

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

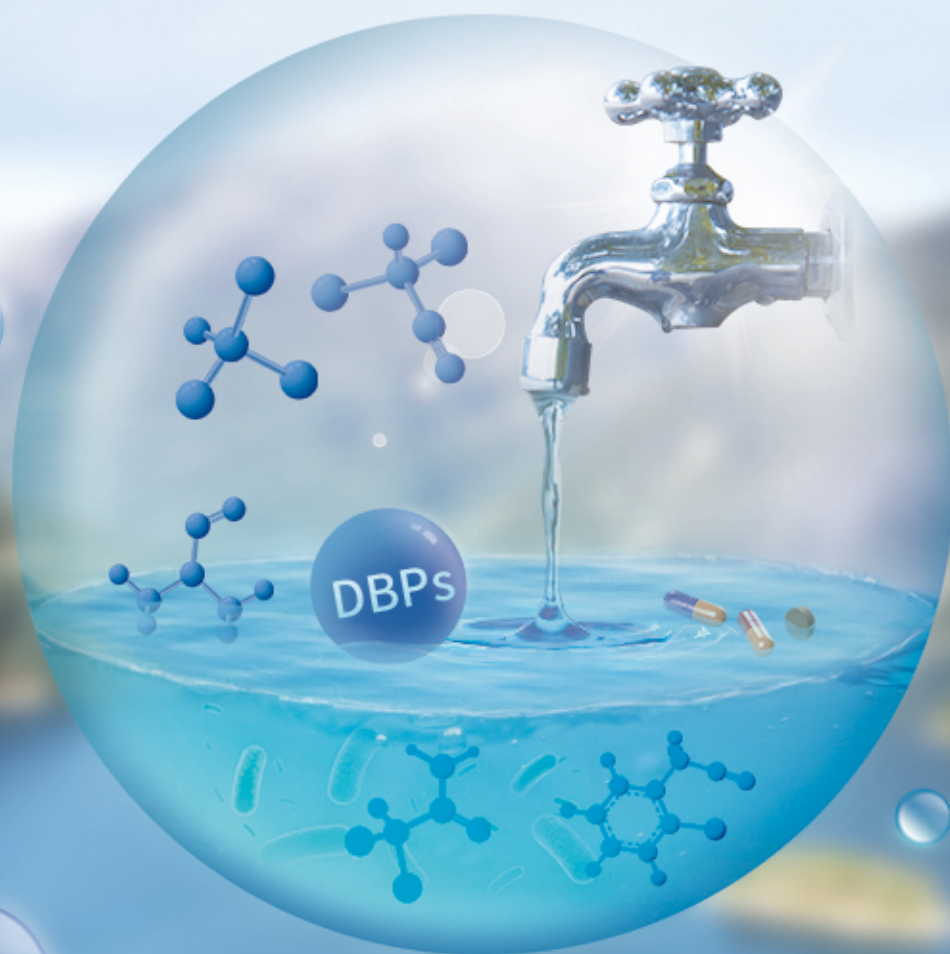
环境科学

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

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, 梁铭坤, 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, 周崑, 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, 李瑞凡, 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的影响 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, 苏枫帆, 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, 甄瑞吟, 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 朱奔, 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, 李颀, 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估 瞿鑫源, 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, 马璇骏, 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, 邱琰茗, 郭道宇 (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)
高锰酸钾改性松木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar 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, 王莹燕, 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, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 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估 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估 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, 姜蓉, 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)

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*

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 选取适合当地种植的 8 个水稻品种为试验对象, 开展大田试验, 比较不同品种水稻对重金属 Cd 的积累、吸收和转运特征, 筛选出适合当地种植的 Cd 低累积水稻品种, 并分析水稻低累积程度及稳定性影响因素。结果表明: ①根据综合积累指数 (P_N) 评价方法筛选出对 Cd 综合积累能力低的水稻品种有: 川优 3203、川优 6203、德梗 6 号和沈优 17。②综合考虑稻米 Cd 含量和产量, 适合在该地区种植的水稻品种为川优 3203 和川优 6203, 既能安全保障稻米 Cd 含量, 又能保证水稻高产。③川优 3203 和川优 6203 在不同 pH 和不同总镉范围内稻米中 Cd 含量均显著低于其他品种, 且在不同土壤条件下表现得很稳定。④水稻品种的差异对水稻的稻米富集能力有较大的影响, 而对水稻茎叶向水稻稻米的转运能力的影响较小; 川优 3203 和川优 6203 的低富集系数, 加之其较低的转运, 最终呈现出稻米较低的镉富集能力。⑤相关性分析发现, 稻米 Cd 含量受水稻富集系数影响最大, 受根际土壤总 Cd 含量影响最小。

关键词: 大田; 水稻品种; 镉积累; 积累特征; 筛选

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5545-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104206

Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions

WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, CHEN Xiao-hong, PENG Jie, LI Jia-xin, CHEN Wen-qing*

(College of Architecture & Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Eight rice varieties suitable for local cultivation were selected and field tests were carried out to compare the accumulation, absorption, and transport characteristics of Cd. The rice varieties with low Cd accumulation were screened, and the factors affecting the accumulation degree and stability of rice were analyzed. The results showed that: ①According to the comprehensive accumulation index (P_N) evaluation method, the rice varieties with low P_N ability for Cd were selected as follows: Chuanyou 3203, Chuanyou 6203, Dejing 6, and Shenyong 17. ②Considering the Cd content and yield of rice, Chuanyou 3203 and Chuanyou 6203 are suitable for planting in this region, which guarantees a safe Cd content in and high yield of rice. ③The contents of Cd in Chuanyou 3203 and Chuanyou 6203 were significantly lower than those of other rice varieties and stable under different pH and total Cd ranges and soil conditions. ④The difference between rice varieties had a significant effect on rice enrichment ability, but little effect on translocation from stem to leaf. The low enrichment coefficient of Chuanyou 3203 and Chuanyou 6203, combined with low translocation, demonstrated the low Cd enrichment capacity of rice. ⑤Correlation analysis showed that the Cd content was most affected by the enrichment coefficient of rice, and least affected by the total Cd content of rhizosphere soil.

