

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响 付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)

不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响 龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)

冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估 侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)

中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力 梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)

济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析 吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)

南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析 阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)

我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜力分析 张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)

中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征 涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)

中国 PM₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017 年) 袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)

长株潭城市群 PM_{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制 马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 王幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)

周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析 马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)

兰州市 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析 马可婧, 孙丽娟 (5997)

北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构 王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)

典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析 韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)

珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素 陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)

淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素 刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)

巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别 姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)

滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别 陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)

典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析 潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)

铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价 廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)

开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价 丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)

霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测 刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)

基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析 陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)

基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)

南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子 韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)

广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价 罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)

紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制 王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)

共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险 张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)

铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制 韩杰, 黄鑫, 杨昆仓, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)

基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例 李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)

农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征 任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)

气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响 单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)

氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析 杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)

生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响 曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)

稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应 毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)

保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响 刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)

土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展 刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)

南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估 王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)

北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险 安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)

锌冶炼废渣重金属在土壤中的垂向迁移特征及归趋 杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)

典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征 成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)

不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征 寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)

开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征 王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)

黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态 王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)

典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响 郑丹凤, 刘娟, 苏超, 张红 (6354)

增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响 肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)

紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)

连作对党参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响 杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)

粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响 罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)

基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系 陈四瑜, 刘晶晶, 孙光明 (6412)

近 5 年我国部分城市群生活垃圾特性 王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)

《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)

北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险

安江梅朵^{1,2}, 张瑞卿², 郭广慧^{1*}, 王云涛³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010070; 3. 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 城市公园在城市发展中具有社会文化、经济和环境服务等多重功能, 城市和经济快速发展可能导致城市公园土壤重金属累积从而威胁人体健康。采集北京市 32 个典型公园 140 个土壤样品, 利用单因子污染指数法和地累积指数法分析了公园土壤 Pb 的累积特征, 通过稳定同位素定量解析了土壤 Pb 的潜在污染来源, 并使用基于蒙特卡洛的概率风险评估方法评估其健康风险。结果表明, 北京市城市公园土壤 $\omega(\text{Pb})$ 几何均值为 $38.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是北京市土壤背景值的 1.48 倍, 但尚未超过《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018) 规定的筛选值; 城市公园土壤 Pb 累积随着公园距中心城区的距离和建园时间的增加而增加; 2 环内、2~4 环和 4~6 环公园土壤 Pb 单因子污染指数分别为 0.16、0.10 和 0.09, 均未达到污染水平; 地累积指数分别是 0.80、0.07 和 -0.31, 除 2 环内和 2~4 环土壤 Pb 达到无-中度污染水平, 4~6 环土壤均未达到污染水平; 同位素定量源解析表明公园土壤 Pb 污染主要来源于煤燃烧(45.4%)、道路灰尘(19.6%)和油漆(13.9%); 公园土壤 Pb 对 0~1、1~3、3~6、6~18、18~44、44~59、59~79 和 >80 岁人群的危害指数(HI)的 95% 分位数分别为 $1.11\text{E}-01$ 、 $8.57\text{E}-02$ 、 $6.39\text{E}-02$ 、 $1.64\text{E}-02$ 、 $1.36\text{E}-02$ 、 $1.26\text{E}-02$ 、 $1.64\text{E}-02$ 和 $1.78\text{E}-02$, 均无潜在的非致癌风险($\text{HI} < 1$); 0~18 岁年龄段人群非致癌风险中敏感性最强的是暴露持续时间, 18~80 岁年龄段人群非致癌风险中敏感性最强的是土壤 Pb 含量, 体重的增加往往会使得非致癌风险降低。研究结果可为城市公园土壤环境风险管控提供理论依据。

关键词: 铅(Pb); 北京市; 公园土壤; 同位素; 蒙特卡洛; 健康风险评估

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-6287-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202211051

Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing

AN Jiang-mei-duo^{1,2}, ZHANG Rui-qing², GUO Guang-hui^{1*}, WANG Yun-tao³

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China; 3. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Urban parks have multiple functions such as social culture, economy, and environmental services during urban development. The rapid development of cities and economy may lead to the accumulation of heavy metals in the soil of urban parks, which may threaten human health. A total of 140 soil samples were collected in 32 typical parks in Beijing. The accumulation characteristics of Pb in the soil of urban parks were analyzed using the single-factor pollution and geo-accumulation indices. The sources of Pb pollution in soils were quantitatively analyzed using the stable isotope of Pb, and the health risk was assessed using the probabilistic risk assessment method based on Monte Carlo simulation. The results showed that the geometric mean of Pb in soils of urban parks in Beijing was $38.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which was 1.48 times the background value. However, it did not exceed the risk screening value (GB 36600-2018). The accumulation of soil Pb in urban parks increased with the increase in the proximity between the park and the central urban area and the increase in the establishment time. The soil Pb pollution index of 2 ring, 2-4 ring, and 4-6 ring parks were 0.16, 0.10, and 0.09, which did not reach the pollution level, and the geo-accumulation indices were 0.80, 0.07, and -0.31, respectively. Except for the no-moderate pollution level in ring 2 and ring 2 to ring 4, the other rings did not reach the pollution level. The sources of Pb pollution in urban parks were coal combustion, road dust, and paint, with the contributions of 45.4%, 19.6%, and 13.9%, respectively. The 95% quantiles of hazard index (HI) of soil Pb in the park for different age groups were $1.11\text{E}-01$, $8.57\text{E}-02$, $6.39\text{E}-02$, $1.64\text{E}-02$, $1.36\text{E}-02$, $1.26\text{E}-02$, $1.64\text{E}-02$, and $1.78\text{E}-02$, respectively, which indicated that there was no potential non-carcinogenic risk ($\text{HI} < 1$). Exposure duration was the most sensitive to non-carcinogenic risks in people aged 0-18 years, and soil Pb concentration was the most sensitive to non-carcinogenic risks in people aged 18-80 years. The increase in body weight often reduced the non-carcinogenic risks. These results can provide theoretical basis for soil environmental risk control in urban parks.

Key words: lead (Pb); Beijing; park soil; isotope tracing; Monte Carlo; health risk assessment

由于城市化和工业化进程的加快, 重金属通过交通运输、市政建设、工业排放、农业生产和大气沉降等方式进入城市土壤, 造成土壤重金属污染^[1]。城市公园是居民户外公共休闲的重要场所, 公园土壤环境质量问题不容忽视。铅(Pb)作为一种有毒有害重金属, 具有毒性强、来源广和不可降解的特性, 受到世界各国的广泛关注^[2]。土壤 Pb 主要通过手-口无意摄入、呼吸吸入和皮肤接触等暴露

途径损害人体健康, 尤其是老年人与儿童^[3]。Pb 中毒会影响人体中枢神经系统、肾脏和血压, 儿童 Pb 中毒则会对认知表现造成不可逆转的影响^[4]。因此, 开展城市公园土壤 Pb 污染评价、来源分析和健

收稿日期: 2022-11-04; 修订日期: 2023-01-06

作者简介: 安江梅朵(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域土壤污染调查评估, E-mail: Anjiangmeiduo@163.com

