调查研究
Investigation

我国职业病危害作业分级和 EPA 吸入风险模型在接苯作业健康风险评估中的应用

徐守香[1]，王博深[1,2]，韩磊[2]，周燕华[1]，邢彩虹[3]，朱宝立[1,2]，浦跃朴[1]，张娟[1]

1. 东南大学公共卫生学院，环境医学工程教育部重点实验室，江苏 南京 210000
2. 江苏省疾病预防控制中心职业病防治所，江苏 南京 210000
3. 中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所，北京 100050

摘要：

[背景] 苯是Ⅰ类致癌物，作为一种重要的生产原料应用于各行各业，工业企业中接触苯的人数居高不下。针对工作场所存在的苯这一职业有害因素，迫切需要运用风险评估模型评价其对劳动者健康损害的严重程度，提出预防或者控制措施，降低职业健康风险。

[目的] 应用我国职业病危害作业分级和美国环境保护署（EPA）吸入风险模型评估江苏省某造漆厂苯接触工人职业健康风险，探讨两种模型的适用性及各自的优势。

[方法] 于2018年3月收集江苏省某造漆厂各岗位苯接触人群的调查问卷（使用的化学原料、岗位人员分布、个人防护用品使用）以及各岗位作业场所环境中苯浓度的监测数据，采用我国工作场所职业病危害作业分级标准以及美国EPA吸入风险评估模型对苯接触人群进行职业健康风险评估。

[结果] 该厂苯职业接触人群主要分布在包装、调漆和调色岗位。各岗位苯接触8 h时间加权平均浓度（C_{TWA}）均小于8 h时间加权平均容许浓度（*PC*-TWA，为6 mg·m^{-3}），短期接触平均浓度（C_{STEL}）也均小于短期接触容许浓度（*PC*-STEL，为10 mg·m^{-3}），工作场所职业病危害作业分级评分指数（*G*）≤1为0级（相对无害作业）。但由于不同岗位苯接触浓度差别较大，应用EPA吸入风险评估模型，各岗位工人随着暴露年限的增加出现不同程度的致癌和非致癌风险。苯暴露C_{TWA}最高的岗位是调色岗，高达4 100 μg·m^{-3}。接苯作业1年时，所有岗位工人的致癌风险（*Risk*）均大于1×10^{-6}，为中致癌风险；其中，调色岗致癌风险最大，*Risk*为（32.22~114.23）×10^{-6}。接苯作业5年时，调色岗、调漆岗和包装岗出现高致癌风险，*Risk*为（102.16~571.16）×10^{-6}。接苯作业20年时，除化验岗位外其他岗位均出现高致癌风险。另外，各岗位危害商数（*HQ*）也均远高于1，其中包装岗和调色岗的非致癌效应风险较大，*HQ*为25.39~37.44。

[结论] 依据我国职业病危害作业分级标准，该涉苯企业在此暴露浓度下职业病危害风险为0级（相对无害）；依据美国EPA模型，各岗位出现中等到高等水平的健康风险。因此苯的职业病危害作业分级均为0级时，仍应考虑实际接触浓度的致癌性和非致癌性的健康效应，重视苯接触职业人群的健康防护。

关键词：苯；风险评估；职业健康风险；职业病危害作业分级；EPA吸入风险模型

Application of China's occupational disease hazard classification and EPA inhalation risk model in health risk assessment of work exposed to benzene

XU Shou-xiang[1], WANG Bo-shen[1,2], HAN Lei[2], ZHOU Yan-hua[1], XING Cai-hong[3], ZHU Bao-li[1,2], PU Yue-pu[1], ZHANG Juan[1] (1.Key Laboratory of Environmental Medicine Engineering of Ministry of Education, School of Public Health, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210000, China; 2.Institute of Occupational Disease Control, Jiangsu Provincial Center for Disease Control and Prevention, Nanjing, Jiangsu 210000, China; 3.National Institute of Occupational Health and Poison Control, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100050, China)

Abstract:

