植物营养与肥料学报 2015,21(1): 190 - 199
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2015.0121

硒对镉胁迫下寒地水稻镉含量与分配的影响

刘春梅[1,2], 罗盛国[1], 刘元英[1*]
(1 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江哈尔滨 150030; 2 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江大庆 163319)

摘要:【目的】研究施硒对不同镉污染土壤上镉在水稻各器官中的分配及稻米中镉含量的影响,探讨通过施硒降低水稻镉吸收量及在稻米中分配的可行性。**【方法】**采用盆栽试验,以垦鉴稻 6 号为材料,研究添加不同浓度镉(0、2、4 和 8 mg/kg 土壤)的条件下,施硒(0、0.07 和 0.14 mg/kg 土壤)对水稻不同器官镉含量和镉分配的影响。成熟期整盆收获,分别测定叶片、叶鞘、茎秆、根系和糙米、精米镉含量、硒含量和干物重,计算镉积累量和分配比例。**【结果】**1)当土壤镉浓度在 0 ~ 4 mg/kg 时,水稻各营养器官和糙米、精米中镉含量随土壤镉浓度增高而显著增加,但当土壤中镉浓度 > 4 mg/kg 时,糙米和精米中镉含量增加不显著。未施硒(Se0)时, Cd2(4 mg/kg)和 Cd3(8 mg/kg)处理糙米中镉含量分别为 0.221 mg/kg 和 0.234 mg/kg,分别是 Cd0 处理的 15.8 和 16.7 倍,均超过我国国家食品安全标准中稻米镉的限量(0.2 mg/kg),精米镉含量未超过国家食品安全规定的限量,Cd3 处理精米中镉含量最高,为 0.174 mg/kg。2)相同镉浓度下,随着硒浓度的增加,水稻各营养器官和糙米、精米的镉含量和镉积累量均显著下降,糙米和精米的镉含量均低于我国国家食品安全规定的稻米镉限量,且 Se2(0.14 mg/kg)处理优于 Se1(0.07 mg/kg)处理。其中 Cd1(2 mg/kg)浓度时,Se2 处理的精米镉含量下降幅度最大,比 Se0 降低 31.5%($P < 0.01$)。3)镉在各器官中的分配比例为根系 > 茎鞘 > 稻谷 > 叶片。随着硒浓度的增加,镉在根系中的分配比例增加,在地上部的分配比例减少,在稻壳中的分配比例增加,在精米中的分配比例下降。在 Cd1 浓度时,根系镉分配比例范围为 60.9% ~ 67.8%,稻谷镉分配比例为 12.6% ~ 13.8%;Se2 处理稻壳中镉分配比例比 Se0 增加 5.2 个百分点,而精米中镉分配比例则下降了 6.2 个百分点。4)相同镉浓度下,随着硒浓度的增加,植株各营养器官干物重均增加,Se2 处理对干物重的影响优于 Se1 处理。Cd1、Cd2 和 Cd3 浓度下,Se2 处理比 Se0 处理稻谷干物重分别增加了 6.4%($P < 0.01$)、5.2%($P < 0.05$)和 11.3%($P < 0.01$)。**【结论】**施硒可降低镉污染土壤上水稻各营养器官和糙米、精米的镉含量,并能显著降低精米中镉的分配比例,保证稻米的食用安全性,尤其在 Cd 加入量为 2 mg/kg 土浓度下,施硒效果最显著,以施 Se 量为 0.07 mg/kg 处理的效果最好。

关键词: 硒; 镉胁迫; 寒地水稻; 镉含量; 镉分配
中图分类号: S511.062; Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)01-0190-10

Effects of Se on Cd content and distribution in rice plant under Cd stress in cold climate

LIU Chun-mei[1,2], LUO Sheng-guo[1], LIU Yuan-ying[1*]
(*1College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China*;
2 College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract:【Objectives】 Effects of Se application on Cd accumulation and distribution in rice organs and content of Cd in rice grain were studied to explore countermeasures for rice planting in Cd polluted soils. **【Methods】** A pot experiment was conducted using rice cultivar Kenjiandao 6 as experimental material. Four levels of Cd additions (0, 2, 4 and 8 mg/kg soil) and 3 Se levels (0, 0.07 and 0.14 mg/kg soil) for each Cd addition were designed. The rice plants were harvested at the maturity stage, the Cd contents in leaves, stems, sheaths, roots, brown rice and polished rice were determined, Cd accumulation amounts and distribution ratios in rice organs were calculated,

收稿日期: 2013-12-25 **接受日期:** 2014-09-15
基金项目: "十二五"国家科技支撑计划项目(2013BAB20B04)资助。
作者简介: 刘春梅(1974—), 女, 黑龙江嫩江人, 博士研究生, 讲师。主要从事水稻营养调控方面研究。
Tel: 0459-6819183, E-mail: soilfertilizer@163.com。 * 通信作者 Tel: 0451-55190439, E-mail: yuanyingL@163.com