* 通信作者, E-mail: Guogh@igsnrr.ac.cn

康风险评估对保护人体健康具有重要的科学和现实意义。

目前,现有的研究主要集中在城市公园土壤中重金属的空间分布、来源解析和环境风险评估,如 Liu 等^[5]采用受体模型和多元统计方法分析了北京市城市公园土壤重金属污染的来源。事实上,Pb 具有明显的“指纹特征”,可以通过比较土壤和不同端元 Pb 同位素比值特征,结合贝叶斯模型定量解析不同端元对土壤 Pb 的贡献^[6],为土壤 Pb 污染来源的定量解析提供更准确的依据。另外,关于土壤重金属的健康风险评估主要采用定性的健康风险评价方法^[7],但由于不同人群暴露参数的变异性及土壤重金属含量的空间异质性,将会造成评估结果的偏低或偏高。而基于 Monte Carlo 的概率风险评价方法,可以获得健康风险值的概率分布特征,并且通过敏感性分析得到暴露参数对评价结果的影响,可以提高评价结果的科学性^[3]。

本文选择城市规模大且人口密集的北京市典型城市公园为研究对象,采集土壤表层样品,分析土壤 Pb 时空分布特征、来源贡献及其对不同人群的健康风险概率,以期为北京市城市公园土壤环境风险管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

北京市城区主要包括东城区、西城区、朝阳区、海淀区、丰台区和石景山区等区域,涵盖商业、住宅和工业园区等功能区,常住人口 2 189.0 万人,人口密度达到 $1\,334\text{人}\cdot\text{km}^{-2}$,私人机动车辆保有量为 507.9 万辆。截至 2020 年,该市公园绿地面积达到 $35\,720\text{hm}^2$,人均公园绿地面积 16.6m^2 ^[8]。

北京市属于温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 11.8°C ,年均降水量 $400\sim 750\text{mm}$ 。土壤母质主要为黄土状沉积物、钙质岩类风化的残坡积物和冲积物 (<http://vdb3.soil.csdb.cn/>),土壤类型为褐土和潮土。

1.2 样品采集与分析

2021 年 8~9 月,在连续 7 d 无雨后于北京市城区 32 个典型公园内采集土壤表层样品 ($0\sim 10\text{cm}$) 140 个(图 1),其中 2 环内公园 8 个,2~4 环公园 11 个,4~6 环公园 13 个。每个公园根据其面积大小及人流程度布置采样点,设置 5~6 个子样点,将样品混合均匀装入聚乙烯塑料袋带回实验室。

土壤样品经自然风干后,去除其中的动植物残体等杂质,过 20 目尼龙筛,利用四分法取 100g ,通过研钵磨碎过 100 目筛。称取 0.2g 土壤样品于三

角瓶,利用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 进行消解(USEPA, 1996)。利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS Elan DRC-e, Perkin Elmer, USA)测定土壤 Pb 含量。在分析测定中,设置平行样、空白样品和土壤标准物质样品(GSS-1)进行全程质量控制,Pb 回收率在 $90\%\pm 10\%$ 。

通过电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, Thermo Fisher Scientific, Inc., USA)测定铅同位素组成(^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb)。在铅浓度测定过程中,使用铅标准溶液绘制标准曲线,同时测定试剂空白和参比物(GSS-3)。测量结果的标准差控制在 5% 以内。样品测量前使用国际参考物质(NIST SRM 981 通用铅同位素标准,德国默克公司)进行校准和分析控制。每测量 5 个样品,对 NBS 981 标准溶液进行质量鉴别和仪器参数漂移校正。在实验过程中,对仪器的精度进行了长时间的监测。NBS 981 铅同位素组成的测定值在给定值范围内变化较小,RSD 值小于 0.5%,在证书规定的标准值范围内,符合测定要求。

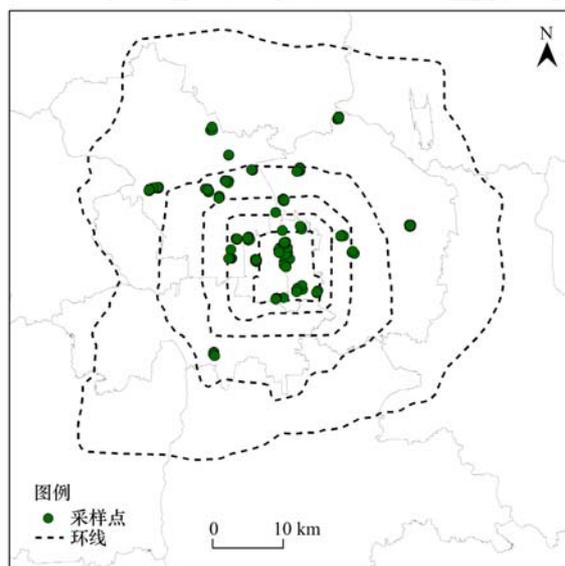


图 1 北京市公园土壤采样点

Fig. 1 Sampling sites in urban parks in Beijing

1.3 土壤污染评价

1.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数(P_i)利用土壤 Pb 实测含量与风险筛选值的比值来表示,公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中, P_i 表示土壤 Pb 的单因子污染指数; C_i 表示土壤 Pb 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 表示公园土壤 Pb 风险筛选值($400\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)(GB 36600-2018)^[9]。利用单因子污染指数可以将污染程度划分为 5 个等级(表 1)。

表 1 单因子污染指数法的分级标准

Table 1 Classification of single factor pollution index method

项目	$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$3 < P_i \leq 5$	$P_i > 5$
污染水平	无污染	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染

1.3.2 地累积指数法

地累积指数(I_{geo})适于探究土壤污染被人类干扰的程度大小,其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5 \times S_i} \right) \quad (2)$$

式中, C_i 表示土壤 Pb 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 表示土壤 Pb 背景值($24.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[10]. 利用地累积指数可以将土壤污染程度分为 7 个等级(表 2).

表 2 地累积指数法的分级标准(I_{geo})

Table 2 Classification standard of geo-accumulation index(I_{geo})

项目	级别	污染程度
$I_{geo} \leq 0$	0	无污染
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	无-中度污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中度污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中度-强污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	强污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	强-极强污染
$5 < I_{geo}$	6	极强污染

1.4 人体健康风险评估

本研究利用美国 USEPA 评价方法对不同人群的健康风险进行评估^[11]. 使用式(3)~(5)分别计算经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触暴露途径下的平均日剂量(ADD)[$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$].

$$\text{ADD}_{\text{Ingestion}} = \frac{C \times R_{\text{Ingestion}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

表 3 健康风险模型的参数值^[11-13]

