



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

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

冯爱煊, 贺红周, 李娜, 李伟, 魏世强, 蒋珍茂

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0617>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施加脱硫石膏对紫色土壤-水稻系统重金属累积的影响

胡翔宇, 向秋洁, 罗伯林, 尚二凤, 木志坚

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 459–466 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0044>

郴州尾矿区不同油菜品种对重金属吸收积累特性的比较

杨洋, 黎红亮, 陈志鹏, 廖柏寒, 曾清如

农业资源与环境学报. 2015(4): 370–376 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0210>

秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响

倪中应, 沈倩, 章明奎

农业资源与环境学报. 2017, 34(3): 215–225 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0305>

成都平原不同种植模式下重金属镉污染风险和经济效益评价

刘海涛, 陈一兵, 田静, 林超文

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 184–191 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0164>

河北省蔬菜大棚土壤及蔬菜中重金属累积分析

孙硕, 李菊梅, 马义兵, 赵会薇

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 236–244 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0163>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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 Ai-xuan, HE Hong-zhou, LI Na, 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.



开放科学 OSID

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

冯爱煊^{1,2}, 贺红周³, 李娜^{1,2}, 李伟³, 魏世强^{1,2*}, 蒋珍茂^{1,2*}

(1.西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2.重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715; 3.重庆市农业技术推广总站, 重庆 401147)

摘要:选择重庆市主推的13个水稻品种为受试对象,采用田间原位小区试验,比较不同基因型水稻品种籽粒对镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)等潜在危害大的重金属元素累积的差异,分析其在水稻植株各部位的转运与分配特征及其与籽粒吸收累积的关系,筛选多目标元素低累积品种,为水稻安全生产提供依据。结果表明:不同水稻品种籽粒Cd、As、Pb和Cr含量极值相差分别超过3、4、20倍和3倍,同一品种对不同重金属元素的累积能力也存在很大差异,重金属低累积水稻品种筛选需以多种污染元素为目标。运用重金属综合累积指数 P_z ,将供试水稻品种重金属综合累积能力分为低($P_z < 0.7$)、中等($0.7 \leq P_z < 1.0$)和高($P_z \geq 1.0$)三类,其中Y两优1号、隆两优534和隆两优华占为重金属低累积品种。水稻品种基因型差异对重金属累积的影响以籽粒最大、茎叶部和根部次之。茎叶向籽粒的转运系数 TF_{SL-G} 是水稻基因型差异的重要体现,与籽粒重金属含量呈极显著正相关($P < 0.01$)。13种供试水稻平均产量在 $5.85 \sim 10.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,极值相差44.8%,产量较高的6个水稻品种的产量均超过 $9.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;平均穗粒数差异是决定产量的主要因素。兼顾水稻产量与籽粒重金属累积情况,推荐隆两优534、Y两优1号、袁两优908和渝香203品种为重庆地区适宜品种,既能获得高产也利于水稻安全生产。

关键词:水稻品种;重金属;基因型;累积;分配;食品安全

中图分类号:X503.231;S511 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2020)06-0988-13 doi:10.13254/j.jare.2019.0617

Screening of rice varieties with low accumulation of heavy metals based on multiple target elements and their absorption and transport characteristics in rice plants

FENG Ai-xuan^{1,2}, HE Hong-zhou³, LI Na^{1,2}, LI Wei³, WEI Shi-qiang^{1,2*}, JIANG Zhen-mao^{1,2*}

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2.Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China; 3.Chongqing Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401147, China)

Abstract: In order to obtain rice varieties with low accumulation of heavy metals for safe rice production, an in-situ field experiment was conducted in Chongqing. The accumulation capacity for heavy metals, including Cd, As, Pb, and Cr, of the 13 main rice cultivars with different genotypes was compared, and the characteristics of heavy metal absorption, translocation, and distribution in rice plants in relation

收稿日期:2019-12-17 录用日期:2020-02-14

作者简介:冯爱煊(1993—),男,天津人,硕士研究生,从事土壤重金属修复研究。E-mail:315003812@qq.com

*通信作者:魏世强 E-mail:sqwei@swu.edu.cn; 蒋珍茂 E-mail:winding@swu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800600);重庆市科学技术委员会重点研发计划项目(cstc2017shms-zdyfX0008);中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2018B045)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2018YFD0800600); The Key R&D Program of Chongqing Committee of Science and Technology(cstc2017shms-zdyfX0008); Fundamental Research Funds for the Central Universities(XDJK2018B045)

<http://www.aed.org.cn>

to the heavy metal contents in rice grains were analyzed. The results showed that the extreme values of the Cd, As, Pb, and Cr contents in rice grains of different rice varieties varied by more than 3, 4, 20, and 3 times, respectively, and the accumulative capacity of the same variety for different heavy metals was also significantly different. Thus, multiple elements should be considered while screening for rice varieties with a poor ability of accumulating heavy metals. The heavy metal comprehensive accumulation index (P_z) was adopted to evaluate the heavy metal accumulation ability of rice varieties. The 13 rice varieties were divided into three categories, namely low ($P_z < 0.7$), medium ($0.7 \leq P_z < 1.0$), and high ($P_z \geq 1.0$) cumulative capacity. Among them, Y Liangyou 1, Longliangyou 534, and Longliangyouhuazhan accounted for low cumulative varieties. The genotype differences related to heavy metal accumulation in rice plants of different varieties were mainly reflected by rice grains, followed by the stem/leaf and root. The transport coefficient was an important manifestation of rice genotype differences, and was positively correlated with the content of heavy metals in rice grains ($P < 0.01$). The yields of the 13 rice varieties ranged from $5.85 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $10.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ with a maximum variation of 44.8%. The yields of the top six rice varieties exceeded $9.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the average grain number per panicle was found to be the main yield determining factor. Longliangyou 534, Y Liangyou 1, Yuanliangyou 908, and Yuxiang 203 are recommended as suitable varieties in Chongqing in consideration of both rice yield and heavy metal accumulation ability, which can not only achieve a high yield, but also safe rice production.

Keywords: rice varieties; heavy metals; genotype; accumulation; distribution; food safety

近年来,随着工业化和城市化进程的加快,土壤重金属污染问题日益受到关注^[1]。首次全国土壤污染调查(2014)显示,全国土壤总的点位超标率为16.1%,耕地土壤点位超标率为19.4%,镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)几种无机污染物点位超标率分别为7.0%、2.7%、1.5%、1.1%^[2]。耕地重金属污染不仅导致作物生长发育受阻、产量下降,而且影响农产品品质,并通过食物链对人体健康造成严重威胁^[3-5]。水稻作为世界第二大和我国第一大粮食作物,食用稻米成为人群重金属暴露的主要途径之一^[6]。土壤重金属污染尤以Cd、As、Pb、Cr等最为普遍,超标风险较高^[7-9]。早在2002年,原农业部稻米及制品质量监督检验测试中心对全国市场稻米进行安全性抽检,结果显示,稻米中重金属超标最严重的是Cd和Pb,超标率分别为10.3%和28.4%^[10]。随着稻田土壤污染面积的增加,糙米重金属超标现象呈加重态势,稻田土壤重金属污染修复与污染稻田安全利用问题亟待解决。

我国水稻主产区的重金属污染问题复杂,土壤与稻米中重金属含量并不存在完全对应关系,降低土壤重金属含量至达标水平并不能确保稻米安全达标^[11]。水稻无论在养分还是重金属的吸收上都存在明显的生态型差异和基因型差异^[12-13],不同品种水稻因其基因型的不同而对重金属的吸收累积能力可相差数倍。有研究表明,水稻对Cd、Pb的积累和耐性具有明显的品种间差异,不同基因型的水稻品种对Cd、Pb的吸收累积能力可分别相差3~7倍^[14-16]。同时,同一水稻品种对不同重金属的积累能力也可能完全不同,例如低累积Cd水稻品种可能存在高吸收As的情况^[14,17]。一

