

品种和土壤对水稻镉吸收的影响 及镉生物有效性预测模型研究进展^①

叶新新^{1,2}, 孙波^{1*}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 稻田受重金属镉 (Cd) 污染后, 土壤中的 Cd 可能被植物吸收通过食物链进入人体, 威胁人类健康。而水稻品种和土壤类型对 Cd 吸收和积累有着深远的影响, 因此在进行 Cd 的农产品安全阈值制定和人体健康风险评估时, 需考虑土壤 Cd 的生物有效性和不同水稻品种对 Cd 吸收的影响。本文综述了水稻品种和土壤类型对 Cd 吸收和积累的影响, 并重点介绍了目前常用于预测重金属生物有效性的模型, 以期对环境风险评估、土壤环境质量标准及农产品安全阈值制定提供有效的工具, 并为生产安全 (无公害) 稻米提供参考。

关键词: 水稻; 镉; 生物有效性; 模型

中图分类号: X56

20 世纪以来, 随着人口数量的大幅度增加, 采矿、冶炼和制造等工业的快速发展, 大量农用化学品的使用以及城市污水的排放^[1], 使土壤中镉 (Cd) 的污染问题日益严重。据统计, 全世界目前受重金属污染的耕地约 2.35 亿 hm^2 , 而每年世界范围进入土壤中的 Cd 为 2.2 万 $\text{t}^{[2-3]}$; 我国大田作物每年生产 Cd 超标的农产品达 14.6 亿 kg, Cd 污染农田面积约 27.86 万 hm^2 ^[4]。2002 年和 2003 年农业部稻米及制品质量监督检验测试中心对我国各地稻米质量安全普查结果表明, 稻米重金属 Cd 超标的问题严重。按照我国稻米重金属 Cd 含量 0.2 mg/kg 的限量标准 (GB15201294), 重金属 Cd 的超标率超过 10%, 一些 Cd 污染地区的稻米含 Cd 量高达 0.4 ~ 1.0 mg/kg, 远远超过我国谷物中 Cd 的最高许可含量标准, 威胁到人体健康^[5]。

水稻籽粒中 Cd 积累量存在显著的品种间差异^[6-7], 而这种差异主要是由于根系的形态和生理活性、根表氧化膜以及在体内运输的不同引起的^[8-10]。因此, 可以通过筛选 Cd 富集能力低的品种来减少 Cd 污染土壤中水稻 Cd 含量, 从而降低人类健康风险。另外, 重金属在土壤-植物系统中的迁移还取决于土壤的物理化学性质, Cd 在不同土壤类型中的生物有效性不同, 会影响水稻 Cd 吸收和积累。因此, 探索水稻 Cd 吸收和积累的影响因素并建立起定量关系, 对制定农产

品安全阈值和进行环境风险评估以及提高食品安全性具有重大意义。

1 水稻镉吸收的品种间差异

大量研究表明, 不同水稻品种由于遗传上的差异, 对稻田 Cd 的吸收存在很大差异^[11-14]。蒋彬等^[11]对 239 个水稻品种的研究表明籽粒 Cd 含量变幅为 0.01 ~ 1.99 mg/kg, 差异极显著。宋阿琳等^[12]通过水培试验研究发现 7 种水稻品种 Cd 吸收累积特征差异显著, 汕优 63 相对其他 6 种水稻品种属于高积累水稻品种, 对 Cd 较敏感; 武育粳 3 号属于相对低积累水稻品种, 对 Cd 相对不敏感。不少研究也表明水稻籽粒中 Cd 在不同的水稻类型间达显著性差异。龚伟群等^[13]采用盆栽实验方法证实了相同 Cd 处理下超级稻吸收积累 Cd 显著高于普通杂交稻。仲维功等^[14]对 43 个不同类型水稻品种的研究发现, 精米中 Cd 的富集能力: 常规籼稻 > 杂交籼稻 > 常规粳稻。

