

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

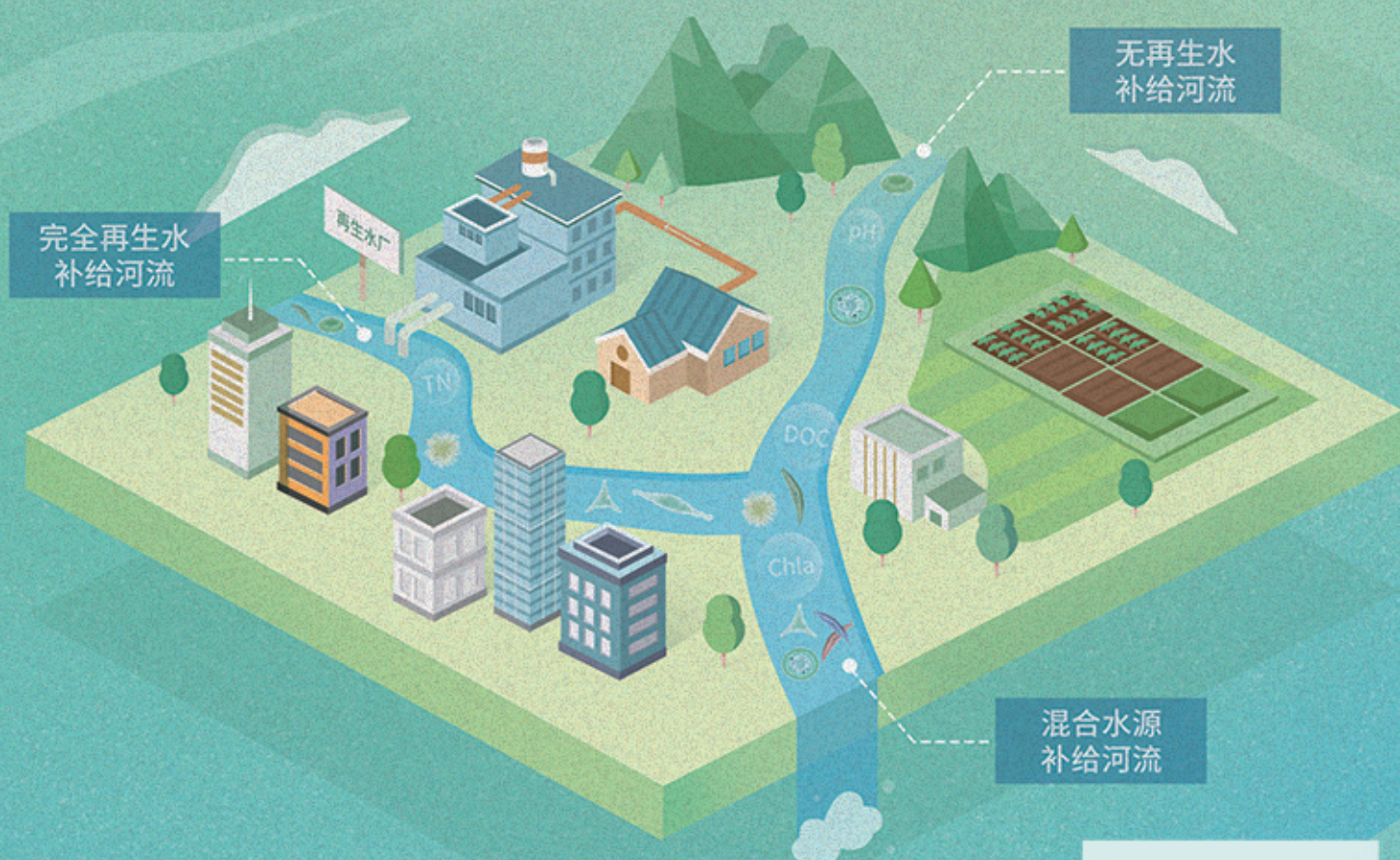
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜豪, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评价

陈瑜佳¹, 屈星辰², 张斌³, 李现涛³, 朱国平³, 查同刚^{1,4,5,6*}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 甘肃矿业开发研究院, 兰州 730000; 3. 北京中气京诚环境科技有限公司, 北京 100085; 4. 北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 5. 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083; 6. 北京林业大学北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要:为系统研究河北省香河县农用地土壤重金属污染状况,网格法采集了288个点位的表层(0~20 cm)土壤样品,分析土壤样品中Cd、Cr、Hg、Ni、Pb、As、Cu和Zn这8种土壤重金属的分布特征,并采用单因子指数、内梅罗综合污染指数、地累积指数、潜在生态风险指数和人体健康风险指数评估其污染状况、生态风险和健康风险。结果表明:①香河县土壤重金属含量均低于筛选值,但存在较强的空间变异;富集因子分析表明有20.74%的Hg和0.33%的Cd呈显著污染,68.56%的Hg和20.40%的Cd呈中污染,其余重金属处于无~弱污染水平。②内梅罗综合污染指数超标率为8.68%,主要以点状分布在香河县西部与中部。③地累积指数评价表明土壤Cd、Pb和Zn污染相对严重,Hg污染最严重,达到中度污染及以上的点位占比为46.50%。④潜在生态风险指数表明土壤以中等和强潜在生态风险为主,占比分别为46.15%和37.46%,有1.34%点位达到极强潜在生态风险等级,达到中等及以上潜在风险程度的重金属为Cd和Hg。⑤土壤重金属健康风险较低,经任何暴露途径产生的非致癌风险大体均可以接受。相对而言,土壤Cr、As和Pb是各乡镇非致癌风险最大的3个贡献因子,土壤As是各乡镇主要的致癌风险因子。土壤重金属对儿童引起的健康风险高于成人,食物摄取为主要暴露途径。建议香河县针对各乡镇产业布局 and 土壤重金属含量、生态和健康风险差异,采取对应措施加强防控。

关键词:土壤重金属污染;生态风险评价;健康风险评价;香河县;农田土壤

中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2022)12-5728-14 DOI: 10.13227/j.hjks.202202122

Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County

CHEN Yu-jia¹, QU Xing-chen², ZHANG Bin³, LI Xian-tao³, ZHU Guo-ping³, ZHA Tong-gang^{1,4,5,6*}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Gansu Mining Development Research Institute, Lanzhou 730000, China; 3. Beijing Zhongqi Jingcheng Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China; 4. Jixian County National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 5. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 6. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to systematically study the soil heavy metal pollution of agricultural land in Xianghe County, Hebei province, 288 surface (0-20 cm) soil samples were collected using the grid method. The distribution characteristics of Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, As, Cu, and Zn in soil samples were analyzed, and the single factor index, Newerow comprehensive pollution index, geo-accumulation index, potential ecological risk index, and human health risk index were used to evaluate their pollution status, ecological risk, and health risk. The results showed that: ① the contents of heavy metals in Xianghe County soil were all lower than the screening values, but there was a strong spatial variation. Enrichment factor analysis showed that 20.74% of Hg and 0.33% of Cd were significantly polluted, 68.56% of Hg and 20.40% of Cd were moderately polluted, and the other heavy metals were at the level of no or weak pollution. ② The over-standard rate of the Newerow comprehensive pollution index was 8.68%, which was mainly distributed in the western and central parts of Xianghe County. ③ The geo-accumulation index evaluation showed that the soil Cd, Pb, and Zn pollution was relatively serious, Hg pollution was the most serious, and the sites with moderate pollution and above accounted for 46.50%. ④ According to the potential ecological risk index, the soil was dominated by medium and strong potential ecological risk, accounting for 46.15% and 37.46%, respectively, with 1.34% of the heavy metals reaching the level of extremely strong potential ecological risk. The heavy metals that reached the level of medium and above were Cd and Hg. ⑤ The health risks of soil heavy metals were low, and the non-carcinogenic risks from any exposure route were generally acceptable. Soil Cr, As, and Pb were the three biggest contributing factors to the non-carcinogenic risk in each township, and As in the soil was the main carcinogenic risk factor in each township. The health risk caused by heavy metals in soil was higher for children than for adults, and exposure through food intake was the main exposure route. This suggested that Xianghe County should take corresponding measures to strengthen prevention and control according to the differences in industrial distribution, soil heavy metal content, and ecological and health risks among townships and towns.

Key words: soil heavy metal pollution; ecological risk assessment; health risk assessment; Xianghe County; farmland soil

重金属污染因其持久性、毒性和对区域景观影响的不可逆性^[1~3],可导致土壤退化,进而直接或间接威胁人类健康,因而引起广泛的关注^[4]。受污染土壤不但肥力下降导致农作物产量下降,而且还会导致植物重金属富集,甚至通过食物链威胁人类健康^[5]。人类的生存离不开食物,农田作为粮食蔬菜

生产的载体^[6],一旦受到污染将产生难以估量的后果。我国政府一直高度重视农田土壤环境保护工作,

收稿日期: 2022-02-17; 修订日期: 2022-04-11

基金项目: 国家林业局林业科技成果推广计划项目([2019]03)

作者简介: 陈瑜佳(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染修复与风险评价, E-mail: cyj2038853_20@bjfu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhtg73@bjfu.edu.cn

近期编制完成了相关指南^[7], 农田土壤重金属污染已成为科研、生产和人民生活密切相关的热点问题^[6]. 目前研究集中于全国、区域或流域等较大尺度^[8-10], 或集中于矿区等集中污染源周边的耕地等^[1, 11, 12], 对县域等基层行政区域农田土壤重金属污染研究相对较少, 不利于基层污染防治工作实践. 在内容上主要聚焦于重金属含量、赋存形态、来源解析和生物可给性等方面^[12-14], 针对农田土壤污染的生态风险和健康风险评估方面有待加强^[15].