Table 3 Values for exposure parameters in health risk model

因子	定义	概率分布	单位	参数值									
				0~1岁	1~3岁	3~6岁	6~18岁	18~44岁	44~59岁	59~79岁	>80岁		
$R_{\text{Ingestion}}$ (Ing)	经口摄入率	对数分布	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	50%:45 ¹⁾	50%:45	50%:45	50%:74.5	50%:74.5	50%:74.5	50%:74.5	50%:74.5	50%:74.5	
				95%:202 ¹⁾	95%:202	95%:202	95%:257.5	95%:257.5	95%:257.5	95%:257.5	95%:257.5	95%:257.5	
$R_{\text{Inhalation}}$ (Inh)	呼吸摄入率	对数分布	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	50%:4.9	50%:5.9	50%:8.4	50%:12.5	50%:16.0	50%:16.0	50%:13.7	50%:12.0		
				95%:6.5	95%:7.6	95%:9.6	95%:16.3	95%:20.6	95%:20.2	95%:17.5	95%:15.0		
EF	暴露频率	三角分布 ²⁾	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	350(180,365) ⁵⁾									
ED	暴露持续时间	均匀分布 ³⁾	a	(0,6)	(0,6)	(0,6)	(0,6)	(19,44)	(19,44)	(19,44)	(19,44)		
BW	平均体重	正态分布	kg	50%:8.3	50%:12.2	50%:17.4	50%:39.9	50%:60.1	50%:62.4	50%:59.4	50%:54.3		
				95%:10.7	95%:15.5	95%:22.6	95%:57.3	95%:83.8	95%:83.0	95%:80.0	95%:75.1		
AT	平均暴露时间	点分布	d	365	365	365	1095	8760	8760	6935	6935		
PEF	颗粒排放因子	点分布	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1.36E+09 ⁵⁾									
SA	皮肤暴露面积	对数分布	cm^2	50%:4125	50%:5650	50%:7367	50%:13075	50%:16000	50%:16000	50%:16000	50%:15000		
				95%:4925	95%:6600	95%:8733	95%:16300	95%:19000	95%:19000	95%:19000	95%:18000		
SL	皮肤粘附因子	Beta分布 ⁴⁾	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.2(0,3.3)	0.2(0,3.3)	0.2(0,3.3)	0.2(0,3.3)	0.07(0,3.3)	0.07(0,3.3)	0.07(0,3.3)	0.07(0,3.3)		
ABF	皮肤吸附因子	点分布	无	0.001 ⁵⁾									

1)50%表示分位数为50%对应的值;95%表示分位数为95%对应的值;2)三角分布:最可能值(最小值,最大值);3)均匀分布:(最小值,最大值);4)Beta分布:最可能值(最小值,最大值);5)该值对应所有年龄段

$$\text{ADD}_{\text{Inhalation}} = \frac{C \times R_{\text{Inhalation}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad (4)$$

$$\text{ADD}_{\text{Dermal}} = \frac{C \times \text{SA} \times \text{SL} \times \text{ABF} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中, C 表示土壤 Pb 实测含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其他参数定义和数值见表 3.

土壤 Pb 的非致癌风险的危险商(HQ)和危害指数(HI)分别按式(6)和式(7)计算:

$$\text{HQ} = \frac{\text{ADD}}{\text{RfD}} \quad (6)$$

$$\text{HI} = \sum \text{HQ} \quad (7)$$

式中,RfD表示Pb每日摄入参考剂量,经口、呼吸和皮肤每日摄入参考剂量分别为 $3.50\text{E}-03$ 、 $3.52\text{E}-03$ 和 $5.25\text{E}-04 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$.

利用蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟[式(3)~(5)]中暴露参数和土壤Pb含量的概率分布(表3),并从定义分布的数值随机抽取10000次用于风险值的计算,从而得到非致癌风险的HQ和HI的概率分布.

1.5 数据统计和制图

本研究采用SPSS 22.0完成数据统计,采用Origin 2022b进行正态检验、方差分析和统计图绘制, Monte Carlo模拟采用 Oracle Crystal Ball 11.1.2.4软件完成.

2 结果与讨论

2.1 公园土壤铅含量特征

表4列出了北京市城市公园土壤Pb含量的统计值.经K-S检验,土壤Pb含量符合对数正态分布(图2).因此,本研究采用几何均值代表北京市城市公园土壤Pb含量.北京市城市公园中土壤 $\omega(\text{Pb})$ 范围为17.78 ~ 203.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,几何均值为38.63

表4 北京市城市公园土壤Pb含量统计值

Table 4 Statistical values of Pb concentrations in soil from urban parks in Beijing

项目	最小值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中位值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	偏度	丰度	变异系数 /%	对数转换 (P_{k-s})
数值	17.78	203.42	36.41	42.70	23.59	38.63	3.23	16.23	55.24	0.13

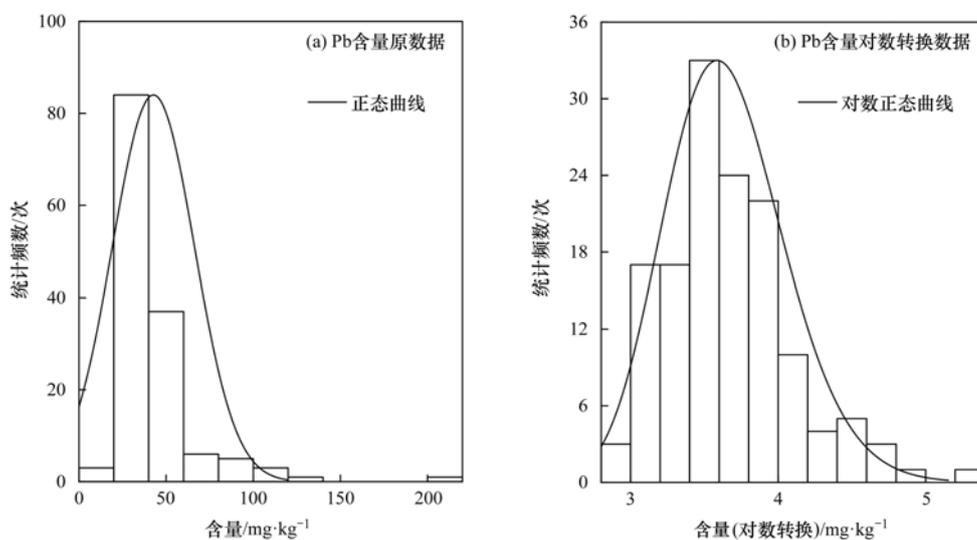


图2 北京市城市公园土壤Pb含量分布直方图

Fig. 2 Histograms of Pb concentrations in soil from urban parks in Beijing

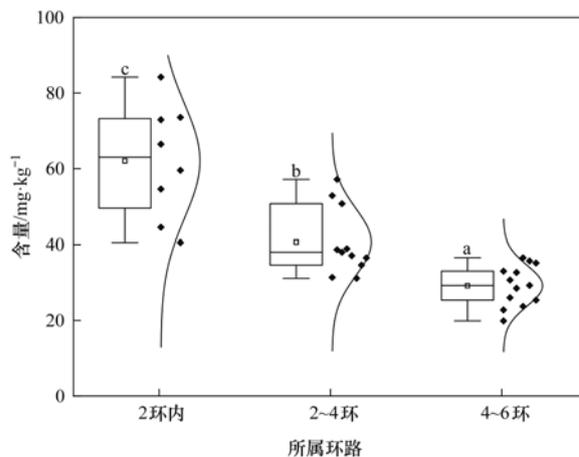
国内外城市公园土壤Pb含量见表5.从中可知,北京市城市公园土壤Pb含量低于我国大型城市广州^[15]、南京^[16]、深圳^[17]、上海^[18]、香港^[19]、杭州^[20]和西安^[21]公园土壤Pb含量,也低于我国南昌^[22]、白银^[23]、长沙^[24]、天津^[25]、佛山^[1]、长春^[26]和乌鲁木齐^[27]等受工业影响较大的城市,但高于呼和浩特^[28]、青岛^[29]和重庆^[30]等城市公园土壤Pb含量.上海、南京和深圳这些城市由于其密集的交通网络和发达的工业活动使其Pb含量具有一定的积累^[16~18];白银等工业型城市,矿产资源开采冶炼活动是其土壤Pb含量较高的主要原因^[23].与国外城市公园土壤Pb含量相比,北京市公园土壤Pb高于韩国京畿道^[31]、美国华盛顿^[32]和澳大利亚珀斯^[33],而低于英国戈尔韦^[34]、美国洛杉矶^[35]和希腊雅典^[36].

