

镉对水稻的毒害效应及其调控措施研究进展

王永强^{1,2},肖立中¹,李诗殷²,李伯威²,蔡信德²

(¹华南农业大学农学院,广州 510642;²环境保护部华南环境科学研究所,广州 510655)

摘要:镉是植物生长的非必需元素,它易于被吸收,具有很大的生物毒性。镉通过在水稻内富集而进入食物链,对人畜健康构成巨大威胁。在参阅大量文献资料的基础上,概述了土壤中镉对水稻的毒害效应及水稻对镉的吸收分配作用,讨论了目前降低其毒性的调控措施。

关键词:镉;水稻;毒害;修复

中图分类号:X171.5

文献标志码:A

论文编号:2009-2299

Review of Toxic Effect of Cadmium on *Oryza Sativa* and Remediations

Wang Yongqiang^{1,2}, Xiao Lizhong¹, Li Shiyin², Li Bowei², Cai Xinde²

(¹College of Agriculture, SCAU, Guangzhou 510642;

²South China Institute of Environmental Science, MEP, Guangzhou 510655)

Abstract: Cadmium, as one of unnecessary elements for plant growth, is toxic and easier to absorb and it can accumulate in rice to harm human and animal health through the food chain. Based on literatures, the poisonous effect of cadmium on *Oryza sativa* were summarized, absorption, distribution, translocation and accumulation of cadmium in rice plants were reviewed, the remediations to alleviate the poisonous effect presently were discussed.

Key words: cadmium; *Oryza sativa*; toxicity; remediation

0 引言

近年来,随着工业“三废”排放量的增加,固体废弃物的处理不善,污水灌溉、肥料施用及污泥农用等使大量镉进入环境,农业污染加剧,农田土壤中有毒重金属含量急剧增加,造成土壤重金属污染日益严重、土壤肥力退化、农作物产量降低和品质下降,严重影响环境质量和经济的可持续发展^[1]。水稻是仅次于小麦的世界第二大粮食作物,世界上有2/3以上的人口以稻米为主食。中国是世界上最大的水稻生产国和消费国。因此,水稻生产的发展在中国倍受重视。镉污染不仅影响其生长发育,导致产量下降,更为重要的是重金属在水稻体内大量积累,并沿着食物链进入人类,最终危害人类身体健康。稻米中的重金属含量超标问题已经非

常突出^[2-7]。随着社会的发展,人们的生活水平越来越高,对稻米的品质要求也相应提高,稻米中有毒重金属含量超标将面临着销售和出口困难等问题^[7]。因此要对土壤中镉对水稻整个生长发育期的毒害效应有个深刻的认识,了解其主要调控措施,为降低镉的毒性和生产无镉污染的稻米提供理论上的指导。

1 土壤中镉的来源

像其他重金属一样,镉存在于全球各生态系统,一般在自然条件下土壤中的重金属主要来自其成土母质,往往含量较低,这种背景含量不会对土壤生态系统造成危害。目前,土壤重金属超标主要是受到多种人为因素的影响。主要是工业“三废”排放量的增加,固体废弃物的处理不善,污水灌溉、肥料施用及污泥农用

基金项目:国家环境保护总局项目“废弃工业场地和铅锌污染土壤修复与综合治理试点”(1440800011);广州市环境保护局资助。

第一作者简介:王永强,男,1983年出生,河南开封人,硕士研究生,主要土壤污染与作物生态学的研究。通信地址:510655广东省广州市天河员村西街7号大院。E-mail:hkjdx0903@163.com。

通讯作者:蔡信德,男,1965年出生,广东广州人,研究员,博士,主要从事土壤污染治理技术研究。通信地址:510655广东省广州市天河员村西街7号大院。Email:xindecai@scies.com.cn。

收稿日期:2009-11-04, **修回日期:**2009-11-23。

等。从近年来发表的有关调查研究报告看,中国农田镉污染很多是由于引用工业污水灌溉造成的,在工矿和城郊区,污灌农田都存在土壤镉污染问题。施用重金属含量较高的肥料、农药,以及不合理施用化肥,都有可能引起土壤镉污染。

