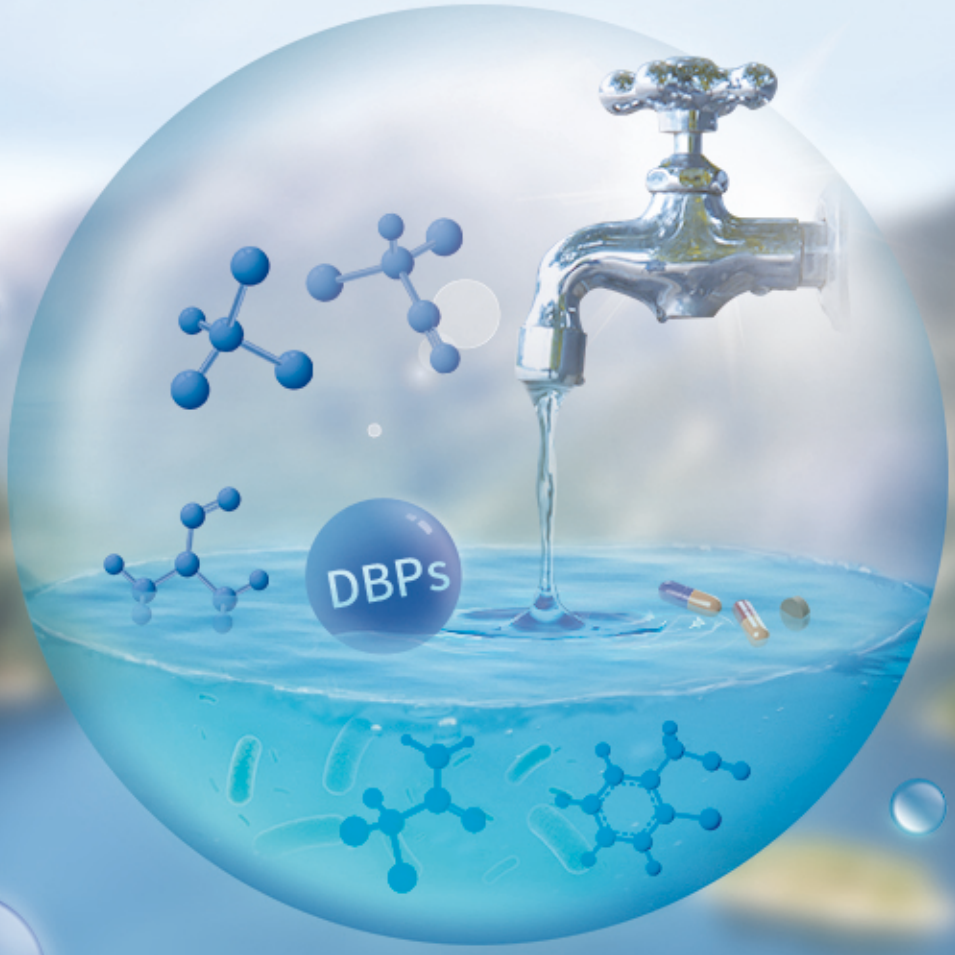
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略
楚文海，肖融，丁顺克，张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年11月
第42卷 第11期
Vol.42 No.11

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第42卷 第11期
2021年11月15日

目 次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 …… 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 …… 徐期勇, 梁铭珅, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 …… 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 ……
…… 赵德龙, 田平, 周嵬, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋,黄梦宇,何晖,丁德平(5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 ……
…… 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 …… 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 …… 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 …… 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 … 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)
2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 ……
…… 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 …… 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞芃, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境影响 …… 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 …… 库盈盈, 任万辉, 苏枞枞, 于兴娜(5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 ……
…… 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 …… 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 …… 张莹, 倪长健,冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 …… 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 ……
…… 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑀晗, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 …… 朱弈, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)
北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布 …… 胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 谢珍雯, 陈磊(5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 …… 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 …… 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 …… 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 …… 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 ……
…… 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 …… 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 …… 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评价 …… 訾鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 …… 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 …… 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 …… 董斯齐, 黄翀(5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 …… 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 …… 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马瑛骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 …… 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 …… 彭柯, 董志, 邸琰茗, 郭逍宇(5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 …… 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)
高锰酸钾改性桉木生物炭对 Pb(Ⅱ)的吸附特性 …… 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对Pb(Ⅱ)的吸附性能 …… 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 …… 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 …… 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 …… 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王鋆燕, 王子芳(5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 …… 徐曼, 余泺, 王富华, 王丹, 王鋆燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评价 …… 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京(5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评价 …… 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 …… 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)
典型矿冶区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 …… 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜瑢, 陈卫平(5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区:以重庆市某区为例 …… 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 …… 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清(5545)
纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 …… 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)
《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区:以重庆市某区为例

曹淑珍[1], 母悦[1], 崔敬鑫[1,2], 刘安迪[1], 程先[1], 符远航[1], 魏世强[1], 张进忠[1*]
(1. 西南大学资源环境学院, 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715; 2. 陕西省西安市城市排水集团, 西安 710077)

摘要: 水稻对土壤中 Cd 的富集积累能力强,开展稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区研究对于区域土地有效利用具有重要意义. 在重庆市某区 22 个镇同步采集稻田土壤-水稻样品 300 套,测定土壤 pH、Cd 全量和有效态含量、糙米 Cd 含量,采用地累积指数、生物富集系数和单因子污染指数评价土壤 Cd 污染状况;结合土壤和糙米 Cd 污染指数进行水稻安全种植分区. 结果表明,研究区稻田土壤总体偏酸性,Cd 全量为 0.09 ~ 1.60 mg·kg^{-1},超过风险筛选值的点位占 35.0%;糙米 Cd 含量为 0.002 ~ 0.808 mg·kg^{-1},超过食品安全限量值的点位占 13.7%. Pearson 相关分析表明,糙米 Cd 含量与土壤 Cd 全量、有效态 Cd 含量均呈极显著正相关(P < 0.01). 污染评价显示,稻田土壤呈现明显的 Cd 累积,部分土壤表现为轻-中度污染;糙米对土壤 Cd 的富集系数为 0.004 ~ 1.72. 研究区稻田土壤总体为安全或基本安全,低风险区在南部、西部和东部均有分布;中高风险区面积较小,主要分散在 8 个地区.

关键词:稻田土壤; 糙米; Cd 污染; 风险评价; 安全种植分区
中图分类号: X171.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)11-5535-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202101111

Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing

CAO Shu-zhen[1], MU Yue[1], CUI Jing-xin[1,2], LIU An-di[1], CHENG Xian[1], FU Yuan-hang[1], WEI Shi-qiang[1], ZHANG Jin-zhong[1*]
(1. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment Research, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Xi'an City Drainage Group, Xi'an 710077, China)

Abstract: Rice has a strong ability to accumulate Cd in soil, and it is of great significance to study Cd pollution and safe planting zoning in paddy soils. In this work, 300 sets of paddy soil-rice samples were simultaneously collected in 22 towns in a District of Chongqing, and soil pH, soil total and available Cd contents, and brown rice Cd contents were determined. Soil Cd pollution was assessed using the geoaccumulation index, bioconcentration factor, and the single-factor pollution index. Based on the Cd pollution indices of soil and brown rice, safe planting zoning for rice was determined. The results showed that the paddy soils were generally acidic, and total Cd contents ranged from 0.09 mg·kg^{-1} to 1.60 mg·kg^{-1}, with 35.0% of sites exceeding the risk screening value. The Cd contents of the brown rice ranged from 0.002 mg·kg^{-1} to 0.808 mg·kg^{-1} and exceeded the food safety limit in 13.7% of cases. Pearson correlation analysis showed that the Cd content of brown rice was significantly positively correlated with soil total and available Cd (P < 0.01). The pollution evaluation indicated that significant Cd accumulation occurred in the paddy soils, with some areas showing light-to-moderate pollution levels. The enrichment coefficients of rice to soil Cd ranged from 0.004 to 1.72. Overall, the paddy soils in the studied area were considered generally safe with respect to Cd pollution, with low-risk areas distributed in the south, west, and east, whereas some medium-high risk areas were detected in eight towns.