[Background] Benzene is a group Ⅰ carcinogen. With the wide use of benzene as an important production material in various industries, the number of workers exposed to benzene remains high. There is an urgent need to evaluate workers' health damage caused by occupational

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2020.19640

基金项目
国家自然科学基金项目（81573120，81872645）；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
徐守香（1993—），女，硕士生；
E-mail：xusx202011@126.com

通信作者
张娟，E-mail：101011288@seu.edu.cn

利益冲突 无申报
收稿日期 2019-09-20
录用日期 2020-02-11

文章编号 2095-9982(2020)04-0379-06
中图分类号 R134+.1
文献标志码 A

▸引用
徐守香，王博深，韩磊，等. 我国职业病危害作业分级和EPA吸入风险模型在接苯作业健康风险评估中的应用［J］. 环境与职业医学，2020，37（4）：379-384.

▸本文链接
www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2020.19640

Funding
This study was funded.

Correspondence to
ZHANG Juan, E-mail: 101011288@seu.edu.cn

Competing interests None declared
Received 2019-09-20
Accepted 2020-02-11

▸To cite
XU Shou-xiang, WANG Bo-shen, HAN Lei, et al. Application of China's occupational disease hazard classification and EPA inhalation risk model in health risk assessment of work exposed to benzene[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(4): 379-384.

▸Link to this article
www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2020.19640

benzene exposure in the workplace, and propose preventive and control measures to reduce the occupational health risk of benzene.

[Objective] This study evaluates the occupational health risks of workers exposed to benzene in a paint factory in Jiangsu Province by China's occupational hazard classification and US Environmental Protection Agency (EPA) inhalation risk assessment model, and discusses their applicability and advantages.

[Methods] Questionnaires about chemical raw materials, worker distribution, and personal protective equipment usage were distributed among the workers exposed to benzene at various workstations in a paint factory in Jiangsu Province and the workplace monitoring data of benzene concentrations were collected in March 2018. China's occupational hazard classification and US EPA inhalation risk assessment model were used to evaluate the occupational health risks of workers exposed to benzene.

[Results] The occupational benzene-exposed workers were mainly distributed in packing, paint mixing, and color palette workstations. The concentration of 8 h time weighted average (C_{TWA}) of each workstation was less than the permissible concentration-time weighted average (*PC*-TWA, 6 mg·m^{-3}), the concentration of short-term exposure limit (C_{STEL}) was less than the permissible concentration-short-term exposure limit (*PC*-STEL, 10 mg·m^{-3}), and result graded by China's occupational hazard classification was $G \leqslant 1$ (Grade 0), indicating relative harmless work. However, due to the large difference in benzene exposure concentrations in different workstations, the results graded by EPA inhalation risk assessment model showed varied carcinogenic and non-carcinogenic risks with the extension of exposure years. The highest C_{TWA} of benzene exposure was 4 100 μg·m^{-3} in the color palette workstation. The carcinogenic risks (*Risk*) of workers in the selected workstations all exceeded 1×10^{-6} after they were exposed to benzene for 1 year, indicating medium carcinogenic risks; among them, the highest carcinogenic risk (*Risk*) was (32.22-114.23)×10^{-6} in the color palette workstation. When they were exposed to benzene for 5 years, high carcinogenic risks occurred in the color palette, paint mixing, and packaging workstations, and the *Risk* values were (102.16-571.16)×10^{-6}. When they were exposed to benzene for 20 years, all workstations except the testing workstation had high carcinogenic risks. The hazard quotients (*HQ*) of the selected workstations were much higher than 1; among them, the non-carcinogenic risks were higher in the packing and color palette workstations, and their *HQ* values were 25.39-37.44.

[Conclusion] According to China's occupational hazard classification standards, the benzene-related factory's occupational hazard risk at reported exposure concentration is grade 0 (relatively harmless). According to the US EPA model, all workstations show medium to high health risks. Therefore, even the result generated by China's occupational hazard classification is grade 0, we should consider the carcinogenic and non-carcinogenic health effects of benzene exposure in real workplace settings, and pay attention to the health protection of occupational benzene-exposed population.

