

DOI:10.7524/AJE.1673-5897.20191111001

张晓惠, 王冬梅, 焦永杰, 等. 我国苯的环境暴露、风险评估与管控[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(3): 202-209

Zhang X H, Wang D M, Jiao Y J, et al. Environmental exposure, risk assessment and control of benzene in China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(3): 202-209 (in Chinese)

## 我国苯的环境暴露、风险评估与管控

张晓惠<sup>1,3</sup>, 王冬梅<sup>2,\*</sup>, 焦永杰<sup>1</sup>, 袁雪竹<sup>1,3</sup>, 陈红<sup>1</sup>, 王越<sup>1,3</sup>

1. 天津市生态环境科学研究院, 天津 300191
2. 天津市生态环境综合保障中心, 天津 300191
3. 天津环科环安科技有限公司, 天津 300191

收稿日期: 2019-11-11 录用日期: 2020-02-12

**摘要:** 我国苯生产量大, 且用途广泛。与此同时, 大量的苯系物通过化石燃料燃烧、汽车尾气排放以及生产使用过程中泄漏的方式进入环境。结合国内外对苯的毒理研究成果, 探索了苯在环境中释放与转归路径, 统计了我国大气、土壤、地下水、地表水、沉积物及食物链中苯的赋存现状。由于苯有致癌性, 长期或频繁地暴露在苯环境中的人群存在致癌风险。环境中苯主要以气态相存在, 呼吸吸入是人体苯暴露的主要途径, 研究采用美国环境保护局(US EPA)吸入风险评估模型, 计算人群在苯暴露下的致癌风险。根据化工区、交通干道两侧和地下车库3个区域空气苯的统计数据, 开展人体健康风险评估, 致癌风险分别为  $3.98 \times 10^{-5}$ 、 $9.66 \times 10^{-5}$  和  $1.44 \times 10^{-6}$ , 风险不可接受; 以可接受风险水平  $10^{-6}$  为目标, 反推以上3种情景下苯的最大允许暴露浓度分别为 0.0002、0.0002 和 0.0321  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。上述研究结果为确定我国环境空气质量标准中苯的控制限值和保护人体健康提供了基础数据。

**关键词:** 苯; 环境暴露; 风险评估; 风险管控

文章编号: 1673-5897(2020)3-202-08 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## Environmental Exposure, Risk Assessment and Control of Benzene in China

Zhang Xiaohui<sup>1,3</sup>, Wang Dongmei<sup>2,\*</sup>, Jiao Yongjie<sup>1</sup>, Yuan Xuezhu<sup>1,3</sup>, Chen Hong<sup>1</sup>, Wang Yue<sup>1,3</sup>

1. Tianjin Academy of Ecological and Environmental Science, Tianjin 300191, China
2. Tianjin Ecology and Environment Comprehensive Protection Center, Tianjin 300191, China
3. Tianjin Environmental Science and Safety Co. Ltd., Tianjin 300191, China

Received 11 November 2019 accepted 12 February 2020

**Abstract:** Benzene has been produced with a large quantity and numerous applications in China. Meanwhile, a large amount of benzene series enters the environment through fossil fuel combustion, automobile exhaust emissions, leakage of liquid benzene during production and storage. Based on the international results of toxicological studies, the path of benzene release and fate in the environment was explored, and the occurrence status of benzene in China's atmosphere, soil, groundwater, surface water, sediment and food chain was calculated. Benzene is carcinogenic, people who are exposed to the benzene environment for long or frequent periods have high risk of cancer.

第一作者: 张晓惠(1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为环境有毒有害化学品风险评估, E-mail: zxh\_8677@126.com

\* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: tjwangdongmei@126.com

Benzene mainly exists in the gaseous phase in the environment, and inhalation is the main route of human exposure to benzene. This study used the U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) inhalation risk assessment model to calculate the carcinogenic risk of human who were exposed to benzene. Human health risk assessments were carried out according to the statistical data of atmospheric benzene in three typical areas, including chemical industry area, both sides of the main road and the underground garage. When the carcinogenic risk is  $3.98 \times 10^{-5}$ ,  $9.66 \times 10^{-5}$ , and  $1.44 \times 10^{-6}$ , it is unacceptable. With an acceptable risk level of  $10^{-6}$  as the target, the maximum allowable exposure concentrations of benzene under the above three scenarios are 0.0002, 0.0002 and  $0.0321 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectively. The results presented in this study would provide basic data for establishing ambient air quality criteria of benzene and protecting the human health.

