

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)

基于不同电力需求的中国减污降碳协同增效路径 向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)

城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用 张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)

基于可解释性机器学习的城市 O₃ 驱动因素挖掘 董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)

基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析 朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)

基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O₃ 来源解析 王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)

基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测 朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)

2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析 李婉苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)

夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响 杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)

气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别 杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)

2000~2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)

基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM_{2.5} 小时浓度估算 吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)

2013~2021 年邢台 PM_{2.5} 重污染过程输送和增长特性 江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)

基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源 朱书慧 (3760)

机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢锋, 曹芳, 章炎麟 (3771)

沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献 关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)

疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估 云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 李明棣, 郭健锋 (3788)

西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势 王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)

淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价 徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)

雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应 王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)

流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)

南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)

闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)

金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素 燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)

嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性 竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郑伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)

水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响 王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)

典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探 吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)

太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响 俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)

基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算 张育福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)

千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别 俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)

沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征 李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)

外秦淮河底泥污染及疏浚效果 张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)

新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为 葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)

镉在针铁矿界面共吸附的相互作用机制 苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)

环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H₂O₂ 氧化水中有机微污染物 刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)

Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制 朱敬林, 汪舒 (3990)

微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征 谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)

中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价 王静, 魏恒, 潘波 (4006)

渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)

基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例 方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)

乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)

荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制 黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)

近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展 赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)

改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)

沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)

两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果 梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)

秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响 王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)

秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)

基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断 黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)

地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)

浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)

生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)

低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响 周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡廷江 (4170)

沼液施用对麦茬茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响 乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)

大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)

马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响 姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)

《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)

中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价

王静^{1,2}, 魏恒^{1,3}, 潘波¹

(1. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南省土壤固碳与污染控制重点实验室, 昆明 650500; 2. 云南生态环境厅, 昆明 650032; 3. 云南省生态环境科学研究院, 昆明 650032)

摘要: 通过检索 2000 ~ 2022 年国内外公开发表的文献资料, 获得 31 个省 240 个市(县)区域 160 446 个农田土壤样点的镉(Cd)含量数据, 利用单因子污染指数、地累积指数和概率风险评价方法从整体上分析了我国农田土壤 Cd 污染时空分布特征及其健康风险, 为农田土壤 Cd 污染治理和风险管控提供了科学依据. 结果表明, 我国农田土壤 $\omega(\text{Cd})$ 范围在 0.012 ~ 23.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 几何均值为 0.473 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是我国农用地土壤 Cd 风险筛选值(6.5 < pH ≤ 7.5)的 1.58 倍. 从不同区域来看, 华中地区土壤 Cd 含量最高, 其他区域土壤 Cd 含量大小依次为: 西南 > 华南 > 西北 > 东北 > 华东 > 华北; 从时间尺度来看, 我国农田土壤 Cd 含量在各时间段并无统计学意义的显著性差异 ($P > 0.05$). 我国农田土壤 Cd 对儿童、青年、成年人和老年人尚无非致癌风险, 但其对成年人和老年人存在潜在致癌风险, 约 5.81% 和 4.49% 的成年人和老年人的致癌风险超过美国环保署规定的限量值(1E-06). 为提高农田土壤 Cd 健康风险评价的准确性, 概率生态风险评价中还需要进一步考虑土壤 Cd 的生物有效性和农产品的摄食暴露途径.

关键词: 镉; 农田土壤; 蒙特卡洛模拟; 健康风险评价; 空间分布

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)07-4006-11 **DOI:** 10.13227/j.hjkk.202206153

Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China

WANG Jing^{1,2}, WEI Heng^{1,3}, PAN Bo¹

(1. Yunnan Provincial Key Laboratory of Soil Carbon Sequestration and Pollution Control, Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Department of Ecology and Environment of Yunnan, Kunming 650032, China; 3. Academy of Eco-environmental Science of Yunnan, Kunming 650032, China)

Abstract: To understand cadmium (Cd) pollution status and associated health risks in agricultural soils of China, a database including Cd concentrations of 160 446 soil samples from 240 cities (counties) in 31 provinces was constructed based on domestic and foreign literature. The contamination factor and geochemical accumulation index were applied to explore the pollution level of Cd, and then health risks for different population groups were evaluated with the probabilistic risk assessment method based on Monte Carlo simulation. The results indicated that soil Cd concentrations in China ranged from 0.012 to 23.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, with the geometric mean of 0.473 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which was 1.58 times the risk screening value of heavy metals in the soil of agricultural land (GB 15186-2018) (6.5 < pH ≤ 7.5). From the perspective of different regions, the highest concentrations of soil Cd were found in central China, followed by southwest, south, northwest, northeast, east, and north China. From the perspective of time, there was no significant difference in soil Cd in different time periods ($P > 0.05$). Cd pollution in agricultural soils was mainly distributed in Yunnan, Hunan, Guangxi, and Gansu provinces in China, which may have been related to the mining and smelting activities. The non-carcinogenic risks for all the population groups could be negligible, whereas there were potential carcinogenic risks for adults and seniors, with 5.81% and 4.49% of carcinogenic risk values exceeding the threshold of 1E-06 set by USEPA for adults and seniors, respectively. The results of this study provided valuable information for the pollution prevention and risk control of soil Cd pollution. To improve the accuracy of health risk assessment results, the exposure ingestion route of agricultural products and bioavailability of soil Cd should be considered in the probabilistic ecological risk assessment.

Key words: cadmium(Cd); agriculture soils; Monte Carlo simulation; health risk assessment; spatial distribution

随着我国城市化和工业化进程的加快及集约化的农业活动, 大量重金属被释放到土壤并不断累积^[1,2]. 2014 年, 原环境保护部和国土资源部联合发布的全国土壤污染状况调查公报显示^[3], 我国土壤镉(Cd)点位超标率高达 7%. 土壤 Cd 累积与矿业采选冶、工业排放和交通运输等人类活动有关^[4-6], 同时与土壤母质或地质背景等自然因素有关^[7]. 超量累积的 Cd 不仅导致土壤质量退化, 而且导致农产品产量和质量降低, 甚至通过食物链危害人体健康^[8]. 长期 Cd 暴露将会对人体免疫系统、生殖系统和心脑血管系统产生毒害作用^[9]. 因此, 农

田土壤 Cd 污染分布特征和健康风险受到了环境科学家和公众的广泛关注.

