

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3  
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM<sub>2.5</sub> 分布格局演变及其影响因素 ..... 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 ..... 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组分及来源分析 ..... 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM<sub>2.5</sub> 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 ..... 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 ..... 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 ..... 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 ..... 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 ..... 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 ..... 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 ..... 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 ..... 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 ..... 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 ..... 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 ..... 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 ..... 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 ..... 张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 ..... 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 ..... 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 ..... 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹翔, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 ..... 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 ..... 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 ..... 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 ..... 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997 ~ 2017 年) ..... 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 ..... 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 ..... 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 ..... 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 ..... 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 ..... 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 ..... 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 ..... 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 ..... 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 ..... 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 ..... 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 ..... 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 ..... 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 ..... 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 ..... 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 ..... 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 ..... 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 ..... 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 ..... 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 ..... 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 ..... 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 ..... 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 ..... 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 ..... 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 ..... 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 ..... 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 ..... 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 ..... 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As<sup>5+</sup> 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 ..... 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)

## 耕地土壤重金属健康风险空间分布特征

姬超<sup>1</sup>, 侯大伟<sup>1\*</sup>, 李发志<sup>1</sup>, 包广静<sup>2</sup>, 邓爱萍<sup>3,4</sup>, 沈红军<sup>3,4</sup>, 孙华<sup>1\*</sup>

(1. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095; 2. 云南财经大学城市与环境学院, 昆明 650221; 3. 江苏省环境监测中心, 南京 210036; 4. 江苏省环境与健康重点实验室, 南京 210036)

**摘要:** 以江苏省某市为研究区域, 借助 ArcGIS 和 SPSS 分析工具, 利用 US EPA 健康风险评估模型评估耕地土壤重金属 Cr、Pb、Cd 和 Hg 的健康风险, 从地理学的视角构建包含地理探测器及优化后的位序-规模理论模型的健康风险分析方法体系, 分析其健康风险空间分异度及风险水平差异. 结果表明, 研究区域 Cr、Pb、Cd 及 Hg 这 4 种耕地土壤重金属含量均值分别为 65.207、25.486、0.238 和 0.045 mg·kg<sup>-1</sup>, 均低于耕地土壤污染风险的最低筛选值; Hg 和 Cd 的健康风险均处于可接受范围内, Cr 和 Pb 的儿童非致癌风险均值以及 Cr 的成人及儿童致癌风险指数均值分别为 2.914 385、1.337 503、4.312 679 × 10<sup>-6</sup> 及 8.137 130 × 10<sup>-6</sup>, 均超过可接受范围; 不同耕地重金属健康风险 *q* 值的范围为 0.005 523 ~ 0.204 238, 高风险特征因子需要进一步引起关注; 研究子区域 1、子区域 2、子区域 3 和子区域 4 的 Cr 与 Pb 的儿童非致癌风险及 Cr 的致癌风险的 *R* 值较大, 均接近或超过 1, 其他研究子区域的 *R* 值均低于 0.1, 中、高风险区与低风险区 *R* 值差异相对较大, 研究子区域的高风险区比较集中. 以耕地土壤重金属健康风险评价结果为基础, 地理学视角分析市域范围的空间分异程度以及市辖县的风险水平, 对于丰富健康风险研究手段、衡量不同尺度的健康风险水平以及制定精细化的风险管控策略等具有积极的意义.

**关键词:** 耕地; 土壤重金属; 健康风险; 地理探测器; 位序规模理论

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1440-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201908163

## Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil

Ji Chao<sup>1</sup>, Hou Da-wei<sup>1\*</sup>, Li Fa-zhi<sup>1</sup>, Bao Guang-jing<sup>2</sup>, Deng Ai-ping<sup>3,4</sup>, Shen Hong-jun<sup>3,4</sup>, Sun Hua<sup>1\*</sup>

(1. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Urban and Environment, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China; 3. Jiangsu Environmental Monitoring, Nanjing 210036, China; 4. Jiangsu Key Laboratory of Environment and Health, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** Spatial characteristics analysis of the human health risk posed by heavy metals in cultivated soils is of great significance, with the potential to prevent and control soil pollution, protect human health, provide a basis for risk management, etc. In this paper, a methodological system, including a USEPA health risk assessment model, differentiation and factor detector within a geographical detector, and optimized initial model of rank-size theory, was constructed from a geographical perspective. Taking a city in Jiangsu province as the research object, we obtained the spatial differentiation and relative level of human health risk of Cr, Pb, Hg, and Cd in cultivated land by using the methodological system constructed and SPSS and ArcGIS software. The average concentrations of heavy metals (mg·kg<sup>-1</sup>) in the research area were Cr (65.207 mg·kg<sup>-1</sup>), Pb (25.486 mg·kg<sup>-1</sup>), Cd (0.238 mg·kg<sup>-1</sup>), and Hg (0.045 mg·kg<sup>-1</sup>), which were lower than the risk control standards for soil contamination of agricultural land in China. The children's non-cancer risk of Cr and Pb and the cancer risk to children and adults of Cr were 2.914 385, 1.337 503, 4.312 679 × 10<sup>-6</sup>, and 8.137 130 × 10<sup>-6</sup>, respectively, all of which exceeded the maximum acceptable limit in the research. Meanwhile, the spatial differentiation (*q*) of heavy metal health risk was between 0.005 523 and 0.204 238, which indicated that the high health risk posed by heavy metals should be paid attention to. The health risk rankings (*R*) of the children's non-cancer risk of Cr and Pb and the cancer risk of Cr in subregions 1, 2, 3, and 4 approached or exceeded 1, and were higher than in subregions 5, 6, and 7, for which *R* was lower than 0.1. The *R* values indicated that the high health risk is concentrated in the research region. This research has great significance in measuring the health risk of heavy metals in cultivated soil at different scales, and in forming control strategies with local conditions.

**Key words:** cultivated land; soil heavy metals; human health risk; geographical detector; rank-size theory

随着工业化的迅速发展以及城镇化的快速推进, 中国耕地土壤重金属的污染形势愈发严峻<sup>[1, 2]</sup>. 土壤是重金属向大气、水体和有机体传播的主要介质, 并可通过经口摄入途径、呼吸途径和皮肤接触途径等暴露途径进一步影响人体健康, 因此耕地土壤重金属的过度累积对于人类健康和区域生态系统平衡具有较大的影响<sup>[3-5]</sup>.

