

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2010~2015年我国水泥工业 NO _x 排放清单及排放特征	蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煅烧污染物排放清单及其对 PM _{2.5} 浓度贡献	郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征	孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征	温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单	郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险	盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征	杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应	石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析	胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响	彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响	陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响	白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 δ ¹⁵ N 空间差异及成因分析	唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律	耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素	张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算	熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响	李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征	刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响	葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用	王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用	卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H ₂ O ₂ 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶	张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N ₂ O 产生途径	杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响	安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行	于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学	唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性	张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N ₂ O 释放的冲击影响	付昆明, 姜娜, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析	房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析	伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布	刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH	姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征	申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响	王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响	俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响	郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响	曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性	林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤	曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO ₂ 通量日变化观测及其影响因素分析	罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH ₄ 排放特征及其影响因素	商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响	罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展	冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展	杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素	张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事 (4848)	《环境科学》征稿简则 (4990)
信息 (5188, 5216, 5236)	

不同水稻品种对重金属的积累特性

林小兵¹, 周利军¹, 王惠明², 刘晖², 武琳¹, 俞莹², 胡敏³, 何波³, 周青辉², 黄欠如^{1*}

(1. 江西省红壤研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 331717; 2. 江西省农业环境监测站, 南昌 330046; 3. 萍乡市农业局, 萍乡 337000)

摘要: 采用田间试验法, 以南方主要种植的 129 个水稻品种为研究对象, 通过对稻米样品中镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)、无机砷(As)和总汞(Hg)重金属含量的测定, 分析不同品种和类型的水稻对重金属吸收能力的差异。结果表明, 35 个早稻糙米 Cd 含量在 0.35~0.60 mg·kg⁻¹ 之间, 超标率 100%, 糙米 Pb 含量在 0.08~0.30 mg·kg⁻¹ 之间, 超标率 14.29%; 54 个中稻糙米 Cd 含量在 0.03~0.45 mg·kg⁻¹ 之间, 超标率 33.33%; 40 个晚稻糙米 Cd 含量在 0.08~0.20 mg·kg⁻¹ 之间, 均未超过国家标准。早、中、晚稻都表现出三系杂交稻糙米 Cd 含量高于两系杂交稻, 但是差异不明显; 早稻三系杂交稻糙米 Cr 和总 Hg 含量显著高于两系杂交稻。中稻糙米 Cd 含量与 Pb 和总 Hg 含量间呈显著正相关; 与糙米中无机 As 含量间存在极显著负相关; 而与糙米中 Cr 含量间相关性不明显。总之, 水稻对重金属的吸收积累, 受遗传背景、品种类型和重金属互作的影响较大。

关键词: 水稻品种; 重金属; 镉; 杂交稻; 糙米

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-5198-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804027

Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties

LIN Xiao-bing¹, ZHOU Li-jun¹, WANG Hui-ming², LIU Hui², WU Lin¹, YU Ying², HU Min³, HE Bo³, ZHOU Qing-hui², HUANG Qian-ru^{1*}

(1. National Red Soil Improvement Engineering Technology Research Center, Red Soil Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang 331717, China; 2. Agricultural Environmental Monitoring Station of Jiangxi, Nanchang 330046, China; 3. Agricultural Bureau of Pingxiang, Pingxiang 337000, China)

Abstract: Field experiments were conducted on the heavy metal contents (Cd, Pb, Cr, inorganic As, and total Hg) of the 129 main cultivated rice varieties in southern China. We analyzed the effects of different varieties and types of rice on the absorption capacities of these heavy metals. The results showed that the Cd content in 35 brown rice of early rice was 0.35-0.60 mg·kg⁻¹, exceeding the standard rate of 100%. The Pb content in brown rice was 0.08-0.30 mg·kg⁻¹, exceeding the rate of 14.29%. The Cd content in 54 brown rice of medium rice was 0.03-0.45 mg·kg⁻¹, exceeding the rate of 33.33%. The Cd content in 40 brown rice of late rice was 0.08-0.20 mg·kg⁻¹, which did not exceed the national standard. Early, middle, and late rice all showed that the Cd content of three-line hybrid rice was higher than that of two-line hybrid rice, but the difference was not obvious. The contents of Cr and total Hg in brown rice of three-line hybrid rice in early rice were significantly higher than that of two-line hybrid rice. There was a significant positive correlation between Cd content in brown rice and Pb and total Hg content in medium rice, and there was a significant negative correlation between inorganic Cd content and inorganic As content, whereas there was no significant correlation between Cd and Cr content. In short, rice's absorption and accumulation of heavy metals is greatly affected by genetic background, species types, and heavy metal interactions.

Key words: rice variety; heavy metal; Cd; hybrid rice; brown rice

近年来, 由于污水灌溉、污泥农用及含有重金属的农药、化肥、杀虫剂等不合理使用, 造成我国农田土壤重金属污染日益加重, 土壤重金属长期积累不仅破坏土壤生态环境, 阻碍动植物生长, 而且通过食物链危及人体健康^[1]。在我国土壤重金属污染主要以镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)等污染为主^[2]。水稻是我国第一大粮食作物, 并且对重金属具有强吸收的特征, 土壤-水稻系统重金属污染问题已成为一个重要的研究领域^[3]。在重金属污染土壤中种植水稻, 不仅影响了水稻产量, 而且稻米富集后通过食物链进入人体引

起健康风险^[4]。

对于控制重金属向水稻中转移^[5]: 一方面通过化学固定降低土壤中重金属的活性使其钝化, 例如调控土壤酸碱度(pH)、施用钝化剂或改良剂(如石灰石、沸石粉、磷酸盐类、膨润土、生物炭等)^[6,7]; 另一方面则种植重金属抗性强、低累积型的水稻品

收稿日期: 2018-04-03; 修订日期: 2018-05-16

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20171ACG70022); 国家重点研发计划项目(2016YFD0200101); 公益性行业(农业)科研专项(201503122-11)

作者简介: 林小兵(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向土壤重金属污染修复及其评价, E-mail: linxiaobing@xtbg.ac.cn

* 通信作者, E-mail: qianruhuang@163.com

种或合理灌溉^[8,9]. 已有研究表明^[10], 不同品种稻米中对于重金属的吸收和积累存在显著差异, 不同的水稻品种或基因类型对重金属的耐性不同, 从而对重金属元素的吸收和积累差异很大, 而且不同基因型水稻品种对重金属的种类也存在明显的差异^[11~13]. 不同品种水稻对 Pb、Hg 的耐性和富集能力存在显著的基因型差异. 合理选育高耐性低积累水稻品种是有效降低稻米重金属污染风险的一个有效途径^[13~15].

大多数研究针对不同水稻品种对某一重金属吸收积累的差异, 当前的重金属低累积水稻品种筛选主要关注的是重金属 Cd, 而对于其他重金属 Hg 尤其是 As 的低累积水稻品种报道较少^[10], 而事实上土壤环境中重金属的污染常常是多种重金属的复合污染^[16~18], 而对多种重金属复合污染土壤上水稻对重金属积累能力差异研究比较少. 关于水稻对重金属的吸收特征研究以室内模拟为主, 但是研究表明水稻在室内模拟和大田试验条件下的生长状况、对重金属元素的吸收、积累和转运具有一定的差异^[19,20]. 本试验通过研究大田生产条件下不同水稻品种对土壤中重金属 (Cd、Pb、Cr、无机 As 和总 Hg) 的积累特性的差异, 不仅对于模拟试验是必不可少的验证与补充, 也可以全面了解水稻品种对不同重金属积累特征.

