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 Tao, LIAO Xiao-yong, WANG Ling-qing, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars from cadmium-polluted paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8)：1818-1826.

镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究

薛　涛[1,2,3]，廖晓勇[1,2*]，王凌青[1,2]，张扬珠[3*]

(1.中国科学院地理科学与资源研究所，北京　100101；2.中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室，北京　100101；3.湖南农业大学资源环境学院，长沙　410128)

摘　要：为降低稻米Cd含量，筛选适用于粮食安全生产的Cd低积累水稻品种，利用8个早稻品种和10个晚稻品种进行Cd低积累水稻品种筛选田间小区试验，对比不同品种水稻糙米及其他部位的Cd含量，并分析不同品种水稻的生长发育及产量状况。结果显示：不同品种水稻间根际土pH值和根际土有效态Cd含量均有显著差异，且两者和水稻Cd含量的相关性较高，根际土pH值降低和有效态Cd含量升高会导致了水稻Cd含量升高；综合考虑降Cd效果和产量状况，供试的18个水稻品种中，早稻中嘉早17、株两优189、华1s/R039三个品种和晚稻长两优772、长两优1419、长两优051三个品种推荐为湖南地区中低Cd污染农田适宜推广的Cd低积累水稻品种，且早稻品种株两优189糙米Cd含量仅有0.09 $mg\cdot kg^{-1}$，晚稻品种长两优772和长两优051也仅有0.085 $mg\cdot kg^{-1}$左右，Cd低积累特性明显。研究表明，利用不同水稻品种对Cd的积累特性差异，可以筛选出适于中低Cd污染稻田的低累积型水稻品种，使稻米Cd含量降至国家粮食安全限量标准。

关键词：农田；水稻品种；糙米；Cd；筛选

中图分类号：X171.5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-2043(2019)08-1818-09　　doi:10.11654/jaes.2019-0517

Cadmium accumulation in different rice cultivars from cadmium-polluted paddy fields

XUE Tao[1,2,3], LIAO Xiao-yong[1,2*], WANG Ling-qing[1,2], ZHANG Yang-zhu[3*]

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract：In this study, rice cultivars that accumulated low levels of Cd were selected to reduce Cd content in rice and ensure the security of food production. The physiological growth and yield of 8 early- and 10 late-cultivars were studied to find those with low Cd accumulation and compare their differences based on a paddy field plot experiment. The results showed significant differences in pH value and available Cd content in the rhizosphere of the different cultivars. In addition, there were significant correlations among the pH values, available Cd content in rhizosphere, and the Cd content in rice. This demonstrated that a decrease in rhizosphere pH and an increase in available Cd content resulted in an increase in Cd content in rice. Based on the Cd content and rice yield, some rice cultivars were recommended as low Cd accumulation cultivars for fields moderately to slightly contaminated with Cd, including early cultivars ZJZ17, ZLY189, and H1s/R039 and late cultivars CLY772, CLY1419, and CLY051. Of these, the Cd content in the brown rice of early-cultivar ZLY189 was 0.09 $mg\cdot kg^{-1}$ and that in the late-cultivars CLY772 and CLY051 was approximately 0.085 $mg\cdot kg^{-1}$, which are both lower than the maximum allowable levels of Cd in food in China(0.2 $mg\cdot kg^{-1}$). This study thus showed that it is practical to select rice cultivars that accumulated low levels of Cd and are adapted to moderately to slightly Cd-contaminated paddy fields based on the differences in the Cd accumulation characteristics of the former. This provides a basis for food production on farmland contaminated with heavy metals.

Keywords：farmland; rice cultivar; brown rice; cadmium; screening

收稿日期：2019-05-09　　**录用日期**：2019-07-18

作者简介：薛　涛(1984—)，男，宁夏中卫人，博士研究生，从事重金属污染土壤修复研究。E-mail：xuetao_igsnrr@163.com
***通信作者**：廖晓勇　E-mail：liaoxy@igsnrr.ac.cn；张扬珠　E-mail：zhangyangzhu2006@163.com

基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFD0800900)
Project supported：The National Key R&D Program of China(2017YFD0800900)

近年来,由于工矿业活动的加剧,以及农业生产中各种农药、化肥不合理使用,导致土壤重金属污染日益严重[1]。据估算,由于重金属(准金属)污染造成的我国粮食产量损失每年超过1000万t,导致总经济损失超过200亿元[2-3]。重金属污染治理已成为我国亟待解决的环境问题之一。Cd作为主要的土壤重金属污染元素之一,即使在浓度较低的条件下,也极易被水稻吸收并在籽粒等部位积累,并通过食物链进入人体,对人体健康造成危害[4-5]。调查显示,重金属污染的农业土壤约占农田种植面积的16.7%,其中40%以上的土壤被Cd污染,超过10%的稻米被Cd污染[6]。

水稻是我国的主要粮食作物之一,大米占我国所有谷物消费量的55%,特别是我国南方地区是水稻的主产区[7]。在治理农田重金属污染的过程中,既要保证粮食供应不受影响,又要使稻谷中的重金属含量不超标,种植重金属低积累品种是一种较为理想的实现途径。筛选和培育重金属低积累水稻品种,不但能有效降低水稻籽粒中Cd的含量,而且技术利用简单、经济成本低,且环境友好[8-10]。近年来,诸多学者针对不同水稻品种对Cd的积累差异进行了大量研究。Yu等[11]首先提出了栽种安全作物品种的概念,即通过品种替代的方式将谷物中的Cd降至食用限量范围以内,降低粮食安全利用风险。不同水稻品种,对Cd的吸收能力可能相差数倍[12-13]。Zhang等[14]从146个水稻品种中筛选出17个Cd富集较低的品种,并对这17个水稻品种进行盆栽试验直至完熟,发现不同水稻品种的吸收和积累效果具有明显的差异性,且当供试土壤Cd浓度接近10 mg·kg^{-1}时,仍然有部分品种表现出较强的Cd低积累特性,籽粒Cd含量低于0.2 mg·kg^{-1}的安全限量标准。