and the Se contents in brown rice and polished rice, and dry matter weight were determined as well. 【**Results**】1) When the added Cd concentration in soil is increased from 0 to 4 mg/kg, the Cd contents in different organs of rice, brown rice and polished rice are increased significantly. When added Cd concentration is higher than 4 mg/kg, the increases of the Cd contents in brown rice and polished rice are not significant. The Cd contents in brown rice are 0.221 mg/kg and 0.234 mg/kg under the Cd2 (4 mg/kg) and Cd3 (8 mg/kg) treatments without Se application which are 15.8 and 16.7 times higher than that of Cd0, higher than the national food safety standards of China for Cd content (0.2 mg/kg). The Cd content in polished rice is 0.174 mg/kg, which conforms to the national food safety standards of China. 2) The Cd contents and Cd accumulation amounts in different organs of rice and brown rice, polished rice are decreased significantly with the increase of Se concentration under the same Cd concentration, and larger declines of the Cd content are observed under the Se2 (0.14 mg/kg) treatment. Under Cd1 (2 mg/kg), the Cd content in polished rice in the Se2 treatment is reduced by 31.5% ($P < 0.01$) compared to Se0.3) Sequence of the Cd distribution in rice organs is roots > stems and sheaths > grains > leaves. The Cd distribution portion in roots is enhanced with the increase of Se concentration as Cd distribution in other organs is declined at the same time. The Cd distribution portion in rice husk is increased with the increase of Se concentration, meanwhile, the Cd distribution portion in polished rice is decreased. Under Cd1, the Cd distribution portions in roots and grains are in the range of 60.9% –67.8% and 12.6–13.8%, the Cd distribution portion in rice husk with Se2 is 5.2 percentage points higher than that of Se0, while the Cd distribution portion in polished rice with same treatment is lower than Se0 by 6.2 percentage points. 4) The dry matter weights of different organs are increased significantly with the increase of Se concentration under same Cd concentration. Under the concentrations of Cd1, Cd2 and Cd3, the dry matter weights of grain with the Se2 treatment are increased by 6.5% ($P < 0.01$), 5.2% ($P < 0.05$) and 11.3% ($P < 0.01$), respectively compared to Se0. 【**Conclusions**】Se application could reduce Cd concentration in rice plants, brown rice and polished rice, and reduce Cd transportation into polished rice. Se application shows the most significant effects when the added soil Cd concentration is 2 mg/kg, and the 0.07 mg/kg of Se application treatment exhibits the best effects.

Key words: Se; Cd stress; rice in cold climate; Cd content; Cd distribution

我国农田土壤镉污染的主要原因是污灌,城镇垃圾、污泥、农药、石灰和磷肥中也都含有一定量的镉,农业生产中施用这些物料也会使土壤中的镉含量提高[1]。史文娇等[2]研究了黑龙江北部土壤中主要重金属和微量元素状况,结果显示,嫩江、五大连池、克山的镉含量比 1980 年测定的黑龙江省土壤全镉背景值 0.042 mg/kg 高出近一倍,均在轻度污染(0.08 ～0.16 mg/kg)的范围内。郭观林[3]对中国东北北部 22 个县市的黑土样品进行了测定,结果表明,土壤样品的镉污染最为明显,多集中在中度和重度水平。水稻对镉吸收和累积作用强,糙米镉含量可达其生长环境中镉浓度的数倍至数十倍[4]。据研究,稻米是亚洲人口体内镉摄入的源之一,经稻米摄入的镉量占总镉摄入量的比例,菲律宾马尼拉地区约占 20%[5],中国大陆大部分地区[6]、中国台湾[7]、孟加拉国和泰国等约占 30% ～40%[8]。因此,如何减少镉进入水稻植株体内,是保证稻米卫生安全急需解决的问题。

虽然硒不是植物生长必需的营养元素,但近年来许多研究结果表明,植物体内硒与镉表现为拮抗作用。Cary[9]报道,小麦和莴苣施硒后,能降低其对镉的吸收。Shanker 等[10]发现,随着外源硒浓度的升高,菜豆对镉的吸收明显下降。谭周磁等[11]的研究表明,施用低浓度的亚硒酸钠能降低稻米中镉、铅和铬的含量。目前硒与镉胁迫关系的报道缺乏硒对镉污染下寒地水稻各器官和籽粒各部位镉含量和分布影响的研究。本文通过研究硒对镉胁迫寒地水稻成熟期植株和籽粒中镉含量和分布等方面的影响,揭示外源硒对寒地水稻体内镉分布及稻米中镉积累的作用,探讨寒地无公害稻米生产的技术措施,为该地区无公害稻米的生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为垦鉴稻 6 号。试验地土壤基本理化性状为：有机质含量 47.99 g/kg，全氮 2.33 g/kg，碱解氮 151.2 mg/kg，全磷 1.48 g/kg，速效磷 18.4 mg/kg，速效钾 240 mg/kg，pH 7.71；全镉含量 0.042 mg/kg，全硒 0.03 mg/kg。氮肥为尿素，磷肥用磷酸二铵，钾肥为硫酸钾，用分析纯亚硒酸钠、分析纯氯化镉处理土壤。

1.2 试验设计

试验于 2011 年 5 月～10 月在黑龙江八一农垦大学盆栽试验场进行，采用盆栽方法，每盆栽水稻 3 穴，每穴 3 株。设 4 个土壤镉浓度，分别为 0、2、4、8 mg/kg，用 Cd0、Cd1、Cd2、Cd3 表示。每个镉浓度下设为 0、0.07、0.14 mg/kg 3 个土壤硒水平，用 Se0、Se1、Se2 表示。共 12 个处理，每处理 4 次重复。试验用塑料桶直径 30 cm，高 50 cm，装土 15 kg。施肥量为 N 100 kg/hm^2，P_2O_5 50 kg/hm^2，K_2O 60 kg/hm^2。氮肥按基肥∶返青肥∶分蘖肥∶穗肥 =4∶2.5∶1.5∶2 施用，磷肥作基肥一次性施入，钾肥按基肥∶分蘖肥∶穗肥 = 4∶2∶4 施用。移栽前，先用水泡土 3d，然后将肥料施入土中混匀，同时将亚硒酸钠和氯化镉配成溶液均匀施入。

1.3 测定项目与方法

样品制备　成熟期，将整盆植株收获，分别用自来水和蒸馏水清洗，将根、茎（包括稻穗枝梗部分）、叶、鞘、籽粒分开，105℃下杀青 30 min，80℃下烘干至恒重，称重。砻谷机除去稻壳，将稻壳收集起来；然后用精米机将糙米处理为精米，将精米和糠皮分别收集并粉碎备用。

镉含量的测定　称取样品 1 g 左右（精确至 0.0001 g），置于 25 mL 三角瓶中，加入 10 mL 体积比 4 ∶1 的优级纯 HNO_3-HClO_4 混合酸，冷消化过夜。第 2 天，将三角瓶置于砂浴上，在 165 ～175℃下消化，直至溶液变为无色透明，稍冷却后，分别加两次约 1 mL 的蒸馏水排酸，蒸发浓缩消化液至 2 mL 左右，用 5% 的 HCl 转移并定容至 10 mL 比色管中，用 AA7003 原子吸收光谱仪测定镉含量[12]。