些水稻品种即使在土壤重金属含量较高条件下,稻米中重金属的含量仍然可以维持在较低水平^[18-19],因此,重金属低积累水稻品种的筛选与应用成为重金属污染农田安全利用的有效途径^[20-21]。水稻生产性能以及其对重金属的累积特性,除与其基因型有关外,还受气候、土壤类型与污染特征等区域自然环境条件的制约,不具备广适性。目前全国各地均开展重金属低积累水稻品种筛选工作,明确当地主要重金属累积的品种差异、阐明制约重金属累积的关键过程和因素是筛选适配区域条件的低积累水稻品种的重要基础。另外,目前的品种筛选通常是以特定污染元素为目标,缺乏针对多种污染元素的多目标筛选。

水稻在重庆市粮食生产中具有重要地位,常年总产量在550万t左右,约占全市粮食总产量的一半。同时该区域重金属总超标率为21.9%,污染特征以Cd为主并伴有局部As、Pb等污染,污染程度以轻微-轻度污染为主,占超标点位的94.5%^[22-23]。实现这类土壤的安全利用对于保障全市粮食供给、维护农产品安全具有重要意义。但迄今该地区尚未开展重金属低积累水稻筛选研究,缺乏针对污染特征的定型品种,对不同重金属元素在水稻植株中的转运分配规律尚不清楚。为此,本研究以重庆市13个主推的水稻品种为研究对象,选择渝西粮食主产区典型污染稻田,开展田间原位试验,同田比较不同水稻品种对Cd、As、Pb、Cr四种潜在危害较大的重金属元素的积累特征,阐明水稻对重金属吸收、转运和分配的差异性,及其与稻米重金属累积之间的相关性,基于多元素污染控制筛选适宜重庆地区种植的低积累水稻品种,为污

染稻田土壤水稻安全生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地点位于重庆市合川区南津街道张家村三社老湾院子(29°56′05″N, 106°12′53″E), 海拔214 m。地属亚热带季风气候, 平均气温17.5℃, 年均降水量为1 125.3 mm, 冬暖春早, 夏热秋凉, 四季分明, 无霜期长; 太阳辐射弱, 日照时间短; 多云雾, 少霜雪; 光温水同季, 立体气候显著^[24]。试验点排灌方便, 作物轮作方式为水稻-油菜或水稻-休闲, 供试土壤为渝西粮食主产区主要土壤类型——紫色水稻土, 根据国际制土壤质地分级标准^[25], 供试土壤属于黏壤土。土壤酸碱度近中性, 有机质含量较高, 肥力水平中上, 土壤基本理化性质和机械组成见表1和表2。

供试土壤Cd、As、Pb、Cr四种重金属含量见表3。依据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018), 四种元素含量均低于相应的风险筛选值, 污染指数依次为0.65、0.26、0.19和0.23, 其中Cd的污染程度最高且Cd含量接近原《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准值, 反映了区域内农田重金属污染的一般状况。

从重庆市主推品种中选择13个常用水稻品种作为供试水稻, 所选水稻品种均属中粳迟熟杂交水稻且在重庆地区种植过, 能够适应当地自然环境且健康生长。种子由当地农业委员会下属农业技术推广站提

供, 具体水稻品种目录见表4。

1.2 试验设计与方法

以水稻品种为处理设置小区试验, 共13个水稻品种, 小区面积为12.0 m² (2 m×6 m)。每个处理3次重复, 共39个小区, 随机区组排列(图1)。水稻种植规格为行距30 cm×窝距20 cm, 每小区20行、每行10窝。

于2018年5月6日移栽秧苗, 秧龄29 d。肥料施用量按当地推荐用量进行, N、P₂O₅、K₂O用量分别为150、75、100 kg·hm⁻², 其中氮肥80%作基肥, 20%作追

表4 供试水稻品种

Table 4 Introduction of the tested rice varieties

系谱 Genealogy	水稻品种 Rice varieties	亲本来源 Source of parent
籼型两系杂交水稻	袁两优908	袁S(♀)R908(♂)
	创两优小占	创5S(♀)粤丰丝占(♂)
	深两优5814	Y58S(♀)丙4114(♂)
	Y两优1号	Y58S(♀)93-11(♂)
	C两优华占	C815S(♀)华占(♂)
	晶两优华占	晶4155S(♀)华占(♂)
	隆两优华占	隆科638S(♀)华占(♂)
	隆两优534	隆科638S(♀)R534(♂)
籼型三系杂交水稻	宜香3724	宜香1A(♀)绵恢3724(♂)
	宜香优2115	宜香1A(♀)雅恢2115(♂)
	渝香203	宜香1A(♀)渝恢2103(♂)
	万优66	万8A(♀)万恢66(♂)
	丰优香占	粤丰A(♀)R6547(♂)

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical-chemical properties of the experimental soil

pH	有机质 OM/ (g·kg ⁻¹)	总氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	总磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	总钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	速效氮 Available N/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC/ (cmol·kg ⁻¹)
6.79±0.18	29.78±1.01	0.52±0.09	0.54±0.06	19.33±1.32	42.11±7.1	9.46±2.56	137.31±9.28	21.31±3.64

表2 土壤机械组成

Table 2 Mechanical composition of the experimental soil

指标 Index	粗砂粒 Coarse sand	细砂粒 Fine sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
粒径 d/mm	0.2<d≤2	0.02<d≤0.2	0.002<d≤0.02	d≤0.002
质量分数 Percent/%	9.9	43.2	32.4	14.5

表3 供试土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 3 The contents of heavy metals in the tested soil(mg·kg⁻¹)

指标 Index	总镉 Total Cd	总砷 Total As	总铅 Total Pb	总铬 Total Cr
供试土壤实测值	0.39±0.01	6.46±0.11	25.96±0.72	68.96±0.71
风险筛选值(GB 15618—2018)	0.6	25	140	300

肥,磷钾肥全作基肥一次性施用,肥料种类为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。除试验因子水稻品种外,其他田间管理方法与当地常规种植一致。

试验期间在返青期、分蘖末期和扬花期观察记录水稻生长动态,指标包括株高、分蘖数和叶面积等,图2分别是水稻生长中期和收获期现场照片。水稻成熟期按小区实收计产并进行考种,考种指标包括有效穗数、分蘖数、平均穗粒数、千粒重、结实率。根据上述指标,可计算相应理论产量:

理论产量($t\cdot hm^{-2}$)=单位穗数($667\ m^{-2}$) $\times$ 穗粒数 $\times$ 结实率 $\times$ 千粒重(g) $\times 15\times 10^{-9}$,考虑采样的代表性和考种过程中的随机误差,将理论产量和实收产量相互印

证后,最终选择实收产量引入本研究分析。

水稻种植前采用蛇形多点采样法,采集供试田块表层土壤(0~20 cm)样品,充分混匀作为一个土壤样品,测定土壤基本理化性质。在水稻成熟期按处理采样,相同处理小区采用五点采样法采集混合样品。土壤样品自然风干、磨细,过80目筛备用。成熟期在每小区随机取4整株水稻,按处理组成混合样,先用自来水将水稻根系土壤洗脱,再用去离子水将稻株洗净,晾干后放入烘箱,于105℃下杀青30 min,70℃烘干至恒质量,然后将水稻植株分为根、茎、叶、穗四部分,用电子天平称取根、茎、叶各部分质量,然后再粉碎,稻谷脱壳成糙米并粉碎,然后分装入聚乙烯自封