近年来, 国内外学者重点关注工矿企业^[10]、公园^[11]和农田^[12]土壤重金属污染问题, 并致力于土壤重金属风险评估、致毒机制和修复治理等方面. 目前, 已有研究报道我国农田土壤重金属在区域上表现出较强的空间分异性, 南方地区土壤重金属污染高于北方地区^[13-15]. 然而, 以上研究仅侧重于重

收稿日期: 2022-06-14; 修订日期: 2022-09-13

作者简介: 王静(1981~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境质量评估, E-mail: 10722197@qq.com

金属污染的空间分布,忽略了时间尺度的变化.同时,关于国家尺度的人体健康风险主要利用确定性健康风险评估方法,这可能会高估或低估健康风险的评价结果^[16].基于蒙特卡洛(Monte Carlo)的概率风险评估方法可以通过模拟暴露参数的概率分布进而预测健康风险超过限量值的概率,从而提高健康风险评估的科学性^[17,18].因此,本研究通过文献调研2000~2022年公开发表的中国农田土壤Cd含量数据,进一步探讨全国农田土壤Cd含量时空分布、污染特征及其对不同人群的健康风险,以期为农用地土壤Cd污染防治和风险管控提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 文献搜集与整理

本研究收集和整理了2000~2022年我国公开发表的关于农田土壤Cd含量相关文献536篇(表

1).以“农田土壤”、“Cd污染”和“Cd暴露”为关键词,在中国知网、万方、维普和Web of Science等数据库搜索目标文献.获取数据的原则:①目标文献研究对象为表层土壤(0~20 cm);②目标文献所采用的分析方法遵循严格的质量控制,如必须有质控样品,平行样和空白样,消解方法采用HNO₃-HClO₄-HF, HCl-HNO₃-HClO₄-HF等方法,测试方法采用电感耦合等离子体质谱法或石墨炉原子吸收光谱法;③检索结果采用目标文献中土壤Cd含量平均值;④同一城市不同研究中土壤Cd含量根据文献数据计算其平均值.通过以上筛选原则,本研究共获得31个省级行政区240个市县区域160446个土壤样本,240个市县样点分布见图1.从中可知,大部分土壤样点分布于华东、华中和西南部,而青海、西藏、宁夏、内蒙古、吉林、沈阳和黑龙江的样点分布较为稀疏.

表1 我国不同地理分区公开发表的文献

Table 1 Literature published from different regions of China

区域	省份(篇数)
东北	黑龙江(4篇)、吉林(12篇)和辽宁(15篇)
华北	北京(19篇)、天津(8篇)、山西(21篇)和河北(12篇)
华东	上海(10篇)、江苏(43篇)、浙江(43篇)、安徽(20篇)、江西(14篇)、山东(24篇)和福建(7篇)
华中	河南(19篇)、湖北(23篇)和湖南(51篇)
华南	广东(17篇)、广西(21篇)和海南(2篇)
西北	陕西(24篇)、甘肃(28篇)、青海(3篇)、宁夏(5篇)、新疆(15篇)和内蒙古(10篇)
西南	重庆(5篇)、四川(7篇)、贵州(23篇)、云南(26篇)和西藏(5篇)

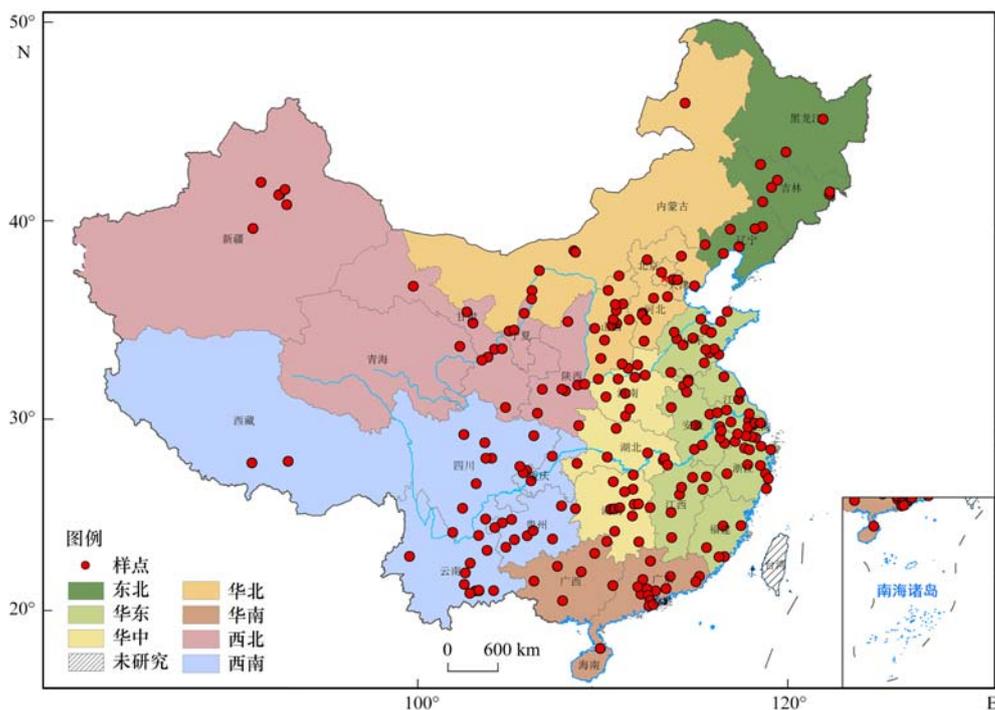


图1 全国240个市(县)土壤Cd样点示意

Fig. 1 Soil Cd sample sites in 240 cities (counties) of China

1.2 重金属污染评价方法

1.2.1 单因子污染指数法(CF)

单因子污染指数(CF)利用土壤 Cd 含量与农用地土壤重金属筛选值的比值来表示^[19],计算公式如下:

$$CF = C_i/S_i \quad (1)$$

式中,CF 表示土壤 Cd 的单因子污染指数; C_i 表示土壤 Cd 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 表示农用地土壤 Cd 风险筛选值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (GB 15618-2018)^[20],考虑全国土壤 pH 值平均值为 6.61^[14],因此选择土壤 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 的重金属风险筛选值. CF 可划分为 5 个等级, $CF < 1$ 表示无污染, $1 < CF \leq 2$ 表示轻微污染, $2 < CF \leq 3$ 表示轻度污染, $3 < CF \leq 5$ 表示中度污染, $CF > 5$ 表示重度污染.

1.2.2 土壤 Cd 地累积指数法(I_{geo})

地累积指数(I_{geo})综合考虑人为因素、背景值和地质岩性差异引起的背景值变动等影响,适用于探究土壤重金属的累积水平^[21],计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_i}{1.5 \times B_i} \quad (2)$$

式中, C_i 表示土壤 Cd 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); B_i 表示各省份土壤 Cd 背景值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[22]. 地累积指数将土壤累积水平分为 7 个等级, $I_{\text{geo}} \leq 0$ 表示无累积; $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ 表示无-中度累积; $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ 表示中度累积; $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ 表示中度-强累积; $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ 表示强累积; $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$ 表示强-极强累积; $5 < I_{\text{geo}}$ 表示极

强累积.

1.3 人体健康风险评价

采用美国环保署(USEPA)推荐的健康风险评价模型分析农田土壤 Cd 对不同人群的健康风险^[23,24]. 本研究设定经口摄入、呼吸摄入和皮肤接触这 3 种暴露途径,分别对儿童(5~6 岁)、青年(15~18 岁)、成年人(18~44 岁)和老年人(60~79 岁)这 4 类人群的非致癌风险和致癌风险进行评价.

1.3.1 暴露评价

经口摄入、呼吸摄入和皮肤接触的暴露评估的计算公式如下:

$$ADD_{\text{ing}} = \frac{C \times \text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$ADD_{\text{inh}} = \frac{C \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad (4)$$

$$ADD_{\text{dermal}} = \frac{C \times \text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 和 ADD_{dermal} 分别表示通过经口摄入、呼吸摄入和皮肤接触的摄入量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$], C 表示土壤中 Cd 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), IngR 表示经口摄入率($\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$), InhR 表示呼吸摄入率($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$), EF 表示年暴露天数($\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$), ED 表示暴露持续时间(a), SA 表示暴露的皮肤面积(cm^2), AF 表示皮肤粘附因子($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$), ABS 表示皮肤吸收因子(无量纲), PEF 表示颗粒物排放因子($\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$), BW 表示不同人群的体重(kg), AT 表示平均暴露时间(d), 参数取值见表 2^[17].

