

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

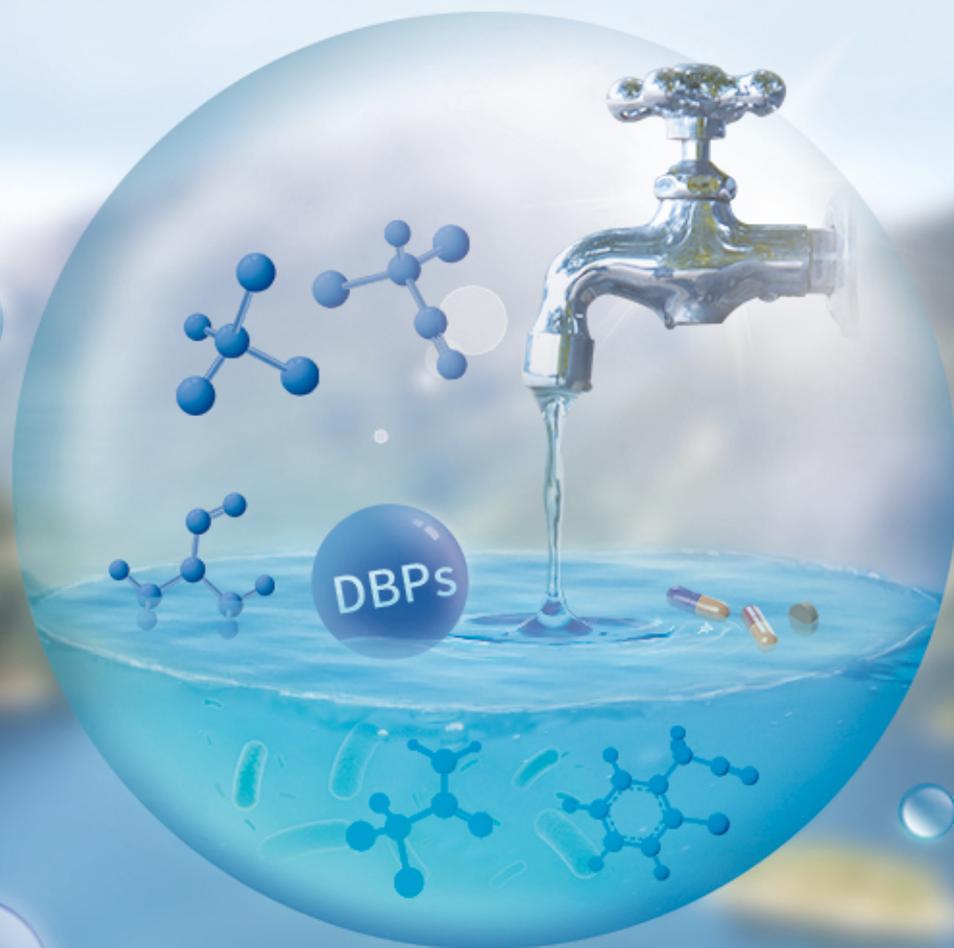
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期

Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)

生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)

COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铨, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM_{2.5} 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞哈, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 訾鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性桉木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评价

张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 为明确城郊农田土壤多环芳烃(PAHs)的污染特征,按照网格布点法在南京城郊采集29个样点,测定了15种PAHs的含量。结果表明,二氢萘(Ace)均未检出,农田土壤PAHs含量为24.49~750.04 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为226.64 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;高环PAHs与总PAHs空间分布类似,农田土壤PAHs主要以高环PAHs为主。相关性分析结果表明,农田土壤PAHs与有机质(SOM)、pH、阳离子交换量(CEC)和全氮(TN)无显著相关性,容重(ρ_b)与低环PAHs极显著相关。源解析结果表明,农田土壤PAHs主要来源为燃烧源和石油源的混合源。CSI指数结果表明,农田土壤PAHs不存在生态风险。健康风险评价结果表明,农田土壤PAHs对儿童和成人不存在潜在致癌风险,主要暴露途径是:皮肤接触>摄食>呼吸吸入。

关键词: 城郊; 农田土壤; 多环芳烃(PAHs); CSI指数; 风险评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5510-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202103161

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil

ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, ZHU Chang-da, PAN Jian-jun*

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to assess the pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in a suburban farmland soil, 29 sampling sites were collected around Nanjing according to the grid method, and the contents of 15 different PAHs were determined. Acenaphthene(Ace) was not detected in any of the samples. The total content of PAHs in farmland soil ranged from 24.49 to 750.04 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with an average of 226.64 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The spatial distribution of high-ring PAHs, the main PAHs in the farmland soil, was similar to that of total PAHs. There was no significant correlation between PAHs and soil organic matter(SOM), pH, cation exchange capacity(CEC), and total nitrogen(TN), whereas bulk density and low ring PAHs were significantly correlated. The results of source apportionment show that the main source of PAHs in the farmland soil is a mixture of combustion and petroleum. The contamination severity index(CSI) index shows that the PAHs does not pose an ecological risk. The results of the health risk assessment show that there is no potential carcinogenic risk to children or adults, and the main sequence of exposure is skin contact > ingestion > inhalation.

Key words: suburban; farmland soil; polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs); CSI index; risk assessment

随着工农业的发展,土壤污染问题越来越突出^[1]。其中,多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)因其在环境中的高稳定性、广泛存在性以及特殊的毒性和致癌性而受到人们的关注^[2,3]。16种PAHs被美国环保署认定为优先控制的有机污染物,其中7种被美国环保署(USEPA)列为致癌物质^[4]。PAHs主要是由木材、煤炭、柴油和烟草等含碳燃料不完全燃烧而形成的,并且PAHs的大部分来源是人为的,包括工业排放、固体废物焚烧和车辆排放等^[5]。由于PAHs不易溶解,易被土壤颗粒吸附,且不易降解,容易在土壤中积累,土壤是环境中PAHs最重要的汇^[6]。有研究表明,人类通过土壤接触PAHs的量高于通过空气和水这两种介质^[7]。PAHs具有致畸性、致癌性和致突变性^[8],并且土壤PAHs会通过摄食、呼吸吸入和皮肤接触的途径危害人类身体健康^[9],因此值得引起广泛关注。

已有研究表明,南京城市土壤已经受到重金属和PAHs的污染^[10~12],但是关于南京城郊土壤的研究较少。城郊是介于城市与乡村的交错地带,土地利用类型复杂,并且受到城市化、工业化和农业生产

