调查研究
Investigation

常用职业健康风险评估方法在氯乙烯生产企业中的应用

董一文[1]，边洪英[1]，王新刚[2]，胡伟江[1]

1. 中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所职业流行病学与风险评估室，北京 100050
2. 天津市滨海新区疾病预防控制中心职业卫生与放射卫生科，天津 300480

摘要：

[背景] 目前，我国氯乙烯生产企业以电石乙炔法应用最为广泛。因高温高热环境所致氯乙烯单体（VCM）的少量逸散，以及巡视、维修、清釜等岗位的防护措施不佳等因素引发的工人急性中毒或慢性损伤，已成为现今VCM职业接触健康损伤的主要问题。

[目的] 识别VCM生产过程中的重点接触岗位，结合个体接触水平将三种风险评估方法应用于实践并进行比较，了解重点接触岗位的风险水平。

[方法] 通过现场调查和个体接触水平检测了解天津市2家聚氯乙烯（PVC）化工企业（B厂和G厂）中19种VCM相关岗位共35人的接触情况；继而采用半定量综合指数法、半定量接触比值法和定量致癌风险评估法对接触工人开展风险评估，并采用*Kappa*法对三种风险评估法的结果一致性进行检验。

[结果] 35名重点接触岗位工人均为男性，年龄为（40.04±1.03）岁，工龄为6.0（4.0，9.5）年，分别从事VCM合成、聚合外操、分析、清釜、下料、釜维修等VCM生产相关环节。B厂压缩机外操工、聚合外操工、VCM回收工、糊树脂外操工的时间加权平均质量浓度（后称：浓度）（C_{TWA}）较高（60.90~71.30 mg·m^{-3}），达职业接触限值（C_{OEL}=10 mg·m^{-3}）的6~7倍；配制外操工、聚合内操工、合成主控内操工的C_{TWA}为10.50~22.70 mg·m^{-3}，为限值的1~2倍。G厂看釜清釜工在清理反应釜时C_{TWA}达到438.30 mg·m^{-3}，为限值的40余倍，其他岗位的C_{TWA}均低于职业接触限值。半定量综合指数法评估结果显示，各岗位工人处于中等~高风险间；半定量接触比值法评估结果显示，各岗位工人处于低~极高风险间；定量致癌风险评估法结果显示，B厂作业工人处于高~很高风险间，G厂作业工人处于可忽略~很高风险间。一致性检验结果显示，当岗位$C_{TWA} \geqslant C_{OEL}$时，半定量接触比值法结果与定量致癌风险评估法一致性好（K=0.632，P=0.002）。

[结论] PVC生产企业中，VCM合成、压缩、聚合、回收、清釜、糊树脂、维修等生产过程中涉及的岗位为VCM重点接触岗位；依据接触水平和所处环境的差异，岗位风险分别处于中等至极高风险之间；三种风险评估方法各具优势及局限性，在评估过程中结合应用将更有利于充分发挥其优势。

关键词：氯乙烯；职业健康风险评估；方法学；工作场所

Application of common occupational health risk assessment methods in vinyl chloride manufacturing factories

DONG Yi-wen[1], BIAN Hong-ying[1], WANG Xin-gang[2], HU Wei-jiang[1]
(1.Department of Occupational Epidemiology and Risk Assessment, Institute of Occupational Health and Poison Control, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100050, China; 2.Department of Occupational and Radiological Health, Center for Disease Control and Prevention in Bin Hai District of Tianjin, Tianjin 300480, China)

Abstract:

[Background] Nowadays, calcium carbide craft is one of the most widely used method in China's vinyl chloride factories. Nevertheless, the acute or chronic poisoning induced either by small amount of vinyl chloride monomer (VCM) effusion during high-temperature processes or by inadequate protection in specific operation positions like patrolling, maintenance, and kettle clearing have contributed to a large fraction of VCM related occupational health problems.

[Objective] The study is conducted to recognize major exposure positions of VCM manufacturing,

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2020.19870

基金项目
职业健康风险评估与国家职业卫生标准制定项目（131031109000150003）

作者简介
董一文（1986—），男，硕士，助理研究员；
E-mail：dongyw@niohp.chinacdc.cn

通信作者
胡伟江，E-mail：hwj0107@sina.com

利益冲突 无申报
收稿日期 2019-12-16
录用日期 2020-06-16

文章编号 2095-9982(2020)08-0797-07
中图分类号 R13
文献标志码 A

▸引用
董一文，边洪英，王新刚，等.常用职业健康风险评估方法在氯乙烯生产企业中的应用[J].环境与职业医学，2020，37（8）：797-803.

▸本文链接
www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2020.19870

Funding
This study was funded.