表 2 健康风险评价模型中暴露参数的概率分布

Table 2 Probability distribution of exposure parameters in health risk assessment

暴露参数	概率分布	儿童	青年	成年人	老年人
IngR	对数分布 ¹⁾	50% :78, 95% :295	50% :71, 95% :220	50% :50, 95% :200	50% :50, 95% :200
InhR	对数分布 ¹⁾	50% :8.8, 95% :10.1	50% :14.0, 95% :18.2	50% :16.1, 95% :20.4	50% :13.7, 95% :17.5
EF	三角分布 ²⁾	350(180, 365)	350(180, 365)	350(180, 365)	350(180, 365)
ED	均匀分布 ³⁾	(5, 6)	(15, 18)	(19, 44)	(60, 79)
SA	对数正态 ¹⁾	50% :8 000, 95% :9 500	50% :15 900, 95% :19 000	50% :16 000, 95% :19 000	50% :16 000, 95% :19 000
AF	Beta 分布 ⁴⁾	0.2(0, 3.3)	0.2(0, 3.3)	0.07(0, 0.3)	0.07(0, 0.3)
ABS	点分布	0.001	0.001	0.001	0.001
PTE	点分布	1.36E+09	1.36E+09	1.36E+09	1.36E+09
BW	对数分布 ¹⁾	50% :19.3, 95% :25.5	50% :53.1, 95% :71.0	50% :60.1, 95% :83.8	50% :59.4, 95% :80.0
AT(非致癌)	点分布	1×365	3×365	25×365	19×365
AT(致癌)	点分布	70×365	70×365	70×365	70×365

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)

1.3.2 风险表征

土壤 Cd 对不同人群的非致癌风险和致癌风险的计算公式分别如下:

$$HI = \sum \text{ADD}/\text{RfD} \quad (6)$$

$$\text{CR} = \text{ADD} \times \text{SF} \quad (7)$$

式中, RfD 表示每日摄入参考剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], SF 表示斜率因子 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]. HI 和 CR 分别表示经口摄入、呼吸摄入和皮肤接触暴露途径下 Cd 产生的非致癌

风险和致癌风险. HI 小于 1, 表示无潜在危害; HI 大于 1, 表示存在潜在危害. CR 小于 $1\text{E}-06$, 表示无潜在致癌风险; CR 大于 $1\text{E}-06$, 表示具有潜在致癌风险. RfD 和 SF 的取值见表 3.

表 3 不同暴露途径下土壤 Cd 的每日摄入参考剂量和斜率因子/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$

Table 3 Reference measurement and slope factor of Cd intake in soil under different exposure pathways/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$

项目	RfD			SF		
	经口	皮肤	呼吸	经口	皮肤	呼吸
数值	$3\text{E}-03$	$1\text{E}-05$	$1\text{E}-05$	$5.01\text{E}-01$	$2.00\text{E}+01$	$6.3\text{E}+00$

1.4 数据统计和制图

本研究采用 SPSS 22.0 (IBM, New York, USA) 完成数据统计, 采用 Origin 2022b (Origin Lab, Massachusetts, USA) 进行正态检验和统计作图, 采用 ArcGIS 12.0 完成土壤 Cd 含量、单因子指数和地累积指数的空间分布图, Monte Carlo 模拟采用 Crystal Ball 软件完成.

2 结果与讨论

2.1 中国农田土壤 Cd 含量特征

不同区域土壤 Cd 含量统计值见表 4. 从中可知, 土壤 Cd 含量呈现对数正态分布 ($P_{ks} > 0.05$), 几何均值更能代表土壤 Cd 的真实含量. 全国农田土壤 $\omega(\text{Cd})$ 范围为 $0.012 \sim 23.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 几何均值为 $0.473 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是我国农用地土壤 Cd 风险筛选值 ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[20] 的 1.58 倍. 与我国城市土壤 ($0.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[25] 相比, 我国农田土壤 Cd 含量较低, 这可能是因为城市土壤受到人类活动的影响更大. 我国农田土壤 Cd 含量超过农用地土壤风险筛选值的比例为 54.3%, 这与 Yang 等^[26] 研究的结果类似, 其发现 56.9% 的农田土壤样本中 Cd 含量超过土壤 Cd 标准值 ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 文献[27]则发现 36.7% 的土壤样点超过土壤 Cd 标准值. 与我国土壤污染调查公报 Cd 点位超标率 (7%)^[3] 相比, 本研究中 Cd 超标率较高, 这可能是因为一方面调查公报中土壤污染调查数据时间跨度为 2003 ~ 2015 年, 而本研究的时间跨度更长 (2000 ~ 2022 年), 另一方

面覆盖范围不同, 调查公报覆盖全部耕地, 部分林地、草地和未利用地, 但本研究收集的是农田土壤, 且已有研究往往调查存在污染的农田土壤^[28]. 与国外土壤 Cd 指导值相比, 我国农用地土壤 Cd 筛选值 ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 低于美国 ($0.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[24]、加拿大 ($1.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[29] 和芬兰 ($10.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[30] 等国家的指导值, 说明我国执行更为严格的土壤标准; 若与美国、加拿大和芬兰指导值相比, 农田土壤 Cd 超标率分别为 31.42%、22.33% 和 2.37%.

与其他欧洲和亚洲国家相比, 我国农田土壤 Cd 含量高于法国 ($0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[31] 和西班牙 ($0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[32], 高于亚洲国家日本 ($0.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[33]、马来西亚 ($0.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[34] 和泰国 ($0.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[35]. 从变异系数来看, 全国土壤 Cd 变异系数高达 208.3%, 表现为强变异性, 说明土壤 Cd 受人类活动的影响很大^[36]. 尽管本研究中土壤样点 Cd 数据来源于不同时期, 采样和测定方法也不尽相同, 对土壤 Cd 含量真实水平的认识存在一定的局限性, 但总体来说我国农田土壤 Cd 空间变异大, 受到人类活动的重要影响. 已有研究也表明^[26-28], Cd 已被列为我国农田土壤污染防治的优先控制污染物之一. 因此, 社会经济发展的同时也不可避免地带来了土壤 Cd 增加, 未来还需要制定更为严格的工业排放标准和开发污染防治技术来遏制土壤环境退化. 总体来讲, 我国土壤 Cd 含量处于中等水平, 与发达国家相比还有一定的改善空间.

