

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 PM _{2.5} 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晚芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻ 和 δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

固定源排放污染物健康风险评估方法的建立

陈强, 吴焕波

(兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 将 AERMOD 模型应用于健康风险评估中, 建立固定源排放污染物的健康风险评估方法, 直接预测污染源排放毒性污染物通过某种暴露途径引起的健康风险。以兰州市三大电厂在采暖期和非采暖期排放可吸入颗粒物 (PM_{10}) 中多环芳烃 (PAHs) 和其中的苯并[a]芘 (BaP) 对不同年龄、不同性别的人群在呼吸暴露下的健康风险 (包括致癌风险值和非致癌危险指数) 为例, 结合兰州市采样点处 PM_{10} 中 PAHs 的实测数据, 分析三大电厂排放 PM_{10} 中 PAHs 和 BaP 对人群呼吸暴露下的健康风险在采样点处的贡献率。结果表明贡献率与性别和年龄无关, 与时间段和风险类别有关, 非采暖期的贡献比采暖期的大, 非致癌危险指数的贡献比致癌风险值的大。通过与传统方法的对比验证该方法的可靠性。该方法适用于所有固定源排放毒性污染物的健康风险评估以及环境影响评价中环境风险的评价。

关键词: 固定源; 健康风险评估; AERMOD 模型; 多环芳烃; 环境影响评价

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1646-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.05.007

Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources

CHEN Qiang, WU Huan-bo

(Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A health risk assessment method of pollutants from fixed sources was developed by applying AERMOD model in the health risk assessment. The method could directly forecast the health risks of toxic pollutants from source by some exposure pathway. Using the established method, in combination with the data of sources and traditional health risk assessment method as well as the measured data of PAHs in inhalation particle matter (PM_{10}) in Lanzhou, the health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and benzo[a]pyrene (BaP) in PM_{10} from the three fire power plants and the health risk of PAHs and BaP in PM_{10} at the receptor point by inhalation exposure in heating and non-heating seasons was calculated, respectively. Then the contribution rates of the health risk caused by the three fire power plants to the health risk at the receptor point were calculated. The results showed that the contribution rates were not associated with sex and age, but were associated with time period and risk types. The contribution rates in the non-heating seasons were greater than those in heating seasons, and the contribution rates of the carcinogenic risk index were greater than those of the cancer risk value. The reliability of the established method was validated by comparing with the traditional method. This method was applicable to health risk assessment of toxic pollutants from all fixed sources and environmental risk assessment of environmental impact assessment.

Key words: fixed sources; health risk assessment method; AERMOD model; polycyclic aromatic hydrocarbons; environmental impact assessment

大气污染物对暴露于其中的人群有健康损害, 大气颗粒物已成为我国城市空气污染的主要组分, 其中可吸入颗粒物 (PM_{10}) 本身含有毒有害物质, 且由于粒径小, 容易吸附有毒有害物质而对人类健康的危害及环境的影响更大^[1,2]。2013 年, 国际癌症研究机构宣布大气污染会致癌, 已将大气颗粒物确定为致癌物质^[3]。目前健康风险评估主要是基于关心点处环境质量监测数据的健康风险评估的研究^[4], 若将大气扩散模型与健康风险评估相结合, 可以实现污染源排放污染物健康风险评估。王志霞等^[5]集成了复杂工业源扩散模型和传统风险评估中的多种风险源累积的风险评价模型, 建立区域

健康风险评估方法。目前对于固定污染源排放污染物的健康风险评估的研究较少。

多环芳烃 (PAHs) 因具有致癌、致畸和致突变性而被广泛关注^[6], 人们长期暴露在含有 PAHs 的大气中, 会使慢性呼吸系统疾病的发病率^[7,8]和多种癌症的患病风险升高^[9], 因此, 深入了解其对人体产生的健康风险^[10,11]具有重要意义。本研究拟基于污染源排放有毒有害污染物, 利用 AERMOD 模型

收稿日期: 2015-11-26; 修订日期: 2015-12-29

基金项目: 甘肃省科技攻关项目 (1204FKCA130); 半干旱气候变化教育部重点实验室 (兰州大学) 开放课题项目

作者简介: 陈强 (1969 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为环境化学、大气化学, E-mail: chenqhqh@lzu.edu.cn