Key words: paddy soil; brown rice; Cd pollution; risk assessment; safe planting zoning

2014 年发布的全国土壤污染状况调查公报显示,我国耕地土壤环境质量堪忧,重金属 Cd、Hg、As 和 Pb 含量呈现从西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高的态势,其中 Cd 超标点位数占总超标点位的 7.0%[1]. 最近的研究进一步揭示我国农业土壤中 Cd 含量逐年增加,南方地区土壤 Cd 含量超标率明显高于北方地区[2,3]. Cd 是毒性最强的重金属之一,可通过施肥、灌溉和大气沉降等途径进入稻田土壤[4],容易在稻米中富集积累,严重威胁食品安全和人体健康[5~7]. 稻米是我国南方地区居民的传统主食,食用稻米成为人体 Cd 暴露的重要途径[8]. 因此,开展稻田土壤 Cd 污染与安全种植研究,对于精准防控土壤 Cd 污染与合理利用土地资源尤显重要和迫切.

有学者在四川盆地[3]、三峡库区[9]、草海流域[10]和广西西江流域[11]等区域开展农用地土壤 Cd 污染调查、污染源分析和生态风险评价研究,为认识区域土壤 Cd 污染来源和潜在风险提供了科学依据和方法指导. 但是,以上研究将多种土地利用类型(如水田、旱地、菜地、果园和林地等)合并考虑,且未关注农产品中 Cd 的污染状况. 近年来,在贵州都匀市周边水稻种植区[12]、桂西南 Cd 地质异常区[13]和广西典型碳酸盐岩区[14]研究了稻田土壤和水稻 Cd 污染特征、主要影响因子和生态环境风险,为科学管控土壤污染和保证农产品安全生产提供了重要依据,但在典型区域开展稻田土壤 Cd 污染和安全

收稿日期: 2021-01-13; **修订日期**: 2021-03-19
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800601)
作者简介: 曹淑珍(1996 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染控制,E-mail: 1021286427@qq.com
* 通信作者,E-mail:jzhzhang@swu.edu.cn

种植分区研究还未见报道. 重庆市某区是我国的水稻主产区,工业、农业和交通运输等人类活动频繁,可能加剧该地区稻田土壤和水稻 Cd 污染问题. 为此,本文选择该区为研究区,在水稻主要种植区系统采集稻田土壤和稻谷样品,分析稻田土壤和糙米 Cd 污染状况;利用土壤和糙米 Cd 污染指数对稻田土壤进行安全种植分区,以期为稻田土壤 Cd 污染防治和区域土地有效利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于长江上游,重庆市西南部,跨东经 105°49′~106°38′、北纬 28°28′~29°28′,幅员面积 3 218 km^2,辖 30 个镇(街道),地形南高北低,北部和中部以丘陵、低山为主,南部以山地为主. 该区属亚热带湿润季风气候,四季分明、冬暖夏热,常年平均气温为 18.4℃,年均降雨量为1 001.2 mm. 该区的土壤类型主要有紫色土、水稻土、黄壤和冲积土,水稻种植面积约为 4.53 万 hm^2,占作物种植面积的 44.4%,为全国粮食生产大县(区)和千亿斤粮食生产能力项目县(区).

1.2 样品采集与分析

2019 年 8 月水稻成熟季,根据水稻种植面积和集中连片原则进行抽样调查,在研究区主产水稻的 22 个镇(A~V)同步采集稻田耕层土壤(0~20 cm)和稻谷样品,每个土壤和稻谷样品均由 5 个子样混合组成,共采集土壤-水稻样品 300 套,并记录采样点地理坐标,研究区位置和采样点位如图 1 所示.

剔除土样中的杂草和砾石,温室自然风干、压碎和研磨,过 2 mm 和 0.25 mm 尼龙筛,2 mm 土样用于土壤 pH 测定,0.25 mm 土样用于土壤 Cd 全量和有效态含量测定;用牛皮纸封装水稻样品,65℃烘箱中烘干至恒重,用砻谷机脱壳得到糙米,不锈钢粉碎机磨至粉末,过 0.25 mm 筛,测定糙米 Cd 含量.

土壤 pH:按 1∶2.5 的土水比浸提,用 pH 计(ZetaPlus, Brookhaven)测定[15];土壤 Cd 全量:用王水-$HClO_4$ 消解,石墨炉原子吸收分光光度计(AA-6880G,苏州岛津仪器有限公司)测定;土壤有效态 Cd 含量:用 0.1 mol·L^{-1} $CaCl_2$ 溶液浸提[16],石墨炉原子吸收分光光度计测定;糙米 Cd 含量:用 HNO_3-$HClO_4$(体积比 4∶1)消解[17],石墨炉原子吸收分光光度计测定. 用标准物质(土壤:GBW07428;植物:GBW10044)和空白样品进行分析质量控制,分析样品的重复率为 10%~15%,平行样相对标准偏差小于 5%. 土壤 Cd 检出限为 0.01 mg·kg^{-1},加标回收率为 97.1%~102.2%;糙米 Cd 检出限为 0.001 mg·kg^{-1},加标回收率为 94.7%~103.6%.

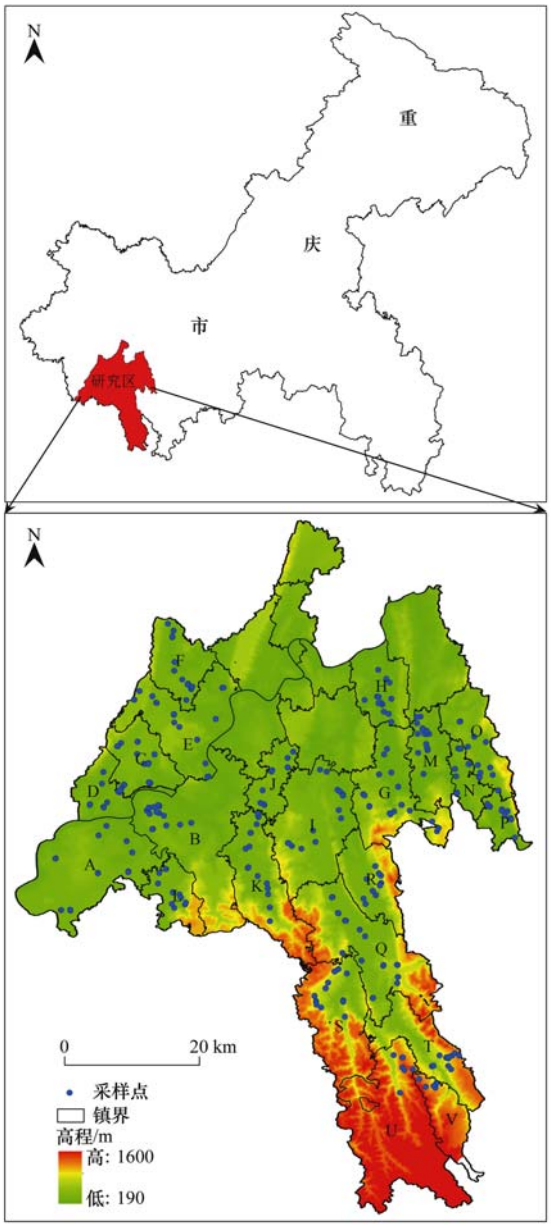


图 1 研究区位置和采样点位示意

Fig. 1 Map of the studied area and sampling sites

1.3 土壤污染评价与安全种植分区

1.3.1 地累积指数评价

地累积指数(I_{geo})考虑了自然地质和人为活动的影响,不仅反映土壤 Cd 的自然分布特征,还强调了 Cd 的历史累积作用[6],其表达式为:

$$I_{geo} = \log_2[C/(1.5 \times B)] \quad (1)$$

式中,C 为土壤 Cd 含量;1.5 为修正系数;B 为土壤 Cd 背景值,本文采用重庆渝西经济区土壤 Cd 背景值(0.221 mg·kg^{-1})[18]. 分级标准见表 1.