水稻吸收 Cd 品种间的差异主要体现在不同品种根表氧化膜、重金属在体内运输以及根的吸收性能差异上。

1.1 根表氧化膜

水稻根系具有向根际释放氧气和氧化物质的能力, 使根际氧化还原电位高于土体。这一特性使渍水

^①基金项目: 农业部公益性行业科研专项 (200903015) 和质检公益性行业科研专项 (200910201-03) 资助。

* 通讯作者 (bsun@issas.ac.cn)

作者简介: 叶新新 (1982—), 男, 安徽滁州人, 博士研究生, 主要从事土壤化学与环境方面的研究。E-mail: xxye@issas.ac.cn

土壤中大量 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 等还原性物质在水稻根表及根质外体被氧化而形成明显可见的铁锰氧化物胶膜。一般认为, 该膜具有特殊的电化学性质, 对重金属离子进入水稻体内起着重要作用^[10]。Liu 等^[15]通过盆栽试验研究发现, Cd 高亲和力的水稻品种(汕优 63)胶膜上 Fe 的浓度低于低亲和力品种(武运 7 号), 这表明铁膜可以作为水稻 Cd 毒害的屏障, 减少根部 Cd 的吸收。一定厚度的胶膜可促进水稻根系对周围介质中元素的吸收, 如果厚度太大, 胶膜则成为元素吸收的阻碍层。如芦苇可形成一层较厚的胶膜, 当其生长在 pH 6.0 的条件下, 胶膜可以作为 Cu 屏障, 而在 pH 3.5 条件下, 胶膜会变薄, 因此会失去胶膜阻碍 Cu 吸收功能^[16]。不同水稻品种对重金属元素的吸收, 还与胶膜中不同离子间的相互作用有关。据报道, 胶膜上吸附的一些阴离子可以与 Cd 形成难溶性沉淀, 从而降低了 Cd 在根际的生物有效性, 使水稻避免了 Cd 的毒害^[17]。

1.2 重金属在体内运输

Cd 从水稻根往地上部运输存在品种间差异。不同水稻品种间 Cd 从根向地上部的运输中存在着极大的差异^[8]。据报道, Cd 长距离运输机制可能与 Zn 很相似, 很可能以配合物或者螯合物的形式被载体运输, 其在植物体中运输与植物的代谢有关。Lasat 等^[19]检测和克隆了 Zn 的载体蛋白基因(ZNT1), 并证明了该基因可以提高 Cd 在植物体内的运输, 其 DNA 序列分析表明, Zn 的载体蛋白基因(ZNT1)与 Fe 的载体蛋白基因(IRT1)有很高的相似性^[18]。而 Cohen 等^[20]报道, IRT1 也会提高二价重金属阳离子(Cd^{2+} 和 Zn^{2+})运输。Salt 和 Kramaer^[21]提出, Zn 的超积累植物也可以积累较高浓度的 Cd 和 Mn。可见, Zn 和 Fe 的转运蛋白对重金属 Cd 不具有特异性识别, 因此, 可以很好地解释为什么植物在成长和繁殖的过程中不需要 Cd, 但是 Cd 在植物体内的积累指数却很高, 甚至超过了必需元素; 另一方面可以说明 Cd 高积累的水稻品种中, 该种金属的转运蛋白基因可能具有较高的表达能力。

1.3 根系

根系是重金属元素进入植物体的门户, 根系的形态性状和生理活性以及根与土壤环境的相互作用都会影响植物对 Cd 的吸收。吴启堂等^[9]水培试验表明, 糙米 Cd 含量较高的水稻品种其单位产量的耗水量、根冠比明显高于糙米含 Cd 量较低的品种。刘敏超等^[10]报道, 因为不同的水稻品种的根有不同的氧化还原能力, 因此可以创造出不同的根际环境, 可以产生不同数量

