

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰 (2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲 (2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍 (2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健 (2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平 (2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉 (2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰 (2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣 (2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇 (2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林 (2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲 (2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清 (2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健 (2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远 (2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽 (2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞 (2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊 (2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫 (2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平 (2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜 (2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营 (2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊 (2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝 (2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春 (2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌 (2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星 (2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄 (2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军 (2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶 (2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳 (2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明 (2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟 (2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健 (2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯 (2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华 (2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕 (2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠 (2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫 (2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫 (2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅 (2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐 (2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒 (2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒 (2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏 (2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华 (2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平 (2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军 (2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新 (2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军 (2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成 (2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊 (2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱 (2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例

佟瑞鹏, 杨校毅

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要: 为获得更为合理的健康风险评价结果,并辨识对健康风险影响最大的因素,基于蒙特卡罗随机模拟,运用概率风险评价模型,定量评估了中国上海某居民区土壤中16种PAHs对居民的健康风险水平,并对各参数进行敏感性分析。结果表明,土壤中PAHs造成的健康风险服从对数正态分布,总的致癌风险为 $3.43 \times 10^{-5} \pm 2.63 \times 10^{-5}$,最小值为 8.10×10^{-7} ,最大值为 2.39×10^{-4} ,超过 10^{-6} 的概率为95%,超过 10^{-5} 的概率为75%,超过 10^{-4} 的概率小于5%;总的危害商为 $4.74 \times 10^{-2} \pm 3.42 \times 10^{-2}$,不超过1,风险较小;在7种具有致癌效应的PAHs中,苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽和苯并(a)蒽是总致癌风险的主要贡献物质,贡献率分别占60.41%、26.84%和6.56%;3种暴露途径中,经口途径是造成致癌风险的主要途径,贡献率为73.22%;对于总致癌风险,人体暴露参数中每日土壤摄入量、暴露周期、暴露皮肤面积敏感度较大,分别为58.35%、50.21%和20.51%;体重具有负敏感性,敏感度为-11.66%。

关键词: 土壤;多环芳烃;健康风险评价;概率风险模型;蒙特卡罗模拟

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2522-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611040

Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method: A Case of PAHs

TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi

(School of Resources & Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to obtain more reasonable health risk values and get the most significant factors, probabilistic risk models based on Monte Carlo simulation were applied, the health risk level of 16 PAHs in soil was evaluated for a residential area in Shanghai, China. And, sensitivity analysis was conducted for each parameter. The results showed that, the health risks caused by PAHs followed lognormal distribution with $3.43 \times 10^{-5} \pm 2.63 \times 10^{-5}$ for carcinogenic risk, which was between 8.10×10^{-7} and 2.39×10^{-4} and the probabilities exceeding 10^{-6} , 10^{-5} and 10^{-4} were 95%, 75% and less than 5%. And the value was $4.74 \times 10^{-2} \pm 3.42 \times 10^{-2}$ for hazard quotient, which was between 1.38×10^{-3} and 2.85×10^{-1} and less than 1, so could be regarded negligible. As for total carcinogenic risk (TCR), the most influential PAHs were BaP, DBA and BaA, and their contribution rates were 60.41%, 26.84% and 6.56%, respectively. Among the three exposure pathways, the risk was mainly caused by oral intake with the contribution rate of 73.22%, followed by dermal contact with 26.51%. The most influential parameters were: intake amount of soil per day, exposure duration and exposed skin area with the sensitivity values of 58.35%, 50.21% and 20.51%, respectively. And body weight had a negative sensitivity with -11.66%. When it came to total hazard quotient (THQ), Pyr, FL and PA accounted for the most with 36.56%, 33.18% and 13.18%, respectively. And the oral intake and dermal contact were also primary exposure pathways with 72.21% and 26.36%. The most significant parameters were the same with TCR with the sensitivity values of 63.52%, 53.18%, 24.39% and -13.98%, respectively.

Key words: soil; PAHs; health risk assessment; probabilistic risk model; Monte Carlo simulation

近年来,由于环境因素引起的健康风险已得到越来越多的关注,多环芳烃(PAHs)作为持久性有机污染物广泛存在于环境中,其致癌、致畸和致突变性都非常强,由PAHs造成的环境污染问题引起大量的报道,已成为世界各国面临的重大环境和公共健康问题^[1]。

PAHs的性质^[2,3]、物质来源^[4,5]、健康风险^[6-8]、污染修复^[9]等方面都曾被研究。在进行健康风险评价时,传统的风险评价是确定性评估的过程,多使用理论最大参数来计算风险保守值^[10],这

就导致所获得的风险评价结果过大或者过小^[11]。同时,风险评价过程中,不确定性是固有存在的^[12],在风险评价过程中应辨识其不确定性,并加以量化,这可以通过概率风险来实现^[13]。概率风险评价能够获得风险的分布情况,并且能够辨识暴露途径和参数对风险的影响程度^[14]。在评价PAHs健康风险

收稿日期: 2016-11-06; 修订日期: 2017-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51674268)

作者简介: 佟瑞鹏(1977~),男,博士,副教授,主要研究方向为职业健康与环境风险评估, E-mail: tongrp@cumt.edu.cn

时,其毒性评估部分通常基于各 PAHs 相对于苯并(a)芘(BaP)各自的毒性当量因子,采用 BaP 的致癌斜率因子,或者直接采用各 PAHs 的致癌斜率因子和各 PAHs 非致癌参考剂量,而采用后者进行毒性评估能够获得更为科学地评价结果^[15]。