香河县属于河北省廊坊市, 是环京津雄生态屏障的组成部分. 香河县作为环首都圈的卫星城, 并兼具一定农业与工业价值, 作为我国北方主要的家具生产销售集散中心, 区域周边农田具有较高的重金属富集风险. 开展香河全域农田土壤重金属污染调查评价, 弄清土壤重金属污染状况, 评估其生态与健康风险, 以期为该区域土地利用发展规划、农业生产发展和人民健康生活提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

香河县位于河北省中部以东 ($39^{\circ}37' \sim 39^{\circ}51' N$, $116^{\circ}51' \sim 117^{\circ}12' E$), 属于单一地形的平原区, 地势西北高, 东南低, 总面积 458 km^2 , 总人口 35 万人. 属大陆性季风气候, 年平均气温为 $11.2^{\circ}C$, 多年平均降水量约为 600 mm , 年降水量集中在 6~8 月, 年际变化较大. 土壤类型主要有褐土、潮土和风沙土, 其中褐土主要在北部, 潮土主要在南部, 风沙土沿河岸分布. 该县农作物以小麦 (*Triticum aestivum* L.)、玉米 (*Zea mays* L.) 和棉花 (*Gossypium hirsutum* Linn.) 为主, 同时有少量红薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.].

农用地分布在淑阳镇、安平镇西南以外的区域. 农用地以水浇地为主, 面积约 245.90 km^2 , 占总用地面积的 55%; 旱地面积 28.56 km^2 , 占总用地面积的 6%. 根据香河县自然资源和规划局的土地规划, 香河县部分土地存在未来用地规划, 其所在区域的土壤重金属污染特征、治理方式可能会受相应的用地类型影响.

1.2 样品采集及处理

在农用地范围内, 基于遥感影像和土地利用图图斑, 按 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 进行网格法布点. 实地调查采样时, 没有农田的网格不进行调查, 同时根据耕作历史、周边家具厂分布等实际情况优化点位位置、增减点位数量, 最终确定了 288 个采样点位 (图 1). 在每个采样点位, 按“S”形等间距布设 10 个点, 用木制工具采取表层 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 土样混合为一个样品,

同时进行现场记录. 采取的土壤样品风干去杂后, 分别处理成 $<2 \text{ mm}$ 样品供测定土壤 pH, $<0.15 \text{ mm}$ 样品供测定土壤重金属含量^[12].

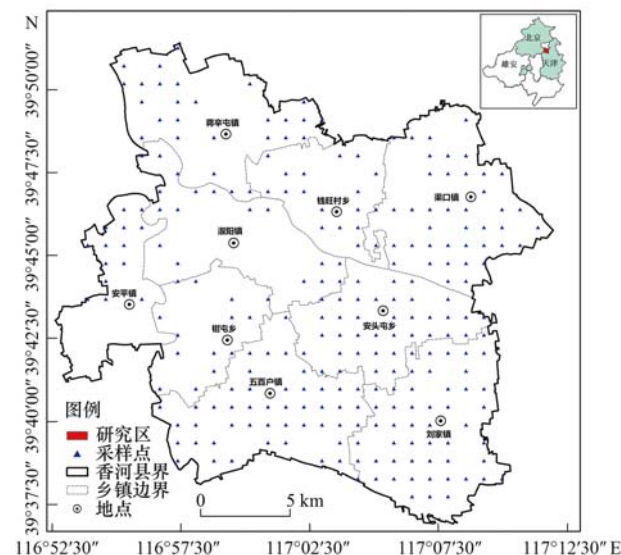


图 1 香河县农用地采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points for agricultural land in Xianghe County

1.3 样品测试与质量控制

土壤 pH 值用电位法测定^[16]. 土壤 Cd、Pb、Ni、Cr、Cu 和 Zn 采用四酸法 (HCl 、 HF 、 HNO_3 和 $HClO_4$) 消煮后, 用原子吸收分光光度计 (GTA 120, 美国安捷伦) 测定^[17]; 土壤 As、Hg 采用王水提取法消解, 原子荧光光度计 (AFS-8220, 北京吉天) 测定^[17]. 为控制测试质量, 采用了国家标准参比物质 (GBW 系列) GSS-1 和 GSS-5 和重复样进行质量控制, 重复性样品检验总体合格率为 99.7%, 标准土样回收率 $88\% \sim 94\%$, 分析结果符合文献^[18]的标准要求. 土壤中 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的检出限分别为 0.01 、 0.005 、 0.5 、 2.0 、 0.40 、 0.15 、 0.50 和 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均满足文献^[19]的相关要求.

1.4 评价方法

1.4.1 富集因子法

富集因子 (EF) 是分析和判断人为源与自然源对颗粒物中元素含量的贡献水平, 定量评价污染程度与污染来源的重要指标^[20, 21], 计算公式如下^[22]:

$$EF = (C_i/C_{ref})_{\text{土壤}} / (C_i/C_{ref})_{\text{地壳}}$$

式中, EF 为富集指数; C_i 为土壤重金属元素 i 的含量; C_{ref} 为参考元素含量. 由于人类活动对源于地壳的 Sc 含量产生影响较小^[21], 本研究选择 Sc 为参考元素, Sc 实测值取河北省土壤重金属 Sc 背景值^[23]. 参照相关研究, 地壳中 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 和 Sc 的丰度分别为 0.2 、 0.08 、

1.8、13、100、55、75、70 和 22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [24,25]。Sutherland [26] 将富集因子 EF 分为 5 个级别, EF < 2 为无~弱污染; $2 \leq \text{EF} < 5$ 为中污染; $5 \leq \text{EF} < 20$ 为显著污染; $20 \leq \text{EF} < 40$ 为高度污染; $\text{EF} \geq 40$ 为极度污染。

1.4.2 单因子污染指数法

土壤中某一重金属元素污染评价采用单因子污染指数法,其计算公式如下 [27]:

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

式中, P_i 为土壤重金属元素 i 的环境质量指数; C_i 为重金属元素 i 的实测值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为重金属 i 的评价标准 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 选用农用地土壤污染风险筛选值 [28]。根据文献 [29] 中给出的等级划分标准, 可划分为: $P_i \leq 1$ 表示清洁, $1 < P_i \leq 2$ 表示轻微污染, $2 < P_i \leq 3$ 表示轻度污染, $3 < P_i \leq 5$ 表示中度污染, $P_i > 5$ 表示重度污染。

1.4.3 内梅罗综合污染指数法

综合考虑各重金属元素的土壤综合污染评价采用内梅罗 (Newerow) 综合污染指数法。该方法可全面反映土壤中各污染物的平均污染水平, 能突出污染最严重的污染物给环境造成的危害, 其计算公式如下 [30]:

$$P_N = \sqrt{(P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2) / 2} \quad (2)$$

式中, P_N 为综合考虑所有评价重金属元素的第 n 个采样点综合环境质量指数; P_{max} 为第 n 个采样点中所有评价重金属元素单因子污染指数的最大值; P_{ave} 为第 n 个采样点中所有评价重金属元素单因子污染指数的平均值。

根据内梅罗综合污染指数法可将土壤重金属污染划分为 5 个等级 [27,30,31]。I: 安全级, $P_N \leq 0.7$; II: 警戒级, $0.7 < P_N \leq 1.0$; III: 轻度污染级, $1.0 < P_N \leq 2.0$; IV: 中度污染级, $2.0 < P_N \leq 3.0$; V: 重度污染级, $P_N > 3.0$ 。

1.4.4 地累积指数法

地累积指数 (I_{geo}) 通常称为 Müller 指数, 是区分人为活动影响的重要参数, 计算公式如下 [32]:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i \times (k \times \text{BE}_i)^{-1}] \quad (3)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为重金属 i 实测含量值; k 为修正系数 (通常取 1.5); BE_i 为重金属 i 的土壤背景值, 本研究以河北省土壤重金属背景值为参考。根据地累积指数 I_{geo} 将污染等级分为 7 级 [33], 其中, 0~6 级依次为: $I_{\text{geo}} < 0$, 无污染; $0 \leq I_{\text{geo}} < 1$, 无污染到中度污染; $1 \leq I_{\text{geo}} < 2$, 中度污染; $2 \leq I_{\text{geo}} < 3$, 中度污染到强污染; $3 \leq I_{\text{geo}} < 4$, 强污染; $4 \leq I_{\text{geo}} < 5$, 强污染到极强度污染; $I_{\text{geo}} \geq 5$, 极