2 镉对水稻的毒害效应

2.1 镉胁迫对水稻种子萌发的影响

作物个体发育的第一阶段是种子萌发到幼苗的形态建成,在这一阶段中生长中心是胚芽和胚根的生长,代谢中心是胚乳中贮藏的大分子物质(如淀粉、蛋白质)的降解和呼吸代谢,从而为幼苗萌发和生长提供能量。种子萌发的好坏直接关系到幼苗的形态建成及后期植株的生长发育。重金属能抑制种子萌发和根系的生长。田艳芬^[8]等报道,镉离子能抑制蛋白酶和肽酶活性,且随离子浓度的增加抑制强度增大。当 $Cd^{2+} \geq 0.5 \text{ mmol/L}$ 时,种子总蛋白量仍维持一定的水平,而此浓度下种子仅出弱芽,不长根,出苗率为零;对照组种子则总蛋白分解迅速,含量下降,根芽长势良好,出苗率高。研究表明,水稻种子萌芽时, Cd^{2+} 胁迫会引起决定种子萌芽力大小的水解酶——淀粉酶(Amy)和酸性磷酸酯酶(Acp)活力的下降,导致萌芽率低甚至全部失活。同时,镉胁迫可以抑制种子有氧呼吸,加上由于镉离子可能会阻碍氧分子向胚细胞内部的扩散,从而使胚根细胞缺氧,根生长受阻,出现只长弱芽、不长根的现象^[9]。

2.2 镉胁迫对水稻生长的影响

由于Cd进入土壤环境之后,其生物有效性会受外界环境的影响发生变化,而水稻在不同生育时期对Cd暴露的反应可能并不相同。在现实污染环境中,镉的胁迫可能只在作物生长的某一阶段,也可能是整个生育时期。 Cd^{2+} 首先引起根的损伤,主要表现在抑制根的伸长、根数的减少,随着 Cd^{2+} 浓度的提高,这种抑制作用逐渐增强。这是由于从种子吸胀时起,胚根和已发出的侧根都是处于被 Cd^{2+} 污染的环境中,所以受害最为严重。当 Cd^{2+} 浓度为 100 mg/L 时,不仅根短、根少,而且根尖的颜色略呈红褐色,使根系活力降低,根中的能量和物质转化受阻,最终导致物质代谢与能量转化不能正常进行。另外, Cd^{2+} 能破坏生物工程膜的结构,最终使水稻根生长受阻^[10]。其次,抑制水稻幼苗的生长,Cd胁迫明显抑制水稻幼苗的生长,使水稻生长迟缓,幼苗矮化,降低株高和根长,减少根数,同时叶片干重降低,苗鲜重减少,极大降低了干物质积累。 Cd^{2+} 使水稻根系活力和硝酸还原酶(NR)活性降低,游离氨基酸、可溶性蛋白含量明显减少,严重干扰了水稻

幼株的代谢过程,使植株矮小^[11-12]。有研究表明,在全生育期Cd胁迫环境下,植株生长瘦弱,叶片短小,中下部叶片枯尖、黄化严重,根短而粗。表皮糙裂,菌丝状根毛发达,抽穗期推迟3~4天。植株贪青晚熟,后期小分蘖多,穗短粒少,其中杂交水稻表现尤为突出。

2.3 镉胁迫对水稻叶绿素和光合作用的影响

叶绿素是植物进行光合作用的色素,其含量在一定程度上反映了光合作用的水平。VAN A F^[13]等认为,重金属离子能与酶活性中心或蛋白质中的巯基结合,能取代金属蛋白中的必需元素,导致生物大分子构象改变、酶活性丧失,抑制了原叶绿素酸酯还原酶活性。陈平^[14]等认为,镉毒害使水稻吸收的元素减少,阻碍叶绿素形成及其含量增加,导致叶绿素含量下降,最终严重影响植物光合作用的正常进行。众多试验证明,镉胁迫均对植物的叶绿素合成和光合作用产生抑制,胁迫效应与浓度呈正相关。 Cd^{2+} 污染能明显降低水稻种苗叶绿素含量^[15],导致叶绿素a/b比值改变,造成PS I、PS II、捕光色素-蛋白质复合体的解体或形成抑制,影响PS I和PS II 2个光系统的中间电子载体系统——Cytb6-f复合体含量,从而影响光合链上的电子传递,进而直接影响光合作用^[16]。此外,王逸群等以不同浓度 Cd^{2+} 处理水稻,发现叶肉细胞中细胞核核膜破裂,核仁消失;叶绿体被膜受损,类囊体遭到破坏;线粒体被膜结构也受损,内嵴逐渐解体;而且随着 Cd^{2+} 浓度的提高,叶肉细胞中细胞核、叶绿体、线粒体受毒害程度加重^[17]。