Key words: field; rice varieties; cadmium accumulation; accumulation characteristics; screening

近年来,随着城市的快速发展,工农业水平的提高,工业上的“三废”大量排放,农业上化肥和农药的不合理使用,导致了土壤重金属污染的问题日益加剧^[1,2]。根据最新的全国土壤污染调查(2014年)显示,我国土壤环境状况总体不佳,其中Cd是所有重金属中点位超标率最高的(7%)^[3]。Cd是人体非必需元素,被列为第一类人类致癌物,是土壤中流动性最强的重金属之一^[4]。土壤Cd污染不仅会导致土壤肥力下降^[5],还会通过食物链富集进入人体,最终对人体健康造成危害^[6]。农作物是土壤重金属Cd进入人体的重要途径^[7],而水稻作为我国的主要粮食作物,与其他粮食作物相比,水稻对土壤中重金属Cd的富集能力更强^[8]。随着土壤Cd污染越来越严重,特别是,我国南方地区和北方地区大米人均日食用量分别为310 g和116 g,而全国人均日食用量为219 g,说明我

国南方镉大米问题比北方更加严重^[9,10]。土壤Cd污染修复和水稻的安全利用问题亟待解决。

影响水稻中Cd含量的因素较为复杂,主要分为内部因素和外部因素,内部因素主要是水稻品种,不同品种的水稻对Cd的吸收存在显著的差异,对Cd的积累能力可相差数倍^[11,12]。Liu等^[13]的研究显示,不同品种的水稻糙米中Cd含量为0.22~2.86 mg·kg⁻¹。任树友等^[14]在川西平原种植了21种水稻,稻米镉平均含量最高的品种是C两优华占,平均Cd含量为0.789 mg·kg⁻¹;稻米镉平均含量最低的品种是蜀优217,平均Cd含量为0.078 mg·kg⁻¹,

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-05-11

基金项目: 四川省重大科技专项项目(2018SZDX0028)

作者简介: 王宇豪(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: 928573033@qq.com

* 通信作者, E-mail: chenwenqing@scu.edu.cn

相差高达 10 倍. 有研究表明, 某些水稻品种即使在土壤 Cd 含量较高的情况下, 稻米中的 Cd 含量依旧能保持在安全水平以下. Zhang 等^[15] 的研究从 146 个水稻品种中筛选出 17 个 Cd 低累积品种, 在土壤 Cd 浓度接近 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 仍有部分水稻品种的稻米镉含量在安全水平以下. 外部因素包括土壤理化性质、农艺措施等, 代子雯等^[16] 的研究表明, 稻米 Cd 含量受到土壤 pH、Eh 和 EC, 地下部生物量等的显著影响. 因此, 筛选重金属 Cd 的低累积水稻品种是保障稻米 Cd 安全的有效方法^[17].

因为田间试验条件繁琐, 受外界影响较大, 管理上较为困难, 所以关于不同品种水稻积累 Cd 的特征影响大多是在室内模拟研究为主, 田间试验研究报道较少^[18~21]. 大田生产条件下受外界影响更为严重, 管理上更加困难, 所以大田条件下研究报道更为少有.

同时, 大多数研究集中于稻米 Cd 含量的水稻品种筛选, 对于稻米中 Cd 含量的影响因素研究较少. 所以, 本文以适合当地种植的 8 个水稻品种为试

验对象, 选择西南某 Cd 污染农田, 开展大田试验, 比较不同品种水稻对重金属 Cd 的积累、吸收和转运特征, 筛选出适合当地种植的 Cd 低累积水稻品种, 并研究其影响因素, 以期为 Cd 污染土壤水稻的安全生产提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究在我国西南地区的某大面积农田土壤中进行, 面积为 1.334 km^2 (约 2 000 亩), 主要由长期旱水交替耕作形成的水田组成. 该地海拔 585 m, 降雨极不均匀, 最大降雨量为 1 420 mm, 最小降雨量为 608 mm, 多年平均年降雨量为 1 035 mm. 夏季最高气温为 36.5°C , 冬季最冷月平均气温为 5.5°C , 多年平均气温为 15.7°C . 该地土壤母质来源于北部典型含磷岩系和含煤地层山脉, 该地区的土壤受到了不同程度的 Cd 污染. 该地区土壤总镉质量分数为 $0.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效态镉质量分数为 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为轻度 Cd 污染土壤. 土壤的主要理化性质见表 1 所示.

表 1 试验田水稻土的理化性质

Table 1 Physical-chemical properties of paddy soil in experimental field

土壤类型	pH	$\omega/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$			$\omega/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		阳离子交换量 $/\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
		有机质	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾	
水稻土	7.03	38.38 ± 3.85	1.99 ± 0.19	150.60 ± 26.26	17.91 ± 9.25	45.30 ± 16.30	10.08 ± 1.06

1.2 试验处理

本试验以水稻品种为处理, 共 8 个水稻品种, 每个处理一个水稻品种. 水稻种植分为育秧施工和种植施工, 育秧施工采用机械整地 + 人工播种方式进行, 水稻种植施工采用机械整地 + 人工移栽的方式进行. 整地前人工进行复合肥施撒 ($\text{N}:\text{P}:\text{K} = 15:15:15$) 作为底肥. 追肥、灌溉、病虫害防治等田间管理方式与当地种植习惯相同. 在水稻成熟后进行水稻和根际土壤的采样.

试验水稻品种: 本研究选取适合本地区的 8 种水稻品种种植, 包括 A 类水稻品种 (小试筛选的水稻品种) 和 B 类水稻品种 (当地常种植水稻品种), 其中 A 类水稻品种有: 川优 3203、川优 6203、德香 4103、德梗 6 号、沈优 17 和中嘉早 17; B 类水稻品种有: F 优 498 和宜香 2115. 本研究使用的水稻品种均来源于市场购买.

1.3 样品的采集与分析

在水稻成熟期间, 从研究区域采集了 431 份土壤-水稻配对样品, 采样点位如图 1 所示, 水稻样品信息如表 2 所示. 每个样本都是由 5 个均匀分布在现场的子样本混合而成. 每个土样都是采集的 0 ~

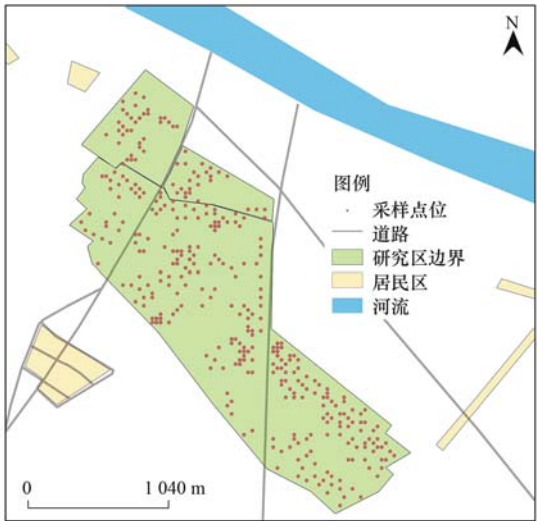


图 1 研究区位置及布点示意

Fig. 1 Diagram of location and distribution of the study area

20 cm 耕作层土样, 原始重量超过 1 kg. 土壤样品和水稻样品都是几个子样品的混合物. 土壤样品放置于风干盘中在阴凉处自然风干后用玛瑙球磨机研磨过 10 目的尼龙筛后用自封袋保存, 水稻样品自然晾干后用玛瑙球磨机研磨, 过尼龙筛后用自封袋保存.