2.2 公园土壤Pb含量时空分布特征

2.2.1 公园土壤Pb空间分布

按照环路范围(2环内、2~4环和4~6环)

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,明显低于《土壤环境质量-建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 3600-2018)中规定的筛选值($400 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[9],是北京市土壤Pb背景值($24.60 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的1.48倍^[10].85%样本的Pb含量超过土壤背景值,说明北京市城市公园土壤Pb存在一定的累积.另外,土壤Pb含量的变异系数为55.24%,表现为中等变异^[14],说明Pb含量的空间分布差异较大,其来源受到人为因素的影响.



不同小写字母表示不同环路公园Pb含量有显著差异

图3 北京市不同环路城市公园Pb含量分布情况

Fig. 3 Distribution of Pb concentrations in urban parks of different ring roads in Beijing

对土壤Pb含量进行空间分析.从图3可知,不同环路公园土壤Pb含量具有显著性差异($P < 0.05$),公园土壤Pb含量随着环路数的增加而逐

渐降低. Pb 被认为是城市土壤受机动车污染的标识性元素^[37], 靠近城市中心的土壤样点 Pb 含量较高, 其主要原因是城区交通活动强度相对较

高. 整体上来说, Pb 浓度由中心城区向外扩散而逐渐减小, 说明公园位置与公园土壤 Pb 污染程度有很大关系.

表 5 不同城市公园土壤 Pb 含量水平比较/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 5 Comparison of soil Pb concentrations in different urban parks worldwide/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

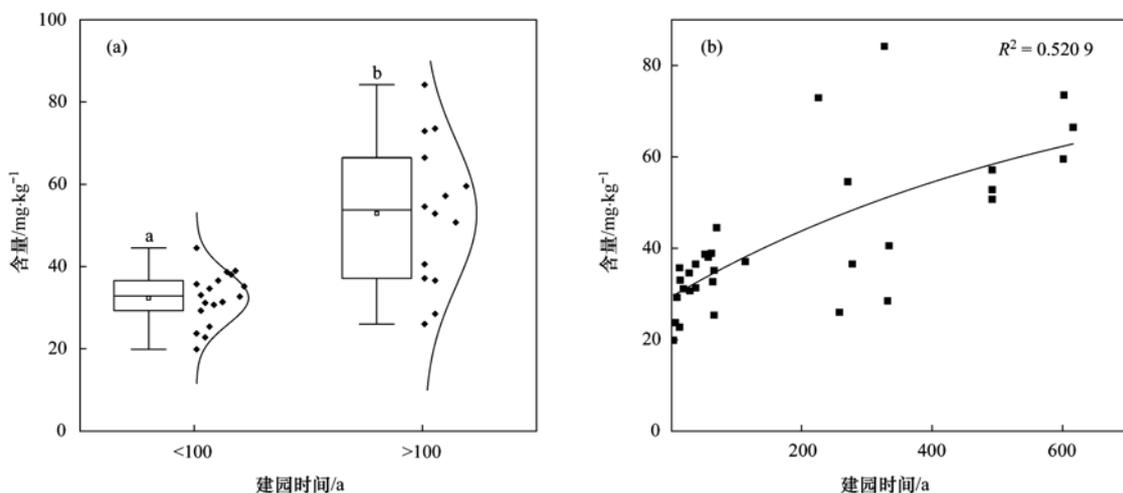
城市	平均值	中值	标准差	最小值	最大值	文献
广州(中国)	110.60	107.90	49.00	31.90	272.60	[15]
南京(中国)	111.13	96.50	64.22	20.53	356.45	[16]
深圳(中国)	83.47	— ¹⁾	68.46	11.20	349.70	[17]
上海(中国)	55.06	—	—	26.39	174.35	[18]
香港(中国)	93.40	89.70	37.20	5.27	404.00	[19]
杭州(中国)	55.78	50.74	39.04	15.04	308.51	[20]
西安(中国)	42.94	—	15.88	26.70	76.80	[21]
南昌(中国)	60.92	—	45.02	0.70	285.90	[22]
白银(中国)	60.71	—	45.84	26.89	227.40	[23]
长沙(中国)	45.30	44.60	20.20	11.30	90.60	[24]
天津(中国)	44.00	—	—	15.00	810.00	[25]
佛山(中国)	42.80	—	34.40	14.80	137.00	[1]
长春(中国)	69.12	59.86	31.26	30.79	172.89	[26]
乌鲁木齐(中国)	43.22	—	6.70	22.38	72.71	[27]
呼和浩特(中国)	15.60	—	3.21	9.40	22.30	[28]
青岛(中国)	34.49	—	—	—	—	[29]
重庆(中国)	29.02	22.02	16.81	2.34	88.61	[30]
京畿道(韩国)	30.90	—	—	21.30	47.70	[31]
华盛顿(美国)	19.00	18.30	2.00	10.90	55.30	[32]
珀斯(澳大利亚)	253.00	75.60	878.00	3.48	5150.00	[33]
戈尔韦(英国)	78.40	58.00	72.00	25.00	543.00	[34]
洛杉矶(美国)	65.50	45.00	63.90	0.97	363.00	[35]
雅典(希腊)	110.30	101.30	35.80	59.70	289.60	[36]
北京(中国)	42.70	36.41	23.59	17.78	203.42	本研究

1)“—”表示此值未能查询到

2.2.2 公园土壤 Pb 的时间变化趋势

不同建园时间(以百年为界)的公园土壤 Pb 含量见图 4. 建园时间在百年以上的城市公园土壤 Pb 含量显著高于百年以下的公园 [$P < 0.05$, 图 4 (a)], 进一步分析北京市城市公园土壤 Pb 含量与

建园时间的关系[图 4(b)], 发现土壤 Pb 含量随建园时间的增加有较为明显的积累. 建园时间直接反映了人类活动的剧烈程度, 说明人类活动对土壤 Pb 污染具有显著影响, 建园时间越长, 人类活动也越多, 土壤 Pb 含量也会随之增加.



