焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评价研究

伯鑫[1,2],王刚[3],温柔[4],赵春丽[1],吴铁[1],李时蓓[1,2*]

(1. 环境保护部环境工程评估中心,北京 100012; 2. 国家环境保护环境影响评价数值模拟重点实验室,北京 100012; 3. 三捷环境工程咨询(杭州)有限公司,杭州 310012; 4. 清华大学环境学院,北京 100084)

摘要: 焦炉炼焦产生多环芳烃物质(PAHs)具有较强毒性和致癌作用,本研究以某大型钢铁企业焦炉为例,采用 AERMOD 扩散模式来预测分析焦炉排放 PAHs 共 13 种污染物在大气中迁移扩散情况,采用 BREEZE Risk Analyst 根据人体健康风险评价导则 HHRAP 计算评价范围内受体人群 PAHs 污染物致癌和危害指数,对焦炉排放 PAHs 的健康风险进行了定量评价. 结果表明,应重点关注焦炉排放萘危害指数值影响(最大值为 0.97). 焦炉排放各污染物单因子致癌风险均小于 1.0E-06,而综合考虑多环芳烃总致癌风险值最大达到 2.65E-06,对当地居民的人体健康可能存在一定的影响.

关键词: 健康风险; 多环芳烃; 焦化; 致癌; 大气污染

中图分类号: X131; X820.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2014)07-2742-06 **DOI:** 10.13227/j.hjkx.2014.07.043

Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions

BO Xin[1,2], WANG Gang[3], WEN Rou[4], ZHAO Chun-li[1], WU Tie[1], LI Shi-bei[1,2]

(1. Appraisal Center for Environment & Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Numerical Modeling for Environment Impact Assessment, Beijing 100012, China; 3. Trinity Consultants, Hangzhou 310012, China; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) produced by coke oven are with strong toxicity and carcinogenicity. Taken typical coke oven of iron and steel enterprises as the case study, the dispersion and migration of 13 kinds of PAHs emitted from coke oven were analyzed using AERMOD dispersion model, the carcinogenic and non-carcinogenic risks at the receptors within the modeling domain were evaluated using BREEZE Risk Analyst and the Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion (HHRAP) was followed, the health risks caused by PAHs emission from coke oven were quantitatively evaluated. The results indicated that attention should be paid to the non-carcinogenic risk of naphthalene emission (the maximum value was 0.97). The carcinogenic risks of each single pollutant were all below 1.0E-06, while the maximum value of total carcinogenic risk was 2.65E-06, which may have some influence on the health of local residents.

Key words: health risk; PAHs; coking; carcinogenesis; atmospheric pollution

焦炉炼焦过程中产生大量气态污染物,成分复杂,其中含有多环芳烃物质(PAHs),包括萘、蒽、菲、芘等多种化合物[1~4],可通过呼吸、饮食和皮肤接触等多种途径进入人体,具有较强毒性和致癌作用[5]. 国内外开展了不少针对大气中 PAHs 对人体健康影响的研究[6~8],相关研究结果表明 PAHs 类物质例如苯并(a)芘,与肺癌标化死亡率有明显相关性[9],可导致个体寿命损失,对人体健康风险非常大. 国内也有相关学者通过监测采样研究大气中 PAHs 的分布特征,并通过毒性等效因子(TEF)计算致癌风险[10~12].

近年来,中国焦炭产量持续增长,2010 年产量达到38 757万 t,同比增长 9%[13],根据美国 AP-42 大气污染物排放因子中焦化无组织源强公式[14]估算国内 PAHs 排放量约 500 t. 另外由于历史、规划等原因,我国有部分焦化厂建在城市内,周边人口稠密,存在着一定的人体健康风险. 而评价焦化厂产生的大气污染危害,一般仅关注于污染物监测值和预测值是否达到《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)[15]、防护距离是否符合卫生防护距离[16]、大气环境防护距离[17]等要求,而对人体健康风险研究尚缺乏足够的研究,无法给环境管理与决策提供科学依据.