表 4 我国不同区域农田土壤 Cd 含量统计值

Table 4 Statistical values of Cd concentrations in agricultural soils from different regions of China

分区	最小值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	几何均值 ¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数 /%	对数转化 (P_{ks})
东北	0.090	10.45	0.250	1.564	2.833	0.449abc	181.1	0.24
华北	0.010	4.180	0.200	0.414	0.715	0.227c	172.7	0.09
华东	0.030	17.56	0.210	0.582	1.883	0.262bc	323.5	0.05
华南	0.060	16.50	0.620	1.723	2.771	0.632ab	160.8	0.37
华中	0.060	22.60	0.880	2.267	3.397	0.979a	149.8	0.61
西北	0.080	23.33	0.480	1.710	3.707	0.610abc	216.7	0.19
西南	0.090	18.51	0.665	2.466	4.058	0.910a	164.5	0.34
全国	0.012	23.33	0.320	1.397	2.910	0.473	208.3	0.06

1) 不同小写字母表示存在显著性差异, 相同小写字母表示不存在显著性差异, 显著性水平 0.05

2.2 中国农田土壤 Cd 污染的空间分布特征

如表4所示,不同的地理分区土壤 Cd 含量大小依次为:华中>西南>华南>西北>东北>华东>华北.从统计学来看,华中和西南土壤 Cd 含量无显著性差异($P > 0.05$),但显著高于华北和华东土壤 Cd 含量($P < 0.05$);东北、华东、华南和西北土壤 Cd 含量无显著差异($P > 0.05$).我国农田土壤 Cd 污染指数和地累积指数统计分布见图2.从图2(a)中可看出,华南、华中和西南地区土壤 Cd 污染指数

中位数分别为 2.07、2.93 和 2.22,呈现轻度污染水平;西北土壤 Cd 污染指数中位数为 1.47,呈现轻微污染;而东北、华北和华东土壤 Cd 污染指数中位数分别为 0.71、0.77 和 0.70,呈现无污染.从图2(b)中可知,东北、华北和华东地区土壤 Cd 地累积指数分别为 0.91、0.49 和 0.61,呈现无-中度累积水平;华南、华中、西北和西南地区土壤 Cd 地累积指数分别为 1.94、1.93、1.87 和 1.27,呈现中度累积.

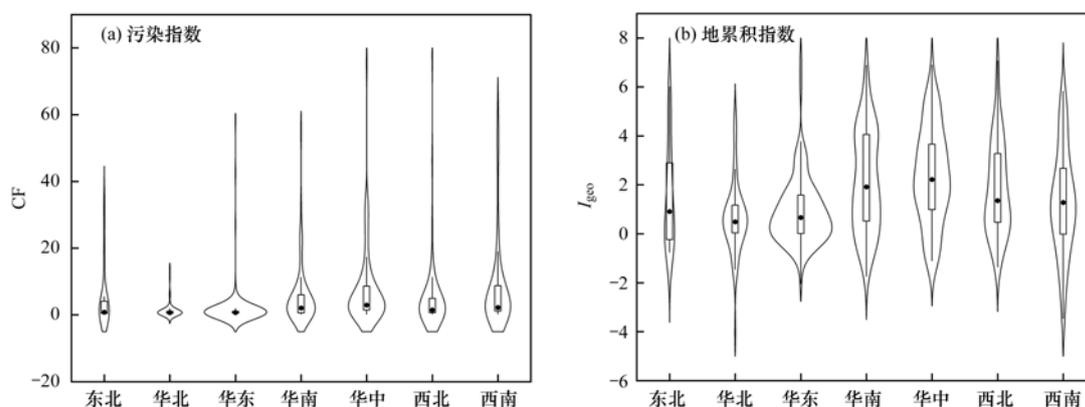


图2 全国不同地区土壤 Cd 污染指数和地累积指数

Fig. 2 Soil Cd pollution index and geochemical accumulation index in different regions of China

从土壤 Cd 含量的空间分布来看(图3),西南、华南和华中地区土壤 Cd 含量高于其他区域,高 Cd 土壤主要分布在云南、广西、湖南、广东、福建、河南、辽宁和甘肃.土壤 Cd 污染指数和地累积指数的空间分布趋势一致(图4),均显示在矿业活动密集的区域土壤 Cd 污染水平较高,如云南、广西、湖南、辽宁、河南和甘肃等.类似地,Hu 等^[37]也统计发现云南、广东、广西和湖南土壤 Cd 含量较高.文献^[38]报道中国农田土壤 Cd 的年大气输入量为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$,汽车尾气、垃圾焚烧、冶炼过程和建

筑粉尘等大气沉降输入农田土壤,加剧了土壤重金属污染.以人类活动为主导的工矿业活动和农业活动等方式产生的 Cd 直接或间接排放进入土壤,矿业活动如采选冶和尾矿处理等过程中往往伴生 Cd 的排放,以上活动排放的 Cd 将会进入土壤并累积.云南个旧和会泽、广西河池、湖南郴州、甘肃白银和辽宁葫芦岛等地是我国重要的有色金属基地,具有丰富的矿产资源和长久的采选冶历史,矿业开采冶炼排放的重金属烟尘和废水可能是土壤 Cd 含量较高的主要原因之一.另外,Cd 高值区在河南、湖南和河北等省市出现,以上地区是我国粮食主产区,污水灌溉和不合理的化肥农药施用成为土壤 Cd 输入的主要途径.据报道,我国污水灌溉面积占全国农田总面积的 73%^[39].在北方地区如新疆、河北、河南和天津等地由于水资源匮乏,污水灌溉也将导致农田土壤 Cd 的不断积累.如河南新乡一带利用电池厂废水灌溉导致了土壤 Cd 含量增高^[40],河北赵县农田土壤 Cd 也呈现集聚现象,主要来源于受污染的洺河水的灌溉^[41].此外,农田土壤 Cd 污染还与化学肥料和有机肥的施用有关,据报道畜禽粪便有机肥占农田土壤 Cd 投入量的 55%^[38].值得一提的是,在土壤重金属污染防治工作中需要充分考虑自然因素的影响,从全国各省背景值来看,我国西南地区土壤 Cd 背景值高于其他区域^[20],这主要归因于

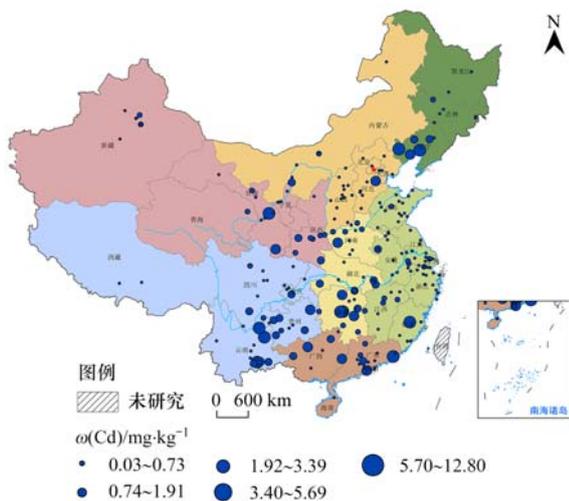
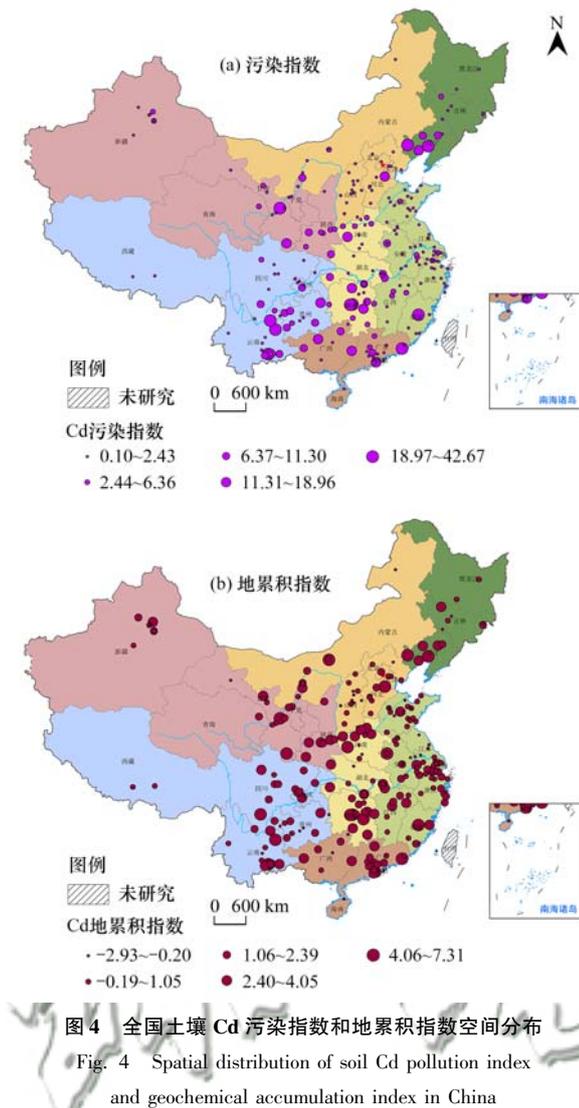