的有效态 Cd 和矿质营养, 尤其是在淹水的稻田中。

2 土壤类型对水稻镉积累的影响

不同的土壤类型对水稻 Cd 积累特征存在显著差异。黄德乾等^[22]通过温室盆栽试验研究发现稻米中 Cd 含量在 3 种不同性质土壤上大小顺序为: 红壤 > 青紫泥 > 乌栅土。范中亮等^[23]采用盆栽试验方法研究发现不同土壤类型之间籽粒中 Cd 累积差异显著, 水稻土栽培下籽粒中 Cd 的累积量高于潮土。Li 等^[7]对通过种植 Cd 吸收能力不同的两种水稻品种, 研究发现在红壤上两种水稻品种 Cd 的浓度都要高于水稻土。

水稻吸收重金属产生上述差异, 主要与土壤中 Cd 形态有关。按 Tessier 连续浸提法, 土壤固相重金属形态可分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态和残渣态 5 种。可交换态是作物最易吸收的部分, 残渣态通常是被包含在矿物结晶中, 性质非常稳定, 生物可利用性不大, 一般认为其对环境是安全的, 而其他几种形态是被作物间接吸收的。土壤重金属在土壤-植物系统中的迁移与土壤的物理化学性质有关。影响土壤 Cd 的生物有效性的主要理化性质有 pH、Eh、有机质等。

2.1 pH

土壤 pH 是显著影响 Cd 在土壤中的形态变化、迁移及其生物有效性的最重要因子之一。土壤体系 pH 升高以后, 土壤中的黏土矿物、水合氧化物和有机质表面的负电荷数量就会增加, 对 Cd 离子的吸附力因而加强, 同时 Cd^{2+} 在氧化物表面的专性吸附、土壤有机质-金属络合物的稳定性随 pH 升高而加强; 而土壤溶液中的 H^+ 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 浓度会减小, 与 Cd^{2+} 的竞争吸附相应减少, 更有利于土壤吸附 Cd, 同时 pH 升高也会生成 CdCO_3 而被土壤吸附^[24]; 反之则会提高土壤重金属 Cd 生物有效性。Li 等^[25]通过盆栽模拟试验研究发现空气中 CO_2 浓度的提高会降低土壤 pH, 提高 Cd 的活性, 从而增加水稻对 Cd 的吸附, 反之亦然。

2.2 Eh

稻田是一个复杂的体系, 经常处于氧化还原的交替状态, 因此土壤的 Eh 值在很大程度上影响着水稻对 Cd 的吸收。土壤在还原状态下, Cd 可与硫化物形成难溶化合物、与有机质络合、被铁锰氧化物吸附, 使土壤溶液中的 Cd 离子减少, 从而抑制了植物对重金属的吸收。有研究发现^[26]随着 Eh 下降, 植物对 Cd 吸收显著降低, 籽粒 Cd 含量下降。曹仁林等^[4]、张丽娜等^[27]通过盆栽试验研究发现, 全生育期淹水栽培方式下,

水稻糙米中 Cd 含量低于旱作或不同生育期烤田下糙米中 Cd 含量。

2.3 有机质

土壤有机质含量对土壤中重金属生物有效性有着深刻的影响,其含量的多少影响着重金属元素的吸附、络合性能,进而影响土壤中重金属的移动性及其生物有效性。固相有机物能吸附重金属而限制其移动性,可溶性有机物(DOM)可能与重金属形成配合物增加重金属的移动性,提高植物的吸收^[28]。土壤有机质主要为腐殖质,而其中的胡敏酸、胡敏素与金属形成的络合物是不易溶的,这可以减轻金属的危害,但富里酸和金属的络合物却是比较易溶的,可以提高其移动性^[29]。一般来说,提高有机质含量,土壤 Cd 的有效性降低,植物受害症状明显减轻^[30]。