强污染。

1.4.5 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数由瑞典学者 Hakanson 提出的基于重金属的理化性质以及环境的相互作用的方法 [34], 采用具有可比的等价属性指数分级法进行评价 [35,36]。其计算公式如下 [36,37]:

$$R_i = \sum E_r^i \quad (4)$$

$$E_r^i = T_r^i \times P_i \quad (5)$$

式中, E_r^i 为重金属元素 i 的单因子潜在生态风险指数, $E_r^i < 40$ 为轻微潜在生态风险, $40 \leq E_r^i < 80$ 为中等潜在生态风险, $80 \leq E_r^i < 160$ 为强潜在生态风险, $160 \leq E_r^i < 320$ 为很强潜在生态风险, $E_r^i \geq 320$ 为极强潜在生态风险; P_i 为土壤重金属元素 i 的环境质量指数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数, 目前学者们一般直接用毒性系数代替毒性响应系数 [36,38], 重金属毒性系数分别为 Cd = 30, Cr = 2, Hg = 40, Ni = 5, Pb = 5, As = 10, Cu = 5, Zn = 1 [39]; 由于本研究中的重金属种类与 Hakanson [34] 的研究有所不同, 根据重金属种类及其毒性系数对各生态风险程度所对应的 R_i 限值进行适当调整 [40], 调整后的评价标准为: $R_i < 110$ 为轻微潜在生态风险, $110 \leq R_i < 220$ 为中等潜在生态风险, $220 \leq R_i < 440$ 为强潜在生态风险, $R_i \geq 440$ 为极强潜在生态风险。

1.4.6 健康风险评价

采用美国环保署 (U. S. EPA) 推荐的危害商 (HQ) 表示重金属的健康风险 [41], 计算公式如下:

$$\text{CR}_i = \text{EDI}_i \times \text{SF}_i \quad (6)$$

$$\text{HQ}_i = \text{EDI}_i \times (\text{RfD}_i)^{-1} \quad (7)$$

式中, CR_i 表示重金属 i 的致癌风险系数; EDI_i 为重金属 i 的长期日平均暴露剂量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$]; SF_i 为重金属 i 的致癌风险斜率 [$\text{g} \cdot \text{d} \cdot \mu\text{g}^{-1}$]; HQ_i 表示重金属 i 的非致癌风险系数; RfD_i 为重金属 i 经各种途径的参考剂量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$], 其中, 土壤重金属污染主要通过食物链摄取、皮肤直接接触和口鼻吸入这 3 种途径影响人体健康。3 种暴露模型参数取值见表 1。重金属不同暴露途径下的 SF_i 和 RfD_i 取值见表 2。

1.5 数据分析与制图

土壤重金属的平均值、最大值、最小值和标准差等描述性统计分析采用 SPSS 软件计算。基于以上统计特征, 以及土壤污染不能随意舍去异常值, 选择能够考虑到异常值的反距离权重 (IDW) 法在 ArcGIS 10.2 中进行插值 (数据符合正态分布)。变异系数 (CV) = 标准差/平均值。

表 1 健康风险评价暴露参数
Table 1 Exposure parameter values of health risk assessment

暴露评价参数	含义	参考值		文献
		成人	儿童	
CS	表层土壤重金属元素含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	实测	实测	
IR _{ora}	土壤日平均摄入量/ $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	100	200	[42]
CF	转换系数/ $\text{g}\cdot\mu\text{g}^{-1}$	10^{-6}	10^{-6}	[42]
EF	暴露频率/ $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	365	365	[42]
ED	暴露年限/ $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	24	6	[43]
AT	平均暴露时间/d	24 × 365 (非致癌), 70 × 365 (致癌) 6 × 365 (非致癌), 70 × 365 (致癌)		[43]
BW	平均体重/kg	53.1	15	[44]
SA	皮肤暴露面积/ cm^2	4 350	1 600	[44]
AF	皮肤黏附系数/ $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	0.2	0.2	[44]
PEF	颗粒排放因子/ $\text{m}^3\cdot\text{kg}$	1.6×10^9	1.6×10^9	[44]
IR _{inh}	土壤日平均吸入量/ $\text{mg}^3\cdot\text{d}^{-1}$	15	7.5	[44]
ABS	皮肤吸收因子/无量纲	0.001	0.001	[43]

表 2 不同暴露途径下的 SF_i 与 RFD_i^[44]
Table 2 SF_i and RFD_i of different exposure pathways

重金属	SF _i / $\text{g}\cdot\text{d}\cdot\mu\text{g}^{-1}$			Rfd _i / $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$		
	食用	呼吸	接触	食用	呼吸	接触
Cd	6.10	1.80×10^{-3}	6.10	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-5}
Cr	ND	42.00	ND ¹⁾	3.00×10^{-3}	2.86×10^{-5}	6.00×10^{-5}
Hg	ND	ND	ND	3.00×10^{-4}	3.00×10^{-4}	2.40×10^{-5}
Ni	ND	8.40×10^{-1}	ND	2.00×10^{-2}	2.06×10^{-2}	5.40×10^{-3}
Pb	ND	ND	ND	3.50×10^{-3}	3.52×10^{-3}	5.25×10^{-4}
As	1.50	4.30×10^{-3}	1.50	3.00×10^{-4}	1.23×10^{-4}	3.00×10^{-4}
Cu	ND	ND	ND	4.20×10^{-2}	4.02×10^{-2}	1.20×10^{-2}
Zn	ND	ND	ND	3.00×10^{-1}	3.00×10^{-1}	6.00×10^{-2}

1) “ND”表示没有数据

2 结果与分析

2.1 土壤重金属空间分布

2.1.1 土壤重金属含量

香河县土壤中重金属含量统计结果见表 3。香河县农用地土壤 pH 值范围介于 7.25 ~ 9.42 之间,属于中性到碱性土。土壤中不同重金属含量差异较大,与河北省土壤环境背景值相比,研究区农用地土壤中 8 种重金属含量超过背景值样本占比为:Zn (94.98%) > Hg (93.65%) > Pb (86.96%) > Cd (78.60%) > Cu (60.54%) > Cr (20.74%) > Ni

(18.73%) > As (1.34%)。表明香河县土壤受到 8 种重金属不同程度的累积,尤其土壤 Zn 和 Hg 累积较为严重,除安头屯乡一个取样点的 Cu 和 Zn 的含量高于土壤污染风险筛选值,其余取样点的 8 种重金属均低于农用地土壤污染风险筛选值中上述 8 种重金属含量^[28]。

变异系数是表征样品变异程度的重要尺度,能在一定程度上反映样品受人为影响的程度^[45],变异系数 CV < 0.10 为弱变异,0.10 ≤ CV < 0.30 为中等变异,CV ≥ 0.30 为强变异。由表 3 可知,8 种重金属变异程度为:Hg > Zn > As > Cu > Cd > Ni > Cr > Pb,

表 3 土壤重金属含量的描述统计
Table 3 Descriptive statistics of soil heavy metals

重金属	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 /%	河北省背景值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	农用地土壤污染风险筛选值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Cd	0.14	0.48	0.02	0.06	0.43	0.09	0.6
Cr	55.03	218.00	22.00	16.78	0.30	63	250
Hg	0.07	0.21	0.01	0.04	0.57	0.02	3.4
Ni	24.52	94.00	7.00	7.97	0.33	30	190
Pb	28.79	79.00	8.00	7.79	0.27	20	170
As	4.88	13.90	0.72	2.38	0.49	11	25
Cu	24.65	156.00	5.00	10.98	0.45	21	100
Zn	87.83	800.00	42.20	47.15	0.54	60	300

除 Cr 和 Pb 为中等变异外,其余重金属均为强变异,初步认为,香河县农田土壤中 Hg、Zn、As、Cu、Cd 和 Ni 受外界干扰比较显著,空间变异较大,可能是工业、交通和化肥施用等人为活动影响所致.而土壤 Cr 和 Pb 变异系数相对较小,说明 Cr 和 Pb 空间变异相对不显著.

研究区土壤重金属污染程度为: $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Zn > Ni > Cr$ (图 2). 样本中 Cr、Ni、Pb、As、Cu 和 Zn 均处于无~弱污染状态, Cd 和 Hg 达到显著污染水平, Cd 有 0.33% 为显著污染状态, 20.40% 处于中度污染程度; 样本中 Hg 有 20.74% 处于显著污染状态, 68.56% 处于中度污染程度.

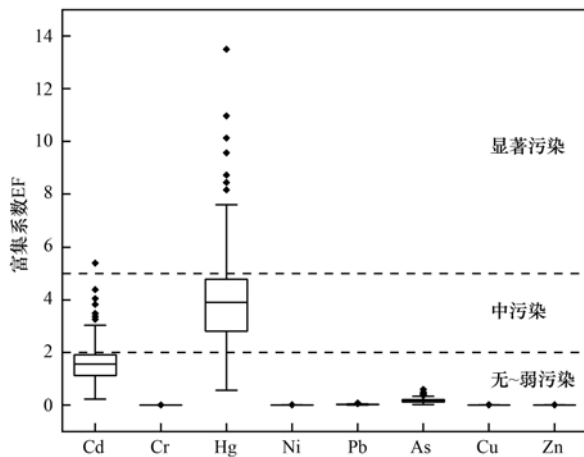


图2 土壤重金属富集因子

Fig. 2 Enrichment factors of soil heavy metals

2.1.2 土壤重金属空间分布特征

各类重金属空间分异格局大致可以分成两种情形(图3). Cd、Hg、Pb 和 As 通常有几个集中分布的含量较高区域,与大小不一的含量分布区域呈镶嵌分布. Cd 含量较高区域主要分布在县域东北部、西部和南部,近似带状分布,主要集中在安平镇大部、安头屯乡南部和五百户镇南部等区域,中北部为含量较低区域; Hg 含量较高区域主要分布在香河县中部,南部为含量较低区域; Pb 含量较高区域主要分布在香河县东北部和中部,包括刘家镇南部、安头屯乡大部和渠口镇大部等区域,西北部为含量较低区域; As 含量较高区域主要分布在香河县北部,包括渠口镇大部、钱旺村乡大部、淑阳镇大部和蒋辛屯镇大部,同时以点状分布在五百户镇东北部、钳屯乡东南部等区域,南部为含量较低区域.