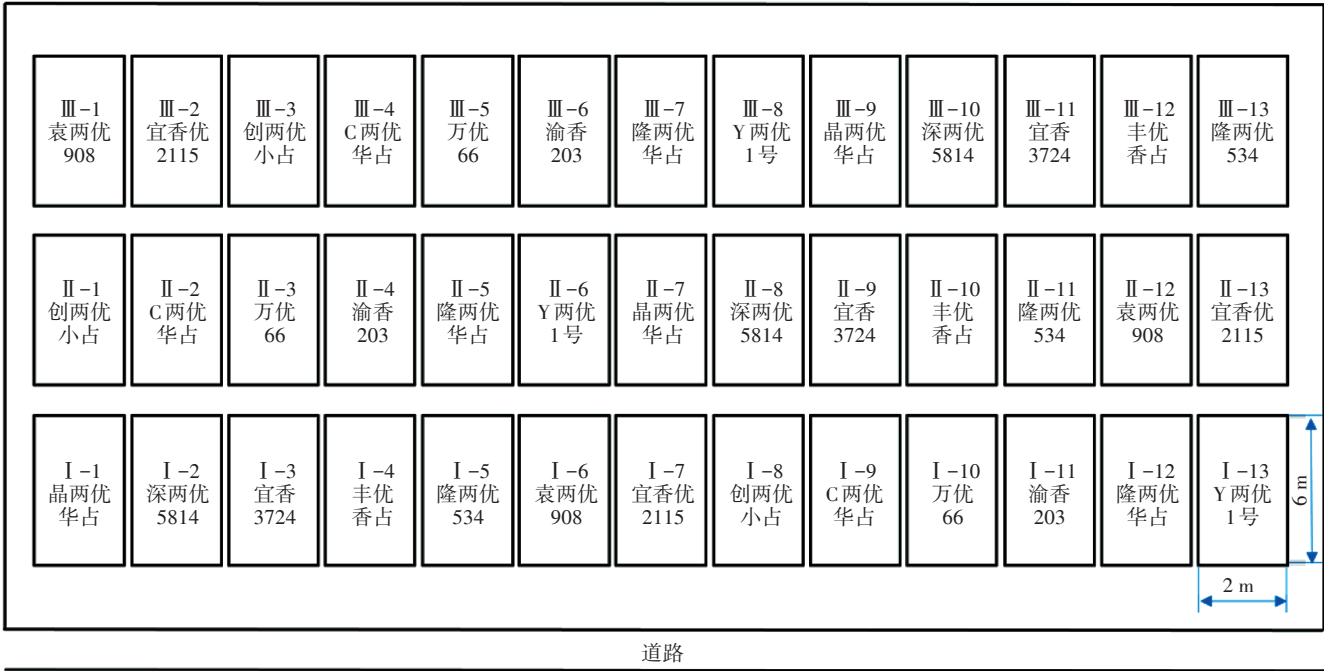


图1 田间试验小区布置图
Figure 1 The layout of field experiment plot



图2 试验现场图片
Figure 2 Picture of the test site

袋密封保存供分析测试使用。

1.3 样品分析

基础土样理化性质指标包括pH、有机质、总钾、总磷、总氮、速效钾、速效磷和速效氮,测定方法参照《土壤农化分析》^[26]。土壤和植株进行重金属测定,土壤采用王水+HClO₄联合消解法^[27-29],植株粉碎样品和糙米粉碎样品均采用HNO₃+HClO₄混酸湿法消解,土壤和植株的重金属含量均采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,采用“国家有色金属及电子材料分析测试中心标液GNM-M212773-2013”和“四川大米成分分析标准物质GBW10044(GSB-22)”进行分析质量控制。

1.4 数据处理

1.4.1 富集及转运系数

为表征不同品种水稻重金属吸收累积与分配情况以及对不同重金属的吸收特征,计算了不同品种水稻对Cd、As、Pb、Cr的根系富集系数(BCF_R)、根系向地上部(茎和叶)的转运系数(TF_{R-SL})及地上部(茎和叶)向籽粒的转移系数(TF_{SL-G})^[30],公式如下:

$BCF_R = \text{水稻根部重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{土壤重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ (1)

$TF_{R-SL} = \text{水稻地上部(茎叶部)重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{水稻根部重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ (2)

$TF_{SL-G} = \text{水稻籽粒重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{水稻地上部(茎叶)重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ (3)

所有数据使用Excel 2016进行处理,应用SPSS 21.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、多元回归线性分析、聚类分析和相关性分析。应用Origin 2018绘图,数据为平均值±标准差。

1.4.2 水稻重金属综合累积能力评价

为表征不同水稻品种对重金属的累积能力,参照土壤污染评价指数法,分别采用单因子累积指数(P_i)和综合累积指数(P_z)对籽粒重金属的积累状况进行表征^[31]:

$$P_i = C_i / S_i \quad (4)$$

$$P_z = [(P_{i\max}^2 + P_{i\text{ave}}^2) / 2]^{1/2} \quad (5)$$

式中: P_i 为单项累积指数; C_i 为稻米污染物实测浓度; S_i 为稻米中相应污染物的粮食安全标准限值,根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)^[32],Cd、As、Pb和Cr四种元素的标准限值分别为0.2、0.2、0.2 mg·kg⁻¹和1.0 mg·kg⁻¹; P_z 为综合累积指数; $P_{i\max}$ 为最大单项累积指数; $P_{i\text{ave}}$ 为平均单项累积指数。

2 结果与讨论

2.1 不同品种水稻重金属积累差异分析

2.1.1 不同品种水稻籽粒重金属含量总体特征

在相同田间耕作管理与施肥条件下,13种受试水稻Cd、As、Pb、Cr四种元素含量分别为0.018~0.057、0.101~0.392、0.004~0.096 mg·kg⁻¹和0.535~1.583 mg·kg⁻¹(图3)。与Cd、As、Pb、Cr对应含量最低的品种分别为渝香203、宜香3724、Y两优1号和丰优香占,含量最高的品种分别为袁两优908、C两优华占、渝香203和创两优小占。不同品种水稻籽粒四种重金属含量极差分别超过3、4、20倍和3倍,含量的变异系数分别达到39.9%、49.3%、72.4%、30.7%,表明不同品种水稻对Cd、As、Pb、Cr的积累存在显著的基因型差异,其中Pb和As较大,Cd和Cr次之。按照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)^[32]中重金属限值,对于Cd和Pb,所有受试水稻品种均未超标;对于As,水稻品种丰优香占和C两优华占籽粒超标,超标率为34.3%~96.1%;对于Cr,晶两优华占、万优66、创两优小占及宜香系列品种水稻共6个品种超准,超标率为2.10%~58.3%。结果表明,水稻重金属累积能力受水稻品种及重金属元素影响,同一水稻品种对不同重金属元素的累积能力常存在显著不同。

2.1.2 不同品种水稻对四种重金属元素的累积能力差异

根据水稻籽粒四种重金属的含量—— $m(\text{Cd})$ 、 $m(\text{As})$ 、 $m(\text{Pb})$ 和 $m(\text{Cr})$,采用聚类分析方法(系统聚类分析法-组间联接-平方Euclidean距离)结合统计差异性检验结果(图4),将不同水稻品种分成三类:第Ⅰ类(较低值类)、第Ⅱ类(中间值类)、第Ⅲ类(较高值类),以反映不同品种水稻籽粒对四种重金属元素累积能力的差异。为针对特定重金属元素污染为目标的水稻品种筛选提供依据,即应首选第Ⅰ、Ⅱ类,避开第Ⅲ类则更利于保障稻米食用安全。

根据籽粒的 $m(\text{Cd})$ 可分为三类,第Ⅰ类:渝香203、C两优华占等7个品种;第Ⅱ类:万优66、宜香优2115和深两优5814;第Ⅲ类:丰优香占、晶两优华占和袁两优908。