鉴于此,本文以美国环保署(USEPA)列出的 16 种 PAHs 污染物的健康风险作为评价目标,运用概率风险评价模型,直接采用各 PAHs 的致癌斜率因子和各 PAHs 非致癌参考剂量进行毒性评估,基于蒙特卡罗随机模拟,运用 Crystal Ball 11.1 软件,评价中国上海市土壤中 16 种 PAHs 对居民的健康风险,分析各参数对健康风险的影响,以期为该区域健康风险管理提供指导。

1 材料与方法

1.1 暴露假设

本研究中评估用地为敏感用地的某居民区,主要评估该居民区成人的致癌风险和危害商。致癌风险和危害商分别表征居民暴露于致癌效应物质和非

致癌物质受到危害的水平^[16]。居民区内成人可经由 3 种途径摄入土壤:①经口途径,主要是摄入被 PAHs 污染的土壤;②经皮肤接触途径,主要是接触被 PAHs 污染的土壤;③经吸入途径,主要是呼吸吸入被 PAHs 污染的土壤颗粒物。

1.2 毒性评估

污染物引起暴露人群健康反应的各种证据称为毒性评估,主要用于评估人群对污染物的暴露程度和产生负面效应发生率之间的关系。最新研究表明,中国上海市土壤中 USEPA 推荐优先控制的 16 种 PAH 占总检测到 26 种 PAH 的 81.41%^[17],可代表整体风险水平,同时由于其他种类 PAH 相关参数的缺失,本研究将以 USEPA 优先控制的 16 种 PAH 为评价对象,如表 1 所示。参考美国国际环境评估中心(NCEA)、美国环保署综合风险信息系(IRIS)、美国环保署风险评估系统(RAIS),结合冯焕银的相关研究^[6],获得关于 16 种 PAH 的毒性参数(SF 为具有致癌效应 PAHs 的致癌斜率因子;RfD 为具有非致癌效应 PAHs 的参考剂量),如表 1 所示。

表 1 16 种 PAHs 的 SF 和 RfD 值/kg·d·mg⁻¹
Table 1 SF and RfD data of 16 PAHs/kg·d·mg⁻¹

PAHs	致癌效应 PAHs 的 SF 值			PAHs	非致癌效应 PAHs 的 RfD 值		
	SF _o	SF _i	SF _d		RfD _o	RfD _i	RfD _d
苯并(a)蒽(BaA)	7.30×10 ⁻¹	3.10×10 ⁻¹	1.46	萘(Nap)	4.00×10 ⁻²	8.57×10 ⁻⁴	2.00×10 ⁻²
蒽(CHR)	7.30×10 ⁻³	3.10×10 ⁻³	1.46×10 ⁻²	芘(AcPy)	6.00×10 ⁻²	3.00×10 ⁻²	3.00×10 ⁻²
苯并(a)芘(BaP)	7.30	3.10	14.60	芘(Acp)	6.00×10 ⁻²	3.00×10 ⁻²	3.00×10 ⁻²
苯并(k)荧蒽(BkF)	7.30×10 ⁻²	3.10×10 ⁻²	1.46×10 ⁻¹	芴(Flu)	4.00×10 ⁻²	2.00×10 ⁻²	2.00×10 ⁻²
苯并(b)荧蒽(BbF)	7.30×10 ⁻¹	3.10×10 ⁻¹	1.46	菲(PA)	3.00×10 ⁻²	1.50×10 ⁻²	1.50×10 ⁻²
茚并(1,2,3-cd)芘(IND)	7.30×10 ⁻¹	3.10×10 ⁻¹	1.46	蒽(Ant)	3.00×10 ⁻¹	1.50×10 ⁻¹	1.50×10 ⁻¹
二苯并(a,h)蒽(DBA)	7.30	3.10	14.60	荧蒽(FL)	4.00×10 ⁻²	2.00×10 ⁻²	2.00×10 ⁻²
—	—	—	—	芘(Pyr)	3.00×10 ⁻²	1.50×10 ⁻²	1.50×10 ⁻²
—	—	—	—	苯并(g,h,i)芘(BghiP)	3.00×10 ⁻²	1.50×10 ⁻²	1.50×10 ⁻²

1.3 暴露量化及风险表征

参照国家环境保护部提出的《污染场地风险评估技术导则》^[16],被 PAHs 污染土壤的健康风险可分为致癌风险和危害商两部分,计算公式如下所示。

(1) 经口摄入被 PAHs 污染的土壤

致癌风险:

$$CR_{ois} = OSIER_{ca} \times C_{sur} \times SF_o \tag{1}$$

式中,CR_{ois}为经口摄入被 PAHs 污染土壤的致癌风险;C_{sur}为土壤中 PAHs 含量;SF_o为经口摄入致癌斜率因子;OSIER_{ca}为经口摄入土壤暴露量(致癌效应),计算公式为:

$$OSIER_{ca} = \frac{OSIR \times ED \times EF \times ABS_o}{BW \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \tag{2}$$

危害商:

$$HQ_{ois} = \frac{OSIER_{nc} \times C_{sur}}{RfD_o \times SAF} \tag{3}$$

式中,HQ_{ois}为经口摄入被 PAHs 污染土壤的危害商;RfD_o为经口摄入参考剂量;OSIER_{nc}为经口摄入土壤暴露量(非致癌效应),计算公式为:

$$OSIER_{nc} = \frac{OSIR \times ED \times EF \times ABS_o}{BW \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \tag{4}$$