的多重影响^[13]。在城郊这个特殊地带,土壤污染方面的研究主要集中于重金属污染^[14,15],关于城郊土壤PAHs污染鲜见报道。尤其在农业土壤中,PAHs在表层土壤上沉积后,可进一步积聚在粮食蔬菜等生物体内^[16]。城郊农田土壤是农产品的重要生产基地,其土壤环境质量不但影响农产品的质量还影响人类身体健康^[14],所以对城郊农田土壤PAHs的研究显得尤为重要。

关于PAHs风险评价方面,先前较多的研究选择用内梅罗指数^[17,18]或者质量基准法(SQGs)^[19]对土壤PAHs进行生态风险评价。但由于国内缺乏PAHs背景值,对于内梅罗指数来说,选择不同的背景值,会出现不同的研究结果。同时也有研究表明,对比SQGs方法,污染程度指数(CSI指数)的敏感性更高^[20]。有研究已经采用CSI指数对长春工业城市土壤的重金属、多环芳烃、多氯联苯和有机氯杀

收稿日期: 2021-03-17; 修订日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771247)

作者简介: 张秀秀(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤信息技术, E-mail: 2603240013@qq.com

* 通信作者, E-mail: jpan@njau.edu.cn

虫剂这 4 种污染物进行生态风险评价^[21]. 但是鲜见采用 CSI 指数对农田土壤 PAHs 的研究报道. 因此, 本文选择 CSI 指数对农田土壤 PAHs 的生态风险进行评价.

南京是中国江苏省省会, 一个以电子、汽车和化工为主的复杂工业基地^[22]. 本文以南京东南郊这一典型的城乡结合带为研究对象, 测定南京城郊农田土壤 15 种优控 PAHs 的含量. 通过研究城郊农田土壤 PAHs 的污染特征及风险评价, 以期为制定区域 PAHs 的防护对策提供一定的借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省南京市江宁区湖熟街道周岗镇, 面积约为 40 km², 其中耕地面积约为 24 km², 主

要以水稻土为主, 伴随分布有菜地和林地, 处于北经 31°46'9.07" ~ 31°49'42.27"、东经 118°53'41.77" ~ 119°00'4.55", 属于北亚热带季风性气候, 年平均气温为 15.4℃, 年降雨量为 1 600 mm, 距离市区 35 km、禄口机场 7 km, 内部形成机械制造等一系列产业, 分布相对集中, 主要位于集镇中西部.

1.2 样品采集

以高分一号遥感影像为数据源, 利用 ArcGIS 10.2 软件采用网格布点法进行样点布设, 采集时间为 2017 年 10 ~ 11 月. 以五点混合采样法获取 0 ~ 20 cm 的农田表层土壤, 共采集土壤样品 29 个, 以水稻田为主. 按照四分法获取 1 kg 土壤样品, 研磨过 60 目筛, 用棕色玻璃瓶于 4℃ 以下冷藏密封保存. 同时记录采样点周边污染源, 并用 GPS 记录所有采样点地理坐标, 如图 1 所示.

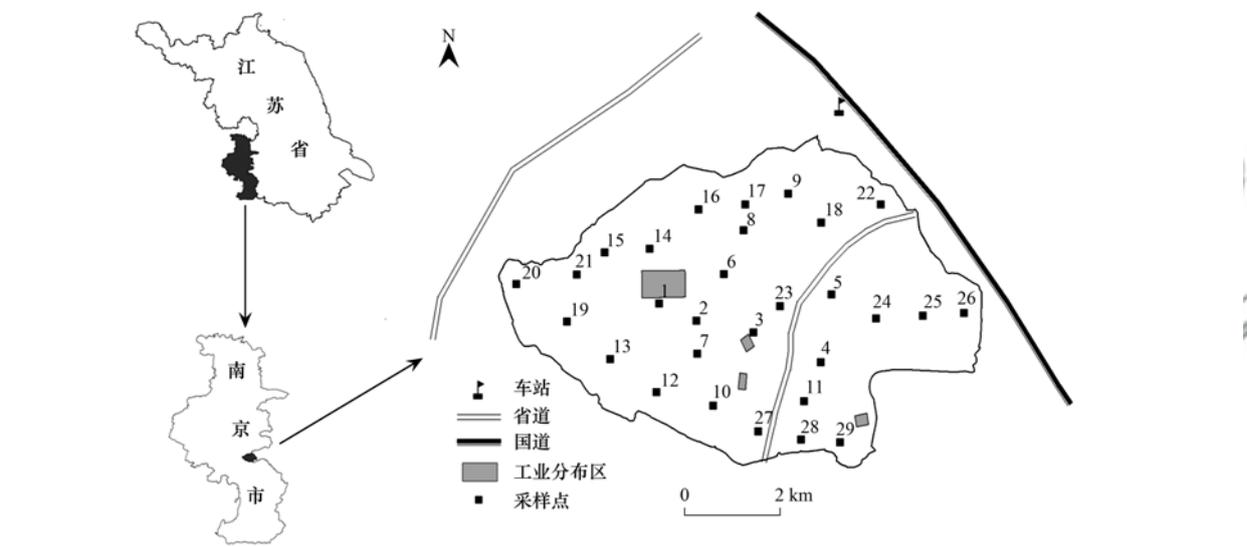


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution diagram of sampling points

1.3 样品测试及质量控制

为保证实验数据的准确性, 委托中国科学院南京土壤研究所进行 15 种 PAHs 的测定 [萘 (Acy) 因故未测定]. 分别为萘 (Nap)、二氢萘 (Ace)、芴 (Flu)、菲 (Phe)、蒽 (Ant)、荧蒽 (Fla)、芘 (Pyr)、苯并 [a] 蒽 (BaA)、䓛 (Chry)、苯并 [b] 荧蒽 (BbF)、苯并 [k] 荧蒽 (BkF)、苯并 [a] 芘 (BaP)、二苯并 [a, h] 蒽 (DahA)、茚并 [1, 2, 3-c, d] 芘 (InP) 和苯并 [g, h, i] 芘 (BghiP). PAHs 含量的测定方法参考文献 [23].

