

天然气开采凝析油职业健康风险评估方法筛选

朱玥爰¹, 李林玥¹, 王永伟^{1,2}

1. 四川大学华西公共卫生学院(华西第四医院), 四川 成都 610041; 2. 四川省职业卫生应急(甲级)重点实验室

摘要: **目的** 明确天然气开采凝析油存在的主要化学职业病危害因素及其暴露水平, 探究该行业化学有害因素职业健康风险评估方法, 为精准预防职业病危害因素、保护职业人群健康提供依据。 **方法** 基于职业卫生调查、凝析油组分分析及职业病化学有害因素连续监测, 采用综合指数法、ICMM 定量评估法及职业危害风险指数法评估天然气开采凝析油暴露职业健康风险。 **结果** 天然气开采凝析油主要职业病危害因素为苯、甲苯、二甲苯、正己烷、环己烷, 其时间加权浓度(C_{TWA})处于 1% ~ 50% OELs 区间, 10 个采气井站中, 仅有二甲苯的浓度水平存在统计学意义($P < 0.001$), 其余 4 种化学毒物浓度均基本一致($P > 0.05$); 气田水处理站五种典型化学毒物短时间浓度(C_{STEL})均有检出, 且浓度基本一致($P > 0.05$)。职业健康风险等级分析, 采气站与气田水处理站综合指数法风险, 苯均为极高风险, 甲苯、正己烷、环己烷为高风险, 二甲苯为中等风险; 职业危害风险指数法显示, 气田水处理站苯为中度风险, 采气站苯为轻度风险, 其余均无风险; ICMM 定量评估法中仅有气田水处理站苯的风险评级为不可容忍风险, 其余均为可容忍风险; 三种方法 Kruskal - Wallis 检验评级分布存在差异($P < 0.05$)。反映出不同评估体系在有害因素风险等级的判别能力上有所不同。 **结论** 天然气开采行业凝析油暴露应重点关注职业病危害因素为苯、甲苯、二甲苯、正己烷、环己烷, 改良后的 ICMM 定量评估是天然气开采凝析油职业健康风险评估的适宜方法。

关键词: 凝析油; 典型化学毒物; 职业健康; 风险评估; 筛选

中图分类号: R134 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 8507(2026)14 - 2573 - 08

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202512345

Screening of occupational health risk assessment methods for condensate oil in natural gas extraction

ZHU Yue - yuan*, LI Lin - yue, WANG Yong - wei

* West China School of Public Health and West China Fourth Hospital, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract: **Objective** To identify the main chemical occupational hazard factors and their exposure levels associated with condensate oil in natural gas exploitation, and to explore occupational health risk assessment methods for chemical hazards in this industry, so as to provide a basis for accurately preventing occupational hazards and protecting the health of occupational populations. **Methods** Based on occupational health surveys, condensate oil component analysis and continuous monitoring of chemical occupational hazards, the occupational health risks of condensate oil exposure in natural gas exploitation were assessed using the comprehensive index method, ICMM quantitative assessment method and occupational hazard risk index method. **Results** The main occupational hazard factors of condensate oil in natural gas exploitation were benzene, toluene, xylene, n - hexane and cyclohexane. Their time - weighted average concentrations (C_{TWA}) ranged within 1% - 50% of the occupational exposure limits (OELs). Among the 10 gas production well stations, only xylene concentration showed statistical significance ($P < 0.001$), while concentrations of the other four chemical toxicants were generally consistent ($P > 0.05$). Short - term exposure concentrations (C_{STEL}) of all five typical chemical toxicants were detected in the gas field water treatment station, with generally consistent concentrations ($P > 0.05$). Analysis of occupational health risk levels showed that according to the comprehensive index method, benzene was rated as extremely high risk in both gas production stations and gas field water treatment stations, toluene, n - hexane and cyclohexane as high risk, and xylene as medium risk. According to the occupational hazard risk index method, benzene was moderate risk in the gas field water treatment station and mild risk in gas production stations, while all other factors were assessed as no risk. In the ICMM quantitative assessment method, only benzene in the gas field water treatment station was rated as intolerable risk, and all other factors were rated as tolerable risk. The Kruskal - Wallis test showed significant differences in the rating distributions among the three methods ($P < 0.05$),

基金项目: 中石化横向项目基金(23H0825)

作者简介: 朱玥爰(1999—), 女, 硕士在读, 研究方向: 公共卫生

通信作者: 王永伟, E - mail: wangyw_1980@sina.com

indicating that different assessment systems varied in their ability to discriminate risk levels of hazardous factors. **Conclusion** Benzene, toluene, xylene, n-hexane and cyclohexane should be the key occupational hazards concerned in condensate oil exposure in the natural gas exploitation industry. The improved ICMM quantitative assessment is a suitable method for occupational health risk assessment of condensate oil in natural gas exploitation.