(2) 经皮肤接触被 PAHs 污染的土壤

致癌风险:

$$CR_{dcs} = DCSER_{ca} \times C_{sur} \times SF_d \tag{5}$$

式中,CR_{dcs}为皮肤接触土壤中 PAHs 的致癌风险;SF_d为皮肤接触致癌斜率因子;DCSER_{ca}为皮肤接

途径的土壤暴露量(致癌效应),计算公式为:

$$DSCER_{ca} = \frac{SAE \times SSAR \times ED \times EF \times E_v \times ABS_d}{BW \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (6)$$

危害商:

$$HQ_{dcs} = \frac{DSCER_{nc} \times C_{sur}}{RfD_d \times SAF} \quad (7)$$

式中, HQ_{dcs} 为皮肤接触被 PAHs 污染土壤途径的危害商; RfD_d 为皮肤接触参考剂量; $DSCER_{nc}$ 为皮肤接触途径的土壤暴露量(非致癌效应), 其计算公式为:

$$DSCER_{nc} = \frac{SAE \times SSAR \times ED \times EF \times E_v \times ABS_d}{BW \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (8)$$

(3) 经呼吸吸入被 PAHs 污染的土壤颗粒物
致癌风险:

$$CR_{pis} = PISER_{ca} \times C_{sur} \times SF_i \quad (9)$$

式中, CR_{pis} 为吸入被 PAHs 污染土壤颗粒物的致癌风险; SF_i 为呼吸吸入致癌斜率因子; $PISER_{ca}$ 为吸入土壤颗粒物的土壤暴露量(致癌效应), 计算公式为:

$$PISER_{ca} = \frac{PM_{10} \times DAIR \times ED \times PIAF}{BW} \times \frac{fsp_o \times EFO + fsp_i \times EFI}{AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (10)$$

危害商:

$$HQ_{pis} = \frac{PISER_{nc} \times C_{sur}}{RfD_i \times SAF} \quad (11)$$

式中, HQ_{pis} 为吸入被 PAHs 污染土壤颗粒的危害商; RfD_i 为呼吸吸入参考剂量; $PISER_{nc}$ 为吸入土壤颗粒

物的土壤暴露量(非致癌效应), 计算公式为:

$$PISER_{nc} = \frac{PM_{10} \times DAIR \times ED \times PIAF}{BW} \times \frac{fsp_o \times EFO + fsp_i \times EFI}{AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (12)$$

(4) 总健康风险水平

总致癌风险:

$$TCR = \sum_{i=1}^n (CR_{ois,n} + CR_{dcs,n} + CR_{pis,n}) \quad (13)$$

式中, n 取值为 1~7, 依次表示苯并(a)蒽、蒽、苯并(a)芘、苯并(k)荧蒽、苯并(b)荧蒽、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽 7 种具有致癌效应的 PAHs, TCR 表示 7 种具有致癌效应 PAHs 的总致癌风险。

总危害商:

$$THQ = \sum_{i=1}^m (HQ_{ois,m} + HQ_{dcs,m} + HQ_{pis,m}) \quad (14)$$

式中, m 取值为 1~9, 依次表示萘、苊烯、苊、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并(g,h,i)芘这 9 种具有非致癌效应的 PAHs, THQ 表示 9 种具有非致癌效应 PAHs 的总危害商。

参考杜芳芳等^[18]的相关研究, 得到表 2 中上海市土壤中 PAHs 的含量分布情况。土壤样品采集于上海市, 共布置 80 个采样点, 采集每个采样点 5 个以上土样混合作为该点样品, 经处理及测试, 采用方法空白、基质加标等进行质量保证和控制, 得到 16 种 PAHs 的含量数据。

公式(1)~(14)中其它参数主要来源于中国已开展的大范围的大型调查资料及相关研究, 取值及意义如表 3 所示。

表 2 上海市土壤中 PAHs 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 PAHs concentrations in soils in Shanghai/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

PAHs	最小值	最大值	平均值	PAHs	最小值	最大值	平均值
BaA	0.004	1.698	0.231	AcPy	0.001	0.173	0.019
CHR	0.008	1.548	0.252	Acp	0	0.714	0.031
BaP	0.013	1.534	0.280	Flu	0.003	0.227	0.034
BkF	0.015	0.578	0.123	PA	0.013	1.693	0.271
BbF	0.015	0.578	0.123	Ant	0.004	0.276	0.054
IND	0.011	0.919	0.185	FL	0.027	5.662	0.571
DBA	0.002	0.690	0.068	Pyr	0.021	4.665	0.491
Nap	0.001	0.112	0.018	BghiP	0.012	1.441	0.225

2 结果与讨论

本研究居民区位于中国上海市, 上海地区的土壤已遭到多种 PAHs 不同程度的污染^[22,23]。采样所得的土壤样品来自于表层土壤, 其 PAHs 污染主要

来源于燃烧源, 贡献率最大的是石油类燃烧, 煤和生物质次之^[18]。该小区是上海市内的普通小区, 具有较好的代表性。

在风险评价过程中, 其不确定性主要来自于暴露量化和风险表征, 暴露量化求解中涉及到的各人

表 3 上海市居民(成人)的暴露参数
Table 3 Parameter values of the model for probabilistic risk assessment of Shanghai(adult)

