

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例	杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)
基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径	向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)
城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用	张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)
基于可解释性机器学习的城市 O ₃ 驱动因素挖掘	董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)
基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析	朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)
基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O ₃ 来源解析	王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)
基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测	朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)
2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析	李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)
夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响	杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)
气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别	杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)
2000~2021 年成渝城市群 PM _{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测	徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)
基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM _{2.5} 小时浓度估算	吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)
2013~2021 年邢台 PM _{2.5} 重污染过程输送和增长特性	江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)
基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源	朱书慧 (3760)
机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征	于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)
沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献	关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)
疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估	云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)
西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势	王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)
淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价	徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)
雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应	王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)
流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例	刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)
南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化	郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)
闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析	杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)
金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素	燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)
嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性	竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)
水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响	王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)
典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探	吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)
太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响	俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)
基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算	张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)
千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别	俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)
沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征	李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)
外秦淮河底泥污染及疏浚效果	张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)
新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为	葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)
镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制	苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)
环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H ₂ O ₂ 氧化水中有机微污染物	刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)
Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制	朱敬林, 汪舒 (3990)
微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征	谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)
中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价	王静, 魏恒, 潘波 (4006)
渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价	蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)
基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例	方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)
乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价	范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)
荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制	黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)
近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展	赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)
改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展	吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)
沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析	赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)
两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果	梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)
秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响	王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)
秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质	赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)
基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断	黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)
地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)
浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险	张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)
生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响	刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)
低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响	周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)
沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响	乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)
大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征	刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)
马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响	姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)
《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)	

地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价

张传华¹, 王钟书², 刘力^{1*}, 刘燕^{1,3}

(1. 重庆理工大学管理学院, 重庆 400054; 2. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042; 3. 重庆市规划和自然资源调查监测院, 重庆 401120)

摘要: 为了研究地质高背景区土壤及农产品的污染程度及原因, 为农产品安全生产及土壤重金属风险管控提供依据, 在重庆市巫山县抱龙镇耕地区采集了土壤-玉米协同样品 36 套, 分析了土壤-玉米中重金属 (Cd、Hg、Pb、As 和 Cr) 含量及土壤 pH, 利用内梅罗综合污染指数法 (P_N) 和综合质量影响指数 (IICQ) 对土壤-玉米中重金属的污染程度进行了评价, 并分析了土壤重金属来源及玉米重金属超标的影响因素。结果表明, 研究区土壤重金属含量的平均值高于全国及重庆土壤背景值, 土壤重金属富集效应明显。Cd 是土壤-玉米超标的主要因子, 土壤和玉米 Cd 的总体超标率分别为 91.67% 和 30.55%。内梅罗综合污染指数评价结果显示, 土壤以重度污染为主, 占比 63.89%, 玉米轻度污染、中度污染和重度污染的占比分别为 5.56%、11.11% 和 11.11%。土壤-玉米综合质量影响指数以中度和重度污染为主, 分别占比 44.44% 和 47.22%。从重金属污染空间分布来看, 玉米与土壤污染区域不一致。土壤重金属污染主要受到二叠系和三叠系地层的影响, 与黑色岩系和灰岩区次生富集作用有关。玉米 Cd 含量主要受到土壤 pH 的影响, 碱性条件下玉米相对安全。建议根据地层分布对研究区土壤进行风险分区, 对高风险区进行种植结构调整, 对于中低风险区, 建议加强农业投入品的监测, 减少土壤重金属的输入。在酸性土壤区开展农艺调控, 改善土壤酸化问题, 种植玉米重金属低累积品种, 降低农产品超标风险。

关键词: 地质高背景; 重金属; 土壤-玉米; 污染来源; 风险管控

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-4142-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202208050

Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area

ZHANG Chuan-hua¹, WANG Zhong-shu², LIU Li^{1*}, LIU Yan^{1,3}

(1. College of Management, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China; 3. Chongqing Institute of Surveying and Monitoring for Planning and Natural Resources, Chongqing 401120, China)

Abstract: The aim of this study was to analyze the pollution degree and causes of soil and agricultural products in high geological background areas and to provide a basis for the safe production of agricultural products and the risk control of soil heavy metals. A total of 36 sets of soil-corn collaborative samples were collected in the farming area of Baolong Town, Wushan County, Chongqing City; the contents of heavy metals (Cd, Hg, Pb, As, and Cr) and soil pH in the soil-maize were analyzed, the pollution degree of heavy metals in the soil-maize was evaluated using the Nemerow comprehensive pollution index method (P_N) and comprehensive quality impact index (IICQ). The sources of heavy metals in the soil and the influencing factors of heavy metal excess in corn were also analyzed. The results showed that the average value of soil heavy metal content in the study area was higher than the national and Chongqing soil background values, and the soil heavy metal enrichment effect was obvious. Cd was the main factor of soil-maize exceeding the standard, and the overall exceeding rates of soil and corn Cd were 91.67% and 30.55%, respectively. The evaluation results of the Nemerow comprehensive pollution index showed that the soil was dominated by heavy pollution, accounting for 63.89%. The soil-maize comprehensive quality impact index was dominated by moderate and severe pollution, accounting for 44.44% and 47.22%, respectively. From the perspective of the spatial distribution of heavy metal pollution, corn and soil pollution areas were inconsistent. Soil heavy metal pollution was mainly affected by the Permian and Triassic strata and was related to the secondary enrichment of black rock series and limestone areas. The Cd content of maize was mainly affected by soil pH, and maize was relatively safe under alkaline conditions. It is suggested that the soil in the study area should be divided into risk zones according to the stratum distribution, and the planting structure should be adjusted in the high-risk areas. For the low- and medium-risk areas, it is recommended to strengthen the monitoring of agricultural inputs and reduce the input of heavy metals in the soil. Additionally, we recommend carrying out agronomic regulation in acidic soil areas to improve soil acidification, plant corn varieties with low accumulation of heavy metals, and reduce the risk of agricultural products exceeding the standard.