本试验选用市场上已审定推广试验的早中晚主栽水稻品种, 在萍乡重金属污染土壤中进行水稻品种筛选大田试验, 分析同等条件下不同水稻品种对重金属 Cd、Pb、Cr、无机 As 和总 Hg 吸收积累的差异性, 通过筛选出重金属低吸收或低积累水稻品种, 降低水稻重金属富集含量, 以期研究水稻品种对重金属的吸收规律和机制提供科学、准确的数据, 并为土壤重金属修复治理提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 供试材料

参与筛选的水稻品种共 129 个, 其中早稻品种 35 个、中稻品种 54 个、晚稻品种 40 个. 具体水稻品种目录见表 1~3. 供试水稻品种由江西省农业科学院、江西省农技总站、湖南隆平高科、江西天涯种业、江西现代种业等单位或公司提供.

试验地位于江西省萍乡市湘东区湘东镇某村 (113°46'02"E, 27°33'47"N, 160 m). 属于亚热带湿润季风气候区, 四季分明, 光照充足, 雨量丰沛, 气候温和, 霜期较短, 年平均气温 17.3℃, 平均日

照时间为 1 500 h 左右, 年平均降雨量 1 580 mm. 试验区土壤为红壤性水稻土, 壤土, 土壤肥力中等, 排灌方便, 属于已受污染的常规耕作大田. 对试验田土壤按梅花形 5 点混合取样进行检测分析其土壤理化性质. 试验前耕层土壤 pH 值 5.30, 有机质 33.43 g·kg⁻¹, 阳离子交换量 20.16 cmol·kg⁻¹, 土壤重金属 Cd 含量 0.86 mg·kg⁻¹, 土壤 Pb 含量 34.00 mg·kg⁻¹、土壤 Cr 含量 61.73 mg·kg⁻¹ 和土壤 As 含量 14.60 mg·kg⁻¹.

1.2 试验设计

试验大田面积为 1 hm², 其中早稻和晚稻每个品种小区面积为 1.5 m² (1 m × 1.5 m), 中稻每个品种小区面积为 2.4 m² (1.2 m × 2 m). 整个试验分早稻、中稻和晚稻这 3 组分别进行品种筛选试验, 采用随机区组排列, 设 3 次重复, 每个小区种植 50 穴, 其中早稻和晚稻株行距为 (5 株 × 20 cm) × (10 株 × 16.5 cm), 中稻株行距为 (5 株 × 26.5 cm) × (10 株 × 20 cm). 试验田四周设保护行, 保护行栽插对应小区品种, 保护行不少于 5 行. 小区间、小区与保护行间留操作走道. 供试早稻品种 2015 年 4 月 6 日播种, 采用湿润水育秧, 用农膜保温, 5 月 3 日施基肥, 5 月 4 日同规格移栽, 移栽密度为 16.5 cm × 20 cm, 7 月 15 日采集稻谷样品, 7 月 20 日收割. 供试中稻品种 2015 年 5 月 21 日播种, 采用湿润水育秧, 6 月 11 日施基肥, 6 月 12 日同规格移栽, 移栽密度为 20 cm × 26.5 cm, 针对中稻生长期分别在 9 月 24 日、10 月 3 日和 10 月 17 日采集稻谷样品. 供试晚稻品种 2015 年 6 月 16 日播种, 采用湿润水育秧, 用农膜保温, 7 月 8 日同规格移栽, 移栽密度为 16.5 cm × 20 cm, 10 月 21 日采集稻谷样品, 10 月 28 日收割. 肥料施用: 统一测土配方施肥法施肥, 移栽前整田块时施 45% 复合肥 600 kg·hm⁻² 作基肥, 移栽后 7 d 施尿素 600 kg·hm⁻² 作促蘖肥, 孕穗初期施尿素、氯化钾 600 kg·hm⁻² 作穗肥.

1.3 样品采集与分析

植株样品采集于水稻收获期, 分别对各小区进行样品的采集, 每个处理小区采 5 株水稻, 收获的水稻样品各部分分别用去离子水洗净, 晾干后放入烘箱, 于 105℃ 下杀青 30 min, 在 70℃ 下烘干至恒重, 稻谷脱壳成糙米并粉碎. 样品用湿式消解法消解后, 用石墨炉原子吸收光谱法测定 Cd、Pb、Cr; 样品中无机 As 测定, 用湿式消解法消解后, 用原子荧光光度法测定; 样品中总 Hg 测定, 用微波消解法消解, 用原子荧光光度法测定. 在测定稻米样

品的同时,使用国家标准物质湖南大米 GBW10045 (GSB-23),进行质量控制分析,同时全程进行空白试验.

1.4 数据处理

不同品种水稻糙米 Cd、Pb、Cr、无机 As 和总 Hg 含量数据均为平均值 $\pm$ 标准差. 应用 R 3.4.3 (www.r-project.org) 进行统计和分析数据,各处理间差异显著性分析采用 R 语言 vegan 程序包中 t 检验,通过 R 语言线性相关分析糙米 Cd 含量与其对应重金属 Pb、Cr、无机 As 和总 Hg 含量的相关性,以上制图通过 R 语言软件完成. 不同水稻品种糙米 Cd 含量聚类分析由 DPS 数据处理软件完成并制图.

2 结果与分析

2.1 不同品种稻米重金属含量差异

由表 1 中不同早稻品种稻米重金属含量的比较

可以看出. 各品种糙米 Cd 含量变幅不大,35 个水稻品种糙米 Cd 含量在 $0.35 \sim 0.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,最高值和最低值相差 2 倍,均值为 $0.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均超过 GB/T 5009.15 (国家标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),超标率 100%,吸收量最多的主要为早丰优 402、五优 301、五优 156、荣优 463、淦鑫 203 等. 糙米 Pb 含量在 $0.08 \sim 0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中 5 个水稻品种超过 GB 5009.12 (国家标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),超标率 14.29%,5 个糙米 Pb 含量超标的水稻品种为株两优 538、株两优 6108、陵两优 104、早丰优 402 和陆两优 98. 35 个品种糙米 Cr 含量 (GB/T 5009.123,国家标准要求 $\leq 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、无机 As 含量 (GB/T 5009.11,国家标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和总 Hg 含量 (GB/T 5009.17,国家标准要求 $\leq 0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 均未超过国家标准,其中糙米 Cr 含量在 $0.02 \sim 0.38$

表 1 不同早稻品种稻米重金属含量的比较/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Comparison of heavy metal content in brown rice of early rice varieties/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