Cr、Ni、Cu 和 Zn 属于另外一种空间分布格局,整体特征为全区域均处于一个含量相对较低的水平,含量较高的分布区域以点状分布. Cr 含量较高区域主要分布在香河县中部偏东,基本集中在安头屯乡中南部,少量分布在刘家镇东北部、渠口镇西北部和钳屯乡中部,其他区域含量较低; Ni 含量较

高区域主要分布在香河县中部偏东,仅集中在安头屯乡中部,南部为含量较低区域; Cu 含量较高区域主要分布在香河县中部偏东,集中在安头屯乡南部及东部、渠口镇东南部,少量分布在蒋辛屯镇,西南部为含量较低区域; Zn 含量较高区域主要分布在香河县东北部和中部偏东,基本集中在安头屯乡中南部与东部、渠口镇东部、淑阳镇西北部等区域,少量分布在钳屯乡西部、五百户镇西南部、刘家镇东部,西南部为含量较低区域.

2.2 土壤重金属生态风险评价

2.2.1 土壤综合污染指数评价

利用内梅罗污染指数法对香河县土壤重金属污染做生态风险评估. 首先计算出单项污染指数值,再通过计算内梅罗综合污染指数,对研究区农田表层土壤污染风险进行评价,确定主要的重金属污染物及其危害程度. 以农用地土壤污染风险筛选值作为评价标准,除 Cu 和 Zn,其余重金属均无单因子污染指数评价值大于 1 的样品(图4), Cu 和 Zn 土壤重金属元素超标率均仅为 0.35%,说明重金属元素污染程度整体相对安全.

单因子污染指数评价结果能说明研究区 288 个采样点 8 种重金属元素的污染程度,而要明确 288 个采样点各自的污染程度,则需通过内梅罗综合污染指数进行评价(图5). 香河县农田表层土壤采样点的内梅罗综合污染指数超标率为 8.68%,主要以点状分布在香河县西部与中部,对应安平镇东部、五百户镇东部与安头屯乡南部的采样点.

结合重金属含量空间分布分析,安平镇的主要污染重金属为 Cd 和 Hg,五百户镇的主要污染重金属为 Cd 和 Zn,淑阳镇的主要污染重金属为 Hg 和 Cd,钳屯镇北部的主要污染重金属为 Hg 和 Cd,钱旺村乡东部的主要污染重金属为 Hg、Cd 和 As,渠口镇南部的主要污染重金属为 Cd、Pb 和 As,安头屯乡受到全部 8 种重金属污染.

2.2.2 土壤地累积指数评价

以河北省土壤重金属背景值,计算 8 种重金属元素的地累积指数(表4). 8 种重金属超标率为: $Hg (70.6\%) > Cd (46.8\%) > Pb (37.4\%) > Zn (30\%) > Cu (15.4\%) > Cr (0.7\%) > Ni (0.3\%) > As (0\%)$,其中, Hg 元素污染最严重,达到中度污染及以上的采样单元占总数的 46.50%.

如图6所示, As、Cr、Ni、Cu 地累积指数绝大部分小于 0,说明这 4 种重金属在一段时间内无新污染源加入; Cd、Pb 和 Zn 有一定区域处于无污染到中度污染,说明在地质累积过程中出现了接近中度污染程度的重金属污染;而 Hg 有较大区域处于

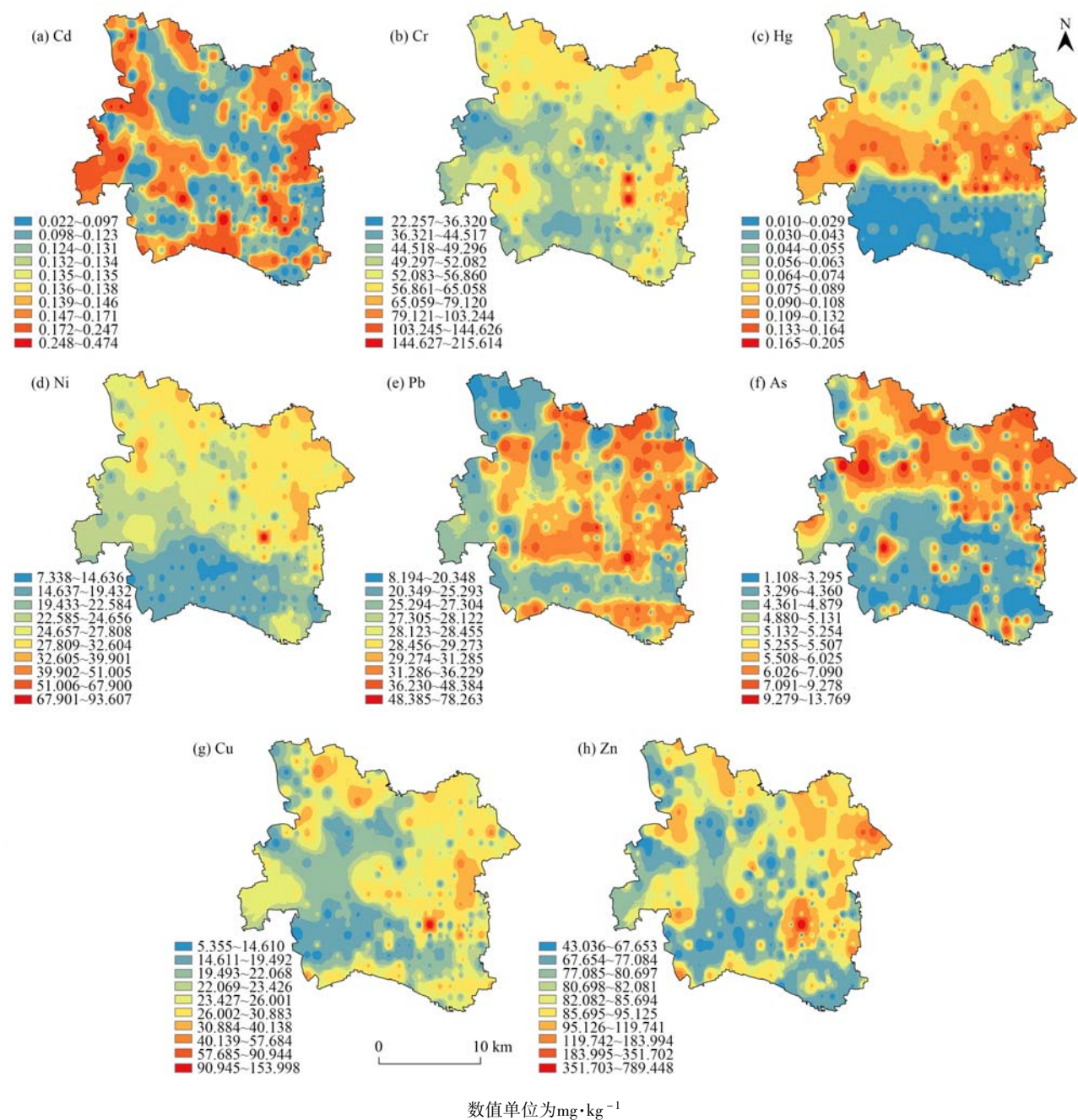


图3 土壤重金属空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil heavy metals

表4 土壤重金属地累积指数(I_{geo})评价结果

指标	范围	平均值	污染程度/%						
			无污染	无污染 ~ 中度污染	中度污染	中度污染 ~ 强污染	强污染	强污染 ~ 极强度污染	极强度污染
Cd	-2.75 ~ 1.83	-0.09	53.2	43.1	3.7	0	0	0	0
Cr	-2.10 ~ 1.21	-0.83	99.3	0	0.7	0	0	0	0
Hg	-1.59 ~ 2.78	0.82	29.4	24.1	29.8	16.7	0	0	0
Ni	-2.68 ~ 1.06	-0.95	99.7	0	0.3	0	0	0	0
Pb	-1.91 ~ 1.40	-0.11	62.6	37.1	0.3	0	0	0	0
As	-4.52 ~ -0.25	-1.94	100	0	0	0	0	0	0
Cu	-2.66 ~ 2.31	-0.45	84.6	15.1	0.3	0	0	0	0
Zn	-1.09 ~ 3.15	-0.11	70	28.4	0.3	1.3	0	0	0