Key words: high geological background; heavy metal; soil-corn; pollution source; risk management and control

土壤及农产品安全是生态文明建设中重要的组成部分, 尤其是湖南“镉大米”事件, 使得农产品安全成为社会各界关注的焦点之一^[1,2]。全国土壤污染状况调查结果显示, 我国土壤总的点位超标率为 16.1%, 以无机型为主^[3]。就耕地土壤而言, 点位超标率为 19.4%, 主要污染物为镉、镍、铜、砷、汞和铅等元素, 污染区域主要分布在长江三角洲、珠江三角洲和东北老工业基地等部分区域^[4,5]。西南地

区由于地质高背景及人为因素的叠加, 土壤重金属污染范围更大, 土壤-农作物超标问题更加显著^[6]。

在 2020 年 12 月召开的中央农村工作会议上,

收稿日期: 2022-08-06; 修订日期: 2022-09-11

基金项目: 国家社会科学基金重点项目 (20AJY005); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (cstc2019jcsx-gksb0241)

作者简介: 张传华 (1978 ~), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为土壤污染防治, E-mail: 2091948438@qq.com

* 通信作者, E-mail: liul428@cqu.edu.cn

习近平总书记指出,要确保国家粮食安全,把中国人的饭碗牢牢端在自己手中,将农产品安全问题提升到了国家层面。各地亟需开展土壤-农产品污染状况调查,厘清地区污染特征及成因,根据土壤-农产品重金属污染程度进行分区管理,针对性提出风险管控建议,确保农产品安全生产^[7,8]。

巫山县位于重庆市东部,处三峡库区腹心,素有“渝东北门户”之称,属大巴山弧形构造、川东褶皱带及川鄂湘黔隆褶带三大构造体系结合部,地质条件复杂^[9]。因大巴山、巫山、七曜山三大山脉交汇于巫山县境内,形成了典型的喀斯特地貌,区域内以煤为主的黑色岩系发育广泛,是灰岩次生富集和黑色岩系叠加的重金属地质高背景区^[10,11],在西南地区有着很好的代表性。本文以巫山县抱龙镇为研究对象,在耕地地区采集土壤-玉米样品,开展土壤和玉米单项污染及综合质量评价,通过查明特殊地质背景区土壤-农产品污染程度及分布,厘清土壤及农产品污染成因,旨在为地质高背景区重金属污染管控及分区治理提供示例。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本次研究区为重庆市巫山县抱龙镇,位于重庆市巫山县东南部,距县城 75 km。东接笃坪乡、培石乡;南与湖北省建始县接壤,距建始县城 70 km;西连官渡镇;北临长江。面积 148.13 km²。抱龙镇地形南北高、中间低,境内沟壑纵横,峰峦挺拔,南北两岸是高山陡坡,中间夹一大深谷,大部分为中、低山,兼有丘陵与平坝;主要山脉有巫山山脉。

研究区属亚热带季风气候,多年平均气温 19.8℃。境内属长江流域,主要有抱龙河、响水沟等河流。主要种植的农作物为玉米和红薯。主要地层为二叠系、三叠系和志留系,岩性以灰岩和黑色页岩为主。矿藏资源主要为铁矿、煤矿和石英石矿。

1.2 样品采集与分析

本次样品均为耕地土壤,根据研究区耕地分布情况,采用均匀布点的方式共布设 36 个土壤样点,采集深度为 0~20 cm(图 1)。以确定点位为中心划定采样区域,用 5 点混合采样法(根据地块形状可选取双对角线 5 点混合采样法、梅花 5 点混合采样法或 S 型 5 点混合采样法)采样,每个分样点的采样方法和采样量相同,采样后将所有样品混匀后使用四分法分取样品。玉米与土壤样品协同采样,采集农产品可食用部分,然后等量混匀组成一个混合样品。

样品分析方法参照文献^[12]。土壤 pH 采用 1:2.5(质量浓度)的土壤-水悬浮液,用 pH 计直接

测定;土壤 Cd 和 Pb 含量测定时,用硝酸、氢氟酸和高氯酸分解溶样,硝酸提取,最后用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行检测;土壤 Cr 含量测定时,用盐酸、硝酸、氢氟酸和高氯酸分解溶样,盐酸提取,并用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)进行检测;土壤 As 含量测定时,用王水溶解样品,盐酸提取,并用原子荧光光谱法(AFS)进行含量测定;土壤 Hg 含量测定时,用王水溶解样品,并用原子荧光光谱法(AFS)进行含量测定。玉米 Hg 含量采用汞原子荧光光度计(AFS)测定,玉米 As、Cr、Cd 和 Pb 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。

采用分析国家一级标准物质的方法进行精密度和准确度控制,按照总样量的 5% 以密码样插入同类国家一级标准物质(GSS-7、GSS-9、GSS-12、GSS-17、GSS-21、GSS-25、GSS-26 和 GSS-27)和重复样来进行分析对比。以重复样分析结果评定本次分析精密度(RD),以密码插入的同类国家一级标准物质的测试结果检验本次分析的准确度(RE),计算公式如下:

$$RE = \Delta \lg \bar{C}(\text{GSS}) = |\lg \bar{C}_i - \lg C_r| \quad (1)$$

$$RD = \frac{(1/n) \sum |C_1 C_2|}{(C_1 + C_2)/2} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\Delta \lg \bar{C}(\text{GSS})$ 为标准物质平均对数偏差,表示分析的准确度, C_i 为每个标准物质*i*元素的单次分析结果, $\bar{C}_i$ 为每个标准物质重复分析后元素*i*测试结果的平均值, C_r 为该标准物质对应元素的标准值; n 为标准物质的件数, C_1 和 C_2 为常规测试及重复样的测试分析结果。RE 均小于 2.0%,RD 均小于 1.0%。

每一分析批次玉米样品中插入同类型 2 个标准物质与样品同时分析,并计算单个样品单次测试值的相对误差。采用重复分析的方法控制样品分析的精密度,每件样品进行 100% 的重复分析。结果显示,相对误差 $\leq 10\%$,双份分析的相对双差 $\leq 15\%$ 。