称取样品 5 g (精确到 0.01 g), 加入二氯甲烷 15 mL, 浸泡 12 h, 之后用超声清洗仪提取 20 min, 水浴温度在 20℃ 左右; 在垫一层玻璃棉的玻璃漏斗上加入约 5 g 无水硫酸钠, 将提取液过滤, 重复超声提取 3 次, 提取液并入浓缩蒸发皿中, 使用旋转蒸发浓

缩至近干. 制备层析柱, 层析柱内依次加入玻璃棉、10 mm 厚的无水硫酸钠、用少量二氯甲烷进行冲洗, 用 40 mL 正己烷预淋洗层析柱, 将浓缩后的提取液移入层析柱, 用 2 mL 正己烷分 3 次洗涤浓缩器皿, 洗液全部移入层析柱, 弃去流出液. 再用 8 mL (二氯甲烷: 正己烷 = 1: 1) 混合溶液洗脱, 洗脱液用鸡心瓶收集, 采用旋转蒸发至近干, 加入约 1 mL 乙腈, 充分润洗转移至进样瓶中, 于 4℃ 下冷藏、避光、密封保存.

使用配备有荧光检测器的高效液相色谱仪分离检测 (HPLC/UV-FLD), 流动相为乙腈-水, 流速为 1.0 mL·min⁻¹, 柱温为 35℃, 进样量为 10 μL, 梯度淋洗.

在测定过程中, 严格遵循质量保证和质量控制的程序, 采用空白分析、平行样测定、基体加标和

校准的方法进行质量控制. 空白样品中无待测物检出, 加标回收率在 67%~99%.

1.4 土壤理化性质测定

pH 采用 pH 计测定法测定; 有机质 (SOM) 采用重铬酸钾容量法-外加热法测定; 土壤容重 (ρ_b) 采用环刀法测定; 阳离子交换量 (CEC) 采用乙酸铵交换法测定; 全氮 (TN) 采用凯氏定氮法测定.

1.5 风险评价

1.5.1 生态风险

在本研究中, 采用 CSI 指数对农田土壤进行生态风险评价^[20]. 该指数基于先前研究提出的效应区间低值 ERL 和效应区间中值 ERM^[24]. 当 PAHs 低于 ERL 时, 不良生态效应很少发生; 当含量高于 ERL 但低于 ERM 时, 偶尔会发生不良生态效应; 当含量高于 ERM 时, 意味着经常发生不良生态效应^[19]. CSI 指数的计算公式如下:

$$GSI = \sum_{i=1}^n W_i \left[\left(\frac{C_i}{ERL_i} \right)^{1/2} + \left(\frac{C_i}{ERM_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中, W_i 是污染物的权重; C_i 是污染物含量, $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; ERL_i 和 ERM_i 分别为每种污染物的效应区间低值和效应区间中值. CSI 指数的分级标准参见文献[20]. 利用主成分分析的结果获得每种污染物的 W_i , 在计算 W_i 时, 只考虑人为因素. 每种污染物权重计算公式如下:

$$W_i = \frac{(\text{载荷值}_i \times \text{特征值})}{\sum_i (\text{载荷值}_i \times \text{特征值})} \quad (2)$$

1.5.2 健康风险

终生癌症风险增量模型 (ILCRs) 被广泛应用于环境中 PAHs 的健康风险评估^[5, 25]. 本文采用 ILCRs 模型来评估儿童和成人通过摄食、呼吸吸入和皮肤接触土壤 PAHs 所致的健康风险. 其中通过摄食、呼吸吸入和皮肤接触这 3 种途径 PAHs 摄入量的计算公式如下^[5]:

$$ILCR_{\text{摄食}} = CS \times CSF_{\text{摄食}} \times \sqrt[3]{BW/70} \times IR_{\text{摄食}} \times EF \times ED / (BW \times AT \times 10^6) \quad (3)$$

$$ILCR_{\text{呼吸吸入}} = CS \times CSF_{\text{呼吸吸入}} \times \sqrt[3]{BW/70} \times IR_{\text{呼吸吸入}} \times EF \times ED / (BW \times AT \times PEF) \quad (4)$$

$$ILCR_{\text{皮肤接触}} = CS \times CSF_{\text{皮肤接触}} \times \sqrt[3]{BW/70} \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED / (BW \times AT \times 10^6) \quad (5)$$

$$CS = \sum (\text{PAH}_i \times \text{TEF}_i) \quad (6)$$

$$CR = \sum (ILCR_{\text{摄食}} + ILCR_{\text{呼吸吸入}} + ILCR_{\text{皮肤接触}}) \quad (7)$$

式中, CS 是土壤中单体 PAHs 基于 BaP 的等效毒性当量含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; TEF 是单体 PAHs 相当于 BaP

的毒性系数, 见表 1; CSF 是 PAHs 的致癌斜率因子, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, $CSF_{\text{摄食}} = 7.3$, $CSF_{\text{呼吸吸入}} = 3.85$ 和 $CSF_{\text{皮肤接触}} = 25$; CR 为摄食、呼吸吸入和皮肤接触这 3 种暴露途径下的总和, 根据 CR 的大小, 致癌风险可分为 3 个等级: 不存在健康风险 ($CR \leq 10^{-6}$), 存在潜在健康风险 ($10^{-6} < CR \leq 10^{-4}$), 存在健康风险 ($CR > 10^{-4}$). 其他相关参数及取值来自文献[25~27].

1.6 数据处理

农田土壤 PAHs 描述性统计、相关性分析及主成分分析均在 SPSS 26 软件中完成; 绘图在 Excel 2019 和 OriginPro 2019 软件中完成; 采样点分布和空间分布在 ArcGIS 10.2 软件中完成.

2 结果与分析

2.1 农田土壤中 PAHs 含量及空间分布

在研究区 29 个采样点中检测了 15 种 PAHs, Ace 在所有土壤样本中均未被检出, 可能是因为是在样品风干的过程中, 低环类的单体容易损失, 或者是在运输和测量过程中会挥发损失. 农田土壤中 PAHs 含量如表 1 所示, PAHs 的总含量表现出很宽的范围, 最高含量为最低含量的 30 倍, 说明不同采样点之间 PAHs 水平差异较大. PAHs 的总含量范围为 24.49~750.04 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有 50% 的样本 PAHs 总含量小于 197.51 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (即中值), 平均含量为 226.64 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 同时, Nap、Flu、Ant、InP、DahA 和 BghiP 这 6 种单体化合物的最小值均低于检出限. Fla 的平均含量最大, 为 79.61 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 紧随其后的是 Pyr 和 Phe, 含量分别为 38.87 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 38.29 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 7 种致癌 PAHs (包括 BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、InP 和 DahA) 含量范围为 8.74~141.66 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 50.90 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