目前,利用不同水稻品种Cd积累差异进行低积累品种筛选的研究较多,但大多集中在水稻籽粒Cd富集能力差异和产量上,而水稻根际土壤性质、水稻的植株形态和指标相关性等方面研究则有待深入。本试验选用早、晚稻共18个品种,在长沙县Cd污染农田中进行水稻品种筛选大田试验,分析不同水稻品种对重金属Cd吸收积累的差异性,通过Cd低积累品种的筛选和验证,分析水稻的Cd富集状况、生长状况及产量等信息,以期通过品种筛选技术降低稻米中Cd含量。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验小区位于湖南省长沙县(28°33′N,113°12′E),地处亚热带季风区,属亚热带湿润气候,年平均气温16~20 ℃,日照时数为1600~1800 h,年均降水量1 877.1 mm,土壤类型为红黄泥。由于该地区多年的工矿废水以及采矿冶炼化工及降尘污染,造成大量水稻田遭受重金属大面积严重污染,其中以Cd污染为主[15]。研究区土壤基本理化性质如下:pH 5.6;土壤有机质 29.9 mg·kg^{-1};CEC 9.13 cmol·kg^{-1};有效态Cd 0.26 mg·kg^{-1};全Cd 0.48 mg·kg^{-1}。

1.2 试验处理

本试验早稻设置8个处理,晚稻设置10个处理,每个处理1个品种,每个处理设置4个重复。每个小区面积为5 m×6 m,小区田埂高30 cm、宽30 cm,并进行覆膜隔断,排灌水相互独立。早稻和晚稻均采用相同的田间种植方式,即种植前进行翻耕,以复合肥作为底肥(N∶P∶K=22∶5∶13),将30 d龄的水稻幼苗分别以0.20 m×0.20 m的间距移植,采用人工插秧的方式进行。在移栽7 d后以112.5 kg·hm^{-2}的尿素作追肥,田间管理活动按照当地原有的种植习惯进行。在水稻抽穗后期利用美国CID公司的植物冠层分析仪CI-110进行叶面积指数、平均叶倾角及透光系数的测定。在水稻完熟期收割前进行水稻植株及土壤的取样。

供筛选的水稻品种共18种,具体见表1。其中早稻8种,包括常规稻2种,两系杂交稻6种;晚稻10种,包括常规稻4种,两系杂交稻4种,三系杂交稻2种。

1.3 样品采集与分析

水稻收割前在每个试验小区均匀采集3个连续5株的水稻整株,并采集相对应点的表层(0~20 cm)混合土壤1 kg左右。采集的水稻植株,每个处理随机选取20根整株水稻测量株高。然后将水稻根分离,剩余部分洗净。将水稻根部进行烘干后,采用抖落法[16]进行根际土的采集。将洗净的水稻植株经烘箱105 ℃杀青半小时后,调至60 ℃烘干48 h,将水稻各部位分离,糙米进行称量计算产量;分别研磨稻谷、颖壳、茎、叶、根,过0.425 mm筛备用。表层土壤和根际土壤阴干后磨碎过2 mm筛,混匀备用。

水稻糙米和土壤中重金属含量检测参照EPA改进的方法,分别利用HNO_3-$HClO_4$和HNO_3-HF-$HClO_4$进行湿法消解后,采用ICP-MS测定糙米和土壤中重金属浓度[17]。土壤Cd有效态含量利用DTPA-TEA-$CaCl_2$进行提取(pH=7.3±0.2),采用ICP-OES测定[18]。土壤有机质(SOM)和阳离子交换量(CEC)采用鲍士旦[19]的方法进行。所用试剂均为优级纯,并采用国家

标准参比物质（植物：GBW－07603；土壤：GBW－07402&07404）及空白样进行质量控制，测定偏差控制在10%以内。

1.4 数据分析

采用单因素方差分析多重比较LSD检验分别进行早、晚稻不同水稻品种的土壤pH值、土壤Cd含量、水稻株高及冠层特征、水稻不同部位Cd含量及产量均值的比较（$P<0.05$），Pearson双尾检验进行土壤相关指标和水稻相关指标变化之间的相关性分析。数据处理在Excel 2016和Origin 2017软件中进行。

2 结果与分析

2.1 不同品种水稻的根际土pH值和有效态Cd含量

由表2和表3可以看出，早、晚稻根际土pH值和有效态Cd含量在水稻品种间具有显著差异（$P<0.05$）。早稻根际土pH值最高为邦191s/R093，达6.69，株两优189、长两优199和华1s/R039的pH值显著低于其他品种水稻，均不超过5.6，常规稻和杂交稻之间无显著性规律。相反，晚稻则表现出了杂交稻根际土pH值显著高于常规稻的规律，杂交稻根际土pH值均高于5.7，而常规稻中长两优051的pH值略高，为5.62，长两优1419最低，仅为5.49。

早稻根际土有效态Cd含量在0.17~0.28 mg·kg^{-1}之间，最高的为长D26s/R039，达0.28 mg·kg^{-1}，株两优189和长两优199根际土Cd含量显著低于其他品种，分别为0.17 mg·kg^{-1}和0.19 mg·kg^{-1}，早稻常规稻和杂交稻根际土有效态Cd含量并未表现出规律性。晚稻根际土有效态Cd含量平均高于早稻，常规稻根际土有效态Cd含量显著低于杂交稻，其中常规稻长两优051最低，为0.18 mg·kg^{-1}，杂交稻泰优390最高，达0.29 mg·kg^{-1}。在所有品种水稻中，早稻品种株两优189和长两优199的根际土有效态Cd含量表现出了Cd低含量特性，而晚稻品种长两优772和长两优051表现出了根际土有效态Cd低含量特性。