2.4 镉胁迫对水稻抗氧化类酶活性的影响

在重金属镉的胁迫下,水稻通常会产生活性氧自由基(ROS),自由基与细胞膜系统、脂类、蛋白质和核酸等生物大分子发生连锁式反应,使细胞结构遭到强烈破坏。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)被称为植物保护酶系统^[18]。它们以不同途径来减轻氧化胁迫危害:SOD分解(歧化) O_2 为 H_2O_2 和 O_2 ,CAT直接分解 H_2O_2 产生 H_2O 和 O_2 ,而POD以过氧化物为底物,以植株体内多种还原剂为电子受体清除过氧化物。植物细胞存在着自由基的产生和消除这两个过程,只有以上三者协调一致,才能使生物自由基维持在一个低水平,从而防止细胞受自由基的毒害。当植物受到Cd污染后,SOD、POD和CAT,发生相应变化。邵国胜等研究表明,在镉胁迫下水稻SOD、CAT和POD活性随镉水平的提高而减少,而丙二醛(MDA)含量表现相反^[19]。章秀福等试验发现,轻度镉胁迫有利于提高水稻叶片的SOD活性;高浓度镉胁迫对水稻叶片的SOD活性有抑制作用;叶片SOD活

性与植株镉含量呈负相关,MDA含量与植株镉含量呈正相关^[20]。

2.5 镉胁迫对水稻品质的影响

王凯荣等^[21]认为,土壤受重金属污染后,能影响稻米营养品质和卫生品质。镉能显著降低糙米中赖氨酸含量,以及赖氨酸和组氨酸占总数的百分数,提高天冬氨酸含量;支链淀粉含量与Cd添加量呈显著正相关。Cd还有降低直/总比值,提高糙米还原糖的含量的趋势。水稻籽实中Pb、Cd含量与土壤中Pb、Cd污染程度呈显著正相关,郑文娟等^[22]在土壤中加入28 mg/kg Cd²⁺,糙米中粗淀粉、直链淀粉含量与对照相比均明显下降,其下降幅度为3.93%~7.33%、7.09%~21.4%。糙米的赖氨酸含量下降10.5%~31.6%,粗蛋白下降14.0%~36.9%。

3 水稻对有毒重金属元素的吸收与分配

3.1 水稻不同品种(系)间的差异

大量研究表明,水稻不同品种由于基因型的差异,在对镉的吸收和分配上存在很大的差异,这种差异不仅存在于亚种间,而且在亚种内也存在^[23]。刘敏超^[24]等研究表明,水稻不同品种之间,无论是根表铁氧化膜、根部含Cd量,还是地上部含Cd量均存在显著性差异,不同品种之间Cd在根与地上部的分布和转移情况亦不同,且这种分配模式与Cd的总吸收量无关。李坤权^[25]、Liu^[26-27]等对20个供试水稻品种(系)的系统研究表明,不同品种茎叶的Cd积累总量、积累浓度、日积累量均存在显著性差异,不同品种对镉的吸收分配亦存在明显差异。Al-Saleh^[28]等检测了27个水稻品种籽粒中的重金属含量,结果表明,不同品种Cd、Pb、Hg含量差异很大。李正文^[29]等发现供试的57个水稻品种。籽粒对同一土壤中Cd、Cu的积累存在显著的差异。关于水稻不同类型品种籽粒对重金属元素吸收的差异,前人的研究结果不太一致。王凯荣^[24]等认为晚稻籽粒对Pb和Cd的富集能力比早稻强。但亦有调查表明,不同季节栽培的籼稻籽粒和茎叶的As吸收量均按以下顺序递减:早籼>中籼>晚籼。一般认为杂交水稻比常规水稻或优质特用稻对镉有更强的向其籽粒转运的能力^[23],但李坤权等^[25]发现常籼品种籽粒对镉的积累能力并不比杂籼低;最新研究表明籼型、新株型和粳型三种类型水稻的糙米对Cd的积累能力依次为籼型>新株型>粳型^[25],而对Pb的积累能力依次为新株型>籼型>粳型^[27]。

