手段。它通过对设备组件泄漏浓度实施定量检测, 发现泄漏点并及时进行修复, 从而达到减少 VOCs 泄漏排放的目的^[8]。自“十二五”以来, 我国出台的众多政策文件和标准规范已对 LDAR 实施提出了明确要求, 各地也陆续开展了相关工作。当前国内的 LDAR 实施情况与美国 1990 年十分类似, 美国国家环境保护局(US EPA)在 1978 年颁布了第一部涉及 LDAR 的管理文件《石油精炼设备挥发性有机化合物泄漏控制》^[9], 但在有限的执法条件下, 低成本的 LDAR 检测使得实施水平参差不齐, 因此在 90 年代中期 US EPA 提出对石油化工行业进行效果审核, 并且与多家公司签署具有法律约束力的同意判决书(Consent Decree)^[10], 其中包含执法规定、民事罚款和增强 LDAR 计划等^[11], 要求企业定期进行第三方 LDAR 审核。目前国内 LDAR 实施中也面临类似的挑战, 因此开展严格的 LDAR 实施效果评估极为必要。

国内学者通过对实际案例共性问题的归纳分析得出, 目前国内 LDAR 实施中存在以下问题: 1) 在 LDAR 核查评估中建档存在本质错误、定位错误、其他类型错误, 包括计件数量缺失、计件标识不一、可达不可达属性不明等问题^[12]; 2) 在 LDAR 现场检测时存在未正确校验或漂移、标气浓度不符合规定或校验气超期、未按标准规范要求进行检测操作等错误^[13]; 3) 经泄漏识别后未能及时修复泄漏密封点, 或缺乏实质性修复措施直接列为延迟修复等情况^[14]。

合规有效地开展 LDAR 是实现工艺设备与管线组件泄漏环节 VOCs 减排的关键, 也是避免 LDAR 工作流于形式的重要途径。总体上, 我国的 LDAR 工作尚处于起步阶段^[15], 加之国内缺乏配套的 LDAR 效果跟踪评估制度与技术^[16], 导致当前 LDAR 实施乱象丛生、问题突出, 因此亟需建立一套科学实用的 LDAR 实施效果评估体系。笔者通过对我国 LDAR 领域标准规范内容要点的详细梳理, 采用模糊层次

分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)构建了 LDAR 实施效果层次结构模型, 形成了 LDAR 实施效果评估体系, 以期为企业相关自查及政府核查工作提供技术参考。

1 研究方法及指标筛选

1.1 模糊层次分析法

FAHP^[17-18]是将模糊理论(fuzzy theory)与层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)结合, 用于解决层次分析法中存在的主观性强和科学性弱等问题, 通过引入模糊数来构造模糊判断矩阵^[19], 将定量指标与定性分析有机结合, 间接削弱专家评分中的主观因素对评估指标的影响, 从而客观有效地提高评估结果的科学性与真实性^[20]。

FAHP 以往多应用于工程方案选定^[21-22]、风险评估^[23-24]等领域, 随着环保理念逐渐深入人心, 其在环境领域的运用也随之增多, 如燃煤电厂脱硫废水处理可利用技术评价^[25]、黄河三角洲生态脆弱性评价^[26]、高校室内空气质量评价^[27]等。

建立 FAHP 模型首先要确定评估对象, 即指标; 再通过选择指标的主要影响要素如合规性、有效性等, 构建评估指标体系模型以计算权重。权重的计算通过发放专家问卷获取各指标两两相对重要性的赋值结果, 以建立三角模糊对比矩阵, 即模糊判断矩阵。该矩阵满足一致性检验后方为有效数据, 再运用 MATLAB 编程手段计算出层次权重排序和指标权重。

1.2 指标筛选

结合当前 LDAR 实施的政策要求及工作特点, 本研究中 FAHP 模型指标筛选时重点考虑以下原则: 1) 遵循国家 LDAR 标准法规要求; 2) 涵盖 LDAR 实施工作全流程; 3) 便于评估工作高效开展。

梳理了截至目前生态环境部已出台的对 LDAR 工作提出相关要求的标准及规范性文件(表 1), 在此基础上结合 LDAR 操作流程, 即项目建立、现场检测、泄漏修复与复测、台账管理 4 个环节, 对照标准法规中设备泄漏排放控制要求, 评估相应企业实施 LDAR 的合规性, 通过设计评分表来量化实施效果。