作为土壤环境风险研究的重要组成部分, 耕地土壤重金属健康风险研究对于指导区域耕地质量

收稿日期: 2019-08-20; 修订日期: 2019-10-13

基金项目: 2018 年度江苏环保科研课题项目(2018001); 流域典型区域农用地环境健康风险研究(1905)

作者简介: 姬超(1993~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土地资源环境, E-mail: 208860788@qq.com

\* 通信作者, E-mail: dawei900531@163.com; sh@njau.edu.cn

提升和保障人体健康等具有积极地意义,已引起广泛的关注。1875年,Hawley<sup>[6]</sup>根据前人的研究成果提出了不同年龄段的人群在不同暴露途径下室内外的暴露参数;Jaishankar等<sup>[7]</sup>分析了重金属Cr、Cd和Pb的毒性机制及其对人体健康的危害程度;Swartjes<sup>[8]</sup>从暴露参数、风险评价及实践分析的视角梳理了当前土壤健康风险的研究进展并提出了未来研究的侧重点;Ihedioha等<sup>[9]</sup>在调查尼日利亚南部旱季和雨季固体废弃物堆放场周边土壤重金属的基础上分析其土壤重金属健康风险等。与美国和加拿大等发达国家相关的研究相比<sup>[6~8,10]</sup>,我国土壤环境健康风险的研究起步较晚,研究方法及相关参数主要借鉴国外相关研究成果,如Zhao等<sup>[11]</sup>利用89个土壤点位数据分析了大宝山矿区不同土地利用类型的重金属健康风险;刘芳等<sup>[12]</sup>研究了煤矿周边地区的土壤重金属健康风险并通过对52个点位插值分析其空间分布特征;Shen等<sup>[13]</sup>和杨敏等<sup>[14]</sup>也是在点位调查的基础上进行矿区周边的耕地土壤重金属健康风险评价,研究的内容不断拓展,研究结果对于推动我国土壤重金属健康风险和土壤污染防治具有重要的意义。然而,当前的研究领域侧重于环境科学,研究方法主要基于暴露参数和暴露途径等的土壤重金属健康风险评估,研究基础单元侧重于调查点位或者基于调查点位空间插值单元,以包含多个调查点位的县域为研究基础单元的耕地土壤重金属健康风险的分析研究较少,同时针对健康风险评估结果的空间特征分析的相关研究方法和基础理论亟待深入。

地理探测器(geographical detector)作为探测不同尺度范围的变量空间分异特征或变量之间一致性的空间数据探索性分析的有力工具<sup>[15]</sup>,已被应用于环境<sup>[16]</sup>、社会<sup>[17]</sup>和经济<sup>[18]</sup>等方面,研究内容侧重于变量之间的相关性的探测,直接衡量单一变量的空间分异特征的研究较少,因此以重金属调查点位为研究区单元数,将地理探测器应用于土壤重金属健康风险空间分异特征分析进而探索分析其空间特征分异,即丰富了地理探测器的实践应用领域又可为后续健康风险水平分析提供前期支撑。同时,位序-规模理论最初主要用来反映城市发展规模在一定的时空范围内具有分形性质<sup>[19~21]</sup>,随后一些学者通过优化该模型并进一步将其运用在地理学和经济等领域,如城市旅游规模分析<sup>[22]</sup>、港口体系位序规模<sup>[23]</sup>和石油资源流量位序-规模特征<sup>[24]</sup>等,但在生态环境领域应用的较少,因此依据耕地重金属健康风险空间分异特征评价结果,进一步通过优化位序-规模理论模型综合评价包含多个耕地土壤重金

属点位数据的区域健康风险位序来表征健康风险的综合水平,可以解决当前区域综合风险水平测度研究缺乏及空间特征研究较少的问题,同时对于拓展该理论模型的应用领域、丰富健康风险分析方法等也具有积极地意义。

基于此,本研究以江苏省某市为研究区域并将市辖县作为研究子区域,尝试将地理探测器及位序-规模理论模型嵌入耕地土壤重金属健康风险分析中,从地理学视角构建健康风险空间特征分析方法体系,分析区域总体的健康风险分异特征及子区域间的风险水平,明晰包含多个点位的区域综合健康风险的空间分异特征及健康风险水平,以期探索构建多维视角下的耕地土壤环境管控策略提供借鉴及参考,同时对于丰富环境健康风险研究方法和理论等也具有积极的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

研究区位于黄淮海平原(E116°22'~118°40', N33°43'~34°58'),属暖温带半湿润季风气候,年均气温为14℃,年均降水量为800~930mm,地形以平原为主,约90%的区域属于平原地区,是全国重要的粮食主产区,耕地土壤为弱碱性且土壤类型主要为脱潮土和潮土<sup>[25]</sup>。该市拥有丰富的煤炭资源且重工业发达,是江苏省主要的工业生产基地,也是我国电力和煤炭工业的重要基地。伴随着工业化和城镇化的快速推进,工业生产、农业生产等致使该市土壤面临的生态环境形势进一步加剧,尤其是重金属污染。同时全市耕地面积、化肥使用量及农药使用量等在2014年均位于江苏省前列,耕地质量整体水平较低。因此本研究选取该市作为研究区进行耕地土壤重金属健康风险研究具有一定的实用意义和代表性。

### 1.2 研究基础数据

研究基础数据主要包括耕地土壤重金属统计数据以及研究区的矢量数据,其中矢量数据利用ArcGis软件对研究区的行政区划图进行矢量化得到的;耕地土壤重金属数据依据我国2014年批准实施的“土壤环境监测技术示范”以及研究区的耕地空间分布特征,采用网格法进行布点并对网格区域实施0~20cm耕层土壤采集,每个采样点的土壤质量在除去土壤中的农作物根系和土壤动物等之后不低于1kg,利用手持GPS定位仪测定采样点的经纬度,在此基础上分别参照我国土壤环境质量分析的相关标准HJ 491-2009、GB/T 22105.3-2008、GB/T 23739-2009及GB/T 22105.1-2008分别分析研究区

域耕地土壤的 Cr、Pb、Cd 和 Hg 的含量,并将经纬度、重金属监测结果以及行政代码等数据导入到 Excel 表格中,删除重金属数据的缺省值和异常值等,最终得出覆盖该市 7 个县区的 766 个有效调查点位(图 1).

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 健康风险评价

由美国环境保护署(US EPA)提出的健康风险

评价模型已得到国内外广泛认可和应用,因此本研究以该模型为基础,结合市域土壤调查数据及相关研究,评估研究区耕地土壤重金属的健康风险<sup>[26~32]</sup>.同时由于土壤重金属通过皮肤和呼吸暴露方式进入人体的量低于经口摄入量的 1%<sup>[11,26]</sup>,因此本研究的耕地土壤日均暴露量主要从经口摄入暴露途径分析[公式(1)].在日均暴露量分析的基础上,进一步探讨研究区域内致癌风险及非致癌风险