2.2 不同品种水稻的植株形态

水稻冠层结构和株高是反映水稻产量的重要指

表1 供筛选水稻品种信息

Table 1 Information for screening rice cultivars

品种编号 Abbreviation	类型 Type	品种名称 Cultivars	类别 Species	品种编号 Abbreviation	类别 Type	品种名称 Cultivars	类型 Species
XZX45	早稻	湘早籼45	常规稻	CLY1408	晚稻	长两优1408	常规稻
ZJZ17	早稻	中嘉早17	常规稻	CLY1419	晚稻	长两优1419	常规稻
ZLY189	早稻	株两优189	两系杂交稻	CLY051	晚稻	长两优051	常规稻
CLY199	早稻	长两优199	两系杂交稻	NLY044	晚稻	N两优044	两系杂交稻
H1s/R039	早稻	华1s/R039	两系杂交稻	CLY143	晚稻	C两优143	两系杂交稻
CD26s/R093	早稻	长D26s/R093	两系杂交稻	Z201s/R2115	晚稻	卓201s/R2115	两系杂交稻
CD26s/R039	早稻	长D26s/R039	两系杂交稻	ZLY1998	晚稻	卓两优1998	两系杂交稻
B191s/R093	早稻	邦191s/R093	两系杂交稻	HY159	晚稻	H优159	三系杂交稻
CLY772	晚稻	长两优772	常规稻	TY390	晚稻	泰优390	三系杂交稻

表2 早稻不同品种根际土pH值及土壤有效态Cd含量（mg·kg^{-1}）

Table 2 Rhizosphere soil pH and soil available Cd content in different early rice cultivars（mg·kg^{-1}）

项目 Items	XZX45	ZJZ17	ZLY189	CLY199	H1s/R039	CD26s/R093	CD26s/R039	B191s/R093
pH	5.66±0.06d	5.64±0.04d	5.38±0.11e	5.50±0.08e	5.51±0.07e	5.77±0.04c	5.93±0.09b	6.69±0.04a
有效态Cd	0.23±0.02b	0.23±0.01b	0.17±0.02c	0.19±0.02c	0.22±0.01b	0.24±0.02b	0.28±0.02a	0.23±0.01b

注：不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note：Different lowercase letters indicate significant differences among treatments（$P<0.05$）. The same below.

表3 晚稻不同品种根际土pH值及土壤有效态Cd含量（mg·kg^{-1}）

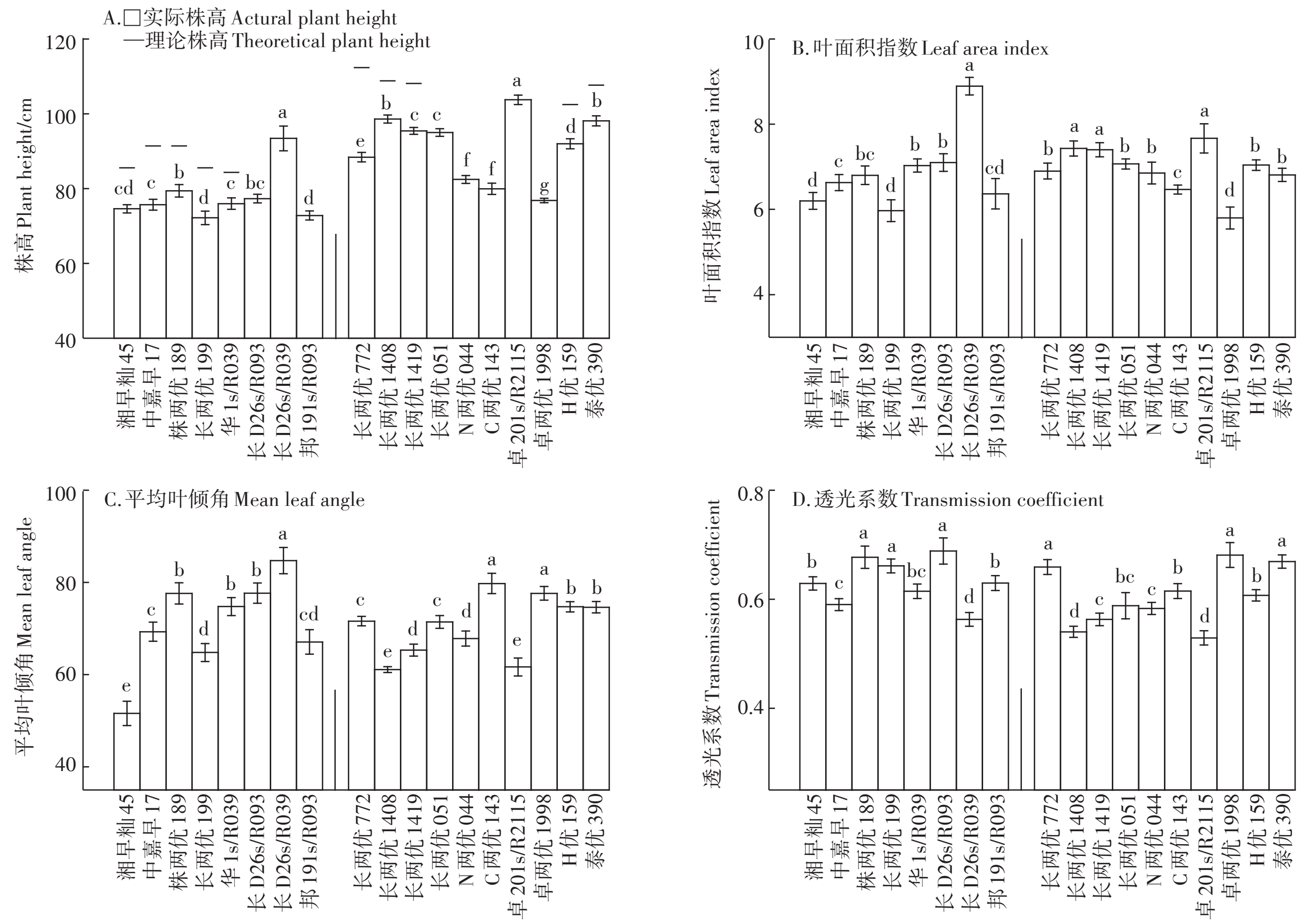
Table 3 Rhizosphere soil pH and soil available Cd content in different late rice cultivars（mg·kg^{-1}）

项目 Items	CLY772	CLY1408	CLY1419	CLY051	NLY044	CLY143	Z201s/R2115	ZLY1998	HY159	TY390
pH	5.58±0.06bc	5.54±0.04bc	5.49±0.06c	5.62±0.05b	5.76±0.06a	5.77±0.08a	5.75±0.04a	5.70±0.02a	5.75±0.06a	5.73±0.03a
有效态Cd	0.19±0.02c	0.24±0.01b	0.24±0.01b	0.18±0.02c	0.29±0.03a	0.29±0.03a	0.29±0.02a	0.28±0.02a	0.27±0.02a	0.29±0.01a

