四种职业健康风险评估模型在某涂料生产企业化学危害因素评价中的应用分析

Comparative study on four models of occupation health risk assessment of chemicals applied in a coating production enterprise

董秋颖[1]，李建国[1]，郝世宾[2]，张杰[2]，徐萍[2]，赵俊琴[1]，李莎[1]，赵春香[1]

（1. 河北省疾病预防控制中心，河北 石家庄 050021；2. 廊坊市疾病预防控制中心）

摘要：选择某涂料生产企业油性涂料生产车间进行现场调查和危害因素检测，应用美国（EPA 模型）、新加坡（MOM 模型）、国际采矿与金属委员会（ICMM 模型）定量法和职业危害风险指数法四种模型进行职业健康风险评估。结果显示，EPA 模型评估二甲苯的非致癌效应结果为极高风险（包装工为高风险），调色工接触甲苯的非致癌效应为低风险。MOM 模型评估铅及其化合物、甲苯和二甲苯的危害结果为低风险。经统计学分析，EPA 模型与 MOM 模型评估结果不一致。ICMM 模型定量法和职业危害风险指数法评估结果均为可忽略风险，与 EPA 模型和 MOM 模型评估结果不一致。MOM 模型评估结果优于其他模型。

关键词：涂料；风险评估模型；一致性检验

中图分类号：R135　　**文献标识码**：B

文章编号：1002-221X(2020)01-0071-04

DOI：10.13631/j.cnki.zggyyx.2020.01.024

油性涂料一般以有机溶剂作分散介质，可产生多种化学有害因素，对人体神经系统、造血系统等产生毒副作用[1]。目前风险评估方法在涂料行业应用较少，本次研究选取美国环境保护署风险评估方法（EPA 模型）、新加坡化学物质职业暴露半定量风险评估法（MOM 模型）、国际采矿与金属委员会职业健康风险评估方法（ICMM 模型）定量法及职业危害风险指数法对某涂料生产企业有关化学因素的危害进行职业健康风险评估，通过比较分析，探讨其适用性，为相关标准或规范的制定提供依据。

1　对象与方法

1.1　对象　某涂料生产企业油性产品生产车间。

1.2　方法

1.2.1　资料收集　对该企业生产工艺、职业危害因素分布、作业人数、个人防护及工程防护措施等情况进行现场调查，并对作业场所主要职业危害因素进行检测。

1.2.2　职业健康风险评估方法[2~5]

1.2.2.1　EPA 模型　本次研究中该模型仅包括非致癌风险评估。非致癌风险估算公式：HQ = EC/RfC，HQ 表示非致癌危害系数，以 1 为上限值，RfC 表示吸入毒性参考值，EC 表示暴露浓度，对多种化学有害因素进行评价时，需计算联合暴露危害指数（HI）。EPA 模型仅有高风险和低风险两种分级，本次研究参考文献［2］将 HQ 分为 1—可忽略风险（HQ < 0.1）、2—低风险（0.1 ~ ）、3—中等风险（0.5 ~ ）、4—高风险（1.0 ~ ）和 5—极高风险（≥ 2.0）5 个等级。

1.2.2.2　MOM 模型　该模型依据化学物质的危害等级（HR）和暴露等级（ER）确定暴露工人的风险水平，Risk = $(HR \times ER)^{1/2}$。对于具有相似健康效应的多种化合物接触时，需考虑联合接触水平。

1.2.2.3　ICMM 模型　该模型可分为定量法和矩阵法。定量法：RR = C×PrE×PeE×U，式中，RR—风险等级；C—后果；PrE—暴露概率；PeE—暴露时间；U—不确定性。

1.2.2.4　职业危害风险指数法　该方法综合考虑工作场所中职业有害因素的危害特性、暴露水平和作业条件，计算暴露工人的风险指数。风险指数 = $2^{健康效应等级} \times 2^{暴露比值}$×作业条件等级。

1.2.3　风险评估结果比较　本文采用风险比值法（risk ratio，RR）比较不同评估方法之间的差异，RR = 风险等级/总风险等级，将 RR ≤ 0.2、~ 0.4、~0.6、~0.8、~1.0分为 1、2、3、4、5 级，分别为可忽略风险、低风险、中等风险、高风险、极高风险[6]。