Keywords: benzene; risk assessment; occupational health risk; occupational hazard classification; EPA inhalation risk assessment model

苯是国际癌症研究机构（International Agency for Research on Cancer，IARC）确认的人类致癌物[1]，是导致白血病的病因之一[2]，1987 年我国将苯致白血病确定为职业性肿瘤。随着苯作为重要的生产原料应用于各行各业，苯接触职业人群越来越多。2014 年以来，我国每年新发病的苯中毒病例居慢性职业中毒人数的第二位，苯所致白血病居职业性肿瘤首位[3]。苯对于人类造血系统的损害一直是许多研究领域的热点，尤其是在职业卫生领域[4]。苯急性接触案例比较少见，长期慢性低剂量（<3.25 mg·m^{-3}）苯接触以造血系统的损害尤为显著[5-7]，早期以白细胞减少的血象变化最常见。

风险评估是指在风险事件发生之前或之后，对于其可能致人们的生命、财产等各方面的影响和损失的可能性进行量化评估，通过分析发现存在的风险因素，从而能够采取针对性的措施以达到降低风险的目的[8]。根据新修订的《职业病防治法》，职业危害风险评估是卫生部门的一项职责。我国目前通常依据作业场所职业病危害分级标准进行评估[9]，其影响因素包括化学物的危害程度、化学物的职业接触比值和劳动者的体力劳动强度。美国环境保护署（Environmental Protection Agency，EPA）吸入风险评估模型（以下简称“EPA 模型”）[10]是美国 EPA 发布的《个人健康风险评估手册 F 部分：吸入风险评估补充指南》推荐的定量和定性相结合的风险评估方法，包括致癌性风险评估和非致癌性风险评估两方面。

苯职业接触危害的风险评估受多种因素影响，包括工作场所环境中的苯浓度、工作时间、劳动强度和个体防护措施等。本研究选取江苏省某造漆厂的苯接触工人为研究对象，开展职业接触情况问卷调查以及现场环境监测，应用我国工作场所职业病危害作业分级标准和 EPA 模型对该厂苯接触人群进行职业健康风险评估，探索两种风险评估模型在接苯人群职业健康风险评估中的适用性及各自的优势。

1 对象与方法

1.1 研究对象

2018 年 3 月对江苏省某造漆厂不同岗位接苯人群进行问卷调查，经统一培训的调查员对生产流程，使用的化学原料，可能产生的有害物质及岗位人员分

布，个人防护用品使用等信息逐一询问。

1.2 作业场所苯浓度监测方法

依据GBZ 159—2004《工作场所空气中有害物质监测采样规范》进行布点[11]；按照GBZ/T 160—2007《工作场所空气有毒物质测定 芳香烃类化合物》[12]监测空气中苯的浓度。即对该厂各个岗位以相同的时间间隔取样，连续采样3个工作日。并根据我国苯的职业接触限值（occupational exposure limits，OELs）：8 h时间加权平均容许浓度（permissible concentration-time weighted average，*PC*-TWA）为6 mg·m^{-3}，短期接触平均容许浓度（permissible concentration-short term exposure limit，*PC*-STEL）为10 mg·m^{-3} [12]判定各岗位浓度是否合格。

1.3 我国工作场所职业病危害作业分级标准

按照GBZ/T 229—2010《工作场所职业病危害作业分级 第2部分：化学物质》[13]进行职业病危害作业分级。有毒有害化学品的危害分类指数计算公式：$G=W_B\times W_D\times W_L$。其中$G$是评分指数；$W_B$是工作场所空气中化学物职业接触比值的权重，根据GBZ 2.1—2007《工作场所危害的职业接触限值 第1部分：化学危害》[14]确定；W_D是化学物危害程度级别的权重，化学物的危害程度根据GBZ 230—2010《职业接触毒物危害分类》[15]进行分级；W_L是劳动者体力劳动强度的权重，体力劳动强度的水平根据GBZ/T 189.10—2007《工作场所物理因素的测量 第10部分：体力劳动分类》[16]分类。见表1。