1.3.2 生物富集系数评价

用生物富集系数(BCF)评价糙米对土壤中 Cd 的富集积累能力[19],其表达式为:

$$BCF = R/C \quad (2)$$

表 1　基于地累积指数的土壤污染分级

Table 1　Soil pollution classification based on the geological accumulation index

I_{geo}	污染等级	I_{geo}	污染等级
$I_{geo} \leqslant 0$	无污染	$3 < I_{geo} \leqslant 4$	强污染
$0 < I_{geo} \leqslant 1$	轻-中度污染	$4 < I_{geo} \leqslant 5$	强-极强污染
$1 < I_{geo} \leqslant 2$	中度污染	$I_{geo} > 5$	极强污染
$2 < I_{geo} \leqslant 3$	中-强度污染		

式中，R 为糙米 Cd 含量；C 为土壤 Cd 含量.

1.3.3　污染指数评价与土壤安全利用分区

以土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）（GB 15618-2018）规定的 Cd 风险筛选值为依据，计算污染指数，划分污染等级，评价稻田土壤 Cd 污染水平[20]. 类似地，根据食品安全国家标准食品中污染物限量（GB 2762-2017）规定的 Cd 限量值为 0.2 mg·kg^{-1}，评价糙米 Cd 污染水平[21]（表 2）. 污染指数的计算公式为：

$$P = C/C_s \quad (3)$$

$$E = R/R_s \quad (4)$$

式中，P 为土壤 Cd 污染指数，C 为土壤 Cd 含量，C_s 为土壤 Cd 污染评价标准值；E 为糙米 Cd 污染指数，R 为糙米 Cd 含量，R_s 为糙米 Cd 限量标准值.

结合稻田土壤和稻米 Cd 污染指数，将稻田土壤划分为 5 个等级，并确定安全利用分区[22]（表 3）.

表 2　土壤（糙米）Cd 污染指数与分级

Table 2　Cd pollution indices and classification of soil (brown rice)

等级	P 或 E	污染程度
Ⅰ	≤1	清洁
Ⅱ	1～2	尚清洁（警戒线）
Ⅲ	2～3	轻度污染
Ⅳ	3～5	中度污染
Ⅴ	＞5	重度污染

1.4　数据处理与分析

运用 Excel 2016 和 IBM SPSS 25.0 软件进行数据处理与统计分析，利用 Pearson 系数进行相关性分析，并用 ArcGIS 10.1 软件制图.

2　结果与分析

2.1　稻田土壤和糙米 Cd 含量特征

2.1.1　稻田土壤 Cd 含量

研究区稻田土壤 pH 和 Cd 全量如表 4 所示. 可以看出，该区稻田土壤 pH 为 4.29～8.09，pH＜6.5 的点位占 74.7%，总体上偏酸性. 稻田土壤 Cd 全量为 0.09～1.60 mg·kg^{-1}，平均含量为 0.36 mg·kg^{-1}，是中国土壤 Cd 背景值（0.1 mg·kg^{-1}）[23]的 3.6 倍、重庆渝西经济区土壤 Cd 背景值[18]的 1.6 倍. 与我国其它省份农田土壤 Cd 平均含量比较，研究区稻田土壤 Cd 平均含量高于云南（0.25 mg·kg^{-1}）、湖北（0.26 mg·kg^{-1}）、四川（0.27 mg·kg^{-1}）和陕西（0.31 mg·kg^{-1}），略低于湖南（0.38 mg·kg^{-1}）和贵州（0.37 mg·kg^{-1}）[24]. 研究区土壤 Cd 含量均未超过 GB 15618-2018 规定的风险管控值；超过筛选值的点位数为 105 个，超标率达到 35.0%，O 和 M 地的点位超标率较高，以 O 地土壤 Cd 的平均含量（0.62 mg·kg^{-1}）最高. 稻田土壤 Cd 全量的变异系数为 41.3%，属高度变异，说明该区稻田土壤 Cd 的空间分布不均.

表 3　Cd 污染土壤安全利用等级与分区

Table 3　Classification and zoning of safe utilization for Cd-contaminated soils

安全利用等级	划分依据	安全利用分区
Ⅰ	$P \leqslant 1$，$E \leqslant 1$	安全区
Ⅱ	$P \leqslant 1$，$1 < E \leqslant 2$ $1 < P \leqslant 2$，$E \leqslant 1$	基本安全区
Ⅲ	$P \leqslant 1$，$2 < E \leqslant 3$ $1 < P \leqslant 2$，$1 < E \leqslant 2$ $2 < P \leqslant 3$，$E \leqslant 1$	低风险区
Ⅳ	$P \leqslant 1$，$3 < E \leqslant 5$ $1 < P \leqslant 2$，$2 < E \leqslant 3$ $2 < P \leqslant 3$，$1 < E \leqslant 2$ $3 < P \leqslant 5$，$E \leqslant 1$	中风险区
Ⅴ	P 为任意值，$E > 5$ $1 < P \leqslant 2$，$E > 3$ $2 < P \leqslant 3$，$E > 2$ $3 < P \leqslant 5$，$E > 1$ $P > 5$，E 为任意值	高风险区

重金属的生物有效性与其在土壤中的有效态含量相关，将重金属有效态含量与其全量的比值称为活化系数[25]. 研究区稻田土壤有效态 Cd 含量和活化系数如表 5 所示. 可以看出，该区稻田土壤有效态 Cd 含量为 0.01～0.70 mg·kg^{-1}，平均含量为 0.21 mg·kg^{-1}，以 O 地最高（0.32 mg·kg^{-1}），其次为 S（0.27 mg·kg^{-1}）、K（0.27 mg·kg^{-1}）和 E 地（0.26 mg·kg^{-1}）. 稻田土壤有效态 Cd 的变异系数为 50.6%，变异性较强，表明该区稻田土壤有效态 Cd 含量差异较大；D、V、S、B、E 和 K 地的稻田土壤 Cd 活化系数≥70%，土壤 Cd 迁移活性较高.

2.1.2　糙米 Cd 含量

研究区糙米 Cd 含量如表 6 所示. 可以看出，该区糙米 Cd 含量为 0.002～0.808 mg·kg^{-1}，平均含量为 0.108 mg·kg^{-1}，以 R 地最高（0.261 mg·kg^{-1}）；糙米 Cd 含量的变异系数达到 125%，具有较高的离散程度. 付婷婷等[27]研究了江津区石蟆、永兴、中山和慈云镇的土壤-稻米对 Cd 的迁移和积累特征，发现稻米 Cd 含量为 0.003～0.473