Correspondence to
HU Wei-jiang, E-mail: hwj0107@sina.com

Competing interests None declared
Received 2019-12-16
Accepted 2020-06-16

▸To cite
DONG Yi-wen, BIAN Hong-ying, WANG Xin-gang, et al. Application of common occupational health risk assessment methods in vinyl chloride manufacturing factories[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(8): 797-803.

▸Link to this article
www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2020.19870

and understand the occupational health risk levels through the application and comparison of three recommended risk assessment methods.

[Methods] A total of 35 VCM workers from 19 major positions in 2 polyvinyl chloride (PVC) factories (factory B and factory G) in Tianjin City were investigated through field investigation and individual sampling. The occupational health risk levels were subsequently evaluated by semi-quantitative comprehensive index method, semi-quantitative exposure ratio method, and quantitative risk assessment method for carcinogens. Also, methodological differences among the three methods above were tested by *Kappa* conformance test.

[Results] All the 35 workers were male and aged (40.04±1.03) years, with an average working age of 6.0 (4.0, 9.5) years. They were assigned to positions such as VCM synthesis, polymerization, analysis, kettle clearance, material cutting, and machine maintenance. The time-weighted average concentrations (C_{TWA}) in positions like compressor operation, polymerization, VCM recycling, and paste resin in factory B reached very high levels (60.90-71.30 mg·m^{-3}) that were 6-7 folds of the national occupational exposure limits (C_{OEL}=10 mg·m^{-3}); the C_{TWA} in positions of preparation operation, internal polymerization, and synthesis controlling were 1-2 folds of the occupational exposure limits. Meanwhile, the C_{TWA} in factory G was not high, except the concentration in kettle monitoring and clearance position which was as high as 438.3 mg·m^{-3}, over 40 folds of the occupational exposure limit. The results of semi-quantitative comprehensive index method demonstrated that all positions were at medium to high risk levels; the results of semi-quantitative exposure ratio method presented low to extremely high risk levels; the results of quantitative risk assessment method for carcinogens showed positions in factory B were at high to very high risk levels, and positions in factory G were at negligible to very high risk levels. The results of quantitative risk assessment for carcinogens and semi-quantitative exposure ratio method were in a good conformance (K=0.632, P=0.002) when $C_{TWA} \geqslant C_{OEL}$.

[Conclusion] Positions involved in processes such as VCM synthesis, compression, polymerization, recycling, kettle cleaning, paste resin, and maintenance are major exposure positions in PVC production enterprises. Their risk ranks are from medium to extreme high risks according to differences in exposure level and workplace environment. Application of the three different risk assessments in a combined way will certainly play to their strengths as limitations and advantages coexist.

Keywords: vinyl chloride; occupational health risk assessment; methodology; workplace

氯乙烯单体（vinyl chloride monomer，VCM）作为重要的化工原料，主要用途为合成聚氯乙烯（polyvinyl chloride，PVC）。在职业环境中，VCM 蒸汽可通过呼吸道进入体内，或以液体形式经皮肤吸收[1]。研究证实，VCM 靶器官为肝脏，并可引起如肝炎、肝纤维化、肝细胞癌及肝血管瘤等多种肝脏疾病[2]。早在 1987 年，国际癌症研究机构（International Agency for Research on Cancer，IARC）就将 VCM 确定为 I 类致癌物（IA 级）[3]；2002 年，我国也将 VCM 导致的肝血管肉瘤列入职业肿瘤名单[4]。2007 年，IARC 对 VCM 的致癌性再次开展评估，提出 VCM 的职业接触将导致肝血管瘤和肝细胞癌[5]。国内外大量研究也表明，VCM 接触人群的职业健康状况已不容乐观[6]。如 1992 年，刘晓明[7]发现天津市 VCM 作业工人全肿瘤死亡率为 111.66/10 万，未发现肝血管肉瘤；但 VCM 作业工人的肝癌死亡率为 49.64/10 万，占全部肿瘤的 44.44%，居首位。欧洲四国和美国的大型职业流行病学研究发现，VCM 累积接触量与肝血管瘤和肝细胞癌死亡风险间存在剂量-反应关系[8-9]。同时，VCM 作为一种多系统、多器官致癌物，还可诱发如淋巴、造血、神经系统肿瘤及恶性黑色素瘤[10]。如今，许多发达国家引入职业健康风险评估（occupational health risk assessment，OHRA）作为一项有效控制职业危害的手段，已被广泛应用于重点行业风险评估。常用的如美国环保署吸入风险评估法、澳大利亚风险评估法、罗马尼亚风险评估法及国际采矿与金属委员会风险评估法等。但以上方法存在诸如风险等级划分不一致，受主观判断影响及缺乏毒性参考值或应用受限等问题，在我国的应用过程中存在局限性[11-12]。而 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》[13]（后称“标准”）中介绍的定性、半定量及定量风险评估方法符合并适用于我国企业的现场状况。因此，为了对 PVC 生产企业中 VCM 重点接触岗位进行识别，对其风险等级进行了解，为后期接触人群的职业健康监护和风险管理提供基础。本研究采用标准[13]中推荐的半定量综合指数法、半定量接触比值法及定量致癌风险评估法对天津市 2 家 PVC 企业中重点接触岗位开展风险评估。

