

# 不同镉积累型水稻品种苗期镉积累及转运变化特征

邓伟<sup>1,2</sup> 张玉烛<sup>3\*</sup> 敖和军<sup>1\*</sup> 方宝华<sup>2</sup> 刘洋<sup>2</sup> 李强<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; <sup>2</sup> 湖南省水稻研究所, 长沙 410125; <sup>3</sup> 国家杂交水稻工程技术研究中心, 长沙 410125;

\* 通讯作者: yuzhuzhang@hotmail.com; aohejun@126.com)

**摘 要:** 稻米镉污染成为国家和社会广泛关注的问题, 为了解不同水稻品种对土壤中镉离子的吸附特性, 本研究通过水培试验分析了不同镉积累型水稻品种(高镉积累品种: 玉针香、天优华占; 低镉积累品种: 湘晚籼 12 号、金优 59) 在苗期的镉吸收及转运时间动力学特征。结果表明, 4 个品种苗期根系和地上部的镉积累时间动力学特征均符合米氏方程, 根系和地上部分的  $\alpha$  值均表现为高镉积累品种大于低镉积累品种; 镉胁迫 72 h 之后各品种镉总累积量表现为玉针香>金优 59>天优华占>湘晚籼 12 号, 其中高镉积累品种天优华占苗期累计量未达到饱和状态。4 个品种镉转运速率随着胁迫时间延长均呈显著下降趋势, 72 h 后表现为高镉积累品种大于低镉积累品种。相关分析表明, 参试品种根系镉含量、地上部分镉含量及根部向地上部的镉转运速率三者之间均呈显著正相关关系。可见, 水稻高、低镉积累特性的显现具有一定的时限性, 其中, 以湘晚籼 12 号等为代表的低吸收、低转运品种类型在镉污染田块种植具有较高应用价值。

**关键词:** 水稻; 镉; 苗期; 时间动力学

**中图分类号:** S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8082(2018)04-0086-05

镉(Cd)是生物毒性最强的重金属元素之一, 被国际癌症研究协会列为 IA 级致癌物, 在联合国环境规划署提出的 12 种具有全球性意义的危险化学物质中位居榜首<sup>[1]</sup>。水稻作为我国最重要的口粮作物, 近年来遭受 Cd 等重金属污染的严重威胁。镉污染严重影响水稻生长和产量、品质形成, 并且通过镉含量超标大米进入食物链, 危害人体健康。因此, 阻止镉进入水稻体内, 控制稻米镉积累成为当前保障我国粮食和食品安全的重要内容。研究表明, 镉主要以离子形式通过根系吸收进入水稻中, 一部分进入木质部并随蒸腾流向上分配到茎叶中, 另外一部分再通过韧皮部进入穗部和籽粒中并积累于此, 从而使得稻米中含有重金属镉<sup>[2]</sup>。因此, 根系吸收、木质部装载和韧皮部转运是决定稻米镉含量的三个关键环节<sup>[3-4]</sup>, 也成为了稻米镉污染防治的研究重点。

离子吸收动力学及其参数的提出在对植物矿质元素的代谢研究和描述中具有重要作用。植物离子吸收动力学参数可以定量地描述根系吸收离子的效率, 表现根系对矿质元素离子的吸收特征, 以及建立数学模型来描述离子迁移转运, 并为预测植物对离子的吸收提供依据<sup>[5]</sup>。20 世纪 50 年代, Epstein 等<sup>[6]</sup>首次发现 Michaelis-Menten 酶动力学方程(米氏方程)可以适用于大麦根系的离子吸收过程。近年来, 众多研究也发现, 水稻、玉米、油菜、生菜和烟草等作物吸收镉离子的