本研究以某大型钢铁企业焦炉为例,采用 AERMOD 污染物扩散模式来模拟焦炉排放 PAHs 类共 13 种污染物在大气中的浓度情况,按照美国环保署推荐的人体健康风险评价导则(HHRAP)[18]中的算法,采用 Risk Analyst 软件[19]计算评价范围内人群受焦炉排放 PAHs 类污染物的致癌风险和危害指数,在 GIS 环境进行致癌风险和危害指数等值线展

收稿日期: 2013-11-22; 修订日期: 2014-02-18
基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201309062)
作者简介: 伯鑫(1983~),男,硕士,主要研究方向为大气环境质量模拟、污染源清单及大气技术复核,E-mail: boxinet@gmail.com
* 通讯联系人,E-mail: lisb@acee.org.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

示,对焦炉排放 PAHs 类污染物的健康风险进行了定量评价,开展了基于人体健康风险的防护距离计算,以期为环评体系构建人体健康风险评价做了初步探索.

1　材料与方法

1.1　模式应用

本研究使用 AERMOD 污染扩散模式模拟焦炉排放 PAHs 大气污染物浓度及沉降情况,采用 Risk Analyst 健康风险分析模型系统评价焦炉排放 PAHs 类污染物的致癌风险和危害指数. AERMOD 为我国环保部、美国环保署等多个国家环保管理部门推荐的、适用于 50 km 小范围内的污染物扩散法规模式[17],Risk Analyst 是由美国 Trinity Consultants 公司完全基于 HHRAP 导则算法编制的健康风险分析系统. 技术路线见图 1.

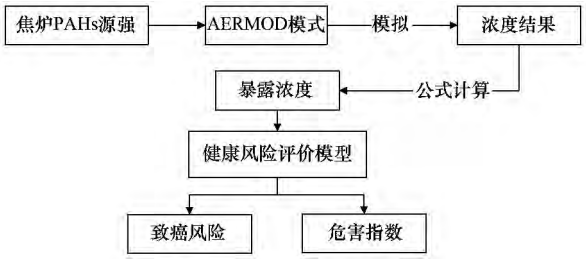


图 1　人体健康风险评价技术路线

Fig. 1　Technology roadmap of human health risk assessment

1.2　暴露途径

暴露途径描述了大气中污染物从排放点到受影响人体的过程,一般可分为直接呼吸吸入和间接摄入途径. 间接途径包括饮食摄入、饮用水摄入和皮肤接触(土壤或水体)摄入等. 由于案例关于间接摄入途径参考数据较少,本研究仅考虑直接呼吸吸入的影响.

1.3　致癌风险

致癌风险根据各污染物的呼吸吸入单位风险因子(URFi)估算. URFi 定义为空气中污染物浓度为 1 $\mu g \cdot m^{-3}$ 时的致癌几率的上限.

直接呼吸吸入的致癌风险计算公式如下[16]:

$$\text{致癌风险 } CR = EC \times URFi$$

$$\text{暴露浓度 } EC = (Ca \times EF \times ED)/(AT \times 365\ d \cdot a^{-1})$$

式中,CR: 通过直接呼吸吸入大气中污染物造成的致癌风险; EC: 暴露浓度,$\mu g \cdot m^{-3}$; URF: 单位风险因子,$m^3 \cdot \mu g^{-1}$,污染物毒理学参数; Ca: 大气中污染物的浓度,$\mu g \cdot m^{-3}$; EF: 暴露频率,$d \cdot a^{-1}$; ED: 暴露时间,a; AT: 平均时间,a.

一般来说,致癌风险在 1×10^{-6} 以下是可以接受的,表示该受体点人群在一生中发生癌症的几率为百万分之一[20,21].