基金项目：2018 年度河北省医学科学研究重点课题计划（20180935）

作者简介：董秋颖（1989—），女，硕士，医师，研究方向：职业卫生及职业健康风险评估。

通信作者：赵春香，主任医师，E-mail：hbxyy0911@126.com

1.3　统计学分析　采用 SAS 9.1 软件进行统计学分析。风险等级的检验使用加权 *Kappa* 一致性检验，得出 *Kappa* 系数[6, 7]。

2　结　果

2.1　现场调查　油性涂料生产车间主要现场工作人员 101 人，实行每周 5 d、每天 8 h 工作制，全年工作 235 d。油性涂料生产过程大部分经管道运输，仅部分程序需手工加入，工艺流程见图 1。生产过程主要接触的化学因素有铅及其化合物、甲苯、二甲苯、甲醇、丙酮、乙酸乙酯等。

油性涂料生产车间内设有整体换气装置，预混加料口处有除尘装置，砂磨机等大型设备有减震装置。包装工防尘口罩、防毒口罩佩戴率较低（50%），其他工种佩戴率均为 100%。见表 1。详见表 1。

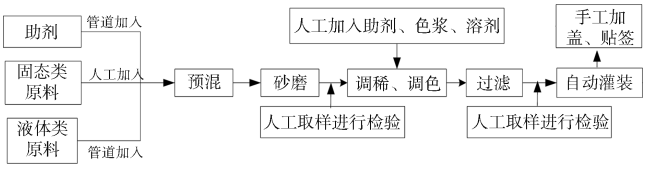

图 1　油性涂料生产工艺

2.2　检测结果　本次研究所有危害因素的检测浓度较低，以时间加权平均浓度（C_{TWA}）/8 h 最大值（接触浓度小于检出限按 1/2 检出限计算）与职业接触限值进行比较，其比值均<1/2。详见表 1。

表 1　粉尘和化学危害因素现场调查及检测结果

工种	职业危害因素	检测范围（mg/m³）	C_{TWA}（mg/m³）	PC-TWA（mg/m³）	平均工龄（年）	暴露时间（h）	暴露人数	个体防护措施佩戴率(%)
预混工	铅及其化合物	<0.004	<0.004	0.05	8.25	2	6	100
	甲苯	1.50	1.50	50	8.25	2	6	100
	二甲苯	8.90~10.00	10.00	50	8.25	2	6	100
	甲醇	<1.3	<1.3	25	8.25	2	6	100
	丙酮	<6.7	<6.7	300	8.25	2	6	100
	乙酸乙酯	0.66~1.32	1.32	200	8.25	2	6	100
砂磨工	甲苯	<1.20~4.80	4.80	50	8.42	2	6	100
	二甲苯	18.60	18.60	50	8.42	2	6	100
	甲醇	<1.3	<1.3	25	8.42	2	6	100
	丙酮	<6.7	<6.7	300	8.42	2	6	100
	乙酸乙酯	3.00~4.40	4.40	200	8.42	2	6	100
调稀工	甲苯	<1.20~5.22	5.22	50	7.57	2	19	100
	二甲苯	<3.30~5.62	5.62	50	7.57	2	19	100
	甲醇	<1.3	<1.3	25	7.57	2	19	100
	丙酮	<6.7~10.4	10.4	300	7.57	2	19	100
	乙酸乙酯	<0.27~5.72	5.72	200	7.57	2	19	100
调色工	甲苯	3.74~18.3	18.3	50	8.80	2	7	100
	二甲苯	4.43~18.21	18.21	50	8.80	2	7	100
	甲醇	<1.3	<1.3	25	8.80	2	7	100
	丙酮	6.2~30.4	30.4	300	8.80	2	7	100
	乙酸乙酯	<0.27~6.68	6.68	200	8.80	2	7	100
包装工	甲苯	<1.20	<1.20	50	5.96	2	18	50
	二甲苯	<3.30	<3.30	50	5.96	2	18	50
	甲醇	<1.3	<1.3	25	5.96	4	18	50
	丙酮	<6.7	<6.7	300	5.96	4	18	50
	乙酸乙酯	1.40~3.00	3.00	200	5.96	4	18	50

2.3　四种模型风险评估结果　EPA 模型仅能评估甲苯、二甲苯和甲醇的非致癌效应，预混工、砂磨工、调稀工和调色工接触二甲苯和联合暴露评估结果为极高风险，包装工接触二甲苯和联合暴露评估结果为高风险，调色工接触甲苯的评估结果为低风险，其他均为可忽略风险，见表 2。MOM 模型评估结果显示，铅及其化合物、甲苯、二甲苯的结果均为低风险，其他为可忽略风险，联合暴露的评估结果均为低风险，见表 2。ICMM 模型定量法和职业危害风险指数法评估结果均为可忽略风险。