3 生物有效性预测模型

重金属以多种化学形态存在于不同性质/特征的环境介质(水、土壤)中,往往表现出不同的生物有效性,因此,在进行土壤重金属的风险评估、环境质量标准和农产品安全阈值的制定时,仅仅根据重金属总量已不能对生物及其环境效应进行很好预测,必须考虑影响其生物有效性和毒性的特定区域的地球化学特征^[31-32]。目前,常用的预测模型有固液分配模型、植物有效性预测模型和毒性预测模型。

3.1 固液分配模型

土壤重金属的固液分配及其在溶液中的形态是影响重金属积累、移动性(滞留和运输)以及生物有效性的重要因素。土壤中重金属分配和形态与金属本身性质以及土壤固相和液相组分有关。在预测土壤 Cd 的分配和形态中,多种模型已经被应用,从简单的经验关系模型^[33-35]到详细描述土壤表面络合和溶液化学过程的复杂机理模型^[36-37]。

3.1.1 经验模型 一些研究者把 Kd(固液-分配系数 $K_d = \text{吸附态/水溶态}$)与土壤属性值(pH、土壤有机质、黏粒含量、阳离子交换量、铁铝氧化物和锰氧化物)相联系,判定主要影响因素,并提出了一些经验性的预测模型^[38-39];也有通过 Freundlich 方程与具体的土壤性质(pH、黏粒含量、铁铝氧化物和可溶性有机碳)相联系,来预测不同的污染土壤中可溶态和自由离子态 Cd 的浓度^[33,40]。

3.1.2 机理模型 最近,常用于预测土壤 Cd 固液分配的机理模型为多表面模型,它结合了不同活性表面(有机质、黏粒、氢氧化物)的吸附模型。一般对吸附于固相和可溶有机质的 Cd^{2+} ,使用 NICA-Donnan

(Nonideal competitive adsorption Donnan model)模型,对吸附于黏粒矿物的 Cd^{2+} 使用 Donnan 模型(non-specific Donnan type exchange model),而对于氢氧化物使用双边 DDL 模型(two site diffusive double layer model)。多表面模型是 3 种活性表面模型的简单相加,而各种表面的相互作用以及对 Cd^{2+} 吸附的影响被忽略。通过研究^[37,41-42]发现,土壤有机质是最重要的吸附剂,控制着土壤中 Cd^{2+} 的活性,当土壤处于重度重金属污染的情况下,黏粒矿物对 Cd^{2+} 的吸附会增加。

与机理模型相比较,经验模型要求较少的数据输入,因为不需要进行迭代运算,使用较少计算时间。因此,它们极其适合大范围的应用或者当使用的数据比较有限时^[42-43],但是这些模型缺乏普适性。机理模型能对 Cd 的吸附行为有很好的解释,但需要的数据量较大,很难大范围地应用,也有待于完善。

3.2 植物有效性预测模型

植物能吸收并积累土壤中的重金属,通过食物链而进入人体,因而重金属的植物积累预测对农产品安全阈值的制定和人体健康风险评价非常必要。目前,大多数针对土壤固相有效态及溶液金属形态和植物金属吸收的研究,是将生物体内含量与土壤重金属全量或形态及其他影响有效性的土壤性质作相关或者统计分析^[44]。Guo 等^[45]研究台湾受重金属污染的农田中不同水稻品种 Cd 的吸收和积累状况,结果发现土壤 Cd 有效性主要受土壤 pH 和 Cd 总量控制;通过建立糙米 Cd 吸收量和 pH、有机质和 CEC 的多元回归,能够很好预测糙米中 Cd 吸收量。汤丽玲^[46]通过多元回归方程研究不同品种水稻籽粒 Cd 的吸收积累特征,结果发现土壤 Cd 总浓度和 pH 是影响水稻籽粒中 Cd 吸收最重要的因素,该回归模型对水稻籽粒中 Cd 含量的预测能力达到极显著水平。Sterckeman 等^[47]通过 Barber-Cushman 机理模型来预测玉米和遏蓝菜中 Cd 的吸收,研究发现用 0.01 mol/L CaCl_2 溶液浸提的土壤 Cd 作为数量因子,在没有产生植物毒性的污染浓度下模型可以很好地预测玉米中 Cd 的吸收;对于遏蓝菜需要采用较高容量因子(同位素不稳定库和 DTPA 浸提态 Cd)可以较好模拟遏蓝菜 Cd 的吸收。其结果也表明土壤 Cd 容量因子与植物从土壤中吸收 Cd 水平相关。