共筛选了 14 项评估指标, 其中项目建立环节包含实施范围完整性、密封点分类正确性、密封点标识合理性、不可达点占比合理性 4 项指标; 现场检测环节包含检测仪器合规性、仪器调试合规性、检测操作合规性、泄漏标识合规性、免于检测合规性 5 项指标; 泄漏修复与复测环节包含泄漏修复及时性、延迟修复合规性、复测合规性 3 项指标; 台账管

表 1 国家已发布的 LDAR 相关标准/规范文件

Table 1 LDAR related standard/regulation documents issued by the country

序号	标准/规范名称	标准号/文号	发布时间	摘要
1	农药制造工业大气污染物排放标准	GB 39727	2020-12-08	规定了农药行业设备与管线组件 VOCs 泄漏控制要求
2	挥发性有机物无组织排放控制标准	GB 37822	2019-05-29	规定了设备与管线组件VOCs泄漏控制要求
3	制药工业大气污染物排放标准	GB 37823	2019-05-29	按照GB 37822执行
4	涂料、油墨及胶粘剂工业大气污染物排放标准	GB 37824	2019-05-29	按照GB 37822执行
5	石油炼制工业污染物排放标准	GB 31570	2015-04-16	规定了石化行业设备与管线组件泄漏污染控制要求
6	石油化学工业污染物排放标准	GB 31571	2015-04-16	同GB 31570要求
7	合成树脂工业污染物排放标准	GB 31572	2015-04-16	同GB 31570要求
8	泄漏和敞开液面排放的挥发性有机物检测技术导则	HJ 733	2014-12-31	规定了设备泄漏源排放的挥发性有机物的检测方法、仪器设备要求等
9	石化企业泄漏检测与修复工作指南	环办〔2015〕104号	2015-11-17	规定了受控设备、密封点挥发性有机物泄漏检测与修复的项目建立、现场检测、泄漏维修以及质量保证与控制等技术要求

理环节包含报告内容完整性、台账记录合规性 2 项指标。

针对企业实际开展 LDAR 过程中存在的泄漏率较高、未按规定要求开展等问题,结合 GB 37822 首次提出的“应做未做”“不符合规定做”和“抽测泄漏率超 2%”3 种典型违法行为,将其作为 LDAR 实施效果判定预评估的一票否决。即在对企业进行评估时,优先考虑以上 3 项内容是否满足要求,若违反其中任意一项,则可直接判定为不合规,评估终止。具体的一票否决内容见表 2。

针对 14 项指标构建了 LDAR 实施效果评估的层次结构模型(图 1)。模型主要分为 3 个层次:目标层 A,是模型的最终决策目标,即 LDAR 实施效果评估体系;准则层 B,是该模型指标要素的分类依据的一级指标,即 LDAR 实施过程的 4 个层面,包括项目建立、现场检测、泄漏修复与复测、台账管理;指标层 C,模型中对 LDAR 实施效果进行评估的具体指标,是该模型指标要素的二级指标。

1.3 一致性检验

依据 FAHP 模型的指标要素发放调查问卷,得出每一层级内两两指标之间的相对重要性,以构建模糊判断矩阵。同时为避免各指标间相对重要性结果出现前后逻辑不一致的情况,需要对模糊判断矩阵进行一致性检验。依照 Buckley^[28] 的假设,采用一致性比率(CR)是否小于 0.1 作为判别数据是否有效的方法。当 CR<0.1 时,表示矩阵一致性程度可以接

表 2 LDAR 评估中的一票否决项

Table 2 Vetoes in LDAR assessment

编号	评估内容	评估方法	判断结果
1	企业涉 VOCs 物料的密封点数量超过 2000 个(含),是否开展 LDAR 工作	资料审核	是 否
2	是否按规定的频次、时间开展 LDAR 工作	资料审核	是 否
3	现场随机抽查时,在检测不超过 100 个密封点的情况下,是否未发现有 2 个以上(不含)不在修复期内的密封点出现可见泄漏现象或超过泄漏认定浓度	现场抽测	是 否