硒含量的测定　称取样品 0.5 g 左右（精确至 0.0001 g）于 25 mL 的三角瓶，加入 10 mL 体积比为 4 ∶1 的优级纯 HNO_3-HClO_4 混合酸，盖上弯颈漏斗，静置过夜后在电热板低温砂浴消化 1 h，然后再逐步升温，微沸条件下消化至无色并冒白烟，取下，稍冷后加入 5 mL HCl（1 ∶1），继续加热至无色并冒白烟，取下，稍冷却后分别加两次约 1 mL 蒸馏水，然后用 5% 的 HCl 转入 10 mL 试管中，定容至 10 mL，用 AFS-930 双道原子荧光光度计测定[12]。

土壤基础养分含量的测定采用常规测定方法[13]。

1.4 数据处理

试验数据用 Microsoft Excel 2003 进行处理，DPS 7.05 版软件进行统计分析。

2 结果分析

2.1 硒对镉胁迫下水稻营养器官镉含量的影响

从图 1 可以看出，各器官中镉含量的大小顺序为根系 > 茎秆 > 叶片 > 叶鞘。相同硒浓度下，随着土壤中镉浓度的增加，各营养器官中镉含量也随之增加。Se0 处理时，不同镉处理间各营养器官的镉含量差异极显著，其中 Cd3 浓度下各营养器官的镉含量最高，根系、茎秆、叶片、叶鞘中镉含量高达 3.71、2.55、1.17 和 0.491 mg/kg，分别是 Cd0 的 32、27、14 和 20 倍。

硒对镉胁迫下水稻镉含量的变异性分析（表 1）表明，土壤镉浓度对水稻各营养器官镉含量的影响极显著；土壤硒浓度对茎秆和叶鞘、根系镉含量的影响显著，对叶片镉含量的影响不显著；土壤镉浓度与土壤硒浓度的交互作用对各营养器官镉含量的影响极显著。

相同镉浓度下，各营养器官的镉含量随着硒浓度的增加而减少。根系的镉含量最高，在 Cd1、Cd2 和 Cd3 浓度下，硒处理间的差异达到极显著水平，Se2 处理的根系镉含量分别比 Se0 降低了 19.3%、30.8% 及 30.1%。茎秆中镉含量随土壤镉浓度升高而大幅增加，在 Cd1 浓度下，Se0 处理茎秆中镉含量为 1.42 mg/kg，分别是 Se1 和 Se2 处理的 1.2 倍和 1.5 倍；Cd2 浓度下，Se0 处理茎秆中镉含量为 2.47 mg/kg，分别是 Se1 和 Se2 处理的 1.3 倍和 1.5 倍。Cd3 浓度与 Cd2 浓度相比，茎秆中镉含量增加不明显。叶片和叶鞘的镉含量相对较低，在 Cd3 浓度下，Se1 和 Se2 处理的叶片镉含量分别比 Se0 降低了 19.6% 和 24.7%（$P<0.01$），叶鞘中镉含量分别比 Se0 降低了 21.8% 和 28.7%（$P<0.01$）。

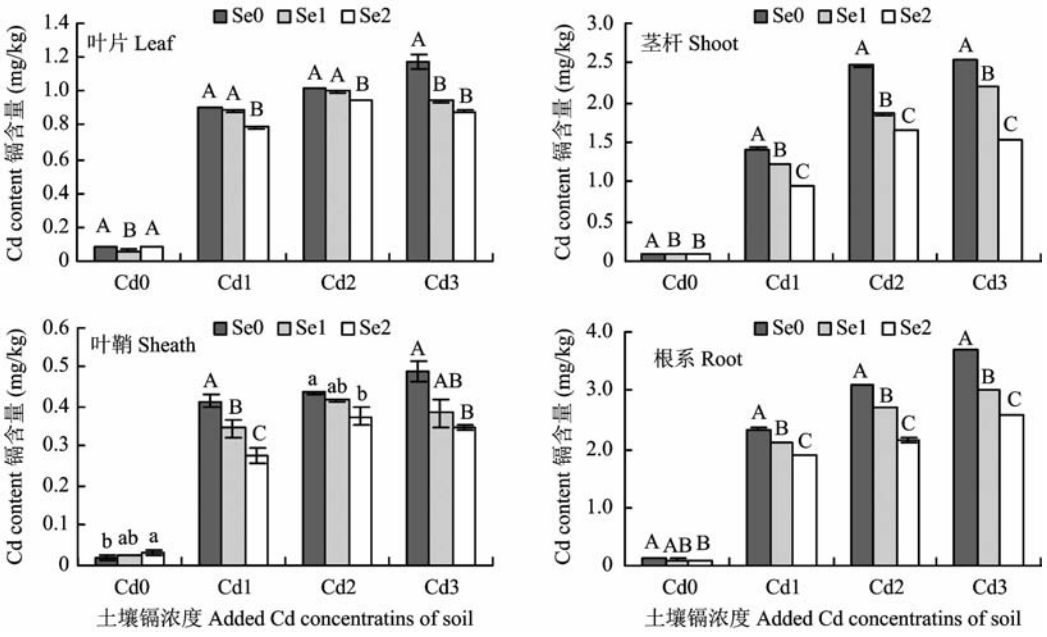

图 1　硒对镉胁迫下水稻不同营养器官镉含量的影响

Fig. 1　Effects of Se on the Cd contents in different organs of rice plants under Cd stress

[注(Note)：柱上不同小、大写字母分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平
Different small and capital letters above the bars mean significant at 5% and 1% levels, respectively.]

表 1　硒对镉胁迫下水稻镉含量的变异性分析

Table 1　Variation analysis of the Cd contents of rice as affected by Se under Cd stress

变异来源 Source of variation	叶片 Leaf	叶鞘 Sheath	茎秆 Stem	根系 Root	精米 Polished rice	糙米 Brown rice
Cd	123.16**	46.29**	66.23**	53.96**	227.91**	136.72**
Se	3.11	6.03*	4.29*	4.63*	9.89*	8.07*
Cd × Se	4.56*	23.63**	9.43*	24.81**	8.29**	3.86**

注(Note)：*，** 分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平 Mean significant at 5% and 1% levels, respectively.

