

复合污染重金属在水稻不同部位的积累转运*

刘志彦^{1,2}, 田耀武³, 陈桂珠¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;

2. 聊城大学环境与规划学院, 山东 聊城 252059;

3. 河南科技大学林学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 通过在广东大宝山矿区 Fe、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 复合污染土壤中进行大田试验, 研究了 6 种金属元素在杂交稻、常规稻和糯稻 3 个水稻品系 (共 21 个水稻品种) 的稻米、谷壳、稻草、根、铁膜以及根系各部位的积累转运规律。结果表明, 6 种供试金属元素在水稻体内含量均为地下部 (根系) > 地上部。水稻各部位金属含量指标中, 大部分指标品系间含量差异极显著 ($P < 0.01$)。常规稻和糯稻稻米对 Fe、Cu、Zn、Pb 和 Cd 的积累能力均高于杂交稻, 但杂交稻稻米对 As 的积累能力高于其它两个品系。在 Fe、Cu、Zn、Pb 和 Cd 污染土壤中较适宜种植杂交稻; 在 As 污染土壤则较适宜种植糯稻。Zn、Pb 和 As 在水稻不同部位的富集系数均为根系 > 稻草 > 谷壳 > 稻米; Fe、Cu 和 Cd 的富集系数均为根系 > 稻草 > 稻米 > 谷壳。除 Cu 外, 其余 5 种金属元素 Fe、Zn、Pb、As 和 Cd 在铁膜的富集系数均高于根部。铁膜对不同金属的富集能力不同, 排序为 Cd > As > Fe > Zn > Pb > Cu。

关键词: 复合污染; 水稻; 品系; 积累; 转运

中图分类号: X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2010) 02-0138-07

Accumulation and Translocation of Combined Heavy Metals in Different Parts of Rice

LIU Zhiyan^{1,2}, TIAN Yaowu³, CHEN Guizhu¹

(1. School of Environmental Science and Engineering,

Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. College of Environment & Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;

3. College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: The accumulation and translocation of metals Fe, Cu, Zn, Pb, As and Cd in different parts (rice core, rice hull, straw, root, iron plaque and root system) of 21 rice varieties referred to three common rice cultivars (hybrid, conventional and glutinous) were studied through the field experiment in heavy metal polluted soils in the Dabao Mountain of Shaoguan, Guangdong province. The contents of the six experimental metals were higher in underground parts (root system) than in overground parts. Metal concentrations in different parts of rice showed significant differences among various rice cultivars ($P < 0.01$). Conventional and glutinous rice had stronger ability to accumulate Fe, Cu, Zn, Pb and Cd than hybrid rice. Hybrid rice had stronger ability to accumulate As than the other two cultivars. Hybrid rice was more applicable to Fe, Cu, Pb, Zn and Cd polluted soils. Glutinous rice was more applicable to As polluted soils. The accumulation factors of Zn, Pb and As followed the order of root system > straw > rice hull > rice core. The accumulation factors of Fe, Cu and Cd followed the order of root system > straw > rice core > rice hull. The values of accumulation factors of Fe, Zn, Pb, As and Cd are higher in iron

* 收稿日期: 2009-04-13

基金项目: 教育部 985 工程环境与污染控制科技创新平台资助项目

作者简介: 刘志彦 (1979 年生), 女, 博士; 通讯作者: 陈桂珠; E-mail: chenguizhu@yeah.net

plaque than in root, with the exception of Cu. The ability to accumulate different metals by iron plaque was different, with the rank of $Cd > As > Fe > Zn > Pb > Cu$.

Key words: combined pollution; rice; cultivar; accumulation; translocation

矿床开采规模的不断扩大, 所产生的大量酸性废水和尾矿中含有的 Fe、Cu、Zn、Pb、As、Cd 等金属元素一起进入地表, 使矿区周边土壤受到严重的重金属污染^[1-3]。水稻是世界上许多地方, 特别是东南亚地区最稳定的食物来源^[4]。因此水稻的食品安全问题一直以来备受学者们的关注。水稻种植在重金属污染土壤或用受污染水源灌溉后会通过食物链危害人类健康^[4,5], 重金属在土壤—水稻系统中的积累转运规律早已引起人们普遍的关注^[6-11]。有关水稻品系的研究主要集中于其农艺特性、生理生化等方面^[12-15]。不同水稻品系对外界逆境环境如不同淹涝程度、酸雨、病虫害等所表现的抗性也不相同^[13,15]。不同水稻品系对复合污染重金属积累转运规律的相关研究并不多见。目前有关重金属对植物(农作物)污染的研究中, 多集中于单一重金属污染对植物的影响, 有关重金属复合污染的研究, 多数也仅限于 2-3 种元素之间的复合作用, 四种以上重金属复合污染的报道还相对较少^[16]。而且以往的研究也多数以室内模拟为主。大田实验外界影响因素较多, 人为控制实验条件较为困难, 管理起来比较繁琐, 相对而言研究报道较少。但是水稻在室内模拟条件下和大田实验条件下, 其生长状况、对重金属元素的吸收、积累和转运往往具有一定的差异^[17-20]。研究在大田实验条件下不同水稻品系对重金属的积累转运不仅对于室内模拟实验是必不可少的验证与补充, 对于实际生产也具有更加可靠的指导意义。