过程也符合米氏方程, 而且不同作物或同一作物不同品种间的最大吸收速率和米氏常数也存在较大差异<sup>[5-9]</sup>。水稻是镉富集能力最强的大宗农作物, 在一定的时间和镉浓度范围内, 其在不同镉浓度梯度或时间威胁下对镉的吸收均可用动力学曲线来描述。何俊瑜等<sup>[10]</sup>利用同位素示踪技术研究发现, 镉敏感型水稻品种及其突变体幼苗根系镉积累的浓度动力学特征也符合米氏方程, 在短时间(210 min)和长时间(96 h)内的镉积累量变化均是一条饱和曲线, 并且发现 Cd 在两类水稻幼苗中的吸收和分配具有很大差异。王龙等<sup>[9]</sup>在对 19 份水稻核心种质和 5 份水稻品种的幼苗镉离子吸收动力学特性的研究中发现, 不同基因型水稻幼苗根系和地上部分的镉离子吸收动力学特征均符合米氏方程, 两者对镉离子的吸收存在不同的阻控机制, 镉离子吸收特性和转运效率在基因型间存在着丰富的遗传多样性。

众多研究发现, 水稻对镉的吸收主要集中在苗期, 对水稻镉积累进行阻抑调控的措施也主要针对这一时期<sup>[11]</sup>。此外, 低镉积累品种的选育和研究是降低稻米镉积累最有效的措施。但是, 目前关于不同镉积累型水稻

收稿日期: 2017-12-07

**基金项目:** 湖南省重金属污染耕地修复及农作物种植结构调整试点项目

品种在苗期的镉吸收积累动力学特征的比较研究尚未有报道。因此,本文采用4个不同镉积累型水稻品种作为供试材料,通过水培试验重点研究水稻苗期镉在植株体内的积累转运分配差异及其时间动力学特征,以期探明水稻对镉的吸收积累差异机制,为筛选低吸收、低转运,适合大面积推广的品种提供数据支撑和理论依据,从而促进我国稻米安全生产。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试水稻品种为湖南省农科院多年研究筛选出的不同镉积累型晚稻品种,其中,高镉积累品种2个:玉针香(A1)和天优华占(A2);低镉积累品种2个:湘晚粳12号(B1)和金优59(B2)。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 材料培养

于2017年3~6月在湖南省水稻研究所温室内通过水培试验完成。水稻种子用10%的强氯精溶液消毒后用清水冲洗干净并置于30℃培养箱中催芽,破胸后播种到无镉污染的秧田中。长至3叶1心期时选择均匀一致的秧苗洗净移栽到不含镉的水培溶液中,培养至苗期(5叶1心期)时将无镉营养液替换为镉含量为0.05 mmol/L(5.621 mg/L)的含镉营养液,开始进行镉吸收时间动力学试验。水培盆长66 cm、宽41 cm、高16 cm,装有营养液10 L,每盆种4个品种(4行),每个品种6丛。水培营养液参照国际水稻研究所(IRRI)推荐的配方制备,Cd溶液由优级纯的 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 配制而成,营养液pH值用1.0 mol/L的NaOH和HCl溶液调节至5.0~5.5,每2 d调1次,营养液每5~7 d换1次。

#### 1.2.2 镉吸收时间动力学试验

镉吸收时间动力学试验设置11个时间段:即分别在镉胁迫0.5、1、1.5、2、4、8、16、24、36、48和72 h后取水稻植株和营养液样品,检测根、茎叶和营养液中的镉含量,每个处理3次重复。植株取样后用自来水冲洗干净,再用去离子水冲洗2遍并用滤纸吸干水分。接着将根和茎叶(地上部)分离,根使用20 mmol/L的 $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 溶液浸泡15 min除去表面吸附的镉离子,然后用去离子水冲洗干净,滤纸吸干水分后装入信封置于烘箱中105℃杀青30 min,再80℃烘干至恒质量,称量干物质量后使用万能粉碎机将样品粉碎,用于消化检测根和茎叶中的镉含量。

### 1.3 取样方案及计算方法

#### 1.3.1 测定指标及方法

1.3.1.1 干物质量 水稻苗期,取植株根系及地上部分烘干至恒质量后称重。

1.3.1.2 根和茎叶镉含量 样品用不锈钢植物样品粉碎机磨碎后,采用浓硝酸-高氯酸(V:V=4:1)混合液消化后使用ICP-MS测定根和茎叶的镉含量<sup>[12]</sup>。