预测污染物的健康风险值,建立固定源排放污染物的健康风险评价方法,也可用于环境影响评价,为从源头预防污染、保护人群健康提供理论依据.以兰州市为例,分析三大电厂在采暖期和非采暖期排放 PM_{10} 中 PAHs 和其中的苯并[a]芘(BaP)对不同年龄、不同性别的人群在呼吸暴露下的健康风险,并结合兰州市采样点处 PM_{10} 中 PAHs 的实测数据,分析三大电厂排放 PM_{10} 中 PAHs 和 BaP 对人群呼吸暴露下的健康风险在采样点处的贡献率.

1 方法的介绍

1.1 固定源排放污染物健康风险评价原理

暴露评价是健康风险评价的重要过程之一,经呼吸道吸入是 PM_{10} 中 PAHs 的主要暴露途径,呼吸暴露 PAHs 的日均摄入量计算方法来自文献[12~15],见公式(1):

$$D = q \times IR \times EF \times ED / (BW \times AT) \quad (1)$$

式中, D 为暴露途径下污染物的日平均摄入量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; q 为环境中污染物的质量浓度, $mg \cdot m^{-3}$; IR 为呼吸速率, $m^3 \cdot d^{-1}$; EF 为暴露频率, $d \cdot a^{-1}$; ED 为暴露持续时间, a ; BW 为体重, kg ; AT 为终身平均暴露时间, d .

健康风险包括非致癌风险和致癌风险,非致癌危害指数和致癌风险值(由于一般致癌风险值 $R^c \leq 0.001$,为低剂量暴露,本研究选用低剂量暴露公式)的计算方法^[16,17]见公式(2)和公式(3):

$$R^n = D / RfD \quad (2)$$

$$R^c = D \times SF \quad (3)$$

式中, R^n 为非致癌物经暴露途径所致危害指数; RfD 为非致癌污染物的暴露途径参考剂量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; R^c 为致癌物经暴露途径所致风险值; SF 为化学致癌物的致癌强度系数, $[mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}]^{-1}$.

AERMOD 模型是基于高斯模式的大气扩散模型,其原理^[18]见公式(4):

$$q(x, y, z; H) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (4)$$

简化为:

$$q = Q \times f(\bar{u}, \sigma_y, \sigma_z, y, H) \quad (5)$$

式中, q 为环境中 (x, y) 处污染物的质量浓度, $mg \cdot m^{-3}$; x, y 为相对于点源的坐标, m ; Q 为点源源强, $g \cdot s^{-1}$; 其余参数的意义见文献[18].

现对固定源排放污染物健康风险评价原理进行推导:

$$\begin{aligned} R^n &= D / RfD = D \times (1/RfD) \\ &= q \times IR \times EF \times ED / (BW \times AT) \times (1/RfD) \\ &= Q \times f(\bar{u}, \sigma_y, \sigma_z, y, H) \times IR \times \\ &\quad EF \times ED / (BW \times AT) \times (1/RfD) \\ &= IR \times EF \times ED / (BW \times AT) \times (1/RfD) \times \\ &\quad Q \times f(\bar{u}, \sigma_y, \sigma_z, y, H) \end{aligned}$$

令: $IR \times EF \times ED / (BW \times AT) \times (1/RfD) \times Q = R_Q^n$ 则:

$$R^n = R_Q^n \times f(\bar{u}, \sigma_y, \sigma_z, y, H)$$

同理,令: $IR \times EF \times ED / (BW \times AT) \times SF \times Q = R_Q^c$, 得:

$$R^c = R_Q^c \times f(\bar{u}, \sigma_y, \sigma_z, y, H) \quad (6)$$

与 AERMOD 原理类比,将 R_Q^c 和 R_Q^n 代入 AERMOD 模型中可预测得到 R^c 和 R^n ,在此定义 R_Q^c 和 R_Q^n 分别为致癌风险源强和非致癌危险源强.

该方法是基于 AERMOD 模型与健康风险评价模型的结合,故适用于所有固定源排放毒性污染物的健康风险评价,其中 TSP 需要采用 AERMOD 模型中的降尘模式.