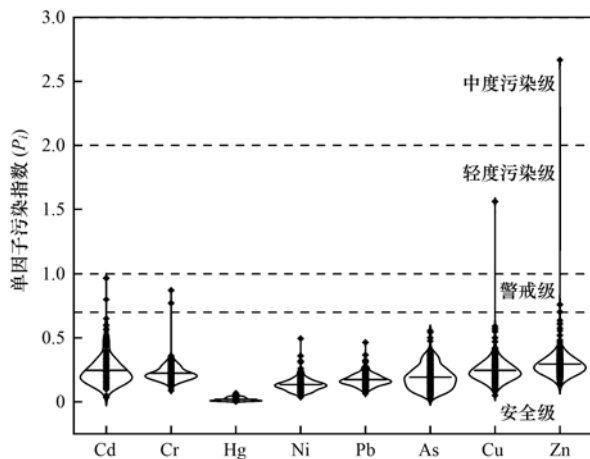
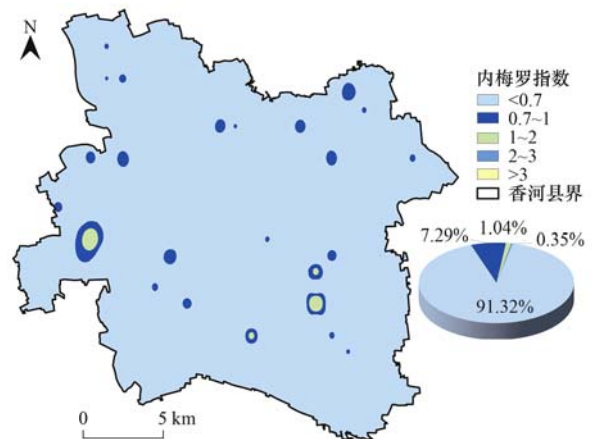
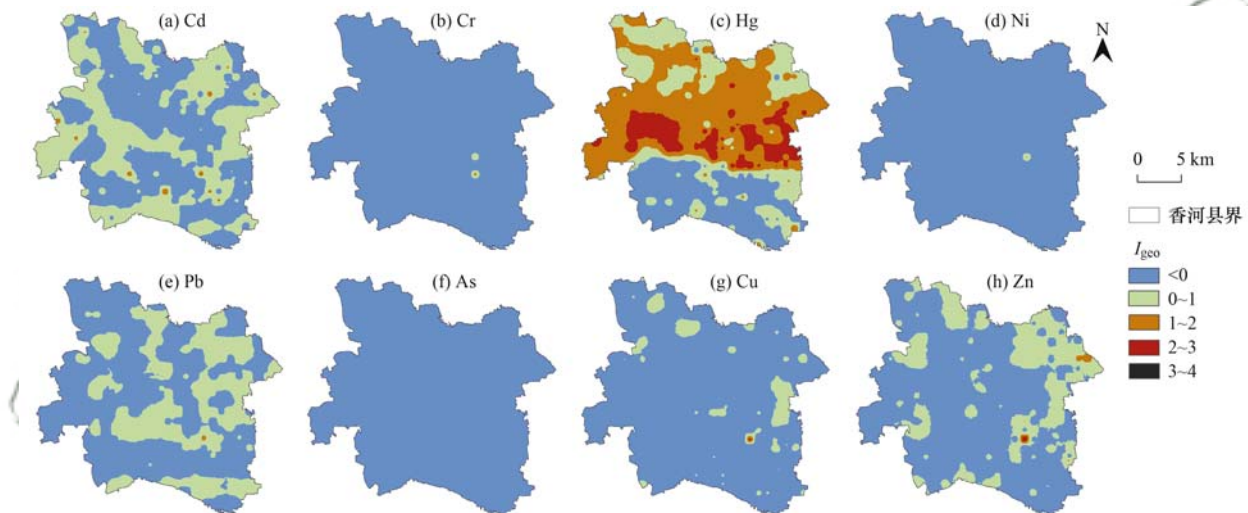
图4 土壤重金属单因子指数 (P_i)Fig. 4 Single factor index of soil heavy metals (P_i)

图5 土壤重金属内梅罗指数综合污染分布

Fig. 5 Comprehensive pollution distribution of soil heavy metal Newerow index

图6 土壤重金属地累积指数 (I_{geo})Fig. 6 Geo-accumulation index (I_{geo}) of soil heavy metals

中度污染与一定区域处于中度污染到强污染,说明香河县中部与北部部分区域在近一段时间内有新污染源加入,已经达到中度污染或强污染水平。总体来看,Cd、Cr、Pb、Cu和Zn的颜色最深点均出现在安头屯乡南部,查看土地利用现状,该点所在区域为水浇地、旱地、农村居民点用地交错区域,受农村居民生活习惯影响,地累积指数较高;Ni和Hg的颜色最深点位于安头屯乡中南部,查看土地利用现状,该点所在区域为水浇地、园地、旱地和公路交错地带,交通运输导致地累积指数较高。

2.2.3 重金属潜在生态风险评价

除Cd和Hg外,其余6种重金属潜在风险指数均小于40,为轻微潜在风险等级(表5)。Cd和Hg分别有60.54%和94.31%生态风险程度达到中等及以上的采样点。其中Hg的污染最严重,Hg存在强潜在风险样本占总样本数的25.75%,以及31.77%很强潜在风险和3.01%极强潜在生态风险等级的采样点。综

合考虑8种重金属元素在各采样点土壤重金属的综合因子潜在风险指数(R_i),288个采样点的 R_i 值范围为67.98~475.92,中等和强潜在生态风险样点所占比例分别为46.15%和37.46%。

2.3 健康风险评价

2.3.1 土壤重金属非致癌和致癌健康风险评价

非致癌健康风险评价结果显示(表6),同一元素不同暴露途径下非致癌健康风险指数均表现为: $HQ_{oral} > HQ_{dermal} > HQ_{inh}$ 。各单项重金属对成人和儿童的HQ平均值均小于1,不同重金属对成人的非致癌风险由高到低为:Cr > As > Pb > Ni > Cu > Zn > Cd > Hg,对儿童的非致癌风险由高到低为:Cr > As > Pb > Ni > Cu > Zn > Hg > Cd,反映研究区各单项土壤重金属对人体健康尚不存在非致癌风险。成人非致癌健康风险指数 HI_{adult} 介于0.05~0.28之间,均小于1,儿童非致癌健康风险指数 HI_{child} 介于0.32~1.60之间,其中 HQ_{child} 大于1的样品5件,表明研

究区 98.26% 样本中土壤重金属对儿童非致癌健康风险较小,可忽略不计,仅 1.74% 的零星样本土壤重金属对儿童具有非致癌健康风险,土壤重金属对儿童引起的非致癌风险高于成人。

表 5 土壤重金属单因子潜在生态风险指数评价结果

Table 5 Evaluation results of single factor potential ecological risk index for heavy metals in soil								
项目	指数评价范围	指数平均值	生态风险程度/%					
			$E_i < 40$	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	≥ 320	
			$R_i < 110$	110 ~ 220	220 ~ 440	—	≥ 440	
			轻微	中等	强	很强	极强	
E_i	Cd	6. 67 ~ 160. 00	46. 32	39. 46	54. 85	5. 35	0. 34	0
	Cr	0. 70 ~ 6. 92	1. 75	100	0	0	0	0
	Hg	20. 00 ~ 412. 00	134. 54	5. 69	33. 78	25. 75	31. 77	3. 01
	Ni	1. 17 ~ 15. 67	4. 09	100	0	0	0	0
	Pb	2. 00 ~ 19. 75	7. 20	100	0	0	0	0
	As	0. 65 ~ 12. 64	4. 44	100	0	0	0	0
	Cu	1. 19 ~ 37. 14	5. 87	100	0	0	0	0
	Zn	0. 70 ~ 13. 33	1. 46	100	0	0	0	0
R_i	67. 98 ~ 475. 92	205. 67	15. 05	46. 15	37. 46	—	1. 34	

表 6 土壤重金属非致癌风险指数平均值¹⁾

Table 6 Average non-carcinogenic risk index of soil heavy metals								
重金属	HQ_{oral}		HQ_{dermal}		HQ_{inh}		HQ_{all}	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Cd	2.62×10^{-4}	1.85×10^{-3}	2.28×10^{-4}	2.96×10^{-4}	2.45×10^{-8}	4.34×10^{-8}	4.89×10^{-4}	2.15×10^{-3}
Cr	3.45×10^{-2}	2.45×10^{-1}	1.50×10^{-2}	1.96×10^{-2}	3.40×10^{-4}	6.01×10^{-4}	4.99×10^{-2}	2.65×10^{-1}
Hg	4.22×10^{-4}	2.99×10^{-3}	4.59×10^{-5}	5.98×10^{-5}	3.96×10^{-8}	7.01×10^{-8}	4.68×10^{-4}	3.05×10^{-3}
Ni	2.31×10^{-3}	1.63×10^{-2}	7.44×10^{-5}	9.69×10^{-5}	2.10×10^{-7}	3.72×10^{-7}	2.38×10^{-3}	1.64×10^{-2}
Pb	1.55×10^{-2}	1.10×10^{-1}	8.98×10^{-4}	1.17×10^{-3}	1.44×10^{-6}	2.56×10^{-6}	1.64×10^{-2}	1.11×10^{-1}
As	3.07×10^{-2}	2.17×10^{-1}	2.67×10^{-4}	3.47×10^{-4}	7.01×10^{-6}	1.24×10^{-5}	3.09×10^{-2}	2.17×10^{-1}
Cu	1.11×10^{-3}	7.83×10^{-3}	3.37×10^{-5}	4.38×10^{-5}	1.08×10^{-7}	1.92×10^{-7}	1.14×10^{-3}	7.87×10^{-3}
Zn	5.51×10^{-4}	3.90×10^{-3}	2.40×10^{-5}	3.12×10^{-5}	5.17×10^{-8}	9.15×10^{-8}	5.75×10^{-4}	3.93×10^{-3}

1) 成人和儿童对应的 HI 分别为 1.02×10^{-1} 和 6.26×10^{-1}

致癌健康风险评价结果显示(表 7),各单项重金属对成人和儿童的 CR 平均值均介于可接受范围 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间^[46, 47],不同重金属对成人和儿童的致癌风险由高到低均为:As > Cd > Cr > Ni. 成人致癌健康风险指数 TCR_{adult} 介于 $1.12 \times 10^{-6} \sim 1.48 \times 10^{-5}$ 之间,儿童致癌健康风险指数 TCR_{child}