表 2　EPA 和 MOM 模型风险评估结果

工种	职业危害因素	EPA 模型						MOM 模型				
		EC(μg/m³)	RfC(μg/m³)	HQ/HI	Risk	RR	RR 等级	HR	ER	Risk	RR	RR 等级
预混工	铅及其化合物	—	—	—	—	—	—	4	1	2	0.4	低
	甲苯	80.479	5 000	0.016	1	0.2	可忽略	3	1	2	0.4	低
	二甲苯	536.530	100	5.365	5	1	极高	3	1	2	0.4	低
	甲醇	21.461	20 000	0.001	1	0.2	可忽略	2	1	1	0.2	可忽略
	丙酮	—	—	—	—	—	—	2	1	1	0.2	可忽略
	乙酸乙酯	—	—	—	—	—	—	2	1	1	0.2	可忽略
	联合暴露#	—	—	5.382	5	1	极高	3	1	2	0.4	低
砂磨工	甲苯	257.534	5 000	0.052	1	0.2	可忽略	3	1	2	0.4	低
	二甲苯	997.945	100	9.979	5	1	极高	3	1	2	0.4	低
	甲醇	37.557	20 000	0.002	1	0.2	可忽略	2	1	1	0.2	可忽略
	丙酮	—	—	—	—	—	—	2	1	1	0.2	可忽略
	乙酸乙酯	—	—	—	—	—	—	2	1	1	0.2	可忽略
	联合暴露#	—	—	10.033	5	1	极高	3	2	2	0.4	低
调稀工	甲苯	280.068	5 000	0.002	1	0.2	可忽略	3	1	2	0.4	低
	二甲苯	301.530	100	3.015	5	1	极高	3	1	2	0.4	低
	甲醇	32.192	20 000	0.002	1	0.2	可忽略	2	1	1	0.2	可忽略
	丙酮	—	—	—	—	—	—	2	1	1	0.2	可忽略
	乙酸乙酯	—	—	—	—	—	—	2	1	1	0.2	可忽略
	联合暴露#	—	—	3.019	5	1	极高	3	1	2	0.4	低
调色工	甲苯	981.849	5 000	0.196	2	0.4	低	3	1	2	0.4	低
	二甲苯	977.021	100	9.770	5	1	极高	3	1	2	0.4	低
	甲醇	37.557	20 000	0.002	1	0.2	可忽略	2	1	1	0.2	可忽略
	丙酮	—	—	—	—	—	—	2	1	1	0.2	可忽略
	乙酸乙酯	—	—	—	—	—	—	2	1	1	0.2	可忽略
	联合暴露#	—	—	9.968	5	1	极高	3	2	2	0.4	低
包装工	甲苯	64.383	5 000	0.013	1	0.2	可忽略	3	1	2	0.4	低
	二甲苯	177.055	100	1.771	4	0.8	高	3	1	2	0.4	低
	甲醇	69.749	20 000	0.003	1	0.2	可忽略	2	1	1	0.2	可忽略
	丙酮	—	—	—	—	—	—	2	1	1	0.2	可忽略
	乙酸乙酯	—	—	—	—	—	—	2	1	1	0.2	可忽略
	联合暴露#	—	—	1.787	4	0.8	高	3	1	2	0.4	低

注：#，指甲苯、二甲苯、甲醇、丙酮、乙酸乙酯的联合暴露。

2.4　风险评估结果比较　ICMM 模型和职业危害风险指数法风险比值评估结果一致，均为可忽略风险。将四种方法风险比值评估结果进行一致性检验，EPA 模型与 MOM 模型评估结果不一致（$Kappa = 0.24$，P

=0.09)，EPA 模型与 ICMM 模型和职业危害风险指数法评估结果不一致（$Kappa < 0.01$，$P > 0.10$），MOM 模型与 ICMM 模型和职业危害风险指数法评估结果不一致（$Kappa<0.01$，$P>0.10$）。

3 讨 论

本次研究化学因素的暴露浓度均较低，但 EPA 模型和 MOM 模型均显示有不同程度的风险/危害。有研究发现[8]，工作场所有害物质即使符合国家标准，也仍然存在一定的健康风险，提示在危害因素浓度低于接触限值时，职业健康风险评估模型可区分职业危害严重性，有助于企业早期整改，保护劳动者健康。