Keywords: Condensate oil; Typical chemical toxicants; Occupational health; Risk assessment; Screening

凝析油(Gas Condensate, GC)是一种特殊的轻质油,具有原始地层温度下为气态和地面常压下凝结为液态的气液两相特征,其成分与原油成因有关,不同地区的凝析油成分不同^[1]。我国中原和西南地区是凝析油主要储存地,四川盆地气藏油气较为丰富^[2-3]。天然气开采过程中的凝析油为气藏油气凝析而成。研究显示,凝析油含芳香烃(如苯、甲苯、二甲苯)、烷烃(如正己烷)等多种化学有害因素,这些有害因素大多为职业病高风险因素^[4-6]。作业过程中因凝析油气液两相的特征,上述有害因素可通过呼吸道、皮肤等途径进入体内。团队前期调研发现,某天然气开采单位凝析油暴露职工有 1 例疑似职业性慢性苯中毒,其苯的暴露浓度达到苯职业接触限值(OELs)的 20%~60%。天然气开采过程中凝析油暴露及其含凝析油污水处理环节作业者的职业有害因素防护形势严峻^[7]。目前,国内外针对石油原油、成品油的职业苯暴露及健康效应研究已较为系统^[8],针对凝析油暴露场景下关键危害因子的识别及适宜风险评估方法的研究尚属空白。职业健康风险与危害程度不明^[9],现有评估方法在此类复杂暴露情境中的适用性难以确定,给该行业从业人员的职业病防治与职业健康管理带来了挑战。本研究旨在以天然气开采的凝析油暴露为研究对象,根据工作场所连续性危害监测结果,采用综合指数法、职业危害风险指数法及 ICMM 定量评估法三种风险评估方法,筛选适用于天然气开采行业凝析油暴露的风险评估方法,为该行业职业病防控与职业健康管理提供科学工具。

1 对象与方法

1.1 对象 根据四川某天然气开采井站现状,结合工作场所职业性有害因素分析,按照 15% 的比例从 64 座含凝析油天然气开采井站中随机抽取 10 个井站和 1 个气田水集中处理站为研究对象。

1.2 方法

1.2.1 职业卫生调查 职业卫生技术服务人员进行职业卫生调查,包括场所布局、采气工艺、工程防护、个体防护及职业性有害因素接触情况。

1.2.2 职业卫生监测 凝析油原液组分分析采用广东省职业卫生技术质量控制中心技术指南 GDOHTQC 001—2020 的方法^[10],用 W9N08 标准谱库检索,相对保留时间 RSD 和峰面积 RSD 均小于 10%、匹配因子

均大于 75% 的化合物明确组分,报告限为 0.1%,对 3 批次 9 个凝析油液体原液样品进行组分分析。典型化学毒物监测,由于采气站采用巡检作业模式,工作点位不固定、流动性强,故对采气工岗位采用个体采样,通过随机数表法抽取 17 名采气工佩戴采样设备。水处理站工艺流程集中、岗位固定,为减少对作业的影响,对水理工岗位采用定点采样,在 9 个点位(回注水处理池、钻井液废水接收池、均质隔油池、高浓水池、脱氮水池、压滤机、压裂返排液接收池、300 m³ 罐、800 m³ 罐)分别设置采样点,并按照现行国家标准要求对采集样品进行分析^[11-15];采样频次为 1 次/月,连续 6 个月,主要设备:全二维气相色谱-飞行时间质谱联用仪(GC×GC-TOF MS)、全二维气相色谱-氢火焰离子化检测器(GC×GC-FID)。

1.2.3 统计学方法 采用 Excel 2010 建立数据库,SPSS 29.0 软件包进行统计分析。正态分布数据采用($\bar{x} \pm s$)描述,批次浓度比较采用方差分析。非正态分布数据采用中位数(M)、四分位间距(IQR)描述,风险评估方法比较采用非参数检验(Kruskal-Wallis 检验),检验水准 $\alpha=0.05$ 。

1.2.4 职业健康风险评估 采用综合指数法、职业危害风险指数法、ICMM 定量评估法:①综合指数法:风险指数 $R = \sqrt{HR \times ER}$ 。其中:HR 为危害等级,ER 为接触等级。风险等级:可忽略($R=1$);低风险($R=2$);中等风险($R=3$);高风险($R=4$);极高风险($R=5$)^[16]。②职业危害风险指数法:风险指数(R) = $2^{\text{健康效应等级}} \times 2^{\text{暴露比值}} \times \text{作业条件等级}$,风险等级: $R \leq 6$ 为无危害;7~11 为轻度危害;12~23 为中度危害;24~80 为高度危害;>80 为极度危害^[17]。③ICMM 定量评估法:风险评级值(RR) = 后果(C) × 暴露概率(PrE) × 暴露时间(PeE),风险等级:RR < 20 为可容忍风险;20~69 为潜在风险;70~199 为高风险;200~399 为非常高风险;≥400 为不可容忍风险^[18]。因原模型暴露时间于 4~8h 时赋值困难,综合现场实际与行业专家咨询,调整了 ICMM 模型的赋值条件^[19],见表 1。