1.4　危害指数(非致癌风险)

对于大部分没有致癌风险的污染物,需计算危害指数(非致癌风险). 危害指数为人体接受到的暴露剂量与污染物的参考浓度(RfC)的比值,RfC 定义为不会引起健康风险的大气中污染物浓度.

直接呼吸吸入的危害指数计算公式如下[16]:

$$\text{危害指数 } HQ = EC \times 0.001/RfC$$

式中,HQ: 通过直接呼吸吸入大气中污染物造成的危害指数; EC: 暴露浓度,$\mu g \cdot m^{-3}$; 0.001: 单位转换因子,$mg \cdot \mu g^{-1}$; RfC: 参考浓度,$mg \cdot m^{-3}$,污染物毒理学参数.

一般来说,危害指数小于 1 可被认为是没有不利健康风险的[22].

1.5　毒理学参数

本次研究的 13 种 PAHs 类污染物中,有 6 种为非致癌污染物,7 种为致癌污染物,相关毒理学参数见表 1 ~ 2[18].

表 1　PAHs 类非致癌污染物毒理学参数

Table 1　Non-carcinogenic health standards of PAHs

序号	CAS[1)]	中文名	RfC/$mg \cdot m^{-3}$
1	91-20-3	萘	0.003
2	83-32-9	苊	0.21
3	86-73-7	芴	0.14
4	120-12-7	蒽	1.0
5	206-44-0	荧	0.14
6	129-00-0	芘	0.11

1) CAS 号是化合物的唯一数字识别码,下同

表 2　PAHs 类致癌污染物毒理学参数

Table 2　Carcinogenic health standards of PAHs

序号	CAS	中文名	URFi/$(\mu g \cdot m^{-3})^{-1}$
7	56-55-3	苯并(a)蒽	0.000 11
8	218-01-9	苯并菲	0.000 11
9	205-99-2	苯并(b)荧蒽	0.000 11
10	207-08-9	苯并(k)荧蒽	0.000 11
11	50-32-8	苯并(a)芘	0.001 1
12	193-39-5	茚并(1,2,3-cd)芘	0.000 11
13	53-70-3	二苯并(a,h)蒽	0.001 2

2　案例分析

某大型钢铁联合企业所在位置为丘陵农村地区,项目周边主要是村落和农田,属暖温带半湿润大陆性季风气候,焦化厂主要生产装置为 55 孔 6 m 焦炉 6 台,年产焦炭 330 万 t.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.1 源项分析

炼焦过程中产生的多环芳烃大部分为无组织排放,国内对源强估算没有较统一的导则、标准和方法. 目前环评单位大多采用各自的经验值来估算 BaP 的排放量(尚未考虑其他 PAHs 类物质),导致相同型号、相同规模的焦炉估算出来的 BaP 排放量差别很大[3 ~ 20 mg·(t·J)$^{-1}$][23]. 针对上述问题,本研究参考美国 AP-42 大气污染物排放因子中关于焦化无组织源强计算部分,分别计算了 13 种 PAHs 类污染物年排放量,见表 3.

表 3 案例企业焦炉排放 PAHs 污染物情况

Table 3 Emission of PAHs by the coke oven in the case

序号	CAS	英文名	中文名	排放量/t·a^{-1}
1	91-20-3	Naphthalene	萘	1.633
2	83-32-9	Acenaphthene	苊	0.005
3	86-73-7	Fluorene	芴	0.345
4	120-12-7	Anthracene	蒽	0.150
5	206-44-0	Fluoranthene	荧	0.337
6	129-00-0	Pyrene	芘	0.569
7	56-55-3	Benzo [a] anthracene	苯并 [a] 蒽	0.023
8	218-01-9	Chrysene	苯并菲	0.011
9	205-99-2	Benzo [b] flouranthene	苯并 [b] 荧蒽	0.005
10	207-08-9	Benzo [k] fluoranthene	苯并 [k] 荧蒽	0.005
11	50-32-8	Benzo [a] pyrene	苯并 [a] 芘	0.002
12	193-39-5	Ideno [1,2,3-cd] pyrene	茚并 [1,2,3-cd] 芘	0.003
13	53-70-3	Dibenz [a,h] anthracene	二苯并 [a,h] 蒽	0.002