本文针对广东大宝山矿区 Fe、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 复合污染较为严重的特点, 选用广东及华南地区较为常见的杂交稻、常规稻和糯稻 3 个水稻品系(共 21 个水稻品种)在矿区受污染土壤进行大田实验, 研究 Fe、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 6 种重金属元素在不同水稻品系的积累转运规律, 从而为矿区重金属污染大田土壤中水稻的种植以及低积累、高耐性水稻品系(品种)的选育等提供更加准确的理论指导与依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

1.1.1 土壤 实验设在广东北部韶关大宝山矿区周边某地受重金属污染的水稻田内。水稻田土壤重

金属含量本底值为: As 69.0, Fe 29778.1, Cu 328.6, Pa 231.3, En 272.9, Cd 0.874。

1.1.2 水稻品种 本实验所用杂交稻、常规稻和糯稻 3 个水稻品系, 共 21 个水稻品种。杂交稻包括 II 优 804、优优 998、五丰优 128、秋优 166、天优 116、两优培九、五丰优 2168; 常规稻包括丰富占、美香占、黄丝占、华新占、矮华占、黄美占、黄华占; 糯稻包括糯 H、广州糯、耘糯、糯 GW、黄壳糯、杂优糯、糯 CY。

1.2 实验方案

1.2.1 育苗 将水稻种子用 30% H_2O_2 浸泡 15min, 用去离子水洗净, 催芽后在潮湿的珍珠岩中培育 21d。

1.2.2 种植 将 21 个水稻品种的幼苗采用随机区组设计种植。每个品种每个重复种植 0.5 m^2 , 分为 8 穴, 每穴 2 株, 共 16 株。每个品种进行 4 个重复, 即每个品种种植 64 株苗。供试 21 个品种共种植 1 344 株苗, 占地 42 m^2 。种植前向土壤中施入底肥, 在分蘖期和抽穗期分别施肥。每次施用化肥用量约 1.67/kg km^2 , 其中, 尿素(46% N) 0.4kg, 磷酸二铵(18% N, 46% P_2O_5) 0.3kg, 硫酸钾(33% K_2SO_4) 0.4 kg, N:P:K 比为 2:1:1.2。

1.2.3 收获及水稻处理 由于水稻品种不同, 成熟期不一致, 因此在大部分水稻品种的籽实成熟后, 在同一天进行收获(生长期为 140 d), 以保证生长时间相同。将水稻各组织分为 6 部分进行分析, 地上部分包括稻米、谷壳和稻草, 地下部分包括根、铁膜和根系。其中根表示除铁膜外的根部组织, 根系为根与铁膜组成的整体。将水稻用超纯水洗净, 将其地上部分与地下部分分开。地上部分于 65 $^{\circ}C$ 烘箱中烘干至恒重, 待测。地下部分(即根系)取 0.2 g 左右的根样, 采用“DCB”法提取根表铁膜^[21]。具体步骤如下:

(1) 配制 0.03 M 的柠檬酸钠($Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$)与 0.125 M 的碳酸氢钠($NaHCO_3$)混合溶液, 即为 DCB 溶液。

(2) 将待提铁膜根样放入 50 mL 的三角瓶中, 每个样品中加入 30 mL DCB 溶液, 再加入连二代硫酸钠($Na_2S_2O_4$) 0.6 g。放置 1 h, 期间每隔 15 min 摇动一次。