介于 $9.80 \times 10^{-6} \sim 1.44 \times 10^{-4}$ 之间,其中 CR_{child} 大于 10^{-4} 的样品 7 件,表明研究区 97.57% 样本中土壤重金属对儿童致癌健康风险较小,仅 2.43% 的零星样本土壤重金属对儿童具有致癌健康风险,土壤重金属对儿童引起的致癌风险高于成人。

表 7 土壤重金属致癌风险指数平均值¹⁾

Table 7 Average carcinogenic risk index of soil heavy metals								
重金属	CR_{oral}		CR_{dermal}		CR_{inh}		CR_{all}	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Cd	5.47×10^{-7}	5.39×10^{-6}	4.76×10^{-9}	1.25×10^{-8}	1.51×10^{-14}	4.86×10^{-14}	5.52×10^{-7}	5.40×10^{-6}
Cr	ND	ND	ND	ND	1.40×10^{-7}	4.49×10^{-7}	1.40×10^{-7}	4.49×10^{-7}
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni	ND	ND	ND	ND	1.25×10^{-9}	4.01×10^{-9}	1.25×10^{-9}	4.01×10^{-9}
Pb	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
As	4.73×10^{-6}	4.66×10^{-5}	4.12×10^{-8}	1.08×10^{-7}	1.27×10^{-12}	4.08×10^{-12}	4.77×10^{-6}	4.67×10^{-5}
Cu	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Zn	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

1) “ND”表示没有数据;成人和儿童对应的 TCR 分别为 5.46×10^{-6} 和 5.26×10^{-5}

2.3.2 不同分区土壤重金属健康风险评价

不同分区土壤重金属健康风险评价结果显示(表 8),9 个乡镇 8 种重金属对成人和儿童的 HI 平均值均小于 1,TCR 平均值均小于 10^{-4} ,不存在健康风险.其中,淑阳镇、安平镇、钳屯乡、安头屯乡和

刘家镇分别有 1 ~ 2 个样本的 HI_{child} 和 TCR_{child} 存在健康风险,应予以重视.不同乡镇由于主要污染重金属不同,其健康风险指数也存在一定差异.无论是成人还是儿童,9 个乡镇 HI 平均值均表现为:渠口镇 > 蒋辛屯镇 = 钱旺村乡 > 安头屯乡 > 淑阳镇 > 钳屯

乡 > 刘家镇 > 安平镇 > 五百户镇. 不同乡镇 TCR 平均值均都表现为: 渠口镇 > 蒋辛屯镇 > 淑阳镇 > 钱旺村乡 > 安平镇 > 安头屯乡 > 钳屯乡 > 刘家镇 > 五百户镇.

在儿童和成人非致癌总风险中, 每个乡镇 HQ_{Cr} 、 HQ_{As} 和 HQ_{Pb} 的贡献率变化均在 30% 左右, 且三者贡献率之和均超过 90% (图 7), 可见, 土壤 Cr、As 和 Pb 是各乡镇非致癌风险最大的 3 个贡献因

表 8 不同分区土壤重金属健康风险评价结果

Table 8 Evaluation results of health risk of heavy metals in soils in different zones										
评价指标	统计值	蒋辛屯镇	钱旺村乡	渠口镇	淑阳镇	安平镇	钳屯乡	安头屯乡	五百户镇	刘家镇
HI_{adult}	存在风险占比/%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均值	1.11×10^{-1}	1.09×10^{-1}	1.16×10^{-1}	1.04×10^{-1}	9.25×10^{-2}	9.98×10^{-2}	1.08×10^{-1}	8.77×10^{-2}	9.80×10^{-2}
HI_{child}	存在风险占比/%	0	0	0	5.26	7.14	6.67	5.13	0	1.41
	平均值	6.84×10^{-1}	6.84×10^{-1}	7.20×10^{-1}	6.46×10^{-1}	5.75×10^{-1}	6.09×10^{-1}	6.61×10^{-1}	5.35×10^{-1}	5.94×10^{-1}
TCR_{adult}	存在风险占比/%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均值	6.46×10^{-6}	6.31×10^{-6}	7.17×10^{-6}	6.39×10^{-6}	5.85×10^{-6}	5.08×10^{-6}	5.24×10^{-6}	4.51×10^{-6}	4.64×10^{-6}
TCR_{child}	存在风险占比/%	0	0	0	10.63	7.14	6.67	2.56	0	2.81
	平均值	6.22×10^{-5}	6.08×10^{-5}	6.92×10^{-5}	6.17×10^{-5}	5.65×10^{-5}	4.88×10^{-5}	5.03×10^{-5}	4.33×10^{-5}	4.45×10^{-5}

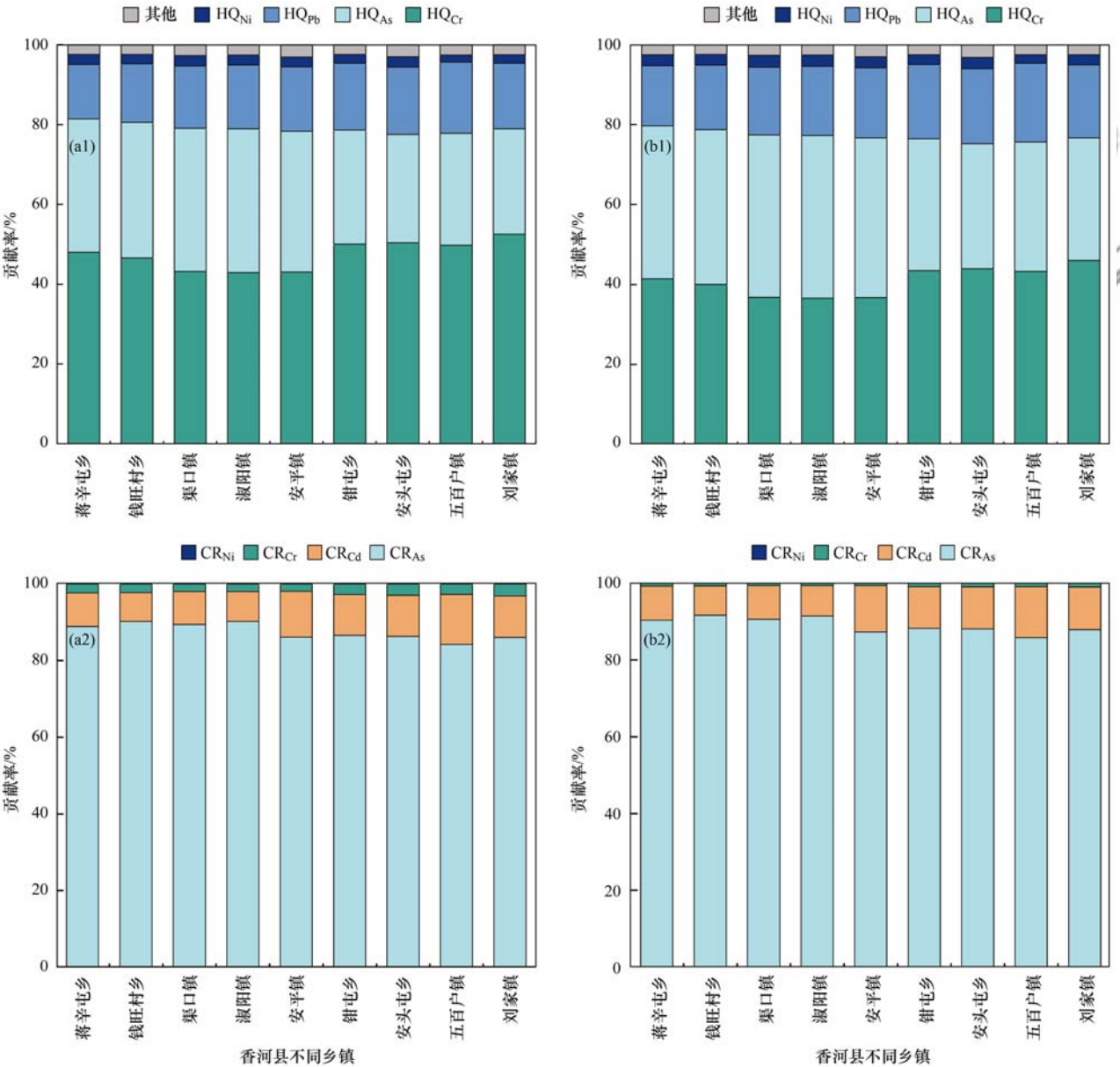


图 7 不同乡镇土壤重金属的健康风险贡献率

Fig. 7 Health risk contribution of heavy metals in soils of different towns

子. 儿童的 CR_{As} 对 TCR 贡献率为 84.20% ~ 90.20%, 平均值为 87.55%; 成人的 CR_{As} 对 TCR 贡献率为 85.77% ~ 91.60%, 平均值为 89.02%, 所以土壤 As 是各乡镇主要的致癌风险因子.

3 讨论

3.1 土壤重金属空间分布及主要污染物

高密度人为活动相关区域的重金属污染水平普遍较高^[2]. 农田土壤金属污染主要来源于自然因素和人为因素, 其中人类活动引起的重金属污染活性较高, 容易被植物吸收积累, 危害性更高^[48,49]. 本研究发现, 含量较高区域以点状分布在香河县西部与中部, 该区域集中分布工业园区, 其中安平镇和淑阳镇的主要污染重金属为 Cd 和 Hg, 五百户镇的主要污染重金属为 Cd 和 Zn, 安头屯乡受到全部 8 种重金属污染.