1 对象与方法

1.1 对象

选取天津市 2 家 PVC 生产企业（简称 B 厂和 G 厂）中 19 种 VCM 接触岗位及其作业工人（共 35 人）作为研究对象。

1.2 方法

1.2.1 职业卫生现场调查 对 2 家企业的工艺流程、岗位名称、防护设施情况、个体防护用品使用情况、应急救援设施及职业卫生管理等信息进行收集。

1.2.2 空气样品的采集 依据 GBZ 159—2004《工作

场所空气中有害物质监测的采样规范》[14]对VCM接触作业工人（35人）开展个体采样。采样过程：将装有100~150 mg·根$^{-1}$的活性炭管连接采样泵（美国SKC pocket pump型采样泵，流量范围50~500 mL·min^{-1}）佩戴于工人前胸上部，进气口接近呼吸带。以流量0.05 L·min^{-1}连续采集两个白班和一个中班（8 h·班$^{-1}$），采集样品共105份（35人，每人3个班次）。

1.2.3 实验室检测分析 依据GBZ/T 160.46—2004《工作场所空气有毒物质测定 卤代不饱和烃类化合物》[15]中的热解析-气相色谱法进行VCM检测；依据GBZ 2.1—2019《工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素》[16]，VCM的时间加权平均容许浓度（permissible concentration-time weighted average, PC-TWA）（均为质量浓度，简称：浓度）为10 mg·m^{-3}。

1.2.4 风险评估法 采用半定量综合指数法、半定量接触比值法及定量致癌风险评估法对VCM接触作业工人开展风险评估。根据IARC将VCM确定为I类致癌物（IA级），结合标准[13]中表F.1的化学有害因素毒性危害特性分级确定VCM的危害等级（hazard rank，HR）为5级；半定量综合指数法的接触等级（exposure rank，ER）依照标准[13]中表F.5并结合现场调查结果给予相应赋值；半定量接触比值法的ER则依据标准[13]中表F.3接触浓度（E）与相应的职业接触限值（occupational exposure limit，OEL，相当于PC-TWA）进行比较，以C_E/C_{OEL}最大值为相应的ER等级；以上两种半定量风险评估法的风险指数（risk，R）均以公式$R=\sqrt{HR \cdot ER}$计算后得出，并参照表F.6中R所对应的风险等级进行结果判定。半定量综合指数法和半定量接触比值法均以R取值1~5分别代表可忽略风险、低风险、中等风险、高风险和极高风险5个等级。定量致癌风险评估法中的致癌吸入超额个人风险（inhalation of excess personal risk，IR）通过公式$IR=(IUR \cdot d \cdot t_E/t_L)$计算。IUR：致癌吸入单位风险值，单位为（μg·m^{-3}）$^{-1}$；d：个人接触剂量，μg·m^{-3}；t_E：接触工龄，年；t_L：终身期望寿命，年。IR的结果与超额风险可接受水平（1×10^{-4}）比较后得出近似于相对危险度的比值，再依据相对危险度的分级标准进行风险等级判定[17]。定量致癌风险评估法的风险判定见表1。

1.2.5 三种风险评估法比较 因三种风险评估法的风险等级判定不完全一致，因此需引入风险比值这一概念进行比较。参考张美辨等[18]的研究方法以风险比值（risk ratio，RR）将各方法的风险指数R进行标准化，即RR=风险因子的等级/模型风险等级总数。再采用5分级法，将RR值≤0.2、~0.4、~0.6、~0.8、~1.0分别记为1级（可忽略风险）、2级（低风险）、3级（中等风险）、4级（高风险）、5级（极高风险）；再依据岗位时间加权平均质量浓度（后简称：浓度）（time weighted average concentration，C_{TWA}），将重点接触岗位工人划分为两组（$<C_{OEL}$和$\geqslant C_{OEL}$），并在不同接触水平范围内分别对三种风险评估方法的标准化RR等级进行统计分析。