2 结果

2.1 凝析油成分中典型化学有害因素 根据凝析油原液组分分析峰面积(见表 2),输出结果见图 1,结合各组分的理化特性、毒性、暴露几率、健康结局,确定

表 1 改良后 ICMM 定量评估法风险因素赋值

Table 1 Risk factor assignment for improved ICMM quantitative assessment

风险因素	原模型分类	改良后分类	赋值
暴露概率	持续超过	毒物浓度 > 1.5OELs	10.0
	间断地	OELs < 毒物浓度 ≤ 1.5OELs	6.0
	不经常,但有可能性	现场检测浓度 = OELs	3.0
	只有极小可能(但曾发生过)	0.5OELs < 毒物浓度 < OELs	1.0
	可能,但可能性极微	毒物浓度 ≤ 0.5OELs	0.5
暴露时间	连续工作 8 h	每班连续工作时长 > 6 h	10.0
	每班连续工作 2 h 至 4 h	2h < 每班连续工作时长 ≤ 6 h	6.0
	每班连续工作 1 h 至 2 h	每班连续工作时长 ≤ 2 h	3.0
	每个月几次(> 1 次)	/	2.0
	每年几次(> 1 次)	/	1.0
	每年一次	/	0.5
后果	一人或多人死亡	/	100.0
	重大残疾	/	50.0
	缺勤时间超过 14 d 的严重疾病	/	15.0
	缺勤时间超过 7 d, 低于 14 d 的重大疾病	/	7.0
	缺勤时间 7 d 及以下的小病	/	1.0

表 2 凝析油原液组分分析

Table 2 Component detection results of condensate oil samples

化学组分	峰面积百分比(%)		
	第 1 批	第 2 批	第 3 批
苯	5.05	3.72	低于检出限
1,2 - 二氯乙烷	低于检出限	低于检出限	低于检出限
正己烷	低于检出限	低于检出限	低于检出限
三氯甲烷	低于检出限	低于检出限	低于检出限
三氯乙烯	低于检出限	低于检出限	低于检出限
二甲胺	低于检出限	2.13	2.92
新戊烷	1.65	1.22	1.40
环己烷	低于检出限	0.54	0.39
正庚烷	0.57	低于检出限	1.17
甲苯	3.02	3.38	3.61
正辛烷	1.30	0.85	1.51
乙苯	0.55	0.70	0.70
二甲苯(全部异构体)	2.88	3.58	3.47
壬烷	0.48	0.91	0.80
其他烃类化合物	38.27	49.40	49.40
其他苯系物	0.30	0.61	0.61
其他化合物	33.43	24.20	24.06
低于报告限组分	1.73	2.21	2.21
总挥发性有机组分峰面积百分比	89.23	93.62	92.25
无机组分峰面积百分比	10.77	6.38	7.75

注:方法检出限为 0.1%。

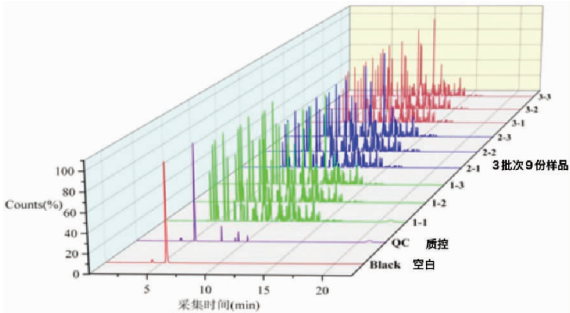


图 1 GC - MS 总离子流色谱图

Fig. 1 Total Ion Chromatograms by GC - MS

苯、甲苯、二甲苯、环己烷、正己烷为天然气采气井站和气田水处理工作场所凝析油暴露的五种典型化学有害因素。

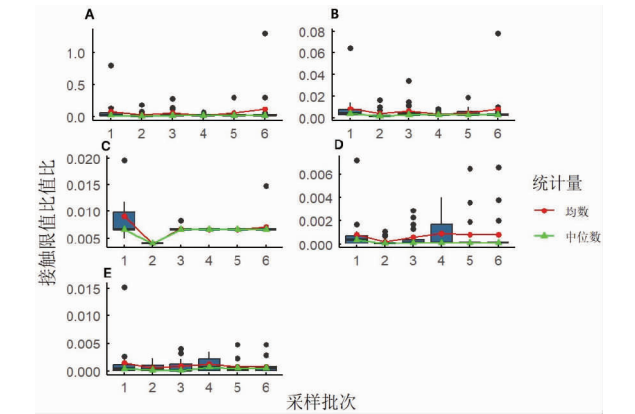
2.2 采气井站化典型化学有害因素暴露水平 10 个采气井站五种典型化学有害因素均有检出,时间加权浓度(C_{TWA})均达到 1% ~ 50% OELs,其中二甲苯不同批次间的浓度水平有差异,存在统计学意义($P < 0.001$),其原因可能为不同井位因开采层位和年限的差异,二甲苯的组分含量存在波动;其余 4 种化学毒物浓度水平批次间无差异($P > 0.05$)见表 3。计算采气工岗位的短时间接触浓度与短时间接触容许浓度