3.3 土壤重金属生物毒性预测模型

科学家通过大量水环境中金属形态与其生物有效性或毒性关系的研究结果,提出了一系列描述重金属毒性的机理模型,最具代表性是生物配体模型(biotic

ligand model, BLM)。最近生物配体模型已呈现出向陆地环境拓展的趋势, 并且土壤溶液中竞争性阳离子(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})会对植物 Cd 的吸收产生很大影响。Kalis 等^[48]研究了营养液中胡敏酸和竞争性阳离子对黑麦草吸收 Cd 的影响, 结果发现胡敏酸增加了 Cd 在根表的吸附, 这是由于与 DOM 具有较强结合力的阳离子 (Cu、Pb、Fe) 的络合作用可能导致结合力较弱的阳离子 Cd 的吸收增强。Berkelaar 和 Hale^[49]研究培养液中硬质小麦根对 Cd 的积累时, 发现在较高 Cd^{2+} 浓度时柠檬酸盐能增强积累, 当增加 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 时会对柠檬酸盐体系的增强积累效应有所减小。近来有人基于双电层理论用质膜表面电位 (ψ_{PMS}) 来解释阳离子的保护效应, 认为离子 i 通过改变 ψ_{PMS} 来影响质膜表面的离子活度 ($a_{i,\text{PMS}}$), 进而影响金属的生物有效性或毒性, 因此阳离子的保护效应有可能是竞争效应和 ψ_{PMS} 共同作用的结果。BLM 应同时考虑这两方面的因素, 将 BLM 中的本体溶液离子活度 (a_i) 替换为 $a_{i,\text{PMS}}$ 可能更为合理, 将这两种效应同时纳入 BLM 框架将是模型发展研究的新的热点和挑战。

4 研究展望

4.1 加强筛选对多重金属低积累的水稻品种

在治理重金属重度污染的土壤时, 主要应用物理措施、化学方法及生物技术^[50]。在中、轻度污染地区, 可以通过筛选和应用有较高重金属耐性, 同时重金属向籽粒转移较少的水稻品种。此外, 由于土壤的复合污染以及水稻对多种重金属的吸收存在一定的相互关系^[51], 需要加强筛选培育对多种重金属低积累的水稻品种。

4.2 构建预测复杂表面重金属生物有效性的机理模型, 建立基于有效态的土壤重金属安全阈值

经验模型多基于多元回归模型, 通常缺乏普适性, 但有助于了解土壤重金属的化学行为。通过机理模型预测重金属形态和分布是土壤重金属有效性研究的发展方向, 但需要加强对土壤中复杂的组分和作用过程的研究, 如各种天然吸附物质表面的复杂性、各表面间相互作用对重金属吸附的影响机制。影响土壤中重金属形态(水溶性、移动性)的因素都将影响其生物效应(有效性、毒性), 因此土壤性质、土壤环境条件和污染来源等仍是研究重金属植物吸收和毒性的重要因素。

目前, 我国土壤重金属环境质量和风险评估主要建立在重金属总量的基础上, 而很多发达国家都在标准值的制定中结合了有效态含量作为依据^[52]。因

此, 在重金属的风险评估、制定环境质量和农产品安全阈值时, 要综合考虑土壤重金属总量、形态、土壤性质以及环境条件等因素, 利用模型预测产生风险需达到的土壤重金属临界浓度, 进而制定不同地区土壤重金属基准值, 保障农产品的安全生产。

参考文献:

- [1] Huang YZ, Hu Y, Liu YX. Combined toxicity of copper and cadmium to six rice genotypes (*Oryza sativa* L.). J. Environ. Sci., 2009, 21: 647-653
- [2] 潘根兴, Chang AC, Page AL. 土壤-作物系统污染物迁移分配及食品安全评价模型及其应用. 应用生态学报, 2002, 13(7): 854-858
- [3] 周泽义. 中国蔬菜重金属污染及控制. 资源生态环境网络研究动态, 1999, 10(3): 21-27
- [4] 曹仁林, 贾晓葵, 张建顺. 镉污染水稻土防治研究. 天津农林科技, 1999, 12(6): 12-17
- [5] 杨春刚, 廖西元, 章秀福, 朱智伟, 陈铭学, 王丹英, 牟仁祥, 陈温福, 周淑清. 不同基因型水稻籽粒对镉积累的差异. 中国水稻科学, 2006, 20(6): 660-662
- [6] 程旺大, 姚海根, 吴伟, 张国平. 土壤-水稻体系中的重金属污染及其控制. 中国农业科技导报, 2005, 7(4): 51-54
- [7] Li ZW, Li LQ, Pan GX, Che J. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: Soil type versus genotype effects. Plant Soil, 2005, 271: 165-173
- [8] Liu JG, Liang JS, Li KQ, Zhang ZJ, Yu BY, Lu XL, Yang JC, Zhu QS. Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress. Chemosphere, 2003, 52: 1 467-1 473
- [9] 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. 生态学报, 1999, 19(1): 104-107
- [10] 刘敏超, 李花粉, 夏立江, 杨林书. 根表铁锰氧化物胶膜对不同品种水稻吸镉的影响. 生态学报, 2001, 21(1): 598-602
- [11] 蒋彬, 张慧萍. 水稻精米中铅镉含量基因型差异的研究. 云南师范大学学报, 2002, 22(3): 37-40
- [12] 宋阿琳, 娄运生, 梁永超. 不同水稻品种对铜镉的吸收与耐性研究. 农业资源与环境科学, 2006, 22(9): 408-411
- [13] 龚伟群, 李恋卿, 潘根兴. 杂交水稻对Cd的吸收与籽粒积累: 土壤和品种的交互影响. 环境科学, 2006, 27(8): 1 647-1 653
- [14] 仲维功, 杨杰, 陈志德, 王才林, 张永春, 常志州, 周益军. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素 Pb、Cd、Hg、As 积累的差异. 江苏农业学报, 2006, 22(4): 331-338
- [15] Liu JG, Cao CX, Wong MH, Zhang ZJ, Chai YH. Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and