表1 定量致癌风险评估法的风险等级判定

Table 1 Risk category of quantitative risk assessment for carcinogens

相对危险度分级	关联强度	风险等级
1.0~	无	可忽略风险
1.2~	弱	低风险
1.5~	中	中等风险
3.0~	强	高风险
>10	很强	很高风险

1.3 统计学分析

本研究采用SPSS 20.0正版统计软件进行分析。以$\bar{x}\pm s$描述呈正态分布的工龄；C_{TWA}及年龄为非正态数据，以中位数、四分位间距描述变量；*Kappa*检验时，以可忽略风险、低风险、中等风险、高风险、极高风险为等级变量，分别统计3种不同方法的一致性，得出K值。K值的参考评价原则：$K>0.75$表示一致性极好，$0.4<K\leqslant0.75$表示一致性好，$0<K\leqslant0.4$表示一致性差，$K\leqslant0$表示一致性很差。

2 结果

2.1 现场调查结果

B厂与G厂均以电石法生产VCM。工艺为将水与破碎电石反应生成乙炔，在氯化汞等催化剂作用下，使乙炔与氯化氢反应产生VCM。重点接触岗位的35名工人均为男性，年龄为（40.04±1.03）岁，工龄为6.0（4.0，9.5）年。各生产车间岗位周工作时间均为48 h。防护措施、应急设施、个体防护用品使用情况详见表2。

2.2 空气样品检测结果

结果显示，B厂压缩机外操工、聚合外操工、VCM回收工、糊树脂外操工的C_{TWA}较高，为职业接触限值（10 mg·m^{-3}）的6~7倍；配制外操工、聚合内操工、合成主控内操工接触水平也超过限值，约为限值的1~2倍。G厂岗位总体接触水平不高，但看釜清釜工在清理反应釜时，C_{TWA}达到438.30 mg·m^{-3}，是限值的40余倍；其他岗位接触水平均低于职业接触限值。见表3。

表 2 两家企业防护措施、应急救援设施和个体防护用品使用情况

Table 2 Protection measures, emergency response facilities, and pesonal protective equipment usage in two factories

企业	防护措施	应急救援设施	个体防护用品使用情况
B	1. 密闭自动化控制系统 2. 通风设施、局部排风设置 3. 机械通风结合自然通风 4. 管道、连接反应釜等连接密闭，防止泄露	1. 中控室设应急医疗柜及应急药品 2. 车间设喷淋洗眼器及使用说明 3. 厂房设 VCM 自动报警装置及报警值 4. 厂房设事故排风装置，有毒物质存放区域密闭设警示线 5. 中控室配置可燃气体检测仪及氧气浓度检测仪 6. 完整应急救援预案	1. 工人日常佩戴安全帽、耳塞或耳罩、防毒口罩或防毒面具 2. 加药作业时佩防酸碱工作服及空气呼吸器 3. 定期更换、维护口罩及耳罩等防护用品
G	1. 自动化控制系统生产装置 2. 设置有毒气体自动报警和联锁 3. 全面通风设施及局部排风	1. 中控室设应急医疗柜及应急药品 2 .VCM 自动报警装置 3. 厂房设事故排风装置 4. 存放区域设警示线，化学物储存区设职业病危害告知卡、警示标识等 5. 完整应急救援预案	1. 工人日常佩戴安全帽、耳塞或耳罩、防毒口罩或防毒面具 2. 加药作业时佩防酸碱工作服及空气呼吸器

2.3 半定量综合指数法风险评估结果

2 家企业的 VCM 内操工、中控内操工及监控内操工因主控室自动化、密闭化良好，有职业卫生培训和应急救援设施（如设应急药品柜、应急预案）等条件，故 ER 为 2 级；而配制、压缩机外操工及 VCM 回收工和看釜清釜工等因 C_E/C_{OEL} 较高，且个体防护措施或职业卫生防护意识不强，故 ER 位于 3~4 级之间。根据公式计算风险指数 R，结果显示，各岗位工人的风险等级处于中等~高风险间。见表 4。

2.4 半定量接触比值法风险评估结果

结果显示，对于周工作时间（t_H）超 40 h 的岗位，其接触比应为 $C_E/(C_{OEL}\cdot f)$ [13] [f 为降低因子，$f=40/t_H\cdot(168-t_H)/128$] 的换算值，当岗位 t_H 为 48 h 时，f 为 0.78。经比值比计算后，合成外操、监控内操、采样分析、加料配制等岗位 ER 处于 1~2 级；VCM 内操、反应釜外操、压缩机外操、聚合外操等岗位 ER 处于 3~5 级，各岗位工人的风险结果处于低~极高风险间。见表 4。

2.5 定量致癌风险评估结果

依据标准 [13] 附录 I 中 VCM 吸入途径的 IUR 为 4.4×10^{-6} $(\mu g\cdot m^3)^{-1}$；同时根据《天津市居民健康状况报告（2018 年度）》[19] 中提及 2018 年天津市居民的终身期望寿命为 81.7 年，通过公式计算结果显示，B 厂各岗位作业工人处于高~很高风险之间，G 厂各岗位作业工人处于可忽略~很高风险间。见表 4。