**Keywords:** benzene; environmental exposure; risk assessment; risk management

2016年,世界苯产能达6350万t,消费量近5000万t,其中,亚洲是全球最大的纯苯供应地,主要生产国家包括韩国、中国和日本等。截至2017年底,我国纯苯总产能约1240万t,纯苯产量为838.6万t,表观需求量1085万t,累计进口量250.3万t<sup>[1]</sup>。作为基本有机化工原料之一,苯的生产量巨大,用途非常广泛。在我国,苯主要用于生产有机化学原料、其他基础化学原料、化学药品原料和化学农药原料等下游产品,由其生产的苯乙烯、苯胺、苯酚和己内酰胺等产品在航空航天、服装纺织、交通运输和移动通讯等行业中应用十分广泛。随着我国经济的不断发展,苯的生产和使用将持续增加。

苯属于人类致癌物,对人体健康危害高。中国、日本和欧盟等国家和组织都对其危害性进行了分类,其致癌性、致突变性、特异性靶器官毒性和吸入危害均属1类,皮肤腐蚀/刺激、严重眼损伤/眼刺激等属2类<sup>[2]</sup>。短间接接触高浓度苯产品或长期暴露在含苯环境中均会对人体健康产生损害。

苯生产量大,用途广泛,造成苯在我国部分地区及特定区域内大气、土壤、水以及生物体等环境介质中的高暴露浓度。苯有毒,长期或频繁暴露在苯环境中的人群存在致癌风险。研究调查统计了化工区、交通干道两侧和地下车库3个区域空气苯的暴露数据,开展人体健康风险评估,并结合我国目前对苯的管控措施与苯在环境中暴露的风险点,提出了一系列降低风险的管控建议。

## 1 苯在我国的环境暴露 (Environmental exposure of benzene in China)

### 1.1 环境释放与转归分析

苯的环境释放来源与转归路径如图1所示。苯的来源分为天然和人为2类。天然来源包括原油渗漏、森林火灾和植物挥发物等,人为来源包括环境烟

草烟雾、汽车尾气、汽车加油操作和工业排放等。环境中苯的主要来源为工业活动,包括煤和石油燃烧、苯产品生产和存储、汽车尾气以及汽油加油站蒸发等。

进入环境的苯主要以气态相存在于大气中。苯挥发或泄露后进入大气、水和土壤中,表层土壤或水中的大部分苯挥发进入大气,大气中的苯通过雨、雪再次沉降到水或土壤中,沉降到土壤表面的苯再次挥发分散到大气中,深层土壤中的苯随径流进入地表水,一部分挥发进入大气,一部分进入地下水,苯不具有持久性和生物累积性,不会发生土壤蓄积、生物累积。根据一级逸度环境平衡模型(level 1 fugacity based environmental equilibrium model),99%的苯存在于空气中,而水和土壤中的苯分别为0.88%和0.05%,沉积物、水中悬浮沉积物、生物群和气溶胶中的苯存在量很小,可忽略不计<sup>[3]</sup>。

### 1.2 环境中苯的暴露调查

#### 1.2.1 大气

目前,在我国工业区环境空气、交通干道环境空气以及地下车库空气中,普遍检测出了苯的存在,典型区域及空间内空气中苯的暴露情况统计如表1所示。

苯是工业生产中重要的生产原料和有机溶剂,涂料、医药和农药等有机化工类企业分布多的工业区环境空气的苯浓度较高。苯易挥发,受温度、风等气象条件影响较大,调查数据显示夏秋季苯的浓度相对较低,秋冬季苯浓度相对较高<sup>[4-6]</sup>。交通干道环境空气中苯的重要来源主要是机动车尾气<sup>[5,7-11]</sup>,空气中苯的浓度与机动车流量、车速和排放系数密切相关,在车流量高峰和道路不畅的情况下排放较高。地下车库空气中的苯来源于汽车尾气排放及汽车燃料的蒸发,由于地下车库换气功能有限,污染物得以累积,早晨苯污染尤其严重,远远高于工业区以及交通干道环境空气中苯浓度<sup>[12]</sup>。