1.3.1.3 镉转运速率 单位时间内地上部镉积累量与根系干质量的比值,可以用来反映镉从地下部向地上部转运的快慢及运输能力<sup>[13]</sup>。

#### 1.3.2 时间动力学模型及参数拟合

本研究采用Epstein等<sup>[14]</sup>发现的Michaelis-Menten动力学方程来描述植物器官对镉离子的吸收过程,公式如下:

$$I = I_{\max} \times T / (K_m + T);$$

$$\alpha = I_{\max} / K_m。$$

式中,I为植物器官吸收离子的累积量( $\mu\text{g}$ ), $I_{\max}$ 为植物器官吸收离子的最大累积量( $\mu\text{g}$ ),反应了器官对离子吸收的内在潜力,其值越大,则对离子吸收的潜力越大;T为试验镉胁迫时间; $K_m$ 为米氏常数(h),即离子吸收累积量达到最大累积量1/2时的试验时间,表示对离子的亲和力, $K_m$ 值越小,则说明植株器官对离子的亲和力越大; $\alpha$ 为植株器官对离子的实际吸收能力, $\alpha$ 值越大,表示植株器官对镉的吸收能力则越强<sup>[9]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

利用Excel 2011和SPSS 17.0软件对数据进行处理和统计分析,采用Excel 2011和Sigmaplot 12制作图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水稻品种分蘖期根系及地上部分镉积累量时间差异

由图1可知,苗期不同镉积累型水稻品种的根系和地上部分镉吸收时间(72 h内)动力学过程均符合米氏方程。4个品种苗期的根系镉积累量在72 h内的变化趋势均表现为一条饱和曲线( $R^2$ 为0.82~0.96,图1-a),品种A1和B2表现为镉胁迫开始8 h内迅速上升,8~36 h内镉累积速率变缓,36 h后镉积累量趋于饱和。高镉积累品种A2的根系镉积累量在72 h内小于A1和B1,并未达到饱和状态,呈现出快速增加趋势。低镉积累品种B1在8 h后镉积累量即趋于饱和状态。镉胁迫72 h之后低镉积累品种B1镉积累量显著低于品种A1、A2和B2,分别低89.0%、82.7%和82.6%。4个品种