表 3 两家企业各岗位作业工人接触水平和接触时间

Table 3 Individual exposure levels and exposure durations of workers at different positions in two factories

企业	车间	岗位名称	C_{TWA}/ $(mg\cdot m^{-3})$	接触时间 / $(h\cdot d^{-1})$
B	VCM 车间	VCM 内操工	7.01	6
		压缩机外操工	71.30	3
	聚合车间	聚合外操工	70.30	3
		配制外操工	22.00	6
		聚合内操工	22.70	2
	中试车间	反应釜外操工	8.50	2
		中控内操工	3.30	4
		离心机下料工	7.01	6
		VCM 回收工	67.60	3
	合成与成品车间	合成主控内操工	10.50	2
		糊树脂外操工	60.90	3
G	合成工段	监控内操工	0.52	3
		合成外操工	1.01	3
	聚合工段	看釜清釜工	438.30	2
		五六线外操工	2.21	2
	分析工段	采样分析工	0.62	2
		加料配制工	0.81	4
	维修工段	仪表维修工	0.94	6
	包装工段	成品包装工	0.92	4

[注] VCM：氯乙烯单体；C_{TWA}：时间加权平均浓度。

表 4 三种职业健康风险评估方法的评估结果汇总

Table 4 Results of three occupational health risk assessment methods

企业	岗位名称	半定量综合指数法				半定量接触比值法					定量致癌风险评估法				
		HR	ER	R	风险等级	HR	$C_E/(C_{OEL}\cdot f)$	ER	R	风险等级	t_E/ 年	t_L/ 年	$d/\mu g\cdot m^{-3}$	IR	风险等级
B	VCM 内操工	5	2	3	中等	5	0.90	3	4	高	5	81.7	7.01×10^3	18.9×10^{-4}	很高
	压缩机外操工	5	3	4	高	5	9.14	5	5	极高	6	81.7	71.3×10^3	230.4×10^{-4}	很高
	聚合外操工	5	3	4	高	5	9.01	5	5	极高	9	81.7	70.3×10^3	340.7×10^{-4}	很高
	配制外操工	5	3	4	高	5	2.82	5	5	极高	11	81.7	22.0×10^3	130.3×10^{-4}	很高
	聚合内操工	5	3	4	高	5	2.91	5	5	极高	2	81.7	22.7×10^3	24.4×10^{-4}	很高
	反应釜外操工	5	2	3	中等	5	1.09	4	4	高	5	81.7	8.50×10^3	22.9×10^{-4}	很高
	中控内操工	5	2	3	中等	5	0.42	2	3	中等	4	81.7	3.30×10^3	7.11×10^{-4}	高
	离心机下料工	5	2	3	中等	5	0.90	3	4	高	12	81.7	7.01×10^3	45.3×10^{-4}	很高
	VCM 回收工	5	3	4	高	5	8.67	5	5	极高	15	81.7	67.6×10^3	546.1×10^{-4}	很高
	合成主控内操工	5	3	4	高	5	1.35	4	4	高	13	81.7	10.5×10^3	73.5×10^{-4}	很高
	糊树脂外操工	5	3	4	高	5	7.81	5	5	极高	10	81.7	60.9×10^3	328.0×10^{-4}	很高

续表 4

企业	岗位名称	半定量综合指数法				半定量接触比值法					定量致癌风险评估法				
		HR	ER	R	风险等级	HR	C_E/ (C_{OEL}·f)	ER	R	风险等级	t_E/ 年	t_L/ 年	d/μg·m^{-3}	IR	风险等级
G	监控内操工	5	2	3	中等	5	0.07	1	2	低	9	81.7	0.52×10^3	2.52×10^{-4}	中等
	合成外操工	5	2	3	中等	5	0.13	2	3	中等	6	81.7	1.01×10^3	3.26×10^{-4}	高
	看釜清釜工	5	4	4	高	5	56.19	5	5	极高	4	81.7	438.3×10^3	944.2×10^{-4}	很高
	五六线外操工	5	2	3	中等	5	0.28	2	3	中等	2	81.7	2.21×10^3	2.38×10^{-4}	中等
	采样分析工	5	2	3	中等	5	0.08	1	2	低	2	81.7	0.62×10^3	0.68×10^{-4}	可忽略
	加料配制工	5	2	3	中等	5	0.10	2	3	中等	5	81.7	0.81×10^3	2.18×10^{-4}	中等
	仪表维修工	5	2	3	中等	5	0.12	2	3	中等	6	81.7	0.94×10^3	3.04×10^{-4}	高
	成品包装工	5	2	3	中等	5	0.12	2	3	中等	3	81.7	0.92×10^3	1.40×10^{-4}	低