样品检测指标包括土壤 pH 值、总镉、有效态镉以及水稻茎和稻米中总镉。采用 pH 计 (PHSJ-4A) 分析土壤样品中的 pH, 采用原子吸收分光光度计 (AA900T) 分析土壤样品中的总镉, 采用原子吸收分光光度计 (AA700F) 分析土壤样品中的有效态镉; 采用电感耦合等离子体质谱仪 (NexION 350X) 分析水稻样品中的总镉。设置空白对照并使用国家标准物质(植物标准物质为 GBW 10043, 土壤标准物质为

GBW 08303) 进行质量控制, 加标回收率为 95% ~ 105%。具体的测试指标和测试方法如表 3 所示。

表 2 水稻样品信息

Table 2 Rice sample information sheet				
项目	类型	样品数	类型	样品数
A 类水稻	川优 3203	21	川优 6203	131
	德香 4103	125	德梗 6 号	6
	沈优 17	6	中嘉早 17	6
B 类水稻	F 优 498	124	宜香 2115	12

表 3 样品的测试指标和测试方法

Table 3 Test index and test method for samples

样品总类	项目	使用仪器	方法来源	检出限/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
土壤	pH	pH 计 PHSJ-4A	NY/T 1121. 2-2006	/
	总镉	原子吸收分光光度计 AA900T	GB/T 17141-1997	0. 01
	有效态镉	原子吸收分光光度计 AA7000F	GB/T 23739-2009	0. 001
水稻	总镉	电感耦合等离子体质谱仪 NexION 350X	GB5009. 268-2016	0. 002

1.4 数据处理

为了表示不同水稻品种对水稻土中重金属 Cd 的吸收和积累特征, 计算了不同水稻品种对 Cd 的稻米富集系数 (BCF) 和茎叶向稻米转运系数 (TF), 根据以下公式进行计算^[22]:

富集系数(BCF) = $\frac{\text{水稻稻米中重金属含量}}{\text{土壤中重金属含量}}$

转运系数(TF) = $\frac{\text{水稻稻米中重金属含量}}{\text{水稻茎部重金属含量}}$

为了表示不同水稻品种对重金属镉的综合积累能力进行评价, 参照土壤单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法, 采用单因子积累指数 (P_i) 和综合积累指数 (P_N) 来对不同水稻品种对重金属 Cd 的综合积累能力进行评价, 根据以下公式进行计算^[23,24]:

$$P_i = C_i/S_i$$

$$P_N = [(P_{imax}^2 + P_{iave}^2)/2]^{1/2}$$

式中, P_i 为单因子积累指数; C_i 为稻米中重金属 Cd 的实测值; S_i 为稻米中重金属镉的安全限值, 根据食品中污染物限量标准 (GB 2762-2017), 稻米 Cd 标准限值为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; P_N 为综合积累指数; P_{imax} 为最大单项积累指数; P_{iave} 为平均单项积累指数。

所有试验数据均用 SPSS 19.0 和 Excel 2010 进行处理与分析, 采用 Origin 9.0 作图。

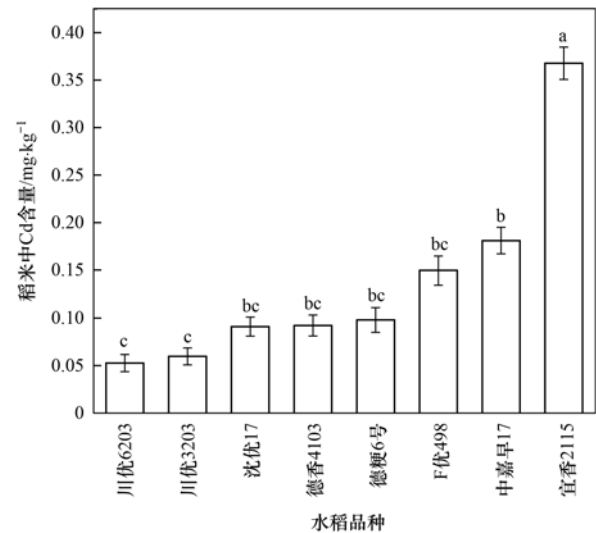
2 结果与分析

2.1 不同品种水稻稻米 Cd 积累特征

2.1.1 不同品种水稻稻米 Cd 含量总体特征

从图 2 可以看出, 8 种水稻的稻米 Cd 含量在 $0.053 \sim 0.368 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。稻米 Cd 含量最低的品种是川优 6203 和川优 3203, 其稻米 Cd 含量分别

为 $0.053 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 稻米镉含量最高的品种是宜香 2115, 稻米镉含量为 $0.368 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。川优 6203 和川优 3203 稻米 Cd 含量显著低于其他水稻品种, 宜香 2115 稻米 Cd 含量显著高于其他水稻品种。根据食品中污染物限量标准 (GB 2762-2017), 稻米 Cd 标准限值为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 不同品种水稻稻米 Cd 含量超标情况如表 4 所示, 所有水稻品种中, 只有宜香 2115 的稻米 Cd 含量超过了标准限值, 为轻微超标。B 类水稻的 Cd 超标程度显著高于 A 类水稻的 Cd 超标程度。B 类水稻中超标程度最低的是 F 优 498, 超标程度为 25.81%, 而 A 类水稻的超标程度大部分均低于 10%。在所有水稻品种中, 川优 3203 和川优 6203 表现出稻米 Cd 含量低, 超标程度低的特性。



不同小写字母表示不同水稻品种之间的差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 不同品种水稻稻米 Cd 含量

Fig. 2 Cd content in different rice varieties

表 4 不同品种水稻稻米 Cd 含量超标情况

Table 4 Excess Cd content in different rice varieties

类型	品种	样本数量	超标数量	超标率/%
A 类水稻	川优 3203	21	0	0
	川优 6203	131	1	0.76
	德香 4103	125	11	8.8
	德梗 6 号	6	0	0
	沈优 17	6	0	0
	中嘉早 17	6	1	16.67
B 类水稻	F 优 498	124	32	25.81
	宜香 2115	12	9	75

2.1.2 不同品种水稻稻米对 Cd 的累积能力差异

根据不同品种水稻稻米中的 Cd 含量差异,采用系统聚类分析方法,将不同品种水稻分成 3 类来表示不同品种水稻稻米对 Cd 的累积能力差异,具体分为 I 类(稻米对 Cd 积累较低的水稻品种)、II 类(稻米对 Cd 积累中等的水稻品种)和 III 类(稻米对 Cd 积累较高的水稻品种),具体如图 3 所示. 根据不同品种水稻稻米 Cd 含量聚类分析, A 类水稻有德香 4103、沈优 17、德梗 6 号、川优 3203 和川优 6203; II 类水稻有中嘉早 17 和 F 优 498; III 类水稻有宜香 2115.