根据芳香环的数目, 把 PAHs 分为低环 PAHs (2~3 环) 和高环 PAHs (4~6 环). 低环 PAHs 的均值为 52.69 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高环 PAHs 的均值为 175.69 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 图 2 为农田土壤总 PAHs、高环 PAHs 和低环 PAHs 含量的空间分布. 经过对比发现, 农田土壤中高环 PAHs 的空间分布与总 PAHs 的空间分布相似, 但是低环 PAHs 的空间分布与总 PAHs 空间分布差异较大. 说明高环 PAHs 在农田土壤中占据有一定优势, 主要原因可能有, 低环 PAHs 具有挥发性, 易在大气中转化, 释放到大气后也发生光化学降解^[16, 28]; 由于工业和农业活动, 高环 PAHs 的排放源多于低环 PAHs^[29]; 另外, 由于在农田土壤中, 低环 PAHs 更容易被作物吸收^[18]. 根据先前研究, 存在与本研究相同的结果^[30], 也存在不相同的

表 1 农田土壤中 PAHs 含量¹⁾
Table 1 PAHs content in farmland soil

项目	环数	TEF	最小值 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	中值 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	检出率 /%
萘(Nap)	2	0.001	ND	82.40	9.28	14.46	41.18
芴(Flu)	3	0.001	ND	9.68	1.90	5.36	32.35
菲(Phe)	3	0.001	2.42	159.30	38.29	26.20	100.00
蒽(Ant)	3	0.01	ND	8.00	1.48	1.16	82.35
荧蒽(Fla)	4	0.001	7.90	247.00	79.61	77.10	100.00
芘(Pyr)	4	0.001	4.27	118.00	38.87	25.60	100.00
苯并[a]蒽(BaA)	4	0.1	1.00	24.00	6.48	5.61	100.00
䓛(Chry)	4	0.01	3.25	42.80	16.47	14.80	100.00
苯并[b]荧蒽(BbF)	5	0.1	2.25	27.90	11.40	10.70	100.00
苯并[k]荧蒽(BkF)	5	0.1	0.41	13.00	3.85	3.73	97.06
苯并[a]芘(BaP)	5	1	0.49	15.60	5.06	4.62	100.00
二苯并[a,h]蒽(DahA)	5	1	ND	3.86	1.49	1.58	76.47
茚并[1,2,3-c,d]芘(InP)	6	0.1	ND	16.00	6.15	7.41	76.47
苯并[g,h,i]芘(BghiP)	6	0.01	ND	17.60	6.31	7.09	73.53
2 环	2	—	ND	92.08	10.98	5.63	—
3 环	3	—	2.42	176.98	41.67	34.08	—
4 环	4	—	16.84	418.20	141.43	141.27	—
5 环	5	—	3.51	59.16	21.79	21.71	—
6 环	6	—	0.00	33.60	12.47	12.47	—
低环	2~3	—	2.42	269.06	52.65	40.76	—
高环	4~6	—	22.07	490.85	175.69	167.41	—
\sum PAH14	—	—	24.49	750.04	226.64	197.51	—
\sum PAH7c	—	—	8.74	141.66	50.90	50.01	—

1) ND 表示未检出; \sum PAH14 表示 14 种多环芳烃总和; \sum PAH7c 表示 7 种致癌多环芳烃总和; “—”表示文中没有相关数据; TEF 表示基于 BaP 的毒性当量因子

结果^[29], 可能是因为工农业活动的影响有所差异.

2.2 农田土壤中 PAHs 组成特征

单体 PAHs 对总 PAHs 的贡献率如图 3 所示, Fla、Pyr、Phe 和 Chry 是农田土壤中主要化合物, 分别占总 PAHs 的 35.12%、17.15%、16.89% 和 7.27%, 与已有的研究结果相似^[5,17,31]. 其中, Fla 和 Phe 主要来源于焦化, Pyr 和 Chry 主要来源于工业燃煤^[17], 并且 Phe 是木材燃烧的标志物^[32]. 不同环数 PAHs 的质量分数分别为: 4 环(62.40%) > 3 环(18.39%) > 5 环(9.62%) > 6 环(5.50%) > 2 环(4.85%). 3 环和 4 环 PAHs 共占总 PAHs 的 80.79%. 与先前研究结果相似, 其 3 环和 4 环 PAHs 占总 PAHs 的 70.00%^[5]. 并且有研究表明, 石油泄漏通常产生 2 环, 低温或中温燃烧过程(如煤炭燃烧)通常产生 3 环和 4 环, 高温燃烧过程(如汽车尾气)通常产生 5 环(汽油燃烧)和 6 环(柴油燃烧)^[5]. 通过初步分析, 该研究区除了煤炭燃烧和生物质燃烧外, 交通排放也是另一可能来源. 具体的农田土壤 PAHs 来源解析见 2.4 节.

2.3 农田土壤中 PAHs 相关性分析

SOM 对有机污染物有很强的亲和力, 和土壤中

有机污染物的生物活性、沉积、生物降解、迁移和蒸发有关^[33]. 农田土壤中 SOM 的范围为 4.38 ~ 40.28 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 21.67 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土壤 SOM 含量差异较大的原因, 可能与农田施肥水平和耕作管理方式的不同有很大关系^[34]. 为了解 SOM 与 PAHs 的关系, 在 SPSS 中进行了相关性分析, 见表 2. 结果表明, SOM 含量与单体 PAHs 和总 PAHs 无明显相关性. SOM 与 Nap、Phe 和 Ant 之间存在相对较低的相关性($0.385 < r < 0.436, P < 0.05$). 文献[3, 35]存在与本研究相似的报道. 相关性较差可能是因为 PAHs 与 SOM 非平衡吸附所致^[6]. 另一个原因可能是采样点分布在农田土壤中, 受人为引入的有机肥的影响较大^[28], 从而影响 SOM 与 PAHs 的相关性. 但是, 有研究表明 SOM 与低环 PAHs 和高环 PAHs 分别在 $P = 0.001$ 和 $P = 0.01$ 水平上显著相关^[30], 表明低环 PAHs 更容易与 SOM 实现吸附平衡. 同时, 进行了 pH、CEC 和 TN 与 PAHs 的相关性分析, 结果表明, pH、CEC 和 TN 与 PAHs 无明显相关性. 但是 ρ_b 与 Nap、Flu、Phe、Ant 和 Pyr 在 0.01 水平上呈极显著相关, 其原因可能是土壤的孔隙度影响 PAHs 的挥发^[36], 低环 PAHs 的多环芳烃分子量小, 挥发性大, 所以当 ρ_b 增大时, 对低环 PAHs 的影响