2.2　硒对镉胁迫下糙米和精米镉含量的影响

图 2 显示,相同硒浓度时,随着土壤镉浓度的增加,糙米和精米的镉含量增加,其中土壤镉浓度在 0～4 mg/kg 时,糙米和精米镉含量增加幅度较大,土壤镉处理浓度在 4～8 mg/kg 时,糙米和精米镉含量仍增加,但增加幅度变小。未施硒(Se0)时, Cd2 和 Cd3 处理糙米中镉含量分别为 0.221 和 0.234 mg/kg,均超过我国国家食品安全标准(GB2762－2012)中大米镉限量的 0.2 mg/kg,分别是 Cd0 处理的 15.8 和 16.7 倍;精米镉含量均未超过国家食品安全规定的限量,Cd3 处理下精米镉含量最高,为 0.174 mg/kg。

相同镉浓度时,随着硒浓度的增加,糙米和精米的镉含量均明显下降,并且镉含量均低于我国国家食品安全规定的大米镉限量。Cd2 和 Cd3 浓度下,Se2(0.14 mg/kg)处理的糙米镉含量分别比 Se0 下降了 27.8%($P < 0.01$)和 22.7%($P < 0.01$)。在 Cd1、Cd2 和 Cd3 浓度,硒处理间精米镉含量差异均达到 5% 显著水平,Se2 处理的精米镉含量分别比 Se0 下降了 31.5%、22.3% 和 16.1%。

硒对镉胁迫下糙米和精米镉含量的变异性分析结果见表 1。从表中也可以看出,土壤镉浓度对糙米和精米镉含量的影响极显著,土壤硒浓度对糙米和精米镉含量的影响显著,土壤镉浓度与土壤硒浓度的交互作用对糙米和精米镉含量也有极显著的影响。

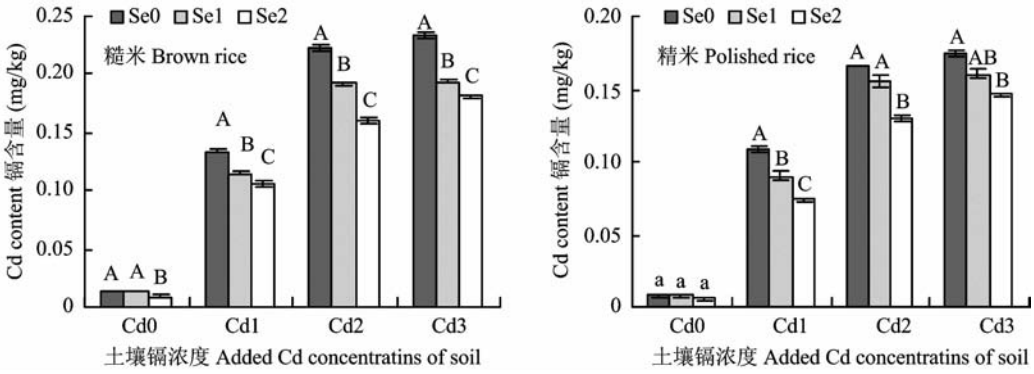

图 2 硒对镉胁迫下糙米和精米镉含量的影响

Fig. 2 Effects of Se on the Cd contents of brown rice and polished rice under Cd stress

[注(Note):柱上不同小、大写字母分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平
Different small and capital letters above the bars mean significant at 5% and 1% levels, respectively.]

2.3 施硒对镉胁迫下糙米和精米硒含量的影响

从图 3 可以看出,相同镉浓度下,随着硒浓度的增加,糙米和精米的硒含量均增加,不同硒处理间的差异显著。施硒后糙米硒含量范围在 0.119 ~ 0.296 mg/kg,精米硒含量为 0.09 ~ 0.186 mg/kg,符合黑龙江省富硒大米的硒含量标准(0.1 ~ 0.3 mg/kg)。在 Cd1 浓度下,Se2 处理糙米硒的含量最高,是 Se0 处理的 5 倍;Cd2 浓度时,Se2 处理糙米硒含量最高,是 Se0 处理的 3 倍。

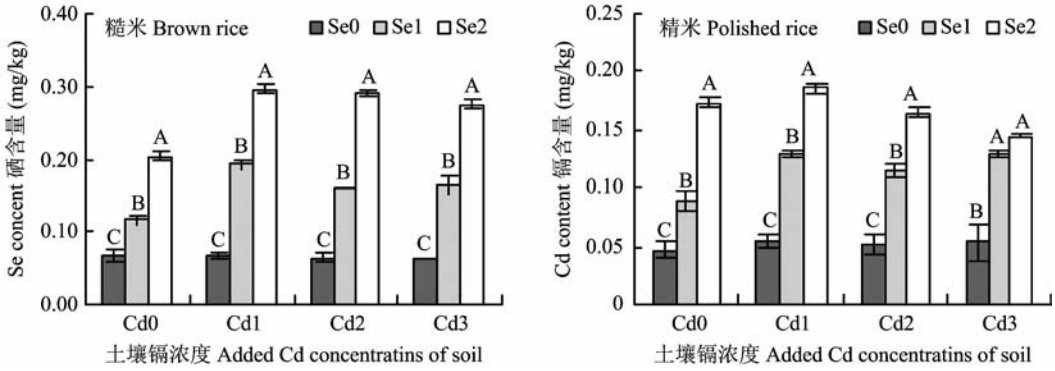

图 3 施硒对镉胁迫下糙米和精米硒含量的影响

Fig. 3 Effects of Se application on the Se contents of brown rice and polished rice under Cd stress

[注(Note):柱上不同大写字母表示处理间差异达 1% 显著水平 Different capital letters above the bars mean significant at the 1% levels]