根据籽粒的 $m(\text{As})$ 可分为三类,第Ⅰ类:宜香3724、渝香203等11个品种;第Ⅱ类:丰优香占;第Ⅲ类:C两优华占。

根据籽粒的 $m(\text{Pb})$ 可分为三类,第Ⅰ类:Y两优1号、隆两优534、宜香3724和隆两优华占;第Ⅱ类:丰

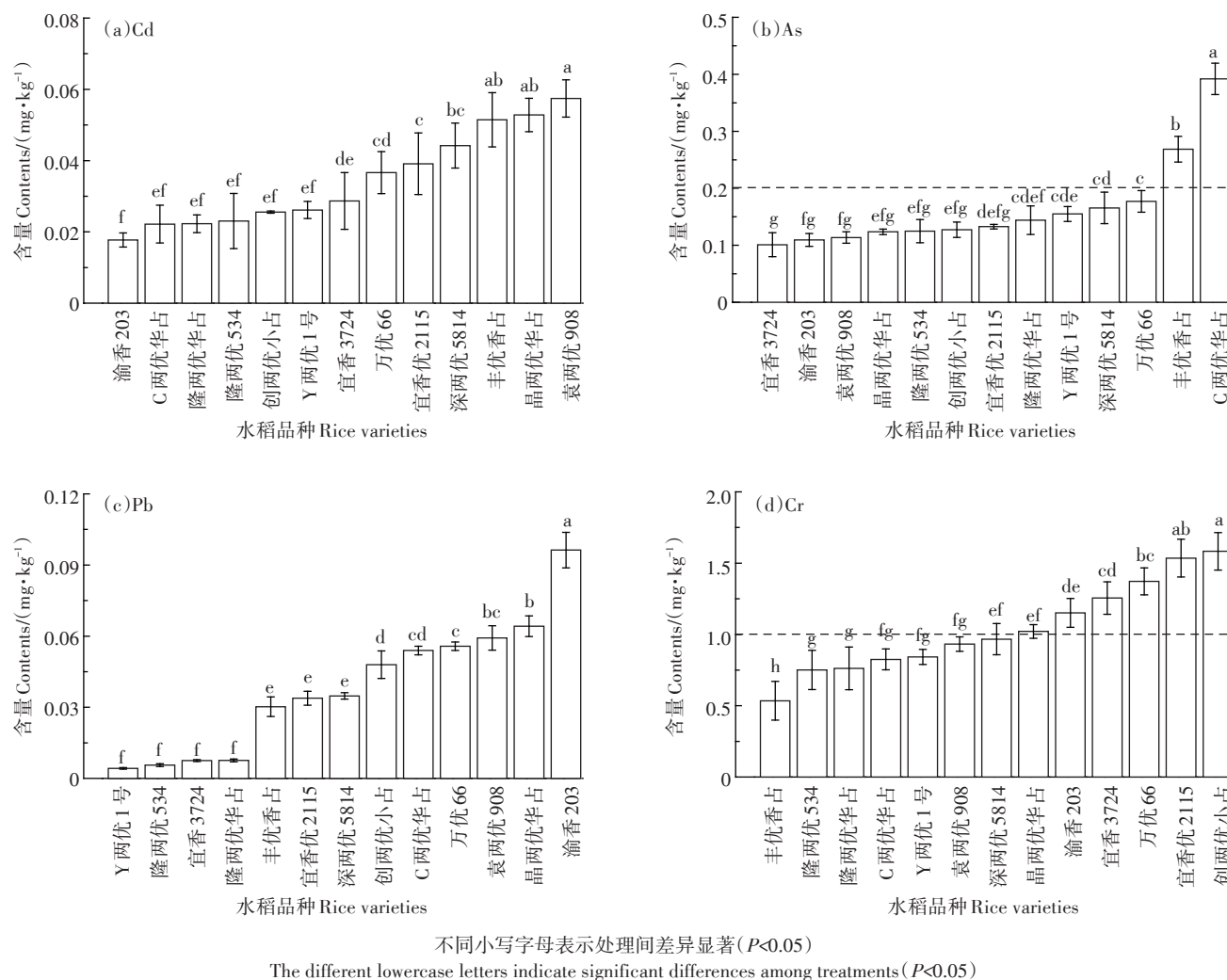


图3 供试水稻籽粒重金属含量

Figure 3 The content of heavy metals in brown rice of different varieties

优香占、宜香优 2115 和深两优 5814 等 8 个品种;第Ⅲ类:渝香 203。

根据籽粒的 $m(\text{Cr})$ 可分为三类,第Ⅰ类:丰优香占;第Ⅱ类:隆两优 534、隆两优华占等 7 个品种;第Ⅲ类:渝香 203、宜香 3724 等 5 个品种。

上述结果表明,同一水稻品种对不同重金属元素的累积差异明显,对特定重金属累积能力相对较低的品种,对其他重金属可能会有较高的累积能力。比较典型的是 C 两优华占对 As 的累积能力最高,籽粒出现 As 超标现象,但其对 Cd 的累积能力却很低;对 Cr 相对累积能力最高的水稻品种为创两优小占,出现了明显的 Cr 超标现象,但其对 Cd 和 As 的累积能力则较低,以上现象的出现与不同品种水稻的基因型差异相关,因为不同基因型水稻在重金属胁迫下,重金属相关防御蛋白的表达会有很大的差异。根据丁文等^[33]

和 Lee 等^[34]的研究发现,水稻在重金属胁迫下会表达出很多的应激蛋白(能量代谢、调节蛋白等),不同基因型的水稻品种在面临不同重金属胁迫时,表达出蛋白的种类、丰度差异很大。已有研究对响应两种及以上重金属的蛋白质组学研究非常少且未发现重复的响应蛋白种类,两种甚至多种重金属的累积之间会存在协同或拮抗作用。例如某品种水稻由于受到某重金属胁迫表达了响应蛋白,该蛋白又促进或抑制其他重金属响应蛋白的表达,换言之,抑制某金属累积吸收的蛋白大量表达时可能会使另一种重金属的响应蛋白的表达受到抑制,这在一定程度上解释了本次试验个别品种水稻出现了“高 As 低 Cd”或“高 Cr 低 Cd”的现象。另外,虽然目前已有更多关于作物响应重金属胁迫的基因表达和蛋白组学的研究,但是水稻累积重金属不仅与其本身基因型相关,还受外部自然地理

条件等多方作用的交互影响,若要阐明水稻的重金属累积能力,还应依据实地种植水稻获得的结果而进行判断。

曾翔等^[35]和殷敬峰等^[36]在水稻筛选试验中发现,水稻籽粒中重金属含量不仅在品种间存在显著差异,而且在水稻品种类型间也存在显著性差异,对于Cd、Cu和Zn等元素,三系杂交水稻的累积能力大于两系杂交水稻。但周歆^[37]研究发现,这一关系并不是绝对的,不同的外部环境条件对试验结果会产生极大的影

响。本次试验中,渝香203虽然属三系杂交水稻,但该品种籽粒中的Cd富集能力却是所有供试品种中最低的。因此可以得出判断,水稻响应复合重金属的研究需与自然环境结合,在重金属复合污染的农田中进行品种筛选更具实用意义,目前全国各地在作物重金属低累积品种筛选或选育过程中,很多情况下只针对特定目标元素,缺乏对多种重金属污染元素的多目标系统筛选,这种情况下选出的低累积品种可能仅仅对目标污染元素累积能力低,但难以保证对其他危害较