表 4 研究区稻田土壤 pH 和 Cd 全量

Table 4 The pH and total Cd contents of paddy soils in the studied area

采样地点	样品数/个	pH	Cd 全量/mg·kg^{-1}	中位数/mg·kg^{-1}	平均值/mg·kg^{-1}	标准差/mg·kg^{-1}	变异系数/%	超标样品数[1)]/个
A	14	4.95 ~ 7.40	0.27 ~ 0.47	0.34	0.36	0.07	19.6	9
B	17	4.96 ~ 7.46	0.20 ~ 0.45	0.32	0.33	0.07	20.5	6
C	18	5.33 ~ 7.79	0.18 ~ 0.38	0.27	0.28	0.06	22.2	4
D	10	5.08 ~ 7.09	0.19 ~ 0.43	0.30	0.30	0.08	25.3	3
E	18	4.64 ~ 7.68	0.25 ~ 0.73	0.34	0.37	0.12	31.3	4
F	14	5.19 ~ 7.37	0.16 ~ 0.48	0.28	0.29	0.08	28.0	3
G	17	4.29 ~ 7.91	0.18 ~ 0.38	0.26	0.26	0.06	22.8	1
H	13	4.73 ~ 7.77	0.10 ~ 0.42	0.26	0.25	0.10	39.8	1
I	15	5.34 ~ 6.83	0.09 ~ 0.39	0.26	0.25	0.09	37.5	1
J	10	5.06 ~ 7.25	0.31 ~ 0.46	0.39	0.40	0.05	11.7	2
K	16	4.61 ~ 6.20	0.17 ~ 0.61	0.37	0.38	0.13	34.2	8
L	12	5.66 ~ 8.09	0.28 ~ 0.68	0.46	0.47	0.12	25.3	7
M	17	4.91 ~ 7.09	0.14 ~ 0.78	0.51	0.51	0.13	25.7	12
N	10	5.20 ~ 7.72	0.15 ~ 0.65	0.48	0.48	0.15	31.0	5
O	11	5.19 ~ 7.36	0.38 ~ 1.60	0.47	0.62	0.36	58.2	9
P	12	5.24 ~ 7.40	0.19 ~ 0.53	0.42	0.41	0.09	21.6	8
Q	20	4.67 ~ 7.69	0.11 ~ 0.56	0.38	0.37	0.12	32.5	6
R	14	5.40 ~ 7.52	0.20 ~ 0.76	0.36	0.40	0.16	41.1	5
S	17	5.07 ~ 7.27	0.17 ~ 0.76	0.31	0.37	0.15	41.4	7
T	12	5.72 ~ 6.74	0.19 ~ 0.49	0.31	0.32	0.10	31.1	3
U	7	5.27 ~ 6.86	0.18 ~ 0.49	0.32	0.33	0.12	36.3	1
V	6	5.90 ~ 6.47	0.23 ~ 0.33	0.29	0.28	0.03	11.9	0
研究区	300	4.29 ~ 8.09	0.09 ~ 1.60	0.34	0.36	0.15	41.3	105

1)超标指超过土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618-2018)规定的 Cd 风险筛选值

表 5 研究区稻田土壤有效态 Cd 含量

Table 5 Available Cd contents of paddy soils in the studied area

采样点	样品数/个	有效态 Cd 含量[1)]/mg·kg^{-1}	中位数/mg·kg^{-1}	平均值/mg·kg^{-1}	标准差/mg·kg^{-1}	变异系数/%	活化系数/%
A	14	0.03 ~ 0.32	0.25	0.23	0.09	39.8	64.2
B	17	0.13 ~ 0.40	0.22	0.23	0.07	30.8	71.9
C	18	0.02 ~ 0.34	0.19	0.19	0.08	43.4	69.2
D	10	0.10 ~ 0.34	0.23	0.23	0.07	31.7	77.7
E	18	0.13 ~ 0.60	0.24	0.26	0.12	44.6	71.7
F	14	0.04 ~ 0.39	0.19	0.19	0.11	57.1	64.9
G	17	0.06 ~ 0.27	0.18	0.18	0.06	35.2	68.7
H	13	0.06 ~ 0.24	0.12	0.14	0.07	48.7	55.3
I	15	0.04 ~ 0.28	0.14	0.14	0.07	51.3	59.8
J	10	0.02 ~ 0.33	0.20	0.17	0.11	61.2	45.1
K	16	0.12 ~ 0.47	0.26	0.27	0.12	43.3	70.0
L	12	0.02 ~ 0.50	0.24	0.24	0.12	51.4	55.7
M	17	0.01 ~ 0.38	0.17	0.18	0.10	56.0	36.7
N	10	0.06 ~ 0.38	0.29	0.23	0.11	47.7	55.0
O	11	0.01 ~ 0.70	0.28	0.32	0.24	76.1	51.2
P	12	0.02 ~ 0.30	0.23	0.22	0.07	33.4	59.5
Q	20	0.06 ~ 0.43	0.17	0.21	0.11	51.2	58.9
R	14	0.05 ~ 0.50	0.25	0.24	0.11	47.4	61.7
S	17	0.07 ~ 0.54	0.25	0.27	0.13	48.0	72.1
T	12	0.10 ~ 0.40	0.19	0.21	0.08	39.0	65.0
U	7	0.10 ~ 0.27	0.13	0.15	0.06	39.6	49.8
V	6	0.14 ~ 0.27	0.20	0.20	0.04	19.7	73.8
研究区	300	0.01 ~ 0.70	0.21	0.21	0.11	50.6	61.8

1)有效态 Cd 表示可被 0.1 mol·L^{-1} $CaCl_2$ 溶液浸提的土壤水溶态 Cd 和大部分交换态 Cd [26]

表 6　研究区糙米 Cd 含量

Table 6　Cd contents of brown rice in the studied area

采样点	样品数/个	Cd 含量/mg·kg^{-1}	中位数/mg·kg^{-1}	平均值/mg·kg^{-1}	标准差/mg·kg^{-1}	变异系数/%	超标样品数[1)]/个
A	14	0.021 ~ 0.460	0.092	0.130	0.125	95.8	3
B	17	0.030 ~ 0.575	0.131	0.203	0.162	79.9	6
C	18	0.006 ~ 0.471	0.062	0.109	0.117	106.7	3
D	10	0.034 ~ 0.204	0.094	0.111	0.055	50.0	1
E	18	0.012 ~ 0.808	0.045	0.122	0.187	153.2	3
F	14	0.005 ~ 0.475	0.031	0.101	0.157	155.3	2
G	17	0.012 ~ 0.125	0.036	0.044	0.031	70.8	0
H	13	0.003 ~ 0.282	0.025	0.051	0.074	144.7	1
I	15	0.006 ~ 0.111	0.030	0.037	0.030	82.6	0
J	10	0.012 ~ 0.063	0.022	0.026	0.015	58.4	0
K	16	0.005 ~ 0.096	0.027	0.034	0.024	70.3	0
L	12	0.003 ~ 0.663	0.015	0.074	0.186	251.8	1
M	17	0.002 ~ 0.116	0.038	0.044	0.036	81.5	0
N	10	0.026 ~ 0.427	0.069	0.106	0.127	119.5	2
O	11	0.013 ~ 0.505	0.046	0.095	0.144	150.6	1
P	12	0.005 ~ 0.221	0.066	0.081	0.058	71.5	1
Q	20	0.012 ~ 0.382	0.135	0.135	0.082	61.2	3
R	14	0.065 ~ 0.702	0.162	0.261	0.228	87.3	6
S	17	0.061 ~ 0.753	0.130	0.194	0.175	90.2	3
T	12	0.011 ~ 0.519	0.143	0.207	0.141	68.1	5
U	7	0.008 ~ 0.133	0.027	0.043	0.046	105.5	0
V	6	0.038 ~ 0.145	0.077	0.083	0.039	47.1	0
研究区	300	0.002 ~ 0.808	0.063	0.108	0.135	125	41

1)超标指超过食品安全国家标准食品中污染物限量(GB 2762-2017)规定的 Cd 限量值 0.2 mg·kg^{-1}

mg·kg^{-1},平均值为 0.103 mg·kg^{-1},与本研究的结果相近. 根据 GB 2762-2017 规定的 Cd 限量值,本研究中糙米 Cd 含量超标样品数为 41 个,超标率为 13.7%,超标样品主要出现在 R、T 和 B 地.

2.1.3　相关性分析

采用 Pearson 相关分析,获得研究区糙米 Cd 含量、稻田土壤 pH、Cd 全量和有效态 Cd 含量之间的相关系数,结果如表 7 所示. 可以看出,土壤有效态 Cd 含量与土壤 pH 呈极显著负相关,这与土壤 pH 显著影响重金属的有效性一致[28],土壤 pH 越低,土壤中有效态 Cd 含量越高;土壤有效态 Cd 含量与土壤 Cd 全量呈极显著正相关,O 地土壤 Cd 的平均含量最高,其有效态 Cd 含量也高;糙米 Cd 含量与土壤 Cd 全量、有效态 Cd 含量均呈极显著正相关,相关系数分别为 0.176 和 0.442,表明土壤 Cd 全量和有效态含量是影响糙米 Cd 含量的主要因子[13],而与土壤有效态 Cd 含量的相关系数更大,这与土壤 Cd 有效态含量与稻米质量关联性更强的研究结果一致[29].