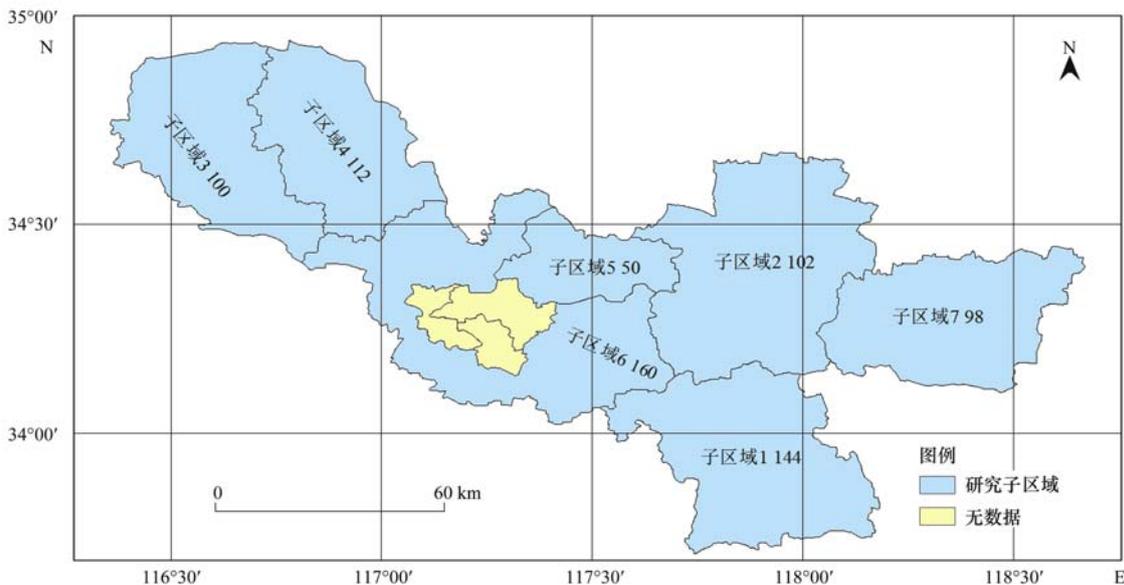


图 1 研究区域及采样点位统计

Fig. 1 Research area and sampling point statistics

[公式(2)、(3)].

$$ADD = C_i \times \frac{IF \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

式中, ADD (average daily dose) 为日均暴露量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ;  $C_i$  (concentration) 为土壤重金属  $i$  含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; IF (ingestion factor) 土壤的摄入频率,  $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ ; ED (exposure duration) 暴露年限, a; CF (conversion factor) 为转换系数; EF (exposure frequency) 暴露频率,  $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ ; BW (body weight) 为体重, kg; AT (averaging time) 平均暴露时间, d.

非致癌风险评价:

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i = \frac{ADD}{RfD_i} \quad (2)$$

致癌风险评价:

$$RI = \sum_{i=1}^n RI_i = \sum_{i=1}^n SF_i \times ADD \quad (3)$$

式中, HI (hazard index) 和 HQ (hazard quotient) 分别为耕地土壤重金属的危害指数和非致癌风险,其阈值均为 1;  $RfD_i$  (chronic reference dose) 为重金属  $i$  毒性参考剂量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ , 在后续的结果分析中用 HIa、HIc、HQa 和 HQc 分别表示成人危害指数、儿童危害指数、成人非致癌风险及儿童非致癌风

险; RI 为致癌风险,其最大可接受风险指数 ( $RI_{\max}$ ) 为  $10^{-6}$ ,  $SF_i$  (cancer slope factor) 为重金属  $i$  致癌强度系数,  $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$ . 公式(1)~(3)中的具体参数见文献[29~34].

#### 1.3.2 健康风险空间分异特征分析

地理探测器可应用于不同领域、不同尺度及不同数据类型等的地理空间分析,根据健康风险评价结果,进一步引用地理探测器中的分异及因子探测(differentiation and factor detector),在健康风险评价的基础上进一步探测不同耕地重金属健康风险的空间分析分异特征,进而为后续健康风险水平的研究提供支撑.具体评价模型如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{v=1}^n N_v \times \sigma_v^2}{N \times \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (4)$$

$$SSW = \sum_{v=1}^n N_v \times \sigma_v^2, \quad SST = N \times \sigma^2 \quad (5)$$

式中,  $q$  为空间分异度,表征研究区域内重金属健康风险空间分异程度,该值的范围为 0~1,  $q$  值越大表明健康风险的空间分析程度越高,反之则越低;  $N_v$  和  $N$  分别为研究子区域  $v$  和全区的单元数,调查

点位作为研究子区域的研究基础单元;  $\sigma_v^2$  和  $\sigma^2$  分别是研究子区域  $v$  和研究区的健康风险方差; SSW (within sum of squares) 为各研究子区域的健康风险方差与调查点位数的乘积, SST (total sum of squares) 为全区健康风险总方差与总调查点位数的乘积。

以地理探测器中的分异及因子探测器分析市域范围内的耕地土壤重金属健康风险的空间分异特征,若不同调查点位的耕地土壤重金属健康风险平均值较高且  $q$  值较小,表明市域范围内的耕地土壤重金属的空间异质性较低,则可以进行统一的风险管控;若健康风险平均值较高且  $q$  值其较大,则表明市域范围内的健康风险空间差异较大,研究区需因地制宜地制定精细化的风险管控措施,进而衡量不同研究子区域间耕地重金属健康风险水平。

### 1.3.3 健康风险水平分析

以位序-规模理论为理论基础,根据齐夫(G·K·Zipf)最初提出的位序-规模公式的先导形式<sup>[19]</sup>,结合研究基础子区域内多个点位的重金属健康风险评价结果和地理探测器分析结果,通过优化其先导模型得到研究区域内不同研究单元的耕地土壤重金属健康风险水平,具体模型如下:

$$R_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{P_j}{P}}{n} \quad (6)$$

式中,  $R_{ij}$  为研究基础单元的健康风险位序(风险水平),  $P_j$  为研究子区域  $i$  内调查点位  $j$  的健康风险值,  $\bar{P}$  为研究区域内健康风险均值,  $n$  为  $i$  内调查点位数量,该值必须能够反映区域耕地重金属的总体水平,由于本研究的基础数是按照土壤普查的标准实施的,所以研究数据能够满足本研究的需求。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕地土壤重金属统计分析

利用 SPSS 软件中的描述统计功能分析了耕地土壤重金属 Cr、Pb、Cd 及 Hg 的含量,分析结果如表 1。4 种耕地土壤重金属含量的平均值分别为 65.207、25.486、0.238 和 0.045  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均低于其对应的中位数值,同时其偏度均为正数,表明重金属含量高于平均值的采样点位较多。根据其变异系数可以看出 Cr 和 Pb 属于中等程度的变异,而 Cd 和 Hg 则呈现出高等程度的变异。与国家于 2018 年发布的“农用地土壤污染风险管控标准”所确定的风险筛选值相比,虽然研究区域 Cr、Pb、Hg 及 Cd 的含量均值均小于最低风险筛选值,但是较高的峰度以及变异系数表明研究区耕地重金属在区域上具有

表 1 耕地土壤重金属描述性统计分析

描述统计	调查要素			
	Cr	Pb	Cd	Hg
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	152.000	88.000	2.650	0.442
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	14.400	7.670	0.070	0.010
平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	65.207	25.486	0.238	0.045
中位数/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	61.850	24.200	0.200	0.037
标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	16.851	8.774	0.184	0.034
偏度	3.206	2.345	5.817	5.952
峰度	27.040	11.653	53.417	52.412
变异系数	0.258	0.344	0.773	0.756
国家最低风险筛选值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	150	70	0.3	0.5