样品编号	品种名称	类型	镉 (Cd) (标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铅 (Pb) (标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铬 (Cr) (标准要求 $\leq 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	无机砷 (As) (标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总汞 (Hg) (标准要求 $\leq 0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
ZZA01	株两优 39	两系杂交稻	0.49 ± 0.13	0.20 ± 0.19	0.19 ± 0.16	0.09 ± 0.09	0.002 ± 0.001
ZZA02	株两优 6108	两系杂交稻	0.44 ± 0.08	0.22 ± 0.12	0.15 ± 0.12	0.17 ± 0.03	0.003 ± 0.002
ZZA03	株两优 538	两系杂交稻	0.46 ± 0.10	0.30 ± 0.36	0.33 ± 0.17	0.12 ± 0.03	0.004 ± 0.001
ZZA04	株两优 706	两系杂交稻	0.37 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.22 ± 0.16	0.15 ± 0.02	0.004 ± 0.002
ZZA05	株两优 606	两系杂交稻	0.48 ± 0.09	0.17 ± 0.09	0.24 ± 0.16	0.12 ± 0.03	0.009 ± 0.005
ZZA06	株两优 1 号	两系杂交稻	0.45 ± 0.08	0.08 ± 0.05	0.18 ± 0.12	0.13 ± 0.04	0.007 ± 0.004
ZZA07	株两优 819	两系杂交稻	0.41 ± 0.08	0.15 ± 0.10	0.19 ± 0.07	0.13 ± 0.04	0.004 ± 0.001
ZZA08	陵两优 211	两系杂交稻	0.44 ± 0.13	0.15 ± 0.03	0.10 ± 0.06	0.10 ± 0.03	0.004 ± 0.001
ZZA09	陵两优 611	两系杂交稻	0.42 ± 0.05	0.12 ± 0.04	0.11 ± 0.04	0.12 ± 0.04	0.004 ± 0.001
ZZA10	陵两优 915	两系杂交稻	0.42 ± 0.06	0.12 ± 0.06	0.13 ± 0.06	0.10 ± 0.03	0.007 ± 0.002
ZZA11	陵两优 32	两系杂交稻	0.50 ± 0.09	0.12 ± 0.05	0.05 ± 0.01	0.11 ± 0.00	0.003 ± 0.000
ZZA12	潭两优 83	两系杂交稻	0.46 ± 0.07	0.11 ± 0.02	0.06 ± 0.06	0.12 ± 0.01	0.004 ± 0.001
ZZA13	陆两优 35	两系杂交稻	0.42 ± 0.10	0.11 ± 0.07	0.20 ± 0.11	0.13 ± 0.02	0.004 ± 0.001
ZZA14	中早 35	常规稻	0.49 ± 0.07	0.15 ± 0.02	0.02 ± 0.02	0.13 ± 0.03	0.003 ± 0.001
ZZA15	中早 39	常规稻	0.51 ± 0.13	0.15 ± 0.02	0.08 ± 0.07	0.14 ± 0.05	0.002 ± 0.002
ZZA16	中嘉早 17	常规稻	0.48 ± 0.06	0.16 ± 0.05	0.04 ± 0.06	0.11 ± 0.05	0.002 ± 0.003
ZZA17	江早 361	常规稻	0.47 ± 0.09	0.17 ± 0.07	0.08 ± 0.11	0.10 ± 0.01	0.005 ± 0.003
ZZB01	陵两优 268	两系杂交稻	0.35 ± 0.10	0.14 ± 0.07	0.26 ± 0.07	0.14 ± 0.05	0.006 ± 0.001
ZZB02	陵两优 104	两系杂交稻	0.47 ± 0.06	0.28 ± 0.07	0.16 ± 0.06	0.08 ± 0.04	0.006 ± 0.001
ZZB03	陵两优 942	两系杂交稻	0.35 ± 0.05	0.18 ± 0.08	0.21 ± 0.11	0.06 ± 0.00	0.006 ± 0.001
ZZB04	荣优 286	三系杂交稻	0.37 ± 0.11	0.14 ± 0.11	0.24 ± 0.05	0.13 ± 0.05	0.008 ± 0.003
ZZB05	五丰优 286	三系杂交稻	0.38 ± 0.11	0.16 ± 0.11	0.23 ± 0.04	0.10 ± 0.03	0.005 ± 0.001
ZZB06	五优 301	三系杂交稻	0.56 ± 0.13	0.16 ± 0.06	0.21 ± 0.11	0.12 ± 0.04	0.006 ± 0.001
ZZB07	早丰优 402	三系杂交稻	0.60 ± 0.07	0.22 ± 0.19	0.37 ± 0.24	0.12 ± 0.04	0.006 ± 0.002
ZZB08	金优 458	三系杂交稻	0.35 ± 0.15	0.10 ± 0.05	0.18 ± 0.05	0.09 ± 0.05	0.006 ± 0.001
ZZB09	淦鑫 203	三系杂交稻	0.52 ± 0.10	0.12 ± 0.05	0.38 ± 0.31	0.12 ± 0.04	0.013 ± 0.007
ZZB10	优 I 156	三系杂交稻	0.39 ± 0.07	0.13 ± 0.02	0.19 ± 0.02	0.12 ± 0.06	0.007 ± 0.003
ZZB11	优 I 651	三系杂交稻	0.48 ± 0.07	0.19 ± 0.17	0.26 ± 0.08	0.13 ± 0.04	0.007 ± 0.001
ZZB12	优 I 2009	三系杂交稻	0.49 ± 0.12	0.10 ± 0.04	0.20 ± 0.10	0.07 ± 0.02	0.007 ± 0.002
ZZB13	五优 156	三系杂交稻	0.54 ± 0.05	0.19 ± 0.23	0.26 ± 0.17	0.10 ± 0.04	0.006 ± 0.001
ZZB14	五丰优 623	三系杂交稻	0.39 ± 0.02	0.13 ± 0.06	0.21 ± 0.06	0.13 ± 0.05	0.006 ± 0.001
ZZB15	陵两优 193	两系杂交稻	0.44 ± 0.11	0.11 ± 0.05	0.15 ± 0.04	0.07 ± 0.04	0.006 ± 0.000
ZZB16	陆两优 98	两系杂交稻	0.47 ± 0.07	0.21 ± 0.16	0.27 ± 0.06	0.05 ± 0.04	0.007 ± 0.002
ZZB17	荣优 608	三系杂交稻	0.49 ± 0.05	0.09 ± 0.06	0.27 ± 0.18	0.10 ± 0.02	0.006 ± 0.002
ZZB18	荣优 463	三系杂交稻	0.53 ± 0.10	0.14 ± 0.01	0.20 ± 0.06	0.09 ± 0.05	0.005 ± 0.002

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 $0.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 糙米无机 As 之间, 均值为 $0.005 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.
含量在 $0.05 \sim 0.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 0.11 由表 2 中不同中稻品种糙米重金属含量的比较
 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 糙米总 Hg 含量在 $0.002 \sim 0.013 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 可以看出, 各品种糙米 Cd 含量变幅较大, 54 个水

表 2 不同中稻品种糙米重金属含量的比较/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Comparison of heavy metal content in brown rice of different middle rice varieties/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