土壤及玉米样品的分析结果均满足文献^[13]的要求。

1.3 土壤-玉米重金属污染评价

内梅罗综合污染指数法是基于单因子指数法而衍生出的综合性污染评价方法,既考虑了单因子污染指数的平均值以及最大值,又能够反映各污染物对土壤的影响,具有突出最大污染物对土壤环境质量的优点,计算公式如下^[14]:

$$P_i = C_i/S_i \quad (3)$$

$$P_N = \sqrt{(P_{i\text{avg}}^2 + P_{i\text{max}}^2)/2} \quad (4)$$

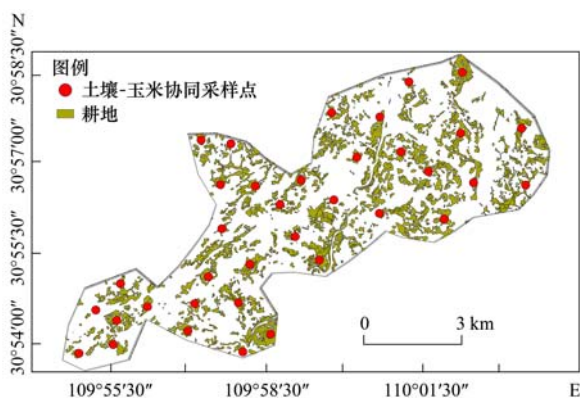


图1 土壤-玉米采样点位示意

Fig. 1 Bitmap of soil-maize sampling sites

式中, P_N 为内梅罗综合污染指数, P_i 为单因子污染指数, P_{avg} 为单因子污染指数的平均值, P_{imax} 为单因子污染指数的最大值, C_i 为土壤或农产品中重金属的实测值, S_i 为土壤或农产品的评价标准, 取《土壤环境质量 农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[15] 中的土壤安全筛选值, 农产品评价标准取《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)^[16] 给出的农产品安全限值. 内梅罗综合污染指数(P_N)的分级标准为: $P \leq 0.7$, 无污染; $0.7 < P \leq 1.0$, 尚未污染(警戒线); $1.0 < P \leq 2.0$, 轻度污染; $2.0 < P \leq 3.0$, 中度污染; $P > 3.0$, 重度污染.

土壤和农产品综合质量影响指数法将耕地土壤及农产品中重金属的含量有效结合, 综合考虑了土壤环境质量标准、土壤元素背景值和农产品安全限值, 用以评价耕地重金属的复合污染程度, 计算公式如下^[17,18]:

$$DDDB = N^{-1} \cdot \sum_{i=1}^N (C_i/C_{Bi})^{1/n} \quad (5)$$

$$RIE = N^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (C_i/S_i)^{1/n} \quad (6)$$

$$DDSB = N^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (C_{Si}/C_{Bi})^{1/n} \quad (7)$$

$$QIAP = N^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (C_{APi}/C_{LSi})^{1/n} \quad (8)$$

$$IICQ_s = X \cdot (1 + RIE) + Y \cdot DDDB/DDSB \quad (9)$$

$$IICQ_{AP} = Z \cdot \left(1 + \frac{QIAP}{k}\right) + \frac{QIAP}{k \cdot DDSB} \quad (10)$$

$$IICQ = IICQ_s + IICQ_{AP} \quad (11)$$

式中, DDDB 为土壤元素测定浓度偏离背景值程度; RIE 为土壤相对影响当量; DDSB 为土壤环境质量标准偏离背景值程度; N 为重金属个数, $N=5$; n 为元素 i 的氧化数, Cr 取 3, As 取 5, Cd、Hg 和 Pb 取 2; QIAP 为农产品质量指数; C_i 和 C_{APi} 分别为土壤和农产品重金属 i 的含量, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_{Bi} 为

土壤元素 i 的背景值, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_{Si} 和 C_{LSi} 分别为元素 i 的环境质量标准和农产品安全标准, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; X 和 Y 分别为土壤元素含量超过环境质量标准值和背景值的数目; Z 为农产品中超过安全标准的元素数目; k 为校正因子, 取 5. IICQ 为综合质量影响指数. 综合质量影响指数(IICQ)包含土壤综合质量影响指数($IICQ_s$)和农产品综合质量影响指数($IICQ_{AP}$)两部分. 土壤背景值取重庆市土壤重金属背景值^[12], Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 的背景值分别为 0.28、0.069、6.62、28.1 和 74.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 综合质量影响指数(IICQ)的分级标准为: $IICQ \leq 1$, 清洁; $1 < IICQ \leq 2$, 轻微污染; $2 < IICQ \leq 3$, 轻度污染; $3 < IICQ \leq 5$, 中度污染; $IICQ > 5$, 重度污染.

1.4 地统计分析

由于研究区地形变化明显, 且耕地较分散, 为了保障空间插值结果的准确性, 采用普通克里格法(OK)进行空间插值分析, 该方法以变异函数理论模型和结构分析为基础, 在局部区域内对区域变量进行无偏最优估计, 不仅考虑了距离远近的影响, 还考虑了已知点的位置和属性值整体的空间分布和格局, 是地统计学的主要插值方法之一^[19]. 因此, 重金属污染指数空间分布、综合质量影响指数分布和 pH 值分布图均采用普通克里格法(OK)进行插值分析.

1.5 数据处理方法

利用 Excel 2010 进行数据整理, 利用 ArcGIS 10.2 完成进行插值研究, 图件绘制利用 ArcGIS 10.2、CorelDRAW X8 和 Excel 2010 完成.