图3 全国土壤 Cd 含量分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil Cd concentrations in China



西南地区地质构造复杂,碳酸岩系石灰岩较其他岩性发育的土壤 Cd 含量偏高^[42]. 总体来看,我国农田土壤 Cd 污染空间分布特征明显,产业结构和土壤背景差异是影响我国农田土壤 Cd 空间分布分异的主要原因.

2.3 中国农田土壤 Cd 污染的时间分布特征

从时间尺度来看(图 5),2000~2004、2005~2009、2010~2014、2015~2019 和 2020~2022 年全国土壤 $\omega(\text{Cd})$ 中位数分别为 0.45、0.20、0.36、0.32 和 0.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,各年份间并无显著差异($P > 0.05$). 文献^[43]发现 2000~2010 年间我国农田土壤 $\omega(\text{Cd})$ 为 0.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这与本研究的结果一致. Shi 等^[44]发现 1981~2001 年为土壤 Cd 高速累积期,而 2001~2016 年间 Cd 的累积比较缓慢,这可能与近年来我国政府致力于土壤重金属污染防治和风险管控有关,如 2002 年开始我国禁止使用某些农药和肥料以及 2016 年发布《土壤污染防治行动计划》等. 不过本研究主要基于不同时期不同地区农田土壤 Cd 含量,不同时期样点分布不均匀,如 2000

~2009 年间,样点主要分布于华东地区如浙江、江苏和上海,华中地区湖北和湖南,东北地区主要集中在辽宁;2010~2014 年间,样点扩展到西北地区如陕西和甘肃,西南地区云南和贵州,华南地区广西和广东,华东地区山东、安徽和江西;2015~2019 年样点进一步扩展到西北地区新疆和西藏,西南地区四川和重庆,华北地区山西和河北. 同时,现有的研究也主要选择典型污染区域开展污染调查和评估,这就给研究结果造成了一定的不确定性.

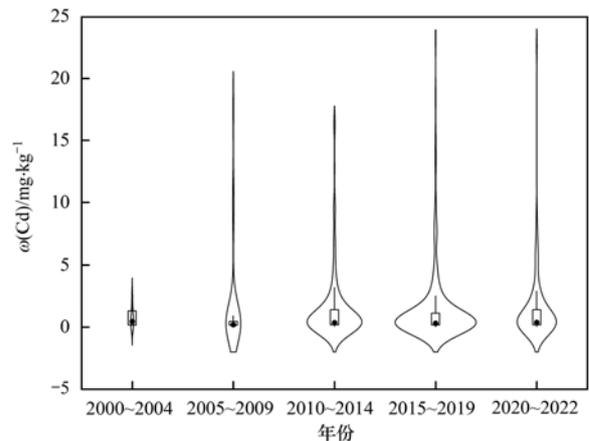


图 5 不同时间我国农田土壤 Cd 含量

Fig. 5 Cd concentrations in agricultural soils at different times in China

2.4 中国农田土壤 Cd 的健康风险评估

基于 Monte Carlo 的不同人群健康风险评估结果见表 5 和图 6. 从中可知,全国土壤 Cd 对儿童、青年、成年人和老年人的 HI 值的 95% 分位数分别为 $8.53\text{E}-02$ 、 $5.06\text{E}-02$ 、 $1.86\text{E}-02$ 和 $1.89\text{E}-02$,均小于 1,这表明土壤 Cd 对不同人群的暴露风险较低. 土壤 Cd 对不同人群的累积概率曲线见图 6(a),从中可知,不同人群的 HI 值均低于 1,其大小表现为:儿童 > 青年 > 老年人 > 成年人,这与 Lei 等^[17]、Jin 等^[45]和陈瑜佳等^[46]研究的结果一致,其主要原因在于儿童的生理行为等,如较高等度的手-口行为和较高的呼吸速率. 另外,儿童生理发育不完善,对总金属毒性更加敏感. 随着年龄的增长,单位体重内的呼吸量和摄入量会逐渐降低,因而青年人的非致癌风险低于儿童^[45].

对于致癌风险,全国土壤 Cd 对成年人和老年人的 CR 值的 95% 的分位数分别为 $1.95\text{E}-06$ 和 $1.50\text{E}-06$,超过美国 EPA 规定的限量值 ($1\text{E}-06$),这说明存在潜在的致癌风险;儿童和青年的致癌风险远低于 $1\text{E}-06$,说明无潜在的致癌风险. 从土壤 Cd 对不同人群的累积概率曲线[图 6(b)]可以看出,5.81%、4.49%、2.76% 和 1.29% 的成年人、老年人、青年和儿童超过 $1\text{E}-06$,存在

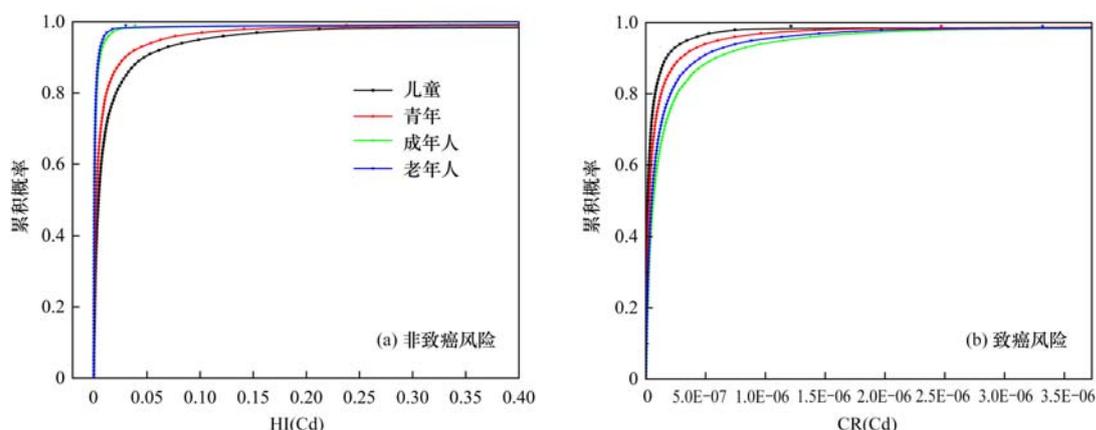


图 6 土壤 Cd 对不同人群的非致癌风险和致癌风险的累积概率曲线

Fig. 6 Cumulative probability curves of non-carcinogenic risk and carcinogenic risk of soil Cd for different population groups

潜在的致癌风险. 与非致癌风险不同的是, 土壤 Cd 对成年人的致癌风险最大, 其次是老年人、青年人和儿童, 这与前人研究的结果并不一致^[26,37], 其主要原因在于成年人对污染物的暴露时间相对儿童来说更长.