表1 我国职业病危害作业分级标准的指标及其权重取值

指标	分类	权重（*W*）
职业接触比值（*B*）	≤1	0
	>1	B
化学物的危害程度（*D*）	轻度危害	1
	中度危害	2
	重度危害	4
	极重度危害	8
体力劳动强度（*L*）	Ⅰ（轻）	1.0
	Ⅱ（中）	1.5
	Ⅲ（重）	2.0
	Ⅳ（极重）	2.5

[注] 职业接触比值*B*的计算公式：$B=\frac{C_{TWA}}{PC\text{-}TWA}$。

根据评分指数G值的大小，我国职业病危害作业分为4级，即：$G\leqslant1$，为0级（相对无害作业）；$1<G\leqslant6$，为Ⅰ级（轻度危害作业）；$6<G\leqslant24$，为Ⅱ级（中度危害作业）；$G>24$，为Ⅲ级（高度危害作业）。

1.4 EPA模型

1.4.1 致癌风险评估的计算过程

（1）暴露浓度：$EC=(CA\times ET\times EF\times ED)/AT$。式中，$EC$为暴露期间的平均暴露浓度，单位为μg·m^{-3}；CA为工作场所中有毒有害物质的浓度，即时间加权平均浓度（concentration-time weighted average，C_{TWA}）、短期接触平均浓度（concentration-short term exposure limit，C_{STEL}），单位为μg·m^{-3}；ET为每日暴露时间，单位为h·d^{-1}；EF为每年暴露频率，单位为d·年$^{-1}$；ED为暴露周期，单位为年；AT为平均暴露工龄的小时数，单位为h，即AT=期望寿命×365×24。（2）致癌风险：$Risk=IUR\times EC$。式中，$Risk$为致癌风险；IUR为吸入单位风险（又称斜率系数），单位为（μg·m^{-3}）$^{-1}$，指连续暴露于1 μg·m^{-3}空气化学物中所引起的超过一生癌症危险度估算值的上限值。可通过美国EPA的综合风险信息系统（Integrated risk information system，IRIS）数据库查询获得IUR数值，网址为http://www.epa.gov/iris/index.html。

$Risk\geqslant100\times10^{-6}$为高致癌风险，$1\times10^{-6}\leqslant Risk<100\times10^{-6}$为中致癌风险，$Risk<1\times10^{-6}$为无致癌风险。因为计算公式$IUR$为（2.2~7.8）×10^{-6}（μg·m^{-3}）$^{-1}$，故$Risk$有最大值和最小值。实际风险判断中，若$Risk$的最大值小于1×10^{-6}为无致癌风险，$Risk$的最小值大于等于100×10^{-6}为高致癌风险，中间为中致癌风险。

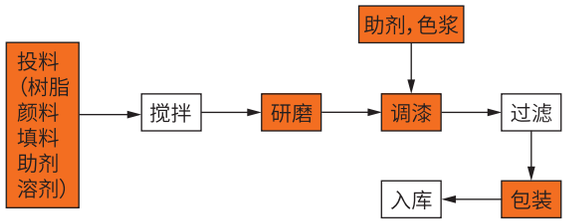
1.4.2 非致癌风险评估的计算过程

（1）如果是急性暴露（<24 h），则$EC=CA$；如果是慢性或亚慢性暴露（≥24 h），则$EC=(CA\times ET\times EF\times ED)/AT$。式中，$EC$为暴露浓度，单位为μg·m^{-3}；$CA$为空气中污染物浓度，单位为μg·m^{-3}；$ET$为暴露时间，单位为h·d^{-1}；$EF$为每年暴露频率，单位为d·年$^{-1}$；$ED$为暴露周期，单位为年；$AT$为平均暴露工龄的小时数，单位为h，即$AT=ED\times365\times24$。（2）危害商数：$HQ=EC/Rfc$。式中，$Rfc$为吸入毒性参考值，单位为μg·m^{-3}。可通过美国EPA的IRIS数据库（http://www.epa.gov/iris/index.html）查询获得Rfc数值。HQ以1为分界值，如果$HQ\geqslant1$，则健康风险较大；如果$HQ<1$，则健康风险较小。