安平镇和淑阳镇的主要污染重金属为 Cd 和 Hg. 安平镇工业以印刷、包装加工为主^[50], 印刷产品中, 油墨是产生重金属污染的重要源头, 比如, 在纸包装、平板印刷及商业票据印刷过程中都会产生大量重金属^[51], 尤其在漆渣中 Cd 和 Hg 的含量较高^[52]. 淑阳镇工业主要以轻工业为主^[50], 淑阳镇第一特色主导产业为家具业, 家具制造工业生产过程中产生的废液废料含有 Cd 和 Hg. 五百户镇的主要污染重金属为 Cd 和 Zn, 五百户镇工业以汽车配件和金属制品为主^[50], 汽车配件、金属制品工业企业在产品生产过程中会产生含废脱模剂(含 Cd 等重金属)的废水和大量废弃物, 并且五百户镇建有数家电镀厂(以镀锌为主), 这些废弃物中含有大量重金属, 会随着雨水渗透到土壤中^[53]. 安头屯乡受到全部 8 种重金属污染, 安头屯乡工业以家具制造业等为主^[50], 家具制造工业生产车间产生的废涂料(稀释剂、固化剂等)、含涂料的有机溶剂废物、漆渣、VOCs 废气处理过程产生的废吸附剂、废催化剂, 以及喷漆房产生的水帘废液和污水处理设施产生的含重金属污泥等均含有大量重金属^[54]. 以上结果表明香河县应针对各乡镇不同的主要污染物, 采取对应的污染治理与防控措施.

3.2 土壤重金属污染生态风险分析

不同评价方法的侧重点有所差异, 本文采用富集因子法、单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法, 从重金属累积程度、污染程度和存在风险程度等不同角度对农田土壤重金属的生态风险进行分析. 不同评价方法在计算上也有一定的区别, 单因子指数法和内梅罗综合污染指数法以土壤污染风险筛选值作为

评价标准, 计算出的污染程度相对安全. 其他方法以河北省背景值作为评价标准, 地累积指数法在单因子污染指数法的基础上进行了改进, 并进行了对数运算. 富集因子法不仅考虑了分析元素的背景值, 还考虑了参考元素的浓度^[55]. 潜在生态危害评价中引入数值各异的重金属毒性响应系数, 将重金属的环境生态效应与毒理学联系起来, 反映出不同重金属元素对环境的潜在生态危害^[56]. 因此, 由于土壤重金属污染具有高隐蔽和多源性等特点, 需多种评价方法相结合才能客观全面地反映出土壤污染情况^[57].

综合不同评价方法发现, 香河县农田土壤受到重金属一定程度上的污染, 其中 Hg、Cd 和 Pb 是主要污染元素. 香河是东北亚地区最具影响力的家居产品集散地、中国北方最大的钣金制品和印刷包装生产基地. 香河家具城展厅面积 220 万 m^2 , 规模位居北方最大、全国第二. 香河县农田土壤重金属富集, 尤其是 Hg、Pb 和 Cd, 可能源于当地企业的污染排放, 以及过量使用化肥易造成土壤中重金属的积累^[58]. 基于筛选值的内梅罗评价表明香河县土壤重金属污染生态风险较低, 但作为缓解北京非首都功能, 优化首都发展格局的重要区域, 香河县农田土壤可能面临较强的重金属污染发展趋势, 因此应加大对土壤重金属污染生态风险管控力度.

3.3 土壤重金属污染健康风险分析

农田土壤重金属一般通过各种暴露途径及介质对人体造成的健康风险主要通过口食途径^[59], 儿童通常比成人更易受到重金属威胁^[16]. 香河县农田土壤重金属对人体健康的非致癌和致癌风险主要以食物为暴露途径摄入人体, 总体风险均可控, 儿童受到的非致癌和致癌风险在 3 种暴露途径下均大于成人, 这与前人的研究观点相同^[16]. 究其原因, 儿童的生理发育不完善, 对重金属的毒性更加敏感, 没有任何保护, 且长期暴露于受污染的环境, 导致农田土壤重金属对儿童造成的非致癌风险更高^[60]. 同时出现存在健康风险的样本均针对儿童, 地方政府应对重金属对儿童健康风险予以重视.

不同乡镇非致癌风险指数和致癌风险指数平均值较大的渠口镇、蒋辛屯镇和钱旺村乡未出现存在风险样本, 可能是由于该乡镇整体健康风险指数较高, 接近阈值, 而出现存在风险样本的乡镇只有极少数样本超出可接受范围, 其余样本健康风险指数较低. 土壤 As 是各乡镇主要的致癌风险因子. 农业种植中, 施肥工程中使用有机农药是产生 As 的原因之一^[61]. 在各个乡镇中, 渠口镇重金属的致癌风险和非致癌风险相对较大. 渠口镇工业已形成了金属制

品、机械制造、家具生产三大产业,重点规划了钣金产业集群,企业在生产过程中产生的废弃物和废液中含有大量的重金属.且渠口镇有农业耕地面积 38 km²,全部为水浇地^[44],重金属是一类在环境中具有持久性的污染物^[62, 63],可通过农作物种植系统积累和迁移,可通过食物链进入到人体,若累积到一定程度就会对人体健康产生威胁^[64].因此,总体上研究区土壤重金属引起的风险尚可接受,仅零星样本土壤重金属对儿童具有健康风险,需加强土壤重金属健康风险预警,同时加大农田土壤重金属污染的治理工作.

4 结论

(1)香河县土壤中不同重金属含量差异较大,具有较高的空间变异性. Cd、Hg、Pb 和 As 通常有几个集中分布的含量较高区域,与大小不一的含量分布区域呈镶嵌分布. Cr、Ni、Cu 和 Zn 分布整体特征为全区域均处于一个含量相对较低的水平,含量较高的分布区域以点状分布. 香河县农田表层土壤采样点的内梅罗综合污染指数超标率为 8.68%,以点状分布在香河县西部与中部.

(2)不同评价方法的侧重点有所差异. 20.74% 的 Hg 和 0.33% 的 Cd 富集因子呈显著富集, 68.56% 的 Hg 和 20.40% 的 Cd 呈中污染,其余重金属处于无~弱污染水平. 地累积指数评价显示土壤 Cd、Pb 和 Zn 污染相对严重, Hg 元素污染最严重,达到中度污染及以上的样品占比为 46.50%. Cd 和 Hg 分别存在 60.54% 和 94.31% 潜在生态风险程度达到中等及以上的采样点,其余 6 种重金属为轻微潜在风险等级. 香河县土壤以中等和强潜在生态风险为主,所占比例分别为 46.15% 和 37.46%,仅存在 1.34% 的极强潜在生态风险等级的样品.

(3)研究区各单项土壤重金属对人体健康尚不存在致癌和非致癌风险. 土壤重金属经任何暴露途径产生的致癌和非致癌风险大体均可接受,仅存在 2.43% 和 1.74% 的零星样本土壤重金属对儿童具有致癌和非致癌健康风险,土壤重金属对儿童引起的非致癌风险高于成人,成人和儿童均经食物摄取途径暴露为主要暴露途径. 9 个乡镇 8 种重金属对成人和儿童基本不存在健康风险. 土壤 Cr、As、Pb 是各乡镇非致癌风险最大的 3 个贡献因子,土壤 As 是各乡镇主要的致癌风险因子.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 雷冰鸣. 孝义市工矿区农田土壤质量状况及潜在生态风险评价[D]. 晋中: 山西农业大学, 2018.
Lei B M. The quality of farmland soil in Xiaoyi Mining Area and potential ecological risk assessment [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2018.
- [4] Zhang X X, Zha T G, Guo X P, *et al.* Spatial distribution of metal pollution of soils of Chinese provincial capital cities[J]. Science of the Total Environment, 2018, **643**: 1502-1513.
- [5] 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙中典型硫铁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.
- [6] 郑影怡, 刘杰, 蒋萍萍, 等. 河池市某废弃冶炼厂周边农田土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 环境工程, 2021, **39**(5): 238-245.
Zheng Y Y, Liu J, Jiang P P, *et al.* Pollution assessment of heavy metals in farmland soils around an abandoned smelter in Hechi, China [J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(5): 238-245.
- [7] 农业农村部农业生态与资源保护总站关于征求《农用地土壤污染责任认定技术指南》(征求意见稿)农业行业标准意见的函[EB/OL]. http://www.reea.agri.cn/stxxypx/202112/t20211222_7795593.htm, 2021-12-23.
- [8] 周亚龙, 王乔林, 王成文, 等. 雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5977-5987.
Zhou Y L, Wang Q L, Wang C W, *et al.* Heavy metal pollution and cumulative effect of soil-crop systems around typical enterprises in Xiong'an New District [J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5977-5987.
- [9] 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 等. 青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4422-4431.
Du H L, Wang Y, Wang J S, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in typical watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4422-4431.
- [10] 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 等. 兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4767-4778.
Zhang L R, Peng X B, Ma Y L, *et al.* Risk Assessment and attribution analysis of “Five toxic” heavy metals in cultivated land in Lanzhou [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4767-4778.
- [11] 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 等. 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 975-984.
Huang Z T, Yi S W, Chen B B, *et al.* Pollution properties and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils and