[注] ER 为接触等级；HR 为危害等级；R 为风险指数；C_E 为个体接触浓度（C_{TWA}）；C_{OEL} 为职业接触限值浓度；f 为降低因子；t_E 为同岗位的平均工龄，年；t_L 为 2018 年天津市户籍居民终身期望寿命 81.7 年；d 为个体接触剂量，μg·m^{-3}；IUR 为致癌吸入单位风险值 [4.4×10^{-6} (μg·m^{-3}) $^{-1}$]。

2.6 三种风险评估法结果比较

表 5 显示三种职业健康风险评估方法的评估结果。一致性检验结果显示，当岗位接触水平为<OEL 时，半定量接触比值法结果与半定量综合指数法结果一致性差（K=0.158，P=0.004），与定量致癌风险评估法结果也表现为一致性差（K=0.161，P=0.165）；半定量综合指数法结果与定量致癌风险评估法结果一致性很差（K=-0.310，P=0.001）；当岗位接触水平为≥C_{OEL} 时，半定量综合指数法结果与半定量接触比值法结果、定量致癌风险评估法结果一致性均很差（K=0.000、-0.121，P<0.01），而半定量接触比值法结果与定量致癌风险评估法的一致性好（K=0.632，P=0.002）。

表 5 三种职业健康风险评估方法评估结果比较

Table 5 Results of comparison of three occupational health risk assessment methods

C_{TWA}	岗位名称	半定量综合指数法		半定量接触比值法		定量致癌风险评估法	
		RR	等级	RR	等级	RR	等级
<C_{OEL}	VCM 内操工	0.6	中等	0.8	高	1.0	极高
	反应釜外操工	0.6	中等	0.8	高	1.0	极高
	离心机下料工	0.6	中等	0.8	高	1.0	极高
	中控内操工	0.6	中等	0.6	中等	0.8	高
	监控内操工	0.6	中等	0.4	低	0.6	中等
	合成外操工	0.6	中等	0.6	中等	0.8	高
	五六线外操工	0.6	中等	0.6	中等	0.6	中等
	采样分析工	0.6	中等	0.4	低	0.2	可忽略
	加料配制工	0.6	中等	0.6	中等	0.6	中等
	仪表维修工	0.6	中等	0.6	中等	0.8	高
	成品包装工	0.6	中等	0.6	中等	0.4	低
≥C_{OEL}	压缩机外操工	0.8	高	1.0	极高	1.0	极高
	聚合外操工	0.8	高	1.0	极高	1.0	极高
	配制外操工	0.8	高	1.0	极高	1.0	极高
	聚合内操工	0.8	高	1.0	极高	1.0	极高
	VCM 回收工	0.8	高	10	极高	1.0	极高
	糊树脂外操工	0.8	高	1.0	极高	1.0	极高
	看釜清釜工	0.8	高	1.0	极高	1.0	极高
	合成主控内操工	0.8	高	0.8	高	1.0	极高

[注] C_{OEL}：职业接触限值浓度即 PC-TWA（10 mg·m^{-3}）。

3 讨论

自 2002 年之后，我国 VCM 职业接触限值由最高容许接触浓度的 30 mg·m^{-3} 调整为 PC-TWA 的 10 mg·m^{-3}，表明随着电石法工艺中自动化密闭生产系统的广泛应用及工人保护意识的提升，工作场所中高浓度 VCM 泄漏或大规模逸散事故的发生已大幅减少。本研究显示，VCM 合成（聚合）外操、内操、分析、清釜、下料、釜维修等为生产过程中重点接触岗位。主要原因是在催化、合成、转化、干燥、回收、清釜等工艺中因高温、高湿作业环境使得 VCM 易挥发逸散，并造成工作地点 VCM 浓度超标，同时超标原因还与场所通风效果不佳或排风量不达标，聚合釜残留挥发等有关。