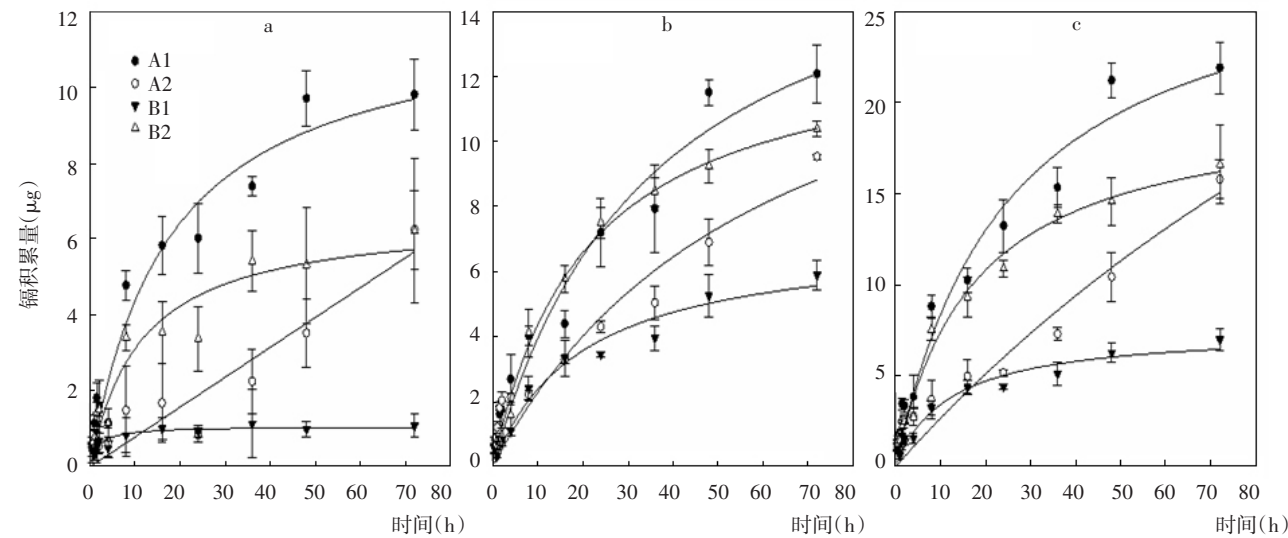


图 1 不同品种水稻苗期根系及地上部分镉吸收积累量差异比较

表 1 不同品种水稻苗期对镉的时间动力学参数

部位	品种	时间动力学参数			
		$K_m$ (h)	$I_{max}$ (μg)	$R^2$	$\alpha$ (μg/h)
根系	A1	17.48	12.04	0.96	0.69
	A2	6.53	5.15	0.88	0.80
	B1	1.80	1.06	0.82	0.59
	B2	1.12	0.74	0.92	0.66
地上部分	A1	24.89	18.10	0.96	0.73
	A2	61.85	16.41	0.88	0.27
	B1	19.73	3.19	0.97	0.16
	B2	20.65	13.38	0.99	0.65
整体	A1	25.03	29.53	0.97	1.18
	A2	68.89	60.80	0.89	0.88
	B1	12.04	7.53	0.96	0.63
	B2	17.19	20.06	0.99	1.17

苗期地上部镉积累量在 72 h 内的变化趋势也表现为一条饱和曲线( $R^2$  为 0.88~0.99,图 1-b),即镉胁迫 16 h 内各品种镉积累量呈现出快速增加趋势,16~36 h 呈缓慢增加趋势,之后趋于平稳,其中高镉积累品种 A2 在 10 h 内的地上部镉积累量小于低镉积累品种 B2。水稻根茎叶整体镉积累量随着镉胁迫时间的变化趋势与根系相似(图 1-c),镉胁迫 72 h 之后各品种镉积累量表现为 A1> B2> A2> B1,差异显著( $P<0.05$ )。

2.2 不同水稻品种分蘖期根系及地上部分镉吸收时间动力学参数特征

用 Michaelis-Menten 动力学模型进行拟合得到的根系、地上部分及整体植株镉吸收时间动力学参数见表 1。根系镉吸收动力学参数中  $I_{max}$  和  $K_m$  值都表现为 A1>A2> B1>B2,说明高镉积累品种的根系镉吸收潜力和镉离子亲和力都大于低镉积累品种,其中高镉

积累品种中玉针香大于天优华占,低镉积累品种湘晚粳 12 号大于金优 59。综合分析  $I_{max}$  和  $K_m$  值,各品种的  $\alpha$  值表现为 A2>A1> B2 >B1,说明在分蘖期,低镉积累品种湘晚粳 12 号对镉的实际吸收能力较低,而高镉积累品种天优华占在苗期后镉吸收潜力较大。水稻苗期镉胁迫的 72 h 内,地上部分镉吸收动力学参数中  $I_{max}$  大小表现为 A1>A2> B2>B1, $K_m$  大小则表现为 A2>A1>B2>B1, $\alpha$  值表现为 A1 >B2> A2> B1,表明高镉积累品种玉针香将镉从根系转运到地上部的能力要强于低镉积累品种湘晚粳 12 号和金优 59,而高镉积累品种天优华占在分蘖初期镉的转运能力较低。整体而言,不同镉积累型水稻品种  $\alpha$  值表现出与地上部分相似的规律,即 A1 >B2> A2> B1,低镉积累品种湘晚粳 12 号的镉吸收效率最低,有利于实际种植推广。