表3 井站凝析油典型化学有害因素个体采样结果分析(C_{TWA})

Table 3 Analysis of continuous individual sampling results for typical chemical toxins in condensate oil at well stations									
岗位名称	化学有害因素	采样批次	检出采气井站数量(个)				C _{TWA} (mg/m ³)		P 值
			低于检出限	1% ~ 50% OEL	51% ~ 99% OEL	超标	$\bar{x} \pm s$	C _{Max}	
采气工(17 份个体采样/批)	苯	1	9	1	0	0	0.13 ± 0.11	0.41	0.501
		2	9	1	0	0	0.06 ± 0.06	0.25	
		3	10	0	0	0	0.06 ± 0.00	0.06	
		4	10	0	0	0	0.06 ± 0.00	0.06	
		5	8	2	0	0	0.15 ± 0.26	0.92	
		6	8	2	0	0	0.15 ± 0.26	0.92	
	甲苯	1	9	1	0	0	0.23 ± 0.13	0.47	0.052
		2	9	1	0	0	0.10 ± 0.08	0.34	
		3	10	0	0	0	0.12 ± 0.00	0.12	
		4	8	2	0	0	0.14 ± 0.05	0.26	
		5	9	1	0	0	0.17 ± 0.13	0.51	
		6	9	1	0	0	0.16 ± 0.12	0.52	
	二甲苯	1	9	1	0	0	0.51 ± 0.31	0.98	<0.001
		2	10	0	0	0	0.20 ± 0.00	0.20	
		3	10	0	0	0	0.33 ± 0.00	0.33	
		4	10	0	0	0	0.33 ± 0.00	0.33	
		5	10	0	0	0	0.33 ± 0.00	0.33	
		6	9	1	0	0	0.33 ± 0.00	0.33	
	正己烷	1	8	2	0	0	0.04 ± 0.05	0.17	0.795
		2	9	1	0	0	0.02 ± 0.04	0.11	
		3	8	2	0	0	0.04 ± 0.06	0.17	
		4	8	2	0	0	0.07 ± 0.13	0.40	
		5	8	2	0	0	0.09 ± 0.19	0.65	
		6	8	2	0	0	0.09 ± 0.20	0.66	
	环己烷	1	8	2	0	0	0.12 ± 0.15	0.52	0.542
		2	7	3	0	0	0.09 ± 0.10	0.29	
		3	8	2	0	0	0.08 ± 0.10	0.30	
		4	6	4	0	0	0.22 ± 0.28	0.85	
		5	6	4	0	0	0.12 ± 0.17	0.58	
		6	6	4	0	0	0.13 ± 0.20	0.70	

注:1 批次/月为一个采样批次,共 6 批次;C_{TWA}为时间加权浓度。

的比值(接触限值比值比),比值比 = C_{STEL}/PC - STEL, C_{STEL}为短间接接触浓度,PC - STEL 为短间接接触容许浓度。以评估短时间个体暴露水平。见图 2。



注:箱式图箱体范围为四分位距(IQR),whiskers 为 Q1/Q3 ± 1.5IQR,超出范围的点定义为离群值。A:苯 B:甲苯 C:二甲苯 D:正己烷 E:环己烷。

图2 采气井站凝析油典型化学有害因素个体暴露水平
Fig.2 Individual exposure levels to typical chemical toxins in condensate oil at gas production well sites

2.3 气田水处理站典型化学毒物暴露水平 气田水处理凝析油典型化学毒物结果分析显示,五种典型化学毒物短时间浓度(C_{STEL})均有检出,批次间浓度差异均无统计学意义(均有 P > 0.05)见表 4;计算水处理工岗位的短间接接触浓度与短间接接触容许浓度的比值(接触限值比值比),比值比 = C_{STEL}/PC - STEL,C_{STEL}为短间接接触浓度,PC - STEL 为短间接接触容许浓度。以评估短时间个体暴露水平。见图 3。

2.4 凝析油职业健康风险

2.4.1 综合指数法 采气井站与气田水处理站的苯均为极高风险,采气井站的甲苯、正己烷、环己烷为高风险,二甲苯为中等风险,见表 5。

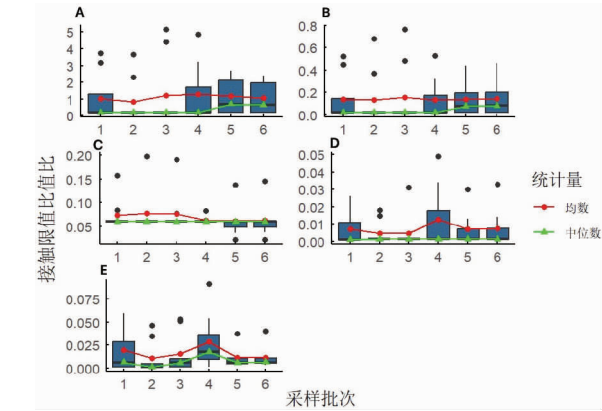
2.4.2 职业危害风险指数法 苯在气田水处理站为中度风险,采气井站为轻度风险,采气井站的甲苯、二甲苯、正己烷、环己烷均无风险,见表 6。