2 结果与讨论

2.1 土壤-玉米中重金属的含量

对研究区土壤重金属的含量进行统计分析, 结果见表 1. 土壤 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{As})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 范围分别为 0.23 ~ 6.67、0.05 ~ 0.39、5.54 ~ 35.40、7.86 ~ 28.90 和 57.90 ~ 256.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 2.32、0.12、27.89、14.24 和 115.80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别是全国土壤背景值的 16.93、4.61、1.26、1.58 和 2.18 倍, 与重庆土壤背景的比值分别为 8.28、1.73、0.99、2.15 和 1.55. 可以看出, 研究区土壤重金属含量富集效应明显, 土壤重金属超标风险高, 尤以土壤 Cd 最为显著.

土壤 Cd、Hg、Pb、As 和 Cr 的变异系数分别为 0.78、0.58、0.16、0.38 和 0.42, 除 Pb 外, 其余重金属均表现为强变异, 说明其含量在空间上分布不均匀, 土壤中的含量受到多种因素的影响^[21].

本研究采集的土壤样品均位于耕地区域,因此,参照文献[15]对土壤环境质量进行评价.对比土壤污染风险筛选值和风险管制值,土壤 Cd 总体超标率高达 91.67%,其中介于筛选值和管制值之间的点位占比 33.33%,大于管制值的点位占比为 58.33%,土壤超标问题显著(图 2).土壤 As 和 Cr 超过筛选值的占比分别为 8.33% 和 13.89%,均未超过管制值.其余重金属含量均未超过风险筛选值.

研究区土壤 pH 的变化范围为 4.29 ~ 8.36,中位值为 6.43, $pH \leq 5.5$ 、 $5.5 < pH \leq 6.5$ 、 $6.5 < pH \leq 7.5$ 和 $pH > 7.5$ 的点位占比分别为 22.22%、30.56%、25% 和 22.22%.有研究表明,土壤重金属的风险程度与土壤 pH 相关性较高,碱性条件下土壤重金属活性较低,农作物相对安全^[22],研究区土壤 pH 在不同酸碱度区间内分布相对均匀,这有利于土壤重金属污染风险分区管控.

表 1 土壤重金属元素含量描述性统计¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of soil heavy metal element content							
元素	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数	$K_1^{[20]}$	$K_2^{[12]}$
Cd	0.23	6.67	2.32	1.81	0.78	16.93	8.28
Hg	0.05	0.39	0.12	0.07	0.58	4.61	1.73
Pb	5.54	35.40	27.89	4.58	0.16	1.26	0.99
As	7.86	28.90	14.24	5.49	0.38	1.58	2.15
Cr	57.90	256.00	115.80	48.99	0.42	2.18	1.55

1) K_1 和 K_2 分别表示土壤元素平均值全国和重庆土壤背景值的比值

玉米中 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{As})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 范围分别为 0.02 ~ 1.34、0.001 ~ 0.003、0.01 ~ 0.04、0.02 ~ 0.05 和 0.01 ~ 0.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值分别为 0.18、0.002、0.02、0.03 和 0.15

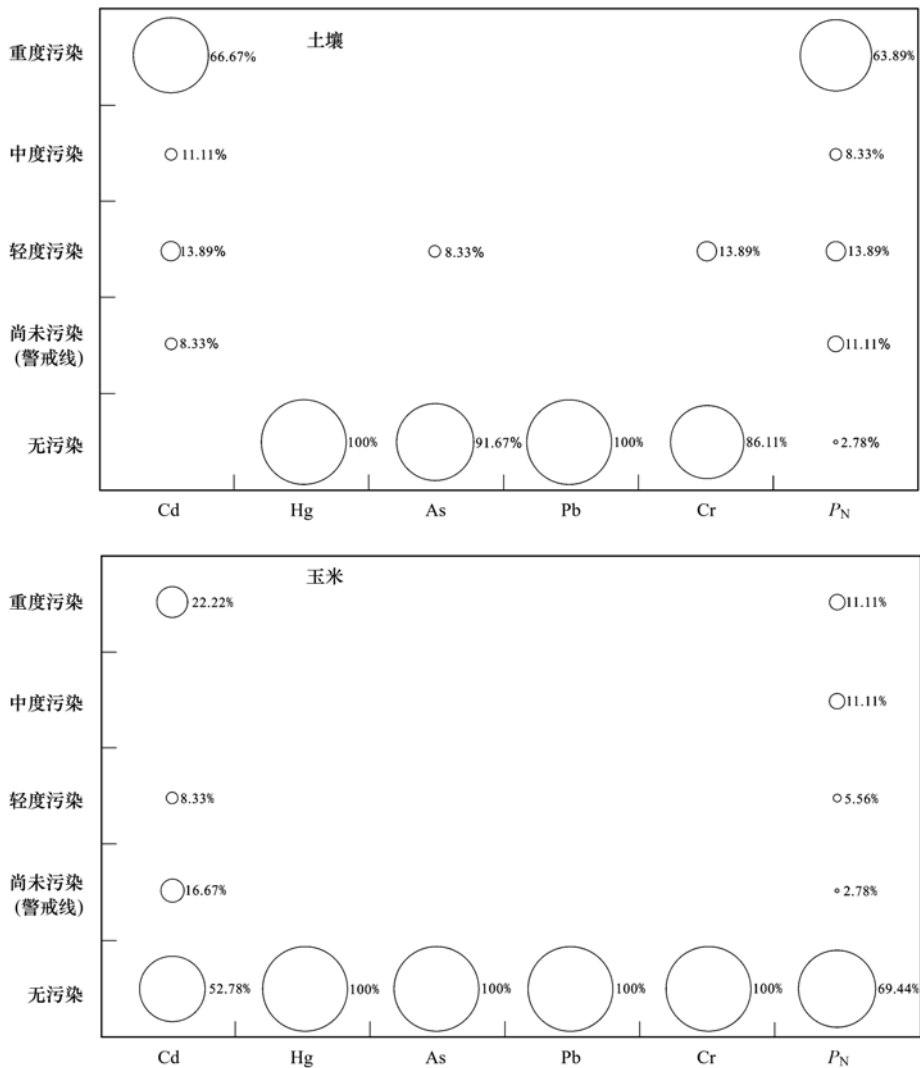


图 2 土壤-玉米内梅罗综合污染指数评价结果

Fig. 2 Evaluation results of soil-corn Nemerow comprehensive pollution index

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 利用文献[16]给出的玉米重金属安全限值对研究区玉米的安全性进行评价,结果显示,玉米Cd的总体超标率为30.55%,轻度超标率(超过安全限值1倍)为8.33%,重度超标率(超过安全限值2倍及以上)为22.22%,其余重金属不超标. 研究区土壤-玉米中主要的超标因子为Cd,且超标问题显著.