(3) 提取完成后, 将溶液过滤定容至 50 mL,

待测。

(4) 将提过铁膜的根用超纯水洗净, 于 65 °C 烘箱中烘干至恒重, 待测。

将烘干后的稻米、谷壳、稻草、根部样品剪碎分别称量 0.2 g 放入消化管中, 加入 5 mL 浓硝酸 (超级纯), 浸泡过夜; 将温度升至 80 °C 消解 1 h, 然后在 120 ~ 130 °C 消解 24 h; 冷却后用超纯水定容, 待测。

用 ICP 测定仪测定稻米、谷壳、稻草、根消解液及根表铁膜提取液中 Fe、Cu、Zn、Pb、Cd 等金属元素含量, 然后用原子荧光光度计 (AFS-820, 北京吉天仪器有限公司) 测定待测液中 As 的浓度。为了进行质量控制, 测试样品中包含空白和标准物质 GBW (0763) (地矿部物化探研究所)。

1.3 数据处理

$$\text{富集系数} = \frac{\text{植物体内重金属质量}}{\text{土壤中重金属质量}} \times 100\%$$

采用 SAS8.0 及 Excel 软件对数据进行统计分析。

2 结果

2.1 不同金属元素在供试水稻品系各部位的积累

2.1.1 Fe 在供试水稻品系各部位的含量 图 1 为 Fe 在供试水稻品系不同部位的积累量。由图 1 可知: 3 个供试水稻品系稻米、谷壳和稻草中 Fe 含量差异均不显著 ($P > 0.05$)。根中 Fe 的含量差异极显著, 3 个品系由高到低顺序如下: 杂交稻 > 常规稻 > 糯稻 ($P < 0.0001$)。铁膜中 Fe 含量远远高于根中 Fe 含量, 杂交稻、常规稻和糯稻铁膜中 Fe 含量分别为根中 Fe 含量的 2.4 倍, 8.7 倍和 14.3 倍。三个品系高低排序为常规稻 > 糯稻 > 杂交稻 ($P < 0.0001$)。根系中 Fe 含量以常规稻最高, 显著高于其它两个品系 ($P = 0.0004$), 杂交稻和糯稻差异不显著。

2.1.2 Cu 在供试水稻品系各部位的含量 图 2 为 Cu 在供试水稻品系不同部位的积累量。由图 2 可知: 杂交稻、常规稻和糯稻的稻米中 Cu 含量差异极其显著, 常规稻 > 糯稻 > 杂交稻 ($P = 0.004$)。谷壳中常规稻和糯稻 Cu 含量差异不显著, 二者显著高于杂交稻 ($P = 0.016$)。稻草中杂交稻和常规稻 Cu 含量差异不显著, 二者显著高于糯稻 ($P = 0.018$)。三个品系根、铁膜和根系中 Cu 含量差异均不显著 ($P > 0.05$)。

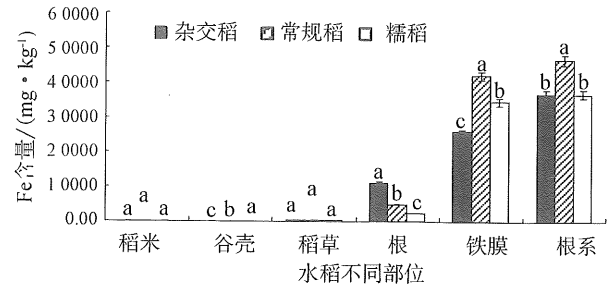


图 1 供试水稻品系不同部位 Fe 含量

Fig. 1 Fe concentrations in different parts of the experimental rice cultivars

(字母为邓肯多重比较结果, 字母不同者表示差异显著, $P < 0.05$; 下同)

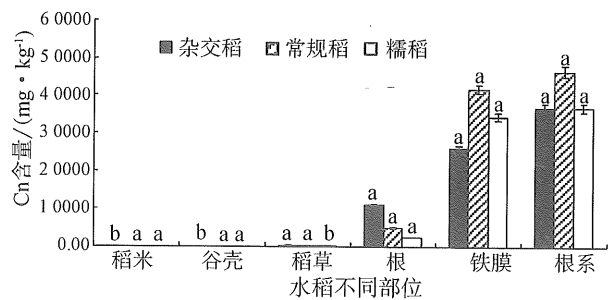


图 2 供试水稻品系不同部位 Cu 含量

Fig. 2 Cu concentrations in different parts of the experimental rice cultivars

2.1.3 Zn 在供试水稻品系各部位的含量 图 3 为 Zn 在供试水稻品系不同部位的积累量。由图 3 可知, 稻米和谷壳中 Zn 含量排序均为糯稻 > 常规稻 > 杂交稻 ($P < 0.0001$)。稻草中 Cu 含量为杂交稻 > 常规稻 > 糯稻 ($P = 0.047$)。三个水稻品系根中 Cu 含量高低排序与稻草相同 ($P = 0.0002$)。铁膜和根系中 Zn 含量排序均为糯稻 > 常规稻 > 杂交稻 ($P < 0.0001$)。