较高分异程度,同时由于不同重金属健康风险的暴露参数和毒性系数的差异以及健康风险叠加效应等<sup>[35,36]</sup>,4 种重金属的健康风险都需要引起关注。

### 2.2 健康风险总体分析

依据前期整理的数据和公式(1)~(3),本研究评估了研究区耕地土壤 Cr、Pb、Hg 及 Cd 的成人和儿童的危害指数(HI)、非致癌风险值(HQ)以及 Cr 和 Cd 的致癌风险值(RI),为方便分析耕地土壤重金属 Cr 和 Pb 的致癌风险,将其致癌风险值 RI 与  $RI_{\max}$  的比值作为分析基础数据,并再次利用 SPSS 软件中制表分析工具统计分析研究区的健康风险评估结果(表 2)。

耕地土壤重金属 Cd、Cr、Pb 和 Hg 的成人非致癌风险 HQ 的均值分别为 0.000 397、0.325 711、0.148 615 和 0.002 241,总体排序为  $HQ_{a\_Cr} > HQ_{a\_Pb} > HQ_{a\_Hg} > HQ_{a\_Cd}$ , Cd、Cr、Pb 和 Hg 成人非致癌风险的方差和 95.0% 百分位数上限分别小于 0.001 和 0.5,危害指数 HI 的均值为 0.476 964,其方差小于 0.02 及 95.0% 百分位数的上限小于 1,表明研究区耕地土壤重金属的成人非致癌风险均处于可接受范围内<sup>[37]</sup>。对于儿童非致癌风险而言, Cd、Cr、Pb 和 Hg 的 HQ 均值以及危害指数 HI 均值分别为 0.003 581、2.914 385、1.337 503、0.020 174 和 4.275 643,由于 HI 最小值为 1.526 100,表明研究区耕地土壤重金属存在儿童非致癌风险<sup>[38]</sup>,其中 Cd 和 Hg 的 HQ 最大致值分别为 0.039 750 和 0.198 900,远小于 1,表明对儿童不会产生健康危害, Pb 和 Cr 的儿童非致癌风险 HQ 的最小值及全距分别为 0.648 000、0.402 675 和 6.192 000、4.217 325,表明 Cr 和 Pb 是儿童非致癌风险的主要的风险特征因子,需要重点关注以及进一步研究分析。由于耕地土壤重金属 Cd、Cr、Pb 和 Hg 中仅 Cr 和 Cd 具有经口致癌斜率因子参数<sup>[38,39]</sup>,因此对其分别评价其致癌风险,研究结果显示 Cd 的成人及儿童致癌风险的均值及最大值分别为 0.000 057、

0.000 635和0.000 120、0.000 108,与杨敏等对土壤Cd致癌风险评价结果均值0.679相差2个数量级以上,表明Cd对人体的致癌风险可以忽略<sup>[14]</sup>;Cr的成人及儿童致癌风险的均值分别为4.312 679和8.137 130,均超过最大可接受风险指数 $RI_{max}$ ,成人及儿童致癌风险的最小值和全距分别为0.958 904、1.809 253、9.162 861和17.288 418,且其方差分别为0.977 953和1.816 714,表明研究区Cr的致癌风险较高<sup>[40]</sup>.

对比分析研究区耕地土壤重金属成人、儿童非致癌风险以及致癌风险的均值、最大值和最小值等可以发现相较于成人健康风险而言,儿童健康风险指数更高,更容易受到土壤重金属的危害.结合以往研究可以看出,虽然不同区域的重金属健康风险指数差异较大,通常儿童健康风险指数大于成人健康指数,该结果在本研究中进一步得到验证,这主要是由于儿童接触的土壤暴露量较成人更高、对环境污染更敏感等因素造成的<sup>[11,37-42]</sup>.

表2 耕地土壤重金健康风险评价结果分析

Table 2 Analysis of health risk assessment of heavy metals in cultivated soil

项目 <sup>1)</sup>	全距	平均值	中位数	最小值	最大值	众数	方差	95.0% 百分位数上限
HQa_Cd	0.004 300	0.000 397	0.000 333	0.000 117	0.004 417	0.000 283	0	0.000 833
HQa_Cr	0.847 500	0.325 711	0.309 000	0.072 000	0.919 500	0.304 000	0.007 076	0.490 500
HQa_Pb	0.468 592	0.148 615	0.141 167	0.044 742	0.513 333	0.120 167	0.002 625	0.242 083
HQa_Hg	0.021 600	0.002 241	0.001 850	0.000 500	0.022 100	0.001 500	0.000 003	0.050 00
HIa	0.769 395	0.476 964	0.450 825	0.169 567	0.938 961	0.300 517 <sup>2)</sup>	0.013 746	0.710 283
HQc_Cd	0.038 700	0.003 581	0.003 000	0.001 050	0.039 750	0.002 550	0.000 008	0.007 500
HQc_Cr	6.192 000	2.914 385	2.781 000	0.648 000	6.840 000	2.736 000	0.423 374	4.360 500
HQc_Pb	4.217 325	1.337 503	1.270 500	0.402 675	4.620 000	1.081 500	0.212 546	2.178 750
HQc_Hg	0.194 400	0.020 174	0.016 650	0.004 500	0.198 900	0.013 500	0.000 235	0.045 00
HIc	7.033 800	4.275 643	4.057 425	1.526 100	8.559 900	2.704 650 <sup>2)</sup>	0.956 392	6.366 450
RIa_Cr	9.162 861	4.312 679	4.115 297	0.958 904	10.121 766	4.048 706	0.927 096	6.452 626
RIa_Cd	0.000 618	0.000 057	0.000 048	0.000 017	0.000 635	0.000 041	0	0.000 120
RIc_Cr	17.288 418	8.137 130	7.764 711	1.809 253	19.097 671	7.639 068	3.300 449	12.174 76
RIc_Cd	0.001 167	0.000 108	0.000 090	0.000 032	0.001 199	0.000 077	0.000 000	0.000 226

1) HQa、HQc、RIa和RIc分别代表成人非致癌风险、儿童非致癌风险、成人致癌风险以及儿童致癌风险; 2) 表示存在多个众数

### 2.3 基于地理探测器的耕地土壤重金属健康风险差异分析

在健康风险评估的基础上,本研究进一步利用地理探测器中的分异及因子探测器,即公式(4)~(5),分析研究区不同耕地土壤重金属的健康风险的整体空间分异特征(表3).同时,为对比分析不同健康风险空间分异程度,在空间分异特征探测时分析了4种重金属的健康风险 $q$ 值.研究区域内不同耕地土壤重金属健康风险的空间分异度 $q$ 的范围为0.005 523~0.204 238,不同重金属健康风险的空间分异度差异较大,表明市域范围内不同类型的耕地土壤重金属的健康风险程度差异较大<sup>[15]</sup>.