2.4 硒对镉胁迫下水稻镉积累与分配的影响

2.4.1 植株各器官镉积累与分配 由表 2 可知,土壤镉浓度对植株各器官镉积累量的影响极显著;土壤硒浓度对茎鞘、稻谷、根系镉积累量影响显著,对叶片镉积累量的影响不显著;土壤镉浓度与土壤硒浓度的交互作用对茎鞘、稻谷镉积累量均有极显著影响,对叶片和根系镉积累有显著影响。植株各器官镉积累量的大小为根系 > 茎鞘 > 稻谷 > 叶片。相同硒浓度时,随着镉浓度的增加,水稻各器官镉积累量均显著增加。相同镉浓度时,随着硒浓度的增加,水稻地上部分各器官镉积累量均下降;但不同镉浓度时,水稻各器官镉积累量变化不同。叶片镉积累只在 Cd1 浓度时,Se 处理间差异极显著,其他 Cd 浓度时,差异不显著。随着硒浓度的增加,Cd3 浓度下,茎鞘镉积累量下降幅度最大,Se2 比 Se0 处理下降了 33.77% ($P < 0.01$);在 Cd2 浓度时,稻谷镉积累量下降幅度最大,Se2 比 Se0 处理下降了 18.93% ($P < 0.01$)。随着硒浓度的增加,在 Cd1 浓度下,根系镉积累量增加,而 Cd2 和 Cd3 浓度时,根系镉积累量反而下降。

不同镉浓度下,水稻各器官镉的分配比例随着硒浓度的增加变化也不相同。根系中镉的分配比例

表 2　不同处理水稻植株各器官镉积累和分配

Table 2　Cd accumulation and distribution in different organs of rice plants in different treatments

处理 Treatment		叶片 Leaf		茎鞘 Stem and sheath		稻谷 Grain		根系 Root		总积累量 Total Cd accumulation (mg/pot)
		积累量 Accumulation (mg/pot)	分配比例 Distribution (%)	积累量 Accumulation (mg/pot)	分配比例 Distribution (%)	积累量 Accumulation (mg/pot)	分配比例 Distribution (%)	积累量 Accumulation (mg/pot)	分配比例 Distribution (%)	
Cd0	Se0	0.36 ± 0.02 AB	8.5	0.85 ± 0.02 AB	20.2	0.72 ± 0.08 a	17.0	2.30 ± 0.10 a	54.3	4.23 ± 0.24 a
	Se1	0.28 ± 0.02 B	6.3	0.80 ± 0.01 B	18.0	0.74 ± 0.07 a	16.7	2.62 ± 0.23 a	59.0	4.45 ± 0.33 a
	Se2	0.42 ± 0.02 A	8.7	0.93 ± 0.03 A	19.4	0.66 ± 0.04 a	13.8	2.78 ± 0.21 a	58.1	4.79 ± 0.16 a
Cd1	Se0	4.62 ± 0.05 A	6.2	14.11 ± 0.12 A	19.1	10.23 ± 0.31 A	13.8	45.08 ± 1.31 a	60.9	74.03 ± 3.15 a
	Se1	4.02 ± 0.30 AB	5.5	12.28 ± 0.10 B	16.9	9.32 ± 0.17 B	12.8	47.08 ± 1.29 a	64.8	72.70 ± 0.78 ab
	Se2	3.41 ± 0.08 B	5.1	9.81 ± 0.13 C	14.5	8.49 ± 0.22 C	12.6	45.78 ± 2.72 a	67.8	67.49 ± 1.13 b
Cd2	Se0	4.20 ± 0.08 a	4.4	22.16 ± 0.19 A	23.1	14.16 ± 0.23 A	14.8	55.25 ± 1.56 a	57.7	95.77 ± 4.08 A
	Se1	4.81 ± 0.48 a	5.3	17.85 ± 0.19 B	19.7	12.95 ± 0.29 B	14.3	55.09 ± 1.49 a	60.7	90.70 ± 3.34 A
	Se2	4.56 ± 0.18 a	5.6	15.91 ± 0.28 C	19.7	11.48 ± 0.15 C	14.2	48.80 ± 1.60 a	60.4	80.75 ± 2.61 B
F 值 *F* value										
Cd		320.03**		82.77**		2752.52**		246.19**		2549.39**
Se		3.91*		6.05*		47.97**		4.05*		60.54**
Cd × Se		3.74**		13.49**		9.57**		5.39*		12.92**

注(Note)：同列数据后不同小、大写字母分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different small and capital letters in same column mean significant at 5% and 1% levels, respectively. *，** 分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平 Mean significant at 5% and 1% levels, respectively.

最高,并且随着硒浓度的增加而增加,其中 Cd1 浓度下根系中镉分配比例最高,为 60.9%～67.8%。Cd1 和 Cd2 浓度时,随着硒浓度的增加,稻谷中镉的分配比例下降;在 Cd3 浓度下,随着硒浓度的增加,稻谷中镉的分配比例略有增加。

2.4.2 稻谷各部位镉的积累与分配 由表 3 可以看出,土壤镉浓度、土壤硒浓度、土壤镉浓度与土壤硒浓度的交互作用均对稻谷各部位镉积累量有极显著的影响。在 Cd0 浓度下,稻谷不同部位镉积累量随着硒浓度的增加变化不大,并且各硒处理间差异不显著。其他镉浓度时,随着硒浓度的增加,稻谷各部位镉积累量均下降。Cd2 浓度时,Se2 比 Se0 处理稻壳镉的积累量下降了 21.76%($P<0.01$)。Cd3 浓度时,糠皮镉积累量下降幅度最大,Se2 比 Se0 处理减少了 16.19%($P<0.01$)。Cd1 浓度时,精米镉积累量下降幅度最大,Se2 比 Se0 减少了 27.25%($P<0.01$)。

在相同镉浓度下,随着硒浓度的增加,稻壳中镉的分配比例增加,精米镉的分配比例下降,糠皮镉的分配比例变化不大。Cd1 浓度时,稻壳镉分配比例增幅最大,Se2 比 Se0 处理增加了 5.2 个百分点;Cd1 浓度时,精米镉的分配比例下降幅度最大,Se2 比 Se0 处理下降了 6.2 个百分点。

表 3 不同处理稻谷不同部位镉积累和分配

Table 3 Cd accumulation and distribution in different parts of rice grain in different treatments