2.4.3 ICM 定量评估法 仅有气田水处理站苯的风险评级为不可容忍风险,其他均为可容忍风险,见表 7。

表 4 气田水处理站凝析油典型化学毒物暴露水平分析

Table 4 Analysis of exposure levels to typical chemical toxins in condensate oil at gas field water treatment stations

岗位名称	典型化学毒物	批次	C _{STEL} (mg/m ³) ($\bar{x} \pm s$)	P 值
水理工(气田水处理)	苯	1	3.14 ± 4.26	0.991
		2	2.46 ± 3.83	
		3	3.66 ± 6.09	
		4	3.89 ± 5.81	
		5	3.53 ± 3.28	
		6	3.21 ± 2.93	
	甲苯	1	6.93 ± 10.10	1.000
		2	6.61 ± 11.77	
		3	7.78 ± 13.79	
		4	6.75 ± 10.27	
		5	6.87 ± 7.66	
		6	7.16 ± 8.05	
	二甲苯	1	3.68 ± 1.63	0.918
		2	3.86 ± 2.27	
		3	3.82 ± 2.15	
		4	3.17 ± 0.44	
		5	3.11 ± 1.83	
		6	3.19 ± 1.96	
	正己烷	1	0.72 ± 1.01	0.794
		2	0.47 ± 0.67	
		3	0.46 ± 0.99	
		4	1.28 ± 2.01	
		5	0.71 ± 1.10	
		6	0.76 ± 1.21	
	环己烷	1	4.91 ± 5.53	0.535
		2	2.64 ± 4.34	
		3	3.83 ± 5.26	
		4	7.17 ± 8.16	
		5	2.84 ± 2.97	
		6	2.94 ± 3.20	



注: 箱式图箱体范围为四分位距 (IQR), whiskers 为 Q1/Q3 ± 1.5IQR, 超出范围的点定义为离群值。A: 苯 B: 甲苯 C: 二甲苯 D: 正己烷 E: 环己烷。

图 3 气田水处理站凝析油典型化学毒物浓度水平
Fig. 3 Trend of concentration levels of typical chemical toxicants in condensed oil under continuous monitoring

2.4.4 凝析油职业暴露风险评估方法对比 将三种风险评估风险等级编秩, 见表 8, Kruskal - Wallis 检

验显示, 三种方法的评级分布存在差异 ($P < 0.05$), 见表 9。反映出不同评估体系在有害因素风险等级的判别能力上有所不同。

3 讨论

含凝析油天然气开采主要包括采气和气田水处理两大部分, 混合化学毒物的凝析油对劳动者存在健康危害。本研究首次阐明了苯、甲苯、二甲苯、正己烷、环己烷为凝析油五种典型化学毒物。研究表明, 含凝析油天然气开采的采气井站和气田水处理站五种典型化学毒物均存在, 不同岗位的暴露水平不同, 气田水处理站苯暴露浓度最高, 这与气田水处理场所含凝析油的污水较为集中, 跑冒滴漏或敞开作业凝析油持续挥发有关^[20]。提示, 含凝析油天然气开采行业, 除天然气开采固有职业病危害因素外, 应重点关注凝析油挥发物职业防控, 尤其是上述五种典型化学毒物。

职业健康风险评估在含凝析油天然气开采行业中应用较少。本研究的三种职业健康评估方法均一

表 5 综合指数法评估结果

Table 5 Comprehensive index method evaluation results								
毒物名称	蒸汽压力	E/OEL	危害控制措施	日接触时间(h)	ER 评分	RR 评分	风险指数	风险等级
苯								
采气站	4	2	1	2	2.00	1.5	5.0	极高风险
水处理站	4	3	1	4	2.63	36.0	5.0	极高风险
甲苯	5	1	1	2	1.78	1.5	4.0	高风险
二甲苯	4	1	1	2	1.68	1.5	3.0	中等风险
正己烷	5	1	1	2	1.78	1.5	4.0	高风险
环己烷	5	1	1	2	1.78	1.5	4.0	高风险

表 6 职业危害风险指数法评估结果

Table 6 Occupational hazard risk index method assessment results						
毒物名称	暴露人数	暴露时间	工程防护措施	个体防护措施	作业条件等级	风险等级
苯						
采气站	5	2	2	1	2.11	轻度危害
水处理站	5	3	2	1	2.34	中度危害
甲苯	5	2	2	1	2.11	无危害
二甲苯	5	2	2	1	2.11	无危害
正己烷	5	2	2	1	2.11	无危害
环己烷	5	2	2	1	2.11	无危害