国外最新研究表明，长期职业接触 VCM，在高接触水平下如>13.95 mg·m^{-3}（5 ppm）可诱发脂肪变性、炎症（脂肪性肝炎）、肝纤维化、肝坏死及肝细胞癌[20]；Hsu 等[21]关于 VCM 致小鼠肾脏损伤的研究显示，VCM 接触可导致小鼠血中尿素氮和肌酸酐的水平增加，并诱发小鼠肾小球硬化症及肾的管状纤维化损伤及肾组织的纤维化及细胞自噬。Anders 等[22]的研究表明，VCM 代谢物氯乙醇将导致体内碳水化合物调节异常及脂肪代谢发生紊乱，最终导致糖原耗尽从而肝脏脂肪发生变性。这可能与氯乙醇启动炎症应答进而增加肝细胞的敏感性，并诱发线粒体损伤有关。Mundt 等[23]于 1973—2013 年间对 35 家北美企业 9 951 名工龄>1 年的接触人群开展队列研究。发现接触人群中共发生 63 例肝血管瘤及 36 例肝细胞癌，且肝癌、肝外胆道癌明显高于其他器官类癌症（标化死亡比为 2.87，95% CI：2.40~3.40）；2010 年，我国台湾地区对 347 名 VCM 接触男工开展的研究发现，接触高浓度 VCM 与肝硬化和肝纤维化间存在明显剂量-反应关系[24]。

因此，识别PVC生产企业中的重点接触岗位并开展风险评估意义重大。本研究中以标准[13]中推荐的三种风险评估法应用于19种VCM接触岗位开展风险评估。结果显示，如监控内操工、采样分析工、加料配制工等C_{TWA}<1/2 C_{OEL}的岗位，其半定量接触比值法风险等级要等于或低于半定量综合指数法评估结果；如VCM内操工、反应釜外操工及离心机下料工这种C_{TWA}处于（0.5~1）C_{OEL}间的岗位，其接触水平已超过工作场所设置有毒气体检测报警仪的警报值（警报值为2 mg·m^{-3}），半定量接触比值法风险等级要比半定量综合指数法评估结果高一个等级。这表明浓度虽符合限值要求，但依然存在职业健康损害风险，同时两种评估方法的*Kappa*检验结果也表现为一致性差；在岗位C_{TWA}较高的情况下，如聚合外操工、压缩机外操工、VCM回收工、糊树脂外操工等，其半定量接触比值法的风险结果明显高于半定量综合指数法结果一个等级，两种评估方法的*Kappa*检验结果也表现为一致性极差。究其原因有以下几点：（1）半定量接触比值法的ER分级主要依赖C_E/（C_{OEL}·f），当C_{TWA}较低时结果就呈现偏低的态势，而当C_{TWA}过高时（如>C_{OEL}），则呈现出半定量接触比值法评估结果高于半定量综合指数法结果的压倒性态势；（2）现场调查发现，低C_{TWA}岗位多集中在自动化、密闭化、职业防护措施完善或室外露天操作为主工作条件下的内操工和配制、采样、维修、包装等岗位，这就使得半定量综合指数评估法的ER评估更基于现场调查与检测的结果，在综合赋值的基础上更贴切地反映出岗位的真实接触等级；（3）企业现场调查结果显示，岗位工人均规范化佩戴防毒口罩、防毒面具等防护用品，因此即使在外暴露较高的情况下，通过佩戴防护用品也可大大降低进入人体内的化学物质量，这也是当C_{TWA}>C_{OEL}时，半定量综合指数评估法通过赋值后的ER计算得出的风险等级略低于半定量接触比值法结果的一个主要原因。

定量致癌风险评估法的IR由IUR、接触水平（d）、工龄（t_E）和该地区的终身期望寿命共同决定。从表4结果可见，岗位中接触水平高、工龄长的个体其风险等级较高。这说明，该方法适用于化学致癌物针对工龄集中的接触人群开展集中健康评估和健康监护。继而经*Kappa*检验后发现，当C_{TWA}<C_{OEL}时，定量致癌风险评估结果与半定量综合指数法、半定量接触比值法结果一致性差；而当C_{TWA}⩾C_{OEL}时，定量致癌风险评估结果与半定量接触比值法结果一致性好（K=0.632，P=0.002）。这可能与35名研究对象的年龄相对集中，且半定量接触比值法与定量致癌风险评估法在以接触剂量或比值比等定量因素决定最终结果的属性上相符合有关。

综上所述，三种风险评估方法各具优势与局限性。半定量接触比值法简单方便，但易受C_E/C_{OEL}影响而导致结果偏高或偏低，较适合对高水平接触岗位进行识别和初筛；定量致癌风险评估法适用于致癌物对重点接触岗位个体实施风险评估和风险管理或对工龄集中接触人群开展集中的健康评估和健康监护；半定量综合指数法结果因充分考虑防护措施、职业卫生管理情况、个体防护用品使用情况及应急救援设施等，其赋值与现场调查情况较为贴近。因此，在开展现场调查的基础上应首先考虑半定量综合指数法。

参考文献

[1] 石先平. 氯乙烯职业病危害及控制的研究进展[J]. 化工管理，2019（20）：69-70.

[2] RAPISARDA V，LORETO C，MALAGUARNERA M，et al. Hepatocellular carcinoma and the risk of occupational exposure[J]. World J Hepatol，2016，8（13）：573-590.