参数	参数含义	单位	分布形式	平均值	最小值	最大值	标准差	文献
BW	体重	kg	正态	63.5	42.1	71.6	5.8	
OSIR	每日土壤摄入量	mg·d ⁻¹	三角	100	20	1 000	—	
SAE	暴露皮肤表面积	cm ²	三角	1 848	797.5	19 400	—	
DAIR	每日空气呼吸量	m ³ ·d ⁻¹	三角	16.3	6.24	114	—	[16,19,20]
ED	暴露周期	a	三角	24	7	64	—	
AT _{ca}	致癌效应平均时间	d	均匀	26 280	25 404	27 156	—	
EFO	室外暴露频率	d·a ⁻¹	三角	45.9	36.5	213	—	
EFI	室内暴露频率	d·a ⁻¹	三角	314.6	104	347.7	—	
ABS _d	皮肤接触吸收效率因子	—	—	0.13	—	—	—	[21]
AT _{nc}	非致癌效应平均时间	d	—	2 190	—	—	—	
EF	暴露频率	d·a ⁻¹	—	350	—	—	—	
ABS _o	经口摄入吸收效率因子	—	—	1	—	—	—	
SSAR	皮肤表面土壤黏附系数	—	—	0.07	—	—	—	
E _v	每日皮肤接触事件频率	—	—	1	—	—	—	[16]
PM ₁₀	空气中可吸入悬浮颗粒物含量	—	—	0.15	—	—	—	
PIAF	吸入土壤颗粒物在体内滞留比例	—	—	0.75	—	—	—	
f _{sp_o}	室外空气中来自土壤颗粒物所占比例	—	—	0.5	—	—	—	
f _{sp_i}	室内空气中来自土壤颗粒物所占比例	—	—	0.8	—	—	—	
SAF	暴露于土壤的参考剂量分配系数	—	—	0.2	—	—	—	

体参数会造成不确定性,风险表征求解中涉及到的 PAHs 含量也具有不确定性. 这些因素不同程度地都会影响到计算结果对实际风险值的真实反映,造成了致癌风险的不确定性. 结合以上各公式,运用 Crystal Ball 11.1 软件对本研究所涉及 PAHs 中的 16 种物质的总健康风险及各物质的健康风险用蒙特卡罗方法模拟计算,设定随机模拟迭代次数为 10 000 次,置信水平确定为 95%;所得风险评价结果运用 Origin Pro 9.0 处理作图.

2.1 总健康风险

由公式(1)~(14)可得出该地 PAHs 污染造成的健康风险,结果如图 1 和表 4 所示. 该场地造成的总致癌风险(TCR)服从对数正态分布,为 $3.43 \times 10^{-5} \pm 2.63 \times 10^{-5}$,最小值为 8.10×10^{-7} ,最大值为 2.39×10^{-4} ,平均值为 3.43×10^{-5} . USEPA 推荐的可接受致癌风险值为 1.0×10^{-6} ,致癌风险值上限为 1.0×10^{-4} ,若风险值小于 1.0×10^{-6} ,则可以接受,若风险值大于 1.0×10^{-4} ,则潜

在风险较大. 该处总致癌风险值超过 1.0×10^{-6} 的概率为 95%,超过 1.0×10^{-5} 的概率为 75%,最大致癌风险值甚至为可接受致癌风险值上限的 2.39 倍,所以需要 对污染土壤进行修复和综合治理. Kang 等^[24]运用概率模型研究了中国湖南地区儿童和成年人暴露于 PAHs 的健康风险,得出儿童的致癌风险为 $2.73 \times 10^{-8} \sim 8.04 \times 10^{-6}$,成年人的致癌风险为 $2.00 \times 10^{-8} \sim 5.89 \times 10^{-6}$. 对于儿童和成年人来说,有 76% 和 71% 的可能会超过 10^{-6} .

土壤中 PAHs 造成的总危害商(THQ)服从 $4.74 \times 10^{-2} \pm 3.42 \times 10^{-2}$ 的对数正态分布,其最小风险为 1.38×10^{-3} ,最大风险为 2.85×10^{-1} ,平均值为 4.74×10^{-2} . 如果危害商值小于等于 1,则可以接受;大于 1,则可能产生毒性. 本研究中,危害商远远低于 1,说明这些污染物不会对人群产生明显的健康危害,但是长期处于该场地,也会给居民带来潜在的不可接受风险.

表 4 总健康风险统计值
Table 4 Statistical values of total health risk

风险	最小值	最大值	平均值	标准差	百分位/%					
					5	25	50	75	95	99.9
TCR	8.10×10^{-7}	2.39×10^{-4}	3.43×10^{-5}	2.63×10^{-5}	6.35×10^{-6}	1.54×10^{-5}	2.72×10^{-5}	4.54×10^{-5}	8.69×10^{-5}	1.77×10^{-4}
THQ	1.38×10^{-3}	2.85×10^{-1}	4.74×10^{-2}	3.42×10^{-2}	1.00×10^{-2}	2.27×10^{-2}	3.87×10^{-2}	6.32×10^{-2}	1.15×10^{-1}	2.23×10^{-1}

2.2 每种 PAHs 的健康风险

由公式(1)~(12)可得每种 PAHs 的健康风险

及每种暴露途径对人体造成的健康风险,如图 2 所示.