不同耕地土壤重金属成人非致癌风险的 $q$ 值排序为HQa\_Cr > HQa\_Hg > HQa\_Pb > HQa\_Cd,分异度最大的土壤重金属非致癌风险Cr的 $q$ 值为0.013 979,危害指数HI的分异度 $q$ 值为0.013 872,比单一重金属的非致癌风险的分异度都高,这主要由于重金属非致癌风险的综合效应.Cr和Cd的成人致癌风险的 $q$ 值分别为0.204 238和0.005 523,其中Cr的成人致癌风险的分异度是所有单一重金属成人健康风险中最大的,表明其具有明显的空间分

异特征,且将地理探测器结果与成人健康风险分析结果相结合,可以进一步发现研究区耕地土壤重金属成人致癌风险的风险特征因子为Cr,在风险管控时需要进一步分析子区域间的健康风险水平的差异.不同耕地土壤重金属的儿童非致癌风险分异度 $q$ 值的排序为HQc\_Cr > HQc\_Pb > HQc\_Hg > HQc\_Cd,Cr和Pb儿童非致癌风险的 $q$ 值分别为0.127 738和0.101 584,均大于0.1,而Hg和Cd的相对较小,分别为0.010 094和0.005 045,表明市域范围内Cr和Pb的儿童非致癌风险的空间分异程度较大,健康风险在区域间的分布有较大差异,需重点关注;儿童危害指数的分异度 $q$ 值为0.147 126,依然高于单一重金属儿童非致癌风险的 $q$ 值,该现象与成人危害指数的分异度相似.Cd的儿童致癌风险的 $q$ 值为0.020 962,这表明其空间异质性较低,主要由于RIc\_Cd低于 $RI_{max}$ 2个数量级,其风险值普遍较小,区域内部整体的分异程度也随之较低.RIc\_Cr的分异度 $q$ 值为0.134 863,是所有单一重金属儿童健康风险分异度最高的,表明研究区Cr的儿童高致癌风险区域和低致癌风险区域的空间差异较大,需进一步结合子区域间的耕地重金属健康风险空间分

表 3 基于地理探测器的耕地重金属健康风险空间分异特征分析

项目	HQa_Cd	HQa_Cr	HQa_Pb	HQa_Hg	Hla	HQc_Cd	HQc_Cr
$\sigma$	$9.480\ 671 \times 10^{-8}$	$7.066\ 856 \times 10^{-3}$	$2.621\ 855 \times 10^{-3}$	$2.900\ 741 \times 10^{-6}$	$1.372\ 807 \times 10^{-2}$	$7.677\ 073 \times 10^{-6}$	0.422 822
$\sigma_1^2$	$1.061\ 307 \times 10^{-7}$	$9.643\ 954 \times 10^{-3}$	$2.772\ 261 \times 10^{-3}$	$4.601\ 141 \times 10^{-6}$	$1.723\ 219 \times 10^{-2}$	$2.116\ 760 \times 10^{-6}$	0.174 161
$\sigma_2^2$	$2.217\ 984 \times 10^{-7}$	$4.961\ 458 \times 10^{-3}$	$4.451\ 691 \times 10^{-3}$	$7.667\ 234 \times 10^{-7}$	$1.290\ 947 \times 10^{-2}$	$9.534\ 556 \times 10^{-6}$	0.686 803
$\sigma_3^2$	$1.213\ 386 \times 10^{-7}$	$4.125\ 805 \times 10^{-3}$	$2.510\ 055 \times 10^{-3}$	$1.255\ 743 \times 10^{-6}$	$1.019\ 727 \times 10^{-2}$	$6.443\ 042 \times 10^{-6}$	0.241 279
$\sigma_4^2$	$2.540\ 634 \times 10^{-8}$	$5.148\ 580 \times 10^{-3}$	$1.072\ 682 \times 10^{-3}$	$3.597\ 466 \times 10^{-6}$	$8.959\ 984 \times 10^{-3}$	$1.175\ 562 \times 10^{-5}$	0.605 426
$\sigma_5^2$	$2.897\ 662 \times 10^{-8}$	$5.220\ 104 \times 10^{-3}$	$1.537\ 089 \times 10^{-3}$	$3.448\ 669 \times 10^{-6}$	$1.101\ 434 \times 10^{-2}$	$6.096\ 239 \times 10^{-6}$	0.221 163
$\sigma_6^2$	$8.789\ 345 \times 10^{-8}$	$4.546\ 040 \times 10^{-3}$	$2.784\ 529 \times 10^{-3}$	$3.527\ 238 \times 10^{-6}$	$1.178\ 531 \times 10^{-2}$	$1.183\ 803 \times 10^{-5}$	0.204 608
$\sigma_7^2$	$3.901\ 456 \times 10^{-8}$	$1.495\ 052 \times 10^{-3}$	$2.443\ 50 \times 10^{-3}$	$1.930\ 725 \times 10^{-6}$	$2.155\ 115 \times 10^{-2}$	$3.919\ 456 \times 10^{-6}$	0.526 99
SSW/SST	0.994 477	0.986 021	0.989 008	0.987 982	0.986 128	0.989 906	0.872 262
$q$	0.005 523	0.013 979	0.010 992	0.012 018	0.013 872	0.010 094	0.127 738

项目	HQc_Pb	HQc_Hg	Hlc	Rla_Cr	Rla_Cd	Rlc_Cr	Rlc_Cd
$\sigma$	0.212 268	$2.348\ 432 \times 10^{-4}$	0.955 143 188	1.253 463	$1.961\ 426 \times 10^{-9}$	3.296 141	$6.980\ 585 \times 10^{-9}$
$\sigma_1^2$	0.090 154	$4.543\ 015 \times 10^{-4}$	0.401 689 651	1.710 569	$2.195\ 704 \times 10^{-9}$	1.261 911	$2.606\ 779 \times 10^{-9}$
$\sigma_2^2$	0.496 225	$1.102\ 214 \times 10^{-4}$	1.723 406 464	0.880 024	$4.588\ 717 \times 10^{-9}$	6.211 921	$7.553\ 254 \times 10^{-9}$
$\sigma_3^2$	0.132 082	$1.669\ 830 \times 10^{-4}$	0.564 233 291	0.731 803	$2.510\ 337 \times 10^{-9}$	1.749 877	$6.645\ 486 \times 10^{-9}$
$\sigma_4^2$	0.229 547	$1.422\ 463 \times 10^{-4}$	1.217 874 102	0.913 215	$5.256\ 238 \times 10^{-10}$	4.175 817	$2.734\ 468 \times 10^{-10}$
$\sigma_5^2$	0.081 074	$1.099\ 767 \times 10^{-4}$	0.414 494 157	0.925 901	$5.994\ 882 \times 10^{-10}$	1.286 801	$4.709\ 182 \times 10^{-9}$
$\sigma_6^2$	0.107 947	$2.753\ 731 \times 10^{-4}$	0.415 258 11	0.806 341	$1.818\ 399 \times 10^{-9}$	1.450 304	$4.257\ 552 \times 10^{-9}$
$\sigma_7^2$	0.226 942	$2.054\ 287 \times 10^{-4}$	1.126 269 395	2.651 806	$8.071\ 599 \times 10^{-10}$	4.387 129	$2.856\ 992 \times 10^{-9}$
SSW/SST	0.898 416	0.994 955	0.852 873 92	0.795 762	0.994 477	0.865 137	0.979 038
$q$	0.101 584	0.005 045	0.147 126 08	0.204 238	0.005 523	0.134 863	0.020 962