从不同区域 Cd 暴露风险来看(表 5), 不管是致癌风险还是非致癌风险, 不同区域土壤 Cd 健康风险大小均表现为: 西南 > 东北 > 华中 > 西北 > 华南 > 华北 > 华东. 我国西南地区, 特别是云南和贵

州等地, 采选冶发达且历史悠久, 土壤 Cd 的健康风险相对较高; 东北地区主要与冶炼加工和重工业生产有关; 华中地区的湖南和湖北均有较高的 Cd 暴露风险, 与当地矿业生产活动密切相关. Cd 为在环境中不可被生物降解的持久性的污染物, 且其生物有效性较强, 受土壤 pH 值影响较大, 可通过土壤-作物系统进行进一步地累积和迁移^[47-49], 通过食物链进入人体, 累积到一定程度, 对人体健康产生威胁.

表 5 基于蒙特卡洛模拟的土壤 Cd 对不同人群的健康风险评价结果

Table 5 Probabilistic health risk for different population groups based on Monte Carlo simulation

项目	位置	分位数 25%				分位数 50%				分位数 95%			
		儿童	青年	成年人	老年人	儿童	青年	成年人	老年人	儿童	青年	成年人	老年人
HQ	东北	1.49E-03	8.85E-03	3.26E-04	3.30E-04	2.96E-03	1.76E-03	6.48E-04	6.55E-04	1.18E-01	7.01E-02	2.58E-02	2.61E-02
	华北	1.66E-03	9.83E-04	3.62E-04	3.66E-04	2.37E-03	1.40E-03	5.17E-04	5.23E-04	2.21E-02	1.31E-02	4.83E-03	4.89E-03
	华东	1.89E-03	1.12E-03	4.14E-04	4.18E-04	2.48E-03	1.48E-03	5.43E-04	5.49E-04	1.54E-02	9.13E-03	3.36E-03	3.40E-03
	华南	2.13E-03	1.26E-03	4.65E-04	4.71E-04	7.33E-03	4.36E-03	1.60E-03	1.62E-03	8.62E-02	5.12E-02	1.88E-02	1.91E-02
	华中	5.08E-03	3.02E-03	1.11E-03	1.12E-03	1.04E-02	6.18E-03	2.27E-03	2.30E-03	1.13E-01	6.71E-02	2.47E-02	2.50E-02
	西北	2.84E-03	1.69E-03	6.20E-04	6.28E-04	5.68E-03	3.37E-03	1.24E-03	1.26E-03	1.09E-01	6.48E-02	2.39E-02	2.41E-02
	西南	4.05E-03	2.41E-03	8.85E-04	8.96E-04	7.86E-03	4.67E-03	1.72E-03	1.74E-03	1.80E-01	1.07E-01	3.93E-02	3.98E-02
	全国	2.12E-03	1.26E-03	4.63E-04	4.68E-04	3.83E-03	2.27E-03	8.36E-04	8.46E-04	8.53E-02	5.06E-02	1.86E-02	1.89E-02
CR	东北	6.36E-09	9.68E-09	3.41E-08	2.62E-08	1.26E-08	1.92E-08	6.78E-08	5.22E-08	5.04E-07	7.66E-07	2.70E-06	2.08E-06
	华北	1.63E-08	2.48E-08	8.75E-08	6.72E-08	1.63E-08	2.48E-08	8.75E-08	6.72E-08	1.63E-08	2.48E-08	8.75E-08	6.72E-08
	华东	8.08E-09	1.23E-08	4.33E-08	3.33E-08	1.06E-08	1.61E-08	5.69E-08	4.37E-08	6.56E-08	9.98E-08	3.52E-07	2.71E-07
	华南	9.09E-09	1.38E-08	4.87E-08	3.75E-08	3.13E-08	4.76E-08	1.68E-07	1.29E-07	3.68E-07	5.6E-07	1.97E-06	1.52E-06
	华中	2.17E-08	3.30E-08	1.16E-07	8.95E-08	4.44E-08	6.76E-08	2.38E-07	1.83E-07	4.82E-07	7.33E-07	2.59E-06	1.99E-06
	西北	1.21E-08	1.84E-08	6.50E-08	5.00E-08	2.42E-08	3.69E-08	1.3E-07	9.99E-08	4.66E-07	7.09E-07	2.50E-06	1.92E-06
	西南	1.73E-08	2.63E-08	9.28E-08	7.13E-08	3.36E-08	5.11E-08	1.8E-07	1.38E-07	7.68E-07	1.17E-06	4.12E-06	3.17E-06
	全国	9.04E-09	1.37E-08	4.85E-08	3.73E-08	1.63E-08	2.48E-08	8.76E-08	6.73E-08	3.64E-07	5.54E-07	1.95E-06	1.50E-06

2.5 不确定性分析

土壤性质的空间异质性导致了较高的 Cd 污染空间变异性. 本研究基于文献调研的数据探讨了 20 多年来我国农田土壤 Cd 污染状况及健康风险水平, 结果不可避免地存在不确定性. 文献中有限的数据和背景信息、采样时间、样点分布和样品分析方法的不统一在一定程度上均给研究结果带来不确定

性. 为了降低风险评价的不确定性, 本研究采用基于 Monte Carlo 的概率风险评价方法, 在考虑模型参数概率分布的基础上, 计算了健康风险的概率. 利用 Monte Carlo 对暴露参数进行了敏感性分析(图 7), 结果显示农田土壤 Cd 含量对不同人群的非致癌风险和致癌风险的敏感性最强, 分别解释了 44.6%~65.4% 的非致癌风险和 58.3%~66.7% 的致癌风险

的不确定性. 人群体重与致癌风险和非致癌风险呈现负相关, 这意味着体重的增长将有助于降低人体健康风险. 相对于儿童和青年, 成年人和老年人的非致癌风险对土壤 Cd 含量更敏感. EF 值对于儿童、青年和成年人的非致癌风险的影响仅次于土壤 Cd

含量, 解释了 0.5%~37.5% 的非致癌风险的不确定性. IngR 对老年人的非致癌风险影响仅次于土壤 Cd 含量, 其解释了 12.9% 的非致癌风险的不确定性. 儿童、青年、成年人和老年人致癌风险对 IngR 值的敏感性仅次于土壤 Cd 含量.