样品编号	品种名称	类型	镉 (Cd)	铅 (Pb)	铬 (Cr)	无机砷 (As)	总汞 (Hg)
			(标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	(标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	(标准要求 $\leq 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	(标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	(标准要求 $\leq 0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
YJA01	C 两优华占	两系杂交稻	0.11 ± 0.01	0.04 ± 0.03	0.07 ± 0.01	0.14 ± 0.02	0.003 ± 0.001
YJA02	欣荣优华占	三系杂交稻	0.11 ± 0.06	0.03 ± 0.03	0.12 ± 0.09	0.15 ± 0.00	0.002 ± 0.001
YJA03	天优华占	三系杂交稻	0.15 ± 0.02	0.02 ± 0.01	0.06 ± 0.05	0.13 ± 0.01	0.002 ± 0.000
YJA04	川优华占	三系杂交稻	0.11 ± 0.06	0.01 ± 0.0	0.11 ± 0.09	0.14 ± 0.04	0.002 ± 0.001
YJA05	农香优 676	三系杂交稻	0.10 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.15 ± 0.04	0.001 ± 0.001
YJA06	丰优 989	三系杂交稻	0.18 ± 0.04	0.02 ± 0.01	0.05 ± 0.02	0.18 ± 0.02	0.003 ± 0.001
YJA07	两优 8106	两系杂交稻	0.08 ± 0.04	0.03 ± 0.05	0.04 ± 0.02	0.05 ± 0.01	0.003 ± 0.001
YJA08	徽两优 996	两系杂交稻	0.06 ± 0.07	0.03 ± 0.06	0.06 ± 0.03	0.16 ± 0.04	0.003 ± 0.000
YJA09	徽两优 9810	两系杂交稻	0.11 ± 0.08	0.02 ± 0.02	0.09 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.002 ± 0.002
YJA10	新华两优 9 号	两系杂交稻	0.25 ± 0.03	0.02 ± 0.01	0.05 ± 0.02	0.16 ± 0.01	0.004 ± 0.001
YJA11	常 3 号	常规稻	0.08 ± 0.04	0.06 ± 0.06	0.06 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.009 ± 0.001
YJA12	内 5 优 8015	三系杂交稻	0.24 ± 0.02	0.03 ± 0.05	0.11 ± 0.03	0.19 ± 0.01	0.003 ± 0.001
YJB01	C 两优 608	两系杂交稻	0.15 ± 0.05	0.13 ± 0.04	0.07 ± 0.04	0.17 ± 0.01	0.008 ± 0.007
YJB02	盐两优 888	两系杂交稻	0.24 ± 0.02	0.08 ± 0.06	0.08 ± 0.03	0.16 ± 0.01	0.005 ± 0.002
YJB03	新两优 6380	两系杂交稻	0.14 ± 0.12	0.06 ± 0.05	0.08 ± 0.03	0.17 ± 0.02	0.003 ± 0.001
YJB04	深两优 865	两系杂交稻	0.18 ± 0.02	0.08 ± 0.07	0.18 ± 0.17	0.11 ± 0.01	0.007 ± 0.004
YJB05	和两优 1 号	两系杂交稻	0.17 ± 0.11	0.04 ± 0.01	0.07 ± 0.02	0.12 ± 0.01	0.006 ± 0.002
YJB06	Y 两优 9918	两系杂交稻	0.09 ± 0.06	0.02 ± 0.02	0.09 ± 0.05	0.16 ± 0.02	0.003 ± 0.002
YJB07	创两优 520	两系杂交稻	0.09 ± 0.04	0.09 ± 0.08	0.13 ± 0.05	0.17 ± 0.02	0.003 ± 0.003
YJB08	C 两优 520	两系杂交稻	0.17 ± 0.03	0.06 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.13 ± 0.01	0.005 ± 0.003
YJB09	徽两优 520	两系杂交稻	0.08 ± 0.06	0.09 ± 0.09	0.07 ± 0.04	0.15 ± 0.02	0.005 ± 0.001
YJB10	广两优 520	两系杂交稻	0.06 ± 0.04	0.05 ± 0.04	0.07 ± 0.05	0.17 ± 0.01	0.005 ± 0.001
YJB11	荃优 68	三系杂交稻	0.14 ± 0.05	0.07 ± 0.06	0.08 ± 0.04	0.15 ± 0.02	0.006 ± 0.003
YJB12	湘晚籼 13 号	常规稻	0.03 ± 0.01	0.08 ± 0.08	0.08 ± 0.04	0.14 ± 0.01	0.007 ± 0.004
YJC01	Y 两优 1 号	两系杂交稻	0.29 ± 0.06	0.12 ± 0.06	0.09 ± 0.02	0.13 ± 0.01	0.004 ± 0.002
YJC02	中浙优 1 号	三系杂交稻	0.29 ± 0.21	0.09 ± 0.03	0.08 ± 0.02	0.13 ± 0.01	0.008 ± 0.009
YJC03	广两优 1128	两系杂交稻	0.20 ± 0.03	0.10 ± 0.03	0.17 ± 0.12	0.12 ± 0.04	0.004 ± 0.002
YJC04	甬优 1538	三系杂交稻	0.15 ± 0.13	0.06 ± 0.03	0.10 ± 0.06	0.12 ± 0.03	0.003 ± 0.000
YJC05	Y 两优 5813	两系杂交稻	0.33 ± 0.09	0.07 ± 0.06	0.39 ± 0.48	0.12 ± 0.02	0.002 ± 0.001
YJC06	丰两优四号	两系杂交稻	0.16 ± 0.10	0.07 ± 0.05	0.09 ± 0.00	0.13 ± 0.05	0.002 ± 0.001
YJC07	Y 两优 3218	两系杂交稻	0.24 ± 0.19	0.05 ± 0.01	0.18 ± 0.14	0.10 ± 0.02	0.002 ± 0.002
YJC08	两优 126	两系杂交稻	0.24 ± 0.24	0.07 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.10 ± 0.02	0.004 ± 0.003
YJC09	常 1 号	常规稻	0.20 ± 0.14	0.12 ± 0.09	0.10 ± 0.03	0.11 ± 0.02	0.003 ± 0.002
YJC10	常 2 号	常规稻	0.11 ± 0.02	0.03 ± 0.05	0.97 ± 1.56	0.09 ± 0.01	0.002 ± 0.001
YJC11	黄华占	常规稻	0.10 ± 0.13	0.02 ± 0.02	0.07 ± 0.02	0.14 ± 0.03	0.002 ± 0.001
YJC12	五山丝苗	常规稻	0.12 ± 0.06	0.11 ± 0.05	0.17 ± 0.11	0.10 ± 0.01	0.002 ± 0.000
YJD01	Y 两优 5867	两系杂交稻	0.19 ± 0.06	0.16 ± 0.13	0.23 ± 0.31	0.12 ± 0.03	0.006 ± 0.001
YJD02	璐优 8 号	三系杂交稻	0.28 ± 0.04	0.04 ± 0.04	0.16 ± 0.21	0.11 ± 0.01	0.006 ± 0.003
YJD03	Y 两优 689	两系杂交稻	0.20 ± 0.07	0.07 ± 0.06	0.06 ± 0.03	0.12 ± 0.04	0.007 ± 0.001
YJD04	Y 两优 2 号	两系杂交稻	0.16 ± 0.05	0.06 ± 0.01	0.23 ± 0.02	0.13 ± 0.05	0.006 ± 0.001
YJD05	深两优 5814	两系杂交稻	0.15 ± 0.03	0.05 ± 0.00	0.11 ± 0.05	0.10 ± 0.01	0.005 ± 0.000
YJD06	Y 两优 302	两系杂交稻	0.45 ± 0.15	0.08 ± 0.07	0.06 ± 0.07	0.13 ± 0.01	0.005 ± 0.001
YJD07	Y 两优 6 号	两系杂交稻	0.17 ± 0.12	0.07 ± 0.01	0.08 ± 0.04	0.10 ± 0.01	0.008 ± 0.004
YJD08	Y 两优 646	两系杂交稻	0.20 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.08 ± 0.08	0.11 ± 0.03	0.006 ± 0.001
YJD09	荆两优 1198	两系杂交稻	0.19 ± 0.05	0.05 ± 0.06	0.15 ± 0.18	0.13 ± 0.02	0.006 ± 0.001
YJD10	广两优香 66	两系杂交稻	0.45 ± 0.08	0.02 ± 0.04	0.12 ± 0.09	0.13 ± 0.01	0.007 ± 0.003
YJD11	Y 两优 3399	两系杂交稻	0.27 ± 0.09	0.03 ± 0.03	0.05 ± 0.03	0.13 ± 0.06	0.007 ± 0.003
YJD12	Y 两优 916	两系杂交稻	0.25 ± 0.07	0.08 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.11 ± 0.01	0.006 ± 0.000
YJE01	春优 84	三系杂交稻	0.31 ± 0.06	0.16 ± 0.02	0.19 ± 0.26	0.09 ± 0.08	0.008 ± 0.001
YJE02	甬优 12 号	三系杂交稻	0.37 ± 0.03	0.17 ± 0.03	0.35 ± 0.35	0.09 ± 0.04	0.009 ± 0.001
YJE03	甬优 9 号	三系杂交稻	0.42 ± 0.11	0.14 ± 0.00	0.09 ± 0.02	0.05 ± 0.01	0.008 ± 0.001
YJE04	秀水 09	常规稻	0.15 ± 0.03	0.16 ± 0.01	0.03 ± 0.00	0.10 ± 0.11	0.007 ± 0.002
YJE05	甬优 538	籼粳杂交稻	0.25 ± 0.04	0.19 ± 0.01	0.28 ± 0.15	0.10 ± 0.04	0.007 ± 0.000
YJE06	外引 7 号	常规稻	0.43 ± 0.11	0.11 ± 0.00	0.07 ± 0.02	0.03 ± 0.00	0.010 ± 0.002