布特征制定风险管控策略。

根据耕地土壤重金属评价结果及地理探测器分析结果,研究区域内 Pb 的儿童非致癌风险以及 Cr 的儿童非致癌风险、儿童致癌风险以及成人致癌风险超过可接受最大范围且具有明显的空间分析特征,需进一步探索其在研究子区域间的健康风险水平。

## 2.4 基于位序规模理论的健康风险分析

结合上述分析结果,本研究进一步利用优化后的位序规模理论模型 [公式(6)] 分析研究子区域的耕地土壤重金属 Cr 和 Pb 的儿童非致癌风险及 Cr 成人和儿童致癌风险的区域健康风险水平  $R_i$  值(表 4)。根据分析结果可以看出:对于儿童非致癌风险的相对风险程度而言, Cr 和 Pb 的儿童非致癌风险  $R$  值范围分别为 0.005 689 ~ 1.141 533 和 0.005 634 ~ 1.168 159,其在子区域 2、子区域 3 和子区域 4 的值均超过 1,在子区域 1 分别为 0.929 077 和 0.885 193,未超过但接近于 1,在子区域 5、子区域 6 及子区域 7 的  $R$  值均低于 0.1,表明研究区 Cr、Pb 儿童非致癌风险具有明显的集聚特征<sup>[22~24]</sup>; Cr 的成人及儿童致癌风险的  $R$  值的间距分别为 1.027 647 和 1.133 916,其聚集特征与 Cr 和 Pb 儿童非致癌风险相似。

依据“土十条”提出的耕地土壤环境质量要划分为优先保护区、安全利用区以及严格管控区进行分区管控<sup>[43]</sup>,本研究将研究区土壤重金属健康风险

表 4 基于位序规模理论模型的耕地土壤重金属健康风险水平分析

项目	HQc_Cr	HQc_Pb	Rla_Cr	Rlc_Cr
$R_1$	0.929 077	0.885 193	0.967 275	0.923 020
$R_2$	1.078 121	1.168 159	0.994 792	1.092 789
$R_3$	1.013 324	1.021 933	0.968 65	1.015 423
$R_4$	1.141 533	1.155 594	1.033 824	1.139 630
$R_5$	0.020 144	0.019 356	0.020 499	0.019 898
$R_6$	0.005 698	0.005 634	0.006 177	0.005 714
$R_7$	0.010 009	0.009 908	0.010 747	0.010 039

水平按照  $<0.5$ 、 $0.5 \sim 1$  和  $>1$  划分为低、中和高这 3 个等级,利用 ArcGis 软件对研究结果进行可视化分析(图 2)。根据上文分析结果可以看出 Cr 和 Pb 儿童非致癌风险及 Cr 成人和儿童致癌风险的整体异质性及风险值相对较高,因此可以根据该值进行分类。根据结果可以看出, $R$  值大于 1 的区域主要分布在该市的西北区域和中部区域,具体包括子区域 3、子区域 4 及子区域 2,在健康风险分区管控时,应作为严格管控区重点关注,有效降低耕地土壤重金属健康风险;子区域 1 作为安全利用区以及子区域 5、子区域 6 和子区域 7 作为优先保护区,保障耕地土壤重金属健康风险不增加。

## 3 讨论

耕地土壤重金属健康风险评估及空间特征分析对于践行《土壤污染防治法》的污染防治和“健康中

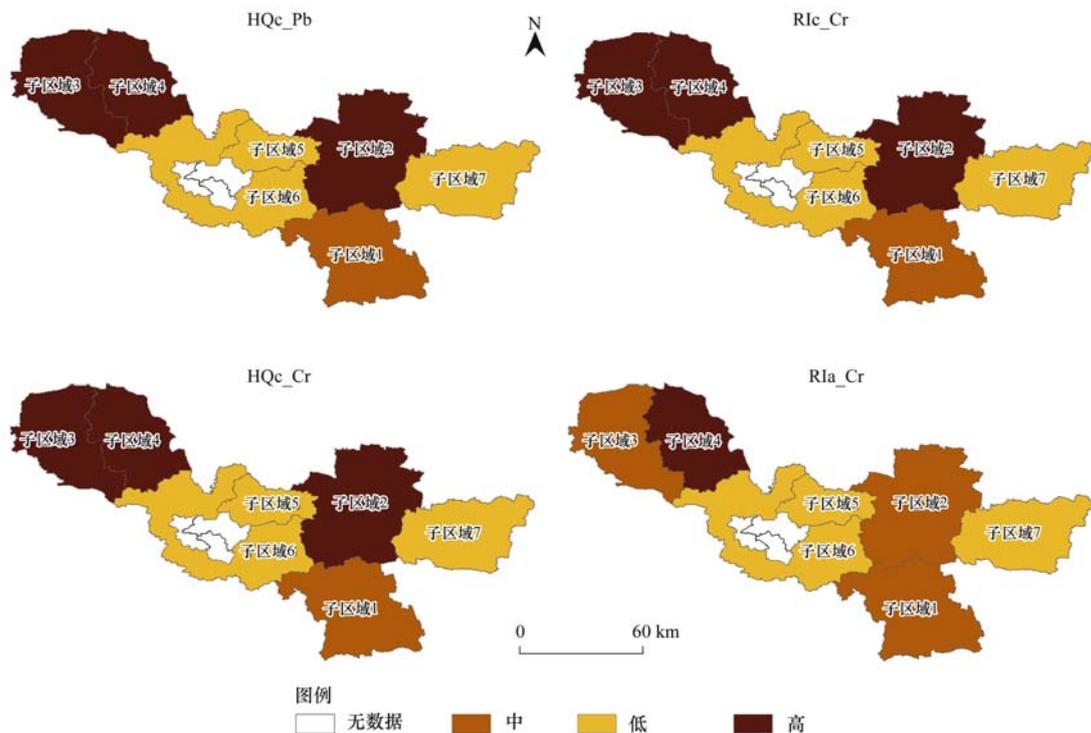


图 2 不同子区域内耕地土壤重金属健康风险水平分析

Fig. 2 Health risk level of heavy metals in cultivated soil of different subregions