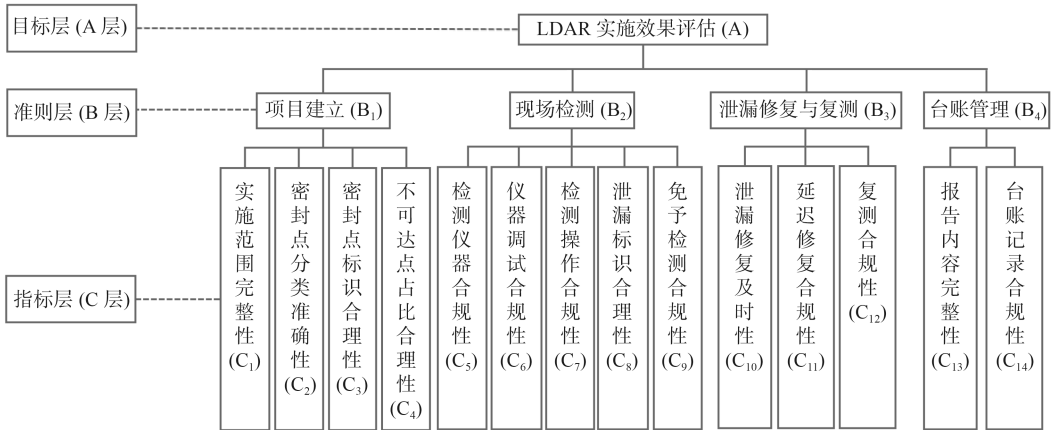


图 1 LDAR 实施效果评估指标体系

Fig.1 Indicator system for LDAR implementation effectiveness evaluation

受, 否则需重新进行指标重要性比较。

一致性比率检验的计算公式为:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

式中: n 为模糊判断矩阵的阶数; $\lambda_{\max}$ 为最大特征值; CI 为一致性指标; RI 为平均随机一致性指标。本研究 FAHP 模型的模糊判断矩阵 CR 均小于 0.1, 具有相对满意的一致性。

2 结果与讨论

2.1 FAHP 模型计算结果

对国内目前 LDAR 工作开展经验较丰富的上海、广东、江苏、浙江等省(市)开展问卷调查, 涉及具有 LDAR 专业背景的行业专家代表、企业代表及

第三方服务商代表 3 类群体, 共发放 37 份问卷, 收回有效问卷 33 份。针对 33 份有效问卷归类并进行 FAHP 建模分析, 其中专家群体、企业群体、第三方服务商群体有效问卷分别为 12、10 和 11 份, 不同群体中 4 项一级指标权重分析结果见图 2, 其中总群体的权重是基于 3 类群体权重的算数平均数, 14 项二级指标权重分析结果见表 3。

2.2 权重结果讨论

2.2.1 不同群体的权重分析

针对不同群体进行 FAHP 建模分析, 可全面评估 LDAR 实施管理中不同群体的关注重点, 以保障在进行 LDAR 评估制度设计时充分考虑各利益群体诉求。从 FAHP 建模结果来看, 各群体对准则层要素权重分摊差异较大。

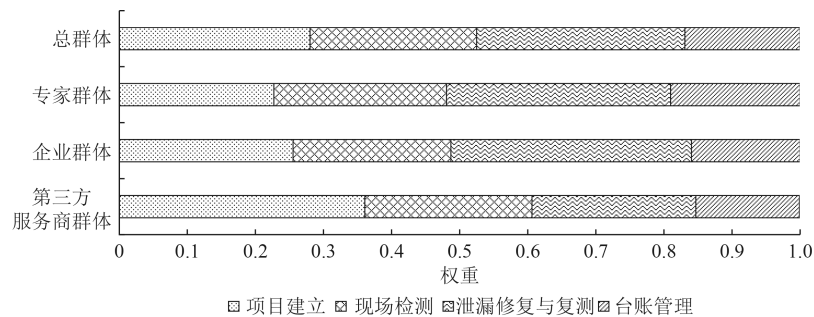


图 2 不同群体 FAHP 建模一级指标权重结果

Fig.2 Result of primary indicator weights in FAHP modelling of different groups

表 3 不同群体 FAHP 建模二级指标权重及排序

Table 3 Weight and ranking of secondary indicator in FAHP modelling of different groups

二级指标	专家群体		企业群体		第三方服务商群体		总群体	
	权重	排序	权重	排序	权重	排序	权重	排序
实施范围完整性(C_1)	0.067	7	0.079	6	0.128	1	0.090	3
密封点分类正确性(C_2)	0.064	8	0.069	7	0.105	3	0.079	6
密封点标识合理性(C_3)	0.054	10	0.057	9	0.074	5	0.062	8
不可达点占比合理性(C_4)	0.042	12	0.051	12	0.054	10	0.050	12
检测仪器合规性(C_5)	0.052	11	0.055	10	0.051	11	0.053	11
仪器调试合规性(C_6)	0.059	9	0.057	8	0.051	12	0.056	10
检测操作合规性(C_7)	0.070	6	0.052	11	0.066	7	0.062	9
泄漏标识合规性(C_8)	0.039	13	0.035	13	0.044	13	0.040	13
免于检测合规性(C_9)	0.033	14	0.033	14	0.034	14	0.034	14
泄漏修复及时性(C_{10})	0.161	1	0.161	1	0.106	2	0.140	1
延迟修复合规性(C_{11})	0.095	4	0.095	4	0.068	6	0.082	5
复测合规性(C_{12})	0.097	3	0.097	3	0.066	8	0.083	4
报告内容完整性(C_{13})	0.092	5	0.092	5	0.059	9	0.077	7
台账记录合规性(C_{14})	0.098	2	0.098	2	0.093	4	0.092	2