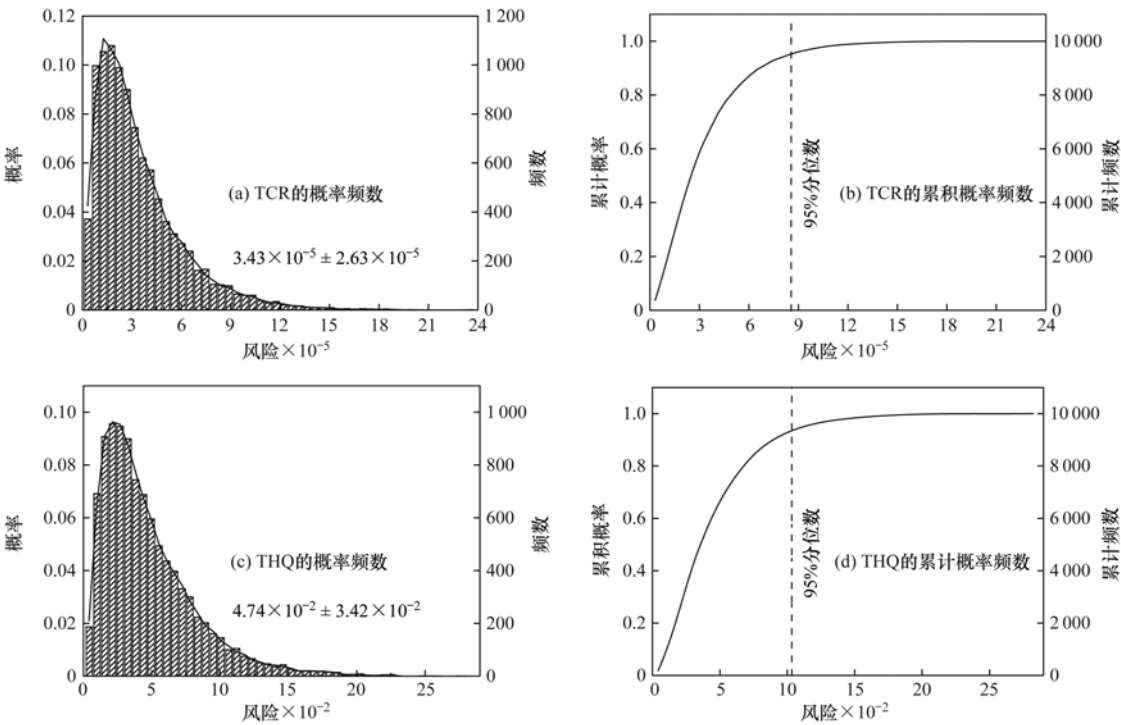


图 1 PAHs 总的健康风险

Fig. 1 Total health risk of PAHs

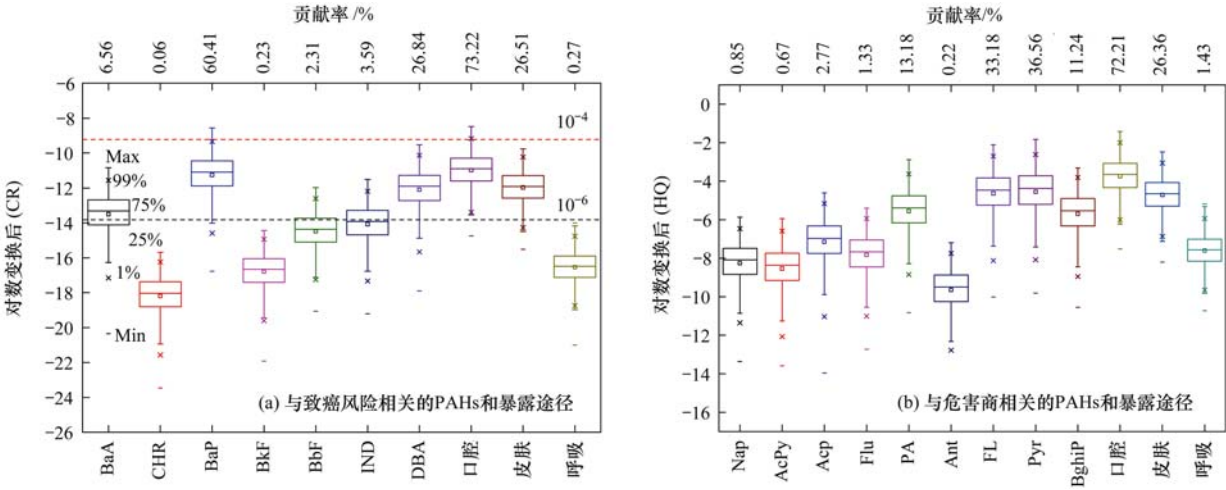


图 2 16 种 PAHs 和 3 种暴露途径的健康风险分布及贡献率

Fig. 2 Health risks and the contribution rates of 16 PAHs and 3 exposure pathways

对于由 PAHs 造成的致癌风险, 经口摄入途径是造成致癌风险的主要途径, 贡献率为 73.22%, 其次为皮肤接触途径, 贡献率为 26.51%。苯并(a)芘对总的致癌风险贡献最大, 占 60.41%; 接着是二苯并(a,h)蒽和苯并(a)蒽, 分别占 26.84% 和 6.56%。北京、上海地区的多环芳烃经口摄入的膳食暴露量贡献比例分别为 88.70%^[25]、94% 左右^[26], 皮肤接触所导致的暴露几乎可以忽略。姜林等^[27]在对北京某炼焦化学厂场地污染的健康风险评价发现, 苯并(a)芘和苯经口摄入贡献率分别为

74.4% 和 20.3%。其他关于 PAHs 健康风险的评价中也发现经口暴露为主要途径^[7,8,28]。

由以上分析, 针对致癌风险的治理, 要格外避免直接摄入土壤颗粒。同时, 在评价该处土壤的致癌风险水平时, 应重点控制贡献率较大的 3 种物质。

对于由 PAHs 造成的危害商, 该处危害商的最大值要远小于 1, 不对该处居民产生明显的健康危害, 但考虑到经口暴露及皮肤暴露途径所导致的危害商值达 72.21% 和 26.36%, 芘、荧蒽和菲的贡献率分别为 36.56%、33.18% 和 13.18%, 所以应减

少经口摄入及皮肤接触以降低健康风险,并重点控制土壤中这 3 种物质.