上述结果表明,不同品种的水稻对 Cd 的累积

表 5 不同品种水稻 Cd 的综合累积能力

Table 5 Comprehensive Cd accumulation ability of different rice varieties

项目	川优 3203	川优 6203	德香 4103	德梗 6 号	沈优 17	中嘉早 17	F 优 498	宜香 2115
P_{imax}	0.75	0.95	1.875	0.575	0.525	1.035	4.825	3.5
P_{iave}	0.298	0.263	0.461	0.493	0.453	0.906	0.748	1.839
P_N	0.571	0.697	1.365	0.536	0.491	0.973	3.453	2.796

2.2 不同品种水稻的产量

不同品种的水稻产量存在着一定差距,产量变幅为 $431.74 \sim 656.60 \text{ kg} \cdot (667 \text{ m}^2)^{-1}$, 均值为 $515.30 \text{ kg} \cdot (667 \text{ m}^2)^{-1}$. 具体如表 6 所示, B 类水稻和 A 类水稻的产量之间存在明显的差异, A 类水稻的产量普遍大于 B 类水稻的产量. 在所有水稻品种中,产量最高的水稻品种是川优 6203,产量为 $656.60 \text{ kg} \cdot (667 \text{ m}^2)^{-1}$; 产量最低的水稻品种是宜香 2115,产量为 $431.74 \text{ kg} \cdot (667 \text{ m}^2)^{-1}$. 在 A 类水稻的产量中,川优 3203、川优 6203、德香 4103 和中嘉早 17 的产量高于平均产量 $515.30 \text{ kg} \cdot (667 \text{ m}^2)^{-1}$; 德梗 6 号和沈优 17 的产量低于平均产量 $515.30 \text{ kg} \cdot (667 \text{ m}^2)^{-1}$.

在所有水稻品种中,川优 3203 和川优 6203 表现出水稻产量高的特征,兼顾水稻对重金属 Cd 的综合积累情况和水稻产量,推荐川优 3203 和川优 6203 作为该地区适宜栽种的水稻品种,既能保证稻

能力有明显的差异,在 Cd 污染的土壤中筛选适合种植的水稻品种时,要优先选择 I 类水稻,尽量避免选择 III 类水稻,更有利于保障 Cd 污染土壤下稻米粮食安全. 在所有水稻品种中,德香 4103、沈优 17、德梗 6 号、川优 3203 和川优 6203 表现出稻米对 Cd 积累能力较低的特性.

2.1.3 不同品种水稻 Cd 的综合累积特征

根据上述分析,参照土壤单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法,采用单因子积累指数(P_i)和综合积累指数(P_N)来对不同水稻品种对重金属 Cd 的综合积累能力进行评价,并将结果分为 5 类:综合积累能力低($P_N \leq 0.7$)、综合积累能力较低($0.7 < P_N \leq 1.0$)、综合积累能力中等($1.0 < P_N \leq 2.0$)、综合积累能力较高($2.0 < P_N \leq 3.0$)和综合积累能力高($P_N > 3.0$),具体结果如表 5 所示,对 Cd 综合积累能力低的水稻品种有:川优 3203、川优 6203、德梗 6 号和沈优 17; 对 Cd 综合积累能力较低的水稻品种有:中嘉早 17; 对 Cd 综合积累能力中等的水稻品种有:德香 4103; 对 Cd 综合积累能力较高的水稻品种有:宜香 2115; 对 Cd 综合积累能力高的水稻品种有:F 优 498. 在所有水稻品种中,川优 3203、川优 6203、德梗 6 号和沈优 17 表现出对 Cd 综合积累能力低的特性.

米的安全质量,又能保证水稻的高产量.

表 6 不同水稻品种的产量

Table 6 Yield of different rice varieties

类型	品种	样方产量/kg	产量/ $\text{kg} \cdot (667 \text{ m}^2)^{-1}$
A 类水稻	川优 3203	4.60	545.65
	川优 6203	5.57	656.60
	德香 4103	4.60	539.65
	德梗 6 号	3.93	451.73
	沈优 17	3.97	461.96
	中嘉早 17	4.60	546.90
B 类水稻	F 优 498	4.19	488.15
	宜香 2115	3.73	431.74

2.3 不同品种水稻在不同条件下稻米中 Cd 含量

从图 4 可以看出,在不同 pH 范围内川优 3203 和川优 6203 的稻米 Cd 含量均低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,表现出很好的镉安全性,而德香 4103 和 F 优 498 稻米中 Cd 含量虽然低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但是含量普遍较高,且川优 3203 和川优 6203 的稻米 Cd 含量显著低

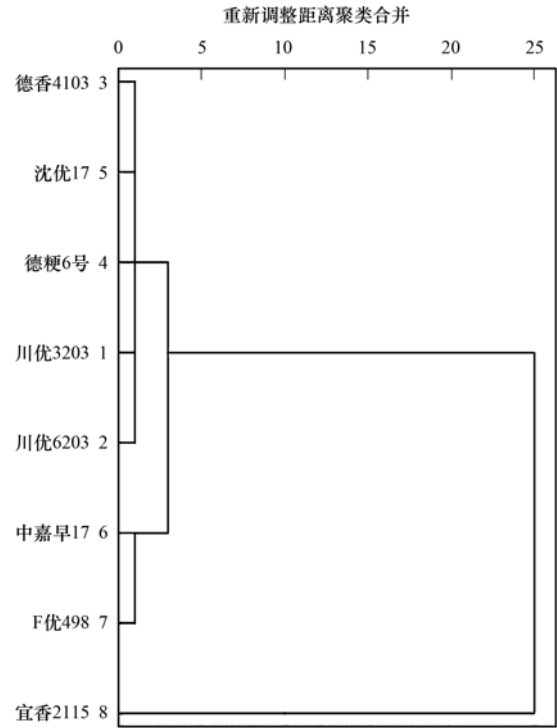
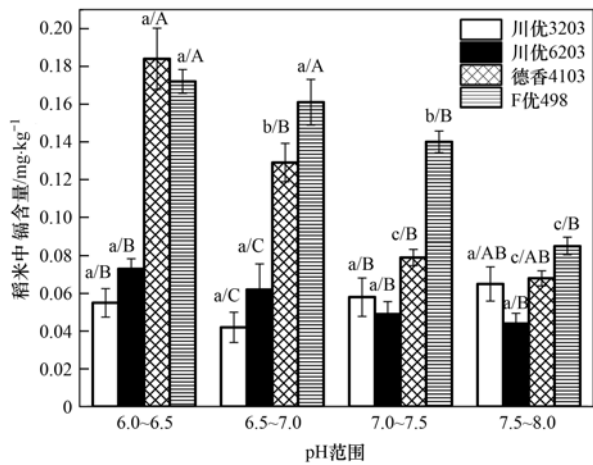