2.2 参数设置

2.2.1 AERMOD 大气扩散模式参数

本研究模拟区域为 16 km × 16 km,受体网格分辨率为 200 m,受体网格覆盖整个模拟区域,采用 AERMOD 模式分别计算各污染物在每个网格的浓度. 地面气象资料采用 2007 年逐日逐时地面气象数据,原始地面气象参数包括温度、风速、风向、总云量、低云量、相对湿度、气压. 采用的高空气象数据由中尺度数值模式 MM5 模拟生成,MM5 模式的初始场采用美国国家环境预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)的再分析数据,高空气象数据垂直层数为 25 层,参数包括大气压、高度、干球温度、露点温度、风向偏北度数、风速.

本研究模拟考虑地形对污染物扩散的影响,地形数据采用航天飞机雷达地形测绘(SRTM)3 角秒数据,数据分辨率约 90 m.

模拟区域用地类型为耕地,采用耕地各季节的地表特征参数,其中鲍文率选用土壤湿度条件为平均的特征参数. 本次大气环境影响预测中的有关参数选取情况见表 4.

表 4 AERMOD 计算选用参数一览表

Table 4 Parameter list for AERMOD calculation

参数名称	扇区/(°)	时段	正午反照率	鲍文率	粗糙度
地表参数	0 ~ 360	冬季(12、1、2 月)	0.6	1.5	0.01
	0 ~ 360	春季(3、4、5 月)	0.14	0.3	0.03
	0 ~ 360	夏季(6、7、8 月)	0.2	0.5	0.2
	0 ~ 360	秋季(9、10、11 月)	0.18	0.7	0.05
化学转化			不考虑		
烟囱出口下洗			考虑		
干沉降			考虑		
地形数据分辨率/m			90 × 90		

2.2.2 Risk Analyst 风险模式参数

本研究暴露情景中的参数均使用美国环境保护署 HHRAP 导则中的推荐参数[18],具体见表 5.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　暴露情景参数

Table 5　Parameter list of exposure scenarios

参数	描述	农村居民(成人)	单位
AT_cancer	致癌分析的平均时间	70	a
AT_hazard	非致癌分析的平均时间	40	a
BW	体重	70	kg
ED	暴露时间	40	a
EF	暴露频率	350	$d \cdot a^{-1}$

3　结果与讨论

3.1　危害指数(非致癌风险)

表 6 结果表明,评价范围内危害指数影响较大的为萘,危害指数范围为 6.65E-06 ~ 0.97,影响大小顺序为萘 > 芘 > 芴,多环芳烃总危害指数指数范围为6.78E-06 ~ 0.99,见图2. 最大危害指数接近标准值 1,可能会对当地居民的人体健康可能存在一定的潜在影响.

表 6　焦炉排放多环芳烃危害指数、致癌风险评价结果

Table 6　Hazard index and carcinogenic risk assessment of the PAHs discharged by the coke oven

污染物	危害指数值	致癌风险值
萘	6.65E-06 ~ 0.97	—
苊	3.15E-10 ~ 4.58E-05	—
芴	3.00E-08 ~ 4.38E-03	—
蒽	1.83E-09 ~ 2.66E-04	—
荧	2.92E-08 ~ 4.25E-03	—
芘	6.28E-08 ~ 9.15E-03	—
苯并[a]蒽	—	8.59E-12 ~ 6.64E-07
苯并菲	—	6.24E-12 ~ 9.09E-08
苯并[b]荧蒽	—	3.42E-12 ~ 4.98E-07
苯并[k]荧蒽	—	1.02E-12 ~ 1.48E-07
苯并[a]芘	—	3.72E-11 ~ 5.42E-07
茚并[1,2,3-cd]芘	—	1.13E-14 ~ 1.65E-09
二苯并[a,h]蒽	—	7.87E-13 ~ 1.15E-07
13 种 PAHs 类总贡献	6.78E-06 ~ 0.99	1.82E-11 ~ 2.65E-06