2.3 不同水稻品种苗期不同时段镉转运速率差异

镉转运速率是单位时间内地上部镉积累量与根系干质量的比值,可以用来反映镉从地下部向地上部转运的快慢及运输能力。表 2 显示了不同水稻品种苗前期根系不同时间段向地上部分的转运速率。从表 2 可以看出,苗期不同时间段 Cd 胁迫处理下,品种 A1、A2、B1 和 B2 的转运速率分别介于 0.24~2.51、0.27~3.30、0.17~2.94 和 0.22~1.73 mg/(kg·h)之间,整体而言,低镉积累品种镉转运速率显著低于高镉积累品种,即低镉积累品种根部吸收的 Cd 向地上部转运的能力较低,不利于镉的吸收和转化。同一水稻品种,镉转运速率随着胁迫时间延长呈显著下降趋势,下降速率由低到高依次表现为 B2<A1<A2<B1。镉胁迫 72 h 后,各品种转运速率达到最低,数值介于 0.17~0.27 mg/(kg·h)之间,B1



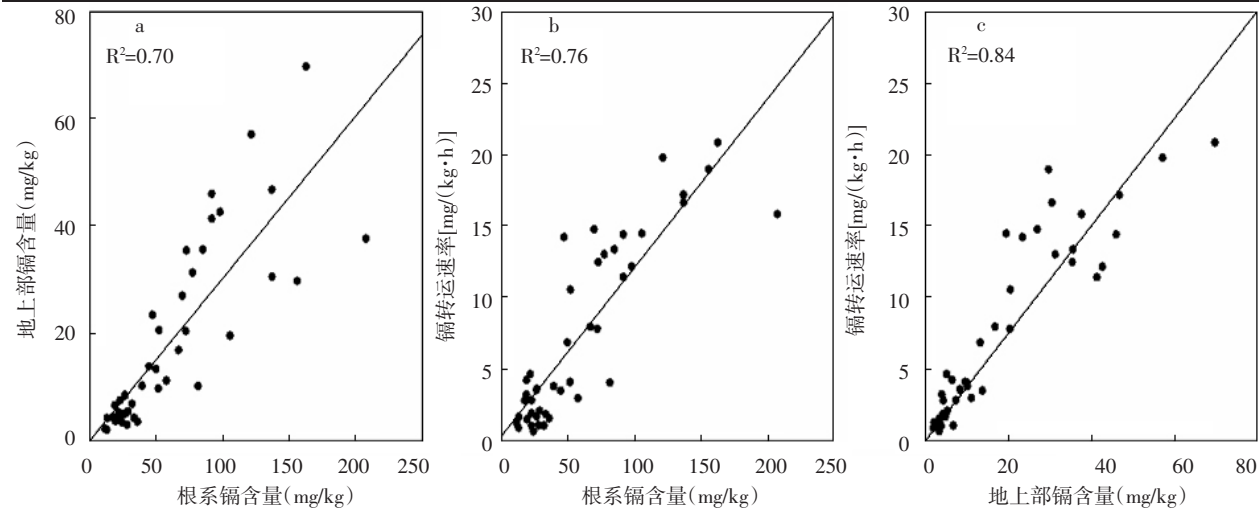


图2 地上部镉含量、根部镉含量以及镉转运速率的相关性

表2 不同水稻品种苗期不同时间段对镉的转运速率影响

时间 (h)	镉转运速率			
	A1	A2	B1	B2
0.5	2.51 ab	3.30 a	2.94 ab	1.73 b
1	1.01 c	2.79 a	1.67 b	1.05 c
1.5	1.21 b	2.14 a	1.87 a	0.42 c
2	1.03 b	2.11 a	0.51 c	0.77 bc
4	0.89 a	1.16 a	0.88 a	0.47 b
8	0.37 b	0.47 ab	0.43 ab	0.51 a
16	0.25 b	0.43 a	0.49 a	0.50 a
24	0.44 c	0.59 b	0.79 a	0.61 b
36	0.32 b	0.40 a	0.40 a	0.36 ab
48	0.25 c	0.35 b	0.43 a	0.28 c
72	0.24 b	0.27 a	0.17 c	0.22 b