标[20-21]。植株较高可以提高水稻的通风条件,但过高却易导致倒伏,相反则会导致通风不良、茎叶拥挤,从而影响光合效率[22]。由图1A中可以看出,常规稻和杂交稻株高并未表现出规律性差异。早稻品种长D26s/R039株高显著高于其他品种水稻,达93.4 cm,其余品种株高均在75 cm左右。晚稻株高最高为两系杂交稻卓201s/R2115,达104 cm,其余两系杂交稻株高则均低于常规稻和三系杂交稻;另外,对比发现,在提供信息的水稻品种中实际株高均低于理论株高。

叶面积指数(Leaf area index,LAI)是用于模拟生态系统过程的基本生理参数[23],用以测量植被与大气之间碳和水的通量[24]。它是生态过程,如光合作用、蒸腾作用和蒸散作用的重要指标[25]。Hirooka等[26]使用植物冠层分析仪测量LAI及其生长速率,结果表明水稻产量与LAI生长速率密切相关,因此其常被用来表征植物冠层的基本特征[21]。LAI与产量、单位面积穗数和每穗粒数呈正相关[27],尤其水稻抽穗期适宜的LAI及其结构是水稻高产的基础[28]。从图1B中可以看出,LAI品种差异性的基本规律和株高类似,常规稻和杂交稻无规律性差异。早稻品种长D26s/R039 LAI远高于其他品种,达8.89,湘早籼45和长两优199 LAI最低,均在6左右。晚稻两系杂交品种卓201s/R2115 LAI最高,达7.67,其余3个两系杂交品种中,C两优143和卓两优1998显著低于常规稻和三系杂交稻,而N两优044则和株高规律性不同。

另外,LAI是影响水稻群体透光率(透光系数)的重要指标之一,二者之间呈显著负相关,透光率是保证光合作用的基本参数,直接影响作物生长和作物产量[29]。一般来说,叶倾角越大,透光系数越大,但透光率同时也受叶倾角的影响。因此,叶倾角分布是植被冠层的第二个最常用的结构特征指标,其和LAI是准确预测反射、透射和吸收辐射通量所需的两个重要结



早稻、晚稻分析均分别进行,不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同

Early rice and late rice were analyzed respectively. The different lowercase letters indicate significant differences among treatments(P<0.05). The same below

图1 不同品种水稻株高及冠层特征

Figure 1 Plant height and canopy characteristics of different rice cultivars

构参数[30]。LAI和叶倾角决定了间作中的光透射和分配，而光进一步影响系统中的其他生态和生理过程[31]。一般来说，叶倾角大，则稻叶直立，增加了群体透光率，有利于更多的光合作用及作物的生长[32]。本研究结果显示（图1C），早稻之间平均叶倾角差异性很大，最高的为杂交稻长D26s/R039，达84.7，最低的为常规稻品种湘早籼45，仅有51.6。另外杂交稻株两优189、华1s/R039和长D26s/R093也有较大的叶倾角，均在75左右，早晚稻中常规稻和杂交稻的平均叶倾角均无规律性。

不同品种水稻间透光系数和LAI及株高大体呈相反的规律（图1D）。早稻品种中，株高和LAI最大的长D26s/R039，其透光系数最小，而LAI较小的湘早籼45和长两优199的透光系数相对较大。晚稻也表现出相同的规律性，株高和LAI最大的卓201s/R2115，其透光系数最小，而株高和LAI最小的卓两优1998，其透光系数最大。但有些也无此规律，如早稻长两优199和华1s/R039，可能是受平均叶倾角的影响。

2.3 不同品种水稻糙米及其各部位Cd含量

由图2可知，早稻常规稻和杂交稻糙米中Cd含量无规律性。常规稻中嘉早17，杂交稻株两优189、长两优199和华1s/R039四个品种糙米Cd含量均低于0.2 mg·kg^{-1}的国家食品安全限量标准（GB 2762—2017），具有水稻Cd低积累特征，常规稻湘早籼45超标也不严重，仅有0.22 mg·kg^{-1}。晚稻则表现出了明显的规律性，即常规稻糙米中的Cd含量显著低于杂交稻。所有晚稻品种水稻中，糙米Cd含量低于0.2 mg·kg^{-1}的均为常规稻，且唯一超标的长两优1408也仅为0.21 mg·kg^{-1}，而杂交稻则均高于0.30 mg·kg^{-1}，其中卓201s/R2115和泰优390尤其高，分别达0.45 mg·kg^{-1}和0.43 mg·kg^{-1}。不同品种水稻其他部位中的Cd含量如图3所示，不论早稻还是晚稻，糙米中Cd含量较低的品种，在水稻其他部位也大体呈现了低积累特征。杂交稻的Cd含量总体高于常规稻，尤其是晚稻更加明显。同样，糙米Cd累积较高的品种，如早稻D26s/R093、D26s/R039和邦191s/R093，晚稻杂交稻的所有6个品种，其在颖壳、茎、叶、根中的Cd含量同样较高。