3.2 水稻不同器官(部位)的差异

水稻不同器官对重金属元素的吸收蓄积能力存在很大差异,其中以根富集重金属元素的能力最强,一般

以根>茎>叶>籽粒(或糙米)的顺序递减^[25-27];水稻各器官重金属元素的分布也因不同生育时期而异。从水稻不同器官重金属含量的相关性来看,李坤权等^[25]指出不同水稻品种根、茎叶和籽粒间的镉含量相关性很差,与土壤重金属浓度的相关性亦随不同部位而异;查燕等^[30]研究发现Cd、Cu、Pb在污染水稻籽粒中的分布具有明显不均匀性,胚和皮层中的浓度均显著高于胚乳,胚乳中的浓度略高于颖壳;从单位重量籽粒中的Cd、Cu、Pb总量分布看,胚乳中的积累量占据绝对优势(67%~74%),其次为颖壳(10%~13%)和皮层(10%~12%),胚中的积累量最小(7%~8%)。上述结果不尽一致,可能与供试品种、重金属元素及试验方法等不同有关。

3.3 水稻不同生育时期(阶段)的差异

重金属元素向水稻的迁移、分布和总量传输是一个动态变化的过程。王凯荣等^[23]水培试验表明,供试水稻品种在前期(幼穗分化之前)吸收的镉不到全生育期吸收总量的10%,中期(幼穗分化到抽穗)约40%,后期(抽穗后)占51%以上,但对镉的吸收速率而言为中期>后期>前期。因此,他认为控制农田镉污染的技术措施必须贯穿于水稻生产的全过程,尤其要注重中、后期的保护和管理。但亦有不同观点,王新等^[31]通过放射性方法研究发现水稻在分蘖期重金属在根部积累量最大。莫争等^[32]研究亦发现,水稻分蘖期Cd、Cr、Zn、Cu、Pb等重金属在根部、茎秆部和叶片的含量达到最大,随着生育期的推进,根部重金属含量愈来愈小;茎秆部重金属含量在拔节期降至最小,随后又稍微上升;叶片重金属含量在拔节期迅速下降,随后趋于稳定。上述研究结果的不一致可能与试验的季节、环境温度、供试品种等因素不同有关。

4 水稻镉毒害的防治途径

目前,修复土壤重金属污染主要有以下几个途径。一是改变重金属在土壤中的存在状态,降低其在环境中的迁移性和生物可利用性;二是利用生物或工程技术方法从土壤中去掉重金属;三是改变种植制度,避免重金属通过食物链影响生物和人体健康。针对稻田镉污染,可以通过以下途径治理。

4.1 制订法规,控制污染源

由于土壤的重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特点,土壤一旦受到污染,就难以彻底治理,因此要防患于未然,对能带来镉污染的工业生产采取预防措施或减少这类生产活动,严格控制污染源,禁用污水灌溉,减少农田使用污泥等固体垃圾,控制和降低磷肥中的镉含量。对工业“三废”和肥料中的镉含量采取

Cd 限量标准, 建立健全农用投入品重金属 Cd 限量标准。

4.2 改变耕作方式, 改善水肥管理

表层土壤受镉污染时, 水稻体内各器官包括籽粒中的镉含量都明显高于深层土壤镉污染^[33]。可以通过深耕的方法, 使表层含镉量高的土带入深层, 或采用客土覆盖的方法来降低植物对污染层中镉的吸收。慎重使用磷肥、有机废料、粪肥以及农用地膜, 如必需使用, 使用前要检测 Cd 含量, 使其在限量以下。使用氮肥和钾肥, 增施锌肥, 避免锌缺乏症(注意增施过多锌肥对植物有毒, 短期内还能增加土壤中水溶性 Cd 含量), 保持和增加土壤有机质, 降低土壤中的水溶性 Cd。加强病虫害防治, 特别是叶部病害的防治, 增强叶面对锌肥的吸收。实行农作物轮作制度, 降低农作物对 Cd 的吸收。