2.2 土壤-玉米重金属污染评价

利用式(1)和式(2)对土壤-玉米进行重金属污染评价,结果见图2. 土壤Cd的单因子污染评价结果显示,无污染、尚未污染(警戒线)、轻度污染、中度污染和重度污染的占比分别为0%、8.33%、13.89%、11.11%和66.67%,以重度污染为主. 土壤As和Cr轻度污染的占比分别为8.33%和13.89%. 其余重金属不存在污染问题. 土壤内梅罗综合污染指数无污染、尚未污染(警戒线)、轻度污染、中度污染和重度污染的占比分别为2.78%、11.11%、13.89%、8.33%和63.89%,以重度污染为主,研究区土壤重金属污染问题显著. 玉米内梅罗综合污染指数评价结果显示,无污染、尚未污染(警戒线)、轻度污染、中度污染和重度污染的占比分别为69.44%、2.78%、5.56%、11.11%和11.11%,主要污染因子为Cd.

研究区土壤内梅罗综合污染指数空间分布情况见图3. 土壤重度污染主要分布在东北及西南方向,仅中部和东南地区存在部分轻度污染区,可见研究区土壤重金属污染问题严重,造成农作物超标的风险高.

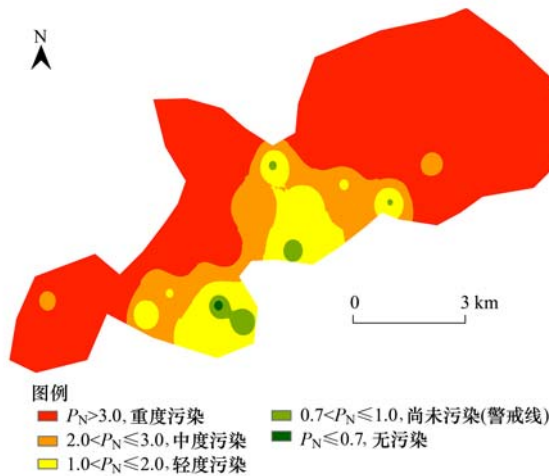


图3 研究区土壤内梅罗综合污染指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the Nemerow comprehensive pollution index in the soil in the study area

图4为玉米内梅罗综合污染指数分布,对比图3可以发现,研究区玉米重金属污染程度与土壤污染分布区存在明显差异,玉米重度、中度污染区主

要分布在研究区东北部分区域,北部、中部和南部存在点状重度和中度污染区.

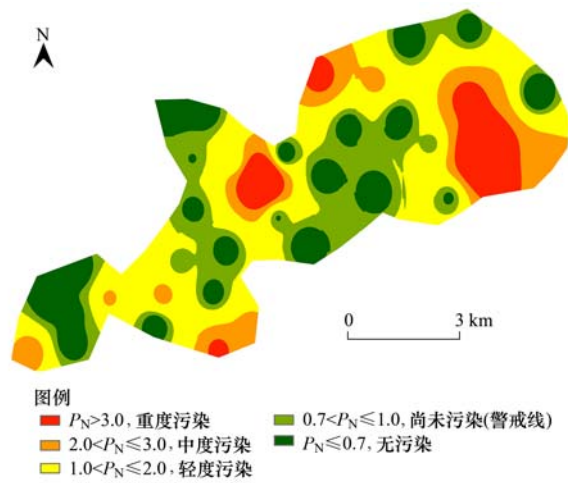


图4 研究区玉米内梅罗综合污染指数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the Nemerow comprehensive pollution index in the corn in the study area

利用式(3)~(9)计算研究区土壤-玉米综合质量,结果见表2. IICQ分级结果显示,处于清洁、轻微污染、轻度污染、中度污染和重度污染的点位占比分别为2.78%、2.78%、2.78%、44.44%和47.22%,以中度和重度污染为主. 研究区土壤-玉米综合质量影响指数(IICQ)的分布情况见图5. 除研究区东南部存在点状无污染-轻微污染区外,其余地区均表现为中度及以上污染,研究区重金属污染问题显著.

表2 土壤-玉米综合质量各指标计算结果

Table 2 Calculation results of each index of soil-maize

指标	comprehensive quality		
	最小值	最大值	平均值
DDDB	0.93	2.04	1.44
RIE	0.65	1.52	1.01
DDSB	1.97	2.53	2.18
QIAP	0.12	1.02	0.49
IICQ _S	0.47	10.46	5.23
IICQ _{AP}	0.01	1.30	0.39
IICQ	0.51	11.67	5.62

2.3 重金属来源浅析及风险管控建议

一般的,土壤重金属的含量受到自然因素和人为因素的影响,人为因素主要包括工矿活动、交通和农业活动等^[23]. 经现场调查发现,研究区地处山区,交通欠发达,不宜机耕,且主要劳动力以65岁以上老年人为主,农业活动以传统耕作方式为主,农药使用极少,化肥以农家肥为主. 本次土壤样品均采集于耕地土壤中,农业活动可能对土壤重金属存在一定程度的影响,但并非主导因素. 土壤重金属的另一个来源为自然因素,主要和成土母质以及成土过程