处理 Treatments		稻壳 Rice husk		糠皮 Rice bran		精米 Polished rice		总积累量 Total Cd accumulation (mg/pot)
		积累量 Accumulation (mg/pot)	分配比例 Distribution (%)	积累量 Accumulation (mg/pot)	分配比例 Distribution (%)	积累量 Accumulation (mg/pot)	分配比例 Distribution (%)	
Cd0	Se0	0.27 ± 0.01 b	37.1	0.06 ± 0.00 a	8.4	0.39 ± 0.08 a	54.5	0.72 ± 0.08 a
	Se1	0.29 ± 0.00 ab	39.7	0.05 ± 0.00 a	7.3	0.39 ± 0.06 a	53.0	0.74 ± 0.07 a
	Se2	0.31 ± 0.01 a	46.8	0.06 ± 0.00 a	8.7	0.29 ± 0.04 a	44.5	0.66 ± 0.04 a
Cd1	Se0	4.25 ± 0.19 a	41.6	0.87 ± 0.02 a	8.5	5.10 ± 0.12 A	49.9	10.23 ± 0.31 A
	Se1	4.02 ± 0.04 a	43.2	0.83 ± 0.01ab	8.9	4.46 ± 0.15 B	47.9	9.32 ± 0.17 B
	Se2	3.98 ± 0.17 a	46.8	0.80 ± 0.01b	9.5	3.71 ± 0.05 C	43.7	8.49 ± 0.22 C
Cd2	Se0	5.24 ± 0.09 A	37.0	1.08 ± 0.02 A	7.7	7.83 ± 0.17 A	55.3	14.16 ± 0.23 A
	Se1	4.37 ± 0.05 B	33.7	1.05 ± 0.02 A	8.1	7.53 ± 0.27 A	58.1	12.95 ± 0.29 B
	Se2	4.10 ± 0.06 B	35.7	0.95 ± 0.01 B	8.3	6.42 ± 0.16 B	55.9	11.48 ± 0.15 C
Cd3	Se0	4.50 ± 0.24 a	34.0	1.05 ± 0.01 A	7.9	7.70 ± 0.17 a	58.1	13.25 ± 0.41 a
	Se1	4.70 ± 0.06 a	35.1	0.98 ± 0.02 A	7.4	7.70 ± 0.17 a	57.6	13.38 ± 0.13 a
	Se2	4.45 ± 0.11 a	35.7	0.88 ± 0.02 B	7.0	7.16 ± 0.05 a	57.3	12.48 ± 0.17 a
				F 值 *F* value				
Cd		145.13**		4333.95**		2421.38**		2752.52**
Se		1.44**		60.69**		57.24**		47.97**
Cd × Se		6.76**		11.27**		8.45**		9.57**

注(Note):同列数据后不同小、大写字母分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different small and capital letters in same column mean significant at 5% and 1% levels, respectively. *, ** 分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平 Mean significant at 5% and 1% levels, respectively.

2.5 硒对镉胁迫下植株干物重的影响

在相同硒浓度下,随着土壤镉浓度的增加,植株各器官干物重和总干物重均下降(表 4),未施硒的处理 Se0,Cd3 比 Cd0 处理总干物重、稻谷、根系、

叶片、茎鞘的干物重分别减少了 11.4%、10.8%、18.8%、10.0% 和 6.8%。相同镉浓度时,随着硒浓度的增加,植株各营养器官干物重和总干物重均增加,但增加幅度不同。Cd0 浓度时,Se2 处理的总干物重、稻谷、根系、叶、茎鞘干物重比 Se0 处理增加了 11.7%、6.5%（$P < 0.01$）、36.9%、14.3% 和 6.6%。从不同器官干物重的结果看出,硒对稻谷干物重的影响较大,在 Cd1、Cd2 和 Cd3 浓度下,Se2 比 Se0 处理的干物重分别增加了 6.4%（$P < 0.01$）、5.2%（$P < 0.05$）和 11.3%（$P < 0.01$）。

表 4　硒对镉胁迫下水稻不同器官干物重的影响(g/pot)

Table 4　Effects of Se on dry matter weight in different organs of rice plants under Cd stress

处理 Treatment		叶片 Leaves	茎鞘 Stems and sheaths	稻谷 Grains	根系 Roots	总干物量 Total dry matter
Cd0	Se0	4.49 ± 0.22 a	14.50 ± 0.13 a	62.90 ± 0.62 B	20.09 ± 0.74 b	102.99 ± 1.50 b
	Se1	4.51 ± 0.08 a	14.83 ± 0.10 a	66.06 ± 0.59 A	24.57 ± 2.06 ab	110.84 ± 2.45 a
	Se2	5.13 ± 0.33 a	15.45 ± 0.24 a	66.99 ± 0.23 A	27.51 ± 1.59 a	115.06 ± 1.55 a
Cd1	Se0	5.08 ± 0.04 a	14.36 ± 0.18 b	61.13 ± 0.74 B	19.24 ± 0.57 b	100.78 ± 1.21 b
	Se1	4.54 ± 0.31 ab	14.62 ± 0.08 ab	63.91 ± 0.23 A	22.37 ± 0.64 ab	105.70 ± 0.31 ab
	Se2	4.34 ± 0.09 b	14.91 ± 0.17 a	65.02 ± 0.66 A	24.21 ± 1.44 a	108.68 ± 2.57 a
Cd2	Se0	4.11 ± 0.10 a	13.96 ± 0.12 b	60.35 ± 0.84 b	17.77 ± 0.50 B	96.87 ± 1.32 C
	Se1	4.79 ± 0.43 a	14.51 ± 0.07 a	62.44 ± 0.37 a	20.34 ± 0.55 A	102.70 ± 0.92 B
	Se2	4.80 ± 0.18 a	14.60 ± 0.12 a	63.51 ± 0.34 a	22.67 ± 0.55 A	106.14 ± 1.18 A
Cd3	Se0	4.04 ± 0.14 a	13.51 ± 0.21 a	56.17 ± 1.96 B	16.32 ± 0.48 a	90.85 ± 1.69 b
	Se1	4.88 ± 0.11 a	14.05 ± 0.30 a	61.43 ± 0.42 AB	17.09 ± 0.37 a	99.07 ± 0.55 a
	Se2	4.65 ± 0.24 a	13.84 ± 0.11 a	62.50 ± 0.71 A	18.34 ± 0.73 a	99.18 ± 1.72 a
				F 值 *F* value		
Cd		0.55	23.94**	23.19**	25.67**	40.87**
Se		2.64	13.84**	32.72**	24.30**	41.06**
Cd × Se		4.49**	1.20	0.98	1.33	0.68

注(Note)：同列数据后不同小、大写字母分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different small and capital letters in same column mean significant at 5% and 1% levels, respectively. *, ** 分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平 Mean significant at 5% and 1% levels, respectively.