1.2 原理中参数取值

本研究对人群按照年龄和性别分别考虑,具体参数见表 1 和表 2.

表 1 不同人群暴露频率及时间

人群	暴露频率 EF /d·a ⁻¹	暴露持续时间 ED/a	终生平均暴露 时间 AT/d
<6 岁	365	4	70 × 365
6 ~ 17 岁	365	10	70 × 365
18 ~ 60 岁	365	30	70 × 365
>60 岁	365	40	70 × 365

经呼吸暴露的部分 PAHs 的参考剂量 RfD 和致癌强度系数 SF 参考文献[21],见表 3.

根据 USEPA,当非致癌危害指数超过 1 时,认为会对人体健康产生危害;一般可接受的致癌风险值为 10^{-6} ,可接受的致癌风险值上限为 10^{-4} ^[22,23].

2 污染源数据

根据调查,兰州市二热电厂、西固电厂和范坪电厂均使用无烟煤,核算采暖期和非采暖期的燃煤量分别为 37.59×10^4 、 187.94×10^4 、 93.97×10^4 $t \cdot a^{-1}$ 和 38.88×10^4 、 194.41×10^4 、 97.21×10^4 $t \cdot a^{-1}$.

表 2 不同人群暴露呼吸速率和体重^[19,20]

年龄	男		女	
	体重(BW)/kg	呼吸速率(IR)/m ³ ·d ⁻¹	体重(BW)/kg	呼吸速率(IR)/m ³ ·d ⁻¹
<6 岁	12.02	5.71	11.65	5.85
6~17 岁	38.80	11.78	35.72	11.36
18~60 岁	60.62	19.02	53.50	14.17
>60 岁	59.42	11.53	51.32	10.36

表 3 PAHs 参考剂量及致癌强度系数表

Table 3 Reference dose and carcinogenic intensity coefficient of PAHs					
序号	名称	RfD/mg·(kg·d) ⁻¹	序号	名称	SF/[mg·(kg·d) ⁻¹] ⁻¹
1	NaP	8.57×10 ⁻⁴	1	BaA	3.10×10 ⁻¹
2	Acy	3.00×10 ⁻²	2	Chr	3.10×10 ⁻³
3	Ace	3.00×10 ⁻²	3	BbF	3.10×10 ⁻¹
4	Flu	2.00×10 ⁻²	4	BkF	3.10×10 ⁻²
5	Phe	1.50×10 ⁻²	5	BaP	3.10
6	Ant	1.50×10 ⁻¹	6	IcdP	3.10×10 ⁻¹
7	Flt	2.00×10 ⁻²	7	DahA	3.10
8	Pyr	1.50×10 ⁻²			
9	BghiP	1.50×10 ⁻²			

由于兰州市无电厂排放 PM₁₀ 中 PAHs 的源成分谱,本研究依据文献[24,25]对源的定义和采样方式的要求,搜集我国 9 个城市 14 个电厂排放 PM₁₀ 中 PAHs 有效实测源成分谱,对缺失值补充、归一化处理后进行聚类分析,并通过相关系数 R 和分歧系数 CD 验证聚类结果的合理性,最终聚类得到三类,分别是褐煤电厂(第Ⅰ类)、烟煤和无烟煤电厂(第Ⅱ类)以及电厂和一般工业锅炉混合(第Ⅲ类)三类. 根据兰州市实际情况,选用第Ⅱ类源成分谱并通过主成分分析得到电厂排放 PM₁₀ 中 PAHs 的归一化可替代源成分谱,见图 1. 根据第Ⅱ类中的文献[26,27],PM₁₀ 中 PAHs 的总量平均值为 1.37 μg·g⁻¹.