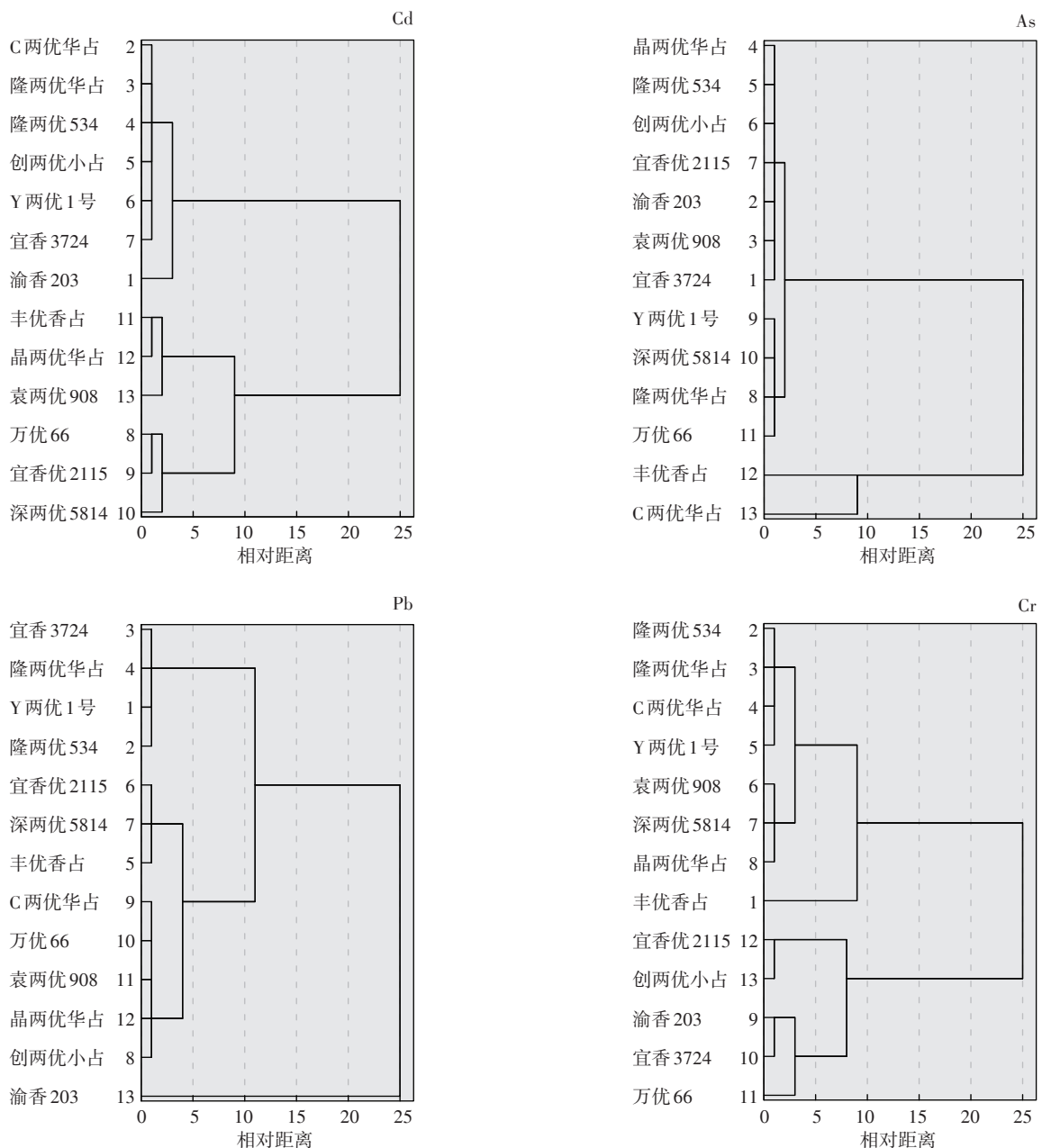


图4 供试水稻籽粒重金属含量聚类分析

Figure 4 Cluster analysis chart of heavy metal contents in tested rice

大的重金属元素的低累积。

2.1.3 不同水稻品种对重金属的综合累积能力

基于前述分析,参照土壤重金属综合污染评价方法,引入综合累积指数 P_z ,对不同品种水稻籽粒重金属综合累积能力进行评价,并按照累积能力较低($P_z < 0.7$)、中等($0.7 \leq P_z < 1.0$)、较高($P_z \geq 1.0$)分类,可将供试水稻品种重金属综合累积能力分为三类:

累积能力较低品种:隆两优534($P_z=0.59$)、隆两优华占($P_z=0.61$)、Y两优1号($P_z=0.67$),这类品种水稻籽粒中四种重金属均不超标。

累积能力中等品种:袁两优908($P_z=0.76$)、深两优5814($P_z=0.79$)、晶两优华占($P_z=0.82$)、渝香203($P_z=0.91$)、宜香3724($P_z=0.95$)。此类品种水稻籽粒 $m(\text{Cr})$ 接近标准限值或已超标。

累积能力较高品种:丰优香占($P_z=1.03$)、万优66($P_z=1.08$)、宜香优2115($P_z=1.18$)、创两优小占($P_z=1.21$)和C两优华占($P_z=1.50$)。此类品种水稻籽粒分别存在As或Cr超标。

2.2 不同品种水稻重金属吸收转运特征

水稻根部重金属富集系数 BCF_R 可在一定程度上反映水稻对重金属的吸收情况。根据表5可见,供试水稻Cd的 BCF_R 为3.029~5.647,As的 BCF_R 为0.166~0.518,Pb的 BCF_R 为0.442~0.627,Cr的 BCF_R 为0.288~0.645,所有供试品种Cd的 BCF_R 均大于1,而As、Pb、Cr的 BCF_R 均小于1,表明水稻根部对Cd的累积能力非常强,累积可达土壤的数倍。Cd、As、Pb、Cr四种元素 BCF_R 的变异系数分别为18.9%、42.2%、10.3%、22.3%,可见,水稻品种的基因型差异对根系富集重金属能力有一定影响,其中As最大,Pb最小。

重金属元素通过根部富集后进而向地上部转运,重金属从稻株根部向地上部的转运系数 TF_{R-SL} 和从地上部向籽粒的转运系数 TF_{SL-G} 可反映重金属在植株内的转运分配情况。根据表5可知,Cd的 TF_{R-SL} 为0.018~0.051,As的 TF_{R-SL} 为0.071~0.218,Pb的 TF_{R-SL} 为0.003 5~0.005 7,Cr的 TF_{R-SL} 为0.158~0.379,所有供试水稻品种对Cd、As、Pb、Cr的 TF_{R-SL} 均小于1,表明Cd、As、Pb、Cr四种元素均主要累积于水稻根部,但不同水稻品种根系向地上部的转运系数 TF_{R-SL} 差异较大,变异系数分别为27.5%、32.1%、14.3%、23.5%,同样是以As基因型差异最大,Pb最小。

TF_{SL-G} 可表明重金属从水稻地上茎叶部向籽粒转运的能力。由表5可见,Cd的 TF_{SL-G} 为0.393~1.221,As的 TF_{SL-G} 为0.357~1.494,Pb的 TF_{SL-G} 为0.066~

1.822,Cr的 TF_{SL-G} 为0.069~0.230,Cd、As、Pb、Cr的变异系数分别为36.9%、40.3%、76.8%、26.2%。比较 BCF_R 、 TF_{R-SL} 和 TF_{SL-G} 的变异系数发现,对于Cd、Pb和Cr,变异系数均存在 $\text{TF}_{SL-G} > \text{TF}_{R-SL} > \text{BCF}_R$,水稻基因型差异主要表现为从茎叶部向籽粒转运的差异,其次为水稻根部向地上部转运差异,而根系富集重金属能力的差异较小,可见 TF_{SL-G} 是基因型差异的最重要体现。另外,虽然Pb的 TF_{SL-G} 变异系数很高,但其 BCF_R 和 TF_{R-SL} 的变异系数低于其他元素,且所有供试水稻Pb的 TF_{R-SL} 均小于0.01,多数品种的 TF_{SL-G} 小于1,说明Pb相对不易被水稻吸收,同时所吸收的Pb在稻株体内的移动能力弱,通过食物链对人体健康产生毒害的风险较低,这与Yu等^[38]和龚伟群等^[39]的研究结果相一致。

实际上,重金属在水稻系统内的累积、转运和外排过程是非常复杂的,整个机制包括转运蛋白的运输作用和应激蛋白的调节作用等^[40],它们会参与水稻累积重金属的各个环节,单一考量某一作用的强弱或者水稻某一部位的累积情况难以说明水稻整体对重金属的累积情况。因此, BCF_R 、 TF_{R-SL} 和 TF_{SL-G} 在水稻筛选工作中更具实用价值,综合分析 BCF_R 、 TF_{R-SL} 和 TF_{SL-G} 以及三者的关系,可以判定不同重金属在不同品种水稻的累积分配情况,为水稻品种筛选提供重要参考。