(1)总群体中, 准则层指标按权重大小排序依次为泄漏修复与复测、项目建立、现场检测、台账管理。指标层权重前 3 为泄漏修复及时性、台账记录合规性、实施范围完整性, 涉及 LDAR 工作不同环节, 也充分反映了目前核查 LDAR 实施效果时需关注是否进行有效修复, 是否进行数据记录, 是否均纳入检测范围的基本思路。(2)专家群体中, 准则层指标按权重大小排序依次为泄漏修复与复测、现场检测、项目建立、台账管理。可以看出, 专家群体更多关注的是企业在发现泄漏时是否及时进行实质性修复、现场操作过程中是否尽可能地检测到泄漏源等, 这与开展 LDAR 以减少物料损耗, 降低 VOCs 排放的工作目标相吻合。(3)企业群体中, 准则层指标权重大小排序与总群体保持一致, 同时与专家群体关注的指标相似度较高, 不同之处是企业群体认为项目建立的重要性要略高于检测。目前企业开展 LDAR 常以外包第三方服务商实施的模式为主, 但修复工作的实施主体为企业, 因此对于企业群体来说, 更多关注密封点泄漏修复与项目建立工作的实施质量。(4)第三方服务商群体中, 准则层指标按权重大小排序依次为项目建立、现场检测、泄漏修复与复测、台账管理。可以看出, 第三方服务商对所提

供的建档与检测的服务关注颇多,对主要由企业实施完成的修复工作关注甚少,这与企业关注的角度有所差异,说明第三方服务商较局限于完成合同任务要求,对 LDAR 有效实施后带来的 VOCs 减排重视度不高。

2.2.2 不同指标的权重分析

实施效果评估体系的一级指标是从 LDAR 工作流程的 4 个环节着手,这与丁德武等^[29]提出的 LDAR 核查量化评估流程基本一致,与之不同的是本研究将 GB 37822 中规定的 3 种违法行为作为预评估项目,以避免企业触及环保红线,同时为管理部门精准执法、科学执法提供目标导向与理论依据。

针对二级指标中的权重结果分析,每项层级中指标权重最大的为项目建立层中的实施范围完整性、现场检测层中的检测操作合规性、泄漏修复与复测层中的泄漏修复及时性和台账管理层中的台账记录完整性。这与郑幸成等^[30]构建的指标体系中的权重排序较一致,不同在于郑幸成等计算出的现场检测环节中操作人员检测合规性权重低于仪器校准与漂移程度,而本研究认为检测操作合规权重略大于仪器调试合规。

14 项二级指标中免于检测合规性的权重最小,该结果充分凸显了目前设备泄漏排放控制中对忽视

密封设备源头削减 VOCs 泄漏的基本现状。当前开展 LDAR 的最终目标及评估实施效果的首要指标是重视修复工作,但同时也应挖掘采用符合豁免条件的低泄漏、高效密封设备等源头控制措施,加大低泄漏设备的技术研发等,实施更全面的 VOCs 泄漏治理。此外 2021 年 3 月,长三角区域发布的《设备泄漏挥发性有机物排放控制技术规范》^[31](DB31/T 310007—2021、DB32/T 310007—2021、DB33/T 310007—2021、DB34/T 310007—2021)中还提到企业可通过精简密封点数量、采取防泄漏措施等方式,从源头减少 VOCs 的泄漏量。

2.3 权重结果应用

基于表 3 中 14 项二级指标的总群体权重结果并结合标准及技术指南的规定要求与专家建议,得出的一套系统的 LDAR 实施效果评分表。该表将评估过程分为预评估与正式评估两部分,明确了各评估指标的总体要求、评估要点、评估方法等,每项指标按照评估要点的具体内容在 0 到满分区间内进行评分且得分为整数。LDAR 实施效果评估流程见图 3,评分表详细内容见表 4。