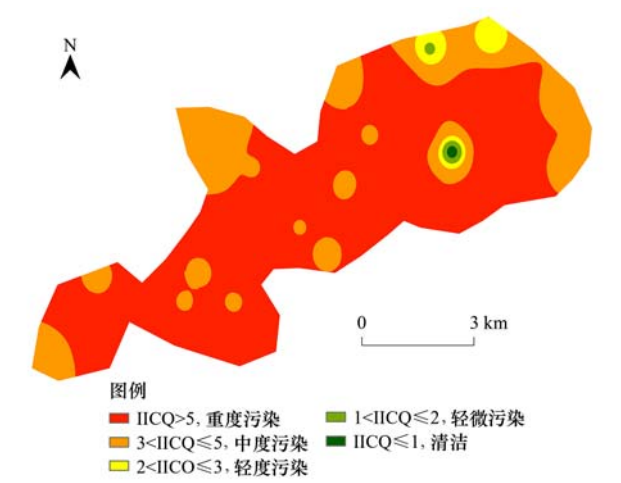


图5 研究区土壤-玉米综合质量影响指数分布
Fig. 5 Distribution of soil-maize comprehensive quality impact index in the study area

有关^[24].图6为研究区地层分布,与图3对比发现,泥盆系和志留系分布区土壤污染程度相对较低,二叠系和三叠系地层分布区污染问题显著.分别统计土壤重金属含量在不同地层分布区的含量,结果见图7.土壤 $\omega(\text{Cd})$ 在不同地层区大小顺序为:二叠系($3.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>三叠系($3.08\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>泥盆系($1.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>志留系($0.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),二叠系和三叠系地层分布区显著高于泥盆系和志留系.土壤 $\omega(\text{As})$ 的大小顺序为:三叠系($15.98\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>泥盆系($13.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>二叠系($13.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>志留系($13.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),高含量点位主要集中在三叠系分布区.土壤 $\omega(\text{Cr})$ 的大小顺序为:三叠系($134.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>泥盆系($119.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>二叠系($118.27\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>志留系($80.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其分布规律与土壤As相似.土壤Hg和Pb含量在不同地层分布区变化幅度较小.

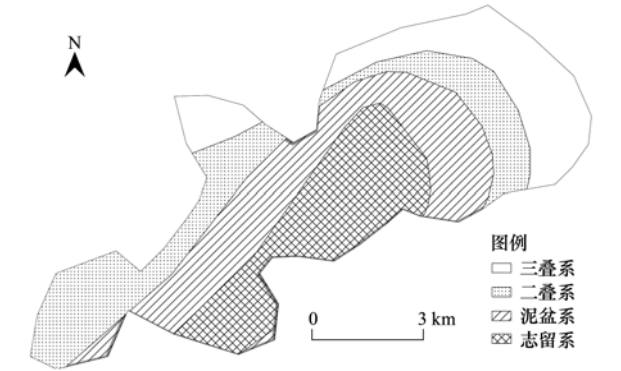


图6 研究区地层分布
Fig. 6 Stratigraphic distribution map of the study area

调查发现,研究区二叠系地层为孤峰组(P_2m),岩性以黑色页岩为主,三叠系以大冶组(T_1d),岩性以灰岩为主.王锐等^[25,26]对重庆市渝东南和渝东北

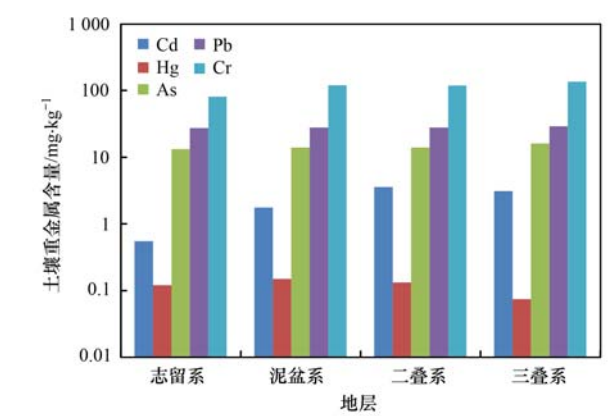


图7 研究区土壤重金属在不同地层区的含量
Fig. 7 Contents of soil heavy metals in different strata in the study area

地质高背景区土壤重金属来源及成因进行了研究,发现黑色页岩由于含有大量的有机质,对Cd等重金属有着很强的吸附作用,使得母岩中重金属的基底值较高,进而导致上覆土壤中重金属含量较高,且黑色岩系中硫化物含量丰富,Cd属于亲硫元素,其地球化学行为受到硫化物的影响较大;灰岩中土壤重金属含量本身很低,但在成土过程中,由于发生次生富集作用,主要与 Cd^{2+} 和 Ca^{2+} 的类质同象作用有关.因此,土壤Cd主要受到二叠系和三叠系地层的影响,而土壤Cr和As主要受到三叠系地层的影响,地质高背景成因主要和黑色岩系及灰岩的次生富集作用有关,这与余涛等^[27]对孤峰组(P_2m)和大冶组(T_1d)土壤重金属含量及来源的研究结果一致.

图8为研究区土壤pH的分布,与图4对比发现,玉米重金属超标区域与土壤酸性区分布在空间上大致契合,进一步分析农产品超标因子Cd含量与土壤pH的相关关系,结果见图9.可以看出,二者具有显著的负相关关系,碱性土壤中玉米Cd含量相对较低,除个别点位外,玉米Cd含量多低于安全标准限值.但在酸性土壤区,玉米Cd超标问题显著.有研究发现,重庆地区农产品主要超标元素为Cd,而土壤pH是控制Cd地球化学行为的主要因

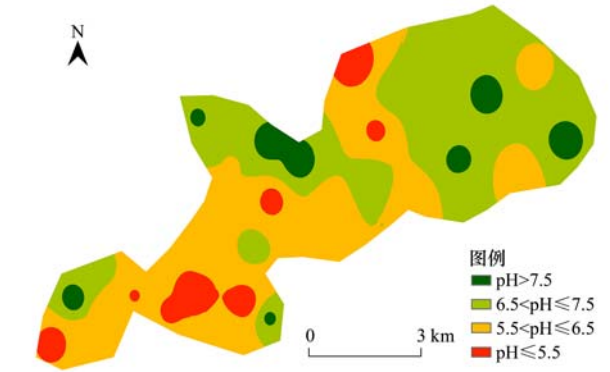


图8 研究区土壤pH空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of soil pH in the study area

子,直接影响了 Cd 在土壤中的吸附解吸及其有效性^[28]. 在酸性条件下,土壤溶液中阳离子含量较多,与土壤 Cd 形成竞争关系,促进 Cd 的解吸附,提高了 Cd 的活动性,进而导致农产品超标风险提高. 中性和碱性条件下,土壤 Cd 易与其他土壤组分形成沉淀或螯合物,活性大大降低^[29]. 因此,土壤 pH 是研究区农产品风险管控的主要关注因子.