- the relation with plant cadmium uptake. *J. Environ. Sci.*, 2010, 22(7): 1 067-1 072
- [16] Batty LC, Baker AJM, Wheeler BD, Curtis CD. The effect of pH and plaque on the uptake of Cu and Mn in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steudel. *Ann. Bot.*, 2000, 86: 647-653
- [17] 刘文菊, 张西科, 尹君, 刘玉双, 张福锁. 镉在水稻根际的生物有效性. *农业环境保护*, 2000(3): 184-187
- [18] Kabata-Pendias A, Pendias H. *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca Raton, FL.: CRC Press, 1984: 114
- [19] Lasat MM, Pence NS, Garvin DF, Ebbs SD, Kochian LV. Molecular physiology of zinc transport in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *J. Exp. Bot.*, 2000, 51: 71-79
- [20] Cohen CK, Fox TC, Garvin DF, Kochian LV. The role of iron-deficiency stress responses in stimulating heavy-metal transport in plants. *Plant Physiol.*, 1998, 116: 1 063-1 072
- [21] Salt DE, Kramaer U. Mechanisms of metal hyperaccumulation in plants // Raskin H, Ensley BD. *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clear up the Environment*. New York: Wiley, 2000: 231-246
- [22] 黄德乾, 汪鹏, 汪玉军, 周东美. 污染土壤上水稻生长及对 Pb、Cd 和 As 的吸收. *土壤*, 2008, 40(4): 626-629
- [23] 范中亮, 季辉, 杨菲, 吴琦, 张卫建. 不同土壤类型下 Cd 和 Pb 在水稻籽粒中累积特征及其环境安全临界值. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 792-797
- [24] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH 对镉在土水系统中的迁移和形态的影响. *环境科学学报*, 1999, 19(1): 81-86
- [25] Li ZY, Tang S, Deng Xf, Wang RG, Song ZG. Contrasting effects of elevated CO₂ on Cu and Cd uptake by different rice varieties grown on contaminated soils with two levels of metals: Implication for phytoextraction and food safety. *J. Hazard Mater.*, 2010, 177: 352-361
- [26] 鲁如坤, 熊礼明, 时正元. 关于土壤-作物生态系统中镉的研究. *土壤*, 1992, 24(3): 129-132
- [27] 张丽娜, 宗良纲, 付世景, 沈振国. 水分管理方式对水稻在 Cd 污染土壤上生长及其吸收 Cd 的影响. *安全与环境学报*, 2006, 6(5): 49-52
- [28] Salati S, Quadri G, Tambone F, Adani F. Fresh organic matter of municipal solid waste enhances phytoextraction of heavy metals from contaminated soil. *Environ. Pollut.*, 2009: 1-8
- [29] 王宏康. 土壤中有毒元素的环境质量基准研究. *农业环境保护*, 1993, 12(4): 162-165
- [30] Li P, Wang XX, Zhang TL, Zhou DM, He YQ. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil. *J. Environ. Sci.*, 2008, 20: 449-455
- [31] Peijnenburg WJGM, Zablotskaja M, Vijver MG. Monitoring metals in terrestrial environments within a bioavailability framework and a focus on soil extraction. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2007, 67(2): 163-172
- [32] 罗小三, 周东美, 李连祯, 陈怀满. 水、沉积物和土壤中重金属生物有效性/毒性的生物配体模型研究进展. *土壤学报*, 2008, 45(3): 535-543
- [33] Sauvé S, Norvell WA, McBride MB, Hendershot WH. Speciation and complexation of cadmium in extracted soil solutions. *Environ. Sci. Technol.*, 2000, 34: 291-296
- [34] Tipping E, Rieuwertsb J, Panb G, Ashmorec MR, Loftsa S, Hille MTR, Faragob ME, Thorntonb I. The solid-solution partitioning of heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb) in upland soils of England and Wales. *Environ. Pollut.*, 2003, 125: 213-225
- [35] Groenenberg JE, Römken PFAM, Comans RNJ, Luster J, Pampura T, Shotbolt L, Tipping E, de Vries W. Transfer functions for solid-solution partitioning of cadmium, copper, nickel, lead and zinc in soils: Derivation of relationships for free metal ion activities and validation with independent data. *Europ. J. Soil Sci.*, 2010, 61: 58-73
- [36] Weng L, Temminghoff EJM, Lofts S, Tipping E, van Riemsdijk W. Complexation with dissolved organic matter and solubility control of heavy metals in a sandy soil. *Environ. Sci. Technol.*, 2002, 36: 4 804-4 810
- [37] Dijkstra JJ, Meeussen JCL, Comans RNJ. Leaching of heavy metals from contaminated soils: An experimental and modeling study. *Environ. Sci. Technol.*, 2004, 38: 4 390-4 395
- [38] Anderson PR, Christensen TH. Distribution coefficients of Cd, Co, Ni and Zn in soils. *J. Soil Sc.*, 1988, 39: 15-22
- [39] Janssen RPT, Peijnenburg WJGM, Posthuma L, van den Hoop MAGT. Equilibrium partitioning of heavy metals in Dutch field soils. I. Relationship between metal partition coefficients and soil characteristics. *Environ. Toxicol. Chem.*, 1997, 16: 2 470-2 478
- [40] Elzinga EJ, van Grinsven JMM, Swartjes FA. General purpose Freundlich isotherms for cadmium, copper and zinc in soils. *Europ. J. Soil Sci.*, 1999, 50: 139-149
- [41] Weng L, Temminghoff EJM, Van Riemsdijk WH. Contribution of individual sorbents to the control of heavy metal activity in sandy soil. *Environ. Sci. Technol.*, 2001, 35: 4 436-4 443
- [42] Bonten LTC, Groenenberg JE, Weng L, van Riemsdijk WH. Use of speciation and complexation models to estimate heavy metal sorption in soils. *Geoderma*, 2008, 146: 303-310
- [43] De Vries W, Römken PFAM, Bonten LTC. Spatially explicit integrated risk assessment of present soil concentrations of