稻品种糙米 Cd 含量在 0.03 ~ 0.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 最高值和最低值相差 15 倍, 均值为 0.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 18 个品种糙米镉含量在 0.24 ~ 0.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 超过国家标准, 超标率 33.33%; 36 个品种糙米镉含量在 0.03 ~ 0.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 符合国家标准, 吸收量最多的主要为 Y 两优 302、Y 两优 5813、中浙优 1 号、Y 两优 1 号、路优 8 号等. 54 个品种糙米 Pb 含量、Cr 含量、无机 As 含量和总 Hg 含量均未超过国家标准, 其中糙米 Pb 含量在 0.01 ~ 0.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 0.07 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 糙米 Cr 含量

在 0.03 ~ 0.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 0.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 糙米无机 As 含量在 0.03 ~ 0.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 0.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 糙米总 Hg 含量在 0.001 ~ 0.010 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 0.005 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

由表 3 中不同晚稻品种糙米重金属含量的比较可以看出, 各品种糙米 Cd 含量变幅不大, 40 个水稻品种糙米 Cd 含量在 0.08 ~ 0.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 最高值和最低值相差 2 倍, 均值为 0.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均未超过国家标准. 糙米 Pb 含量在 0.10 ~ 0.41

表 3 不同晚稻品种糙米重金属含量的比较/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Comparison of heavy metal content in brown rice of different late rice varieties/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

样品编号	品种名称	类型	镉 (Cd)	铅 (Pb)	铬 (Cr)	无机砷 (As)	总汞 (Hg)
			(标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	(标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	(标准要求 $\leq 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	(标准要求 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	(标准要求 $\leq 0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
WZA01	五优 308	三系杂交稻	0.14 ± 0.02	0.12 ± 0.02	0.13 ± 0.11	0.07 ± 0.02	0.004 ± 0.000
WZA02	五优 103	三系杂交稻	0.14 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.08 ± 0.10	0.06 ± 0.03	0.003 ± 0.000
WZA03	五丰优 61	三系杂交稻	0.16 ± 0.02	0.12 ± 0.01	0.30 ± 0.39	0.04 ± 0.02	0.003 ± 0.000
WZA04	天丰优 T025	三系杂交稻	0.13 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.04 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.004 ± 0.001
WZA05	早丰优华占	三系杂交稻	0.13 ± 0.03	0.13 ± 0.03	0.11 ± 0.11	0.09 ± 0.08	0.003 ± 0.000
WZA06	丰两优晚三	两系杂交稻	0.11 ± 0.01	0.12 ± 0.02	0.26 ± 0.23	0.08 ± 0.06	0.003 ± 0.000
WZA07	两优 6206	两系杂交稻	0.12 ± 0.03	0.13 ± 0.02	0.26 ± 0.29	0.04 ± 0.02	0.004 ± 0.000
WZA08	湘丰优 100	三系杂交稻	0.08 ± 0.03	0.13 ± 0.01	0.13 ± 0.03	0.06 ± 0.01	0.004 ± 0.000
WZA09	奥两优 28	两系杂交稻	0.13 ± 0.02	0.13 ± 0.03	0.14 ± 0.09	0.03 ± 0.02	0.004 ± 0.001
WZA10	泰优 398	三系杂交稻	0.15 ± 0.02	0.13 ± 0.03	0.12 ± 0.07	0.07 ± 0.01	0.003 ± 0.000
WZA11	五丰优 T025	三系杂交稻	0.14 ± 0.02	0.12 ± 0.02	0.13 ± 0.14	0.03 ± 0.01	0.003 ± 0.000
WZA12	丰两优一号	两系杂交稻	0.12 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.13 ± 0.08	0.04 ± 0.02	0.004 ± 0.000
WZA13	隆优 308	三系杂交稻	0.14 ± 0.04	0.14 ± 0.04	0.10 ± 0.11	0.06 ± 0.04	0.004 ± 0.001
WZA14	泰优 98	三系杂交稻	0.13 ± 0.03	0.13 ± 0.01	0.11 ± 0.10	0.08 ± 0.03	0.003 ± 0.000
WZA15	吉优 225	三系杂交稻	0.14 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.06 ± 0.02	0.03 ± 0.01	0.003 ± 0.000
WZA16	岳优 617	三系杂交稻	0.13 ± 0.03	0.13 ± 0.02	0.13 ± 0.09	0.06 ± 0.02	0.004 ± 0.000
WZA17	荣优 308	三系杂交稻	0.15 ± 0.01	0.12 ± 0.02	0.07 ± 0.07	0.03 ± 0.01	0.003 ± 0.000
WZA18	吉优 335	三系杂交稻	0.17 ± 0.04	0.31 ± 0.29	0.10 ± 0.09	0.04 ± 0.01	0.003 ± 0.000
WZA19	农丰优 909	三系杂交稻	0.10 ± 0.01	0.12 ± 0.02	0.11 ± 0.07	0.04 ± 0.01	0.004 ± 0.001
WZA20	湘晚粳 12 号	常规稻	0.15 ± 0.04	0.13 ± 0.04	0.05 ± 0.04	0.04 ± 0.01	0.003 ± 0.001
WZB01	欣优 827	三系杂交稻	0.14 ± 0.04	0.15 ± 0.03	0.09 ± 0.05	0.07 ± 0.02	0.003 ± 0.001
WZB02	江科 736	三系杂交稻	0.17 ± 0.04	0.14 ± 0.05	0.14 ± 0.03	0.08 ± 0.02	0.004 ± 0.001
WZB03	汕优 736	三系杂交稻	0.12 ± 0.04	0.13 ± 0.01	0.09 ± 0.06	0.05 ± 0.01	0.003 ± 0.000
WZB04	天优 827	三系杂交稻	0.15 ± 0.04	0.12 ± 0.01	0.08 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.003 ± 0.000
WZB05	天丰优 6418	三系杂交稻	0.17 ± 0.04	0.12 ± 0.00	0.14 ± 0.08	0.05 ± 0.01	0.003 ± 0.000
WZB06	科优 6418	三系杂交稻	0.1 ± 50.01	0.11 ± 0.02	0.16 ± 0.12	0.03 ± 0.01	0.003 ± 0.001
WZB07	五优华占	三系杂交稻	0.13 ± 0.03	0.12 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.04	0.003 ± 0.000
WZB08	五优航 666	三系杂交稻	0.12 ± 0.02	0.11 ± 0.01	0.07 ± 0.03	0.03 ± 0.00	0.003 ± 0.001
WZB09	五优航 1573	三系杂交稻	0.08 ± 0.01	0.12 ± 0.02	0.09 ± 0.06	0.03 ± 0.01	0.003 ± 0.001
WZB10	奥龙优 282	两系杂交稻	0.16 ± 0.03	0.12 ± 0.05	0.10 ± 0.06	0.05 ± 0.02	0.003 ± 0.001
WZB11	五丰优淦 3 号	三系杂交稻	0.20 ± 0.02	0.14 ± 0.01	0.15 ± 0.07	0.06 ± 0.02	0.003 ± 0.000
WZB12	泰优淦 3 号	三系杂交稻	0.17 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.15 ± 0.05	0.04 ± 0.01	0.003 ± 0.000
WZB13	深优 1029	三系杂交稻	0.11 ± 0.02	0.16 ± 0.03	0.10 ± 0.06	0.04 ± 0.01	0.004 ± 0.001
WZB14	荣优华占	三系杂交稻	0.13 ± 0.02	0.11 ± 0.01	0.07 ± 0.04	0.04 ± 0.01	0.003 ± 0.000
WZB15	五丰优 662	三系杂交稻	0.16 ± 0.03	0.13 ± 0.01	0.09 ± 0.04	0.03 ± 0.00	0.003 ± 0.000
WZB16	湘晚粳 13 号	常规稻	0.13 ± 0.03	0.12 ± 0.02	0.12 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.003 ± 0.000
WZB17	甬优 2640	籼粳杂交稻	0.18 ± 0.03	0.13 ± 0.02	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.04	0.003 ± 0.001
WZB18	甬优 5549	籼粳杂交稻	0.16 ± 0.04	0.10 ± 0.02	0.12 ± 0.03	0.05 ± 0.01	0.002 ± 0.000
WZB19	花优 14	三系杂交稻	0.15 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.17 ± 0.11	0.05 ± 0.00	0.003 ± 0.001
WZB20	小叶迟熟	常规稻	0.11 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.09 ± 0.07	0.05 ± 0.04	0.003 ± 0.001