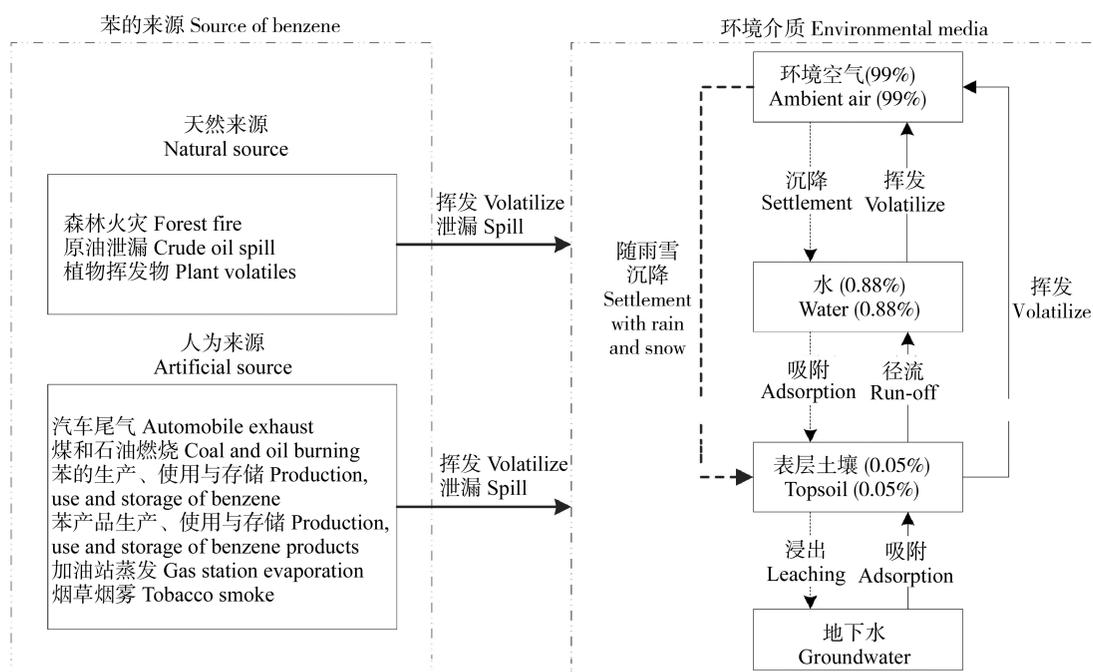


图1 苯的释放与转归

Fig. 1 Release and circulation of benzene

表1 我国典型区域及空间内空气中苯的暴露情况统计

Table 1 Statistics on the exposure of atmospherical benzene in typical regions in China

样本介质 Sample medium	测试日期 Test date	苯浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ Benzene concentration/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	地点 Site	来源 Source
工业区 Industrial park	2012-04—2012-05	春 Spring: 13.72	天津滨海新区工业区 Tianjin Binhai New Area	[4]
	2011-06—2011-08	夏 Summer: 5.33		
	2011-10—2011-11	秋 Autumn: 9.96		
	2013-06—2013-08	夏 Summer: 5.43	西安高压开关厂	[5]
	2013-12—2014-01	冬 Winter: 7.42	Xi'an High Voltage Switch Factory	
	2010年一季 First quarter of 2010	春 Spring: $4.96\pm 1.84$	天津华苑工业区 Tianjin Huayuan Industrial Zone	[6]
	2010年二季 Second quarter of 2010	夏 Summer: $3.09\pm 5.01$		
	2010年三季 Third quarter of 2010	秋 Autumn: $3.42\pm 1.63$		
2010年四季 Fourth quarter of 2010	冬 Winter: $18.3\pm 6.10$			
交通干道 Traffic arterial	2016-03	21.7	合肥 Hefei	[7]
	2010-11	15.9	广州 Guangzhou	[8]
	2013-06—2014-01	12.23	西安 Xi'an	[5]
	2000—2002	50.2	北京 Beijing	[9]
	2004-12	14.4	上海 Shanghai	[10]
	2001-02—2001-11	9.5	南京 Nanjing	[11]
	地下车库 Underground garage	2010-06-02/2010-06-08	早 In the morning: 70.3/49.58	广州大学图书馆地下车库 Underground garage of Guangzhou University Library
中 At noon: 45.88/18.5				
晚 At night: 34.78/40.70				
早 In the morning: 96.2/72.52			广州大学学术交流中心地下车库 Underground garage of Academic Exchange Center in Guangzhou University	
中 At noon: 38.48/31.82				
晚 At night: 16.28/38.48				