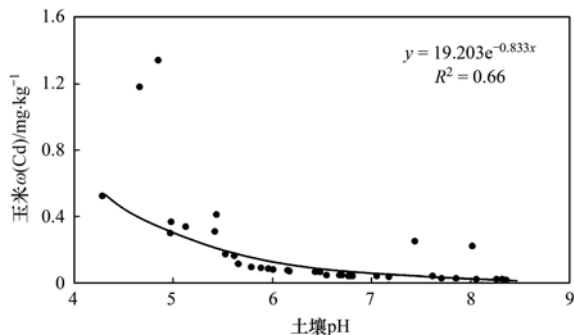


图9 玉米 Cd 含量与土壤 pH 的相关关系

Fig. 9 Correlation between corn Cd content and soil pH

基于上述讨论分析,建议根据地层分布对研究区土壤进行风险分区,对高风险区进行种植结构调整,种植对重金属富集程度较弱的农产品品种,例如发展特色水果等,或者种植非食用农产品,发展养殖业,加长食物链,减少最终产品中重金属的含量^[30]. 对于中低风险区,建议加强农业投入品的监测,引导当地农户购置重金属含量合格的化肥及农药等投入品,减少土壤重金属的输入. 为了提高农产品的安全性,建议在酸性土壤区开展农艺调控,调节土壤 pH,改善土壤酸化问题^[31],种植玉米重金属低累积品种^[32],降低农产品超标风险.

3 结论

(1)研究区土壤 Cd、Hg、Pb、As 和 Cr 含量平均值分别是全国土壤背景值的 16.93、4.61、1.26、1.58 和 2.18 倍,是重庆土壤背景值的 8.28、1.73、0.99、2.15 和 1.55 倍,土壤重金属含量富集效应明显. 土壤 Cd 总体超标率高达 91.67%,大于管制值的点位占比为 58.33%,土壤 As 和 Cr 超过筛选值的占比分别为 8.33% 和 13.89%,未超过管制值. 玉米 Cd 的总体超标率为 30.55%,轻度和重度超标率分布为 8.33% 和 22.22%. 其余重金属含量均未超标.

(2)土壤内梅罗综合污染指数以重度污染为主,占比 63.89%. 玉米内梅罗综合污染指数轻度污染、中度污染和重度污染的占比分别为 5.56%、11.11% 和 11.11%. 土壤-玉米主要污染因子为 Cd. 土壤-玉米综合质量影响指数(IICQ)轻微污染、轻度污染、中度污染和重度污染的点位占比分别为

2.78%、2.78%、44.44% 和 47.22%,以中度和重度污染为主.

(3)土壤重度污染主要分布在东北及西南方向,玉米重度、中度污染区主要分布在研究区东北部分区域,北部、中部和南部存在点状重度、中度污染区,玉米与土壤污染区域不一致. 土壤-玉米综合质量影响指数(IICQ)显示,中度污染和重度污染占比为 44.44% 和 47.22%,重金属污染问题显著.

(4)研究区土壤重金属的来源主要受到地层分布的影响,土壤 Cd 主要受到二叠系和三叠系地层的影响,与黑色岩系和灰岩区次生富集作用有关,而土壤 Cr 和 As 主要受到三叠系地层的影响,主要和灰岩的次生富集有关. 玉米 Cd 含量主要受到土壤 pH 的影响,碱性条件下玉米相对安全.

参考文献:

- [1] 徐建明,刘杏梅. “十四五”土壤质量与食品安全前沿趋势与发展战略[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1143-1154.
Xu J M, Liu X M. Frontier trends and development strategies of soil quality and food safety in the 14th Five-Year Plan[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1143-1154.
- [2] Wang M E, Chen W P, Peng C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, Southern China[J]. Chemosphere, 2016, 144: 346-351.
- [3] 环境保护部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm, 2021-07-20.
- [4] 宋波,王佛鹏,周浪,等. 广西高镉异常区水田土壤 Cd 含量特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2443-2452.
Song B, Wang F P, Zhou L, et al. Cd content characteristics and ecological risk assessment of paddy soil in high cadmium anomaly area of Guangxi[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2443-2452.
- [5] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, et al. Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [6] Kong X Y, Liu T, Yu Z H, et al. Heavy metal bioaccumulation in rice from a high geological background area in Guizhou Province, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(10), doi: 10.3390/ijerph15102281.
- [7] 黄国鑫,刘瑞平,杨瑞杰,等. 我国农用地土壤重金属污染风险管控研究进展与实践要求[J]. 环境工程, 2022, 40(1): 216-223.
Huang G X, Liu R P, Yang R J, et al. Research process of risk management and control and their application requirements for farmland soil heavy metal contamination in China[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(1): 216-223.
- [8] 王彬辉,叶萍. 我国农用地污染风险管控制度问题及其完善[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2021, 22(6): 90-96.
Wang B H, Ye P. Problems and improvement of soil pollution risk management and control system of agricultural land in China[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Social