表 7　Pearson 相关分析结果[1)]

Table 7　Pearson correlation analysis results

	土壤 pH	土壤全 Cd	土壤有效态 Cd	糙米 Cd
土壤 pH	1			
土壤全 Cd	0.083	1		
土壤有效态 Cd	−0.343 **	0.501 **	1	
糙米 Cd	−0.037	0.176 **	0.442 **	1

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关

2.2　稻田土壤 Cd 污染评价

2.2.1　地累积指数评价

研究区稻田土壤 Cd 全量和地累积指数的空间分布如图 2 所示. 可以看出,大部分点位土壤 Cd 全量在 0.3 ~ 0.6 mg·kg^{-1},占比为 58.3%;大于 0.6 mg·kg^{-1}的点位为 17 个,主要出现在 O、M 和 N 等地[图 2(a)]. 地累积指数(I_{geo})评价显示[图 2(b)],51.3% 点位土壤 Cd 的 I_{geo} 为 0 ~ 1,为轻-中度污染,表明土壤 Cd 主要来自人为活动而不是成土母质,稻田土壤出现明显的 Cd 积累;I_{geo} 为 1 ~ 2 的点位占 2.7%,表现为中度污染;I_{geo} 为 2 ~ 3 的点位出现在 O 地,为中-强度污染. 研究区稻田土壤 Cd 的 I_{geo} 平均值为 0.02,低于重庆市农田土壤 Cd 的 I_{geo} 平均值(0.93)和我国农田土壤 Cd 的 I_{geo} (0.50)[24].

2.2.2　生物富集系数评价

研究区糙米 Cd 含量和生物富集系数的空间分布如图 3 所示. 可以看出,该区大部分区域糙米 Cd 含量低于 0.2 mg·kg^{-1},符合国家食品卫生标准;除 7 个镇未检出超标样品外,15 个镇均发现糙米 Cd 含量超标,超标样品主要分布在 T、R 和 B 地[图 3

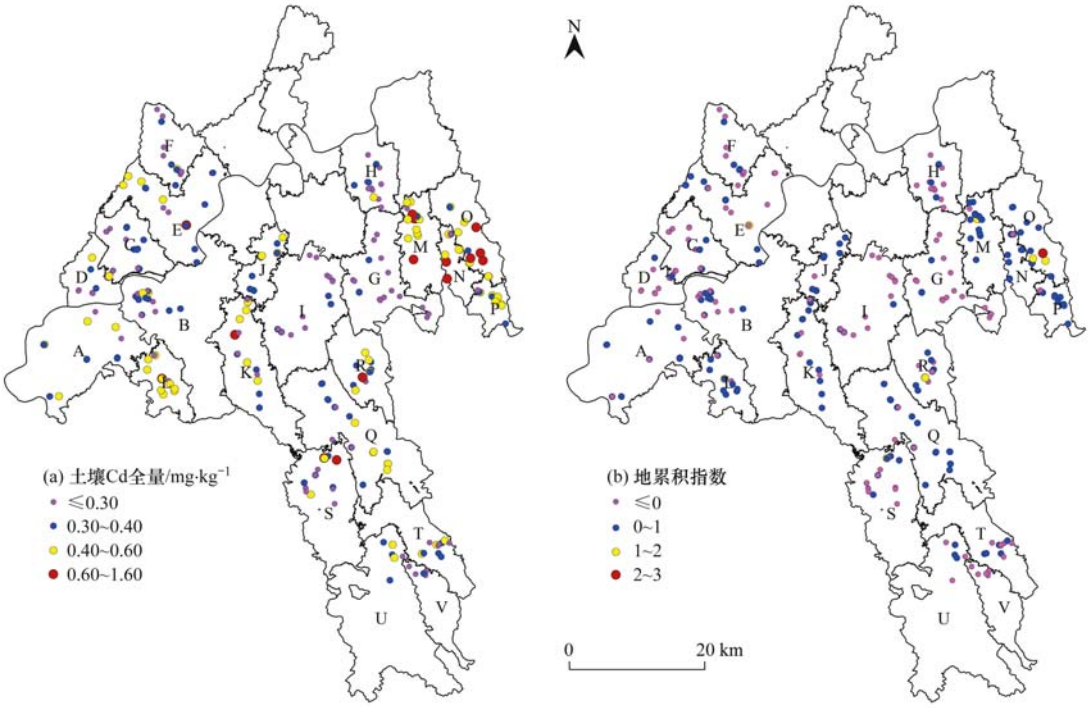


图 2 稻田土壤 Cd 全量和地累积指数的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of Cd contents and the geoaccumulation indices of paddy soils

(a)]. 计算获得研究区糙米对土壤 Cd 的富集系数为 0.004 ~ 1.72,平均值为 0.31,变异系数为 110%,说明各地糙米对 Cd 的富集系数差异较大;与我国其它地区水稻对 Cd 的平均富集系数比较,高于湖北省天门市(0.19)[30]和上海市(0.25)[31],略低于重庆市南川区(0.34)[32]. 从生物富集系数的空间分布来看[图 3(b)],富集系数与糙米 Cd 含量变化基本一致,研究区大部分区域糙米对 Cd 的富集系数小于 1,中部地区的富集系数较小;富集系数大于 1 的点位占 6.3%,主要分布在 R、B 和 T 地,说明这部分区域稻田土壤 Cd 的生物有效性较高.

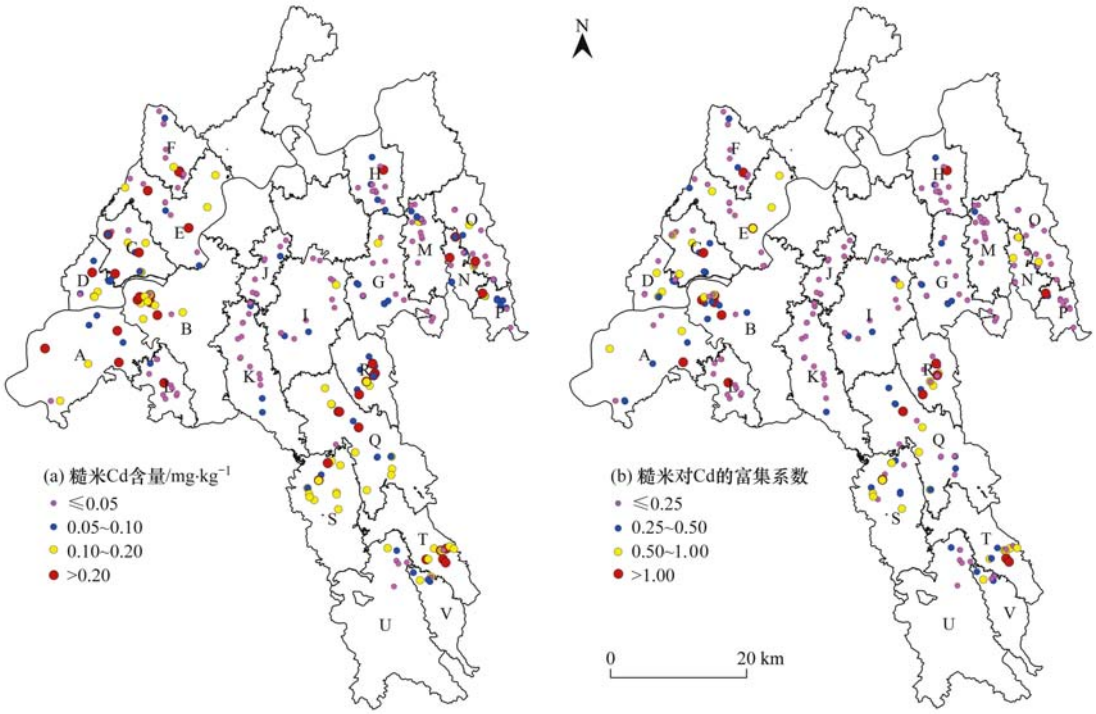


图 3 糙米 Cd 含量和富集系数的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of Cd contents and the concentration factors in brown rice

2.2.3　单因子污染指数评价

计算获得研究区稻田土壤 Cd 污染指数(P)的平均值为 0.90，$P \leqslant 1$ 的点位占 65.3%，$1 < P \leqslant 2$ 的点位占 33.0%. 该区稻田土壤总体处于清洁或尚清洁水平(警戒线)，警戒线区域主要分布在西部和东部，轻度污染点位分布在 O、R、M 和 K 地[图 4(a)]. 研究区糙米 Cd 污染指数(E)的平均值为 0.54，$E \leqslant 1$ 的点位占 86.3%，大部分区域处于清洁水平，警戒线区域集中在西部和东部，轻度污染点位占 4.3%，主要分布在 R、B、F、O 和 N 等地，中度污染点位分布在 R、E、S 和 L 等地[图 4(b)].