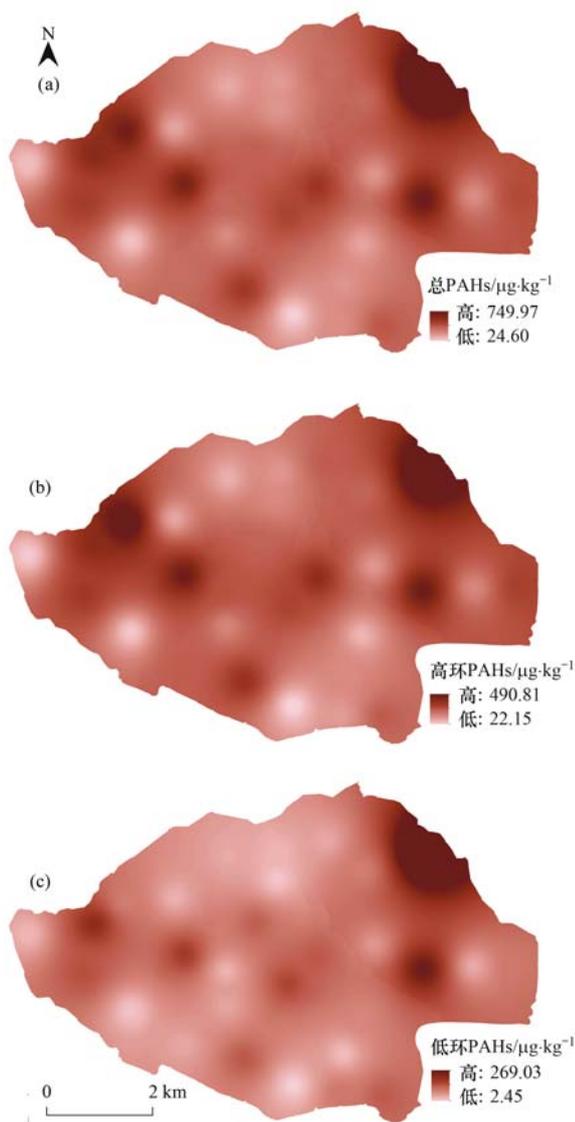


图2 农田土壤中 PAHs 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of PAHs in farmland soil

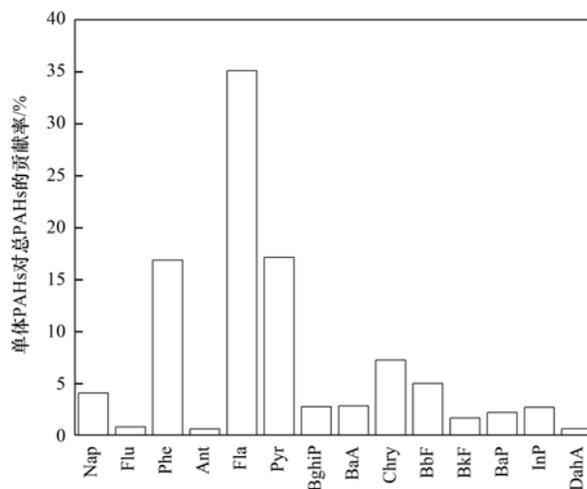


图3 农田土壤中 PAHs 组分特征

Fig. 3 Composition characteristics of PAHs in farmland soil

大于高环 PAHs.

同时,进行了单体 PAHs 与总 PAHs 含量的相关性分析. 相关性表明不同单体 PAHs 是否有同一来源^[37]. 结果表明, 研究中几乎所有变量都在 $P = 0.01$ 水平上显著相关(除了 Nap 和 Flu). 其中, Nap 与高环 PAHs (BbF、BkF、BaP、InP 和 DahA) 无相关性. Flu 与任何变量均无相关性. 另外, 高环单体 PAHs 之间有较高的相关性, 多达到 0.9 以上; 但是, 高环与低环单体 PAHs 的相关性较弱, 表明低环 PAHs 和高环 PAHs 具有不同的来源.

2.4 农田土壤中 PAHs 的来源解析

确定 PAHs 的来源对于准确评估风险和减少未来污染至关重要^[38]. PAHs 的来源可以通过异构体的比值来进行识别, 已有大量研究运用此种方法^[5,25,39]. 常用的异构体比值主要有 $\text{Ant}/(\text{Ant} +$

表2 PAHs 与土壤性质的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis of PAHs and soil properties

	Nap	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	BghiP	BaA	Chry	BbF	BkF	BaP	InP	DahA	PAHs
pH	-0.08	0.51**	-0.15	-0.17	0.02	0.10	-0.05	0.17	0.06	0.03	0.07	0.09	0.01	-0.08	-0.02
SOM	0.39*	0.13	0.42*	0.45*	0.25	0.21	0.00	0.00	0.14	0.03	0.10	0.13	0.02	-0.11	0.26
ρ_b	0.63**	0.51**	0.65**	0.68**	-0.45*	-0.53**	-0.43*	-0.29	-0.31	-0.25	-0.20	-0.24	-0.32	-0.21	-0.54**
CEC	0.22	-0.07	0.24	0.19	0.17	0.08	-0.14	-0.12	0.03	-0.13	-0.21	-0.32	-0.06	-0.22	0.12
TN	0.37	0.11	0.36	0.32	0.23	0.16	-0.07	-0.08	0.06	-0.09	-0.19	-0.24	-0.05	-0.21	0.21

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

Phe), $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$, $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 和 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$. 低环 PAHs (LMW) 和高环 PAHs (HMW) 的比值也可以定性地表明 PAHs 的来源^[16]. $\text{LMW}/\text{HMW} > 1.00$ 表示石油源, $\text{LMW}/\text{HMW} < 1.00$ 表示燃烧源. 如图 4(a) 所示, 所有土壤样品的 LMW/HMW 均小于 1.00, 表明研究区 PAHs 主要来源于燃烧源.

由于某些化合物的检出率相对较低, 某些比值

中有价值的比率较少^[40]. 所以选用 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 和 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 对 PAHs 来源进行解析. $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 小于 0.20 为石油源, 介于 0.20 和 0.35 之间为石油源和燃烧源的混合源, 大于 0.35 为木炭、煤炭及其他生物质的不完全燃烧; $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 小于 0.20 为石油源, 介于 0.20 和 0.50 之间为石油产品不完全燃烧, 大于 0.50 为木炭、煤炭及其他生物质的不完全燃烧^[41]. 由图 4

(b)可知,农田土壤采样点 BaA/(BaA + Chry) 的比值介于 0.14 ~ 0.38 之间,平均值为 0.26,且有 90% 的样点值小于 0.35. InP/(InP + BghiP) 比值介于

0.00 ~ 1.00 之间,平均值为 0.50,且有 61% 的样点值大于 0.50. 说明南京城郊农田土壤 PAHs 主要来源为燃烧源与石油源的混合源.