### 1.2.2 土壤及地下水

在涉及苯生产或使用的化工企业地块中,如加油站、化工、制药和染料等企业土壤及地下水中苯的含量非常高,一般在泄漏源污染区域污染情况较为严重,部分污染埋深最大可至第二含水层底板。结合污染地块调查实测数据,企业土壤苯的浓度在0至数万  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,地下水苯的浓度在0至数百  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,其中,化工类企业土壤和地下水中苯含量较高,某化工厂土壤苯含量高达  $26\ 600\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,地下水苯含量高达  $95.30\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,如表2所示。苯在土壤中吸附性弱(苯的土壤吸附系数  $K_{oc}$  为  $60\sim 83$ <sup>[13]</sup>),可随地下水在各土层间逐步向下迁移,在部分区域甚至可穿透第一含水层底板直达第二稳定含水层底板。如果地层存在粉粘与粉砂互层现象,不能对苯起到很好的阻隔作用,苯穿透土层后随地下水流向在粉土层(第一含水层),造成较大范围水平扩散和纵向迁移。

### 1.2.3 地表水

苯是一种有机溶剂,具有挥发性、不溶于水,正常情况下不会长时间存在于地表水中,目前地表水未见苯检出的报道。

### 1.2.4 沉积物

苯不具有持久性,不会在土壤中蓄积,目前沉积物中未见苯检出的报道。

### 1.2.5 食物链

苯不具有生物累积性,不易在生物体内富集,因此,不会通过食物链进入人体影响人体健康,目前生物体中未见苯检出的报道。

## 1.3 苯的环境暴露的风险点

通过苯的释放与转归分析,苯进入环境后主要以气态相存在于大气中。根据苯在环境中的暴露调查数据统计发现,环境空气、土壤和地下水中均有不

同程度的苯暴露,而苯暴露在土壤和地下水中区域性很强,只有在大量生产和使用苯的企业地块才会出现,只要按照要求做好污染地块管制和修复,土壤和地下水受到的影响通常不会较大,因此,本文仅对特定区域环境空气中的苯进行风险评估和管控研究。

## 2 苯暴露下人体健康风险评估 (Human health risk assessment for benzene exposure)

### 2.1 暴露途径分析

人体对苯的暴露途径包括呼吸吸入、经口摄入和皮肤接触<sup>[14-15]</sup>。呼吸吸入是最主要的暴露方式,在接触的最初几分钟内吸收最高,之后迅速下降,在暴露的前5 min内,吸收率为70%~80%,但是1 h后,吸收率降低至20%~60%。经口摄入是最危险的暴露方式,动物实验表明,经口摄入的苯有90%以上被机体吸收,偶然误食、故意口服苯会导致中毒。人体通过皮肤接触吸收苯主要指皮肤对液体苯的吸收,研究表明,皮肤对液体苯的吸收率比土壤苯、蒸汽苯高,大约  $0.4\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,因此,土壤苯、蒸汽苯暴露引起的皮肤吸收可忽略不计。