表 7 ICMM 定量评估法评估结果

Table 7 ICMM quantitative evaluation method assessment results					
毒物名称	C	PrE	PeE	RR 值	风险评级
苯					
采气站	1	0.5	3	1.5	可容忍风险
水处理站	1	6.0	6	36.0	不可容忍风险
甲苯	1	0.5	3	1.5	可容忍风险
二甲苯	1	0.5	3	1.5	可容忍风险
正己烷	1	0.5	3	1.5	可容忍风险
环己烷	1	0.5	3	1.5	可容忍风险

表 8 三种职业健康风险评估方法风险等级对应关系及赋值
Table 8 Correspondence of risk levels and assigned values for three occupational health risk assessment methods

风险水平	综合指数法	职业危害风险指数法	ICMM 定量评估法	赋值
最低	可忽略	无危害	可容忍风险	1
较低	低风险	轻度危害	潜在风险	2
中等	中等风险	中度危害	高风险	3
较高	高风险	高度危害	非常高风险	4
最高	极高风险	极度危害	不可容忍风险	5

表 9 三种风险评估结果等级分布分析

Table 9 Analysis of grade distribution in three risk assessment results			
统计指标	H 值	自由度(df)	P 值
等级分布	12.263	2	0.002

致识别苯是凝析油暴露的首要风险因素,与既往研究存在一定差异^[6,21],主要表现为文献中识别的主要风险因素包含硫化氢。然而本研究所涉油品中不含硫化氢成分。在排除这一地域性组分差异后,本研究识

别出的核心风险因素与既往研究基本一致。方法在风险分级精度、场景区分能力和防控指导意义上存在差异。综合指数法:操作简便,但存在高估的可能。主要是因为该方法危害等级过于依赖物质的固有毒性,而对工程防护措施、实际暴露时长等关键风险量化整合不足,导致其在复杂暴露场景下的分辨率和准确性受限^[22-23]。职业危害风险指数法引入了作业条件等级,整合了暴露人数、接触时间及防护措施等多维信息,场景区分能力良好,能够实现岗位风险差异识别,适用于早期风险筛查与分级管理。改良的 ICMM 定量评估法综合性能表现最优,综合了精准识别气田水处理站的苯暴露为“不可容忍风险”和其他毒物及场所均为“可容忍风险”,依托纯定量计算规避人工主观赋权偏差,能将暴露概率和暴露时间因素与连续性监测数据链接,系统整合毒理阈值及加工作业场景通风、防护、作业频率等多维度指标,输出的风险值物理意义明确、定量精准且可溯源,能更全面表征凝析油相关职业健康的实际程度,且其健康后果的赋值能准确反映不同毒物的权重差异,符合“致癌物优先管理”的基本原则,能够客观揭示不同岗位间的风险差异,为制定差异化、精准化的工程控制、个体防护和管理措施提供了可靠的量化依据。本研究识别出水处理站苯暴露风险较高,建议重点加强该场所局部通风、密闭防护及个体防护等综合措施,并优化凝析油储存和转运环节的工程控制措施。

综上,本研究通过凝析油组分分析、连续监测及多种职业健康评估方法,系统阐明了凝析油作业中

应重点关注的化学毒物,并明确了不同职业健康风险评估方法在天然气开采凝析油暴露场景中的适用性,可为该行业职业健康管理的精准化和科学化提供科学依据。

但受研究区域及对象范围所限,凝析油组分特征与作业场景的代表性有待进一步提升;本研究主要针对 ICMM 法中暴露概率与暴露时间赋值进行优化,对多种化学毒物联合作用的探讨尚不充分,可能在一定程度上低估了劳动者的综合健康风险。

未来研究可扩大研究样本量与监测周期,纳入气象条件、作业方式等关键影响因素,并深入构建多毒物联合暴露风险评估模型,从而更全面、真实地反映凝析油暴露所致的职业健康风险。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] Chen JP, Deng CP, Wang XL, et al. Source of condensate oil in the middle of southern margin, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43 (5): 902 – 913.

[2] 王义凤,李剑,国建英,等. 中国凝析油分布、成藏特征及新成因分类[J]. 天然气地球科学,2024,35(11):1950 – 1960.

Wang YF, Li J, Guo JY, et al. Distribution, accumulation characteristics and new genetic classification of condensate oil in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(11): 1950 – 1960. (In Chinese)

[3] 张烈辉,胡勇,李小刚,等. 四川盆地天然气开发历程与关键技术进展[J]. 天然气工业,2021,41(12):60 – 72.

Zhang LH, Hu Y, Li XG, et al. History and key technological progress of natural gas development in the Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(12): 60 – 72. (In Chinese)

[4] Xiong DM, Han X. Particular pollutants, human health risk and ecological risk of oil – based drilling fluid: a case study of Fuling shale gas field [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2023, 45(3): 981 – 995.

[5] 秦汝男,刘保峰,李旭东,等. 不同类型程序性细胞死亡在苯致血液毒性作用中的研究进展[J]. 现代预防医学,2024,51(8): 1390 – 1395, 1419.