(a)不同建园时间公园土壤 Pb 含量, (b)建园时间与公园土壤 Pb 含量拟合关系; 不同小写字母表示不同建园时间公园 Pb 含量有显著差异

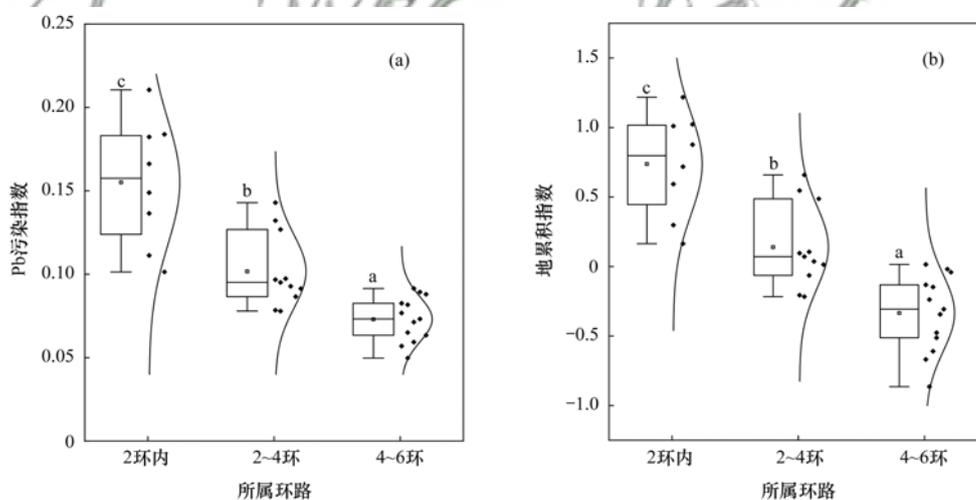
图 4 不同建园时间对城市公园土壤 Pb 含量的影响

Fig. 4 Distribution of Pb concentrations in urban parks at different times of construction in Beijing

另外,不同时期北京市城市公园土壤 Pb 含量数据见表 6. 从时间序列来看,2005 年至目前,北京市城市公园土壤 Pb 含量有降低的趋势,尤其是 2014 年后土壤 $\omega(\text{Pb})$ 维持在 $32.89 \sim 38.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 随着国家对于土壤环境防治的高度重视,北京市近 10 年先后颁布《北京市“十二五”时期环境保护和生态建设规划》和《北京市“十三五”时期环境保护和生态建设规划》,针对北京市土壤利用现状、特点和存在的问题做出合理规划,使得土壤 Pb 污染得到了进一步控制. 北京市政府自 1997 年起通知将逐步在全市范围内禁止销售和使用含铅汽油; 2001 年起,我国根据油漆的不同用途以及油漆中铅对人体和环境产生的危害制定了一系列政策与标准,2015 年生态环境部发布《环境保护综合名录(2015 年版)》将含铅涂料列入“高污染高环境风险产品名录”;《建筑用外墙涂料有害物质限量》(GB 24408-2009)规定涂料中 Pb 含量不能超过 $1\ 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2.3 公园土壤 Pb 含量污染评价

北京市城市公园土壤 Pb 污染指数和地累积指数见图 5. 从中可以看出,各个环路 Pb 污染指数中



不同小写字母表示不同环路公园 Pb 污染指数有显著差异

图 5 北京市不同环路土壤 Pb 污染指数和地累积指数

Fig. 5 Pb pollution index and geo-accumulation index of different ring roads in Beijing

2.4 土壤 Pb 累积来源分析

一般认为,城市土壤 Pb 累积主要与采选业、工业活动、垃圾焚烧、燃煤和车辆交通^[4]有关. 另外, Pb 往往作为着色剂被添加到油漆和涂料^[2],长期使用这类颜料也会造成土壤 Pb 污染. 尽管北京市 1997 年已禁止使用含铅汽油且将工业活动进行转移,但其对土壤 Pb 的影响还依然存在^[43]. 为了进一步明晰城市公园土壤 Pb 累积来源,本研究利用 Pb 同位素比值的“指纹”作用,判断其潜在的污染源. 图 6(a)为北京市城市公园土壤和不同端元样品 Pb 同位素比值关系. 从中看出,北京市城市公园土

表 6 不同年份北京市城市公园土壤 Pb 含量

Table 6 Pb concentrations in soils of urban parks in Beijing at different times

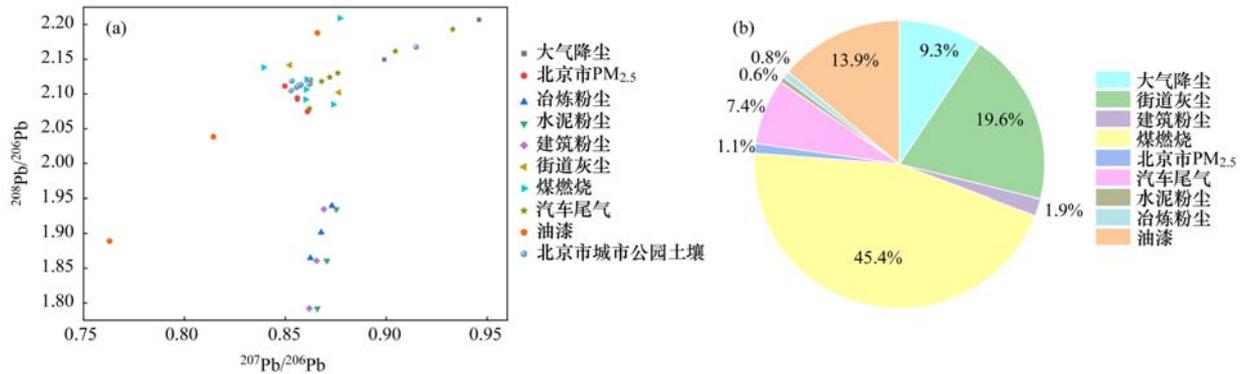
年份	公园个数	土壤样点	$\omega(\text{Pb})$ 平均值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	文献
2005	30	30	66.20	44.20	[38]
2006	12	83	30.95	— ¹⁾	[39]
2012	4	91	61.70	—	[40]
2014	4	21	32.89	2.33	[41]
2020	121	121	36.43	3.84	[42]
2022	32	140	38.63	23.59	本研究

1) “—”表示此值未能查询到

壤 Pb 同位素比值与油漆、煤燃烧、汽车尾气、北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 和道路灰尘较为相似,说明这些污染源是公园土壤 Pb 的可能来源;冶炼粉尘、建筑粉尘和水泥粉尘 Pb 同位素比值不同于公园土壤 Pb 比值,这些污染源对于城市公园土壤 Pb 累积影响并不大. 由此可见,Pb 对北京市城市公园土壤的污染程度并不高.

位数分别为 0.16、0.10 和 0.09,均表现为无污染水平,且各环路内土壤 Pb 污染指数具有显著性差异 [$P < 0.05$, 图 5(a)]. 2 环内和 2~4 环 Pb 地累积指数中位数分别为 0.80 和 0.07,污染水平为无-中度污染;而 4~6 环外 Pb 地累积指数为 -0.31,表现为无污染,且各环路内土壤 Pb 地累积指数具有显著性差异 [$P < 0.05$, 图 5(b)]. 由此可见,Pb 对北京市城市公园土壤的污染程度并不高.