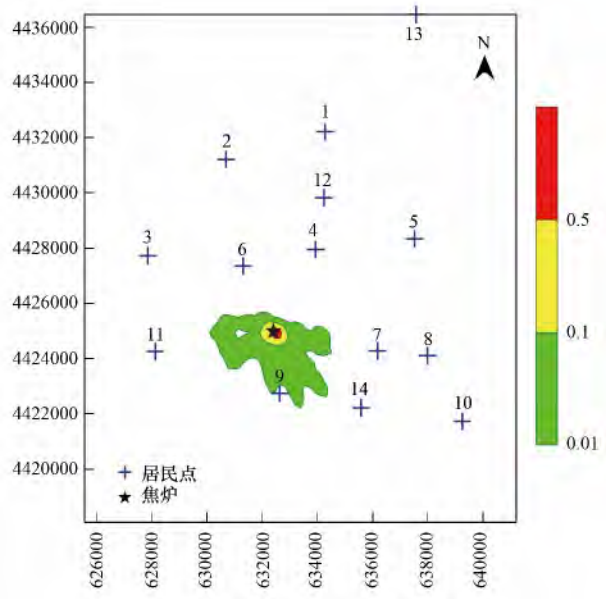


图 2　焦炉排放多环芳烃总危害指数等值线

Fig. 2　Contour map of total hazard index by PAHs emission

3.2　致癌风险

表 6 结果表明,评价范围内致癌风险影响较大的为苯并[a]蒽,致癌风险值范围为 8.59E-12 ~ 6.64E-07,影响大小顺序为苯并[a]蒽 > 苯并[a]芘 > 苯并[b]荧蒽,多环芳烃总致癌风险值为 1.82E-11 ~ 2.65E-06,见图 3. 焦炉排放各污染物单因子致癌风险均小于美国环保署推荐值 1.0E-06[18],单因子不会对人体造成致癌影响,而综合考虑多环芳烃总致癌风险值最大达到 2.65E-06,每百万人增加

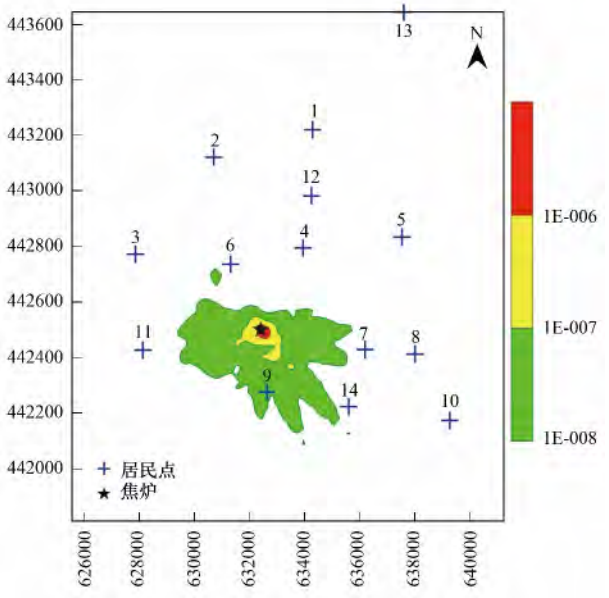


图 3　焦炉排放多环芳烃总致癌风险等值线

Fig. 3　Contour map of total carcinogenic risk by PAHs emission

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.65 个癌症患者,对当地居民的人体健康可能存在一定的影响.