国 2030”国家战略中的环境健康保障具有积极意义. 本研究在耕地土壤重金属健康风险评价结果的基础上, 构架地理探测及位序规模理论模型的健康风险分析方法体系, 从地理学视角分析了健康风险分异及风险程度, 研究结果可以有效衡量研究区的空间特征并且可为区域精细化的管控提供参考借鉴. 然而, 本研究主要分析市域耕地土壤重金属 Cr、Pb、Hg 及 Cd 的健康风险, 由于研究数据的限制及健康风险的复合性, 研究结果可能低于实际情况. 未来, 在暴露参数上, 可进一步对不同性别、不同年龄段、不同区域的土壤暴露参数进一步地细化, 明确健康风险对不同人群健康的影响程度<sup>[44,45]</sup>, 同时也可以采用体内或者体外实验法, 进一步分析不同耕地土壤重金属在不同人体器官的生物有效性<sup>[46~48]</sup>, 进而为健康风险管控提供更为详细的依据; 在研究内容上可进一步增加 As、Zn 和 Ni 等耕地土壤重金属以及 DDTs 或 PAHs 等耕地土壤有机污染物<sup>[49]</sup>, 同时也可以一步增加农产品健康风险评价研究, 构建土壤-农产品的健康风险研究体系, 进而为统筹管理各健康风险特征因子奠定基础<sup>[36]</sup>; 在研究方法上, 可进一步引入地理学中的时间序列分析、空间趋势分析以及遥感解译分析等, 进一步分析区域耕地土壤重金属健康风险的空间变化趋势等<sup>[50]</sup>; 在研究尺度上, 可以进一步依托本研究所提及的方法进一步扩展到省、国家尺度上, 也可精细到村镇尺

度上, 进而为落实国家相关宏观管控战略或者具体的健康风险管控措施提供依据.

#### 4 结论

(1) 耕地土壤重金属的成人非致癌风险水平较低, HQa\_Cr、HQa\_Pb、HQa\_Hg、HQa\_Cd 以及 HIa 均较小, 处于可接受范围内的点位数占总点位的 99.74%; 儿童非致癌风险较高, HIc 值均大于 1, 且主要的风险特征因子为 Cr 和 Pb; 致癌风险中 Cr 的风险水平较高, RI\_Cr 均高于最大可接受风险水平  $RI_{max}$ , 而 Cd 的非致癌风险水平远低于  $RI_{max}$ , 因此全市耕地土壤重金属健康风险特征因子为 Cr 和 Pb.

(2) 不同耕地土壤重金属的健康风险  $q$  值范围为 0.005 523 ~ 0.204 238, 其中 Cr 和 Pb 儿童非致癌风险以及 Cr 的成人及儿童致癌风险的  $q$  值均大于 1, 而其他重金属健康风险的  $q$  值均低于 0.05, 该市除 Cr 和 Pb 之外的重金属健康风险空间分布较为均衡, 同时也有必要对耕地土壤重金属 Cr 和 Pb 实施分区管控, 降低其健康风险水平.

(3) Cr 和 Pb 儿童非致癌风险水平的  $R$  值及 Cr 致癌风险的  $R$  值在研究区域中的空间分布特征相似, 中、高非致癌风险区及致癌风险区主要分布在子区域 1、子区域 2、子区域 3 及子区域 4, 低风险区主要分布在子区域 5、子区域 6 及子区域 7, 该市

的西北部的耕地土壤重金属 Cr 和 Pb 需重点关注。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 143-153.
- [ 2 ] Li Z Y, Ma Z W, Van Der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China; pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 843-853.
- [ 3 ] Cheng S P. Heavy metal pollution in China: origin, pattern and control [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2003, **10**(3): 192-198.
- [ 4 ] Zaccone C, Di Caterina R, Rotunno T, *et al.* Soil-farming system-food-health; effect of conventional and organic fertilizers on heavy metal (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) content in semolina samples[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, **107**(2): 97-105.
- [ 5 ] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- Li C F, Cao J F, Lv J S, *et al.* Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- [ 6 ] Hawley J K. Assessment of health risk from exposure to contaminated soil[J]. *Risk Analysis*, 1985, **5**(4): 289-302.
- [ 7 ] Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, *et al.* Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals [J]. *Interdisciplinary Toxicology*, 2014, **7**(2): 60-72.
- [ 8 ] Swartjes F A. Human health risk assessment related to contaminated land: state of the art [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, **37**(4): 651-673.
- [ 9 ] Ihedioha J N, Ukoah P O, Ekere N R. Ecological and human health risk assessment of heavy metal contamination in soil of a municipal solid waste dump in Uyo, Nigeria[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, **39**(3): 497-515.
- [ 10 ] Meek M E, Newhook R, Liteplo R G, *et al.* Approach to assessment of risk to human health for priority substances under the Canadian environmental protection act [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 1994, **12**(2): 105-134.
- [ 11 ] Zhao H R, Xia B C, Fan C, *et al.* Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **417-418**: 45-54.
- [ 12 ] 刘芳, 塔西甫拉提·特依拜, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 等. 准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4815-4829.
- Liu F, Tashpolat T, Ilyas N, *et al.* Spatial distribution characteristics of heavy metal pollution and health risk in soil around the coal industrial area of east Junggar basin [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4815-4829.
- [ 13 ] Shen Z J, Xu D C, Li L L, *et al.* Ecological and health risks of heavy metal on farmland soils of mining areas around Tongling City, Anhui, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(15): 15698-15709.
- [ 14 ] 杨敏, 滕应, 任文杰, 等. 石门雄黄矿周边农田土壤重金属污染及健康风险评估[J]. *土壤*, 2016, **48**(6): 1172-1178.
- Yang M, Teng Y, Ren W J, *et al.* Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil around Shimen realgar mine [J]. *Soils*, 2016, **48**(6): 1172-1178.
- [ 15 ] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, **72**(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [ 16 ] He J H, Pan Z Z, Liu D F, *et al.* Exploring the regional differences of ecosystem health and its driving factors in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **673**: 553-564.
- [ 17 ] Liu X, Macedo J, Zhou T, *et al.* Evaluation of the utility efficiency of subway stations based on spatial information from public social media [J]. *Habitat International*, 2018, **79**: 10-17.
- [ 18 ] Wang S J, Wang J Y, Wang Y. Effect of land prices on the spatial differentiation of housing prices: evidence from cross-county analyses in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, **28**(6): 725-740.
- [ 19 ] 陈彦光, 罗静. 城市位序-规模问题的分形理论初探——Zipf 定律的理论来源、异化形式及其统一基础 [J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 1998, **11**(3): 264-268.
- Chen Y G, Luo J. A fractal study on Zipf's law and rank-size rule of cities in an urban system [J]. *Journal of Xinyang Teachers College (Natural Science Edition)*, 1998, **11**(3): 264-268.
- [ 20 ] 谈明洪, 范存会. Zipf 维数和城市规模分布的分维值的关系探讨 [J]. *地理研究*, 2004, **23**(2): 243-248.
- Tan M H, Fan C H. Relationship between Zipf dimension and fractal dimension of city-size distribution [J]. *Geographical Research*, 2004, **23**(2): 243-248.
- [ 21 ] 陈彦光, 刘继生. 城市规模分布的分形和分维 [J]. *人文地理*, 1999, **14**(2): 43-48.
- Chen Y G, Liu J S. Fractals and fractal dimensions of city-size distributions [J]. *Human Geography*, 1999, **14**(2): 43-48.
- [ 22 ] 蒋依依, 温晓金, 刘焱序. 2001-2015 年中国出境旅游流位序规模演化特征 [J]. *地理学报*, 2018, **73**(12): 2468-2480.
- Jiang Y Y, Wen X J, Liu Y X. Evolutionary characteristics of China's outbound tourism flow in rank-size distribution from 2001 to 2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(12): 2468-2480.
- [ 23 ] 郭建科, 陈园月, 于旭会, 等. 1985 年来环渤海地区港口体系位序—规模分布及作用机制 [J]. *地理学报*, 2017, **72**(10): 1812-1826.
- Guo J K, Chen Y Y, Yu X H, *et al.* Rank-size distribution and mechanism of port system in the Bohai Rim during the past thirty years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(10): 1812-1826.
- [ 24 ] 赵媛, 牛海玲, 杨足膺. 我国石油资源流位序-规模分布特征变化 [J]. *地理研究*, 2010, **29**(12): 2121-2131.
- Zhao Y, Niu H L, Yang Z Y. Study on the rank-size distribution and variation of crude oil flow in China [J]. *Geographical Research*, 2010, **29**(12): 2121-2131.
- [ 25 ] 秦越华, 强承魁, 曹丹, 等. 徐州市典型稻区土壤和稻米重金属含量及健康风险评估 [J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(9): 1546-1554.
- Qin Y H, Qiang C K, Cao D, *et al.* Contents and health risk assessment of heavy metals in soils and rice grains from typical rice-growing region of Xuzhou City [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(9): 1546-1554.
- [ 26 ] Baghaie A H, Aghili F. Health risk assessment of Pb and Cd in soil, wheat, and barley in Shazand County, central of Iran [J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2019, **17**(1): 467-477.
- [ 27 ] US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund; Volume I-