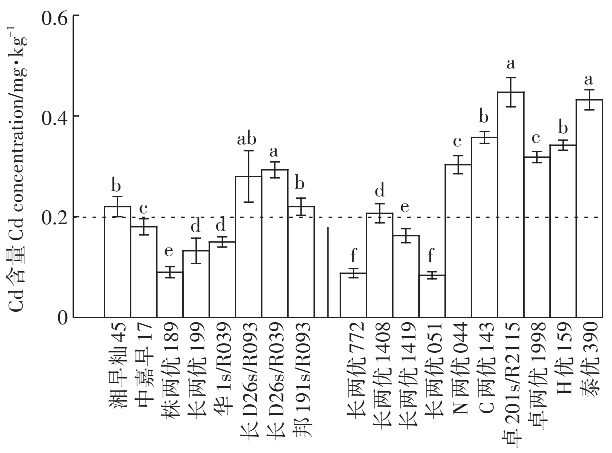


图2 不同品种水稻糙米Cd含量

Figure 2 Cd content in brown rice of different rice cultivars

2.4 不同品种水稻的产量

如图4所示，常规稻和杂交稻产量之间无显著差异性规律。早稻常规稻两个品种间产量无显著差异（P>0.05），均在6300 kg·hm^{-2}左右，杂交稻差异较大，长D26s/R039产量最高，达6918 kg·hm^{-2}，株两优189和长D26s/R093品种其次，也有6450 kg·hm^{-2}左右，长两优199产量最低，仅有6075 kg·hm^{-2}。晚稻常规稻品种产量都较高，平均达到了7428 kg·hm^{-2}，且相互之间无显著差异。杂交稻H优159和泰优390产量显著高于其他品种，分别为7248 kg·hm^{-2}和7382 kg·hm^{-2}，除此之外，其余水稻品种产量远低于常规水稻品种，产量范围在6121~6726 kg·hm^{-2}之间。

2.5 不同品种各指标的相关性分析

利用早、晚稻相关指标进行相关性分析（图5），根际土pH值和根际有效态Cd及水稻不同部位的Cd含量均呈中度相关性，相关系数在0.724~0.887之间。根际土有效态Cd含量和糙米中的Cd含量显著正相关，相关系数高达0.912，和水稻其他部位中的Cd含量呈中度正相关性（P<0.05）。糙米Cd含量还与自身颖壳和叶中的Cd含量高度正相关，与茎和根中的Cd含量具有中度的正相关性。叶面积指数、株高和产量三者之间呈显著正相关性，其中产量和株高的相关系数高达0.979，另外两者呈中度相关性，透光系数则和以上三者呈中度显著负相关性。

3 讨论

根际土壤的重金属生物有效性主要受金属形态、土壤类型和植物种类以及根诱导（物理化学和生物）的土壤性质变化的控制[33-34]。与全Cd相比，土壤有效态Cd更容易被水稻吸收，其与稻米Cd含量之间显著相关，能间接反映土壤中Cd的移动特性和水稻Cd的累积风险[35-36]。相关性分析表明，不同水稻根际土的变化和水稻各部位的Cd含量均呈显著相关性，因此根际土Cd的有效性是水稻Cd吸收的重要指标之一。土壤pH值是影响土壤Cd有效态含量的原因之一[33]，