EPA 模型评估范围较窄，仅能评估部分化学因素，且评估结果高于其他模型，其中二甲苯暴露浓度远远低于职业接触限值，EPA 模型评估结果明显高于其他模型。主要原因是模型中 RfC 值设置了足够的安全边际值，考虑到保护所有人群（包括潜在的敏感人群，如孕妇、婴儿等），经长期的暴露接触而不会对身体健康产生可感知的危害[9]，具有综合考虑因素全面、方法科学细致、健康后果具体等优点，能客观反映化学品吸入暴露人群健康危害的实际状况[10]。其指标设置较严格，适用于针对职业病化学危害因素严格管控的风险评估，且对相关标准或接触限值的制定具有较大的指导意义。

MOM 模型、ICMM 模型定量法和职业危害风险指数法评估化学因素的种类较全面，统计学结果显示 MOM 模型与 ICMM 模型定量法和职业危害风险指数法风险比值结果不一致，MOM 模型评估铅及其化合物、甲苯、二甲苯及联合暴露结果均为低风险，高于 ICMM 模型定量法和职业危害风险指数法。研究显示[11]，MOM 模型指标划分标准较客观，综合考虑了化学物质的危害等级、暴露时间、频率以及接触限值等因素，可操作性和实用性较强，对低浓度化学因素风险评估的敏感性高于其他两种模型方法。

当化学因素联合作用时，其对作业工人的影响要高于单一因素[12]。EPA 模型和 MOM 模型可评估危害的联合暴露水平。本次研究尚未发现联合暴露危害评估结果高于单一因素的最大评估结果。

综上所述，四种模型均可应用于该企业化学因素职业健康风险评估。EPA 模型和 MOM 模型可将低浓度化学因素对健康的风险评估进行分类，其中 EPA 模型指标设置较严格，适用于针对职业病化学危害因素严格管控的风险评估。本次研究 MOM 模型评估结果更有助于企业的管理，优于其他模型，但还需开展更加广泛的适用性研究加以验证。

参考文献

[1] 李青. HACCP 体系在某涂料化工生产企业职业病危害控制效果评价中的应用 [J]. 广东化工，2018，45 (6)：60-61，110.

[2] 张美辨，唐仕川. 职业健康风险评估方法学实践与应用 [M]. 北京：人民军医出版社，2016：6.

[3] US Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund Volume Ⅰ: Human health evaluation manual (Part F, supplemental guidance for inhalation risk assessment) [EB/OL]. 2019-02-27. https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-rags-part-F.

[4] Ministry of Manpower (Singapore). A Semi-quantitative Method to Assess Occupational Exposure to Harmful Chemicals [R]. Ministry of Manpower Occupational Safety and Health Division, 2005.

[5] International Council on Mining and Metals (ICMM). Good practice guidance on occupational health risk assessment [EB/OL]. 2019-02-27. http://www.icmm.com/gpg-occupational-health.

[6] 边洪英，康宁，董一文，等. 三种半定量风险评估方法在矽尘暴露岗位风险等级划分中的比较 [J]. 中国工业医学杂志，2019，32 (3)：167-171.

[7] 郭轶斌，郭威，秦宇辰，等. 基于 Kappa 系数的一致性检验及其软件实现 [J]. 中国卫生统计，2016，33 (1)：169-170，174.

[8] 赵冲，刘中洋. 油漆涂料中苯系物对接触人员健康状况影响的研究进展 [J]. 职业与健康，2019，35 (9)：1286-1289.

[9] 韩丽芳，余晓峰，谢凯蕾，等. 美国 EPA 吸入风险评估模型在荧光灯制造企业汞职业健康风险中的应用 [J]. 预防医学，2017，29 (6)：625-628.

[10] 冷朋波，边国林，王爱红，等. 美国 EPA 吸入风险模型在木质家具制造企业职业健康风险评估中的应用 [J]. 环境与职业医学，2014，31 (11)：858-862.

[11] 陈培仙，张海，凌伟洁，等. 某制鞋企业职业健康风险 2 种方法评估结果比较 [J]. 中国职业医学，2018，34 (6)：849-853.

[12] 毛伟峰，隋海霞，刘爱东，等. 累积风险评估方法在典型人群饮料中铅和镉联合暴露评估中的应用 [J]. 中国食品卫生杂志，2018，30 (3)：307-311.

（**收稿日期**：2019-03-12；**修回日期**：2019-10-18）

欢迎投稿、订阅、发布广告