同行数据后不同小写字母表示相同时间段不同水稻品种间在 0.05 水平差异显著。

品种镉转运速率显著低于 A1、A2 和 B2,分别低 29%、37%和 23%,差异显著(P<0.05)。

2.4 水稻苗期镉含量与镉转运速率的相关性分析

图2显示了根系镉含量、地上部镉含量及根部向地上部的转运速率三者之间的相互关系。通过关联分析发现,不同水稻品种根系镉含量、地上部镉含量及根部向地上部的转运速率三者之间均呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.70、0.76、0.84(图2)。其中,地上部分镉含量与镉转运速率的相关系数大于根系镉含量与镉转运速率的相关系数,说明吸收和转运速率一般是成正比的,因此筛选低吸收、低转运的品种具有可行性。

3 讨论与结论

同种植物不同品种对同一金属元素的吸收特性是

不同的,其时间动力学参数也不尽相同。因此,时间动力学实验常用来研究同种植物不同基因型(生态型)对镉的吸收特征,以期揭示此类植物根系对镉的吸收机理<sup>[14]</sup>。本研究分析了不同镉积累型水稻品种在苗期镉吸收及转运时间动力学特征。研究指出,对于高镉积累品种而言,玉针香苗期根系的镉积累量在镉胁迫的早期(胁迫开始后 4 h 和 36 h 内)便已大于 2 个低镉积累品种,且 36 h 后的差异不断增大。而天优华占的根及地上部分镉积累量却在胁迫后的 72 h 左右才开始接近低镉积累品种金优 59,但未达到饱和状态,72 h 后的差异不断增大。因此,高镉积累品种可能表现为积累速率快,如玉针香,也有可能表现为积累时间长,如天优华占,低镉积累品种也可分为积累速率慢型和积累时间短型两类,归纳起来即可分为速率型(镉积累速率对镉积累总量起主导作用)、时间型(镉积累时间对镉积累总量起主导作用)和兼顾型三种。

镉从根部向茎部的运输以及在地上部的积累是个比较复杂的过程,本研究发现,高低镉积累品种苗期 72 h 内的根和地上部的镉积累曲线均表现为一条饱和和曲线,即开始是快速过程,后期过程稍慢,呈曲线特征变化<sup>[15]</sup>。原因可能在于开始阶段重金属与根细胞壁结合,可被其他离子交换,同时大量的反应载体蛋白也有利于重金属转运能力的提高<sup>[16]</sup>。也有部分学者指出,水稻镉积累过程可能呈现出“不同生长阶段非等阶梯度式增加”模式,即从苗期到成熟期水稻植株或器官中的镉积累量总体表现为不断增加的趋势,但是并非匀速增加,而是呈非等阶梯度式增加,其全生育期即各个生长阶段都可以看成是由很多个大小不同的饱和和曲线叠加而成,每个阶梯(饱和和曲线)都包括一个上升期和平

稳期,且每个上升期的长短、上升幅度以及平稳期的长短各不相同。

本研究只对不同镉积累型水稻品种苗期的镉吸收积累及转运时间动力学特征进行了探讨,在今后的研究中需要进一步探讨水稻完整生育期内镉吸收时间动力学特征。不同基因型品种镉转运速率也存在显著差异。本研究表明,苗期镉胁迫 72 h 后,Cd 低积累品种湘晚粳 12 号根部向地上部分转运速率较高积累品种玉针香低,这可能与不同水稻品种根系对镉的亲合力以及镉吸收转运相关酶的特性等有关。湘晚粳 12 号根系对镉的滞留作用较强,吸收的 Cd 大部分保留在根系中,未向地上部转运,而镉高积累品种玉针香与之相反,这可能是造成玉针香和湘晚粳 12 号镉积累差异的主要原因之一。