2.3 水稻各部位重金属含量与重金属富集转运系数关系

不同基因型水稻品种对重金属的吸收转运差异势必影响稻株体内重金属的分布。将供试水稻各部位根(R)、茎叶(SL)和籽粒(G)的重金属含量与相应的富集、转运系数进行相关性分析,结果见表6。4种重金属 BCF_R 均与根系重金属含量呈极显著正相关($P < 0.01$);其中Cd、As和Pb的 BCF_R 与茎叶含量呈极显著正相关($P < 0.01$);而 BCF_R 与籽粒相应重金属含量均无显著相关性。说明根对重金属的吸收富集与水稻籽粒重金属含量无直接相关性,但显著或极显著影响重金属向地上部茎叶的分配,其中As的 BCF_R 与茎叶含量相关性最高达0.982,表明水稻根系吸收的As极容易向地上部转移。

根系向茎叶的转运系数 TF_{R-SL} 与根系重金属含量呈极显著负相关(除Cd无显著相关性外),说明根系吸收的重金属向地上部转运越多,根系中累积相应减少; TF_{R-SL} 与茎叶重金属含量均呈极显著正相关,相关系数为0.505~0.851,远高于 $P < 0.01$ 的显著性水平($r =$

表5 供试水稻富集转运系数

Table 5 Enrichment and transport coefficients of the tested rice

指标 Index	水稻品种 Rice varieties	Cd	As	Pb	Cr
BCF _R	C两优华占	3.083±0.374e	0.220±0.008e	0.574±0.063abc	0.437±0.036c
	Y两优1号	4.550±0.116b	0.166±0.008g	0.603±0.024ab	0.362±0.022e
	创两优小占	4.088±0.211c	0.295±0.013c	0.564±0.033bcd	0.555±0.029b
	丰优香占	4.579±0.195b	0.208±0.024e	0.501±0.043ef	0.511±0.013b
	晶两优华占	4.234±0.161bc	0.219±0.009e	0.442±0.017f	0.419±0.032cd
	隆两优534	5.647±0.233a	0.199±0.006ef	0.513±0.008de	0.645±0.042a
	隆两优华占	3.029±0.185e	0.205±0.004e	0.466±0.021ef	0.288±0.012f
	深两优5814	4.449±0.009b	0.176±0.005fg	0.528±0.025cde	0.458±0.034c
	万优66	3.318±0.326de	0.193±0.013ef	0.627±0.039a	0.550±0.010b
	宜香3724	4.058±0.135c	0.199±0.014ef	0.475±0.022ef	0.297±0.009f
	宜香优2115	3.506±0.141d	0.479±0.026b	0.503±0.028ef	0.382±0.009de
	渝香203	3.086±0.137e	0.262±0.009d	0.483±0.040ef	0.462±0.047c
	袁两优908	3.470±0.045d	0.518±0.025a	0.492±0.033ef	0.534±0.019b
	C两优华占	0.051±0.003a	0.195±0.008ab	0.005 6±0.000 8ab	0.161±0.032de
	Y两优1号	0.040±0.003abc	0.218±0.018a	0.004 6±0.000 7abc	0.309±0.022ab
	创两优小占	0.018±0.003e	0.125±0.013de	0.004 8±0.000 9abc	0.273±0.016bc
	丰优香占	0.043±0.004ab	0.179±0.015abc	0.004 3±0.000 4abc	0.223±0.014cde
	晶两优华占	0.027±0.004bcde	0.094±0.006ef	0.005 0±0.000 2abc	0.261±0.046bc
	隆两优534	0.020±0.003e	0.149±0.019cd	0.005 7±0.000 2a	0.158±0.028e
TF _{R-SL}	隆两优华占	0.028±0.002bcde	0.118±0.006de	0.005 1±0.000 5abc	0.307±0.011ab
	深两优5814	0.025±0.002cde	0.139±0.008cd	0.004 2±0.001 1abc	0.229±0.039bcde
	万优66	0.034±0.001bcde	0.218±0.029a	0.003 5±0.000 9c	0.240±0.045bcd
	宜香3724	0.034±0.003bcde	0.157±0.009bcd	0.003 7±0.000 2bc	0.379±0.039a
	宜香优2115	0.031±0.003bcde	0.078±0.008f	0.005 7±0.000 7a	0.277±0.043bc
	渝香203	0.030±0.002bcde	0.153±0.023cd	0.005 0±0.000 7abc	0.231±0.023bcde
	袁两优908	0.038±0.001abcd	0.071±0.002f	0.005 1±0.000 5abc	0.205±0.045cde
	C两优华占	0.436±0.027ef	1.494±0.062a	0.611±0.047f	0.158±0.002b
	Y两优1号	0.393±0.033f	0.664±0.111e	0.066±0.004i	0.110±0.008d
	创两优小占	0.927±0.054b	0.538±0.090f	0.769±0.070de	0.152±0.012bc
	丰优香占	0.599±0.039d	1.113±0.041b	0.549±0.046f	0.069±0.019e
	晶两优华占	1.221±0.015a	0.897±0.070cd	1.403±0.007b	0.122±0.004cd
	隆两优534	0.552±0.144de	0.793±0.039d	0.090±0.007hi	0.119±0.019d
	隆两优华占	0.761±0.081c	1.011±0.058bc	0.116±0.002hi	0.124±0.025cd
	深两优5814	1.194±0.072a	0.936±0.041c	0.732±0.032e	0.140±0.024bcd
	万优66	0.951±0.017b	0.559±0.052ef	0.835±0.003d	0.162±0.018b
	宜香3724	0.516±0.108def	0.490±0.090f	0.152±0.018h	0.161±0.024b
	宜香优2115	0.788±0.029c	0.563±0.053ef	0.465±0.082g	0.230±0.021a
	渝香203	0.438±0.053ef	0.357±0.038g	1.822±0.014a	0.157±0.016b
	袁两优908	1.026±0.075b	0.487±0.054f	0.929±0.058c	0.116±0.005d
TF _{SL-G}	C两优华占	0.436±0.027ef	1.494±0.062a	0.611±0.047f	0.158±0.002b
	Y两优1号	0.393±0.033f	0.664±0.111e	0.066±0.004i	0.110±0.008d
	创两优小占	0.927±0.054b	0.538±0.090f	0.769±0.070de	0.152±0.012bc
	丰优香占	0.599±0.039d	1.113±0.041b	0.549±0.046f	0.069±0.019e
	晶两优华占	1.221±0.015a	0.897±0.070cd	1.403±0.007b	0.122±0.004cd
	隆两优534	0.552±0.144de	0.793±0.039d	0.090±0.007hi	0.119±0.019d
	隆两优华占	0.761±0.081c	1.011±0.058bc	0.116±0.002hi	0.124±0.025cd
	深两优5814	1.194±0.072a	0.936±0.041c	0.732±0.032e	0.140±0.024bcd
	万优66	0.951±0.017b	0.559±0.052ef	0.835±0.003d	0.162±0.018b
	宜香3724	0.516±0.108def	0.490±0.090f	0.152±0.018h	0.161±0.024b
	宜香优2115	0.788±0.029c	0.563±0.053ef	0.465±0.082g	0.230±0.021a
	渝香203	0.438±0.053ef	0.357±0.038g	1.822±0.014a	0.157±0.016b
	袁两优908	1.026±0.075b	0.487±0.054f	0.929±0.058c	0.116±0.005d

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different small letters in the same column represent significant difference ($P<0.05$).