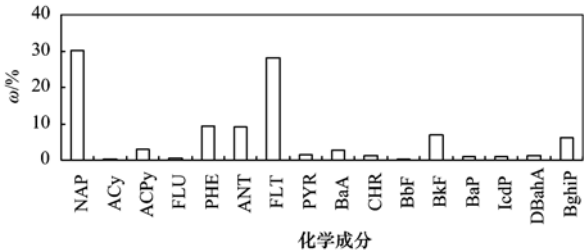


图 1 电厂排放 PM₁₀ 中 PAHs 的归一化可替代源成分谱图

Fig. 1 Normalization replaceable source profiles of PAHs in PM₁₀ emitted from coal-fired power plants

3 结果与分析

3.1 电厂排放 PAHs 引起的健康风险评价

计算三大电厂在采暖期和非采暖期排放 PM₁₀

中各 PAHs 成分对不同年龄、不同性别的人群在呼吸暴露下的致癌风险源强 R_Q^c 或非致癌危险源强 R_Q^n 、 R_Q^c (PAHs) 和 R_Q^n (PAHs) 由各成分的 R_Q^c 和 R_Q^n 相加得到,在此忽略协同作用和拮抗作用,结果见表 4.

将 R_Q^c 和 R_Q^n 代入 AERMOD 模型,得到三大电厂在采暖期和非采暖期排放 PM₁₀ 中 PAHs 和其中的 BaP 对不同年龄、不同性别的人群在呼吸暴露下的非致癌危害指数和致癌风险值等值线分布图(图 2)以及对采样点处暴露人群健康风险的贡献值和兰州市区域内健康风险最大贡献值,结果见表 5 和表 6.

由图 2 可知,三大电厂在采暖期排放 PM₁₀ 中 BaP 对小于 6 岁的男孩在呼吸暴露下的致癌风险值在兰州市的分布呈 3 个高值,位置分别在 3 个电厂周围,且西固电厂(西固区)>范坪电厂(七里河区)>二热电厂(城关区),与 3 个电厂的排污量有关.在污染源西及西南方位,致癌风险值变化梯度较大,且随着与污染源的距离增加,梯度变小,贡献值也减小,和与污染源距离、主导风向有关.其中致癌风险最大值出现在(3 600 m, 10 700 m),即西固电厂的西南部,最大值小于一般可接受的致癌风险值(10^{-6}),不会对人体健康产生危害.

由表 5 可知,三大电厂排放 PM₁₀ 中 PAHs 和 BaP 对采样点处人群呼吸暴露下的致癌风险值和非致癌危害指数均与性别、年龄和时间段有关,与性别的关系均为除 18~60 岁外,对女性的贡献值均大

表 4 采暖期和非采暖期致癌风险源强 R_Q^c 或非致癌危险源强 R_Q^n 的结果¹⁾

Table 4 Results of sources of carcinogenic risk or non-cancer risk in heating and non-heating seasons			采暖期			非采暖期		
项目			二热	西固	范坪	二热	西固	范坪
<6 岁	男	R_Q^c (PAHs)	8.004	40.018	20.009	4.224	21.120	10.561
		R_Q^n (PAHs)	0.369	1.847	0.923	0.195	0.975	0.487
		R_Q^c (BaP)	2.927	14.635	7.317	1.545	7.724	3.862
	女	R_Q^c (PAHs)	8.461	42.302	21.151	4.465	22.325	11.163
		R_Q^n (PAHs)	0.390	1.952	0.976	0.206	1.030	0.515
		R_Q^c (BaP)	3.094	15.470	7.735	1.633	8.164	4.082
6 ~ 17 岁	男	R_Q^c (PAHs)	12.789	63.941	31.971	6.749	33.746	16.874
		R_Q^n (PAHs)	0.590	2.951	1.475	0.311	1.557	0.779
		R_Q^c (BaP)	4.677	23.383	11.692	2.468	12.341	6.171
	女	R_Q^c (PAHs)	13.396	66.978	33.489	7.069	35.349	17.675
		R_Q^n (PAHs)	0.618	3.091	1.545	0.326	1.631	0.816
		R_Q^c (BaP)	4.899	24.494	12.247	2.585	12.927	6.464
18 ~ 60 岁	男	R_Q^c (PAHs)	39.649	198.236	99.118	20.923	104.623	52.314
		R_Q^n (PAHs)	1.830	9.148	4.574	0.966	4.828	2.414
		R_Q^c (BaP)	14.500	72.496	36.248	7.652	38.261	19.131
	女	R_Q^c (PAHs)	33.470	167.342	83.671	17.663	88.318	44.161
		R_Q^n (PAHs)	1.545	7.722	3.861	0.815	4.076	2.038
		R_Q^c (BaP)	12.240	61.197	30.599	6.459	32.298	16.150
>60 岁	男	R_Q^c (PAHs)	32.695	163.465	81.732	17.253	86.271	43.138
		R_Q^n (PAHs)	1.509	7.543	3.772	0.796	3.981	1.991
		R_Q^c (BaP)	11.957	59.780	29.890	6.310	31.550	15.776
	女	R_Q^c (PAHs)	34.014	170.059	85.030	17.949	89.752	44.878
		R_Q^n (PAHs)	1.570	7.848	3.924	0.828	4.142	2.071
		R_Q^c (BaP)	12.439	62.191	31.096	6.564	32.823	16.412