不同的水分条件下土壤的氧化还原状况不同, 直接影响着土壤中镉的生物有效性。沈阳张士镉污染水田采取常规方法管理(干湿交替, 排水烤田), 稻米的镉含量可达 1.12 mg/kg (土壤中镉浓度为 2.78 mg/kg), 而采取水稻全生育期淹水管理, 稻米的镉含量仅为 0.39 mg/kg (土壤中镉浓度为 3.30 mg/kg)^[34]。纪雄辉等^[35]的研究表明, 淹水条件下水稻根、茎叶、糙米中的镉含量较常规水分管理显著降低, 其中, 糙米较间歇灌溉降低了 41.3%, 较湿润灌溉降低了 70.7%。此外, 灌溉水的水温、理化性质通过影响土壤微生物的活性, 随之引起土壤氧化还原电位变化而影响镉的生物有效性^[36]。近些年的研究表明, 硅肥能减轻 Cd 对作物的毒害作用, Si 能够改善叶绿素 a/b 的关系, 使 a/b 比值提高^[37]。施硅后水稻根部所吸收的 Cd 向地上部分迁移的量明显减少^[38]。邵国胜等^[39]提出用定铁肥调控水稻植株镉积累。他们的研究表明土施 EDTA·Na₂Fe 显著降低了水稻根系、地上部以及稻米(糙米和精米)中的镉含量, 并且两基因型水稻精米中的镉含量远低于 0.2 mg/kg, 达到国家限制标准。他们同时检测灌浆盛期剑叶叶绿素含量、株高以及地上部干物重等水稻生长参数, 还检测了有效穗数、每穗粒数、每穗实粒数和千粒重等产量指标(数据略), 结果发现水稻经铁肥处理以后, 各生长参数和产量指标与对照均没有明显差异, 并且稻米中铁、铜、锰等微量营养元素显著提高, 稻米的营养品质在一定程度上得以提高。此外, 由于 Cl 对土壤中镉有效性的影响, 在镉污染的大田中应不施或少施 KCl, 改施其他钾肥^[40]。

4.3 培育和选择抗镉或镉吸收低的水稻品种

水稻的品种及基因型对镉在土壤-稻米的迁移具

有重要的影响。相同条件下, 不同的水稻品种及同一品种的不同器官, 由于外部形态及内部结构的不同, 吸收镉的生理生化机制各异, 故其对镉的积累能力差异很大。王凯荣等^[23]采用水培和分时期提供镉的方法对杂交水稻和常规水稻的镉耐受性进行了研究, 结果表明两种不同基因型水稻对镉的吸收积累有很大的差异性, 杂交稻对镉的吸收大大强于常规稻。蒋彬等^[41]分析了菜与全国不同地区的 239 份不同基因型的水稻品种种植与同一土壤, 发现精米中 Cd 含量存在极显著差异。李坤权等^[25]发现菲律宾的新株型 CV5 的糙米中镉浓度为 1.57 mg/kg, 而中国的南京 11 中镉浓度达 2.47 mg/kg。这为选择优良品种提供了巨大的空间。可在土壤镉污染地区选种一些抗镉污染强的作物, 以降低含镉农作物进入食物链从而避免对人类造成的危害, 同时还可以筛选出在可食用部分累积污染物少的品种, 利用植物基因工程技术, 培育出镉低积累高耐性、生长量大的水稻品种。

4.4 添加土壤改良剂, 改变土壤中镉的存在形态, 降低其活性。

加入特殊的土壤改良剂, 调节和改变重金属在土壤中的物理化学性质, 使其产生沉淀、吸附、离子交换、腐殖化和氧化-还原等一系列反应, 降低重金属在土壤环境中的生物有效性和可迁移性, 从而减少这些重金属元素对动植物的毒性^[42]。王凯荣^[43]在盆栽条件下研究表明, 基施 5.0 g/kg 碱性煤渣, 可使早稻糙米 Cd 含量降低 75.4%, 晚稻糙米 Cd 含量分别降低 87.9%, 使糙米 Cd 含量从严重超标水平降到了国家食品卫生标准允许的含量以下。钙镁磷肥具有促进早熟, 抗倒伏的作用, 同时也能明显抑制水稻植株对镉的吸收, 施用钙镁磷肥后, 水稻植株各部位镉的残留量显著降低, 大量施用后可使数季水稻镉的吸收量显著降低, 另外石膏对降低水稻糙米中镉的含量也有一定效果^[44]。