3.3 人体健康防护距离

从图 2 和图 3 结果表明,PAHs 危害指数、致癌风险最大值均发生在焦化厂周围,相关研究结果也表明焦化厂周围空气 PAHs 浓度较大[24,25],对焦化工人身体健康造成严重威胁. 因此,通过在厂界线外设置一定的防护距离,保护居民的健康,是切实可行的.

目前焦化环境影响评价工作中,防护距离有大气环境防护距离和卫生防护距离两种. 确定卫生防护距离的方法主要有两种: 一是根据《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》(GB/T 13021-91)中的公式进行计算; 二是执行《焦化厂卫生防护距离标准》(GB 11661-89)[26]. 大气环境防护距离是基于《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ 2.2-2008)推荐的 SCREEN3 估算模式进行计算.

本研究提出了人体健康防护距离的概念,在项目厂界以外设置的人体健康防护距离外,对人群健康的影响达到可接受的范围,在人群健康防护距离内不应有长期居住的人群. 本研究人体健康防护距离根据总致癌风险超标区域的面积(S)来折算等效半径(标准设为 1×10^{-6}). 等效半径(R)公式如下: $\pi R^2 = S$.

按不同方法计算的防护距离见表 7. 从几种防护距离方法计算结果来看,防护距离最大影响为《焦化厂卫生防护距离标准》的1 400 m,最小为大气环境防护距离 0 m. 其中《焦化厂卫生防护距离标准》较为陈旧,按其确定的卫生防护距离不太适合目前先进企业焦炉等工艺的发展以及产量要求;《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》、大气环境防护距离由于缺少焦炉排放其他多环芳烃相关空气质量标准,故仅能计算苯并[a]芘物质; 人体健康防护距离综合考虑焦炉排放 13 种 PAHs 类污染物影响,为设置焦炉防护距离提供了一种新的思路与方法.

表 7 焦炉防护距离对比结果

Table 7 Comparison of coke oven protective distances

计算方法	距离/m
制定地方大气污染物排放标准的技术方法	50
焦化厂卫生防护距离标准	1 400
大气环境防护距离	无超标
人体健康防护距离	250

3.4 不确定性分析

(1)源强不确定性对于焦炉 PAHs 类无组织排放计算,我国尚无发布权威方法,本研究采用的 AP-42 中焦炉 PAHs 无组织计算方法,是根据 20 世纪 90 年代美国焦炉产污水平得出的,而当前我国焦炉在规模、产能、环境保护措施方面与其存在一定差异,源强结果存在一定不确定性.

(2)我国关于毒理学、健康统计等参数资料较少,本研究中的健康参考标准等参数采用美国环保署资料,而实际上我国与美国一些参数存在着差异[27],计算参数存在一定不确定性.

4 结论与建议

(1)案例结果表明,焦炉排放中单因子危害指数最大的为萘,危害指数接近标准值 1. 综合考虑多环芳烃总致癌风险值为 2.65E-06,每百万人增加 2.65 个癌症患者,对当地居民的人体健康可能存在一定的影响.

(2)本研究提出的人体健康防护距离的概念及计算方法,对保护人群健康,更科学地进行环境影响评价有着一定的参考意义. 国内应开展相关的污染物毒理学、健康统计等研究,为更准确计算人体健康风险提供数据支持.

参考文献:

[1] 伯鑫,张玲,刘梦,等. 复杂地形下确定钢铁联合企业防护距离研究[J]. 环境工程,2011,29(S1):298-302.

[2] 刘大锰,王玮,李运勇. 首钢焦化厂环境中多环芳烃分布赋存特征研究[J]. 环境科学学报,2004,24(4):746-749.

[3] 刘庚,郭观林,南锋,等. 某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征[J]. 环境科学,2012,33(12):4257-4262.

[4] 牟玲,彭林,刘效峰,等. 机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究[J]. 环境科学,2013,34(3):1156-1160.