1) $R_Q^c: \times 10^{-8}, R_Q^n: \times 10^{-3}$

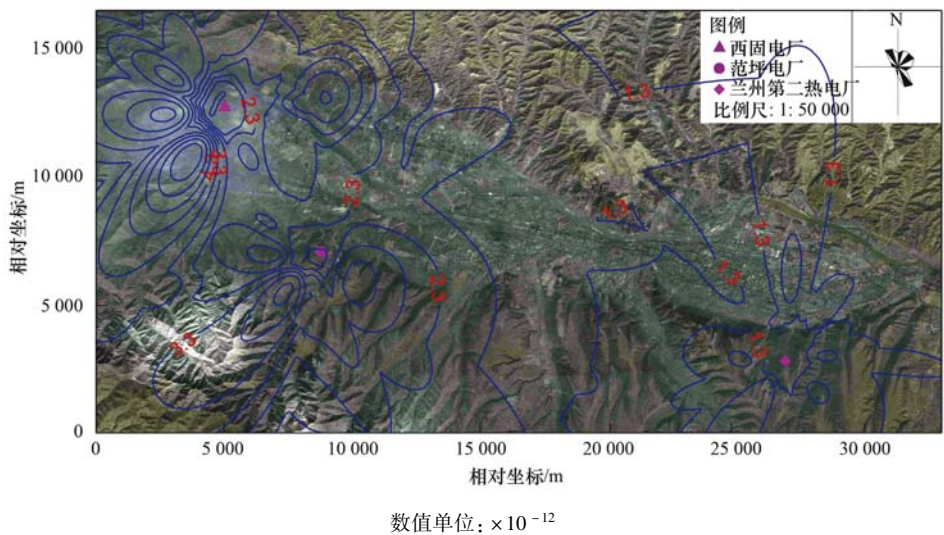


图 2 采暖期三大电厂排放 BaP 经呼吸暴露对小于 6 岁的男孩引起的致癌风险贡献等值线图

Fig. 2 Contour graph of carcinogenic risk for less than 6 year old boys caused by breathing exposure of BaP from the three power plants in heating season

于男性，与年龄的关系均为：小于 6 岁 < 6 ~ 17 岁 < 大于 60 岁 < 18 ~ 60 岁，与时间段的关系为采暖期均大于非采暖期。其中 BaP 对采样点处不同暴露人群的致癌风险值占 PAHs 总致癌风险的 36.5% 左右。非致癌危害指数远小于

1，以不会对人体健康产生危害，致癌风险值均小于 10^{-6} ，致癌风险在可接受范围内。所以，三大电厂排放 PM_{10} 中 PAHs 和 BaP 经扩散到达采样点处经呼吸暴露不会对人群造成致癌性和非致癌性危险。

表 5 三大电厂排放 PM₁₀ 中 PAHs 和 BaP 导致的健康风险在采样点处的贡献值

Table 5 Contributions of health risk caused by PAHs and BaP in PM₁₀ emitted from the three power plants