0.403);对于Cd和As两种元素,TF_{R-SL}还与籽粒重金属含量呈极显著或显著正相关,而对于Pb和Cr则相关性不显著。

四种重金属元素中,Cd、As两种元素的茎叶向籽粒的转运系数TF_{SL-G}与茎叶中Cd、As元素含量呈显著负相关,与Pb和Cr则相关性不显著;而对于所有元素

TF_{SL-G}与籽粒相应元素含量均呈极显著正相关,相关系数为0.651~0.954,均高于 $P<0.01$ 极显著性水平。

综上,不同基因型水稻品种籽粒重金属累积与其对重金属的吸收累积以及在稻株体内的转运、分配密切相关;制约不同重金属元素累积的关键过程不同,根系吸收过程决定根系中重金属的含量和总累积量,吸收能力越强,向地上部的转运也越多。其中As和Cr容易从根系进入茎叶,由茎叶向籽粒的转运效率也很高,这两个过程决定了稻米中As和Cr的累积;Cd和Pb从根系向茎叶的转运能力一般,但由茎叶向籽粒的转运效率较高;地上部茎叶向籽粒的转运是决定籽粒中四种重金属含量的关键过程。因此,进一步研究阐明重金属在稻株体内吸收转运差异的生理基础,对于籽粒重金属累积控制具有重要理论意义。

2.4 不同品种水稻产量与构成

低累积重金属水稻品种的筛选还必须兼顾水稻产量。13个供试水稻品种产量及其构成见表7。

不同供试水稻品种产量在5.85~10.61 t·hm⁻²之间,极值相差较大,达44.8%,平均产量8.61 t·hm⁻²。按品系分为籼型两系(不育系、恢复系)杂交水稻和籼型三系(不育系、恢复系、平衡系)两大品系,比较发现籼型两系杂交水稻与籼型三系杂交水稻稻谷产量差异性显著($P<0.05$),籼型两系杂交水稻产量高于籼型三系杂交水稻,与程本义等^[41]的研究结果相一致。C两优华占、创两优小占、袁两优908、渝香203、丰优香占和宜香优2115六个品种的产量超过9.00 t·hm⁻²上,高于目前重庆市水稻平均产量(8.25 t·hm⁻²)水平^[41]。Y两优1号、隆两优534、宜香3724、深两优5814几个品种产量在7.50~9.00 t·hm⁻²之间,属常规水平。其余品种产量较低,在7.50 t·hm⁻²以下。不同水稻品种稻谷产量差异与产量构成因素紧密相关,对稻谷产量与产量构成要素进行了多元线性回归分析,得到以下回归方程:

产量(t·hm⁻²)=(58.70×有效穗数+16.16×千粒重+3.41×平均穗粒数+5.24×结实率-1 276.88)×0.015

表6 水稻重金属吸收转运与植株各部位重金属含量的相关性(n=39)

Table 6 Correlation between heavy metal uptake and transport in rice and heavy metal content in different parts (n=39)

项目 Items	Cd			As			Pb			Cr		
	根(R)	茎叶(SL)	籽粒(G)	根(R)	茎叶(SL)	籽粒(G)	根(R)	茎叶(SL)	籽粒(G)	根(R)	茎叶(SL)	籽粒(G)
BCF _R	0.972**	0.403**	ND	0.996**	0.982**	ND	0.987**	0.464**	ND	0.987**	0.362*	ND
TF _{R-SL}	ND	0.803**	0.506**	-0.659**	0.505**	0.400*	-0.489**	0.851**	ND	-0.738**	0.698**	ND
TF _{SL-G}	—	-0.321*	0.651**	—	-0.373*	0.825**	—	ND	0.954**	—	ND	0.778**

注: *表示 $P<0.05$, $r=0.312$; **表示 $P<0.01$, $r=0.403$ 。
Note: * and ** represent statistical difference at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

表7 主要水稻品种产量与构成

Table 7 Yield and composition of rice varieties

水稻品种 Rice varieties	有效穗数 Effective panicle number	分蘖数 Tiller number	千粒重 Thousand kernel weight/g	平均穗粒数 Average number of grains per ear	结实率 Seed setting rate/%	产量 Production/(t·hm ⁻²)
C两优华占	11	12	28.6	145	74.0	10.61±0.56a
创两优小占	9	9	24.7	163	88.3	10.21±0.46a
袁两优908	8	9	26.7	194	73.6	9.94±0.40a
渝香203	10	11	31.2	120	78.7	9.64±0.59a
丰优香占	8	8	31.5	160	67.0	9.42±0.67a
宜香优2115	10	10	36.2	85	84.9	9.32±0.74a
Y两优1号	9	10	27.8	134	71.7	8.99±0.75a
隆两优534	11	12	22.5	140	68.9	8.29±0.87b
宜香3724	8	10	28.9	156	72.8	7.98±0.56b
深两优5814	8	11	24.2	179	62.3	7.75±0.50b
晶两优华占	10	12	20.2	141	68.6	7.44±0.81b
隆两优华占	9	9	23.5	135	66.9	6.46±0.54c
万优66	8	10	25.3	121	72.9	5.85±0.44c

将回归系数标准化,排除自变量单位的影响,得到标准化的回归方程:

$$\text{产量}(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})=(0.693\times\text{有效穗数}+0.721\times\text{千粒重}+0.977\times\text{平均穗粒数}+0.393\times\text{结实率})\times 0.015$$

$$(R^2=0.941, N=13)$$

有效穗数、千粒重、平均穗粒数和结实率是产量组成的主要变量,根据标准化回归方程可得,平均穗粒数对产量的贡献率最高,成为影响产量高低的主要因素,千粒重、有效穗数和结实率对产量的贡献率依次降低。

兼顾水稻产量和对重金属的综合累积情况,推荐隆两优 534、Y 两优 1 号、袁两优 908 和渝香 203 为适宜品种,既能保证水稻高产,又能保证水稻安全品质。

3 结论

(1)在供试土壤重金属含量低于农田土壤质量标准风险筛选值的情况下,部分供试品种水稻仍出现了 As 或 Cr 超标的情况。根据重金属综合污染指数 P_z ,将供试水稻品种分为三类:累积能力低($P_z<0.7$)的品种包括隆两优 534、Y 两优 1 号和隆两优华占;累积能力中等($0.7\leq P_z<1.0$)的品种包括袁两优 908、深两优 5814、晶两优华占、渝香 203、宜香 3724;累积能力较高($P_z\geq 1.0$)的品种包括丰优香占、万优 66、宜香优 2115、创两优小占和 C 两优华占。

(2)水稻品种基因型差异对水稻籽粒重金属累积影响最大,对茎叶部和根部影响次之,TF_{SL-G}是水稻基因型差异的重要体现,与水稻籽粒重金属含量具有极显著相关性,比较 TF_{SL-G}可判断不同品种水稻籽粒重金属的累积能力。

(3)不同重金属元素在水稻植株中转运分配特征不同,决定籽粒中重金属含量的关键转运过程各异,对特定元素低累积的品种,对另外一种元素可能出现高累积现象;As 和 Cr 容易从根系进入茎叶,由茎叶向籽粒的转运效率也很高;Cd 和 Pb 从根系向茎叶的转运能力一般,但由茎叶向籽粒的转运效率较高。

(4)兼顾水稻产量与籽粒重金属累积情况,推荐在重庆地区种植隆两优 534、Y 两优 1 号、袁两优 908 和渝香 203 四个品种,这些品种既能获得高产也利于水稻安全生产。

参考文献:

[1] 曾露苹,秦俊豪,董淑玉,等.不同木薯品种对重金属 Cu Zn Cd 累积

差异及健康风险分析[J].农业环境科学学报,2017,36(6):1044-1052.

ZENG Lu-ping, QIN Jun-hao, DONG Shu-yu, et al. Accumulation of heavy metals copper, zinc, and cadmium in cassava varieties and the associated human health risk[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6):1044-1052.

[2] 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 Neng-chang, ZHENG Yu-ji, HE Xiao-feng, 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.

[3] Guan X, Sun L N. Current situation and the harm of soil heavy metal pollution and food safety[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 675/677:612-614.

[4] 郑黎明. EDDS 螯合诱导对 Cd 胁迫下获生长和 Cd 积累的影响[D]. 芜湖:安徽师范大学,2018.

ZHENG Li-ming. Effects of EDDS on growth and Cd accumulation of *Miscanthus sacchariflorus* under Cd stress[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2018.

[5] Dudka S, Miller W P. Accumulation of potentially toxic elements in plants and their transfer to human food chain[J]. *Journal of Environmental Science and Health. Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 1999, 34(4):681-708.