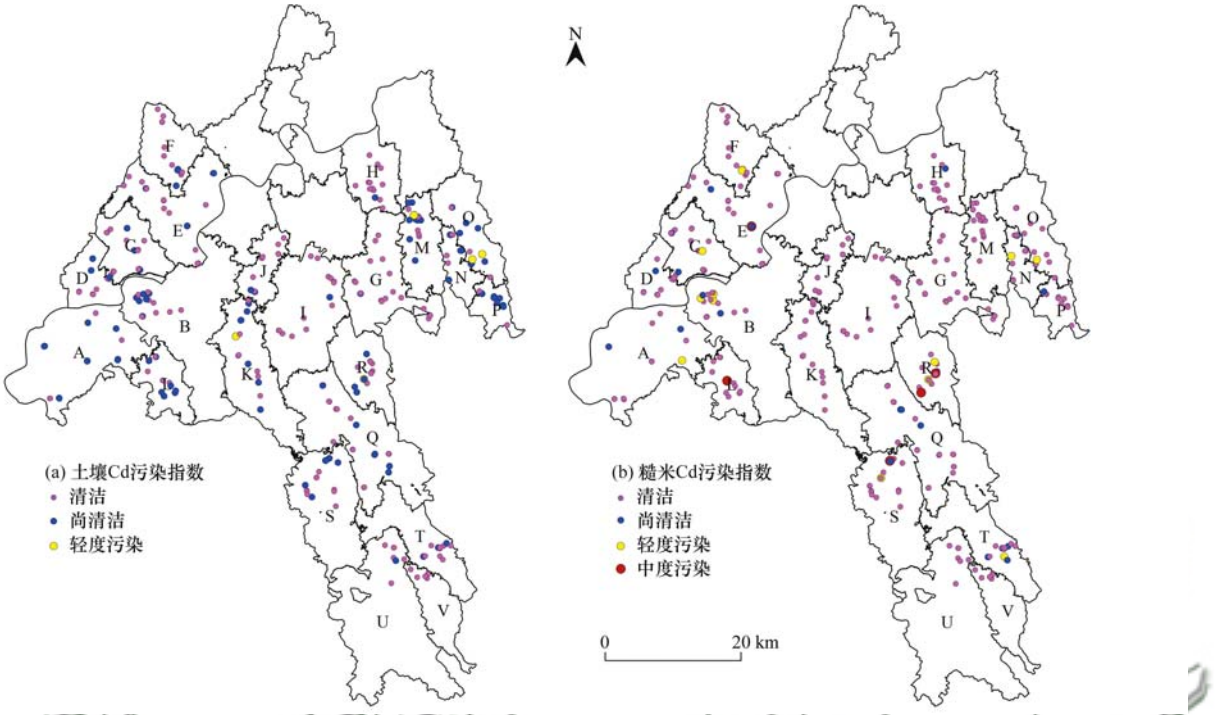


图 4　稻田土壤和糙米 Cd 污染风险的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of Cd pollution risk in paddy soils and brown rice

2.3　水稻安全种植分区

结合土壤和糙米 Cd 污染指数，根据表 3 进行水稻安全种植分区，获得如图 5 所示的结果. 可以看出，57.3% 的点位为安全区，33.3% 的点位为基本安全区；低风险点位 16 个，在南部、西部和东部 13 个镇均有分布；中风险点位 8 个，主要分布在 R 及西部地区；高风险点位 4 个.

3　讨论

3.1　土壤 Cd 污染成因与风险

根据地累积指数和单因子污染指数评价结果，研究区稻田土壤 Cd 污染主要集中在东部地区，且 O 地的地累积指数评价为中-强度污染. O 地紧邻重庆主城区，人为活动剧烈，可能使土壤 Cd 含量高；O 和 M 地近邻现代物流和工业园区，“三废”排放可能导致周边农田土壤 Cd 污染. 生物富集系数和单因子污染指数评价显示，糙米 Cd 污染主要集中在 R(中度)、B(轻度)和 T(轻度). R 地附近煤矿开采可能是引起该地土壤 Cd 污染的原因，有研究表明矿山开采和工业活动使周边农田更易受到重金属污染[33]. 农田土壤重金属来源主要受成土母质、土壤有机质、土壤酸碱度和人类活动等因素的影响[34]，施加磷肥和猪牛粪有机肥会显著增加土壤 Cd 含量[35]. 调查发现，当地农民以磷肥和人畜粪肥为稻田底肥，也是引起稻田土壤 Cd 污染的原因.

比较稻田土壤和糙米 Cd 含量发现，土壤 Cd 含量超标率达到 35.0%，而糙米 Cd 含量超标率为 13.7%，土壤 Cd 含量高的点位，糙米 Cd 含量未必高. 根据相关分析结果，糙米 Cd 含量与土壤 Cd 全量和有效态含量呈极显著正相关，但与土壤有效态 Cd 含量的相关性更强. 有研究表明，植物累积 Cd 很大程度上取决于 Cd 在土壤中的存在形态，不同形态的比例分布会产生不同的生物与环境效应[36,37]. 土壤和糙米 Cd 超标点位不匹配的现象还可能与水稻品种有关[38]，调查发现研究区 2019 年种植 20 多个水稻品种，不同品种的水稻对重金属的吸收速率不同[39,40]. 土壤有效态 Cd 含量与土壤 pH 呈极显著负相关，这是因为研究区土壤主要呈酸性，土壤 Cd 的生物有效性高，容易被水稻富集积累，即使土壤 Cd 含量不超标，也可能造成糙米 Cd 含量超

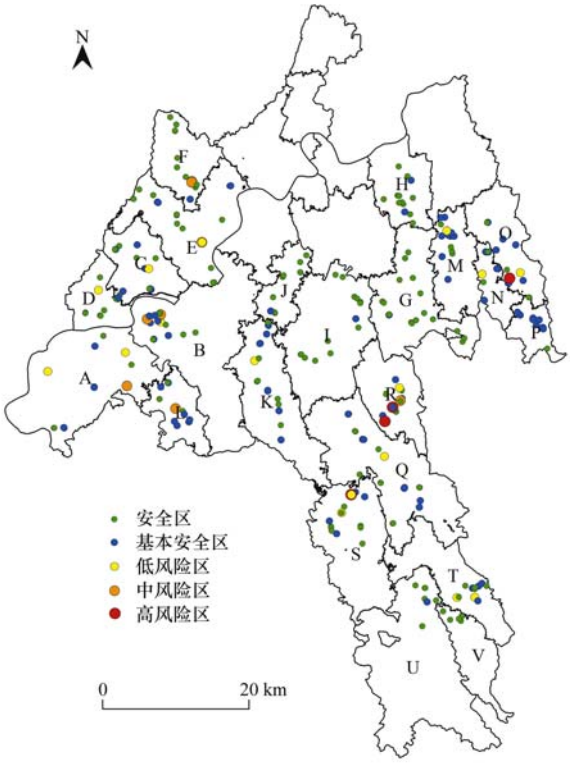


图 5 水稻安全种植分区

Fig. 5 Safe planting zoning of rice

标[41,42]. 但是,土壤 Cd 含量高的点位可能因为 Cd 的生物有效性低,不造成 Cd 在糙米中的大量富集. 本研究还发现土壤 Cd 活化系数高,糙米 Cd 含量不一定高,如活化系数较高的 D、V 和 S 地,其糙米 Cd 平均含量分别为 0.111、0.083 和 0.194 $mg \cdot kg^{-1}$,原因在于活化系数高只是增加稻米 Cd 含量超标的概率. 生物富集系数更能反映稻米对土壤 Cd 的吸收富集能力[32],R、B 和 T 地的富集系数较大,其糙米 Cd 含量也相对较高.