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $0.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中 1 个水稻品种超标($0.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),超标率 2.5%,糙米 Pb 含量超标的水稻品种为吉优 335. 40 个品种糙米 Cr 含量、无机 As 含量和总 Hg 含量均未超过国家标准,其中糙米 Cr 含量在 $0.04 \sim 0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $0.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;糙米无机 As 含量在 $0.03 \sim 0.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;糙米总 Hg 含量在 $0.002 \sim 0.004 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $0.003 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.2 不同水稻品种糙米 Cd 含量聚类分析

对供试水稻糙米重金属 Cd 含量进行聚类分析,结果见图 1. 早稻糙米 Cd 含量聚类分析可分为

3 类[图 1(a)]:第 I 类各 1 个品种(优 I 2009)、第 II 类各 1 个品种(早丰优 402)和第 III 类其他 33 个品种. 中稻糙米 Cd 含量聚类分析可分为 3 类[图 1(b)]:第 I 类各 4 个品种(Y 两优 302、广两优香 66、甬优 9 号和外引 7 号)、第 II 类各 1 个品种(甬优 12 号)和第 III 类其他 49 个品种. 晚稻糙米 Cd 含量聚类分析可分为 3 类[图 1(c)]:第 I 类各 2 个品种(湘丰优 100 和优航 1573)、第 II 类各 2 个品种(丰两优一号和五丰优淦 3 号)和第 III 类其他 38 个品种. 其中第 I 类和第 II 类糙米重金属 Cd 含量最高,因此,在重金属污染区进行品种选择时可以优先考虑第 III 类.

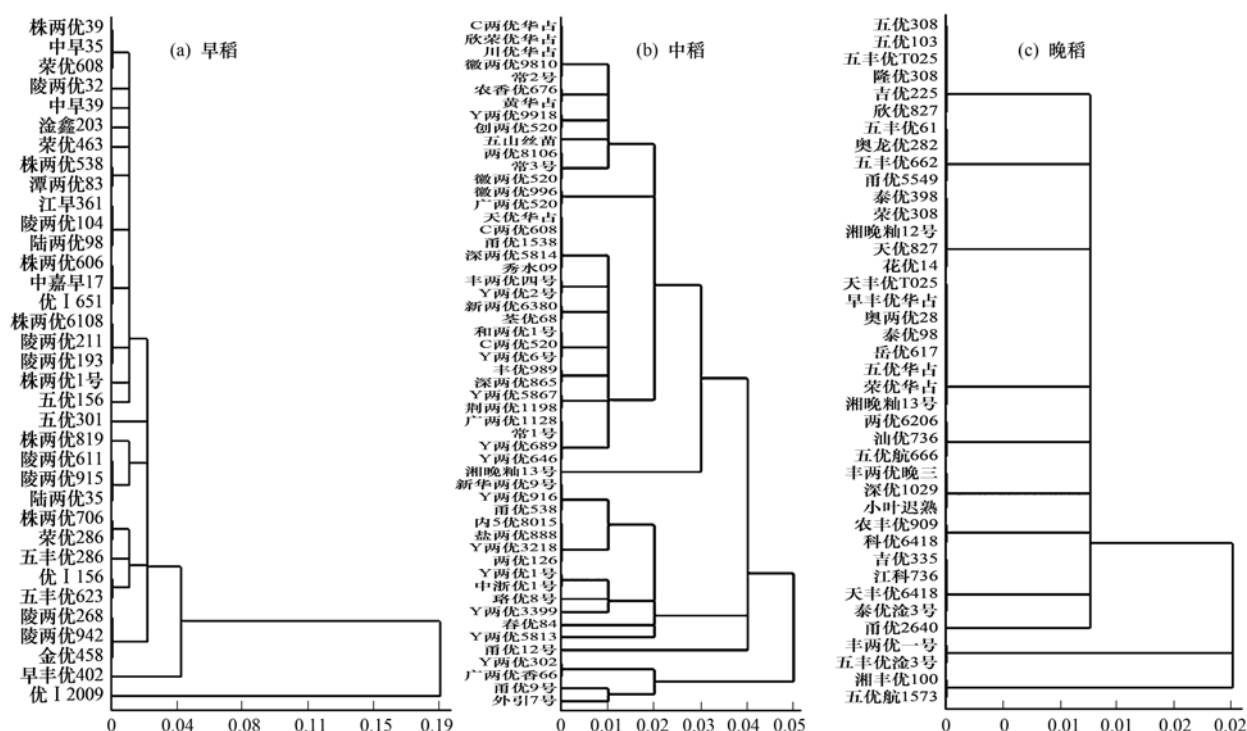


图 1 不同水稻品种糙米 Cd 含量聚类分析

Fig. 1 Clustering analysis of the Cd content of brown rice in different rice varieties

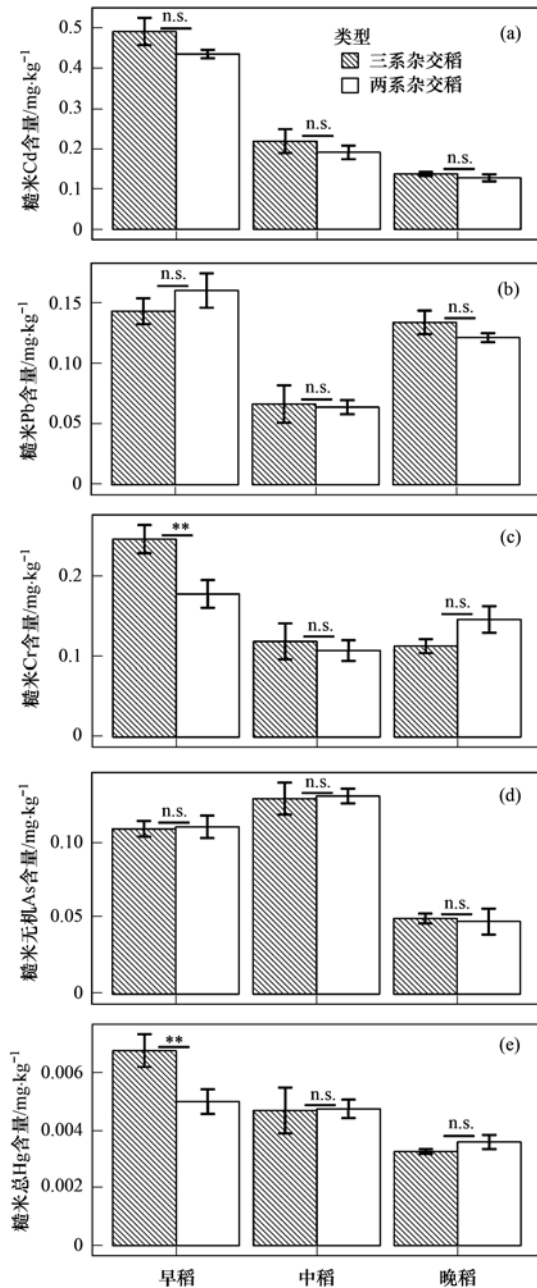
2.3 不同类型水稻糙米重金属积累特性

为了进一步分析水稻品种对重金属吸收的差异,通过选择不同种植时期不同水稻类型比较了两系杂交稻与三系杂交稻重金属积累差异.从图 2 可以看出,早、中、晚稻都表现出三系杂交稻 Cd 含量略高于两系杂交稻,但是两系杂交稻与三系杂交稻间糙米 Cd 含量无明显差异[$P > 0.05$, 图 2(a)].早稻两系杂交稻与三系杂交稻间糙米 Cr、总 Hg 含量有显著差异($P < 0.01$),具体表现为三系杂交稻糙米 Cr、总 Hg 含量极显著高于两系杂交稻[图 2(c)和图 2(e)].两系杂交稻与三系杂交稻间糙米 Pb 含量和无机 As 含量无明显差异[$P > 0.05$, 图 2

(b)和图 2(d)].