健康风险	单位	<6 岁		6 ~ 17 岁		18 ~ 60 岁		>60 岁	
		男	女	男	女	男	女	男	女
采暖期									
R^c (PAHs)	10^{-12}	3.39	3.59	5.42	5.68	16.82	14.19	13.87	14.43
R^n (PAHs)	10^{-8}	1.57	1.65	2.50	2.62	7.76	6.55	6.40	6.66
R^c (BaP)	10^{-12}	1.24	1.31	1.98	2.07	6.12	5.17	5.05	5.25
非采暖期									
R^c (PAHs)	10^{-12}	1.55	1.64	2.48	2.60	7.70	6.50	6.35	6.60
R^n (PAHs)	10^{-8}	0.72	0.76	1.15	1.20	3.55	3.00	2.93	3.05
R^c (BaP)	10^{-12}	0.57	0.60	0.90	0.95	2.80	2.37	2.31	2.40

由表 6 可知,三大电厂排放 PM₁₀ 中 PAHs 和 BaP 对区域人群呼吸暴露下的最大致癌风险值和最大非致癌危害指数与采样点处贡献值的分布规律一致,且均大于采样点处的值. 最大非致癌危害指数的贡献值远小于 1,不会对人体健康产生危害,最大致癌风险值的贡献值均小于 10⁻⁶,致癌风险在可接受范围内. 所以,三大电厂排放 PM₁₀ 中的 PAHs 和 BaP 经扩散后不会对兰州市所有的暴露人群造成致

癌性和非致癌性危险.

3.2 传统健康风险方法验证

为验证方法的可靠性和结果的准确性,用传统健康风险方法进行验证. 首先用 AERMOD 模型计算得到 PAHs 和 BaP 从三大电厂扩散至采样点和最大落地点(3 600 m, 10 700 m)的 24 h 平均浓度,然后根据传统健康风险评价的公式计算得到健康风险值,见表 7.

表 6 三大电厂排放 PM₁₀ 中 PAHs 和 BaP 导致的健康风险贡献最大值

Table 6 Largest contributions of health risk caused by PAHs and BaP in PM₁₀ emitted from the three power plants

健康风险	单位	<6 岁		6 ~ 17 岁		18 ~ 60 岁		>60 岁	
		男	女	男	女	男	女	男	女
采暖期									
R^c (PAHs)	10^{-11}	17.23	18.22	27.54	28.84	85.37	72.06	70.39	73.23
R^n (PAHs)	10^{-8}	7.95	8.41	12.71	13.31	39.39	33.25	32.48	33.80
R^c (BaP)	10^{-12}	6.28	6.64	10.03	10.51	31.11	26.26	25.65	26.68
非采暖期									
R^c (PAHs)	10^{-12}	10.07	10.65	16.10	16.86	49.91	42.13	41.15	42.81
R^n (PAHs)	10^{-8}	4.65	4.91	7.43	7.78	23.03	19.44	18.99	19.76
R^c (BaP)	10^{-12}	3.68	3.89	5.87	6.15	18.21	15.37	15.02	15.62

表 7 传统方法计算得到的健康风险值

Table 7 Result of the health risk calculated using the traditional method

健康风险	点位	单位	<6 岁		6 ~ 17 岁		18 ~ 60 岁		>60 岁	
			男	女	男	女	男	女	男	女
采暖期										
R^c (PAHs)	采样点	10^{-12}	3.39	3.59	5.42	5.68	16.82	14.19	13.87	14.43
R^n (PAHs)		10^{-8}	1.57	1.65	2.50	2.62	7.76	6.55	6.40	6.66
R^c (BaP)		10^{-12}	1.24	1.31	1.98	2.07	6.12	5.17	5.05	5.25
R^c (PAHs)		10^{-11}	17.23	18.22	27.54	28.84	85.37	72.06	70.39	73.23
R^n (PAHs)	(3 600 m, 10 700 m)	10^{-8}	7.95	8.41	12.71	13.31	39.39	33.25	32.48	33.80
R^c (BaP)		10^{-12}	6.28	6.64	10.03	10.51	31.11	26.26	25.65	26.68
非采暖期										
R^c (PAHs)	采样点	10^{-12}	1.55	1.64	2.48	2.60	7.70	6.50	6.35	6.60
R^n (PAHs)		10^{-8}	0.72	0.76	1.15	1.20	3.55	3.00	2.93	3.05
R^c (BaP)		10^{-12}	0.57	0.60	0.90	0.95	2.80	2.37	2.31	2.40
R^c (PAHs)		10^{-12}	10.07	10.65	16.10	16.86	49.91	42.13	41.15	42.81
R^n (PAHs)	(3 600 m, 10 700 m)	10^{-8}	4.65	4.91	7.43	7.78	23.03	19.44	18.99	19.76
R^c (BaP)		10^{-12}	3.68	3.89	5.87	6.15	18.21	15.37	15.02	15.62