Qin RN, Liu BF, Li XD, et al. Progress of different programmed cell death pathways in benzene induced hematotoxicity[J]. Modern Preventive Medicine, 2024, 51 (8): 1390 – 1395, 1419. (In Chinese)

[6] 吴梅香. 凝析油炼制过程中职业病危害因素的分析与控制[J]. 工业卫生与职业病,2013,39(4):232 – 234.

Wu MX. Analysis and control of occupational hazards in the processing of condensate oil [J]. Industrial Health and Occupational Diseases, 2013, 39(4): 232 – 234. (In Chinese)

[7] Benson C, Dimopoulos C, Argyropoulos CD, et al. Assessing the common occupational health hazards and their health risks among oil and gas workers[J]. Safety Science, 2021, 140(4): 105284.

[8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GBZ/T 298 – 2017 工作场所化学有害因素职业健康风险评估技术导则[S].

北京:中国标准出版社,2017.

National Health and Family Planning Commission of the People’s Republic of China. GBZ/T 298 – 2017 Guidelines for occupational health risk assessment of chemicals in the workplace[S]. Beijing: China Standards Press, 2017. (In Chinese)

[9] Witter RZ, Tenney L, Clark S, et al. Occupational exposures in the oil and gas extraction industry: State of the science and research recommendations[J]. American Journal of Industrial Medicine, 2014, 57(7): 847 – 856.

[10] 广东省职业卫生技术质量控制中心. GDOHTQC 001 – 2020 化学品中挥发性有机组分定性分析和峰面积百分比测定 顶空气相色谱 – 质谱法[S]. 广州:广东省职业病防治院,2020.

Guangdong Occupational Health Technical Quality Control Center. GDOHTQC 001 – 2020 Qualitative analysis of volatile organic compounds and determination of peak area percentage in chemicals—Headspace gas chromatography – mass spectrometry [S]. Guangzhou: Guangdong Provincial Institute of Occupational Disease Prevention and Treatment, 2020. (In Chinese)

[11] 中华人民共和国卫生部. BZ 159 – 2004 工作场所空气中有毒物质监测的采样规范[S]. 北京:人民卫生出版社,2004.

Ministry of Health of the People’s Republic of China. GBZ 159 – 2004 Specifications of air sampling for hazardous substances monitoring in the workplace [S]. Beijing: People’s Medical Publishing House, 2004. (In Chinese)

[12] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 160. 42 – 2007 工作场所空气有毒物质测定 芳香烃类化合物[S]. 北京:人民卫生出版社, 2007.

Ministry of Health of the People’s Republic of China. GBZ/T 160. 42 – 2007 Determination of aromatic hydrocarbons in the air of workplace [S]. Beijing: People’s Medical Publishing House, 2007. (In Chinese)

[13] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GBZ/T 300. 60 – 2017 工作场所空气有毒物质测定 第 60 部分:戊烷、己烷、庚烷、辛烷和壬烷[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

National Health and Family Planning Commission of the People’s Republic of China. GBZ/T 300. 60 – 2017 Determination of toxic substances in workplace air—part 60: pentane, hexane, heptane, octane and nonane[S]. Beijing: China Standards Press, 2017. (In Chinese)

[14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GBZ/T 300. 65 – 2017 工作场所空气有毒物质测定 第 65 部分:环己烷和甲基环己烷[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

National Health and Family Planning Commission of the People’s Republic of China. GBZ/T 300. 65 – 2017 Determination of toxic substances in workplace air—part 65: cyclohexane and methylcyclohexane[S]. Beijing: China Standards Press, 2017. (In Chinese)

[15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GBZ/T 300. 66 – 2017 工作场所空气有毒物质测定 第 66 部分:苯、甲苯、二甲苯和乙苯[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

National Health and Family Planning Commission of the People’s Republic of China. GBZ/T 300. 66 – 2017 Determination of toxic substances in workplace air—part 66: benzene, toluene, xylene and ethylbenzene[S]. Beijing: China Standards Press, 2017. (In Chinese)

[16]

史子春. 综合指数法评价工业卫生工作的探讨[J]. 中国卫生统计, 2002, 19(3): 187 – 188.
Shi ZC. A study on evaluating industrial hygiene work using the comprehensive index method [J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2002, 19(3): 187 – 188. (In Chinese)

[17]

林嗣豪, 王治明, 唐文娟, 等. 职业危害风险指数评估方法的初步研究[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2006, 24(12): 769 – 771.
Lin SH, Wang ZM, Tang WJ, et al. A methodological study on occupational hazard risk index [J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 2006, 24(12): 769 – 771. (In Chinese)

[18]

王思华, 王彭彭, 李宏斌, 等. 基于 5 种风险评估方法评估汽车制造业喷漆和焊接岗位中化学有害因素的职业健康风险[J]. 郑州大学学报(医学版), 2024, 59(3): 409 – 414.
Wang SH, Wang PP, Li HB, et al. Occupational health risk of chemical harmful factors in painting and welding positions in automobile manufacturing industry based on 5 risk assessment methods [J]. Journal of Zhengzhou University (Medical Sciences), 2024, 59(3): 409 – 414. (In Chinese)