2 结果

2.1 工艺流程

由于现场和实验条件的限制，现场监测的危害因素是各岗位苯浓度，且各岗位空气互通。整个工艺流程见图1。



[注] ■表示产苯环节，□表示非产苯环节。

图1 造漆厂生产工艺流程图

2.2 企业现场调查结果

根据现场调查，公司在防尘、防热等工业卫生防治设施，工厂布局，配电系统等方面设计合理，基本符合中国职业卫生相关规定。包装工占该厂总职工人数的45.83%，未发现不佩戴呼吸防护用品的工人；公司每年对员工进行职业健康检查，体检率超过95%；工厂以局部通风为主，生产过程中使用的稀释剂是苯及苯系物的主要来源。结果见表2。

表2 2018年造漆厂各岗位人员的基本信息

岗位	调查人数	通风措施	通风效果	呼吸防护用品的佩戴情况	呼吸防护用品的使用率/%	暴露的苯系物	使用含苯原料
包装	11	局部通风	一般	活性炭口罩或其他	100	苯、甲苯、二甲苯、乙苯	稀释剂
研磨	3	局部通风	一般	活性炭口罩或其他	100	苯、甲苯、二甲苯、乙苯	稀释剂
调漆	2	局部通风	一般	活性炭口罩或其他	100	苯、甲苯、二甲苯、乙苯	稀释剂
投料	3	局部通风	一般	活性炭口罩或其他	100	苯、甲苯、二甲苯、乙苯	稀释剂
调色	3	局部通风	一般	活性炭口罩或其他	100	苯、甲苯、二甲苯、乙苯	稀释剂
化验	2	局部通风	一般	活性炭口罩或其他	100	苯、甲苯、二甲苯、乙苯	稀释剂

2.3 不同岗位环境中的苯浓度以及我国职业病危害作业分级结果

各岗位苯的监测浓度均未超过OELs，结果均合格，其中苯浓度相对较高的岗位是包装岗和调色岗。根据职业病危害分级标准计算得出，G≤1为0级（相对无害作业）。结果见表3。

表3 不同岗位检测的苯浓度和苯接触工人的职业病危害作业分级结果

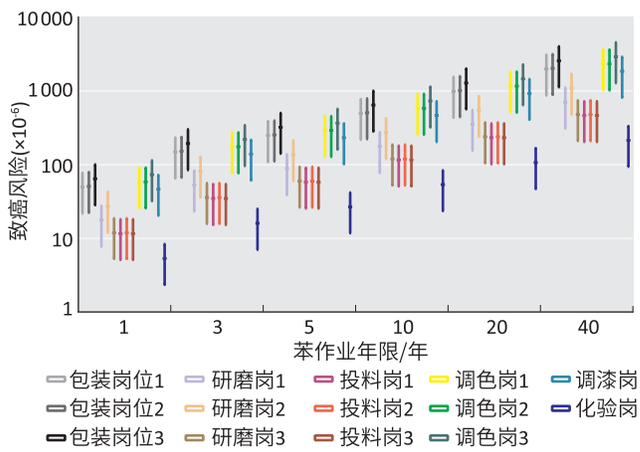
岗位	3 d连续采样结果/mg·m^{-3}（$\bar{x}\pm s$）	8 h时间加权平均浓度 C_{TWA}/mg·m^{-3}	短期接触平均浓度 C_{STEL}/mg·m^{-3}	判定结果	职业病危害分级
包装岗1	2.78±0.24	2.74	3.01	合格	0
包装岗2	2.84±0.70	2.84	3.62	合格	0
包装岗3	3.61±2.10	3.61	6.03	合格	0
研磨岗1	0.99±0.20	0.76	1.13	合格	0
研磨岗2	1.53±1.13	1.53	2.81	合格	0
研磨岗3	0.67±0.32	0.67	0.88	合格	0
调漆岗	2.60±0.13	1.30	2.75	合格	0
投料岗1	0.65±0.60	0.65	1.34	合格	0
投料岗2	0.67±0.65	0.67	1.42	合格	0
投料岗3	0.65±0.61	0.65	1.36	合格	0
调色岗1	3.28±0.99	3.28	4.41	合格	0
调色岗2	3.27±0.76	3.27	4.10	合格	0
调色岗3	4.10±1.61	4.10	5.63	合格	0
化验岗	0.30±0.00	0.30	0.30	合格	0