从表 7 与表 5、表 6 的对比可以看出,两种方法的结果完全一致,说明该方法的建立是可行的。

3.3 电厂排放污染物引起健康风险对总健康风险的贡献

2010 年 12 月 23 日至 2012 年 1 月 17 日在兰州大学本部气象楼(共二层)楼顶采集 PM₁₀ 样品,分析

得到采样点处 PM₁₀ 中 PAHs 的成分谱,具体数据见文献[28]。

根据 1.1 节中健康风险公式,得到采暖期和非采暖期兰州市采样点处 PM₁₀ 中 PAHs 和 BaP 对不同人群在呼吸暴露下的致癌风险值和非致癌危害指数后,结合表 5 计算三大电厂的贡献率,结果见表 8。

表 8 三大电厂排放 PM₁₀ 中 PAHs 和 BaP 导致的健康风险在采样点处的贡献率

Table 8 Health risk contribution at sampling site caused by PAHs and BaP in PM ₁₀ emitted from the three power plants									
健康风险	单位	<6 岁		6 ~ 17 岁		18 ~ 60 岁		>60 岁	
		男	女	男	女	男	女	男	女
		采暖期							
R ^c (PAHs)	‰	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5
R ⁿ (PAHs)	‰	0.030 0	0.030 0	0.030 0	0.030 0	0.030 0	0.030 0	0.030 0	0.030 0
R ^c (BaP)	‰	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2
非采暖期									
R ^c (PAHs)	‰	0.001 2	0.001 2	0.001 2	0.001 2	0.001 2	0.001 2	0.001 2	0.001 2
R ⁿ (PAHs)	‰	0.150 0	0.150 0	0.150 0	0.150 0	0.150 0	0.150 0	0.150 0	0.150 0
R ^c (BaP)	‰	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 5

由表 8 可知,三大电厂排放 PM₁₀ 中 PAHs 和 BaP 对人群呼吸暴露下的健康风险在采样点处的贡献率与性别和年龄无关,与时间段和风险类别有关,非采暖期的贡献比采暖期的大,原因为采暖期无论是电厂排放 PM₁₀ 中的 PAHs 还是采样点处 PM₁₀ 中的 PAHs 的浓度都增加,但对采样点处 PM₁₀ 中的 PAHs 的贡献源增多,浓度增加幅度大于电厂排放 PM₁₀ 中的 PAHs 的增加幅度,在同样的暴露量下,健康风险也满足这样的关系;非致癌危险指数的贡献比致癌风险值的大,是因为电厂排放的非致癌成分的浓度比致癌成分的大(见图 1),而采样点处 PM₁₀ 中的 PAHs 中致癌成分的浓度大于非致癌成分(见文献[28]),无论是非致癌危险指数还是致癌风险值与污染物的浓度成正比,基于以上浓度关系,导致非致癌危险指数的贡献比致癌风险值的大。另外, BaP 的致癌风险值的贡献率将近为 PAHs 的一半。

4 结论

本研究基于污染源排放毒性污染物,结合健康风险评价,利用 AERMOD 模型预测污染物的健康风险值,建立固定源排放污染物的健康风险评价方法,并与传统方法对比说明方法的合理性。应用该方法分析兰州市三大电厂在采暖期和非采暖期排放 PM₁₀ 中 PAHs 和其中的 BaP 对不同年龄、不同性别的人群在呼吸暴露下的非致癌危害指数和致癌风险值,分别小于可接受非致癌危害指数和一般可接受的致癌风险值,不会对兰州市人群造成致癌性和非致癌性危险。结合兰州市采样点处 PM₁₀ 中 PAHs 的

实测数据,分析三大电厂排放 PM₁₀ 中 PAHs 和 BaP 对人群呼吸暴露下的健康风险在采样点处的贡献率,结果表明贡献率与性别和年龄无关,与时间段和风险类别有关,非采暖期的贡献比采暖期的大,非致癌危险指数的贡献比致癌风险值的大。该方法适用于所有固定源排放毒性污染物的健康风险评价以及环境影响评价中环境风险的评价。

参考文献:

[1] Heal M R, Kumar P, Harrison R M. Particles, air quality, policy and health [J]. Chemical Society Reviews, 2012, **41** (19): 6606-6630.