### 2.2 毒代动力学分析

苯吸收进入人体后,随着血液流动迅速分布全身,由于苯是亲脂性的,主要存在于富含脂质的组织(脑和脂肪)和灌注良好的组织(肝和肾)中,尤其在胎盘和胎儿中苯含量高。苯对人体的致癌效应及其他损害均由其代谢物引起,其中,人体的肝脏和骨髓是苯毒性的主要靶组织,研究证明多种苯代谢物可能共同导致苯的毒性,如1,2,4-苯三酚、邻苯二酚、S-苯基巯基尿酸、反式、反式-粘康酸等就是导致苯毒性的活性代谢物<sup>[15]</sup>。低剂量苯暴露时,经过身体代谢后,苯通过尿液排出体外;高剂量苯暴露时,代谢饱和后未经过身体代谢的苯通过肺部呼吸排出体外。

表2 污染地块土壤及地下水中苯含量实测数据统计

Table 2 Investigation on benzene content in soil and groundwater of contaminated sites

地块类型 Plot type	土壤中苯含量/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) Benzene content in soil/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	地下水中苯含量/( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) Benzene content in groundwater/( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )
某加油站地块 A gas station plot	7.69	690
某化工厂地块 A chemical plot	1 380	95 300
某农药厂地块 A pesticide plot	11.2	-
某制药厂地块 A pharmaceutical plot	130	12 100
某涂料厂地块 A paint plot	4.47	370
某染料厂地块 A dye plot	26 600	531

注:-没有测试数据。

Note: - means data not available.

## 2.3 人体健康风险评估

### 2.3.1 评估方法

苯属于致癌物,环境中的苯主要以气态相存在,呼吸吸入是人体苯暴露的主要途径,苯的风险点为一般人群长期呼吸含苯空气的致癌风险。

本研究采用以往调查数据中的平均值为苯暴露浓度,计算人群长期在苯单一污染物暴露下的致癌风险,最后以单一污染物可接受致癌风险水平  $10^{-6}$  为目标,反推假设的暴露时间下的空气最大允许苯暴露浓度。评估模型采用美国环境保护局(US EPA)《超级基金风险评估指南 第一卷 人类健康评估手册(F部分:吸入风险评估补充指南)》(2009年)中的人体致癌风险评估模型,公式如下:

$$CR_{\text{苯}} = IUR_{\text{苯}} \times EC_{\text{苯}} \times 10^3 \quad (1)$$

式中: $CR_{\text{苯}}$ 为长期吸入含苯空气产生的致癌风险; $IUR_{\text{苯}}$ 为呼吸吸入含苯空气单位致癌风险,为  $7.8 \times 10^{-6}(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ ;  $EC_{\text{苯}}$ 为气态苯的暴露量( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )。

$$EC_{\text{苯}} = \frac{CA_{\text{苯}} \times ET \times EF \times ED}{AT} \quad (2)$$

式中: $CA_{\text{苯}}$ 为苯在空气中的含量( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $ET$ 为人群在含苯空气中的日均暴露时长( $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $EF$ 为人群在含苯空气中的年均暴露天数( $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $ED$ 为人群在含苯空气中的总暴露年限( $\text{a}$ );  $AT$ 为人群致癌效应平均时间( $\text{h}$ )。

### 2.3.2 暴露参数

假设3个监测区域空气中苯浓度稳定,不考虑苯泄露事故等特殊条件,人群直接吸入环境空气,不考虑室内与室外空气污染物浓度差异,不考虑不同

人群年龄、性别及身体差异,针对一般成人开展苯的致癌风险评估。

根据工业区、交通干道和地下车库的调查检测数据以及中国人群暴露特点,设定以下3种暴露情景,不同情景下人群暴露参数如表3所示。情景1:评价主体为在工业区工作、居住生活的人群;情景2:评价主体为在城市交通干道两侧居住的人群;情景3:评价主体为日常选择开车为交通方式的人群。