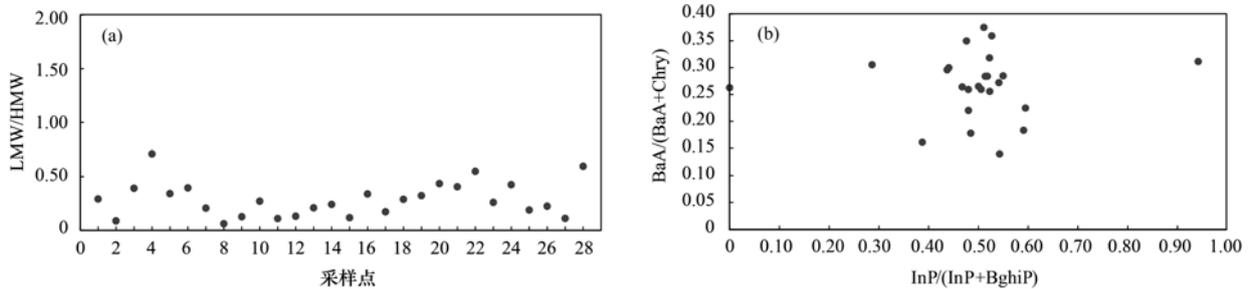


图 4 农田土壤中 PAHs 特征比值
Fig. 4 Characteristic ratio of PAHs in farmland soil

2.5 农田土壤中 PAHs 风险评价

2.5.1 生态风险评价

在 SPSS 中对 PAHs 进行主成分分析,提取了特

征值大于 1 的两个主要成分,第一主成分解释为人
为源,按照公式(2)计算各种污染物的权重^[20],如表
3 所示.

表 3 PAHs 主成分分析

Table 3 Principal component analysis of PAHs

项目	Nap	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	BghiP	BaA	Chry	BbF	BkF	BaP	InP	DahA
载荷值	0.71	0.48	0.80	0.85	0.87	0.91	0.92	0.87	0.93	0.93	0.89	0.86	0.92	0.90
特征值	10.20	— ¹⁾	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
权重	0.06	0.04	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08

1) “—”表示文中没有相关数据

CSI 指数的空间分布如图 5 所示, CSI 的空间分布图与总 PAHs 的空间分布图近似相同[见图 2 (a)]. 通过空间分布图可以看出,该区域受污染程度存在差异. 其高值区主要分布在交通要道(临近句容车站和高速)和工业区(分布有机械制造等工厂)附近. CSI 指数范围为 0.05 ~ 0.37, 其值小于 0.50, 表明处于无污染等级, 没有生态风险.

2.5.2 健康风险评价

按照公式(3) ~ (7) 计算得到农田土壤 PAHs 对儿童和成人通过 3 种暴露途径的 ILCRs 和 CR, 如表 4 所示. 结果表明, 在所有的土壤样品中, 通过摄食和皮肤接触途径的致癌风险等级为 $10^{-9} \sim 10^{-8}$. 然而, 通过呼吸吸入致癌风险为 $10^{-14} \sim 10^{-12}$, 低于其他 2 种途径 4 ~ 5 个数量级, 因此, 呼吸吸入途径可忽略不计, 其原因是由土壤中挥发进入大气的 PAHs 较少^[42]. 该结论与以往的研究结果相一致^[5, 26, 43].

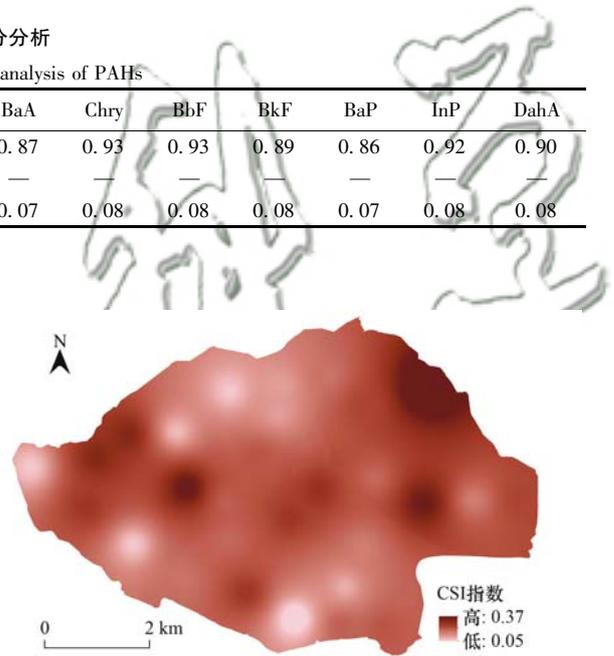


图 5 农田土壤中 CSI 指数空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of CSI index in farmland soil

对于儿童而言, 通过摄食和皮肤接触途径的致癌风险等级在同一数量级 ($10^{-9} \sim 10^{-8}$), 表明这两种途径对儿童的致癌风险具有显著影响. 另外, 儿童摄食途径 ($2.40E-08$) 比成人 ($1.87E-08$) 的致癌风险更高. 这是因为儿童手-口活动频繁, 被污染的土壤更容易摄入体内^[25]; 其次是儿童体重较轻, 所

表 4 儿童和成人 3 种暴露途径的致癌风险

Table 4 Carcinogenic risk of three exposure pathways in children and adults

项目	儿童				成人			
	ILCR _{摄食}	ILCR _{呼吸吸入}	ILCR _{皮肤接触}	CR	ILCR _{摄食}	ILCR _{呼吸吸入}	ILCR _{皮肤接触}	CR
最大值	6.70E-08	1.30E-12	8.35E-08	1.50E-07	5.23E-08	4.06E-12	9.29E-08	1.45E-07
最小值	2.73E-09	5.30E-14	3.41E-09	6.14E-09	2.13E-09	1.65E-13	3.79E-09	5.92E-09
平均值	2.40E-08	4.65E-13	2.99E-08	5.39E-08	1.87E-08	1.45E-12	3.33E-08	5.20E-08

以通过 PAHs 的摄入量大于成人摄入量^[27]. 对于成人而言, 成年人皮肤接触途径(3.33E-08)比儿童(2.99E-08)的终身致癌风险更高. 这可能是因为成年人的皮肤接触面积更大和接触时间更长^[27]. 从整体的 CR 值来看, 对儿童健康的威胁风险略大于成人. 总体而言, 农田土壤中 PAHs 对成人和儿童的致癌风险均在可以接受的安全范围内.