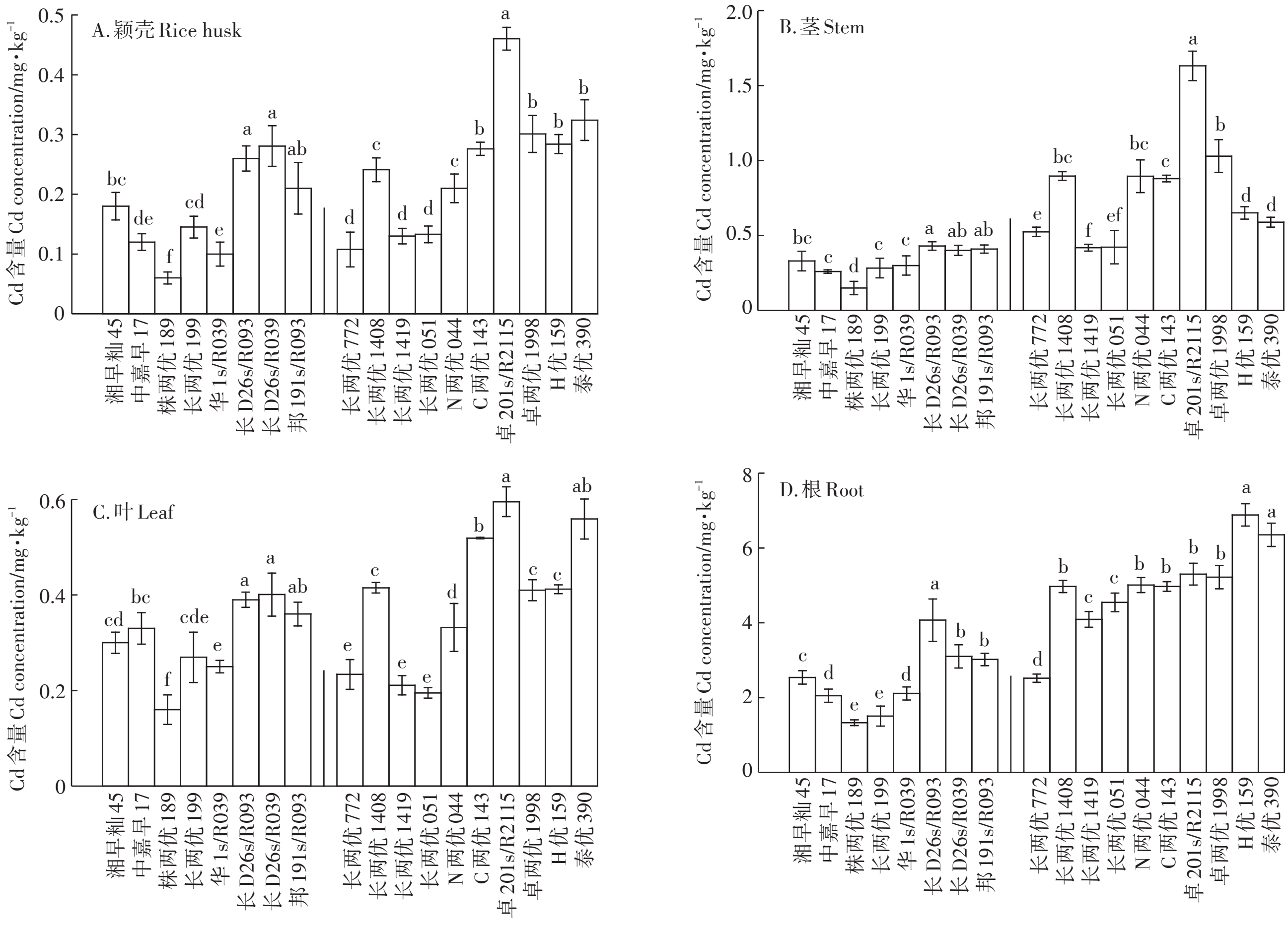


图3 不同品种水稻其他部位Cd含量

Figure 3 Cd content in other parts of different rice cultivars

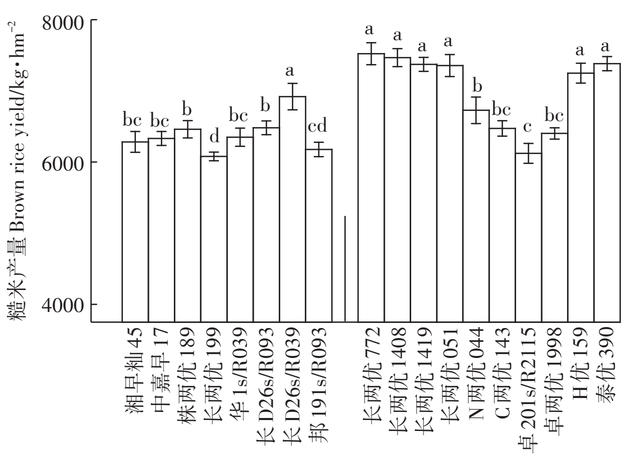


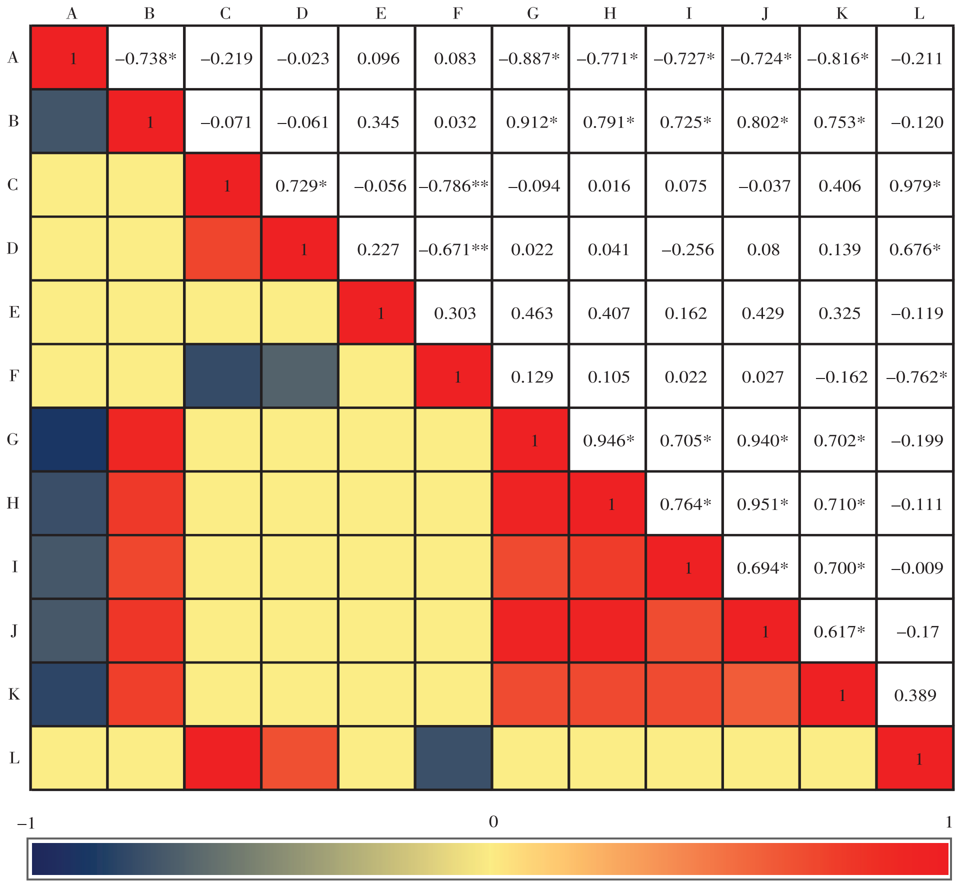
图4 不同品种水稻产量

Figure 4 Yield of different rice cultivars

但根际土壤的化学、物理和生物等植物影响参数与非根际土完全不同,其差异主要是由植物根部附近的根的诱导过程导致的,如:根系分泌物质的释放、营养物的吸收和解吸、水分的去除作用和根的物理力等[37]。本文通过对比根际土pH值发现,水稻不同品种根际土之间存在差异,这种差异主要是不同品种水稻根系分泌物不同,其释放有机酸类型和数量也不同,这些渗出物扩散到土壤中,影响了根际土壤pH值的变化[38]。

水稻各部位中重金属Cd含量分布遵循根>茎、叶>稻谷的规律,这和前人的研究结果一致[39]。不同品种水稻重金属离子的吸收和转运机制不同,进而造成品种间Cd含量和分布的巨大差异[40],因此,利用这种差异性进行重金属低积累水稻的筛选成为可能。以国家食品安全限量标准(GB 2762—2017)作为筛选标准,早稻糙米中Cd含量低于0.2 mg·kg^{-1}的品种有中嘉早17、株两优189、长两优199和华1s/R039,晚稻品种有长两优772、长两优1419和长两优051,以上可认定为Cd低积累水稻品种。

本研究结果表明,水稻株高、LAI和产量三者之



A:根际土pH值;B:根际土有效态Cd含量;C:株高;D:叶面积指数;E:平均叶倾角;F:透光系数;G:糙米Cd含量;H:颖壳Cd含量;I:茎Cd含量;J:叶Cd含量;K:根Cd含量;L:产量;*.在0.05水平(双侧)上显著相关;**.在0.01水平(双侧)上显著相关

A,pH value of rhizosphere soil; B,Cd content of rhizosphere soil; C,plant height; D:Leaf area index; E:Mean leaf angle; F:Transmission coefficient; G:Cd content of brown rice; H:Cd content of hull; I:Cd content of stem; J:Cd content of leaf; K:Cd content of root; L:Yield; *. Significantly correlated at 0.05 level;**.Significantly correlated at 0.01 level