5 结语

综上所述, 土壤中镉污染严重影响了水稻生长发育、产量与品质, 而且通过食物链的传递富集, 影响着人体的健康。今后一方面要加强水稻在镉胁迫下生理生化的变化及水稻本身对镉胁迫防御机制, 在分子水平上研究水稻吸收、转移、分配 Cd 的过程及其影响因子。另一方面要深入研究耐镉毒植物的抗性机制, 将耐性基因导入水稻植株中, 从而在提高水稻产量的同时, 降低稻米中镉的含量。

土壤一旦受到污染, 治理起来就较费时耗财, 所以要杜绝污染源, 减少流向土壤的重金属量。已经受到污染的土壤, 要根据土壤受污染的程度、土壤的用途、

重金属的种类等,采用选择合适经济的治理措施。原位化学固定修复操作方便和效果快速,是修复中轻度污染土壤、特别是农田土壤的一种有效的方法,但施用改良剂也存在很多缺陷,例如过度施用石灰,会改变土壤理化性质,使重金属离子浓度长期升高,导致作用减产^[45]。施用硅酸盐物质会导致土壤溶液中可溶性有机碳增加,使土壤中镉的淋溶性升高^[46]。同时保证和控制长时间的固定效率也是个亟待研究的问题。因此,应加大对改良剂的筛选和新型改良剂的合成的研究工作,寻求高效、低成本、环境安全以及对土壤负面扰动较小的改良剂。

同时,加强原位化学固定修复和植物修复、电化法修复、淋溶络合法修复及农艺调控措施等的综合应用,加强学科间的交流,开展土壤学、遗传学、农业、化学、植物学、微生物学、环境和生态学等多学科的紧密合作,研究和开发修复的应用技术,取长补短,更好地实现重金属污染土壤的修复。