3　讨论

3.1　硒对镉胁迫下水稻镉含量的影响

黄冬芬[14]指出,向土壤中加镉后,水稻各器官镉含量随土壤中镉浓度的增高而增加;王凯荣等[4]的研究结果证明,培养液镉浓度为 0.01 mg/kg 时,糙米中镉的富集率可达 500 倍之多。本试验结果表明,当土壤镉浓度在 0～4 mg/kg 时,水稻营养器官和稻谷中镉含量随土壤镉浓度的增高而显著增加,但当土壤中镉浓度 > 4 mg/kg 时,糙米和精米中镉含量增加不显著。曾翔[15]指出,水稻成熟后,各器官镉含量的大小顺序为：根系 > 茎鞘 > 叶片 > 糙米。本试验测得的水稻各器官中镉含量顺序为根系 > 茎秆 > 叶片 > 叶鞘 > 糙米 > 精米,与曾翔的研究结果相一致。

李正文等[16]对 57 个水稻品种籽粒中镉和硒的浓度的研究证明,硒与镉呈负相关。谭周磁等[11]的研究表明,施硒比未施硒稻米中镉含量下降 29.8%。方勇[17]指出,当叶面喷硒 < 50 g/hm^2 时,稻米中镉含量变化不大,随着叶面喷硒量的增加,稻米中镉含量显著下降。以上研究多集中在南方水稻种植区,而在寒地水稻种植区的这方面的研究较少。我们以往的研究[18]结果表明,叶面施硒可以有效地降低精米中镉的含量。本试验结果表明,不同镉浓

度下,随着硒浓度的增加,糙米、精米中镉含量均明显下降,尤其当土壤镉浓度为 2 mg/kg 时,施硒后精米镉含量下降最明显,且 Se2 处理对降低精米中镉含量的效果优于 Se1 处理,这些结果与在南方水稻种植区的研究结论基本一致。

虽然很多研究证明,施硒能降低稻米中的镉含量[11, 15-16],但关于硒与镉拮抗作用的机理尚不明确,主要有 3 种观点:一是认为硒能促进 PCs(植物螯合肽)的合成,增加镉与 PCs 的络合,降低水稻体内的镉含量,并阻碍镉向水稻籽粒中迁移[17];二是认为硒能与镉结合成难溶性复合物,抑制水稻对镉的吸收而减缓镉在植株体内的累积[19];三是认为在一定范围内,硒可能参与能量代谢、蛋白质代谢以及与其他元素的相互作用,从而缓解镉对水稻的毒害[20]。总而言之,硒与镉的拮抗作用的机理比较复杂,有待于深入研究。

3.2 硒对镉胁迫下水稻镉积累和分配的影响

土壤镉污染对水稻的最大危害是镉在稻米中的积累。水稻镉积累量与环境镉含量具有一致性。水稻生长在镉污染环境中,植株长势虽未受到明显伤害,但镉会在植物体内积累,导致稻米的安全品质下降。水稻不同器官中镉的积累量存在很大差异,根系中镉的积累量最高,是茎秆、籽粒的几十至几千倍[14,21-22]。刘侯俊等[23]的研究表明,未加镉处理时,植物体内镉的分配为根系 > 茎叶 > 颖壳 > 籽粒;当土壤镉浓度为 5 mg/kg 时,植物体内镉的分配规律为茎叶 > 根系 > 颖壳 > 籽粒。本试验结果表明,无论是否加镉,成熟期植株各器官镉的分配顺序均为根系 > 茎鞘 > 稻谷 > 叶片,与曾翔[15]的研究结果相近。镉在稻谷中分配的结果表明,土壤环境中镉浓度较低时,稻壳中镉的分配比例较高,精米中镉的分配比例较低,随着镉浓度的增加,稻壳中镉分配比例逐渐下降,精米中镉分配比例逐渐升高。说明除了根系能阻滞土壤中镉向地上部运转外,稻壳也能阻滞镉向精米中的运输,但只能在低镉浓度下发挥作用。本研究发现,相同镉浓度下,稻壳中镉的分配比例随着硒浓度的增加而增加,而精米中镉的分配比例却随着硒浓度的增加而下降,即施硒能增加镉在稻壳中的分配,减少镉向精米中的运转,有助于提高精米的食用安全性。

3.3 硒对镉胁迫下水稻干物重的影响

本试验条件下,未施硒时,随着土壤镉浓度的增加,植株各器官干物重均下降,与其他研究者[14, 24]的观点一致,表明镉胁迫能抑制水稻的生长发育。施硒后,不同镉浓度胁迫时,随着硒浓度的增加,植株各营养器官干物重均增加,Se2 处理对干物重的影响优于 Se1 处理,表明硒能减轻镉胁迫对水稻生长发育的抑制作用。

4 结论

镉浓度在 0 ~ 8 mg/kg 时,水稻各器官镉含量随着土壤镉浓度的增加而增加,镉含量顺序为根系 > 茎秆 > 叶片 > 叶鞘 > 糙米 > 精米。施硒影响植株和籽粒中的镉含量及其分配比例。随着硒浓度的增加,植株各器官和稻米(糙米和精米)中镉含量下降;根系镉积累和分配比例增加,而稻谷镉积累和分配比例下降。因此,施硒不仅能降低稻米中的镉含量,减少镉积累,而且能提高稻米硒含量,是保证稻米食用安全性的一项简单易行的农艺措施。

参 考 文 献:

[1] 张金彪, 黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展[J]. 生态学报, 2000, 20 (3): 514-523.
Zhang J B, Huang W N. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants[J]. Acta Ecologicaaa Sinica, 2000, 20 (3): 514-523.