评分表中评估方式主要分为文本评估和现场评估 2 种。文本评估中包含资料审核与材料证明,其中资料审核对企业 LDAR 相关资料从准确性、全面

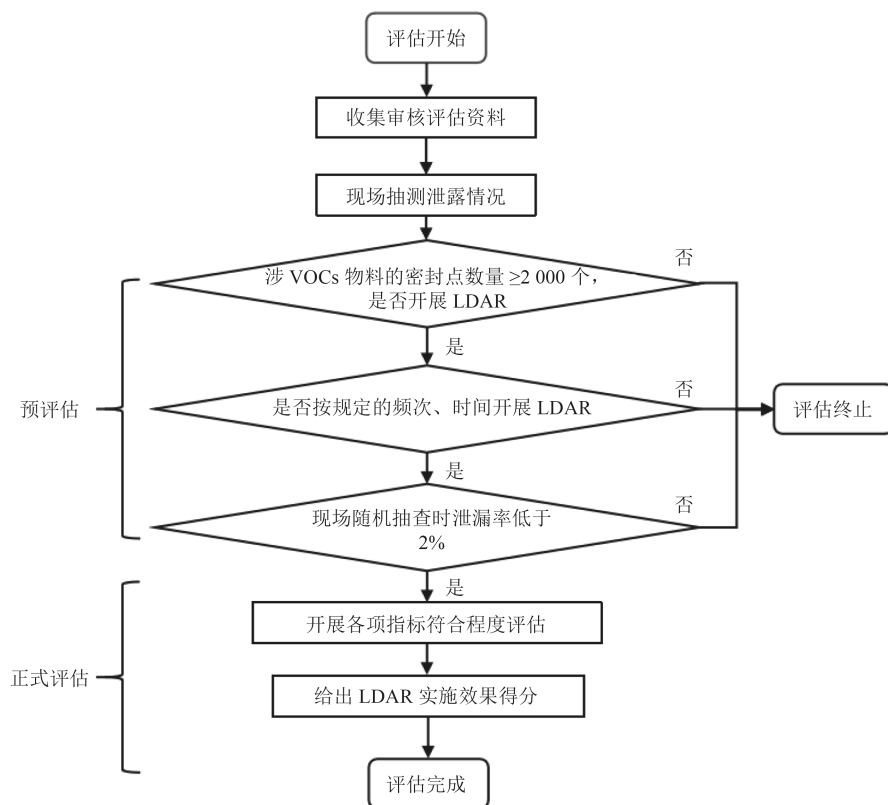


图3 LDAR 实施效果评估流程

Fig.3 LDAR implementation effect evaluation process

表 4 LDAR 实施效果评分表
Table 4 LDAR implementation effect score sheet

一级指标	二级指标	指标说明	评估内容	评估方法	满分值	得分
项目建立	实施范围完整性	LDAR实施范围是否完整覆盖所有受控装置区域及密封点	1.结合装置工艺流程图(PFD)、管道仪表图(P&ID)及现场勘探等,评估LDAR实施范围是否完整覆盖所有受控点;2.是否存在LDAR实施范围的漏判、误判;3.LDAR项目实施范围内工艺设备、管线是否完整、准确、合规的纳入实施范围	资料审核	9	
	密封点分类准确性	受控密封点是否按照标准要求中的规定准确分类	泵、搅拌器、压缩机、泄压设备、阀门、法兰、连接件、开口阀或开口管线等各类密封点是否准确分类	资料审核	8	
	密封点标识合理性	密封点是否设置唯一且易辨识的编号	1.是否设置唯一且易辨识的编号(包括现场挂牌或图档标识);2.密封点标识信息描述是否正确(密封点位置描述、密封点类型、密封点介质状态、密封点尺寸)	资料审核 现场勘查	6	
	不可达点占比合理性	不可达密封点比例是否低于同类密封点的3%	1.不可达点原因是否满足标准中规定的物理及安全要素等;2.不可达点的比例是否偏高,是否低于同类密封点的3%	资料审核 现场勘查	5	
现场检测	检测仪器合规性	仪器选型是否符合标准规范要求;是否具有计量认证证书及本安防爆	1.是否对待测排放源所排放的主要VOCs组分有响应;2.量程是否能满足相关控制标准中的标准浓度限值的测定要求;3.相对误差 $\pm 10\%$;标气误差 $\pm 2\%$;4.具有防爆安全性并通过防爆安全检验认证	材料证明	5	
	仪器调试合规性	仪器是否进行正确的预热、校准、示值和零点漂移等	1.预热时间是否按仪器说明书要求,无明确要求的预热时间是否不少于30 min;2.单点校准时单点浓度值是否接近标准浓度限值;多点校准时标准浓度限值是否在校准浓度的范围之内;3.是否反复通入零气和校准气体3次(每次通气时间为仪器响应时间的2倍以上);通入零气读数平均值是否未超过 $\pm 10 \mu\text{mol/mol}$;通入校准气体,示值误差是否未超过 $\pm 10\%$	资料审核 现场勘查	6	
	检测操作合规性	检测操作是否符合标准的规定要求	1.采样探头是否沿可能发生泄漏的相关部位外围以小于10 cm/s的速度移动;2.密封点检测位置是否按照标准的规定要求进行操作;3.环境本底值测试点距受控密封点是否 $\geq 25 \text{ cm}$,且将5个检测平均值作为当日装置环境本底值	现场勘查	6	
	泄漏标识合规性	泄漏点是否及时系挂泄漏牌;标识牌内容是否符合要求	1.检测发现泄漏点后是否及时系挂泄漏牌;2.泄漏牌中是否记录密封点编码,净检测值,检测时间以及检测人员等信息	现场勘查	4	
	免于检测合规性	豁免密封点是否符合标准中的规定条件	豁免设备与管线组件清单是否满足标准中免于检测的达标要求	资料审核 现场勘查	4	