进一步通过贝叶斯模型对土壤 Pb 累积来源贡献进行计算. 从图 6(b)中可以看出,煤燃烧对于土壤 Pb 污染贡献率最高,达到 45.4%,街道灰尘和油漆贡献率仅次于煤燃烧,分别达到 19.6% 和 13.9%. 由于居民供暖需要以及工厂燃煤影响,北京



(a) 北京市城市公园土壤和不同端元样品 Pb 同位素比值关系图, (b) Pb 污染源定量解析; 端元 Pb 同位素数据通过文献收集获得: 北京市 PM_{2.5}^[45]、大气沉降^[46]、街道灰尘^[46]、煤燃烧^[46]、油漆^[47]、冶炼粉尘^[48]、水泥粉尘^[48]、建筑粉尘^[48]和汽车尾气^[49]

图 6 土壤样品和不同环境样品的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 与²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 污染来源定量解析

Fig. 6 Comparison of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ between soil samples and different environmental samples

市铅颗粒主要来源于燃煤排放^[44]. 而街道灰尘与大气颗粒之间的相互转换,使其对城市环境中 Pb 的转移有很大的影响^[45],另外,含铅油漆被北京市公园建筑长期使用,使 Pb 进入土壤形成污染. 综上,北京市城市公园土壤 Pb 污染主要来源为煤燃烧、道路灰尘和油漆.

2.5 土壤 Pb 的健康风险评估

2.5.1 风险评估

不同暴露途径下土壤 Pb 对不同人群的危害商值见表 7. 从中可知,3 种暴露途径的非致癌风险为: 经口途径摄入 > 皮肤接触摄入 > 呼吸途径摄入, 经口摄入是北京市公园土壤铅的主要暴露途径. 土壤 Pb 对不同人群的危害商值均小于 1, 说明北京市城市公园土壤 Pb 对人体健康并无潜在的非致癌风险.

表 7 不同途径下公园土壤 Pb 危害商值

Table 7 Hazard quotient value of Pb in park soils via different exposure pathways for different population groups

年龄段	经口摄入	呼吸摄入	皮肤接触
0~1 岁	2.75E-02	1.37E-05	2.12E-03
1~3 岁	1.84E-02	1.12E-05	1.93E-03
3~6 岁	1.30E-02	1.11E-05	1.78E-03
6~18 岁	4.83E-03	4.75E-06	9.02E-04
18~44 岁	9.26E-04	2.26E-06	1.38E-04
44~59 岁	9.03E-04	2.20E-06	1.35E-04
59~79 岁	1.20E-03	2.42E-06	1.79E-04
>80 岁	1.30E-03	2.29E-06	1.83E-04

基于 Monte Carlo 模拟的不同人群健康风险评估结果见图 7. 从中可知, 公园土壤 Pb 对不同年龄段人群的 HI 值的 95% 分位数均小于 1, 说明北京市城市公园土壤中的 Pb 通过上述 3 种暴露途径对不同年龄段人群均无潜在的非致癌风险. 但是, 0~6 岁人群的 HI 高于其他人群, 这是由于儿童手-口行为导致其对重金属的摄入量相对于成人更大, 且体重低于成人, 导致污染物暴露风险更高; 另外儿童

处于生长发育阶段, 生理发育不完善, 对于环境中的重金属毒性更敏感^[3]. 因此, 同样的暴露环境条件下, 儿童比成人更容易受到 Pb 的危害.

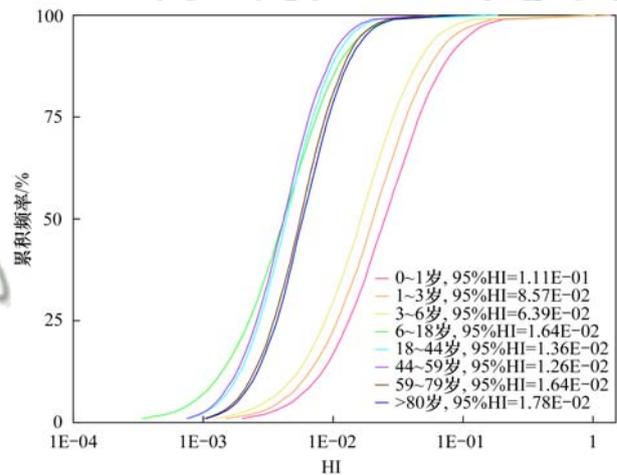


图 7 不同人群土壤 Pb 的非致癌风险累积概率曲线

Fig. 7 Cumulative probability curves of non-carcinogenic risk of soil Pb in different population groups

2.5.2 敏感性分析

利用 Monte Carlo 对健康风险评估中暴露参数进行敏感性分析(图 8). 结果显示, 0~18 岁年龄段人群非致癌风险中敏感性最强的是暴露持续时间, 分别解释了 32.81%~37.80% 的儿童和青年非致癌风险的不确定性, 18~80 岁年龄段人群非致癌风险中敏感性最强的是土壤 Pb 含量, 分别解释了 34.28%~37.74% 的成人和老人非致癌风险的不确定性. 经口摄入率对于儿童非致癌风险的影响仅次于暴露持续时间, 解释了 29.83%~30.51% 的非致癌风险的不确定性. 土壤 Pb 含量对于青年非致癌风险的影响仅次于暴露持续时间, 解释了 20.85% 的非致癌风险的不确定性. 皮肤粘附因子对于成人和老人非致癌风险的影响稍低于土壤 Pb 含量, 解释了