- human health evaluation manual ( Part B, development of risk-based preliminary remediation goals) Interim[R]. Washington, DC; Office of Emergency and Remedial Response, U. S. Environmental Protection Agency, 1991.
- [28] Gay J R, Korre A. A spatially-evaluated methodology for assessing risk to a population from contaminated land [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **142**(2): 227-234.
- [29] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷、儿童卷) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013-2016.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population (adults, children) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013-2016.
- [30] 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 等. 矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2919-2926.  
Tian M L, Zhong X M, Zhang Y X, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metal contents in soil and rice of mine contaminated areas [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2919-2926.
- [31] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].  
HJ 25.3-2014, Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites[S].
- [32] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 437-444.  
Wang Y Y, Li F F, Wang X Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 437-444.
- [33] Zhao L, Xu Y F, Hou H, *et al.* Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 654-662.
- [34] Wong S C, Li X D, Zhang G, *et al.* Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **119**(1): 33-44.
- [35] 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 等. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 916-926.  
Yin Y M, Zhao W T, Huang T, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in an E-waste dismantling area [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 916-926.
- [36] Tang L, Deng S H, Tan D, *et al.* Heavy metal distribution, translocation, and human health risk assessment in the soil-rice system around Dongting Lake area, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(17): 17655-17665.
- [37] Wang Y C, Qiao M, Liu Y X, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from wastewater irrigated area, Beijing-Tianjin city cluster, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(4): 690-698.
- [38] 蔡云梅, 黄涵书, 任露陆, 等. 珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3620-3627.  
Cai Y M, Huang H S, Ren L L, *et al.* Levels, sources, and health risk assessments of heavy metals in indoor dust in a college in the Pearl River Delta [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3620-3627.
- [39] 张静, 张衍杰, 方小珍, 等. 道路扬尘PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染特征及健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4071-4076.  
Zhang J, Zhang Y J, Fang X Z, *et al.* Characteristics and health risk assessment of metallic elements in PM<sub>2.5</sub> fraction of road dust [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4071-4076.
- [40] Bignoli G, Goetz L, Sabbioni E. Health risks of chromium from disposed ash of coal-burning power plants [J]. *Science of the Total Environment*, 1988, **71**(3): 571.
- [41] Dehghani S, Moore F, Keshavarzi B, *et al.* Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **136**: 92-103.
- [42] US EPA. Exposure factors handbook [M]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2011.
- [43] 农业农村部办公厅, 生态环境部办公厅. 关于进一步做好受污染耕地安全利用工作的通知 [EB/OL]. <http://www.moa.gov.cn/>, 2019-04-28.
- [44] Guo L, Luo J, Yuan M, *et al.* The influence of urban planning factors on PM<sub>2.5</sub> pollution exposure and implications: a case study in China based on remote sensing, LBS, and GIS data [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 1585-1596.
- [45] Sponder M, Fritzer-Szekeress M, Marculescu R, *et al.* Blood and urine levels of heavy metal pollutants in female and male patients with coronary artery disease [J]. *Vascular Health and Risk Management*, 2014, **10**: 311-317.
- [46] Rinaldi M, Micali A, Marini H, *et al.* Cadmium, organ toxicity and therapeutic approaches: a review on brain, kidney and testis damage [J]. *Current Medicinal Chemistry*, 2017, **24**(35): 3879-3893.
- [47] Li S W, Sun H J, Li H B, *et al.* Assessment of cadmium bioaccessibility to predict its bioavailability in contaminated soils [J]. *Environment International*, 2016, **94**: 600-606.
- [48] Tang W Z, Xia Q, Shan B Q, *et al.* Relationship of bioaccessibility and fractionation of cadmium in long-term spiked soils for health risk assessment based on four in vitro gastrointestinal simulation models [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 1582-1589.
- [49] 张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 等. 沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 248-255.  
Zhang S C, Yao H, Xiang X X, *et al.* Pollution characteristic and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Groundwater of Shen-fu New City in the Hunhe River basin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 248-255.
- [50] 熊俊楠, 李进, 程维明, 等. 西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素 [J]. *地理学报*, 2019, **74**(7): 1374-1391.  
Xiong J N, Li J, Cheng W M, *et al.* Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(7): 1374-1391.

## CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer .....	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Yangquan City .....	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM <sub>2.5</sub> from Taian City During the Summer .....	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan .....	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration .....	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo .....	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City .....	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province .....	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process .....	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning .....	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park .....	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017 .....	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China .....	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China .....	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles .....	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta .....	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring .....	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions .....	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin .....	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization .....	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province .....	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau .....	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir .....	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature .....	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu .....	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China .....	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System .....	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland .....	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies .....	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution .....	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials .....	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics .....	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers .....	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake .....	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water .....	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX .....	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR) .....	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor .....	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure .....	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy .....	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance .....	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge .....	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City .....	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil .....	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta .....	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria .....	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China .....	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N <sub>2</sub> O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain .....	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors .....	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite .....	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils .....	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As <sup>5+</sup> Stress .....	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)