3.2 稻田土壤安全利用建议

R 地糙米对土壤 Cd 的富集系数高,稻田土壤和糙米 Cd 污染点位在该地均有分布,且存在 5 种安全利用等级. 因此,在该地的不同风险区应实行差别化管控策略:安全利用区,对作物不构成危害,应重点保护,防止新增污染源,保持安全利用状态;基本安全区,表明土壤有一定的 Cd 累积,存在潜在风险,应控制 Cd 的来源,同时监控 Cd 污染的动态变化,优化农艺措施,确保农用地的安全利用;低风险区,应动态监测土壤、灌溉水和大气环境质量,采取一定措施治理土壤污染,适当调整作物类型,降低农用地的使用风险;中风险区,应开展土壤 Cd 污染风险评估,强化风险预警防控管理,选择合适技术修复土壤;高风险区,应深入调查污染源,实施源头控制,并开展风险评估,调整作物种植结构和土地利用类型,降低农用地的利用风险.

有研究者提出一种普适性的安全种植模式(VIRL 技术模式)[43], V 代表作物品种(variety)选择,包括替代作物种植和低富集品种筛选;I 代表农业投入品(input)控制和灌溉(irrigation)调控;R 代表根区(root zone)调控,包括土肥调控与钝化修复,如酸度调节和秸秆移除等;L 代表叶面(leaf blade)调控,主要喷施降 Cd 物质. 该技术将源头预防、过程阻控和末端治理高度结合,能有效实现 Cd 污染农田的安全种植. 李娜等[44]的研究在江津区和潼南区的 Cd 轻度污染稻田进行田间原位修复,种植低 Cd 累积水稻品种常两优 772,并配施硅钙肥、铁粉、生物质炭和秸秆有机肥,可有效降低土壤有效 Cd 含量,减少水稻 Cd 积累. 因此,可通过进一步调查研究,在 R 地各风险区制定详实的土壤利用和修复方案,降低 Cd 污染风险,评估实施效果,总结和优化方案,在研究区其它镇推广使用,实现区域农田的安全利用.

4 结论

(1)研究区稻田土壤总体偏酸性,Cd 全量为 0.09 ~ 1.60 $mg \cdot kg^{-1}$,超过风险筛选值的点位占 35.0%;稻田土壤存在明显的 Cd 累积,但空间分布不均.

(2)糙米 Cd 含量为 0.002 ~ 0.808 $mg \cdot kg^{-1}$,超过食品安全限量值的点位占 13.7%;糙米 Cd 含量与土壤 Cd 含量、有效态 Cd 含量均呈极显著正相关,但与土壤有效态 Cd 含量的相关性更强.

(3)稻田土壤呈现明显的 Cd 累积,部分土壤表现为轻-中度污染.

(4)大部分稻田土壤属于安全或基本安全区,低风险区在南部、西部和东部均有分布;中高风险区面积较小.

参考文献:

[1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.

[2] Shi T R, Zhang Y Y, Gong Y W, *et al*. Status of cadmium accumulation in agricultural soils across China (1975-2016): from temporal and spatial variations to risk assessment[J]. Chemosphere, 2019, **230**: 136-143.

[3] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4670-4683.
Shang E P, Xu E Q, Zhang H Q, *et al*. Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4670-4683.

[4] 蒋凯, 邓潇, 周航, 等. 湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3324-3330.
Jiang K, Deng X, Zhou H, *et al*. Cd balance analysis of a

typical rice paddy system in central Hunan[J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3324-3330.

[5] Li Z Y, Tang S R, Deng X F, *et al*. Contrasting effects of elevated CO_2 on Cu and Cd uptake by different rice varieties grown on contaminated soils with two levels of metals: Implication for phytoextraction and food safety[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **177**(1-3): 352-361.

[6] Ur Rehman Z, Khan S, Brusseau M L, *et al*. Lead and cadmium contamination and exposure risk assessment via consumption of vegetables grown in agricultural soils of five-selected regions of Pakistan[J]. Chemosphere, 2017, **168**: 1589-1596.

[7] Vatanpour N, Feizy J, Talouki H H, *et al*. The high levels of heavy metal accumulation in cultivated rice from the Tajan River basin: health and ecological risk assessment[J]. Chemosphere, 2020, **245**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125639.

[8] Zhao D, Liu R Y, Xiang P, *et al*. Applying cadmium relative bioavailability to assess dietary intake from rice to predict cadmium urinary excretion in nonsmokers[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(12): 6756-6764.

[9] 王金霞, 李谢玲, 何清明, 等. 三峡库区典型农业区土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 农业工程学报, 2018, **34**(8): 227-234.
Wang J X, Li X L, He Q M, *et al*. Characterization and risk assessment of heavy metal pollution in agricultural soils in Three Gorge Reservoir Area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(8): 227-234.

[10] 王志杰, 柳书俊, 郑杰, 等. 草海流域土壤重金属污染及其生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(12): 2438-2446.
Wang Z J, Liu S J, Zheng J, *et al*. Ecological risk assessment of heavy metals in soils of Caohai watershed[J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, **28**(12): 2438-2446.

[11] 宋波, 杨子杰, 张云霞, 等. 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1888-1900.
Song B, Yang Z J, Zhang Y X, *et al*. Accumulation of Cd and its risks in the soils of the Xijiang River drainage basin in Guangxi[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1888-1900.

[12] 敖明, 柴冠群, 范成五, 等. 稻田土壤和稻米中重金属潜在污染风险评估与来源解析[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(6): 198-205.
Ao M, Chai G Q, Fan C W, *et al*. Evaluation of potential pollution risk and source analysis of heavy metals in paddy soil and rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(6): 198-205.

[13] 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 等. 桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1855-1863.
Chen T B, Pang R, Wang F P, *et al*. Safety assessment of rice planting in soil cadmium geological anomaly areas in Southwest Guangxi[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1855-1863.

[14] 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.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.

[16] 肖振林, 王果, 黄瑞卿, 等. 酸性土壤中有效态镉提取方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(2): 795-800.
Xiao Z L, Wang G, Huang R Q, *et al*. Extraction method for available Cadmium in acid soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(2): 795-800.

[17] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.

[18] 鲍丽然, 龚媛媛, 严明书, 等. 渝西经济区土壤地球化学基准值与背景值及元素分布特征[J]. 地球与环境, 2015, **43**(1): 31-40.
Bao L R, Gong Y Y, Yan M S, *et al*. Element geochemical baseline and distributions in soil in Chongqing west economic zone, China[J]. Earth and Environment, 2015, **43**(1): 31-40.

[19] Ding C F, Ma Y B, Li X G, *et al*. Determination and validation of soil thresholds for cadmium based on food quality standard and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2018, **619-620**: 700-706.

[20] Wang Q, Liu J F, Chen Z, *et al*. A causation-based method developed for an integrated risk assessment of heavy metals in soil[J]. Science of the Total Environment, 2018, **642**: 1396-1405.