### 2.3.3 人群健康风险评估

将不同情景下暴露参数代入模型公式,分别计算人群在工业区、交通干道和地下车库的致癌风险,结果如表4所示。我国单一污染物可接受致癌风险水平为  $10^{-6}$ ,即每千万人中因呼吸环境空气中污染物而受到健康危害或死亡的人数不能超过10人。若  $Risk > 10^{-6}$ ,则存在致癌风险,风险值越大,致癌风险越高;若  $Risk < 10^{-6}$ ,则致癌风险很小或无风险。由表4可知,3个区域人群致癌风险均  $> 10^{-6}$ ,即以下3个区域内空气中苯浓度均偏高,需要采取相应措施降低空气中苯的浓度。

### 2.3.4 苯最大允许暴露浓度推算

以我国单一污染物可接受致癌风险水平  $10^{-6}$  为目标,结合致癌风险评估模型反推3种情景下苯最大允许暴露浓度,结果如表5所示。目前,我国《环境空气质量标准》中尚未提出苯的限值标准,本研究从毒理效应的角度出发,评估人群呼吸吸入途径苯的致癌风险,并提出可接受风险目标下的苯最大允许暴露浓度,为工业区、交通干道和地下车库空气中苯的管控提供数据参考和科学依据。

表3 不同情景下人群暴露参数

Table 3 Human exposure parameters under three scenarios

参数 Parameter	符号 Symbol	单位 Unit	情景1(工业区) Scenario 1 (industrial area)	情景2(交通干道) Scenario 2 (arterial road)	情景3(地下车库) Scenario 3 (underground garage)
苯浓度平均值 Mean benzene concentration	$CA_{\text{苯}}$ $CA_{\text{benzene}}$	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	7.96	20.66	46.13
日均暴露时长 Average daily exposure	ET	$\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$	24	14	0.1
年均暴露天数 Annual average exposure days	EF	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	350	350	350
总暴露年限 Total years of exposure	ED	a	50	70	74.8
致癌效应平均时间 Mean time of carcinogenic effect	AT	h	365×74.8×24		

注: $CA_{\text{苯}}$ 采用区域统计数据平均值;情景1、情景2和情景3的ET参数为设定时长;EF参考中国人群暴露参数手册获得;关于ED,情景1中采用工业用地最高50年出让年限,情景2中采用居住用地最高70年出让年限,情景3中采用人均期望年龄;AT为人均期望年龄总时间。

Note:  $CA_{\text{benzene}}$  is the average of regional statistical data; ET of scenario 1, scenario 2, and scenario 3 are set durations; EF is obtained by referring to the Chinese population exposure parameter manual; for ED, in scenario 1 a maximum of 50 years is selected for industrial land, in scenario 2 a maximum of 70 years is selected for residential land, and in scenario 3 the expected age per capita is selected; AT is the expected age per capita.

### 3 国内外苯的管控措施 (Domestic and overseas control measures on benzene)

#### 3.1 我国现有管控要求

我国对苯的管控主要体现在3个方面:生产活动禁限管控、污染排放标准管控和环境质量标准管控。

(1)生产活动的禁限管控即对苯的生产、使用、储存和运输等活动提出禁止、限制和替代等要求,一方面通过对苯的大数据的把握实现国家对苯的战略管理,另一方面可促使企业管理规范化,规避苯污染事故发生。如《危险化学品安全管理条例》将苯纳入危险化学品目录实施管理,要求苯的生产、使用、储存和运输等企业向主管部门申领安全许可证;在《国家鼓励的有毒有害原料(产品)替代品目录(2016年版)》中,在塑料薄膜及复合材料的印刷行业,鼓励将溶剂型含苯、含酮油墨替代成醇酯型无苯、无酮油墨。

(2)污染排放标准即国家或地方政府对人为污染源排入环境的苯的浓度或总量所作的限量规定,其目的是通过控制苯的排放量来实现环境目标。我国排放标准分为综合性和行业性排放标准、国家性和地方性排放标准。在现有的污染物排放标准体系中,按照排放标准不交叉执行的原则,有行业苯排放标准优先按照行业性排放标准执行,有地方排放标准优先按照地方排放标准执行。目前,《大气污染物综合排放标准》国标、地标以及制药、涂料、油墨和胶粘剂等行业企业大气污染物排放标准均对苯的排放高度及排放限值做了规定。