[6] 李静. 土壤重金属污染对农产品质量安全的影响及其防治分析[J]. 南方农业,2018,12(24):187-188,190.

LI Jing. Effects of soil heavy metal pollution on the quality and safety of agricultural products and their prevention and control[J]. *Southern Agriculture*, 2018, 12(24):187-188,190.

[7] 郭虎. 生物质炭对重金属污染土壤水稻镉吸收的影响[D]. 南京:南京农业大学,2016.

GUO Hu. Effects of biochar application on cadmium accumulation of rice in heavy metal contaminated soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.

[8] 吴迪,杨秀珍,李存雄,等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水稻中重金属含量及健康风险评估[J]. 农业环境科学学报,2013,32(10):1992-1998.

WU Di, YANG Xiu-zhen, LI Cun-xiong, et al. Concentrations and health risk assessments of heavy metals in soil and rice in zinc-lead mining area in Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10):1992-1998.

[9] Granero S, Domingo J L. Levels of metals in soils of Alcalá de Henares, Spain: human health risks[J]. *Environment International*, 2002, 28(3):159-164.

[10] 程旺大,张国平,姚海根,等. 晚粳稻籽粒中 As、Cd、Cr、Ni、Pb 等重金属含量的基因型与环境效应及其稳定性[J]. 作物学报,2006,32(4):573-579.

CHENG Wang-da, ZHANG Guo-ping, YAO Hai-gen, et al. Genotypic and environmental variation and their stability of As, Cr, Cd, Ni and Pb concentrations in the grains of Japonica rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(4):573-579.

[11] 于焕云,崔江虎,乔江涛,等. 稻田镉砷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 Huan-yun, CUI Jiang-hu, QIAO Jiang-tao, 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] 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 Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, et al. Accumulation of heavy metals in different rice varieties[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5198-5206.
- [13] 王姗姗, 王颜红, 王世成, 等. 辽北地区农田土壤-作物系统中Cd、Pb的分布及富集特征[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1175-1179.
- WANG Shan-shan, WANG Yan-hong, WANG Shi-cheng, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in agricultural soil-crop systems of Tieling area, Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(5): 1175-1179.
- [14] 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 Chun-gang, LIAO Xi-yuan, ZHANG Xiu-fu, et al. Genotypic difference in cadmium accumulation in brown rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(6): 660-662.
- [15] 杜瑞英, 文典, 赵迪, 等. Cd、Pb和As在不同品种水稻籽粒中的富集特征研究[J]. 生物技术进展, 2016, 6(2): 85-90.
- DU Rui-ying, WEN Dian, ZHAO Di, et al. The characteristics of Cd, Pb and As accumulation in rice grain of different variety[J]. *Current Biotechnology*, 2016, 6(2): 85-90.
- [16] 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.
- [17] 张路. 水稻镉安全亲本材料对镉的吸收、转运及积累特征[D]. 成都: 四川农业大学, 2015.
- ZHANG Lu. Characteristic of cadmium uptake, translocation and accumulation in cadmium-safe rice line[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2015.
- [18] 李正文, 张艳玲, 潘根兴. 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 Zheng-wen, ZHANG Yan-ling, PAN Gen-xing. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Environmental Sciences*, 2003, 24(3): 112-115.
- [19] 李贵杰. 不同水稻品种对土壤重金属吸收及分配的差异[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- LI Gui-jie. Differences in absorption and distribution of soil heavy metals in rice cultivars[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [20] 沈其文, 甘小泽, 樊丹, 等. 重金属污染土壤水稻品种筛选[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(12): 59-61, 100.
- SHEN Qi-wen, GAN Xiao-ze, FAN Dan, et al. Screening of rice varieties in heavy metal contaminated soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(12): 59-61, 100.
- [21] 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 Tao-lin. More comprehensive understanding and effective control of heavy metal pollution of cultivated soils in China[J]. *Soils*, 2015, 47(3): 435-439.
- [22] 李璐. 重庆市土壤重金属污染现状及修复研究[J]. 北京农业, 2015(18): 139-140.
- LI Lu. Current situation and remediation of soil heavy metal pollution in Chongqing[J]. *Beijing Agriculture*, 2015(18): 139-140.
- [23] 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 Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, et al. Safe utilization of paddy soils lightly polluted with cadmium in western Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4637-4646.
- [24] 林孝松, 余倩, 赵纯勇. 重庆市农业气候资源特征分析[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2007, 20(4): 365-368.
- LIN Xiao-song, YU Qing, ZHAO Chun-yong. Analysis of features of agroclimatic resources in Chongqing[J]. *Journal of Hainan Normal University(Natural Science)*, 2007, 20(4): 365-368.
- [25] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 69-74.
- HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 69-74.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2016: 25-38, 39-58, 70-81, 99-109.
- BAO Shi-dan. Analysis of soil agrochemistry[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2016: 25-38, 39-58, 70-81, 99-109.
- [27] Sparks D L. Methods of soil analysis[M]. Wisconsin: SSSA Inc, 1996: 686-697, 739-788, 811-827, 846-863.
- [28] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 北京: 农业出版社, 1993: 144-148, 150-160, 162-168.
- National Agricultural Technology Popularization Service Center. Technical specification for soil analysis[M]. Beijing: Agricultural Press, 1993: 144-148, 150-160, 162-168.
- [29] 陕西省质量技术监督局. 植物提取物中重金属元素的测定——镉的测定: DB61/T 902.1—2013[S]. 西安: 陕西省质量技术监督局, 2013.
- Shaanxi Province Bureau of Quality and Technical Supervision. Determination of heavy metal elements in plant extracts; Determination of cadmium. DB61/T 902.1—2013[S]. Xi'an: Shaanxi Province Bureau of Quality and Technical Supervision, 2013.
- [30] 蔡秋玲, 林大松, 王果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1028-1033.
- CAI Qiu-ling, LIN Da-song, WANG Guo, et al. Differences in cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2016, 35(6): 1028-1033.
- [31] 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 Ying, LI Yan-rong, SHI Zhi-guo, 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.
- [32] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中污染物

- 限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 国家食品药品监督管理总局, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Limits of pollutants in food of national standard for food safety: GB 2762—2017[S]. Beijing: State Food and Drug Administration, 2017.
- [33] 丁文, 吴胜春, 朱成, 等. 水稻响应重金属胁迫的蛋白质组学研究进展[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(1): 95-99.
- DING Wen, WU Sheng-chun, ZHU Cheng, et al. Research of rice plant response to heavy metal stress in proteomics[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2018, 40(1): 95-99.
- [34] Lee K, Bae D W, Kim S H, et al. Comparative proteomic analysis of the short-term responses of rice roots and leaves to cadmium[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167(3): 161-168.
- [35] 曾翔, 张玉焯, 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 Xiang, ZHANG Yu-zhu, WANG Kai-rong, et al. Genotype difference of brown rice in Cd content[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(1): 67-69, 83.
- [36] 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 Jing-feng, LI Hua-xing, LU Wei-sheng, et al. Variations of Cd, Cu, Zn accumulation among rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2010, 29(5): 844-850.
- [37] 周歆. 重金属低累积水稻品种筛选及稻田化学改良技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- ZHOU Xin. Selection of paddy rice varieties of low heavy metal accumulation and chemical modification of paddy field[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013.
- [38] 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.
- [39] 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 Wei-qun, LI Lian-qing, PAN Gen-xing. 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.
- [40] 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 Hui, JIAO Xiao-yu, XU Xue, et al. Advances in physiological and molecular mechanisms of cadmium metabolism in rice[J]. *Crops*, 2020(1): 1-8.
- [41] 程本义, 夏俊辉, 沈伟峰. 长江中下游稻区籼型两系与三系杂交水稻组合的比较分析[J]. 杂交水稻, 2009, 24(5): 61-65.
- CHENG Ben-yi, XIA Jun-hui, SHEN Wei-feng. Comparison analysis between two-line and three-line indica hybrid rice combinations in the middle and down area of the Yangtze Valley of China[J]. *Hybrid Rice*, 2009, 24(5): 61-65.