图3 不同品种水稻稻米 Cd 含量聚类分析
Fig. 3 Cluster analysis diagram of Cd content in different rice varieties

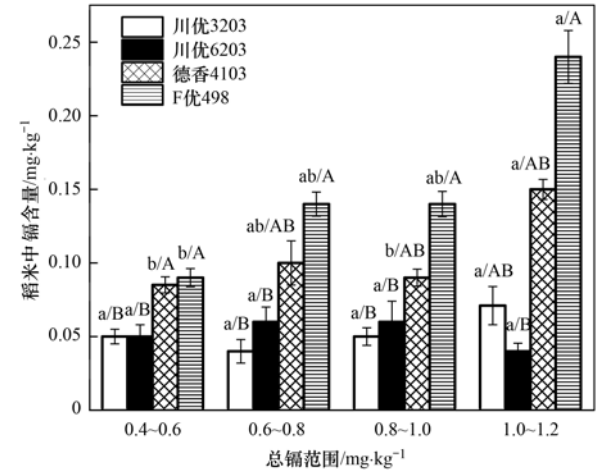
于其他两个水稻品种。

从图 5 可以看出,在不同总镉范围内川优 3203 和川优 6203 的稻米 Cd 含量均较低,稳定在 $0.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,表现出很好的镉安全性,而德香 4103 和 F 优 498 稻米中 Cd 含量普遍较高,有部分超过 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的限值.且川优 3203 和川优 6203 的稻米 Cd 含量显著低于其他两个水稻品种.



不同小写字母表示同种水稻不同 pH 之间的差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示不同水稻品种同 pH 范围之间的差异显著 ($P < 0.05$)

图4 不同品种水稻在不同 pH 范围内稻米中 Cd 含量
Fig. 4 Content of Cd in rice of different varieties in different pH range

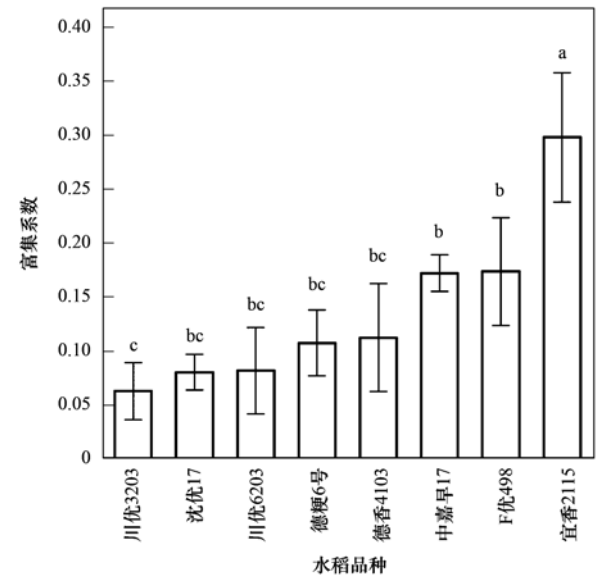


不同小写字母表示同种水稻不同 pH 之间的差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示不同水稻品种同 pH 范围之间的差异显著 ($P < 0.05$)

图5 不同品种水稻在不同总镉范围内稻米中 Cd 含量
Fig. 5 Content of Cd in rice of different varieties in different total Cd range

2.4 不同品种水稻 Cd 的吸收转运特征

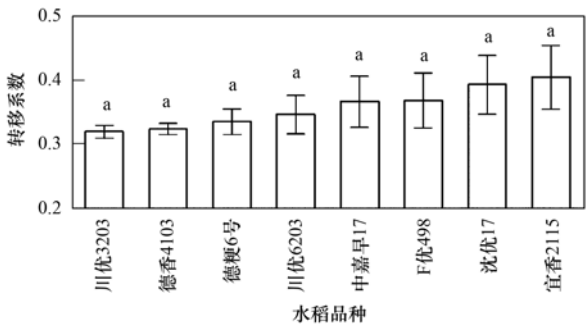
水稻的稻米富集系数在一定程度上能够反映水稻稻米对 Cd 的吸收积累情况.如图 6 所示,本试验的水稻富集系数范围为 $0.064 \sim 0.298$. 在所有水稻品种中,川优 3203 的富集系数最低为 0.064 ,宜香 2115 的富集系数最高为 0.298 . 所有试验品种水稻富集系数均小于 1,说明试验的 8 种不同品种水稻稻米对 Cd 的吸收积累能力较弱;同时,A 类水稻的富集系数普遍低于 B 类水稻的富集系数. 在所有水稻品种中,川优 3203 的富集系数显著低于其他品种水稻的富集系数.



不同小写字母表示不同水稻品种之间的差异显著 ($P < 0.05$)

图6 不同品种水稻富集系数
Fig. 6 Enrichment coefficient of different rice varieties

水稻的茎叶向稻米转运系数在一定程度上能够反映水稻茎叶向水稻稻米的转运能力. 如图 7 所示, 本试验的水稻转运系数范围为 0. 319 ~ 0. 405. 在所有水稻品种中, 川优 3203 的转运系数最低为 0. 319, 宜香 2115 的转运系数最高为 0. 405. 所有试验品种水稻转运系数均小于 1, 说明试验的 8 种不



不同小写字母表示不同水稻品种之间的差异显著 ($P < 0. 05$)