[注] 判定结果为合格的依据为 C_{TWA}<6 mg·m^{-3} 和 C_{STEL}<10 mg·m^{-3}，否则均为不合格。

2.4 应用EPA模型评估不同岗位的致癌风险

各岗位在此暴露浓度下连续作业1~40年，依据EPA模型进行定量和定性的致癌风险评估。苯暴露 C_{TWA} 最高的岗位是调色岗，高达4 100 μg·m^{-3}。*Risk* 计算中，暴露频率（*EF*）=365-52×1（单休日）-11（法定假期）=302 d，考虑实际病假因素，取300 d；国家卫生健康委员会发布的《2017年中国卫生健康事业发展统计公报》显示，2017年中国居民人均预期寿命为76.7岁；*IUR*=（2.2~7.8）×10^{-6}（μg·m^{-3}）$^{-1}$。

图2显示，苯作业年限为1年时，所有岗位工人的致癌风险 *Risk* 均大于1×10^{-6}，为中致癌风险；其中，中致癌风险最大的是调色岗，*Risk* 为（32.22~114.23）×10^{-6}。苯作业年限为5年时，调漆岗、调色岗和包装岗出现高致癌风险，*Risk* 为（102.16~571.16）×10^{-6}。苯作业年限为20年时，除化验岗外其他岗位均出现高致癌风险。



[注] 直条两端分别表示致癌风险 *Risk* 的最大值和最小值，中间点是中位数。

图2 不同岗位工作年限与致癌风险的关系

2.5 应用EPA模型评估不同岗位的非致癌风险

该企业工人长期处在低浓度苯暴露的环境中，应按照慢性或者亚慢性的非致癌暴露浓度进行估算。各

岗位 *HQ* 均高于 1，最大值为 37.44，非致癌效应的风险较大。*HQ* 大小的决定性因素是苯暴露浓度、暴露时间和暴露频率，与工作年限无关。定性评价为高水平非致癌风险。见表 4。

表 4 不同岗位苯接触工人的非致癌风险评估结果

岗位	空气中苯浓度 (*CA*) /μg·m^{-3}	暴露时间 (*ET*) /h·d^{-1}	暴露频率 (*EF*) /d·a^{-1}	暴露周期 (*ED*) /a	平均暴露工龄的小时数 (*AT*) /h	暴露浓度 (*EC*) /μg·m^{-3}	吸入毒性参考值 (*Rfc*) /μg·m^{-3}	危害商数 (*HQ*)	定性评价
包装岗 1	2 780	8	300	1~40	*ED*×365×24	761.64	30	25.39	高风险
包装岗 2	2 840	8	300	1~40	*ED*×365×24	778.08	30	25.94	高风险
包装岗 3	3 610	8	300	1~40	*ED*×365×24	989.04	30	32.97	高风险
研磨岗 1	990	8	300	1~40	*ED*×365×24	271.23	30	9.04	高风险
研磨岗 2	1 530	8	300	1~40	*ED*×365×24	419.18	30	13.97	高风险
研磨岗 3	670	8	300	1~40	*ED*×365×24	183.56	30	6.12	高风险
调漆岗	2 600	8	300	1~40	*ED*×365×24	712.33	30	23.74	高风险
投料岗 1	650	8	300	1~40	*ED*×365×24	178.08	30	5.94	高风险
投料岗 2	670	8	300	1~40	*ED*×365×24	183.56	30	6.12	高风险
投料岗 3	650	8	300	1~40	*ED*×365×24	178.08	30	5.94	高风险
调色岗 1	3 280	8	300	1~40	*ED*×365×24	898.63	30	29.95	高风险
调色岗 2	3 270	8	300	1~40	*ED*×365×24	895.89	30	29.86	高风险
调色岗 3	4 100	8	300	1~40	*ED*×365×24	1123.29	30	37.44	高风险
化验岗	300	8	300	1~40	*ED*×365×24	82.19	30	2.74	高风险