2.4 糙米 Cd 与重金属 Pb、Cr、无机 As 和总 Hg 间的相互关系

进一步了解糙米重金属之间吸收机制,分析了早、中、晚稻糙米中 Cd 含量与糙米 Pb、Cr、无机 As 和总 Hg 含量相互间的关系,中稻糙米 Cd 含量与 Pb 含量间呈显著正相关($r = 0.44$, $P = 0.02$);中稻糙米 Cd 含量与总 Hg 含量间呈极显著正相关($r = 0.34$, $P = 0.001$);中稻糙米 Cd 含量与无机 As 含量间存在极显著负相关($r = 0.43$, $P = 0.001$);中稻糙米 Cd 含量与 Cr 含量间相关性较差($r = 0.28$, $P = 0.65$).



** 与 n. s. 表示相同种植时期水稻的杂交稻品种显著差异, 其中 ** 表示 $P < 0.01$, n. s. 表示 $P > 0.05$

图2 二系和三系杂交稻糙米重金属含量的差异

Fig. 2 Differences in heavy metal content in brown rice between two-line hybrid rice and three-line hybrid rice

3 讨论

3.1 不同品种稻米重金属含量差异

品种差异是影响水稻对重金属元素吸收的主要因素. 本研究中糙米重金属污染影响最大的是 Cd, 其次是 Pb, 而 Cr、无机 As 和总 Hg 影响较小. 本试验中 35 个早稻品种糙米 Cd 含量在 $0.35 \sim 0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超标率 100%; 糙米 Pb 含量在 $0.08 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,

超标率 14.29%; 糙米 Cr、无机 As 和总 Hg 含量均未超过国家标准. 54 个中稻品种糙米 Cd 含量在 $0.03 \sim 0.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 $0.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超标率 33.33%; 糙米 Pb、Cr、无机 As 和总 Hg 含量均未超过国家标准. 40 个晚稻品种糙米 Cd 含量在 $0.08 \sim 0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均未超过国家标准; 糙米 Pb 含量在 $0.10 \sim 0.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 超标率 2.5%; 糙米 Cr、无机 As 和总 Hg 含量均未超过国家标准. 已有研究表明水稻对镉的积累和耐性具有明显的品种间差异^[21~23]. 水稻品种不同, 造成作物形态结构和生理特性产生差异, 导致水稻对重金属元素的吸收和分配存在很大差异^[24,25]. 温娜^[26]的研究表明在轻微度和轻度污染区 (土壤有效镉含量在 $0.3 \sim 0.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间), 株两优 819 和中嘉早 17 属于稻米中 Cd 积累量较低且遗传稳定性好的基因型, 而在本试验中株两优 819 和中嘉早 17 的稻谷 Cd 含量超标, 可能是由于不同筛选试验研究的条件不统一, 即环境因素不同而引起的, 特别是本试验选用的土壤 Cd 含量较高需要进一步试验和探讨, 各水稻品种对镉吸收和累积受地力条件、农艺操作等环境因素影响大, 可能要远远大于基因型效应.

3.2 不同类型水稻糙米重金属积累特性

早、中、晚稻都表现出三系杂交稻 Cd 含量高于两系杂交稻, 但是差异不明显, 早稻三系杂交稻糙米 Cr、总 Hg 含量显著高于两系杂交稻, 两系杂交稻与三系杂交稻间糙米 Pb 和无机 As 含量没有明显差异. 殷敬峰等^[17]的研究发现, 三系杂交稻的糙米 Cd、Cu 含量极显著高于两系杂交稻, 曾翔等^[27]的研究结果也表明糙米对 Cd 的积累能力表现为三系杂交晚稻 > 两系杂交晚稻. 本试验中表现出三系杂交稻 Cd 含量略高于两系杂交稻, 但是没有达到显著差异, 可能由于样本量大小和水稻品种的影响. 李波等^[8]的研究发现对 Hg 的吸收积累顺序是: 籼型常规稻 > 三系杂交稻 > 两系杂交稻. 仲维功等^[28]的研究同时发现, 不同类型水稻品种对于 As 的累积不存在显著差异性, 这一点与本研究水稻品种对于 As 的累积没有明显差异结果相一致. 不同水稻品种由于遗传上的差异, 对稻田中重金属的吸收存在很大差异, 水稻对重金属的吸收积累, 受品种类型和遗传背景的影响较大.

3.3 糙米 Cd 与重金属 Pb、Cr、无机 As 和总 Hg 间的相互关系

中稻糙米 Cd 含量与 Pb 和总 Hg 含量间呈显著

正相关;与无机 As 含量间存在极显著负相关;而与 Cr 含量间相关性较差. 这表明,本试验过程中中稻对 Cd、Pb 和 Cd、总 Hg 的吸收积累表现出协同吸收,对 Cd、无机 As 的吸收积累表现出拮抗作用,而对 Cd、Cr 的积累相互间关系不明显. 周启星等^[29]和徐加宽等^[30]的研究发现,土壤中不同重金属元素组合和器官、不同供试品种、浓度、以及在不同供试条件下,重金属间的相互作用具有不同的表现形式(协同作用或拮抗作用). 研究发现不同基因类型水稻品种吸收重金属时重金属元素间的排斥作用不同^[31]. 关于水稻糙米吸收积累重金属的过程以及重金属元素间的相互作用还要进一步研究和证实.

以上研究表明,水稻各品种间和类型对重金属(以重金属 Cd 为主)的吸收和累积存在差异,早、中、晚稻品种筛选试验数据差异很大,不仅受到季节差异、降水、气温影响,而且还与试验田土壤、农艺操作等因素有关. 综上,水稻对重金属特别是镉的吸收和累积是个复杂的过程,而本试验是基于萍乡地区一年周期大田试验,受各种环境因素影响大,因此还需要通过更多因素的比较试验,同时应增加盆栽试验,为筛选出镉低积累型水稻品种提供更准确、全面的数据.

4 结论

(1)35 个早稻品种糙米 Cd 含量在 $0.35 \sim 0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超标率 100%;糙米 Pb 含量在 $0.08 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,超标率 14.29%;54 个中稻品种糙米 Cd 含量在 $0.03 \sim 0.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $0.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超标率 33.33%;40 个晚稻品种糙米 Cd 含量在 $0.08 \sim 0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均未超过国家标准.

(2)根据糙米 Cd 含量进行聚类分析,将早、中、晚稻划为 3 类,其中第 I 类和第 II 类糙米重金属 Cd 含量最高,在重金属污染区进行品种选择时可以优先考虑第 III 类.

(3)早、中、晚稻都表现出三系杂交稻 Cd 含量明显高于两系杂交稻,早稻三系杂交稻糙米 Cr、总 Hg 含量显著高于两系杂交稻,而两系杂交稻与三系杂交稻间糙米 Pb 和无机 As 含量差异不明显.

(4)中稻糙米 Cd 含量与 Pb 和总 Hg 含量间呈显著正相关;与无机 As 含量间存在极显著负相关;而与 Cr 含量间相关性较差.