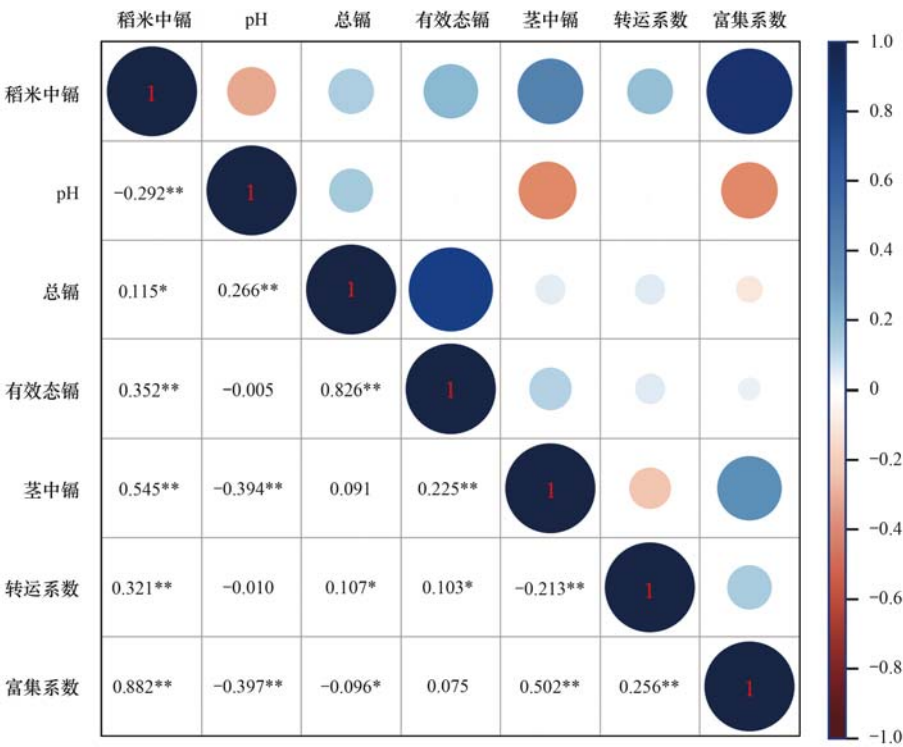
图 7 不同品种水稻转运系数

Fig. 7 Translocation coefficient of different rice varieties

同品种水稻所吸收的 Cd 不易在植株体内迁移; A 类水稻和 B 类水稻的转运吸收没有明显差异. 所有的试验水稻的转运系数均没有显著差异. 在所有水稻品种中, 川优 3203 表现出低稻米富集系数和低茎叶向稻米转运系数的特征.

2. 5 稻米 Cd 含量相关性分析

将稻米 Cd 含量与根际土 pH、总镉、有效态镉、水稻茎中镉、转运系数和富集系数进行相关性分析, 具体如图 8 所示. 稻米 Cd 含量与根际土壤总 Cd 含量呈显著正相关; 稻米 Cd 含量与根际土壤 pH 值呈极显著负相关; 稻米 Cd 含量与根际土壤有效态 Cd 含量、水稻茎中 Cd 含量、水稻转运系数和水稻富集系数呈极显著正相关. 在所有指标中, 显著性最低的指标为根际土壤总 Cd 含量, 其相关性系数为 0. 115; 显著性最高的指标为水稻富集系数, 其相关性系数为 0. 882. 说明在所有指标中, 稻米 Cd 含量受水稻富集系数影响最大, 受根际土壤总镉含量影响最小.



* 和 ** 分别表示在 0. 05 和 0. 01 水平上差异显著

图 8 稻米镉含量相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of Cd content in rice

3 讨论

根据文献 [25], 稻米 Cd 标准限值为 0. 2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 本研究显示, 在所有试验的 8 种水稻品种中, 只有宜香 2115 的稻米 Cd 含量超过了标准限值, 为轻微超标. 川优 6203 和川优 3203 稻米 Cd 含量显

著低于其他水稻品种, 宜香 2115 稻米 Cd 含量显著高于其他水稻品种, 且 A 类水稻和 B 类水稻稻米中 Cd 含量无明显差异. 各品种水稻稻米 Cd 含量依次为: 川优 3203 < 川优 6203 < 沈优 17 < 德香 4103 < 德梗 6 号 < F 优 498 < 中嘉早 17 < 宜香 2115. 任树友等 [14] 的研究发现, 德香 4103 和川优 6203 稻米 Cd

含量较低, 宜香 2115 稻米 Cd 含量较高, 为 $0.511 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这与本研究的结果一致. 结果表明, 不同品种的水稻对 Cd 的积累能力存在显著的差异. 根据本文聚类分析图结果显示, 可以将所有水稻品种分为 3 类: I 类水稻有德香 4103、沈优 17、德梗 6 号、川优 3203 和川优 6203; II 类水稻有中嘉早 17 和 F 优 498; III 类水稻有宜香 2115. 在李正文等^[26]和张成等^[27]的研究中发现, 水稻稻米对重金属的积累存在显著的品种间的差异, 在林小兵等^[28]的研究中发现, 水稻稻米对重金属的积累还存在着品种类型间的差异, 三系 A 类水稻中 Cd、Cr 和 Hg 积累能力高于两系 A 类水稻, 三系 A 类水稻和两系 A 类水稻 Pb 和无机 As 积累能力没有明显差异. 在薛涛等^[29]的研究中发现, 水稻稻米对重金属的积累还存在着早晚稻间的显著差异. 依据综合积累指数 (P_N) 对不同品种水稻对 Cd 的积累能力进行分类: ①对 Cd 综合积累能力低的水稻品种有: 川优 3203、川优 6203、德梗 6 号和沈优 17; ②对 Cd 综合积累能力较低的水稻品种有: 中嘉早 17; ③对 Cd 综合积累能力中等的水稻品种有: 德香 4103; ④对 Cd 综合积累能力较高的水稻品种有: 宜香 2115; ⑤对 Cd 综合积累能力高的水稻品种有: F 优 498.

有研究表明, 不同品种的水稻的产量存在着显著的差异^[30]. 但不同品种的水稻在 Cd 的胁迫下受到的抑制也不相同, 水稻产量因为品种的不同而受到的影响也不相同^[31,32]. 所以, 在 Cd 污染土壤上筛选水稻品种, 既要关注水稻对 Cd 的积累情况, 也要兼顾水稻的产量. 本文研究显示, 不同品种水稻产量依次为: 川优 6203 > 中嘉早 17 > 川优 3203 > 德香 4103 > F 优 498 > 沈优 17 > 德梗 6 号 > 宜香 2115; 产量最高的水稻品种是川优 6203, 产量为 $656.60 \text{ kg} \cdot (667 \text{ m}^2)^{-1}$; 产量最低的水稻品种是宜香 2115, 产量为 $431.74 \text{ kg} \cdot (667 \text{ m}^2)^{-1}$. 兼顾水稻稻米 Cd 的积累情况和水稻的产量, 推荐川优 3203 和川优 6203 作为该地区适宜种植的水稻品种, 既能保证水稻的质量安全, 又能保证水稻产量的高产.

Cd 在土壤中的生物有效性在很大程度上取决于: ①土壤的类型及其理化性质, 例如土壤的 pH 和氧化还原电位; ②Cd 的形态或者 Cd 的性质; ③土壤中的微生物的性质以及降雨、蒸发等能够改变土壤性质的活动^[33]. 易亚科等^[34]的研究显示, 稻米 Cd 含量与土壤 pH 值呈极显著相关. 同时, 土壤 pH 的增高, 土壤中 H^+ 减少, 与 Cd 离子的竞争作用减弱, 从而增强土壤对 Cd 离子的吸附, 使得土壤中的有效态 Cd 含量降低^[35]. 有研究表明, 可以通过调控土壤 pH 来减少 Cd 进入水稻稻米, 将土壤 pH 调控到