3 讨论

该厂各岗位化学有害物质主要是含苯废气，暴露质量浓度一般在 1 000~4 000 μg·m^{-3}，主要经呼吸道吸入[13]，符合两种模型的适用条件。该厂仅采取局部通风，加之工人劳动强度大，工作时间长，由此工人出现职业病危害的效应增大。

根据我国职业病危害作业分级标准评估得出该企业苯暴露对工人相对无害，主要基于现场监测的暴露浓度远低于 OELs，导致化学物职业接触比值的权重 W_B=0，在这种情况下，无论其他参数的值如何，评分指数 $G \leqslant 1$，即职业病危害分级为 0 级。根据 EPA 模型评估，该厂各岗位均存在高水平的非致癌风险，且随着暴露年限的增加，各岗位均出现中到高水平的致癌风险；综合评价各岗位均为职业健康高风险。苯是致癌物，属无阈值化学物，因此常需要定量风险评估和风险管理（如 EPA 模型），但很多国家常结合经济、社会发展水平，提出容许接触水平，制定相应的 OELs[17]，我国职业病危害作业分级标准是依据我国职业接触限值而制定的，因此基于 EPA 模型和基于有安全阈值的我国职业病危害作业分级标准对接苯人群健康风险的评估结果差异较大。

高浓度苯暴露对作业工人的健康尤其是造血系统有明显的损伤。但随着我国经济发展，生产工艺不断提高以及相关部门对职业病防治的重视，据统计除电镀行业某些岗位铬浓度超过 OELs 且职业病危害作业为 3 级以外，绝大部分行业化学物质暴露浓度均低于国家 OELs 且职业病危害作业分级均为 0 级[18]，符合我国《职业病防治法》的相关规定。但即使职业人群暴露在低剂量苯（1 ppm，约 3.48 mg·m^{-3}）的工作环境中，仍可对造血系统产生损害，包括遗传损伤和白细胞等血常规的异常[19-22]。由此可见我国的 OELs 并不能保护所有的接苯人群，尤其是敏感人群和中小型企业工人[23]，因此苯的暴露浓度低于 OELs 和职业病危害作业分级为 0 级时，仍应运用国内外成熟的职业风险评估模型（如 EPA 模型）对作业工人健康风险进行评估。如张有贤等[24]依据 EPA 模型反推出致癌风险的苯暴露浓度限值为 1.46×10^{-3} mg·m^{-3}，非致癌风险的苯暴露浓度限值为 0.10 mg·m^{-3}。以上限值是理论数据推算的结果，实际上我国苯 OELs 的制定要结合动物毒理学及现场劳动卫生学或职业流行病学调查资料、国外的 OELs 及其制定依据和职业卫生防护情况等方面，另外还需充分考虑我国经济和技术的可行性。

国内外职业风险评估的模型有很多，本研究应用我国职业病危害分级标准和 EPA 模型相结合对苯作业人群进行风险评估，总的来看，两种评价方法都是结合实地调查和检测结果，评估过程涉及多个参数，涵盖范围广泛，评估结果相对客观。我国职业病危害作业分级标准适用于有毒有害的化学物质和物理因素，危害程度分为相对无害作业和轻度、中度、高度危害作业四个等级，是职业卫生管理人员进行接触毒物作

业的危害分级和有毒有害工作场所卫生监督的评估依据，对于暴露浓度超过职业接触限值的评估结果意义更大。而EPA模型从化学毒物的性质出发，对IRIS数据库中化学毒物低剂量长期接触作出致癌性和非致癌性的可能性和严重性的风险评估，依据数值大小判定风险强度，数值越大健康风险越大，可以实现一级预防（病因预防）的目的。因此苯的职业病危害作业分级均为0级时，仍应考虑实际接触浓度的致癌性和非致癌性的健康效应，重视苯接触职业人群的健康防护。

参考文献

[1] 陆叶，黄简抒，周元陵，等. 上海市某石化企业苯接触工人的职业危害风险评估 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志，2016，34（10）：746-749.