2.3 与传统风险评价对比

由公式(1)~(14),式中的相关参数取推荐值,如表 1~3 所示,对该地的健康风险进行评价,可得结果如表 5.

在传统风险评价的情况下,总的致癌风险为 2.14×10^{-6} ,超过安全限值 10^{-6} ,表明有风险,与概率风险评价的结论相一致.但与概率风险评价

结果的 95% 分位值(8.69×10^{-5})对比其风险值较小,且为一个固定值,并不能很好地反映风险结果,这可能会误导对该地 PAHs 污染治理的措施建议.对于 3 个暴露途径的贡献率和各个物质的贡献率,与概率风险分析结果相一致.对于各个物质的总危害商,风险值为 2.18×10^{-3} ,远小于 1,表明风险可以忽略.同样地,对于 3 个暴露途径的贡献率和各个物质的贡献率,与概率风险分析结果相一致.

表 5 传统风险评价下 PAHs 的健康风险

Table 5 Health risks of PAHs using traditional approach

PAHs	致癌风险					PAHs	危害商				
	经口	皮肤	吸入	总和	百分比/%		经口	皮肤	吸入	总和	百分比/%
BaA	9.13×10^{-8}	3.07×10^{-8}	3.39×10^{-10}	1.22×10^{-7}	5.73	Nap	1.46×10^{-5}	4.91×10^{-6}	5.96×10^{-6}	2.55×10^{-5}	1.17
CHR	9.96×10^{-10}	3.35×10^{-10}	3.69×10^{-12}	1.33×10^{-9}	0.06	AcPy	1.03×10^{-5}	3.46×10^{-6}	1.80×10^{-7}	1.39×10^{-5}	0.64
BaP	1.11×10^{-6}	3.72×10^{-7}	4.11×10^{-9}	1.48×10^{-6}	69.41	Acp	1.68×10^{-5}	5.64×10^{-6}	2.93×10^{-7}	2.27×10^{-5}	1.04
BkF	4.86×10^{-9}	1.63×10^{-9}	1.80×10^{-11}	6.51×10^{-9}	0.30	Flu	2.76×10^{-5}	9.28×10^{-6}	4.82×10^{-7}	3.74×10^{-5}	1.71
BbF	4.86×10^{-8}	1.63×10^{-8}	1.80×10^{-10}	6.51×10^{-8}	3.05	PA	2.93×10^{-4}	9.87×10^{-5}	5.13×10^{-6}	3.97×10^{-4}	18.21
IND	7.31×10^{-8}	2.46×10^{-8}	2.71×10^{-10}	9.79×10^{-8}	4.59	Ant	5.85×10^{-6}	1.97×10^{-6}	1.02×10^{-7}	7.91×10^{-6}	0.36
DBA	2.69×10^{-7}	9.04×10^{-8}	9.97×10^{-10}	3.60×10^{-7}	16.86	FL	4.64×10^{-4}	1.56×10^{-4}	8.10×10^{-6}	6.28×10^{-4}	28.77
总和	1.59×10^{-6}	5.36×10^{-7}	5.91×10^{-9}	2.14×10^{-6}	—	Pyr	5.31×10^{-4}	1.79×10^{-4}	9.29×10^{-6}	7.20×10^{-4}	32.99
百分比/%	74.62	25.10	0.28	—	—	BghiP	2.44×10^{-4}	8.19×10^{-5}	4.26×10^{-6}	3.30×10^{-4}	15.12
						总和	1.61×10^{-3}	5.40×10^{-4}	3.38×10^{-5}	2.18×10^{-3}	—
						百分比/%	73.67	24.78	1.55	—	—

2.4 敏感性分析

为探究各暴露参数和 PAHs 含量对健康风险的影响程度,使用 Crystal Ball 11.1 对各参数进行敏感性分析,结果如图 3 所示.敏感性分析是该软件非常优越的功能之一,敏感性分析所得敏感度若为正值,则表示与风险结果正相关,且结果越大,其对风险值的影响越大;若为负值,则表示与风险结果负相关,且结果的绝对值越大,其对风险值的影响越大.

从人体暴露参数的角度分析,对于 PAHs 的致

癌风险,每日土壤摄入量、暴露周期、暴露皮肤表面积、体重的敏感性最大,敏感度分别为:58.35%、50.21%、20.51%和-11.66%.对于 PAHs 造成的危害商,仍然是以上 4 个参数的敏感性最大,敏感度分别为:63.52%、53.18%、24.39%和-13.98%.其中土壤暴露量对健康风险的影响最大,体重都具有负敏感性.