6.5 以上是降低稻米中 Cd 含量的重要手段^[36]. 本研究发现, 德香 4103 和 F 优 498 在不同 pH 范围内稻米中 Cd 含量有显著差异, 说明这两种水稻稻米中 Cd 含量受 pH 的影响较大, 这与易亚科等^[34]的研究中发现 pH 对晚稻稻米中 Cd 含量有显著影响一致; 而川优 3203 和川优 6203 在不同 pH 范围内稻米中 Cd 含量无显著差异, 这与邹佳玲等^[37]的研究结果不一致, 这可能是川优 3203 和川优 6203 作为 Cd 低累积水稻受 pH 的影响较小, 在不同 pH 下表现得较为稳定; 同时, 在各个 pH 范围内川优 3203 和川优 6203 稻米 Cd 含量均显著低于德香 4103 和 F 优 498. 有报道称, 土壤总 Cd 含量高, 水稻稻米 Cd 超标风险随之增高^[38]. 本研究发现, 德香 4103 和 F 优 498 随着土壤总 Cd 升高, 稻米中 Cd 含量随之增高, 这与代子雯等^[16]的研究结果一致. 而川优 3203 和川优 6203 随着土壤总 Cd 的升高, 稻米中 Cd 含量并无显著变化且含量较低, 说明该两种水稻对 Cd 的积累能力较低且在各个土壤环境条件下都很稳定.

水稻从土壤中吸收 Cd 并运输到籽粒的过程有 4 个主要的步骤: ①水稻根系吸收 Cd, 该过程有两种途径, 一种是共质体途径, 另外一种是非质体途径^[39]; ②通过木质部负载转运到地上部分; ③通过结节的维管重新定向运输; ④通过韧皮部从叶片再动员并最终运输到籽粒^[40]. 稻米对 Cd 的富集系数和茎叶向稻米 Cd 转运系数在一定程度上能够分别反映稻米对 Cd 的积累能力和茎叶向稻米的 Cd 转运能力. 本研究显示, 水稻品种的差异对水稻的稻米富集能力有较大的影响, 而对水稻茎叶向水稻稻米的转运能力的影响较小. 且相关性分析发现富集系数、转运系数和稻米 Cd 含量呈极显著正相关. 并且本研究筛选出来的川优 3203 和川优 6203 稻米 Cd 含量显著低于其他水稻品种, 同时, 这两种水稻的富集系数低于其他品种, 加之较低的转运能力, 最终呈现出稻米较低的镉富集能力. 这和冯爱煊等^[24]的研究中渝香 203 和 C 两优华占稻米中 Cd 含量低, 其水稻富集系数和转运系数也低的结果一致.

相关性分析结果表明, 稻米 Cd 含量与根际土壤 pH 值、根际土壤有效态 Cd 含量、水稻茎中 Cd 含量、水稻转运系数和水稻富集系数存在极显著相关关系, 受水稻富集系数影响最大, 受根际土壤总镉含量影响最小.

4 结论

(1) 根据综合积累指数 (P_N) 可以将不同水稻品种对重金属 Cd 的综合积累能力进行评价, 并将结

果分为5类:对Cd综合积累能力低的水稻品种有:川优3203、川优6203、德梗6号和沈优17;对Cd综合积累能力较低的水稻品种有:中嘉早17;对Cd综合积累能力中等的水稻品种有:德香4103;对Cd综合积累能力较高的水稻品种有:宜香2115;对Cd综合积累能力高的水稻品种有:F优498。

(2)综合考虑水稻稻米Cd含量和水稻产量,适在该地区种植的水稻品种为川优3203和川优6203,既能安全保障稻米Cd含量,又能保证水稻高产。

(3)川优3203和川优6203在不同pH和不同总镉范围内稻米中Cd含量均显著低于其他品种,且在不同土壤条件下表现得很稳定。

(4)水稻品种的差异对水稻的稻米富集能力有较大的影响,而对水稻茎叶向水稻稻米的转运能力的影响较小;川优3203和川优6203的低富集系数,加之其较低的转运,最终呈现出稻米较低的镉富集能力。

(5)相关性分析发现稻米Cd含量与根际土壤pH值、根际土壤有效态Cd含量、水稻茎中Cd含量、水稻转运系数和水稻富集系数存在极显著相关关系;稻米Cd含量受水稻富集系数影响最大,受根际土壤总Cd含量影响最小。

参考文献:

- [1] 王一志,曹雪莹,谭长银,等.不同土壤pH对红壤稻田镉形态及水稻镉积累的影响[J].湖南师范大学自然科学学报,2017,40(1):10-16.
Wang Y Z, Cao X Y, Tan C Y, et al. Effects of different soil pH on cadmium fractions and cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2017, 40(1): 10-16.
- [2] 张小敏,张秀英,钟太洋,等.中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J].环境科学,2014,35(2):692-703.
Zhang X M, Zhang X Y, Zhong T Y, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 692-703.
- [3] 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.
- [4] Hamid Y, Tang L, Yaseen M, et al. Comparative efficacy of organic and inorganic amendments for cadmium and lead immobilization in contaminated soil under rice-wheat cropping system[J]. Chemosphere, 2019, 214: 259-268.
- [5] 施亚星,吴绍华,周生路,等.土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟[J].环境科学,2016,37(10):3996-4003.
Shi Y X, Wu S H, Zhou S L, et al. Simulation of the absorption, migration and accumulation process of heavy metal elements in soil-crop system[J]. Environmental Science, 2016, 37(10): 3996-4003.
- [6] 尹明,杨大为,唐慧娟,等.黄麻修复重度镉污染农田的品种筛选[J].中国麻业科学,2020,42(4):150-156.
Yin M, Yang D W, Tang H J, et al. Comparison of the capacity of different varieties of Jute(*Corchorus capsularis* L.) to remediate heavily cadmium-contaminated farmland[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2020, 42(4): 150-156.
- [7] 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.
- [8] 石一珺,徐颖菲,倪中应,等.杭州市主要农作物对镉的富集差异及其影响因素[J].浙江农业科学,2019,60(7):1230-1233.
- [9] Chen H P, Yang X P, Wang P, et al. Dietary cadmium intake from rice and vegetables and potential health risk: a case study in Xiangtan, southern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 271-277.
- [10] 封文利,郭朝晖,史磊,等.控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响[J].环境科学,2018,39(1):399-405.
Feng W L, Guo Z H, Shi L, et al. Distribution and accumulation of cadmium in paddy soil and rice affected by pollutant sources control and improvement measures[J]. Environmental Science, 2018, 39(1): 399-405.
- [11] 于焕云,崔江虎,乔江涛,等.稻田镉污染阻控原理与技术应用[J].农业环境科学学报,2018,37(7):1418-1426.
Yu H Y, Cui J H, Qiao J T, et al. Principle and technique of arsenic and cadmium pollution control in paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(7): 1418-1426.
- [12] 周志波,易亚科,陈光辉.水稻Cd吸收、转运机理研究进展[J].作物杂志,2017,(1):14-19.
Zhou Z B, Yi Y K, Chen G H. Advances in Cd uptake and transport in rice[J]. Crops, 2017, (1): 14-19.
- [13] Liu J G, Zhu Q S, Zhang Z J, et al. Variations in cadmium accumulation among rice cultivars and types and the selection of cultivars for reducing cadmium in the diet[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(1): 147-153.
- [14] 任树友,何玉亭,李浩,等.轻度镉污染土壤上不同水稻品种间镉富集及产量差异研究[J].四川农业科技,2020,(6):50-52.
- [15] Zhang H J, Zhang X Z, Li T X, et al. Variation of cadmium uptake, translocation among rice lines and detecting for potential cadmium-safe cultivars[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(1): 277-286.
- [16] 代子雯,方成,孙斌,等.地质高背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素[J].环境科学,2021,42(4):2016-2023.
Dai Z W, Fang C, Sun B, et al. Cadmium accumulation characteristics and impacting factors of different rice varieties under paddy soils with high geological backgrounds[J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 2016-2023.
- [17] 朱雅琪,梁金明,李彬,等.我国土壤镉污染现状分析及修复技术研究[A].见:中国环境科学学会2019年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集(四)[C].西安:中国环境科学学会环境工程分会,2019.
- [18] 串丽敏,赵同科,郑怀国,等.土壤重金属污染修复技术研究进展[J].环境科学与技术,2014,37(120):213-222.
Chuan L M, Zhao T K, Zheng H G, et al. Research advances in remediation of heavy metal contaminated soils[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(120): 213-222.