(3)环境质量标准即在一定时间和空间范围内,为保障人体健康、维护生态环境对环境中的苯的容许浓度所做的限制性规定。目前,我国污染地块中的苯已有比较完善的管控要求,自2004年起,国务院、

原环境保护部(2018年组建为生态环境部)相继发布了一系列法规条文加强土壤管理,强调地块再次开发使用前应按照有关规定开展土壤健康风险评估,污染地块务必采取风险管控和环境修复措施。《土壤环境质量建设用地上壤污染风险管控标准》(GB36600—2018)针对居住用地、商业用地、公园绿地和工业用地等不同类别建设用地上壤,分别规定了保护人体健康的土壤污染风险筛选值和管制值。2018年8月,我国首部《土壤污染防治法》发布,并于2019年1月1日起正式施行。此外,我国《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2006)、《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)规定了生活饮用水、生活饮用水水源、集中式供水、二次供水以及涉及生活饮用水卫生安全产品的水质卫生要求。

#### 3.2 国际管控状况

国外发达国家早就建立了有毒化学品跟踪制度,如欧盟、日本的释放与转移登记制度(E-PRTR)将苯纳入污染物释放与转移清单,要求生产使用苯的企业应每年向主管部门申报苯的环境排放与转移情况。美国在《清洁水法》、欧盟在《水框架指令》中明确规定了苯是优先污染物,后续指令制定了苯在水

表4 不同情景下人群致癌风险

Table 4 Carcinogenic risk under three scenarios

情景 Scenarios	致癌风险(无量纲) Carcinogenic risk (dimensionless)
情景1(工业区) Scenario 1 (industrial area)	$3.98 \times 10^{-5}$
情景2(交通干道) Scenario 2 (arterial road)	$9.66 \times 10^{-5}$
情景3(地下车库) Scenario 3 (underground garage)	$1.44 \times 10^{-6}$

表5 不同情景下苯最大允许暴露浓度

Table 5 Maximum allowable exposure concentration of benzene under three scenarios

情景 Scenarios	致癌风险(无量纲) Carcinogenic risk (dimensionless)	最大允许暴露浓度/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) Maximum allowable exposure concentration/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
情景1(工业区) Scenario 1 (industrial area)	$1 \times 10^{-6}$	0.0002
情景2(交通干道) Scenario 2 (arterial road)	$1 \times 10^{-6}$	0.0002
情景3(地下车库) Scenario 3 (underground garage)	$1 \times 10^{-6}$	0.0321

环境的限值标准。US EPA 在《超级基金风险评估指南》中建立了呼吸吸入、经口摄入和皮肤接触 3 种途径的人体健康风险评估模型,建立综合风险信息数据库(IRIS)毒理参数数据库,从毒理学、卫生学角度评估污染物的致癌/非致癌风险,为各国化学品禁限管控、排放标准和质量标准的制定提供科学依据。

#### 4 结论与建议 (Conclusion and suggestion)

(1)根据化工区、交通干道两侧和地下车库 3 个区域空气苯的统计数据,开展人体健康风险评估,致癌风险分别为  $3.98 \times 10^{-5}$ 、 $9.66 \times 10^{-5}$  和  $1.44 \times 10^{-6}$ , 风险不可接受。以我国单一污染物可接受致癌风险水平  $10^{-6}$  为目标,根据模型反推得出 3 种情景下苯最大允许暴露浓度分别为 0.0002、0.0002 和  $0.0321 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(2)苯属于一种致癌性很强的大气污染物,在工业区生活工作的人群、交通干道两侧生活的人群以及经常出入地下车库的人群将长期、频繁地暴露于含苯的空气中,成为环境中苯暴露的突出风险点。

(3)建议增加《环境空气质量标准》对苯的限值要求,建立工业区特别是化工区环境空气中苯的长效监测机制,研制新配方汽油,加装机动车尾气净化装置,鼓励新能源汽车使用,倡导市民绿色出行。

通讯作者简介:王冬梅(1979—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为固体废物及有毒有害化学品环境风险管理。