[2] 史文娇, 汪景宽, 边振兴, 等. 黑龙江北部土壤中主要重金属和微量元素状况及其评价[J]. 土壤通报, 2005, 36 (6): 880-883.
Shi W J, Wang J K, Bian Z X *et al*. Distribution and evaluation of main heavy metals and available microelements in soils of the northern area of Heilongjiang province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36 (6): 880-883.

[3] 郭观林, 周启星. 中国东北北部黑土重金属污染趋势分析[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21 (3): 386-392.
Guo G L, Zhou Q X. Contaminative trends of heavy metals in phaiozem of Northeast China[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2004, 21(3): 386-392.

[4] 王凯荣, 龚惠群. 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究[J]. 农业环境保护, 1996, 15(4): 145-149, 176.
Wang K R, Gong H Q. Comparative studies on the difference of the uptake and redistribution of environmental Cd by two genic rice [J]. Agro-Environment Protection, 1996, 15 (4): 145-149,176.

[5] Zhang Z W, Subida R D, Agetano M G *et al*. Nonocupational exposure of adult women in Manila, the philippines, to lead and cadmium[J]. Science of the Total Environment, 1998, 215: 157-165.

[6] Zhang Z W, Moon C S, Watanabe T *et al*. Background exposure of urban populations to lead and cadmium: comparison between China and Japan [J]. International Archives of Occupational Environment Health, 1997, 69: 273-281.

[7] Ikeda M, Zhang Z W, Moon C S *et al*. Background exposure of general population to cadmium and lead in Tainan city, Taiwan [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1996, 30: 121-126.

[8] Zhang Z W, Shimbo S, Watanabe T *et al*. Non-occupation lead and cadmium exposure of adult women in Bangkok, Thailand[J]. Science of the Total Environment, 1999, 226: 65-74.

[9] Cary E E. Effect of selenium and cadmium additions to soil on their concentration in lettuce and wheat[J]. Agronomy Journal, 1981, 73: 703-708.

[10] Shanker K, Mishra S, Srivastava S *et al*. Studies on Cd-Se interaction with reference to the uptake and translocation of cadmium in kidney bean [J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 1995, 7 (3): 97-100.

[11] 谭周磁, 陈嘉勤, 薛海霞. 硒(Se)对降低水稻重金属 Pb、Cd、Cr 污染的研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2000, 23 (3): 80-83.
Tan Z C, Chen J Q, Xue H X. Studies on the role of selenium (Se) in decreasing Pb, Cd and Cr pollution to rice[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2000, 23 (3): 80-83.

[12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Lu R K. The analysis methods of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: Science Press, 2000.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil agrochemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[14] 黄冬芬. 水稻对土壤重金属镉的响应及其调控[D]. 江苏扬州: 扬州大学博士论文, 2008.
Huang D F. Responses of rice to cadmium in soil and its regulation [D]. Yangzhou, Jiangsu: PhD dissertation of Yangzhou University, 2008.

[15] 曾翔. 水稻镉积累和耐性机理及其品种间差异研究[D]. 长沙: 湖南农业大学博士论文, 2006.
Zeng X. Studies on physiological mechanism in cadmium accumulation and tolerance and its difference among cultivars of rice[D]. Changsha: PhD dissertation of Hunan Agricultural University, 2006.

[16] 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 in 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. Environment Science, 2003, 24 (3): 112-115.

[17] 方勇. 外源硒在水稻籽中的生物强化和化学形态研究[D]. 南京: 南京农业大学博士论文, 2010.
Fang Y. Studies on selenium biofortification and chemical speciation in rice grain [D]. Nanjing: PhD dissertation of Nanjing Agricultural University, 2010.

[18] 李佳. 硒对寒地水稻产量和稻米安全品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士论文, 2010.
Li J. Effects of selenium application on yield and safety quality of rice in cold area[D]. Habin: Ms thesis of Northeast Agricultural University, 2010.

[19] 梁程, 林匡飞, 张雯, 等. 不同浓度硫处理下硒镉交互胁迫对水稻幼苗的生理特性影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 857-866.
Liang C, Lin K F, Zhang W *et al*. Effects of sulfur and selenium treatment on plant growth and some physiological characteristics of rice under cadmium stress [J]. Journal of Agro-Environment, 2012, 31(5): 857-866.

[20] 林莉. 硒缓解水稻镉毒害的机理研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士论文, 2011.
Lin L. Mechanism of allevation effects of selenium application on cadmium toxicity in rice[D]. Hangzhou: Ms thesis of Zhejiang University, 2011.

[21] 吴启堂, 陈卢, 王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19 (1): 104-107.
Wu Q T, Chen L, Wang G S. Differences in Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism[J]. Acta Ecologicaaa Sinica, 1999, 19 (1): 104-107.

[22] 李坤权, 刘建国, 陆小龙, 等. 水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22 (5): 529-532.
Li K Q, Liu J G, Lu X L *et al*. Uptake and distribution of cadmium in different rice cultivars [J]. Journal of Agro-Environment, 2003, 22 (5): 529-532.

[23] 刘侯俊, 梁吉哲, 韩晓日, 等. 东北地区不同水稻品种对 Cd 的累积特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 220-227.
Liu H J, Liang J Z, Han X R *et al*. Accumulation and distribution of cadmium in different rice cultivars of northeastern China[J]. Journal of Agro-Environment, 2011, 30 (2): 220-227.

[24] 孙永红. 镉砷在水稻体内的积累及其调控[D]. 南京: 南京农业大学博士论文, 2008.
Sun Y H. Cadmium and Arsenic accumulation and partilitioning in rice and their regulation[D]. Nanjing: PhD dissertation of Nanjing Agricultural University, 2008.