- crops around a typical manganese mining area[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 975-984.
- [12] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland Soil around Tongshan mining area[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- [13] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 449-459.
Ma H H, Peng M, Liu F, *et al.* Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 449-459.
- [14] 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 等. 闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 359-367.
Lin C Q, Cai Y H, Hu G R, *et al.* Bioaccessibility and health risks of the heavy metals in soil-rice system of southwest Fujian Province[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 359-367.
- [15] 吕悦风, 谢丽, 孙华, 等. 县域尺度耕地土壤重金属污染评价中的标准选择研究[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(11): 4743-4751.
Lü Y F, Xie L, Sun H, *et al.* Criterion selection in assessment of soil heavy metal pollution in farmland on county scale[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(11): 4743-4751.
- [16] 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 等. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 431-441.
Guo Z J, Zhou Y L, Wang Q L, *et al.* Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiongan New District [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 431-441.
- [17] 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 等. 武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3215-3222.
Zhu J, Hou Y Z, Zou S C, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristic and risk assessment of heavy metals in soils around centralized drinking water sources in Wuhan[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3215-3222.
- [18] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [19] DD 2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)[S]. 2005.
- [20] Wöitke P, Wellmitz J, Helm D, *et al.* Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube[J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(8): 633-642.
- [21] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. *地质科技情报*, 2006, **25**(1): 65-72.
Zhang X Z, Bao Z Y, Tang J H. Application of the enrichment factor in evaluating of heavy metals contamination in the environmental geochemistry [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, **25**(1): 65-72.
- [22] 陈艺, 蔡海生, 曾君乔, 等. 袁州区表层土壤重金属污染特征及潜在生态风险来源的地理探测[J]. *环境化学*, 2021, **40**(4): 1112-1126.
Chen Y, Cai H S, Zeng J Q, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in surface soil and geographical detection of potential ecological risk sources in Yuanzhou District [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(4): 1112-1126.
- [23] 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.
- [24] Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, **28**(8): 1273-1285.
- [25] Wedepohl K H. The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(7): 1217-1232.
- [26] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. *Environmental Geology*, 2000, **39**(6): 611-627.
- [27] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1561-1567.
Wei G, Sun W H, Zhao R X, *et al.* Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1561-1567.
- [28] 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]. 2018.
- [29] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S]. 2016.
- [30] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 260-265.
Liu C Z, Huang Y Z, Lei M, *et al.* Soil contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 260-265.
- [31] 张鹏岩, 秦明周, 陈龙, 等. 黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3654-3662.
Zhang P Y, Qin M Z, Chen L, *et al.* Study on distribution characteristics and potential ecological risk of soil heavy metals in the Yellow River beach region in Kaifeng City [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3654-3662.
- [32] 闫晓露, 郑欢, 赵炬杭, 等. 辽东湾北部河口区土壤重金属污染源识别及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(8): 3028-3039.
Yan X L, Zheng H, Zhao H H, *et al.* Source identification and health risk assessment of soil heavy metal in the estuary of Northern Liaodong Bay, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(8): 3028-3039.
- [33] 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 等. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4232-4240.
Zhang Q, Chen Z J, Peng C S, *et al.* Heavy metals pollution in topsoil from Dagang industry area and its ecological risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4232-4240.
- [34] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [35] 厉炯慧, 翁珊, 方婧, 等. 浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1509-1515.
Li J H, Weng S, Fang J, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil around Haining electroplating industrial park[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1509-1515.
- [36] 李珊珊, 单保庆, 张洪. 濠阳河河系表层沉积物重金属污染特征及其风险评价[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(8): 2277-2284.
Li S S, Shan B Q, Zhang H. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface sediments of Fuyang River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(8): 2277-2284.
- [37] 魏本杰, 文新宇, 朱生翠, 等. 湘江流域某冶炼厂周边土壤

- 重金属含量检测及污染评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, **44**(12): 5180-5187.
- Wei B J, Wen X Y, Zhu S C, *et al.* Detection and evaluation of soil contamination by heavy metals around one of smelters beside Xiangjiang River [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, **44**(12): 5180-5187.
- [38] 汪庆华, 董岩翔, 周国华, 等. 浙江省土壤地球化学基准值与环境背景值[J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(2): 81-88.
- Wang Q H, Dong Y X, Zhou G H, *et al.* Soil geochemical baseline and environmental background values of agricultural regions in Zhejiang Province [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, **23**(2): 81-88.
- [39] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 112-115.
- [40] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. 地理研究, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index [J]. Geographical Research, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- [41] 杨忠平, 赵剑剑, 曹明哲, 等. 长春市城区土壤重金属健康风险评价[J]. 土壤通报, 2015, **46**(2): 502-508.
- Yang Z P, Zhao J J, Cao M Z, *et al.* Assessment on human health risk of potentially toxic heavy metals in urban soil of Changchun City [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, **46**(2): 502-508.
- [42] EPA/540/1-89/002, Risk assessment guidance for superfund. Volume I human health evaluation manual, Part A interim final [S]. 1989.
- [43] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [44] 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.
- [45] 谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 768-774.
- Xie X J, Kang J C, Li W J, *et al.* Analysis on heavy metal concentrations in agricultural soils of Baoshan, Shanghai [J]. Environmental Science, 2010, **31**(3): 768-774.
- [46] HJ 25.3-2019, 建设用地土壤污染风险评估技术导则[S]. 2019.
- [47] Tenkate T. Environmental health risk assessment: Guidelines for assessing human health risks from environmental hazards [J]. Environmental Health, 2002, **2**(3): 94-95.
- [48] Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, *et al.* Remediation of heavy metal (loid)s contaminated soils-To mobilize or to immobilize? [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **266**: 141-166.
- [49] 周江明. 中国耕地重金属污染现状及其人为污染源浅析[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (2): 83-92.
- Zhou J M. The present status of heavy metal(loid)s pollution in farmland soils and analysis of polluting sources in China [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2020, (2): 83-92.
- [50] 河北民政厅. 河北政区大典[M]. 石家庄: 河北省民政厅, 2012.
- [51] 钟福明. 低碳经济背景下印刷包装行业转型升级策略研究[J]. 中国包装, 2021, **41**(9): 28-30.
- [52] 杨晶. 北京市相关行业漆渣废物污染特性及其环境风险评价[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- Yang J. Pollution characteristics and environmental risk assessment of lacquer waste in Beijing [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [53] 林肯. 金属制品厂区土壤重金属污染修复分析[J]. 资源节约与环保, 2019, (4): 121.
- [54] HJ 1180-2021, 家具制造业污染防治可行技术指南[S]. 2021.
- [55] Eziz M, Hayrat A, Yang X Y. Comparison and analysis of estimation methods for heavy metal pollution of farmland soils [J]. Journal of Resources and Ecology, 2020, **11**(5): 435-442.
- [56] 湛润生, 胡冬梅, 甄莉娜, 等. 山西省天镇县设施菜地土壤重金属污染评价及其源解析[J]. 环境污染与防治, 2021, **43**(12): 1573-1577.
- Zhan R S, Hu D M, Zhen L N, *et al.* Pollution evaluation and source analysis of heavy metals in facility vegetable land soils of Tianzhen County of Shanxi province [J]. Environmental Pollution and Control, 2021, **43**(12): 1573-1577.
- [57] 罗松英, 柯思茵, 王嘉琦, 等. 湛江市郊蔬菜地土壤重金属空间分布特征及来源分析[J]. 南方农业学报, 2019, **50**(8): 1709-1717.
- Luo S Y, Ke S Y, Wang J Q, *et al.* Spatial distribution and source analysis of heavy metals content in vegetable field soils in suburb of Zhanjiang [J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, **50**(8): 1709-1717.
- [58] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(1): 63-74.
- Wang M, Li S T, Ma Y B, *et al.* Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(1): 63-74.
- [59] 王世玉, 吴文勇, 刘菲, 等. 典型污灌区土壤与作物中重金属健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- Wang S Y, Wu W Y, Liu F, *et al.* Assessment of human health risks of heavy metals in the typical sewage irrigation areas [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(4): 1550-1560.
- [60] 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.
- [61] 林静雯, 陈勉为, 郑冬梅, 等. 基于 ArcGIS 的城郊不同功能区土壤重金属健康风险评价[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2020, **32**(4): 292-300.
- Lin J W, Chen M W, Zheng D M, *et al.* Health risk assessment of soil heavy metals in different functional areas of suburbs based on ArcGIS [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2020, **32**(4): 292-300.
- [62] 杨泉, 王学华, 敖和军, 等. 不同种植密度高粱对耕地重金属污染的修复效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, **44**(3): 234-239.

- Yang Q, Wang X H, Ao H J, *et al.* Remediation effect on heavy metal pollution of sorghum planting density[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, **44**(3): 234-239.
- [63] 卜思怡, 王翠红, 周伟军, 等. 长株潭地区 5 种母质发育水稻土锌和铜及镍元素剖面分布特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, **45**(4): 391-397.
- Bu S Y, Wang C H, Zhou W J, *et al.* Profile distribution characteristics of zinc, copper and nickel in paddy soils from five parent materials in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan area[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, **45**(4): 391-397.
- [64] 袁余洋, 刘属灵, 刘永林, 等. 重庆江津区自产大米和玉米中重金属的健康风险评价[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, **47**(6): 677-683.
- Yuan Y Y, Liu S L, Liu Y L, *et al.* The heavy metal content characteristic and human health risk assessment of rice and corn in Jiangjin District, Chongqing [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2021, **47**(6): 677-683.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2021 年 12 月 27 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议发布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续 20 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.



CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qi, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)