泄漏修复与复测	泄漏修复及时性	是否按照标准中的规定进行泄漏修复	1.首次修复是否在发现泄漏之日起5日内进行;2.除延迟修复泄漏点外,是否在发现泄漏之日起15日内完成修复	资料审核	14	
	延迟修复合规性	是否符合标准中规定的延迟修复条件;是否按照标准要求开展延迟修复	延迟修复的密封点是否满足以下条件:1)装置停车(工)条件下才能修复;2)立即修复存在安全风险;3)其他特殊情况	资料审核	8	
	复测合规性	常规修复是否在5日内完成复测工作;延迟修复是否在15日内完成复测工作	泄漏密封点修复后,是否在5日内完成复测;延迟修复泄漏点修复后,是否在装置开工稳定后15日内复测	资料审核	8	
台账管理	报告内容完整性	是否包含企业的基本情况介绍、实施过程、结果分析、排放量核算、措施建议等	是否包含企业的基本情况介绍(厂区平面布置图、装置统计表)、检测基本情况(密封点数量、类型统计,泄漏点位信息统计及修复情况及对应图片)、实施过程、设备组件检测报表结果分析、延迟修复申请、排放量核算、措施建议等内容	资料审核	8	
	台账记录合规性	是否建立台账记录管理且保存3年以上	1.是否包含建档、检测、修复、复测、延迟修复等记录;2.是否包含检测原始数据记录;3.是否建立LDAR平台管理台账记录且保存3年以上	资料审核	9	

注:本表采用百分制评估,分值越高表明LDAR实施效果越好。

性进行分析;材料证明则需企业提供 LDAR 检测仪器证书等材料。现场评估包含现场勘查与现场抽测,其中现场勘查重点核实文本记录内容与现场情况是否吻合,检测人员操作是否规范等;现场抽测则需携带红外热像仪或便携式气体检测仪,对随机选

取的密封点泄漏情况进行实测以计算泄漏率。

3 案例应用分析

将构建完成的 LDAR 实施效果评估指标体系应用于国内 2019—2021 年期间完成 LDAR 的 10 家工

业企业,分析其 LDAR 实施现状与 VOCs 泄漏控制效果。通过系统收集相关企业 LDAR 实施报告和原始检测记录,优先判别是否存在 GB 37822 中规定的 3 种违法行为,再对文本资料及实施现场开展检查,并进行各工业企业 LDAR 实施效果评估打分。

10 家工业企业的行业分别为制药 3 家、塑料制品 3 家、合成树脂 2 家、涂料油墨制造 2 家,其中某塑料制品企业厂区内受控密封点数量大于 2 000 个但暂未开展 LDAR 工作,因此评估工作终止且相关管理部门落实对该企业的督促整改工作。其余 9 家企业在充分保证数据真实性、评估公正性的基础上,运用 LDAR 实施效果评分表对企业 LDAR 各环节进行打分,评分结果见表 5。

表 5 9 家不同行业企业 LDAR 实施效果评分
Table 5 LDAR implementation effect scores of 9 companies in different industries

制药行业			塑料制品行业		合成树脂行业		涂料油墨制造行业	
企业1	企业2	企业3	企业4	企业5	企业6	企业7	企业8	企业9
84	83	81	71	68	79	76	78	75

4 结论

(1)从 FAHP 建模的一级指标的权重结果分析,各群体因自身工作经验的差异对 LDAR 的关注有所侧重,专家群体与企业群体将泄漏修复与复测排在首位,第三方服务商群体则赋予项目建立权重最大,总群体权重排序依次为泄漏修复与复测(0.305)、项目建立(0.281)、现场检测(0.245)、台账管理(0.169)。