[3] Overall evaluations of carcinogenicity：An updating of IARC monographs volumes 1 to 42[J].IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum Suppl，1987，7：373-376.

[4] 张晓星，张桂云，肖经纬，等. 氯乙烯接触工人肿瘤标志物水平[J]. 卫生研究，2017，46（6）：950-955.

[5] FEDELI U，GIRARDI P，MASTRANGELO G. Occupational exposure to vinyl chloride and liver diseases[J]. World J Gastroenterol，2019，25（33）：4885-4891.

[6] 钟日海. 氯乙烯作业工人职业接触评估[D]. 上海：复旦大学，2009.

[7] 刘晓明. 天津市职业接触氯乙烯工人肿瘤流行病学调查研究[J]. 职业与健康，2002，18（6）：20-22.

[8] WARD E，BOFFETTA P，ANDERSEN A，et al. Update of the follow-up of mortality and cancer incidence among European workers employed in the vinyl chloride industry[J]. Epidemiology，2001，12（6）：710-718.

[9] FEDELI U，MASTROANGELO G. Vinyl chloride industry in the courtroom and corporate influences on the scientific literature[J]. Am J Ind Med，2011，54（6）：470-473.

[10] FEDELI U，GIRARDI P，GARDIMAN G，et al. Mortality from liver angiosarcoma，hepatocellular carcinoma，and cirrhosis

among vinyl chloride workers [J]. Am J Ind Med，2019，62（1）：14-20.

[11] 边国林，王爱红，李晓海，等. 三种职业健康风险评估方法在小型家具制造企业的应用研究 [J]. 预防医学，2017，29（10）：1003-1008.

[12] 吴智君，徐波，江海，等. 三种风险评估模型在二甲基甲酰胺职业健康风险评估中的应用 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志，2016，34（8）：576-580.

[13] 工作场所化学有害因素职业健康风险评估技术导则：GBZ/T 298—2017 [S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[14] 工作场所空气中有害物质监测的采样规范：GBZ 159—2004 [S]. 北京：人民卫生出版社，2006.

[15] 工作场所空气有毒物质测定 卤代不饱和烃类化合物：GBZ/T 160.46—2004 [S]. 北京：中国标准出版社，2004.

[16] 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素：GBZ 2.1—2019 [S]. 北京：中国标准出版社，2019.

[17] 何晓庆，王祚懿，陈强，等. 应用美国EPA吸入风险评估模型评估3家医药化工企业职业健康风险 [J]. 环境与职业医学，2017，34（1）：53-57.

[18] 张美辨，唐仕川. 职业健康风险评估方法学实践应用 [M]. 北京：人民军医出版社，2016：1-29.

[19] 天津市卫生健康委员会. 天津市居民健康状况报告（2018年度）[R]. 天津：天津市卫生健康委员会，2019.

[20] FRULLANTI E，LA VECCHIA C，BOFFETTA P，et al. Vinyl chloride exposure and cirrhosis：a systematic review and meta-analysis [J]. Dig Liver Dis，2012，44（9）：775-779.

[21] HSU YH，CHUANG HC，LEE YH，et al. Induction of fibrosis and autophagy in kidney cells by vinyl chloride [J]. Cells，2019，8（6）：601.

[22] ANDERS LC，LANG AL，ANWAR-MOHAMED A，et al. Vinyl chloride metabolites potentiate inflammatory liver injury caused by LPS in mice [J]. Toxicol Sci，2016，151（2）：312-323.

[23] MUNDT KA，DELL LD，CRAWFORD L，et al. Quantitative estimated exposure to vinyl chloride and risk of angiosarcoma of the liver and hepatocellular cancer in the US industry-wide vinyl chloride cohort：mortality update through 2013 [J]. Occup Environ Med，2017，74（10）：709-716.

[24] LANG AL，CHEN L，POFF GD，et al. Vinyl chloride dysregulates metabolic homeostasis and enhances diet-induced liver injury in mice [J]. Hepatol Commun，2018，2（3）：270-284.

（英文编辑：汪源；责任编辑：丁瑾瑜）

· 告知栏 ·

欢迎关注《环境与职业医学》微信公众号

《环境与职业医学》微信公众号包括“读者”“作者”和“我们”三个主菜单，主要提供稿件状态查询、当期最新内容及稿件撰写要求等内容，同时也发布国内外最新研究动态及发展前沿等资讯，满足读者网络时代碎片化阅读的需求。本平台旨在为编者、作者、读者之间搭建一个分享、学习、互动的平台，以此推动《环境与职业医学》的健康发展。

请直接扫描右侧二维码或在公众号中搜索“环境与职业医学”（微信号：JEOM），即可关注本刊微信公众号。