从 16 种 PAHs 物质的角度分析,苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽、苯并(a)蒽对致癌风险的影响最

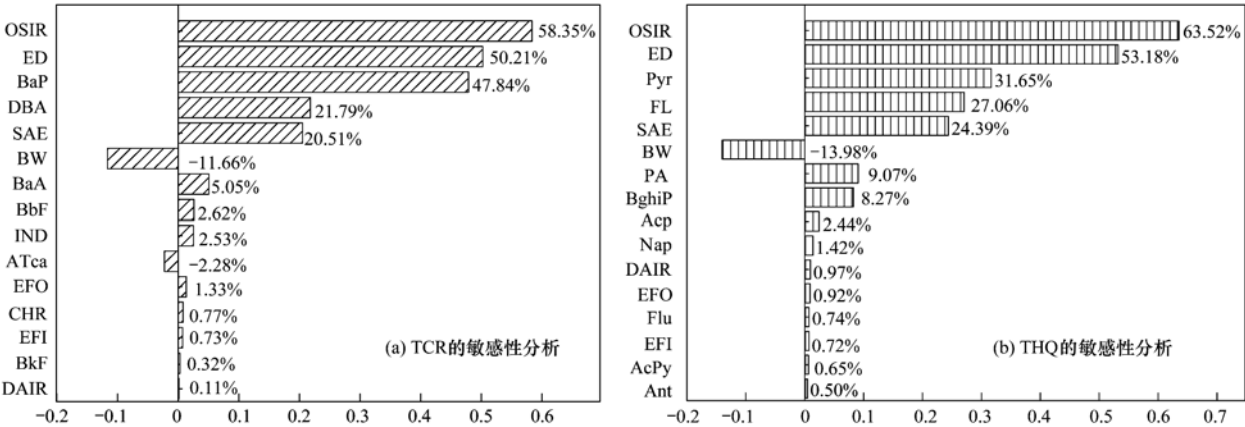


图 3 总致癌风险和总危害商的敏感性分析

Fig. 3 Sensitivity analysis for total carcinogenic risk and total hazard quotient

大,敏感度分别为 47.84%、21.79% 和 5.05%;芘、荧蒹和非对危害商的影响最大,敏感度分别为 31.65%、27.06% 和 9.07%。

Li 等^[29]对中国渤海沉积物中 PAHs 对人造成的健康风险进行了评估,敏感性分析表明,暴露时间、PAHs 含量的敏感性最大,前者的敏感度在 76% 左右,PAHs 含量的敏感度在 23% 左右。体重具有负敏感性,但敏感度较小,在 -1% 以下。Li 等^[30]评价了中国人食入油条而由 PAHs 引起的致癌风险,得出对各年龄群体,苯并(a)芘的等效含量、暴露时间的敏感性最大,敏感度分别为 45% 和 35% 左右,体重具有负敏感性。

由以上分析,应尽量减少每日土壤摄入量和暴露周期,减小暴露皮肤面积,从而有效防范风险。其次,体重的负敏感性,表明体重越小的群体,PAHs 对其造成的健康风险水平越高。并且,应重点控制以上敏感性较强的 6 种 PAHs。

3 结论

(1)土壤中 PAHs 的总致癌风险服从对数正态分布,为 $3.43 \times 10^{-5} \pm 2.63 \times 10^{-5}$, 范围为 $8.10 \times 10^{-7} \sim 2.39 \times 10^{-4}$, 超过 10^{-6} 的概率为 95%, 超过 10^{-5} 的概率为 75%, 最大致癌风险值为 10^{-4} 的 2.39 倍,应当对污染土壤进行修复和综合治理;总危害商服从 $4.74 \times 10^{-2} \pm 3.42 \times 10^{-2}$ 的对数正态分布,范围为 $1.38 \times 10^{-3} \sim 2.85 \times 10^{-1}$, 小于 1, 风险较小。

(2)在 16 种 PAHs 中,具有致癌风险的 PAHs 中,苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒹、苯并(a)蒹是主要的贡献物质,贡献率分别为 60.41%、26.84% 和 6.56%;对于非致癌效应 PAHs 的危害商,芘、荧蒹和菲是主要的贡献物质,贡献率分别为 36.56%、33.18% 和 13.18%。

(3)在 3 种暴露途径中,经口摄入途径是导致致癌健康风险的主要途径,对于致癌风险和危害商,其贡献率分别为 73.22% 和 72.21%,其次是经皮肤接触途径,贡献率分别为 26.51% 和 26.36%。

(4)由敏感性分析可得,在人体暴露参数中,每日土壤摄入量、暴露周期、暴露皮肤面积敏感度较大,对于致癌风险,敏感度分别为: 58.35%、50.21% 和 20.51%;对于危害商,敏感度分别为: 63.52%、53.18% 和 24.39%;体重具有负敏感性,敏感度分别为 -11.66% 和 -13.98%。

参考文献:

[1] Barth J A C, Steidle D, Kuntz D, *et al.* Deposition, persistence

and turnover of pollutants: first results from the EU project AquaTerra for selected river basins and aquifers[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **376**(1-3): 40-50.

[2] 彭驰, 王美娥, 廖晓兰. 城市土壤中多环芳烃分布和风险评价研究进展[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(2): 514-522.

Peng C, Wang M E, Liao X L. Distribution and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(2): 514-522.

[3] Odabasi M, Cetin B, Bayram A. Persistent Organic Pollutants (POPs) on fine and coarse atmospheric particles measured at two (urban and industrial) sites [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(5): 1894-1905.

[4] 李静雅, 吴迪, 许芸松, 等. 长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 253-261.

Li J Y, Wu D, Xu Y S, *et al.* Recent distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Yangtze river delta [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 253-261.

[5] 李英红, 饶志国, 谭吉华, 等. 兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2428-2435.