(2)从 FAHP 建模的二级指标的权重结果分析,各项一级指标中权重最大的分别是项目建立层中的实施范围完整性、现场检测层中的检测操作合规性、泄漏修复与复测层中的泄漏修复及时性和台账管理层中的台账记录完整性。14 项评估指标权重排序中,泄漏修复及时性位于第 1 位,免于检测合规性位于第 14 位。

(3)将基于 FAHP 建立的指标体系应用于 10 家工业企业 LDAR 的评估工作,得出制药行业整体实施效果偏好,企业平均得分为 82.7 分;合成树脂与涂料油墨行业实施水平相当,平均得分分别为 77.5 分、76.5 分;塑料制品企业落实 LDAR 工作的合规性较差,平均得分为 69.5 分。

参考文献

[1] 马超,薛志钢,李树文,等.VOCs排放、污染以及控制对策[J]. 环境工程技术学报,2012,2(2): 103-109.
MA C, XUE Z G, LI S W, et al. VOCs emission, pollution and

由表 5 可以看出,制药企业在 2019 年 GB 37823 出台后陆续施行 LDAR 工作,行业整体实施效果偏好,平均得分为 82.7 分,企业建档完善,能够按标准要求开展周期性检测且及时修复泄漏点;合成树脂与涂料油墨行业实施水平相当,合成树脂企业的平均得分为 77.5 分、涂料油墨制造企业的平均得分为 76.5 分,该行业企业 LDAR 实施综合效果良好,但仍有一些方面需要改善;而塑料制品企业落实 LDAR 工作的合规性较差,平均得分为 69.5 分,评估中除了发现部分企业存在“应做未做”情况外,在检测与修复等环节也均有一些问题,因此塑料制品行业企业需要应加快落实 LDAR 自查工作,确保有效控制设备 VOCs 泄漏排放。

control measures[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, 2(2): 103-109.

[2] MA Z Q, XU J, QUAN W J, et al. Significant increase of surface ozone at a rural site, north of Eastern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(6): 3969-3977.

[3] XUE L K, WANG T, GAO J, et al. Ozone production in four major cities of China: sensitivity to ozone precursors and heterogeneous processes[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2013, 13(10): 27243-27285.

[4] LI L Y, XIE S D, ZENG L M, et al. Characteristics of volatile organic compounds and their role in ground-level ozone formation in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. Atmospheric Environment, 2015, 113: 247-254.

[5] LIU C T, MA Z B, MU Y J, et al. The levels, variation characteristics, and sources of atmospheric non-methane hydrocarbon compounds during wintertime in Beijing, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(17): 10633-10649.

[6] 国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知[A/OL].(2018-07-04) [2021-07-20]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/gz/201807/t20180705_446146.shtml.

[7] ZHANG G F, FEI B, XIU G L. Characteristics of volatile organic compound leaks from equipment components: a study of the pharmaceutical industry in China[J]. Sustainability, 2021, 13(11): 6274.

[8] 张钢锋.泄漏检测与修复(LDAR)技术在国内外应用现状及发展趋势[J]. 环境工程学报,2016, 10(9): 4621-4627.
ZHANG G F. Application and development trend of leak detection and repair (LDAR) [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(9): 4621-4627.