- cadmium, lead, copper and zinc in the Netherlands. *Water, Air and Soil Pollut.*, 2008, 191: 199–215
- [44] Ge Y, Murray P, Hendershot WH. Trace metal speciation and bioavailability in urban soils. *Environ. Pollut.*, 2000, 107(1): 137–144
- [45] Guo HY, Liu TS, Chu CL, Chiang CF, Römken PF. Prediction of heavy metal uptake by different rice species in paddy soils near contaminated sites of TaiWan. [2009-04-08]. <http://www.agnet.org/library/eb/598/>
- [46] 汤丽玲. 作物吸收 Cd 的影响因素分析及籽实 Cd 含量的预测. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 699–703
- [47] Sterckeman T, Perriguet J, Caël M, Schwartz C, Morel JL. Applying a mechanistic model to cadmium uptake by *Zea mays* and *Thlaspi caerulescens*: Consequences for the assessment of the soil quantity and capacity factors. *Plant Soil*, 2004, 262: 289–302
- [48] Kalis EJ, Temminghoff EJ, Weng L, van Riemsdijk WH. Effects of humic acid and competing cations on metal uptake by *Lolium perenne*. *Environ. Toxicol. Chem.*, 2006, 25(3): 702–711
- [49] Berkelaar E, Hale BA. Accumulation of cadmium by durum wheat roots: Bases for citrate-mediated exceptions to the free ion model. *Environ. Toxicol. Chem.*, 2003, 22(5): 1155–1161
- [50] Wang KR. Tolerance of cultivated plants to cadmium and their utilization in polluted farmland soils. *Acta Biotechnol.*, 2002, 22: 189–198
- [51] Cheng WD, Zhang GP, Yao HG, Wu W, Xu M. Genotypic and environmental variation in cadmium, chromium, arsenic, nickel and lead concentrations in rice grains. *J. Zhejiang Uni. Sci.*, 2006, 7(7): 565–571
- [52] Reiley MC. Science, policy, and trends of metals risk assessment at EPA: How understanding metals bioavailability has changed metals risk assessment at US EPA. *Aquat. Toxicol.*, 2007, 84(2): 292–298

Reviews on the Effects of Rice Cultivars and Soil Types on Cd Absorption and Prediction Model for Cd Bioavailability

YE Xin-xin^{1,2}, SUN Bo¹

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Cadmium in paddy soils may be absorbed by the plant once the soils was polluted by cadmium, which can also enter the human body through the food chain and thus threat to human health. Rice cultivars and soil types have significant influences on cadmium absorption and accumulation. Therefore, the effect of cadmium bioavailability and different rice cultivars on cadmium absorption need to be considered during establishing the safety threshold of agricultural products and assessing human health risk. This paper reviewed the influence of rice cultivars and soil types on cadmium absorption and accumulation, and described the prediction model which often used for bioavailability of heavy metal currently. We wish it could provide effective tools for the environmental risk assessment, the establishment of soil environment quality standards and agricultural product safety threshold, and also could provide the reference for the production of safety green rice.

Key words: Rice, Cadmium, Bioavailability, Model