3 讨论

由于污染源类型、排放密度和土壤性质等因素的不同, 造成土壤中 PAHs 含量的差异^[28]. 将本研究区测定的 14 种 PAHs 含量与其它研究报道进行比较, 南京城郊农田土壤 PAHs 均值高于黄淮平原农业土壤^[39] ($130 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和不同的土壤类型, 比如韩国光州土壤($116 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[35]; 低于银马河流域农田土壤($740 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[25]、成都经济区农业土壤^[29] ($3\,233.92 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和其他不同的土壤类型, 比如长春工业城市土壤($17\,200 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[21]、天津滨海新区城市土壤($932 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[5]、北京城市公园($460 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[17] 和印度道路边土壤($3\,488 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[7], 有研究表明, 较高污染地区与特定污染源有关^[25]. 与其他农业土壤相比, 南京城郊农田土壤 PAHs 污染水平处于中低污染水平, 这可能是因为本采样点位于城市郊区农田, 远离明显的污染源.

对南京城市土壤 PAHs 进行研究^[44], 结果表明, 16 种 PAHs 平均含量为 $2\,740 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 主要特征化合物有 Fla、BbF、Phe、InP 和 BghiP. 南京城市土壤 PAHs 含量主要以 4 环为主, 其次是 5、3、6 和 2 环. 南京城市土壤 PAHs 平均含量是南京城郊农田土壤 PAHs 含量的 12 倍. 造成这种差异性结果的原因可能是人口密度的巨大差异, 并且有研究表明, 人口密度与 PAHs 的含量呈明显正相关^[45], 人口密度越大, 资源消耗越大, 会产生更多的 PAHs. 南京总人口超过 800 万, 市区总人口 600 万^[11], 南京郊区的人口密度相对较少, 所以人类活动和资源消耗较少, 产生较少的 PAHs. 也可能与植被茂密程度有关, 与城市土壤相比, 城郊农田土壤植被覆盖面积较大, 植被和农作物对 PAHs 的沉降有一定的阻挡作用, 从而减少 PAHs 在土壤中的沉积.

4 结论

对南京城郊农田土壤中 14 种 PAHs [萘 (Ace) 未被检出] 进行了分析, 农田土壤 PAHs 含量范围为 $24.49 \sim 750.04 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $226.64 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 高环 PAHs 为农田土壤主要污染成分. 农田土壤

PAHs 与 SOM、pH、CEC 和 TN 无显著相关性, 但是 ρ_b 与 Nap、Flu、Phe、Ant 和 Pyr 在 0.01 水平上呈极显著相关. 农田土壤中 PAHs 主要来源于燃烧源与石油源的混合源. 农田土壤 PAHs 不存在生态风险, 对儿童和成人的平均致癌风险分别为 $5.39\text{E}-08$ 和 $5.20\text{E}-08$, 表明致癌风险在可以接受的安全范围内.

参考文献:

- [1] 马妍, 程芦, 阮子渊, 等. 近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1065-1072.
Ma Y, Cheng L, Ruan Z Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil of China(2000-2020): temporal and spatial distribution, influencing factors [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1065-1072.
- [2] Yu H Y, Li T J, Liu Y, et al. Spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in urban soil of China[J]. Chemosphere, 2019, **230**: 498-509.
- [3] Siemering G S, Thiboldeaux R. Background concentration, risk assessment and regulatory threshold development: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in Milwaukee, Wisconsin surface soils[J]. Environmental Pollution, 2021, **268**, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2020.115772.
- [4] Liu H, Yu X L, Liu Z R, et al. Occurrence, characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in arable soils of Beijing, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **159**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.04.069.
- [5] Shi R G, Li X H, Yang Y Y, et al. Contamination and human health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Tianjin coastal new region, China [J]. Environmental Pollution, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115938.
- [6] Wang C H, Wu S H, Zhou S L, et al. Characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils: a review[J]. Pedosphere, 2017, **27**(1): 17-26.
- [7] Suman S, Sinha A, Tarafdar A. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) concentration levels, pattern, source identification and soil toxicity assessment in urban traffic soil of Dhanbad, India[J]. Science of the Total Environment, 2016, **545-546**: 353-360.
- [8] 李大雁, 齐晓宝, 吴健, 等. 大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 106-113.
Li D Y, Qi X B, Wu J, et al. Distribution characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric deposition in areas adjacent to a large petrochemical enterprise[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 106-113.
- [9] 周雯雯, 李军, 胡健, 等. 青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1413-1420.
Zhou W W, Li J, Hu J, et al. Distribution, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils of the central and eastern areas of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1413-1420.
- [10] 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 等. 南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 909-916.
Chen J L, Li R Y, Xie X J, et al. Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in greenbelt soils of