图5 相关性分析

Figure 5 Correlation analysis

间呈显著性相关,因此水稻株高和LAI是水稻产量的两个重要指标。另外,本文通过对比发现,水稻实际株高低于理论株高,说明作物生长受到不同程度的影响。Cao等[41]和Rizwan等[42]研究发现,重金属Cd很容易被植物吸收,并对植物生长产生不利的影响,如生长缓慢、叶片萎黄、生长抑制、光合色素和光合效率下降、离子稳态失衡等,这种现象的产生可能与农田中重金属的影响有直接关系。透光系数和平均叶倾角呈显著负相关,同时其也受平均叶倾角的影响,如长D26s/R093品种,透光系数高,其LAI也相对较高,但平均叶倾角却很大,因此叶片直立,保证了较大的透光系数。相反,中嘉早17的LAI虽然相对较低,但其平均叶倾角小,因此透光系数相对较小。

有研究表明,不同类型水稻干物质生产差异显著,因此其产量和产量构成也会产生显著差异[43]。Cd的高毒性通过土壤输送给植物,经作物积累后,对作物生长产生影响,进而影响作物的产量[44-45],但水稻品种不同,对产量的影响也差异显著[46],因此,在Cd污染土壤上进行水稻筛选,既要考虑其低积累特性,也要充分考虑其在Cd胁迫下的产量状况。通过本文的对比研究发现,早稻糙米Cd低积累品种中,长两优199的产量过低,仅有6075 kg·hm^{-2},而中嘉早17、株两优189、华1s/R039无显著差异,若仅考虑降Cd效果,推荐降Cd率最高的品种株两优189。晚稻低积累3个品种间产量无显著差异,且产量都接近7500 kg·hm^{-2},因此均为较理想的低积累品种。但是,水稻种植存在一定的惯性,农民常会选择常年种植的品种,或者从米质和口感的角度去选择品种进行种植,因此需在低积累品种中选择适宜的品种进行推广种植。另外,水稻的Cd低积累特性也受多种因素的影响,在

实际应用中应充分考虑土壤类型、污染程度等因素。

4 结论

(1)不同品种水稻间根际土pH值和有效态Cd含量均有品种间的显著差异,且两者和水稻Cd含量的相关性较高,根际土pH值的降低和有效态Cd含量的升高是导致水稻Cd含量升高的重要影响因素。

(2)供试的18个水稻品种中,早稻中嘉早17、株两优189、长两优199、华1s/R039四个品种,晚稻长两优772、长两优1419、长两优051三个品种糙米的Cd含量低于国家食品安全限量标准,为Cd低积累水稻品种。

(3)水稻产量是品种筛选的重要因素之一,其受到了水稻株高和冠层特征的影响。早稻Cd低积累品种长两优199产量较低,其余3个品种产量无显著差异,产量均在6300 kg·hm^{-2}以上。晚稻低积累品种的产量都较高,产量均在7350 kg·hm^{-2}以上。结合水稻Cd低积累特性,推荐中嘉早17、株两优189、华1s/R039品种作为低积累早稻品种,长两优772、长两优1419、长两优051作为低积累晚稻品种。另外,湘早籼45、邦191s/R093和长两优1408具有一定的低积累特性,可配合其他措施达到Cd低积累的效果。

参考文献:

[1] Hu Y, Cheng H, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review[J]. *Environment International*, 2016, 92/93:515-532.

[2] Williams P N, Lei M, Sun G, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(3):637-642.

[3] Zhuang P, McBride M B, Xia H, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(5):1551-1561.

[4] Du Y, Hu X F, Wu X H, et al. Affects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan Province, central south China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(12):9843-9856.

[5] Aziz R, Rafiq M T, Li T, et al. Uptake of cadmium by rice grown on contaminated soils and its bioavailability/toxicity in human cell lines (Caco-2/HL-7702)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(13):3599-3608.

[6] Li J, Xu Y. Immobilization remediation of Cd-polluted soil with different water condition[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193:607-612.

[7] Ye X, Ma Y, Sun B. Influence of soil type and genotype on Cd bioavailability and uptake by rice and implications for food safety[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(9):1647-1654.

[8] 陈彩艳, 唐文帮. 筛选和培育镉低积累水稻品种的进展和问题探讨[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6):1044-1051.
CHEN Cai-yan, TANG Wen-bang. A perspective on the selection and breeding of low-Cd rice[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6):1044-1051.

[9] Norton G J, Pinson S R M, Alexander J, et al. Variation in grain arsenic assessed in a diverse panel of rice (*Oryza sativa*) grown in multiple sites[J]. *New Phytologist*, 2012, 193(3):650-664.

[10] Bolan N S, Makino T, Kunhikrishnan A, et al. Cadmium contamination and its risk management in rice ecosystems[J]. *Advances in Agronomy*, 2013, 119: 183-273.

[11] Yu H, Wang J, 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.

[12] 吴照祥, 孙小艳, 刘腾云, 等. 中、轻度污染农田6杂交水稻品种Cd累积分布[J/OL]. 江西农业大学学报[2019-06-25]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/36. 1028. S. 20190320. 1500. 036. html.
WU Zhao-xiang, SUN Xiao-yan, LIU Teng-yun, et al. Cd accumulation, distribution and transport in six varieties of hybrid rice grown in medium to low Cd-polluted farmland[J/OL]. Acta Agriculturae Universitis Jiangxiensis[2019-06-25]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/36. 1028. S. 20190320. 1500. 036. html.

[13] Chiao W T, Syu C H, Chen B C, et al. Cadmium in rice grains from a field trial in relation to model parameters of Cd-toxicity and-absorption in rice seedlings[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 169:837-847.

[14] 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.

[15] Wang K, Qiao Y, Zhang H, et al. Influence of cadmium-contaminated soil on earthworm communities in a subtropical area of China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 127:64-73.

[16] 林瑞余, 戎 红, 周军建, 等. 苗期化感水稻对根际土壤微生物群落及其功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9):3644-3654.
LIN Rui-yu, RONG Hong, ZHOU Jun-jian, et al. Impact of rice seedling allelopathy on rhizospheric microbial populations and their functional diversities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9):3644-3654.