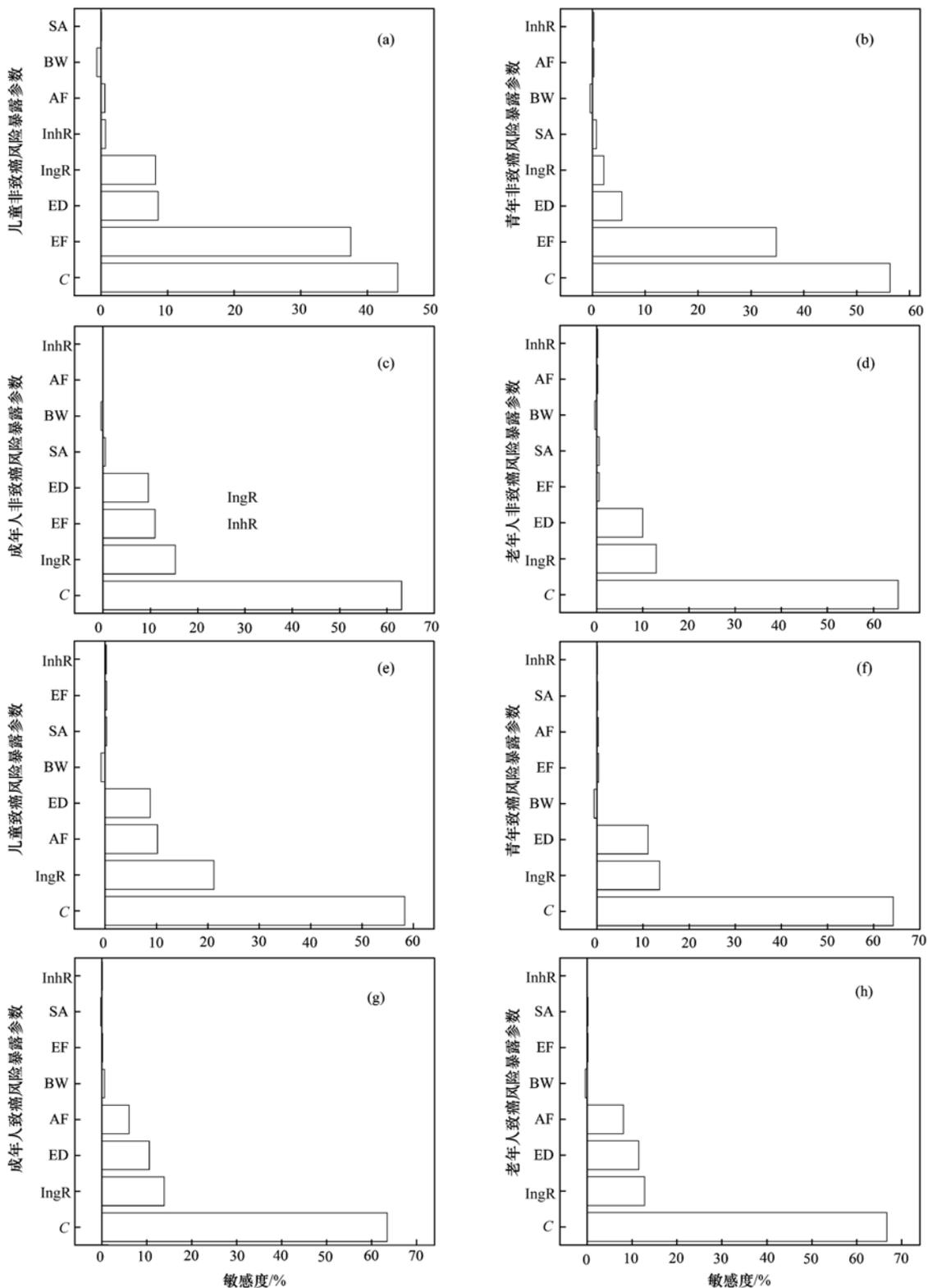


图 7 健康风险评价的敏感性分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of human health risk assessment

但本研究中风险评价结果也存在一定的局限性. 首先在农田土壤重金属健康风险评价中, 食用农产品往往被认为是重要的暴露途径^[49], 但基于文献的土壤-农产品重金属配对数据相对缺乏, 难以对摄食暴露途径的风险进行估算. 其次, 本研究是基于土壤 Cd 含量进行的健康风险, 尚未考虑其生物有效性, 这可能高估了其健康风险. 近年来研究者已经通过建立体外模型测定重金属的生物有效性或可给性^[50], 未来建立基于 Cd 生物有效性和毒性效应的人体健康风险评估模型, 以便更为准确地评估其健康风险. 最后, 目前概率健康风险评价尚未和空间分析方法相结合, 难以从空间角度揭示土壤 Cd 的健康风险概率. 因此, 在未来的健康风险评价中, 还需要进一步考虑通过农产品摄食途径的暴露风险和土壤重金属的生物有效性, 并通过模型耦合加强概率风险的空间分析.

3 结论

通过对已有研究中土壤 Cd 含量数据的搜集和整理, 发现我国农田土壤 $\omega(\text{Cd})$ 几何均值为 $0.473 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其范围为 $0.012 \sim 23.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 从空间分布来看, 土壤 Cd 含量具有较高的空间变异性, 高值区主要分布在西南、华中和华南地区, 低值区主要分布在东北、华北和华东地区; 从时间尺度来看, 我国农田土壤 Cd 含量在时间尺度并无显著性差异. Cd 污染指数和地累积指数较高的省份主要包括: 湖南、广西、云南和广东, 这与以上省份较为发达的金属加工和冶炼业等行业有关. 健康风险评价结果表明: 土壤 Cd 对不同人群的非致癌风险处于安全水平, 但对成年人和老年人存在潜在的致癌风险, 建议加强农田土壤的风险管控.

参考文献:

- [1] Guo G H, Wang Y T, Zhang D G, *et al.* Source-specific ecological and health risks of potentially toxic elements in agricultural soils in southern Yunnan Province and associated uncertainty analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **417**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126144.
- [2] 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 等. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 2104-2114.
Wang H Y, Han L, Xie D N, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in farmland soils around mining areas and pollution assessment[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2104-2114.
- [3] 全国土壤污染状况调查公报正式公布[J]. *中国环境管理*, 2014, **6**(2): 26.
- [4] 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙中典型硫铁矿矿区农田土壤重金属含量特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 442-453.
Cheng X M, Sun B B, Wu C, *et al.* Heavy metal concentration characteristics and health risks of farmland soils in typical pyrite mining area of the central Zhejiang Province, China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 442-453.
- [5] Kebonye N M, Eze P N, John K, *et al.* Self-organizing map artificial neural networks and sequential Gaussian simulation technique for mapping potentially toxic element hotspots in polluted mining soils[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2021, **222**, doi: 10.1016/j.gexplo.2020.106680.
- [6] Thorpe A, Harrison R M. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **400**(1-3): 270-282.
- [7] 秦元礼, 张富贵, 彭敏, 等. 云南省宣威市农耕地土壤重金属元素分布影响因素及生态风险评价[J]. *地质与勘探*, 2022, **58**(2): 360-368.
Qin Y L, Zhang F G, Peng M, *et al.* Influencing factors and ecological risk assessment of soil heavy metals in agricultural areas of Xuanwei City, Yunan Province [J]. *Geology and Exploration*, 2022, **58**(2): 360-368.
- [8] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4779-4790.
Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils and crops in Luancheng, Shijiazhuang City [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4779-4790.
- [9] Watanabe Y, Nogawa K, Nishijo M, *et al.* Relationship between cancer mortality and environmental cadmium exposure in the general Japanese population in cadmium non-polluted areas [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2020, **223**(1): 65-70.
- [10] Wang J, Su J W, Li Z G, *et al.* Source apportionment of heavy metal and their health risks in soil-dustfall-plant system nearby a typical non-ferrous metal mining area of Tongling, Eastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113089.
- [11] 刘玲玲, 安燕飞, 马瑾, 等. 基于 UNMIX 模型的北京城区公园土壤重金属源解析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(12): 2856-2863.
Liu L L, An Y F, Ma J, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in Beijing urban park based on the UNMIX model [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(12): 2856-2863.
- [12] Tao H, Liao X Y, Li Y, *et al.* Quantifying influences of interacting anthropogenic-natural factors on trace element accumulation and pollution risk in karst soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **721**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137770.
- [13] Li C, Sanchez G M, Wu Z F, *et al.* Spatiotemporal patterns and drivers of soil contamination with heavy metals during an intensive urbanization period (1989-2018) in southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114075.
- [14] Sun J X, Zhao M, Cai B Y, *et al.* Risk assessment and driving factors of trace metal (loid) s in soils of China [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **309**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119772.
- [15] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2822-2833.
Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6):

- 2822-2833.
- [16] Alghamdi M A, Hassan S K, Al Sharif M Y, *et al.* On the nature of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with sporting walkways dust: Concentrations, sources and relative health risk[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **781**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146540.
- [17] 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.
- [18] Gope M, Masto R E, Basu A, *et al.* Elucidating the distribution and sources of street dust bound PAHs in Durgapur, India: A probabilistic health risk assessment study by Monte-Carlo simulation[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115669.
- [19] Sun Z H, Xie X D, Wang P, *et al.* Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: A case study from a polymetallic mine in South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **639**: 217-227.
- [20] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [21] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [22] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [23] USEPA (The United States Environmental Protection Agency). Exposure factors handbook (2011 edition)[R]. Washington, DC, 2011.
- [24] USEPA (United States Environmental Protection Agency). Regional Screening Levels (RSLs)-generic tables [R]. Washington, DC, 2018.
- [25] 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 等. 中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 1-10.
Peng C, He Y L, Guo Z H, *et al.* Characteristics and risk assessment of heavy metals in urban soils of major cities in China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 1-10.
- [26] Yang S Y, Zhao J, Chang S X, *et al.* Status assessment and probabilistic health risk modeling of metals accumulation in agriculture soils across China: a synthesis [J]. *Environment International*, 2019, **128**: 165-174.
- [27] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 690-700
- [28] Ren S Y, Song C Q, Ye S J, *et al.* The spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: A meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150322.
- [29] CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). Canadian. Soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Carcinogenic and Other PAHs [R]. Winnipeg, 2010.
- [30] MEF (Ministry of the Environment, Finland). Government decree on the assessment of soil contamination and remediation needs(214/2007)[EB/OL]. <https://www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2007/en20070214.pdf>, 2007-03-01.
- [31] Saby N P A, Thioulouse J, Jolivet C C, *et al.* Multivariate analysis of the spatial patterns of 8 trace elements using the French soil monitoring network data[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(21): 5644-5652.
- [32] Nanos N, Martín J A R. Multiscale analysis of heavy metal contents in soils: spatial variability in the Duero river basin (Spain)[J]. *Geoderma*, 2012, **189-190**: 554-562.
- [33] Takeda A, Kimura K, Yamasaki S I. Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special reference to soil group and agricultural use[J]. *Geoderma*, 2004, **119**(3-4): 291-307.
- [34] Zarcinas B A, Ishak C F, McLaughlin M J, *et al.* Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia. 1. Peninsular malaysia[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, **26**(3): 343-357.
- [35] Zarcinas B A, Pongsakul P, McLaughlin M J, *et al.* Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia. 2. Thailand [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, **26**(4): 359-371.
- [36] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
Li C F, Wang F, Cao W T, *et al.* Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- [37] Hu B F, Shao S, Ni H, *et al.* Assessment of potentially toxic element pollution in soils and related health risks in 271 cities across China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **270**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116196.
- [38] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [39] 王永强, 李诗殷, 蔡信德. 中国农田污水灌溉研究进展[J]. *天津农业科学*, 2010, **16**(4): 77-80.
Wang Y Q, Li S Y, Cai X D. Advance of research on sewage irrigation in farmland in China [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2010, **16**(4): 77-80.
- [40] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 900-908.
Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils surrounding a typical industrial area of Henan Province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 900-908.
- [41] 赵红安, 臧亮, 张贵军, 等. 县域尺度土壤重金属污染特征及源解析——以赵县为例[J]. *土壤通报*, 2018, **49**(3): 710-719.
Zhao H A, Zang L, Zhang G J, *et al.* Soil heavy metal pollution characteristics and source apportionment at county scale-take Zhaoxian county as an example [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49**(3): 710-719.
- [42] Wen Y B, Li W, Yang Z F, *et al.* Evaluation of various approaches to predict cadmium bioavailability to rice grown in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113645.
- [43] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. *Microchemical Journal*, 2010, **94**(3): 99-107.
- [44] Shi T R, Zhang Y Y, Gong Y W, *et al.* Status of cadmium accumulation in agricultural soils across China (1975-2016): from temporal and spatial variations to risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2019, **230**: 136-143.
- [45] Jin Z, Lv J S. Evaluating source-oriented human health risk of potentially toxic elements: A new exploration of multiple age

- groups division[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **787**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147502.
- [46] 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 等. 香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5728-5741.
Chen Y J, Qu X C, Zhang B, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of Xianghe county[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5728-5741.
- [47] 崔云霞, 曹炜琦, 李伟迪, 等. 长三角农业活动区农田土壤重金属风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(7): 1441-1450.
Cui Y X, Cao W Q, Li W D, *et al.* Risk assessment of heavy metals in farmland soils in an agricultural region in the Yangtze River Delta[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(7): 1441-1450.
- [48] 石雨佳, 方林发, 方标, 等. 三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1611-1619.
Shi Y J, Fang L F, Fang B, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in vegetable field in the Three Gorges Reservoir area (Chongqing Section) [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1611-1619.
- [49] 刘鹏祺, 徐东昊, 李亚琳, 等. 基于多评估方法的县域镉污染风险管控研究[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41**(7): 1424-1432.
Liu P Q, Xu D H, Li Y L, *et al.* Risk management of cadmium pollution at the county level based on multiple evaluation methods [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(7): 1424-1432.
- [50] 马骄阳, 保欣晨, 王坤, 等. 土壤镉污染的人体健康风险评估研究: 生物有效性与毒性效应[J]. *生态毒理学报*, 2021, **16**(6): 120-132.
Ma J Y, Bao X C, Wang K, *et al.* Human health risk assessment of cadmium in soils: role of bioavailability and toxic effects[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, **16**(6): 120-132.



CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatio-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waiqinhuai River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulfurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-yue, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)