[9] US Environmental Protection Agency. Control of volatile organic

- compound leaks from petroleum refinery equipment[EB/OL]. [2021-07-15]. <https://www.epa.gov/>.
- [10] US Environmental Protection Agency. Consent decrees and settlement agreements[EB/OL]. [2021-07-15]. <https://www.epa.gov/ogc/consent-decrees-and-settlement-agreements>
- [11] EPPERSON D, LEV-ON M, TABACK H, et al. Equivalent leak definitions for smart LDAR (leak detection and repair) when using optical imaging technology[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, 57(9): 1050-1060.
- [12] 王永敏, 王文秀, 马寅平, 等. 重点行业泄漏检测与修复建档工作评估[J]. 广州化工, 2019, 47(2): 157-160.
- WANG Y M, WANG W X, MA Y P, et al. Assessment of component coding work on leak detection and repair of key industries[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 47(2): 157-160.
- [13] 刘志阳, 廖程浩, 张晖, 等. 泄漏检测与修复(LDAR)工作流程及常见问题剖析[J]. 绿色科技, 2017(14): 135-137.
- [14] KE J, LI S, ZHAO D F. The application of leak detection and repair program in VOCs control in China's petroleum refineries[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2020, 70(9): 862-875.
- [15] 李龙, 李凌波, 程梦婷. 石化行业泄漏检测与修复质量提升计划: LDAR质量审计审核[J]. 当代化工, 2017, 46(10): 2090-2093.
- LI L, LI L B, CHENG M T. Quality enhancement program of leak detection and repair in petrochemical enterprise: LDAR audits[J]. Contemporary Chemical Industry, 2017, 46(10): 2090-2093.
- [16] 彭茵, 吉晟, 赵子玮, 等. 泄漏检测与修复技术管理体系研究及评估建议[J]. 现代化工, 2017, 37(10): 10-14.
- PENG Y, JI S, ZHAO Z W, et al. Research and evaluation recommendation on management system of leak detection and repair technology[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(10): 10-14.
- [17] XU R N, ZHAI X Y. Extensions of the analytic hierarchy process in fuzzy environment[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 52(3): 251-257.
- [18] MIKHAILOV L, TSVETINOV P. Evaluation of services using a fuzzy analytic hierarchy process[J]. Applied Soft Computing, 2004, 5(1): 23-33.
- [19] DUBOIS D, PRADE H. Operations on fuzzy numbers[J]. International Journal of Systems Science, 1978, 9(6): 613-626.
- [20] CHEN J J G, HE Z S. Using analytic hierarchy process and fuzzy set theory to rate and rank the disability[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 88(1): 1-22.
- [21] 段军, 梁智广, 岳洪辉. 基于模糊层次分析法的采矿方法优选[J]. 化工矿物与加工, 2017, 46(12): 53-56.
- DUAN J, LIANG Z G, YUE H H. Optimization of mining method based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Industrial Minerals & Processing, 2017, 46(12): 53-56.
- [22] 宋高峰, 潘卫东, 杨敬虎, 等. 基于模糊层次分析法的厚煤层采煤方法选择研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 35-41.
- SONG G F, PAN W D, YANG J H, et al. Mining methods selection in thick coal seam based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 35-41.
- [23] 李欢, 王涌川. 基于模糊层次分析法的页岩气钻井井喷事故风险评价[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(2): 126-130.
- LI H, WANG Y C. Risk assessment of shale gas drilling blowout accidents based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(2): 126-130.
- [24] 贾海林, 余明高, 崔志恒. 基于模糊层次分析法的高校实验室火灾危险性评价[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(2): 173-176.
- JIA H L, YU M G, CUI Z H. Research on fire hazard evaluation of academy laboratory based on fuzzy analytical hierarchy process[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(2): 173-176.
- [25] 马双忱, 范紫瑄, 温佳琪, 等. 基于模糊层次分析的燃煤电厂脱硫废水处理可利用技术评价[J]. 化工进展, 2018, 37(11): 4451-4459.
- MA S C, FAN Z X, WEN J Q, et al. Evaluation on technology of desulfurization wastewater from coal-fired power plant based on fuzzy AHP[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(11): 4451-4459.
- [26] 吴春生, 黄翀, 刘高焕, 等. 基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4584-4595.
- WU C S, HUANG C, LIU G H, et al. Assessment of ecological vulnerability in the Yellow River Delta using the fuzzy analytic hierarchy process[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4584-4595.
- [27] 黄书君, 李坤权, 朱光怡. 基于模糊层次分析模型的高校室内空气质量评价与分析[J]. 环境工程, 2014, 32(5): 90-94.
- HUANG S J, LI K Q, ZHU G Y. Evaluation and analysis on the indoor air quality of colleges based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(5): 90-94.
- [28] BUCKLEY J J. Fuzzy hierarchical analysis[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1985, 17(3): 233-247.
- [29] 丁德武, 杜德川, 贾润中, 等. 泄漏检测与修复技术实施水平量化评估简介[J]. 安全、健康和环境, 2017, 17(9): 34-37.
- DING D W, DU D C, JIA R Z, et al. Research on quantitative evaluation of implementation level of LDAR technology[J]. Safety Health & Environment, 2017, 17(9): 34-37.
- [30] 郑幸成, 王文秀, 黄浩云, 等. 石化行业泄漏检测与修复评估指标体系的建立与应用[J]. 化工环保, 2018, 38(3): 363-368.
- ZHENG X C, WANG W X, HUANG H Y, et al. Construction and application of evaluation index system for leak detection and repair in petrochemical industry[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2018, 38(3): 363-368.
- [31] 上海市市场监督管理局, 江苏省市场监督管理局, 浙江省市场监督管理局, 等. 设备泄漏挥发性有机物排放控制技术规范: DB31/T 310007—2021, DB32/T 310007—2021, DB33/T 310007—2021, DB34/T 310007—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. ⊗