### 参考文献

- [1] 黄界颖,胡宏祥,伍震威,等. 水稻、油菜秸秆对水中镉的吸附特性[J]. 安全与环境学报,2015,15(4):244-249.
- [2] 朱智伟,陈铭学,牟仁祥,等. 水稻镉代谢与控制研究进展[J]. 中国农业科学,2014,47(18):3 633-3 640.
- [3] 赵学强,介晓磊,李有田,等. 不同基因型小麦钾离子吸收动力学分析[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(3):307-312.
- [4] Epstein E, Hagen C E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots[J]. *Plant Physiol*, 1952, 27(3): 457-474.
- [5] 王龙,高子平,李文华,等. 水稻幼苗镉吸收动力学特性的遗传多样性分析[J]. 植物生理学报,2016,52(1):125-133.
- [6] Sterckeman T, Redjala T, Morel J L. Influence of exposure solution composition and of plant cadmium content on root cadmium short-term uptake[J]. *Environ Exp Bot*, 2011, 74(3): 131-139.
- [7] 王林. 蔬菜对镉铅的吸收累积特征与生理响应研究[D]. 泰安:山东农业大学,2005.
- [8] Chen W P, Chang A C, Wu L S, et al. Modeling uptake kinetics of cadmium by field-grown lettuce [J]. *Environ Pollut*, 2008, 152(1): 147-152.
- [9] 刘双营,李彦娥,赵秀兰. 不同品种烟草镉吸收的动力学研究[J]. 中国农学通报,2010,26(5):257-261.
- [10] 何俊瑜. 水稻突变体对镉敏感的生理生化及籽粒中镉积累的基因型差异[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [11] 王学华,戴力. 作物根系镉滞留作用及其生理生化机制[J]. 中国农业科学,2016,49(22):4 323-4 341.
- [12] 刘凤枝,刘潇威. 土壤和固体废弃物监测分析技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007:242-283.
- [13] 郑陶,李廷轩,张锡洲,等. 水稻镉高积累品种对镉的富集特性[J]. 中国农业科学,2013,46(7):1 492-1 500.
- [14] 卢玲丽. 超积累植物东南景天(*Sedum Alfredii* Hance)对镉的吸收及转运机制研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.
- [15] Lombi E, Zhao F J, McGrath S P, et al. Physiological evidence for a high affinity cadmium transporter in a *Thlaspi caerulescens* ecotype [J]. *New Phytol*, 2008, 149(1): 53-60.
- [16] Hart J J, Norvell W A, Welch R M, et al. Characterization of Zinc uptake, binding, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars[J]. *Plant Physiol*, 1998, 118(1): 219.

## Cadmium Accumulation and Transfer Capacity among Different Types of Rice Cultivars at Seedling Stage

DENG Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuzhu<sup>3\*</sup>, FANG Baohua<sup>2\*</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; <sup>2</sup> Hunan Rice Research Institute, Changsha 410128, China; <sup>3</sup> China National Hybrid Rice R&D Center, Changsha 410128, China; \*Corresponding author: yuzhuzhang@hotmail.com; aohjun@126.com)

**Abstract:** Cadmium pollution incidence in rice had become a widespread concern of the state and society. In order to understand the soil Cd<sup>2+</sup> adsorption characteristics in the different types cultivars, a water culture experiment was established with the high Cd accumulation cultivars (HCAs) Yuzhenxiang (A1) and Tianyouhuazhan (A2) and the low Cd accumulation cultivars (LCAs) Xiangwanxi-an 12 (B1) and Jinyou59 (B2) as materials, to examine the Cd absorption and transfer time kinetic characteristics at seedling stage. The results showed that the root and shoot Cd accumulation time kinetic characteristics of the 4 cultivar were all described with Michaelis-Menten equation,  $\alpha$  value of their root and shoot all showed like HCAs > LCAs. After 72 h of Cd stress, the total Cd accumulation in all cultivars followed the order of A1 > B2 > A2 > B1, in which the cumulative amount of A2 did not reach the saturation level at seedling stage. The Cd translocation efficiency showed a significant downward trend with prolonging of stress time, and HCAs were higher than those of LCAs. The correlation analysis showed that there was a significant positive correlation among Cd concentration in shoots and roots and Cd translocation efficiency of root to shoot in different rice varieties. It can be seen that the characteristics of high and low cadmium accumulation in rice have a certain time limit, and the low cadmium and low transport types represented by low cadmium varieties, such as Xiangwanxian 12, have high practical value in the cadmium polluted paddy fields planting.

**Key words:** rice; Cd; seedling stage; time kinetic