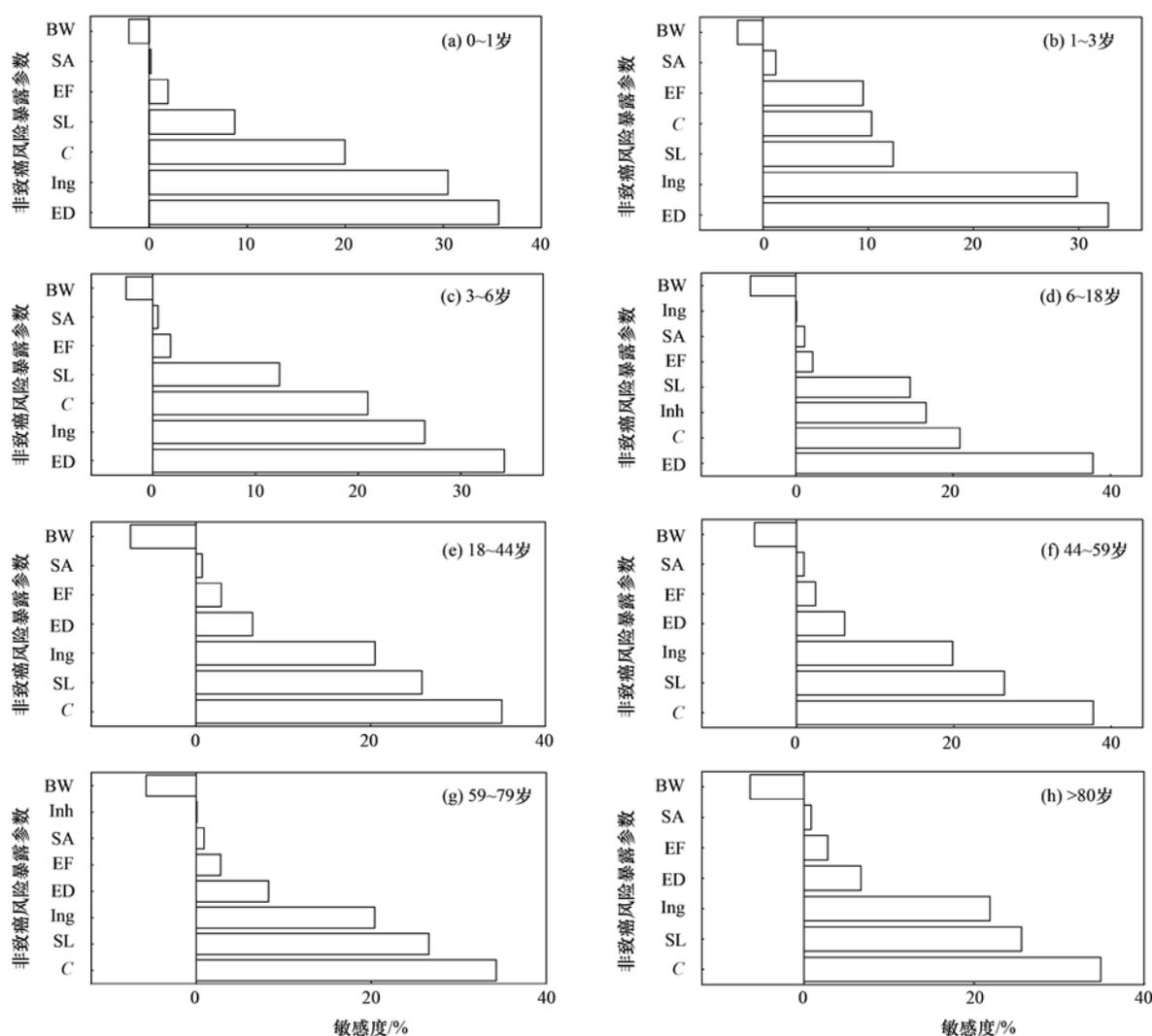


图8 不同年龄段健康风险评估模型的敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of health risk assessment models in different age groups

25.58%~26.59%的非致癌风险的不确定性。另外,体重对于不同人群的非致癌风险都呈现出负的敏感性,这说明体重的增加往往会使得非致癌风险降低。

3 结论

(1)北京市城市公园土壤 $\omega(\text{Pb})$ 几何均值为 $38.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》筛选值,是北京市背景值的1.48倍,说明北京市城市公园存在一定的土壤Pb累积。越接近中心城区,建园时间越久,土壤Pb累积程度越严重。

(2)不同环路公园土壤Pb污染指数分别为0.16、0.10和0.09,均未达到污染水平;地累积指数分别是0.80、0.07和-0.31,除2环内与2~4环达到无-中度污染水平,其他环数均未达到污染水平。

(3)土壤Pb同位素比值和贝叶斯模型表明,公园土壤Pb含量贡献主要为煤燃烧、道路灰尘和油

漆,其贡献率分别为45.4%、19.6%和13.9%。

(4)公园土壤Pb对不同年龄段人群的HI值的95%分位数分别为 $1.11\text{E}-01$ 、 $8.57\text{E}-02$ 、 $6.39\text{E}-02$ 、 $1.64\text{E}-02$ 、 $1.36\text{E}-02$ 、 $1.26\text{E}-02$ 、 $1.64\text{E}-02$ 和 $1.78\text{E}-02$,无潜在的非致癌风险($\text{HI} < 1$),但是儿童受到风险值高于成人。0~18岁年龄段人群非致癌风险中敏感性最强的是暴露持续时间,分别解释了32.81%~37.80%的儿童和青年非致癌风险的不确定性,18~80岁年龄段人群非致癌风险中敏感性最强的是土壤Pb浓度,分别解释了34.28%~37.74%的成人和老人非致癌风险的不确定性;体重的增加则会使得非致癌风险降低。

参考文献:

- [1] 朱立安,殷爱华,林兰稳,等.佛山城市森林公园表层土壤重金属累积特征、影响因素及其评价[J].生态环境学报,2021,30(4):849-856.
Zhu L A, Yin A H, Lin L W, et al. Accumulation characteristics, influencing factors and evaluation of heavy metals in surface soil in urban forest park of Foshan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(4): 849-856.

- [2] Wang Z, Wade A M, Richter D D, *et al.* Legacy of anthropogenic lead in urban soils: co-occurrence with metal (loids) and fallout radionuclides, isotopic fingerprinting, and in vitro bioaccessibility [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151276.
- [3] Lei M, Li K, Guo G H, *et al.* Source-specific health risks apportionment of soil potential toxicity elements combining multiple receptor models with Monte Carlo simulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **817**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152899.
- [4] Cheng H F, Hu Y A. Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1134-1146.
- [5] Liu L L, Liu Q Y, Ma J, *et al.* Heavy metal (loid) s in the topsoil of urban parks in Beijing, China: concentrations, potential sources, and risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114083.
- [6] 肖文丹, 叶雪珠, 张棋, 等. 基于稳定同位素与多元素的土壤铅污染源解析[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(5): 2319-2328.
- Xiao W D, Ye X Z, Zhang Q, *et al.* Source apportionment of lead pollution in soil based on the stable isotope and multi element characteristics[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(5): 2319-2328.
- [7] Peng J Y, Zhang S, Han Y Y, *et al.* Soil heavy metal pollution of industrial legacies in China and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **816**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151632.
- [8] 国家统计局. 2021 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [9] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [10] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. *环境科学*, 2004, **25**(1): 117-122.
- Chen T B, Zheng Y M, Chen H, *et al.* Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(1): 117-122.
- [11] USEPA(The United States Environmental Protection Agency). Exposure factors handbook [M]. Washington, DC: USEPA, 2011.
- [12] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014
- [13] 段小丽. 中国人群暴露参数手册概要-儿童卷[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [14] Costa B R S, Oldoni H, Silva W A, *et al.* Temporal variation and spatial distribution of relative indices of leaf chlorophyll in grapevine cv. chardonnay [J]. *Engenharia Agrícola*, 2019, **39**(S1): 74-84.
- [15] Gu Y G, Gao Y P, Lin Q. Contamination, bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in southern China's largest city, Guangzhou [J]. *Applied Geochemistry*, 2016, **67**: 52-58.
- [16] 庞少东. 基于 GIS 的城市林业土壤重金属含量空间分布——以南京市为例[D]. 南京: 南京林业大学, 2016.
- Pang S D. Spatial distribution of heavy metals in urban forestry soil based on GIS—a case study of Nanjing city [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2016.
- [17] 常文静, 李枝坚, 周妍姿, 等. 深圳市不同功能区土壤表层重金属污染及其综合生态风险评价[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(3): 999-1007.
- Chang W J, Li Z J, Zhou Y Z, *et al.* Heavy metal pollution and comprehensive ecological risk assessment of surface soil in different functional areas of Shenzhen, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(3): 999-1007.
- [18] 史贵涛, 陈振楼, 许世远, 等. 上海城市公园土壤及灰尘中重金属污染特征[J]. *环境科学*, 2007, **28**(2): 238-242.
- Shi G T, Chen Z L, Xu S Y, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in soil and dust of urban parks in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(2): 238-242.
- [19] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11-12): 1361-1368.
- [20] Lu S G, Bai S Q. Contamination and potential mobility assessment of heavy metals in urban soils of Hangzhou, China: relationship with different land uses [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **60**(7): 1481-1490.
- [21] 周燕, 李劲彬. 西安市主要公园表层土壤重金属污染特征及风险评价[J]. *绿色科技*, 2021, **23**(16): 66-70.
- Zhou Y, Li J B. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface soil of major parks in Xi'an city [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2021, **23**(16): 66-70.
- [22] 刘春英, 李洪义. 南昌市不同功能区绿化带土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(8): 1691-1699.
- Liu C Y, Li H Y. Pollution characteristics of heavy metals in green belt soil of different functional areas in Nanchang and the ecological risk assessment [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(8): 1691-1699.
- [23] 李有文, 王晶, 巨天珍, 等. 白银市不同功能区土壤重金属污染特征及其健康风险评价[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(5): 1408-1418.
- Li Y W, Wang J, Ju T Z, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and human health risk assessment in soils from different functional areas of Baiyin, Gansu, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(5): 1408-1418.
- [24] He Y L, Zhang Y, Peng C, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in soil and street dust with different land uses, a case in Changsha, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(20), doi: 10.3390/ijerph182010733.
- [25] 侯佳渝, 杨耀栋, 程绪江. 天津市城区不同功能区绿地土壤重金属分布特征及来源研究[J]. *物探与化探*, 2021, **45**(5): 1130-1134.
- Hou J Y, Yang Y D, Cheng X J. Distribution and sources of heavy metals in greenbelt soil in different functional zones of Tianjin city [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, **45**(5): 1130-1134.
- [26] Liu Q, Wang Y, Liu J S, *et al.* Grain-size distribution and heavy metal contamination of road dusts in urban parks and squares in Changchun, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, **37**(1): 71-82.
- [27] Zhang Z Y, Yang X D, Simay Z, *et al.* Health risk evaluation of heavy metals in green land soils from urban parks in Urumqi, northwest China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(5): 4459-4473.
- [28] 杨永志, 闫海霞, 马穆德. 呼和浩特市绿地土壤重金属污染特征及评价[J]. *北方园艺*, 2019, (16): 110-116.
- Yang Y Z, Yan H X, Ma M D. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different greenbelts of Hohhot [J]. *Northern Horticulture*, 2019, (16): 110-116.
- [29] 钱翌, 赵世刚. 青岛市不同生态功能区表层土壤重金属污染