- [19] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments-a review[J]. Waste Management, 2008, **28**(1): 215-225.
- [20] 杨寒雯, 刘方, 刘秀明, 等. 农田土壤镉污染修复技术研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2020, **39**(2): 58-63.
Yang H W, Liu F, Liu X M, *et al.* Advances in study on the remediation techniques of farmland soil contaminated by Cadmium[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2020, **39**(2): 58-63.
- [21] 孙约兵, 王朋超, 徐应明, 等. 海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4720-4726.
Sun Y B, Wang P C, Xu Y M, *et al.* Immobilization remediation of Cd and Pb contaminated soil: remediation potential and soil environmental quality[J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4720-4726.
- [22] 鄢小龙, 马宏朕, 李元, 等. 铅锌矿区周边农田 Cd、Pb 低累积玉米品种筛选[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, **34**(6): 1076-1083.
Yan X L, Ma H Z, Li Y, *et al.* Screening zeo mays cultivars based upon accumulation of Cd and Pb in the farmland around the lead-zinc mine area[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2019, **34**(6): 1076-1083.
- [23] 常瑛, 李彦荣, 施志国, 等. 基于内梅罗综合污染指数的农田耕层土壤重金属污染评价[J]. 安徽农业科学, 2019, **47**(19): 63-67, 80.
Chang Y, Li Y R, Shi Z G, *et al.* Evaluation of soil heavy metal pollution in farmland soils based on nemero comprehensive pollution index[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, **47**(19): 63-67, 80.
- [24] 冯爱煊, 贺红周, 李娜, 等. 基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, **37**(6): 988-1000.
Feng A X, He H Z, Li N, *et al.* Screening of rice varieties with low accumulation of heavy metals based on multiple target elements and their absorption and transport characteristics in rice plants[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, **37**(6): 988-1000.
- [25] GB 2762-2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [26] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄入风险[J]. 环境科学, 2003, **24**(3): 112-115.
Li Z W, Zhang Y L, Pan G X, *et al.* Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. Environmental Science, 2003, **24**(3): 112-115.
- [27] 张成, 李浩, 任树友, 等. 不同小麦品种籽粒对土壤镉吸收差异性的初步研究[J]. 四川农业科技, 2016, (9): 39-41.
- [28] 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.
- [29] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(8): 1818-1826.
Xue T, Liao X Y, Wang L Q, *et al.* Cadmium accumulation in different rice cultivars from cadmium-polluted paddy fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(8): 1818-1826.
- [30] 刘琦, 胡剑锋, 周伟, 等. 四川盆地不同类型水稻品种机插栽培的干物质生产及产量特性分析[J]. 中国水稻科学, 2019, **33**(1): 35-46.
Liu Q, Hu J F, Zhou W, *et al.* Dry matter production and yield characteristics of machine-transplanted rice varieties falling into different types in Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2019, **33**(1): 35-46.
- [31] 王刚, 孙梦飞, 钟雪梅, 等. 镉胁迫下不同水稻品种镉的累积与产量差异比较[J]. 中国农学通报, 2017, **33**(17): 76-81.
Wang G, Sun M F, Zhong X M, *et al.* Cadmium accumulation and yield difference of different rice varieties under cadmium stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, **33**(17): 76-81.
- [32] Pál M, Horváth E, Janda T, *et al.* Physiological changes and defense mechanisms induced by cadmium stress in maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006, **169**(2): 239-246.
- [33] Dong J, Mao W H, Zhang G P, *et al.* Root excretion and plant tolerance to cadmium toxicity-a review[J]. Plant Soil and Environment, 2007, **53**(5): 193-200.
- [34] 易亚科, 周志波, 陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(3): 428-436.
Yi Y K, Zhou Z B, Chen G H. Effects of soil pH on growth and grain cadmium content in rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(3): 428-436.
- [35] Anderson T A, Guthrie E A, Walton B T. Bioremediation in the rhizosphere[J]. Environmental Science & Technology, 1993, **27**(13): 2630-2636.
- [36] 康六生. 土壤 pH·淹水调控与低镉积累品种在水稻大田生产上的降镉效果[J]. 安徽农业科学, 2018, **46**(20): 110-112, 128.
Kang L S. Cadmium reduction effects of soil pH, flood control and low cadmium accumulation variety in rice field production[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, **46**(20): 110-112, 128.
- [37] 邹佳玲, 辜娇峰, 杨文毅, 等. 不同 pH 值灌溉水对土壤 Cd 生物有效性及稻米 Cd 含量的影响[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(4): 1508-1514.
Zou J L, Gu J F, Yang W T, *et al.* Effects of different pH values of irrigation water on soil Cd bioavailability and Cd content in rice[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(4): 1508-1514.
- [38] Liu J G, Cao C X, Wong M, *et al.* Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and the relation with plant cadmium uptake[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(7): 1067-1072.
- [39] 马卉, 焦小雨, 许学, 等. 水稻重金属镉代谢的生理和分子机制研究进展[J]. 作物杂志, 2020, (1): 1-8.
Ma H, Jiao X Y, Xu X, *et al.* Advances in physiological and molecular mechanisms of cadmium metabolism in rice[J]. Crops, 2020, (1): 1-8.
- [40] Li H, Luo N, Li Y W, *et al.* Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. Environmental Pollution, 2017, **224**: 622-630.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)