[2] MCMICHAEL AJ. Carcinogenicity of benzene，toluene and xylene：epidemiological and experimental evidence [J]. IARC Sci Publ，1988（85）：3-18.

[3] 伍波，李铭，程秀荣，等. 接苯企业职业健康风险评估 [J]. 中国公共卫生，2018，34（5）：755-758.

[4] LAN Q，ZHANG L，LI G，et al. Hematotoxicity in workers exposed to low levels of benzene [J]. Science，2004，306（5702）：1774-1776.

[5] YOON JH，KWAK WS，AHN YS. A brief review of relationship between occupational benzene exposure and hematopoietic cancer [J]. Ann Occup Environ Med，2018，30（1）：33.

[6] KOH DH，JEON HK，LEE SG，et al. The relationship between low-level benzene exposure and blood cell counts in Korean workers [J]. Occup Environ Med，2015，72（6）：421-427.

[7] 冷朋波，李晓海，王群利，等. 低浓度苯暴露工人的职业健康风险评估 [J]. 环境与职业医学，2018，35（11）：985-989.

[8] 袁伟明，张美辨，高向景，等. 美国吸入风险评估模型积累效应在制鞋企业评估毒物致癌性的应用 [J]. 中国预防医学杂志，2016，17（3）：183-186.

[9] 谢红卫，张美辨，周莉芳，等. 两种风险评估模型在印刷行业中的应用研究 [J]. 环境与职业医学，2016，33（1）：29-33.

[10] Office of Superfund Remediation and Technology Innovation Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund volume I：human health evaluation manual（part F，supplemental guidance for inhalation risk assessment）[R]. Washington，DC：OSWER，2009：22-24.

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

[12] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 160—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.

[13] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 229—2010 工作场所职业病危害作业分级 第2部分：化学物质 [S]. 北京：人民卫生出版社，2010.

[14] 中华人民共和国卫生部. GBZ 2.1—2007 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学危害 [S]. 北京：人民卫生出版社，2007.

[15] 中华人民共和国卫生部. GBZ 230—2010 职业接触毒物危害分类 [S]. 北京：人民卫生出版社，2010.

[16] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 189.10—2007 工作场所物理因素的测量 第10部分：体力劳动分类 [S]. 北京：人民卫生出版社，2007.

[17] 陈清光. 有害物质职业接触限值的发展历史和种类综述 [J]. 职业卫生与应急救援，2007，25（6）：303-307.

[18] 周莉芳，张美辨，袁伟明，等. 应用美国国家环境保护署吸入风险模型评估职业危害的研究 [J]. 浙江预防医学，2014，26（2）：109-113.

[19] RUSHTON L，SCHNATTER AR，TANG G，et al. Acute myeloid and chronic lymphoid leukaemias and exposure to low-level benzene among petroleum workers [J]. Br J Cancer，2014，110（3）：783-787.

[20] STOKSTAD E. Toxicology：factory study shows low levels of benzene reduce blood cell counts [J]. Science，2004，306（5702）：1665.

[21] 曾汕，高晨，张波，等. 不同苯暴露水平工人血常规指标的meta分析 [J]. 环境与健康杂志，2017，34（2）：128-134.

[22] 熊晓芸，姜秋霞，韩磊，等. 长期低浓度苯接触的遗传损伤作用 [J]. 环境与职业医学，2014，31（2）：98-103.

[23] WANG BS，HAN L，YANG DD，et al. Impact of enterprise ownership and size on registered hematotoxicity in benzene-exposed workers [J]. Biomed Environ Sci，2018，31（12）：917-921.

[24] 张有贤，苗东阳. 基于健康风险评价的职业接触限值合理性分析 [J]. 环境工程，2010，28（4）：102-104.

（英文编辑：汪源；编辑：丁瑾瑜；校对：汪源）