Li Y H, Rao Z G, Tan J H, *et al.* Pollutional characteristics and sources analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric fine particulate matter in Lanzhou city [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2428-2435.

[6] 冯焕银, 傅晓钦, 赵倩, 等. 宁波土壤中多环芳烃的健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(10): 1998-2004. Feng H Y, Fu X Q, Zhao Q, *et al.* Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Ningbo area, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(10): 1998-2004.

[7] Hou W, Zhang L, Li Y, *et al.* Distribution and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil from a typical contaminated urban coking sites in Shenyang city [J]. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2015, **95**(6): 815-821.

[8] Jiang Y F, Yves U J, Sun H, *et al.* Distribution, compositional pattern and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of an industrial city, Lanzhou, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **126**: 154-162.

[9] 焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 等. 原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用安全性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 3038-3044.

Jiao H H, Pan J G, Xu S J, *et al.* Improving agricultural safety of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons by in situ bioremediation[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 3038-3044.

[10] Peng C, Chen W P, Liao X L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of Beijing: status, sources, distribution and potential risk [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(3): 802-808.

[11] Koupaie E H, Eskicioglu C. Health risk assessment of heavy metals through the consumption of food crops fertilized by biosolids: a probabilistic-based analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **300**: 855-865.

[12] 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.
- [13] Öberg T, Bergbäck B. A review of probabilistic risk assessment of contaminated land (12 pp) [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2005, **5**(4): 213-224.
- [14] Peng C, Cai Y M, Wang T Y, *et al.* Regional probabilistic risk assessment of heavy metals in different environmental media and land uses: an urbanization-affected drinking water supply area [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 37084.
- [15] 王佩, 陈莉娜, 蒋鹏, 等. 2 种毒性评估方法对 PAHs 污染场地人体健康风险的比较研究[J]. *生态毒理学报*, 2016, **11**(3): 180-190.
- Wang P, Chen L N, Jiang P, *et al.* A comparative study of two toxicity evaluation methods on human health risks in a PAHs contaminated site[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(3): 180-190.
- [16] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
- HJ 25.3-2014, Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites[S].
- [17] Wang X T, Miao Y, Zhang Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils of the megacity Shanghai: occurrence, source apportionment and potential human health risk [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **447**: 80-89.
- [18] 杜芳芳, 杨毅, 刘敏, 等. 上海市表层土壤中多环芳烃的分布特征与源解析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 989-995.
- Du F F, Yang Y, Liu M, *et al.* Distribution and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils in Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 989-995.
- [19] 侯捷, 曲艳慧, 宁大亮, 等. 暴露参数对苯污染场地健康风险评价的影响[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(11): 191-195, 200.
- Hou J, Qu Y H, Ning D L, *et al.* Impact of human exposure factors on health risk assessment for Benzene contaminated site [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(11): 191-195, 200.
- [20] 中华人民共和国环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population[M]. Beijing: China Environmental Press, 2013.
- [21] U S EPA. Risk-assessment guidance for superfund. Volume I: human health evaluation manual. Part A. interim report (final) [EB/OL]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response. <http://www.osti.gov/scitech/biblio/7037757>.
- [22] 程书波, 刘敏, 欧冬妮, 等. 城市不同功能区 PAHs 多介质累积规律研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 409-412.
- Cheng S B, Liu M, Ou D N, *et al.* Accumulation characteristics of PAHs in multimedia from various urban functional areas[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(2): 409-412.
- [23] 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4270-4275.
- Lü J G, Bi C J, Chen Z L, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soil of the Chongming island in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4270-4275.
- [24] Kang Y, Shao D D, Li N, *et al.* Cancer risk assessment of human exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) via indoor and outdoor dust based on probit model [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(5): 3451-3456.
- [25] 李新荣, 赵同科, 于艳新, 等. 北京地区人群对多环芳烃的暴露及健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(8): 1758-1765.
- Li X R, Zhao T K, Yu Y X, *et al.* Population exposure to PAHs and the health risk assessment in Beijing area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(8): 1758-1765.
- [26] 董继元, 刘兴荣, 张本忠, 等. 上海市居民暴露于多环芳烃的健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2014, **24**(1): 126-132.
- Dong J Y, Liu X R, Zhang B Z, *et al.* Population exposure to PAHs and the health risk assessment in Shanghai city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **24**(1): 126-132.
- [27] 姜林, 贾晓洋, 夏天翔, 等. PRA 在焦化厂污染土壤健康风险评价中的应用[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(2): 220-226.
- Jiang L, Jia X Y, Xia T X, *et al.* Research on application of PRA in health risk assessment of soil in a coking plant site[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(2): 220-226.
- [28] 段小丽, 王宗爽, 李琴, 等. 基于参数实测的水中重金属暴露的健康风险研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1329-1339.
- Duan X L, Wang Z S, Li Q, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in drinking water based on field measurement of exposure factors of Chinese people[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(5): 1329-1339.
- [29] Li J F, Dong H, Xu X, *et al.* Prediction of the bioaccumulation of PAHs in surface sediments of Bohai sea, China and quantitative assessment of the related toxicity and health risk to humans[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **104**(1-2): 92-100.
- [30] Li G, Wu S M, Wang L, *et al.* Concentration, dietary exposure and health risk estimation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in youtiao, a Chinese traditional fried food[J]. *Food Control*, 2016, **59**: 328-336.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao, <i>et al.</i> (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die, <i>et al.</i> (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen, <i>et al.</i> (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, <i>et al.</i> (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping, <i>et al.</i> (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (2617)