[2] 陶燕,刘亚梦,米生权,等. 大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响 [J]. 环境科学学报, 2014, **34** (3): 592-597.

[3] International Agency for Research on Cancer, World Health Organization. IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. No. 221 [R]. World Health Organization, 2013.

[4] 柯钊跃. 典型污染源或敏感点大气颗粒物的组分特征与健康暴露水平研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2011.

[5] 王志霞,陆雍森. 区域持久性有机物的健康风险评价方法研究 [J]. 环境科学研究, 2007, **20** (3): 152-157.

[6] 张承中,陈静,刘立忠,等. 西安市大气中多环芳烃的季节变化及健康风险评价 [J]. 环境工程学报, 2012, **6** (12): 4579-4584.

[7] Schwartz J. Air pollution and daily mortality: a review and meta analysis [J]. Environmental Research, 1994, **64** (1): 36-52.

[8] Fairley D. Daily mortality and air pollution in Santa Clara County, California: 1989- 1996 [J]. Environmental Health Perspectives, 1999, **107** (8): 637-641.

[9] Hemminki K, Pershagen G. Cancer risk of air pollution;

- epidemiological evidence [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1994, **102**(S4): 187-192.
- [10] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3566-3570.
- [11] Sun J L, Jing X, Chang W J, *et al.* Cumulative health risk assessment of halogenated and parent polycyclic aromatic hydrocarbons associated with particulate matters in urban air[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **113**: 31-37.
- [12] 李丽娜. 上海市多介质环境中持久性毒害污染物的健康风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [13] 董婷, 李天昕, 赵秀阁, 等. 某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1238-1244.
- [14] Brown D G. Development of a raoult's law-based screening-level risk assessment methodology for coal tar and its application to ten tars obtained from former manufactured gas plants in the eastern United States[J]. *Journal of Environmental Protection*, 2013, **4**(6): 33554.
- [15] 赵亚娟, 龚巍巍, 栾胜基. 河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 2960-2966.
- [16] 冯焕银, 傅晓钦, 赵倩, 等. 宁波土壤中多环芳烃的健康风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(10): 1998-2004.
- [17] 徐志荣, 王浙明, 许明珠, 等. 浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1864-1870.
- [18] 蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊, 等. 空气污染气象学教程[M]. (第二版). 北京: 气象出版社, 2004.
- [19] 王宗爽, 武婷, 段小丽, 等. 环境健康风险评估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.
- [20] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评估中我国居民暴露参数探讨[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1164-1170.
- [21] 林海鹏, 武晓燕, 王琼, 等. 兰州市工业区 PM₁₀ 中多环芳烃的来源分析及健康风险评估[J]. *环境与健康杂志*, 2013, **30**(5): 426-430.
- [22] 董继元, 王式功, 尚可政. 黄河兰州段多环芳烃类有机污染物健康风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(9): 1892-1897.
- [23] 伯鑫, 王刚, 温柔, 等. 焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评估研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2742-2747.
- [24] 冯银厂. 关于化学质量平衡(CMB)受体模型应用中若干技术问题的研究[D]. 天津: 南开大学, 2002.
- [25] 中国环境监测总站. 《环境空气颗粒物源解析监测技术方法指南(试行)》[EB/OL]. http://www.cnemc.cn/publish/totalWebSite/news/news_39859.html, 2014-01-27.
- [26] 赵承美, 赵新富, 孙俊民, 等. 燃煤电厂排放可吸入颗粒物中多环芳烃的分布特征[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2008, **21**(2): 203-205.
- [27] 赵承美, 孙俊民, 刘惠永. 褐煤与烟煤燃烧排放可吸入颗粒物的特性[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(12): 140-143.
- [28] 王芳. 兰州市大气颗粒物及其化学组分污染特征和成因研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行