参考文献

- [1] 杨苏才,南忠仁,曾静静.土壤重金属污染现状与治理途径研究进展[J].安徽农业科学,2006,34(3):549-552.
- [2] 王志刚.广东省农村生态环境现状与保护[J].农业环境与发展,2002,2(2):18-19.
- [3] 张建武.广州乡镇企业发展与农业资源环境保护[J].农业环境与发展,1998,15(1):30-33.
- [4] 夏运生,何江华,万洪富.广东省农产品污染现状分析[J].生态环境,2004,13(1):109-111.
- [5] 李德成,李忠佩,张桃林.不同利用年限的红壤水稻土中重金属元素含量研究[J].土壤通报,2004,35(3):336-338.
- [6] 胡培松.土壤有毒重金属镉毒害及镉低积累型水稻筛选与改良[J].中国稻米,2004,2:10-12.
- [7] 方福平,章秀福,王丹英,等.科技进步对我国水稻生产发展的影响与对策[J].农业现代化研究,2004,25(3):177-181.
- [8] 田艳芬,史锬.镉对水稻等作物的毒害作用[J].土壤肥料,2005(5):26-28.
- [9] 施农农,陈志伟,贾秀英.镉胁迫下水稻种子的萌芽生长及体内水解酶的活性变化[J].农业环境保护,1999,18(5):213-216.
- [10] 白嵩,李青芝,白岩,等.水体镉污染对水稻种苗初期生长的影响[J].吉林农业大学学报,2003,25(2):128-130.
- [11] 刘莉.镉胁迫对水稻幼苗干物质积累和活性氧代谢的影响[J].浙江农业学报,2005,17(3):147-150.
- [12] 白嵩,纪秀娥,白岩,等.水体镉污染对水稻幼株生长及某些生理特性的影响[J].吉林农业大学学报,2004,26(3):245-247.
- [13] VAN A F, CLUISTERS H. Effects of metal on enzyme activity in plants[J].Plant Cell Environ,1990,13:195-206.
- [14] 陈平,余土元,陈惠阳,等.硒对镉胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响[J].广西植物,2002,22(30):277-282.
- [15] 葛才林,骆剑峰,刘冲,等.重金属对水稻光合作用和同化物输配的影响[J].核农学报,2005,19(3):214-218.
- [16] 秦天才,阮捷,王腊娇.镉对植物光合作用的影响[J].环境科学与技术,2000(9):33-35.
- [17] 王逸群,郑金贵,陈文列,等.Hg²⁺、Cd²⁺污染对水稻叶肉细胞伤害的超微观察[J].福建农林大学学报:自然科学版,2004,33(4):409-413.
- [18] Fridovich I. The biology of oxygen radical[J].Science,1978,201:8875-880.
- [19] 邵国胜, MUHAMMAD JH, 章秀福, 等. 镉胁迫对不同水稻基因型植株生长和抗氧化酶系统的影响[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(3): 239-241.
- [20] 章秀福,王丹英,储开富,等.镉胁迫下水稻SOD活性和MDA含量的变化及其基因型差异[J].中国水稻科学,2006,20(2):194-198.
- [21] 王凯荣,郭益,何电源,等.重金属污染对稻米品质的影响的研究[J].农业环境保护,1993,12(6):254-257.
- [22] 郑文娟,邓波儿.铬和镉对作物品质的影响[J].土壤,1993,25(6):324-326.
- [23] 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.
- [24] 刘敏超,李花粉,夏立江,等.根表铁锰氧化物胶膜对不同品种水稻吸镉的影响[J].生态学报,2001,21(4):598-602.
- [25] 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.
- [26] Liu JG, Li KQ, Xu JK, et al. Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes[J].Field Crops Research,2003(a),83:271-281
- [27] Liu JG, Li KQ, Xu JK, et al. Lead toxicity, uptake, and translocation in different rice cultivars[J]. Plant Science, 2003b,165:793-802.
- [28] Al-Saleh I, Shinwari N. Report on the levels of cadmium, lead, and mercury in imported rice samples[J]. Biol Trace Elem Res,2001,83(1):91-96.
- [29] 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.
- [30] 查燕,杨居荣,刘虹,等.污染谷物中重金属的分布及加工过程的影响[J].环境科学,2002,21(3):52-55.
- [31] 王新,吴燕玉.不同作物对重金属复合污染物吸收特性的研究[J].农业环境保护,1998,17(5):193-196.
- [32] 莫争,王春霞,陈琴,等.重金属Cu、Pb、Zn、Cr、Cd在水稻植株中的富集和分布[J].环境化学,2002,21(2):110-116.
- [33] 张敬锁,李花粉.不同土层镉污染状况对水稻吸收镉的影响[J].农业环境保护,2002,21(3):221-224.
- [34] 曹仁林,贾晓葵,张建顺.镉污染水稻土防治研究[J].天津农业科技,1999,6:12-17.
- [35] 纪雄辉,鲁艳红,廖育林,等.污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J].生态学报,2007,9(9):3930-3939.
- [36] 夏增禄.土壤环境容量及其应用[M].北京:气象出版社,1988,23-30,

- 65,147.
- [37] 周建华,王永锐.硅营养缓解水稻幼苗Cd、Cr毒害的生理研究[J].应用与环境生物学报,1999,5(1):11-15.
- [38] 秦淑琴,黄庆辉.硅对水稻吸收镉的影响[J].塔里木农垦大学学报,1996,8(2):17-20.
- [39] 邵国胜,陈铭学,王丹英.稻米镉积累的铁肥调控[J].中国科学C辑:生命科学,2008,38(2):180-187.
- [40] 吴燕玉,陈涛,李书鼎,等.张士灌区镉污染综合防治技术的研究[J].中国环境科学,1985,5(3):1-7.
- [41] 蒋彬,张慧萍.水稻精米中铅镉砷含量基因型差异的研究[J].云南师范大学学报,2002,22(3):37-40.
- [42] Mc Gowen SL, Basta NT, Brown GO. Use of diammoniumphos-phate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-con-taminated soil [J]. Journal of Environmental Quality,2001,30(2):493-500.
- [43] 王凯荣.不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J].农业环境科学学报2007,26(2):476-481.
- [44] 曹仁林,贾晓葵,张建顺.镉污染水稻土防治研究[J].天津农林科技,1999,6:12-17.
- [45] Chlopecka A, Adriano DC. Mimicked in situ stabilization of metals in a cropped soil: Bioavailability and chemical form of zinc[J]. Environ Sci Technol,1996,30:3294-3303.
- [46] Bolan NS, Adriano DC, Mani AP, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils II. Effect of lime compost[J]. Plant Soil,2003b,251:187-198.