[21] 王琦, 李芳柏, 黄小追, 等. 一种基于风险管控的稻田土壤重金属污染分级方法[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(12): 2321-2328.
Wang Q, Li F B, Huang X Z, *et al*. A classification approach of heavy metal pollution of paddy soil based on risk management[J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, **27**(12): 2321-2328.

[22] 魏洪斌, 罗明, 鞠正山, 等. 重金属污染农用地风险分区与管控研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, **39**(2): 82-87.
Wei H B, Luo M, Ju Z S, *et al*. Risk zoning and governance of heavy mental pollution in agricultural land[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, **39**(2): 82-87.

[23] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.
Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, *et al*. Study on the background contents on 61 elements of soils in China[J]. Environmental Science, 1991, **12**(4): 12-19.

[24] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2822-2833.
Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al*. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2822-2833.

[25] 于亚军, 贺泽好. 三种复垦类型煤矸山土壤重金属有效态含量及其影响因素分析[J]. 环境工程, 2018, **36**(5): 189-192.
Yu Y J, He Z H. Analysis of available contents and the influence factors of heavy metals in three types of soil in reclaimed coal waste pile[J]. Environmental Engineering, 2018, **36**(5): 189-192.

[26] 颜世红, 吴春发, 胡友彪, 等. 典型土壤中有效态镉 $CaCl_2$ 提取条件优化研究[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(9): 99-104.
Yan S H, Wu C F, Hu Y B, *et al*. Optimization of $CaCl_2$ extraction of available cadmium in typical soils[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, **29**(9): 99-104.

[27] 付婷婷, 张伟, 曾婷婷, 等. 重庆江津区土壤-稻米中硒和重金属的积累及迁移特征[J]. 西南农业学报, 2019, **32**(4): 843-847.
Fu T T, Zhang W, Zeng T T, *et al*. Accumulation and migration

characteristics of selenium and heavy metals in soil-rice[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, **32**(4): 843-847.

[28] Zhong X, Chen Z W, Li Y Y, *et al*. Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **400**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123289.

[29] 张云慧, 杜平, 何赢, 等. 基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4262-4269.
Zhang Y H, Du P, He Y, *et al*. Derivation of the thresholds of available concentrations of heavy metals in soil based on agricultural product safety[J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4262-4269.

[30] 沈体忠, 朱明祥, 肖杰. 天门市土壤—水稻系统重金属迁移积累特征及其健康风险评估[J]. 土壤通报, 2014, **45**(1): 221-226.
Shen T Z, Zhu M X, Xiao J. Characteristics of migration and accumulation of heavy metals in soil-rice system of Tianmen and its health risk assessment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(1): 221-226.

[31] 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 等. 不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4647-4653.
Chen X H, Shen G X, Bai Y J, *et al*. Accumulation of Cd in different crops and screening of low-Cd accumulation cultivars [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4647-4653.

[32] 王锐, 胡小兰, 张永文, 等. 重庆市主要农耕区土壤 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.

[33] 周艳, 陈樯, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2884-2892.
Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al*. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2884-2892.

[34] 韩伟, 王成文, 彭敏, 等. 川南山区土壤与农作物重金属特征及成因[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2480-2489.
Han W, Wang C W, Peng M, *et al*. Characteristics and origins of heavy metals in soil and crops in mountain area of southern Sichuan[J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2480-2489.

[35] 王珂, 徐春丽, 张宇亭, 等. 长期不同施肥下紫色土-作物体系镉累积及安全性评估[J]. 中国农业科学, 2018, **51**(18): 3542-3550.
Wang K, Xu C L, Zhang Y T, *et al*. Cd accumulation and safety assessment of soil-crop system induced by long-term different fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, **51**(18): 3542-3550.

[36] 刘俐, 高新华, 宋存义, 等. 土壤中镉的赋存行为及迁移转化规律研究进展[J]. 能源环境保护, 2006, **20**(2): 6-9.
Liu L, Gao X H, Song C Y, *et al*. Progress in the study of cadmium occurrence and transportation in soils[J]. Energy Environmental Protection, 2006, **20**(2): 6-9.

[37] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2877-2884.
Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, *et al*. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, Southwestern China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2877-2884.

[38] Zhao F J, Wang P. Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies[J]. Plant and Soil, 2020, **446**(1-2): 1-21.

[39] Xiao G X, Hu Y L, Li N, *et al*. Spatial autocorrelation analysis of monitoring data of heavy metals in rice in China[J]. Food Control, 2018, **89**: 32-37.

[40] 林小兵, 周利军, 王惠明, 等. 不同水稻品种对重金属的积累特性[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5198-5206.
Lin X B, Zhou L J, Wang H M, *et al*. Accumulation of heavy metals in different rice varieties[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5198-5206.

[41] 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.

[42] Adil M F, Sehar S, Chen G, *et al*. Cadmium-zinc cross-talk delineates toxicity tolerance in rice via differential genes expression and physiological / ultrastructural adjustments[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **190**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110076.

[43] 周莉, 郑向群, 丁永祯, 等. 农田镉砷污染防控与作物安全种植技术探讨[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(4): 613-619.
Zhou L, Zheng X Q, Ding Y Z, *et al*. Probes of prevention and control of farmland pollution by cadmium & arsenic and crop production safety[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(4): 613-619.

[44] 李娜, 贺红周, 冯爱煊, 等. 渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4637-4646.
Li N, He H Z, Feng A X, *et al*. Safe utilization of paddy soils lightly polluted with cadmium in western Chongqing[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4637-4646.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 11

Nov. 15, 2021

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review ····· CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, *et al.* (5059)

Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar ····· XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, *et al.* (5086)

Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016 ····· YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, *et al.* (5100)

Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China ····· ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, *et al.* (5109)

Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain ····· LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, *et al.* (5122)

Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang ····· NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, *et al.* (5131)

Impact of Air Humidity on $PM_{2.5}$ Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin ····· DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, *et al.* (5143)

Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in $PM_{2.5}$ in Chengde ····· HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, *et al.* (5152)

Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China ····· LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, *et al.* (5162)

Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission in China from 2011 to 2019 ····· LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, *et al.* (5169)

VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method ····· XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, *et al.* (5180)

Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture ····· WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, *et al.* (5193)

Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China ····· KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, *et al.* (5201)

Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area ····· HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, *et al.* (5210)

Atmospheric NH_3 Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City ····· JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, *et al.* (5220)

Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O_3 Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu ····· ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, *et al.* (5228)

Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River ····· LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, *et al.* (5239)

Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province ····· ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, *et al.* (5250)

Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers ····· ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, *et al.* (5264)

Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing ····· HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, *et al.* (5275)

Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake ····· LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, *et al.* (5284)

Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone ····· LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, *et al.* (5294)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake ····· WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, *et al.* (5303)

Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area ····· ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, *et al.* (5312)

Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model ····· JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, *et al.* (5322)

Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River ····· GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, *et al.* (5333)

Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season ····· HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, *et al.* (5346)

Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment ····· ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, *et al.* (5355)

Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors ····· XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, *et al.* (5364)

Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula ····· PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, *et al.* (5375)

Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area ····· DONG Si-qi, HUANG Chong (5384)

Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region ····· FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, *et al.* (5394)

Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen ····· JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, *et al.* (5405)

Effects of *Spartina alterniflora* Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland ····· SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, *et al.* (5414)

Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing ····· PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, *et al.* (5424)

Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar ····· ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong (5433)

Adsorption Characteristics of Pb(Ⅱ) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate ····· MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, *et al.* (5440)

Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(Ⅱ) ····· LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, *et al.* (5450)

Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal ····· SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, *et al.* (5460)

Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitritation and ANAMMOX Process ····· ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, *et al.* (5472)

Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land ····· DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, *et al.* (5481)

Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields ····· XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, *et al.* (5491)

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin ····· LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, *et al.* (5500)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil ····· ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, *et al.* (5510)

Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China ··· SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, *et al.* (5519)

Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter ····· HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, *et al.* (5526)

Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing ····· CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, *et al.* (5535)

Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions ····· WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, *et al.* (5545)

Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure ····· LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, *et al.* (5554)