#### 参考文献 (References):

[1] 米多,王涛,朱玉. 2017 年国内外芳烃供需分析[J]. 化学工业, 2018, 36(3): 16-22, 41  
Mi D, Wang T, Zhu Y. Analysis of the supply and demand of aromatics in 2017 [J]. Chemical Industry, 2018, 36(3): 16-22, 41 (in Chinese)

[2] 中华人民共和国国家安全生产监督管理总局. 危险化学品目录(2015 版)实施指南(试行)[S]. 北京: 中华人民共和国安全监管总局办公厅, 2015

[3] Environment Australia (EA) and the Therapeutic Goods Administration (TGA). National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme—Benzene Priority Existing Chemical Assessment Report No.21 [R]. Sydney: Environment Australia (EA) and the Therapeutic Goods Administration (TGA), 2001

[4] 卢志强,商细彬,张妍,等. 天津市工业区环境空气苯

系物污染特征[J]. 城市环境与城市生态, 2015, 28(3): 9-11

Lu Z Q, Shang X B, Zhang Y, et al. Pollution characterization of BETX in ambient air of Tianjin industrial zone [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2015, 28(3): 9-11 (in Chinese)

[5] 段孟辰. 西安市不同功能区空气中苯系物的污染特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2014: 28-30

Duan M C. Research on pollution characteristics of benzene series in air in different functional areas in Xi'an [D]. Xi'an: Northwest University, 2014: 28-30 (in Chinese)

[6] 宁晓宇,王亘,刘博. 天津市西南部苯系物浓度季节及空间变化特征[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 639-644  
Ning X Y, Wang G, Liu B, et al. Seasonal and spatial variations of BTEX in southwest of Tianjin [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25 (6): 639-644 (in Chinese)

[7] 孟凡昊,秦敏,梁帅西,等. 合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4060-4069  
Meng F H, Qin M, Liang S X, et al. Characteristics of atmospheric BTX near a main road in Hefei City [J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4060-4069 (in Chinese)

[8] 叶丛雷,谢品华,秦敏,等. 广州市交通主干道空气中苯系物的测量[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3718-3724  
Ye C L, Xie P H, Qin M, et al. BTX monitoring nearby main road traffic in Guangzhou [J]. Environmental Science, 2012, 33(11): 3718-3724 (in Chinese)

[9] 陆思华,白郁华,陈运宽,等. 北京市机动车排放挥发性有机化合物的特征[J]. 中国环境科学, 2003, 23(2): 16-19

Lu S H, Bai Y H, Chen Y K, et al. The characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from motor vehicle in Beijing [J]. China Environmental Science, 2003, 23(2): 16-19 (in Chinese)

[10] 张爱东,郭明明,修光利. 上海市交通干道空气中苯系物冬季污染特征初探[J]. 中国环境监测, 2006(2): 52-55  
Zhang A D, Guo M M, Xiu G L. A preliminary study on BTEX pollution characteristics in ambient air at traffic road of Shanghai in winter [J]. Environmental Monitoring in China, 2006(2): 52-55 (in Chinese)

[11] 苗欣,孙成,王禹,等. 南京市交通干道大气环境中挥发性有机物的研究[J]. 环境保护科学, 2003(5): 6-9

Miao X, Sun C, Wang Y, et al. Study on the volatile organic compounds in atmospheric environment by truck road in Nanjing [J]. Environmental Protection Science,

- 2003(5): 6-9 (in Chinese)
- [12] 陈穗玲, 李锦文, 陈南, 等. 地下车库空气中苯系物浓度的时间分布特征与污染评价[J]. 中国环境监测, 2013, 29(5): 32-37
- Chen S L, Li J W, Chen N, et al. Underground garage of benzene homologues in air concentration distribution characteristics and pollution evaluation [J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(5): 32-37 (in Chinese)
- [13] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for benzene [R]. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services & Public Health Service & Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2007
- [14] Canadian Environmental Protection Act. Priority substances list assessment report. Benzene [R]. Quebec: Government of Canada & Environment Canada & Health and Welfare Canada, 1993
- [15] European Commission. European Union Risk Assessment Report. Benzene [R] Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin & Anmeldestelle Chemikaliengesetz (BAuA), 2008 ◆