[5] Boffetta P, Jourenkova N, Gustavsson P. Cancer risk from occupational and environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Cancer Cause & Control, 1997, 8(3): 444-472.

[6] Kriek E, Schooten F J V, Hillebrand M J X, *et al*. DNA adducts as a measure of lung cancer risk in humans exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Environmental Health Perspectives, 1993, 99: 71-75.

[7] VanRooij J G, Bodelier-Bade M M, Jongeneelen F J. Estimation of individual dermal and respiratory uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons in 12 coke oven workers[J]. British Journal of Industrial Medicine, 1993, 50(7): 623-632.

[8] 许海萍,张建英,张志剑,等. 致癌和非致癌环境健康风险的预期寿命损失评价法[J]. 环境科学,2007,28(9):2149-2151.

[9] Okona-Mensah K B, Battershill J, Boobis A, *et al*. An approach to investigating the importance of high potency polycyclic aromatic

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

hydrocarbons (PAHs) in the induction of lung cancer by air pollution [J]. Food and Chemical Toxicology, 2005, **43**(7): 1103-1116.

[10] **王静, 朱利中, 沈学优. 某焦化厂空气中 PAHs 的污染现状及健康风险评价** [J]. **环境科学**, 2003, **24**(1): 135-138.

[11] **王晓飞, 王伟, 刘秀芬, 等. 北京市大气颗粒物中 PAHs 健康风险评估** [J]. **环境化学**, 2008, **27**(3): 393-394.

[12] **周变红, 张承中, 王格慧. 西安城区大气中多环芳烃的季节变化特征及健康风险评价** [J]. **环境科学学报**, 2012, **32**(9): 2324-2331.

[13] **孟庆波. 中国焦化行业发展成就及对钢铁行业发展的支撑** [A]. **见: 第八届**(2011) **中国钢铁年会论文集**(**大会报告与分会场特邀报告**) [C]. **北京**, 2011. 65-73.

[14] U. S. EPA. Emission Factor Documentation for AP-42, Section 12. 2, 2008.

[15] GB 3095-2012, **环境空气质量标准** [S].

[16] GB 11661-1989, **焦化厂卫生防护距离标准** [S].

[17] HJ 2. 2-2008, **环境影响评价技术导则大气环境** [S].

[18] U. S. EPA. Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities, 2005, EPA530-R-05-006.

[19] breeze-software. Risk Analyst Overview [EB/OL]. http://breeze-software. com/Templates/BreezeSoftware/Software/Overview. aspx? id=4461.

[20] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources [J]. Science of the Total Environment, 2006, **366**(1): 112-123.

[21] **李如忠, 童芳, 周爱佳, 等. 基于梯形模糊数的地表灰尘重金属污染健康风险评价模型** [J]. **环境科学学报**, 2011, **31**(8): 1790-1798.

[22] Contaminated Sites Remediation Program. Risk Assessment Procedures Manual [M]. ALASKA: Alaska Department of Environmental Conservation, 2000. 57-64.

[23] **易海涛. 关于焦炉大气环境影响评价的若干问题** [J]. **环境保护**, 2012, **Z1**: 45.

[24] **王静, 朱利中, 沈学优. 某焦化厂空气中 PAHs 的污染现状及健康风险评价** [J]. **环境科学**, 2003, **24**(1): 136-138.

[25] **李鹏宾, 严琼, 曹民. 某焦化厂气态和颗粒物中多环芳烃水平和成分谱特征分析** [J]. **中国职业医学**, 2010, **37**(3): 211-213.

[26] **伯鑫, 杜娟, 丁峰, 等. 钢铁行业大气环境影响评价方法与建议** [J]. **环境工程**, 2011, **29**(S1): 264-268.

[27] **王宗爽, 武婷, 段小丽, 等. 环境健康风险评价中我国居民呼吸速率暴露参数研究** [J]. **环境科学研究**, 2009, **22**(10): 1171-1175.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net