- Nanjing City[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 909-916.
- [11] Wang C H, Zhou S L, Song J, *et al.* Human health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban soils of Nanjing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 750-757.
- [12] Young G, Chen Y Q, Yang M. Concentrations, distribution, and risk assessment of heavy metals in the iron tailings of Yeshan National Mine Park in Nanjing, China[J]. *Chemosphere*, 2021, **271**, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.129546.
- [13] 赵斌, 郭洋洋, 周大迈. 我国城郊农业最新研究进展[J]. *北方园艺*, 2015, (7): 188-192.
- Zhao B, Guo Y Y, Zhou D M. Research progress on suburban agriculture in China [J]. *Northern Horticulture*, 2015, (7): 188-192.
- [14] 谢龙涛, 潘剑君, 白浩然, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布及污染评价——以南京市江宁区某乡镇为例[J]. *土壤学报*, 2020, **57**(2): 316-325.
- Xie L T, Pan J J, Bai H R, *et al.* GIS-based spatial distribution and risk assessment of heavy metals in farmland soils: A case study of a town of Jiangning, Nanjing [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(2): 316-325.
- [15] 赵奕然, 谷建辉, 万卫, 等. 株洲城郊农田土壤重金属污染特征与 Pb 同位素示踪[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(3): 1074-1084.
- Zhao Y R, Gu J H, Wan W, *et al.* The features of heavy metal contamination and possible sources from Pb isotopic evidence in farmland soils, Zhuzhou suburb [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3): 1074-1084.
- [16] Soukariéh B, El Hawari K, El Hussein M, *et al.* Impact of lebanese practices in industry, agriculture and urbanization on soil toxicity: evaluation of the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) levels in soil[J]. *Chemosphere*, 2018, **210**: 85-92.
- [17] Qu Y J, Gong Y W, Ma J, *et al.* Potential sources, influencing factors, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil of urban parks in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114016.
- [18] 解小凡, 刘月仙, 邱慧, 等. 黄河三角洲石油化工区农田土壤-玉米体系 PAHs 的分布特征及风险评价[J]. *生态学报*, 2021, **41**(3): 987-997.
- Xie X F, Liu Y X, Qiu H, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in farmland soil-corn system from oil mining area of Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(3): 987-997.
- [19] Benson N U, Fred-Ahmadu O H, Ekest S I, *et al.* Occurrence, depth distribution and risk assessment of PAHs and PCBs in sediment cores of Lagos lagoon, Nigeria[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, **37**, doi: 10.1016/j.rsma.2020.101335.
- [20] Pejman A, Nabi Bidhendi G, Ardestani M, *et al.* A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: a case study[J]. *Ecological Indicators*, 2015, **58**: 365-373.
- [21] Peng J Y, Chen Y N, Xia Q, *et al.* Ecological risk and early warning of soil compound pollutants (HMs, PAHs, PCBs and OCPs) in an industrial city, Changchun, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **272**, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2020.116038.
- [22] Wang T, Xia Z H, Wu M M, *et al.* Pollution characteristics, sources and lung cancer risk of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in a new urban district of Nanjing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **55**: 118-128.
- [23] 葛蔚, 程琪琪, 柴超, 等. 山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1587-1596.
- Ge W, Cheng Q Q, Chai C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural Soils from Shandong[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1587-1596.
- [24] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. *Environmental Management*, 1995, **19**(1): 81-97.
- [25] Chen Y N, Zhang J Q, Zhang F, *et al.* Contamination and health risk assessment of PAHs in farmland soils of the Yinma River Basin, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **156**: 383-390.
- [26] 段海静, 蔡晓强, 陈铁楠, 等. 开封市公园地表灰尘 PAHs 污染与健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4500-4509.
- Duan H J, Cai X Q, Chen Y N, *et al.* Occurrence and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface dust from parks in Kaifeng, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4500-4509.
- [27] Wang W, Huang M J, Kang Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban surface dust of Guangzhou, China: status, sources and human health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(21): 4519-4527.
- [28] Liu G, Niu J J, Guo W J, *et al.* Ecological and health risk-based characterization of agricultural soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons in the vicinity of a chemical plant in China [J]. *Chemosphere*, 2016, **163**: 461-470.
- [29] Xing X L, Qi S H, Zhang J Q, *et al.* Spatial distribution and source diagnosis of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Chengdu Economic Region, Sichuan Province, western China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, **110**(2): 146-154.
- [30] 冯岸红, 朱智成, 陈社军, 等. 寿光土壤中多环芳烃的污染特征及风险评估[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(9): 1607-1614.
- Feng A H, Zhu Z C, Chen S J, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Shouguang City, North China[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(9): 1607-1614.
- [31] Jia J P, Bi C J, Zhang J F, *et al.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in vegetables near industrial areas of Shanghai, China: sources, exposure, and cancer risk [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **241**: 750-758.
- [32] Khalili N R, Scheff P A, Holsen T M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and, gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(4): 533-542.
- [33] Wang C H, Zhou S L, Tang J H, *et al.* Elemental carbon components and PAHs in soils from different areas of the Yangtze River Delta region, China and their relationship[J]. *CATENA*, 2021, **199**, doi: 10.1016/J.CATENA.2020.105086.
- [34] 张欣, 李梦佳, 刘洪斌, 等. 丘陵区耕地土壤剖面有机质含量分布特征及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, **29**(12): 2696-2708.
- Zhang X, Li M J, Liu H B, *et al.* Distribution characteristics and influence factors of organic matter content in cultivated soil in different horizons in hilly areas[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(12): 2696-2708.

- [35] Islam M N, Park M, Jo Y T, *et al.* Distribution, sources, and toxicity assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of the Gwangju City, Korea [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **180**: 52-60.
- [36] 张大定, 曹云者, 汪群慧, 等. 土壤理化性质对污染场地环境风险不确定性的影响[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(5): 526-532.
Zhang D D, Cao Y Z, Wang Q H, *et al.* Effects of soil physical-chemical properties on risk uncertainty in a contaminated site [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(5): 526-532.
- [37] Basavaiah N, Mohite R D, Singare P U, *et al.* Vertical distribution, composition profiles, sources and toxicity assessment of PAH residues in the reclaimed mudflat sediments from the adjacent Thane Creek of Mumbai [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **118**(1-2): 112-124.
- [38] Yu H Y, Liu Y F, Han C X, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters from the seven main river basins of China: Spatial distribution, source apportionment, and potential risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **752**, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.141764.
- [39] Yang B, Xue N D, Zhou L L, *et al.* Risk assessment and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils of Huanghuai plain, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **84**: 304-310.
- [40] Yuan G L, Wu L J, Sun Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of the central Tibetan Plateau, China: distribution, sources, transport and contribution in global cycling [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **203**: 137-144.
- [41] 车凯, 郁金星, 刘松涛, 等. 河北南部变电站场地土壤中 PAHs 含量、来源及健康风险 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(11): 4865-4874.
Che K, Yu J X, Liu S T, *et al.* Distribution, source and risk assessment of PAHs in soil of typical substation sites in south Hebei [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(11): 4865-4874.
- [42] 杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 等. 宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2490-2501.
Yang F, Luo H X, Zhong Y X, *et al.* Spatial distribution characteristics, source apportionment, and risk assessment of topsoil PAHs in the core area of the Ningdong energy and chemical industry base [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2490-2501.
- [43] 周燕, 卢新卫. 西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4800-4808.
Zhou Y, Lu X W. Assessment of pollution, sources, and risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil from urban parks in Xi'an City, China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4800-4808.
- [44] Wang C H, Zhou S L, Song J, *et al.* Formation mechanism of soil PAH distribution: high and low urbanization [J]. *Geoderma*, 2020, **367**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114271.
- [45] Li Y, Liu M, Li R K, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soils of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration, China: influence of land cover types and urbanization [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **715**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137011.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies; A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)