- 初步评价[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(9): 352-356.
- Qian Y, Zhao S G. Preliminary evaluation of heavy metal in top soil of different ecological function areas in Qingdao[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, **26**(9): 352-356.
- [30] 徐福银, 胡艳燕. 重庆市不同功能区城市绿地土壤重金属分布特征与评价[J]. 土壤通报, 2014, **45**(1): 227-231.
- Xu F Y, Hu Y Y. Distribution and pollution assessment on heavy metals in urban soils of different functional areas in Chongqing [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(1): 227-231.
- [31] Kim W, Song I, Shin J, *et al.* A study on soil contamination of children's parks within the Gyeonggi-do province area [J]. Journal of Environmental Health Sciences, 2017, **43**(3): 233-239.
- [32] Nezat C A, Hatch S A, Uecker T. Heavy metal content in urban residential and park soils: a case study in Spokane, Washington, USA[J]. Applied Geochemistry, 2017, **78**: 186-193.
- [33] Rate A W. Multielement geochemistry identifies the spatial pattern of soil and sediment contamination in an urban parkland, Western Australia[J]. Science of the Total Environment, 2018, **627**: 1106-1120.
- [34] Zhang C S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland[J]. Environmental Pollution, 2006, **142**(3): 501-511.
- [35] Hung W C, Hernandez-Cira M, Jimenez K, *et al.* Preliminary assessment of lead concentrations in topsoil of 100 parks in Los Angeles, California[J]. Applied Geochemistry, 2018, **99**: 13-21.
- [36] Massas I, Ehaliotis C, Kalivas D, *et al.* Concentrations and availability indicators of soil heavy Metals; the case of children's playgrounds in the city of Athens (Greece) [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2010, **212**(1-4): 51-63.
- [37] 熊润光, 乔强龙, 桂智凡. 黄石市绿地土壤重金属污染风险评价及来源解析[J]. 土壤通报, 2022, **53**(4): 972-980.
- Xiong R G, Qiao Q L, Gui Z F. Risk assessment and source analysis of heavy metal pollution in green space soil in Huangshi city[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, **53**(4): 972-980.
- [38] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China[J]. Chemosphere, 2005, **60**(4): 542-551.
- [39] 李纯, 岑况, 王雪. 北京市主要公园土壤中铅含量及污染评价[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(10): 64-66.
- Li C, Cen K, Wang X. Lead concentration in soil of urban parks in Beijing and their pollution assessment [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **29**(10): 64-66.
- [40] 张娟, 王艳春, 田宇. 北京市属公园土壤重金属分布及风险评价[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(6): 161-164.
- Zhang J, Wang Y C, Tian Y. Soil contamination in Beijing's parks and heavy metals risk assessment [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(6): 161-164.
- [41] 鲁绍伟, 高琛, 杨新兵, 等. 北京市不同污染区主要绿化树种对土壤重金属的富集能力[J]. 东北林业大学学报, 2014, **42**(5): 22-26.
- Lu S W, Gao C, Yang X B, *et al.* Main greening tree species on soil heavy metal enrichment capability in different contaminated area of Beijing [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, **42**(5): 22-26.
- [42] 刘玲玲. 北京城市公园表层土壤重金属污染评价及风险评估[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- Liu L L. Heavy metal(loid)s pollution in surface soil of Beijing urban park and their risk assessment [D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [43] 郭广慧, 陈同斌, 宋波, 等. 中国公路交通的重金属排放及其对土地污染的初步估算[J]. 地理研究, 2007, **26**(5): 922-930.
- Guo G H, Chen T B, Song B, *et al.* Emissions of heavy metals from road traffic and effect of emitted lead on land contamination in China: a primary study [J]. Geographical Research, 2007, **26**(5): 922-930.
- [44] Cai J, Wang J D, Zhang Y J, *et al.* Source apportionment of Pb-containing particles in Beijing during January 2013 [J]. Environmental Pollution, 2017, **226**: 30-40.
- [45] Tao Z H, Guo Q J, Wei R F, *et al.* Atmospheric lead pollution in a typical megacity: evidence from lead isotopes[J]. Science of the Total Environment, 2021, **778**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145810.
- [46] Cong L, Zhou S J, Niyogi D, *et al.* Concentrations and isotopic analysis for the sources and transfer of lead in an urban atmosphere-plant-soil system [J]. Journal of Environmental Management, 2022, **311**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114771.
- [47] Liang F, Zhang G L, Tan M G, *et al.* Lead in children's blood is mainly caused by coal-fired ash after phasing out of leaded gasoline in Shanghai[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(12): 4760-4765.
- [48] Zhao L S, Yu R L, Yan Y, *et al.* Bioaccessibility and provenance of heavy metals in the park dust in a coastal city of southeast China [J]. Applied Geochemistry, 2020, **123**, doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104798.
- [49] Tan M G, Zhang G L, Li X L, *et al.* Comprehensive study of lead pollution in Shanghai by multiple techniques[J]. Analytical Chemistry, 2006, **78**(23): 8044-8050.

CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models: A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)