参考文献:

- [1] 郭朝晖,朱永官. 典型矿冶周边地区土壤重金属污染及有效性含量[J]. 生态环境, 2004, 13(4): 553-555.
Guo Z H, Zhu Y G. Contamination and available contents of heavy metals in soils in the typical mining and smelting circumjacent districts[J]. Ecology and Environmental, 2004, 13(4): 553-555.
- [2] 周建军,周桔,冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 315-320, 350.
Zhou J J, Zhou J, Feng R G. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2014, 29(3): 315-320, 350.
- [3] Wei S Q, Jarvis N. Modelling of cadmium transport in soil-crop system[J]. Pedosphere, 2000, 10(1): 1-9.
- [4] Abedin M J, Feldmann J, Meharg A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice plants [J]. Plant Physiology, 2002, 128(3): 1120-1128.
- [5] 张桃林. 科学认识和防治耕地土壤重金属污染[J]. 土壤, 2015, 47(3): 435-439.
Zhang T L. More comprehensive understanding and effective control of heavy metal pollution of cultivated soils in china[J]. Soils, 2015, 47(3): 435-439.
- [6] 陈立伟,杨文骏,辜娇峰,等. 复合改良剂对 Cd 污染稻田早晚稻产地修复效果[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2546-2552.
Chen L W, Yang W T, Gu J F, et al. Remedying effects of a combined amendment for paddy soil polluted with Cd for spring and autumn rice[J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2546-2552.
- [7] 高子翔,周航,杨文骏,等. 基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5299-5307.
Gao Z X, Zhou H, Yang W T, et al. Impacts of silicon fertilizer as base manure on cadmium bioavailability in soil and on cadmium accumulation in rice plants [J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5299-5307.
- [8] 李波,杜瑞英,文典,等. 广东省主栽水稻品种糙米重金属含量差异研究[J]. 热带农业科学, 2014, 34(5): 5-10.
Li B, Du R Y, Wen D, et al. Difference of heavy metal contents in rice of main cultivated rice varieties in Guangdong province [J]. Chinese Journal of Tropical Agricultural, 2014, 34(5): 5-10.
- [9] 杨定清,雷绍荣,李霞,等. 大田水分管理对控制稻米镉含量的技术研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(18): 11-16.
Yang D Q, Lei S R, Li X, et al. Controlling cadmium concentration in rice by field water management technology[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(18): 11-16.
- [10] 周歆,周航,胡森,等. 不同杂交水稻品种糙米中重金属 Cd、Zn、As 含量的差异研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11): 145-150.
Zhou W, Zhou H, Hu W, et al. The difference of Cd, Zn and As accumulation in different hybrid rice cultivars [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(11): 145-150.
- [11] 杨春刚,廖西元,章秀福,等. 不同基因型水稻籽粒对镉积累的差异[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(6): 660-662.
Yang C G, Liao X Y, Zhang X F, et al. Genotypic difference in cadmium accumulation in brown rice [J]. Chinese Journal of

- Rice Science, 2006, **20**(6): 660-662.
- [12] 刘建国, 李坤权, 张祖建, 等. 水稻不同品种对铅吸收、分配的差异及机理[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(2): 291-294.
Liu J G, Li K Q, Zhang Z J, *et al.* Difference of lead uptake and distribution in rice cultivars and its mechanism [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, **15**(2): 291-294.
- [13] Jiang S L, Shi C H, Wu J G. Studies on mineral nutrition and safety of wild rice (*Oryza L.*) [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2009, **60**(S1): 139-147.
- [14] 陈笑. 水稻镉(Cd)毒害及其防治研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2010, **17**(7): 1-7.
Chen X. Cadmium toxicity to rice and its preventions [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2010, **17**(7): 1-7.
- [15] 蒋彬, 张慧萍. 水稻精米中铅镉砷含量基因型差异的研究[J]. 云南师范大学学报, 2002, **22**(3): 37-40.
Jiang B, Zhang H P. Genotypic differences in concentrations of plumbum, cadmium and arsenicum in polished rice grains [J]. Journal of Yunnan Normal University, 2002, **22**(3): 37-40.
- [16] 王林友, 竺朝娜, 王建军, 等. 水稻镉、铅、砷低含量基因型的筛选[J]. 浙江农业学报, 2012, **24**(1): 133-138.
Wang L Y, Zhu C N, Wang J J, *et al.* Screening for rice (*Oryza sativa L.*) genotypes with lower Cd, Pb and As contents [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2012, **24**(1): 133-138.
- [17] 殷敬峰, 李华兴, 卢维盛, 等. 不同品种水稻糙米对 Cd Cu Zn 积累特性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(5): 844-850.
Yin J F, Li H X, Lu W S, *et al.* Variations of Cd, Cu, Zn accumulation among rice cultivars [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(5): 844-850.
- [18] 周东美, 王玉军, 仓龙, 等. 土壤及土壤-植物系统中复合污染的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, **5**(10): 1-8.
Zhou D M, Wang Y J, Cang L, *et al.* Advances in the research of combined pollution in soil and soil-plant systems [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2004, **5**(10): 1-8.
- [19] Li Z W, Li L Q, Pan G X, *et al.* Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: soil type versus genotype effects [J]. Plant and Soil, 2005, **271**(1-2): 165-173.
- [20] Shi J, Li L Q, Pan G X. Variation of grain Cd and Zn concentrations of 110 hybrid rice cultivars grown in a low-Cd paddy soil [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(2): 168-172.
- [21] 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取风险[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.
- [22] 李正文. 镉处理下不同水稻品种对两种土壤中铅、镉的吸收及其生育期动态[D]. 南京: 南京农业大学, 2003. 7-33.
Li Z W. Uptake of Pb and Cd by 2 rice cultivars in 2 soils differing in physico-chemical properties under spiked Cd treatment and its dynamics in growing period [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003. 7-33.
- [23] 张成, 李浩, 任树友, 等. 不同水稻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, (8): 36-38.
Zhang C, Li H, Ren S Y, *et al.* Preliminary study on the difference of soil Cd uptake by different rice cultivars [J]. Science and Technology of Sichuan Agricultural, 2016(8): 36-38.
- [24] 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.
- [25] Yu H, Wang J L, Fang W, *et al.* Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice [J]. Science of the Total Environment, 2006, **370**(2-3): 302-309.
- [26] 温娜. 基因型和钙离子对水稻镉吸收特性的影响[D]. 天津: 天津师范大学, 2015.
Wen N. Effects of genotype and calcium on the characteristics of cadmium absorption in rice [D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2015.
- [27] 曾翔, 张玉烛, 王凯荣, 等. 不同品种水稻糙米含镉量差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, **22**(1): 67-69, 83.
Zeng X, Zhang Y X, Wang K R, *et al.* Genotype difference of brown rices in cd content [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, **22**(1): 67-69, 83.
- [28] 仲维功, 杨杰, 陈志德, 等. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素 Pb、Cd、Hg、As 积累的差异[J]. 江苏农业学报, 2006, **22**(4): 331-338.
Zhong W G, Yang J, Chen Z D, *et al.* Differences in accumulation and distribution of Pb, Cd, Hg and As in rice cultivars and their organs [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2006, **22**(4): 331-338.
- [29] 周启星, 吴燕玉, 熊先哲. 重金属 Cd-Zn 对水稻的复合污染和生态效应[J]. 应用生态学报, 1994, **5**(4): 438-441.
Zhou Q X, Wu Y Y, Xiong X Z. Compound pollution of Cd and Zn and its ecological effect on rice plant [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994, **5**(4): 438-441.
- [30] 徐加宽, 杨连新, 王余龙, 等. 水稻对重金属元素的吸收与分配机理的研究进展[J]. 植物学通报, 2005, **22**(5): 614-622.
Xu J K, Yang L X, Wang Y L, *et al.* Advances in the study uptake and accumulation of heavy metal in rice (*Oryza sativa*) and its mechanisms [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2005, **22**(5): 614-622.
- [31] 龚伟群, 李恋卿, 潘根兴. 杂交水稻对 Cd 的吸收与籽粒积累: 土壤和品种交互影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1647-1653.
Gong W Q, Li L Q, Pan G X. Cd uptake and accumulation in grains by hybrid rice in two paddy soils: interactive effect of soil type and cultivars [J]. Environmental Science, 2006, **27**(8): 1647-1653.

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α -HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)