[19]

石婷, 王永伟, 王德怡, 等. 4 种风险评估模型在粉尘职业暴露重点行业中的应用研究[J]. 中国卫生工程学, 2021, 20(4): 550 – 554, 558.
Shi T, Wang YW, Wang CY, et al. Application of four risk assessment models in key industries of occupational dust exposure [J]. Chinese Journal of Public Health Engineering, 2021, 20(4): 550 – 554, 558. (In Chinese)

[20]

杨术刚, 王庆吉, 张坤峰, 等. 我国气田采出水处置面临的关键挑战与对策建议[J]. 工业水处理, 2024, 44(8): 13 – 20.
Yang SG, Wang QJ, Zhang KF, et al. Key challenges and countermeasures for treatment and disposal of gas field produced water in China [J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(8): 13 – 20. (In Chinese)

[21]

周艳杰, 刘坤, 邓展飞, 等. 油田生产过程中主要风险因素防范建议[J]. 油气田环境保护, 2014, 24(1): 57 – 59, 62.
Zhou YJ, Chi K, Deng ZF, et al. Suggestions on preventing major risks in oilfield production [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2014, 24(1): 57 – 59, 62. (In Chinese)

[22]

陈林, 赵秋妮, 徐璐, 等. 综合指数法在铅酸蓄电池企业职业健康风险评估中的应用[J]. 中国职业医学, 2024, 51(1): 90 – 93, 98.
Chen L, Zhao QN, Xu M, et al. Application of a comprehensive index method for occupational health risk assessment in lead – acid battery enterprises [J]. China Occupational Medicine, 2024, 51(1): 90 – 93, 98. (In Chinese)

[23]

Li Q, Li X, Qin G, et al. Application and comparison of five risk assessment methods in ferrous metal foundry enterprises with silica dust concentration exceeding the limit posts [J]. Frontiers in Public Health, 2025, 13(3): 1465284.

收稿日期: 2025-12-21

(上接第 2501 页)

[6]

Zhang B, Zhai FY, Du SF, et al. The China health and nutrition survey, 1989 – 2011 [J]. Obesity Reviews, 2014, 15(1): 2 – 7.

[7]

中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. WS/T428 – 2013 成人体重判定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. WS/T428 – 2013 Assessment of adult body weight [S]. Beijing: China Standards Press, 2013. (In Chinese)

[8]

王霞, 王莉, 周荣柱. 基于营养需求的动物性食物消费研究[J]. 中国畜牧业, 2022, (15): 22 – 27.
Wang X, Wang L, Zhou RZ. A study on the consumption of animal – based foods based on nutritional requirements [J]. China Animal Industry, 2022, (15): 22 – 27. (In Chinese)

[9]

陈向宇, 王蒙, 胡如英, 等. 2015 – 2023 年浙江省成年居民超重肥胖流行趋势[J]. 预防医学, 2025, 37(11): 1093 – 1098.
Chen XY, Wang M, Hu RY, et al. Trends in overweight and obesity among adult residents in Zhejiang province, 2015 – 2023 [J]. Preventive Medicine, 2025, 37(11): 1093 – 1098. (In Chinese)

[10]

王鹤璇, 于洁, 李里诗洛, 等. 西昌市社区居民中心性肥胖流行特征与影响因素分析[J]. 现代预防医学, 2022, 49(23): 4241 – 4245.
Wang HX, Yu J, Li LSL, et al. The prevalence characteristics and influencing factors of central obesity among community residents in Xichang City [J]. Modern Preventive Medicine, 2022, 49(23): 4241 – 4245. (In Chinese)

[11]

刘意, 刘琼, 刘慧琳, 等. 2018 年湖南省成人中心性肥胖现状及影响因素分析[J]. 中国慢性病预防与控制, 2024, 32(1): 62 – 64.
Liu Y, Liu Q, Liu HL, et al. Analysis of the current status and determinants of central obesity among adults in Hunan province in 2018 [J]. Chinese Journal of Prevention and Control of Chronic Diseases, 2024, 32(1): 62 – 64. (In Chinese)

[12]

范莉莉, 辛鹏, 李静, 等. 2010 – 2018 年天津市成人超重肥胖率及中心性肥胖率变化情况分析[J]. 中国慢性病预防与控制, 2021, 29(11): 826 – 829.
Fan LL, Xin P, Li J, et al. Trend analysis of overweight and obesity rates and central obesity rate in adults in Tianjin from 2010 to 2018 [J]. Chinese Journal of Prevention and Control of Chronic Diseases, 2021, 29(11): 826 – 829. (In Chinese)

[13]

He YZ, Wang JJ, Wang JN, et al. Influence of Central Obesity on Associations between physical activity, sitting time, and metabolic syndrome among middle – aged and older adults in urban China: a cross – sectional study [J]. Diabetes, metabolic syndrome and obesity: targets and therapy, 2024, 17(1): 2555 – 2569.

收稿日期: 2026-01-27