[17] Chen T B, Huang Z C, Huang Y Y, et al. Distributions of arsenic and essential elements in pinna of arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Science in China, Ser C*, 2005, 48(1):18-24.

[18] 高树芳, 王 果, 苏苗育, 等. 土壤环境质量基准中Cd限量指标的推算[J]. 福建农业大学学报, 2006, 35(6):644-647.
GAO Shu-fang, WANG Guo, SU Miao-yu, et al. Estimation of cadmium limits for soil environmental quality standard[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University*, 2006, 35(6):644-647.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[20] Venuprasad R, Dalid C O, Del Valle M, et al. Identification and characterization of large-effect quantitative trait loci for grain yield under lowland drought stress in rice using bulk-segregant analysis[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2009, 120(1):177-190.

[21] Kamal M, Phinn S, Johansen K. Assessment of multi-resolution image data for mangrove leaf area index mapping[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176:242-254.

[22] Setter T L, Laureles E V, Mazaredo A M. Lodging reduces yield of rice by self-shading and reductions in canopy photosynthesis[J]. *Field Crops Research*, 1997, 49(2/3):95-106.

[23] Gray J, Song C. Mapping leaf area index using spatial, spectral, and temporal information from multiple sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119:173-183.

[24] Heiskanen J, Rautiainen M, Stenberg P, et al. Sensitivity of narrowband vegetation indices to boreal forest LAI, reflectance seasonality and species composition[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 78:1-14.

[25] Pierce L L, Running S W. Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer[J]. *Ecology*, 1988, 69(6):1762-1767.

[26] Hirooka Y, Homma K, Maki M, et al. Evaluation of the dynamics of the leaf area index(LAI) of rice in farmer′s fields in Vientiane Province, Lao PDR[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2017, 73(1):16-21.

[27] 朱秋明, 邓翠婷, 叶俊希, 等. 不同生育期水稻叶面积指数与产量的关系[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2016, 29(3):17-21.
ZHU Qiu-ming, DENG Cui-ting, YE Jun-xi, et al. Relationships between rice leaf area index and yield at different growth stages[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2016, 29(3):17-21.

[28] 张林青, 苏祖芳, 张亚洁, 等. 水稻拔节期群体茎蘖结构与叶面积指数及产量关系的研究[J]. 扬州大学学报, 2004, 25(1):55-58.
ZHANG Lin-qing, SU Zu-fang, ZHANG Ya-jie, et al. Study on relationship between tiller structure and LAI at elongating stage and yield in rice[J]. *Journal of Yangzhou University*, 2004, 25(1):55-58.

[29] 胡　凝, 姚克敏, 张晓翠, 等. 水稻株型因子对冠层结构和光分布的影响与模拟[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(5):535-543.
HU Ning, YAO Ke-min, ZHANG Xiao-cui, et al. Effect and simulation of plant type on canopy structure and radiation transmission in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(5):535-543.

[30] Zou X, Mõttus M, Tammeorg P, et al. Photographic measurement of leaf angles in field crops[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 184:137-146.

[31] Leroy C, Sabatier S, Wahyuni N S, et al. Virtual trees and light capture: A method for optimizing agroforestry stand design[J]. *Agroforestry Systems*, 2009, 77(1):37-47.

[32] 孔　许, 徐丽娜, 詹俊辉, 等. 水稻高群体光合速率品种筛选及其叶倾角特征研究[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(4):526-532.
KONG Xu, XU Li-na, ZHAN Jun-hui, et al. Screening of high canopy photosynthetic rate rice varieties and its leaf angle characteristics[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2018, 52(4):526-532.

[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] Martínez-Alcalá I, Clemente R, Bernal M P. Metal availability and chemical properties in the rhizosphere of *Lupinus albus* L. growing in a high-metal calcareous soil[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, 201(1/2/3/4):283-293.

[35] 熊　婕, 朱奇宏, 黄道友, 等. 南方典型稻区稻米镉累积量的预测模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1):22-28.
XIONG Jie, ZHU Qi-hong, HUANG Dao-you, et al. Prediction model for the accumulation of cadmium in rice in typical paddy fields of south China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1):22-28.

[36] Qiu G, Zhu M, Meng J, et al. Changes in soil microbial biomass C, ATP and microbial ATP concentrations due to increasing soil Cd levels in Chinese paddy soils growing rice(*Oryza sativa*)[J]. *Plant and Soil*, 2019, 436(1/2):1-12.

[37] Hu L, McBride M B, Cheng H, et al. Root-induced changes to cadmium speciation in the rhizosphere of two rice(*Oryza sativa* L.) genotypes[J]. *Environmental Research*, 2011, 111(3):356-361.

[38] Anderson T A, Guthrie E A, Walton B T. Bioremediation in the rhizosphere[J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, 27(13):2630-2636.

[39] 周金林, 陈　能, 郭望模. 大田双季种植籼稻籽粒镉积累差异研究[J]. 湖南农业科学, 2013(11):26-28.
ZHOU Jin-lin, CHEN Neng, GUO Wang-mo. Differences in Cd accumulation in grains of double-season planted indica rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013(11):26-28.

[40] Liang C, Xiao H, Hu Z, et al. Uptake, transportation, and accumulation of C-60 fullerene and heavy metal ions(Cd, Cu, and Pb) in rice plants grown in an agricultural soil[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235:330-338.

[41] Cao F, Cai Y, Liu L, et al. Differences in photosynthesis, yield and grain cadmium accumulation as affected by exogenous cadmium and glutathione in the two rice genotypes[J]. *Plant Growth Regulation*, 2015, 75(3):715-723.

[42] Rizwan M, Ali S, Abbas T, et al. Cadmium minimization in wheat: A critical review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 130:43-53.

[43] 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 Qi, HU Jian-feng, ZHOU Wei, 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.

[44] 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.

[45] Gong B, Nie W, Yan Y, et al. Unravelling cadmium toxicity and nitric oxide induced tolerance in *Cucumis sativus*: Insight into regulatory mechanisms using proteomics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 336:202-213.

[46] 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 Gang, SUN Meng-fei, ZHONG Xue-mei, et al. Cadmium accumulation and yield difference of different rice varieties under cadmium stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(17):76-81.