- Sciences), 2021, **22**(6): 90-96.
- [9] 温汉捷, 裴愉卓, 凌宏文, 等. 中国早古生代若干高硒黑色岩系中层状硅质岩的地球化学特征及其成因意义[J]. 沉积学报, 2003, **21**(4): 619-626.
- Wen H J, Qiu Y Z, Ling H W, *et al.* Geochemistry and genesis of bedded cherts in some typical eopaleozoic high selenium black shales, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, **21**(4): 619-626.
- [10] 王秀平, 牟传龙, 肖朝晖, 等. 湖北鹤峰地区二叠系大隆组黑色岩系成因—来自鹤地 1 井的元素地球化学证据[J]. 石油学报, 2018, **39**(12): 1355-1369.
- Wang X P, Mou C L, Xiao Z H, *et al.* Genesis of black rock series of upper Permian Dalong Formation in Hefeng area, Hubei province: an evidence from the analysis of element geochemistry in Well HD1[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2018, **39**(12): 1355-1369.
- [11] 穆德苗, 孙约兵. 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 965-974.
- Mu D M, Sun Y B. Safety production threshold and land quality classification of vegetable Pb in high geological background area of Southwest China[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 965-974.
- [12] Yan M S, Ding X L, Lei J L, *et al.* Potential ecological and health risk assessment of different kiwifruit orchards in Qianjiang district, Chongqing city, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(3): 3088-3105.
- [13] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [14] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 886-894.
- Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 886-894.
- [15] 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].
- [16] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [17] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(12): 2365-2378.
- Wang Y J, Wu T L, Zhou D M, *et al.* Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(12): 2365-2378.
- [18] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 一种农田土壤重金属影响评价的新方法: 土壤和农产品综合质量指数法[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(7): 1225-1232.
- Wang Y J, Liu C, Zhou D M, *et al.* A new approach for evaluating soil heavy metal impact: a comprehensive index combined soil environmental quality and agricultural products quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(7): 1225-1232.
- [19] 张金兰, 欧阳婷萍, 黄铁兰, 等. 农田表层土壤镉的典型空间插值方法对比研究[J]. 生态科学, 2017, **36**(6): 130-136.
- Zhang J L, Ouyang T P, Huang T L, *et al.* Comparison of typical interpolation methods for spatial distribution of Cd in soil[J]. *Ecological Science*, 2017, **36**(6): 130-136.
- [20] 王学求, 周建, 徐善法, 等. 全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征[J]. 中国地质, 2016, **43**(5): 1469-1480.
- Wang X Q, Zhou J, Xu S F, *et al.* China soil geochemical baselines networks: data characteristics[J]. *Geology in China*, 2016, **43**(5): 1469-1480.
- [21] Jiang F, Ren B Z, Hursthouse A, *et al.* Distribution, source identification, and ecological-health risks of potentially toxic elements (PTEs) in soil of thallium mine area (southwestern Guizhou, China)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(16): 16556-16567.
- [22] 王锐, 胡小兰, 张永文, 等. 重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1864-1870.
- Wang R, Hu X L, Zhang Y W, *et al.* Bioavailability and influencing factors of soil Cd in the major farming areas of Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1864-1870.
- [23] 赵东杰, 王学求. 滇黔桂岩溶区河漫滩土壤重金属含量、来源及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(4): 1609-1619.
- Zhao D J, Wang Q X. Distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in the floodplain soils of the karst area of Yunnan, Guizhou, Guangxi[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(4): 1609-1619.
- [24] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 基于受体模型和地统计学相结合的土壤镉污染源解析[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(5): 854-860.
- Qu M K, Li W D, Zhang C R, *et al.* Source apportionment of soil heavy metal Cd based on the combination of receptor model and geostatistics[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(5): 854-860.
- [25] 王锐, 邓海, 梁绍标, 等. 重庆市两不同地貌及地质背景区土壤 Cd、Se 元素含量空间插值方法研究[J]. 土壤通报, 2020, **51**(6): 1332-1341.
- Wang R, Deng H, Liang S B, *et al.* Spatial interpolation method of soil Cd and Se element contents in two different landforms and geological background areas in Chongqing City[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, **51**(6): 1332-1341.
- [26] 王锐, 邓海, 严明书, 等. 重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4749-4756.
- Wang R, Deng H, Yan M S, *et al.* Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soils in southern Youyang County, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4749-4756.
- [27] 余涛, 杨忠芳, 王锐, 等. 恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[J]. 土壤, 2018, **50**(6): 1119-1125.
- Yu T, Yang Z F, Wang R, *et al.* Characteristics and sources of soil selenium and other elements in typical high selenium soil area of Enshi[J]. *Soils*, 2018, **50**(6): 1119-1125.
- [28] 郭超, 文字博, 杨忠芳, 等. 典型岩溶地质高背景土壤镉生物有效性及其控制因素研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, **55**(4): 678-687.
- Guo C, Wen Y B, Yang Z F, *et al.* Factors controlling the bioavailability of soil cadmium in typical karst areas with high geogenic background[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2019, **55**(4): 678-687.
- [29] 杨伟光, 陈卫平, 杨阳, 等. 新疆某矿冶区周边土壤重金属生物有效性与生态风险评价[J]. 环境工程学报, 2019, **13**(8): 1930-1939.
- Yang W G, Chen W P, Yang Y, *et al.* Bioavailability and ecological risk assessment of heavy metals in soils around a mining area in Xinjiang, China[J]. *Chinese Journal of*

- Environmental Engineering, 2019, **13**(8): 1930-1939.
- [30] 辛翔飞, 王秀东, 王济民. 新时代下的中国粮食安全: 意义、挑战和对策[J]. 中国农业资源与区划, 2021, **42**(3): 76-84.
- Xin X F, Wang X D, Wang J M. China's grain security in the new era: significance, challenges and countermeasures [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, **42**(3): 76-84.
- [31] 王锐, 余京, 李瑜, 等. 地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法[J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 4190-4198.
- Wang R, Yu J, Li Y, *et al.* Zoning and safe utilization method of heavy metal contaminated cultivated land at block scale[J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 4190-4198.
- [32] 郭晓方, 卫泽斌, 丘锦荣, 等. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(4): 367-371.
- Guo X F, Wei Z B, Qiu J R, *et al.* Differences between corn cultivars in accumulation and translocation of heavy metals[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, **26**(4): 367-371.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2022年12月29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21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

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