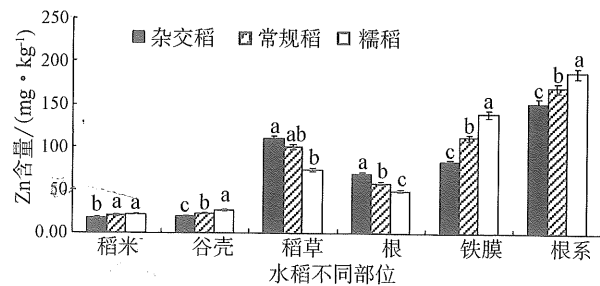


图 3 供试水稻品系不同部位 Zn 含量

Fig. 3 Zn concentrations in different parts of the experimental rice cultivars

2.1.4 Pb 在供试水稻品系各部位的含量 由图 4 可知, 糯稻的稻米中 Pb 的含量最高, 与常规稻差

异不明显，二者显著高于杂交稻 ($P < 0.000 1$)。三个品系稻草中 Pb 含量以杂交稻最高，但与常规稻差异不明显，二者显著高于糯稻 ($P = 0.000 3$)。根和根系中 Pb 含量均为杂交稻 > 常规稻 > 糯稻 ($P < 0.000 1$)。

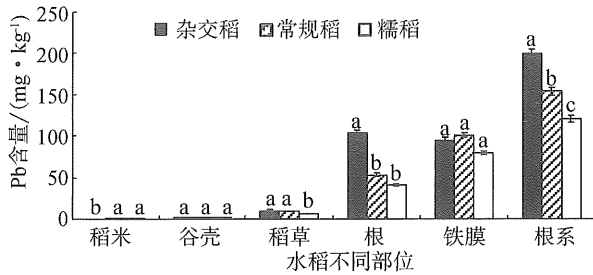


图 4 供试水稻品系不同部位 Pb 含量
Fig. 4 Pb concentrations in different parts of the experimental rice cultivars

2.1.5 As 在供试水稻品系各部位的含量 图 5 为 As 在杂交稻、常规稻和糯稻三个水稻品系不同部位的积累量。由图 5 可知：三个品系的稻米和谷壳中 As 含量差异均不显著 ($P > 0.05$)，由高到低排序分别为：杂交稻 > 常规稻 > 糯稻，糯稻 > 常规稻 > 杂交稻。稻草和根中 As 的积累量三个品系大小变化趋势相同：杂交稻与常规稻差异不显著，二者均极显著高于糯稻 ($P < 0.01$)。常规稻根系 As 的积累量是三个品系中最高的，达 272.02 mg/kg；杂交稻与糯稻差异不明显，二者显著低于杂交稻 ($P = 0.000 3$)。三个品系铁膜中 As 含量差异极显著 ($P = 0.000 2$)，常规稻 > 糯稻 > 杂交稻。

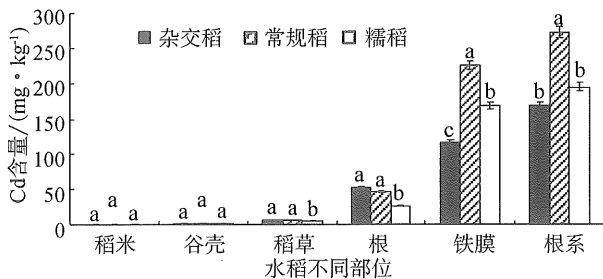


图 5 供试水稻品系不同部位 As 含量
Fig. 5 As concentrations in different parts of the experimental rice cultivars

2.1.6 Cd 在供试水稻品系各部位的含量 图 6 为 Cd 在供试水稻品系不同部位的积累量。由图 6 可知：3 个供试品系稻米中 Cd 含量以糯稻最高，且与常规稻差异不明显，二者显著高于杂交稻 ($P < 0.000 1$)。三个品系谷壳、稻草和根中 Cd 含量由

高到低排序相同，均为杂交稻 > 常规稻 > 糯稻 ($P < 0.05$)。铁膜和根系中 Cd 含量均为常规稻 > 杂交稻 > 糯稻。

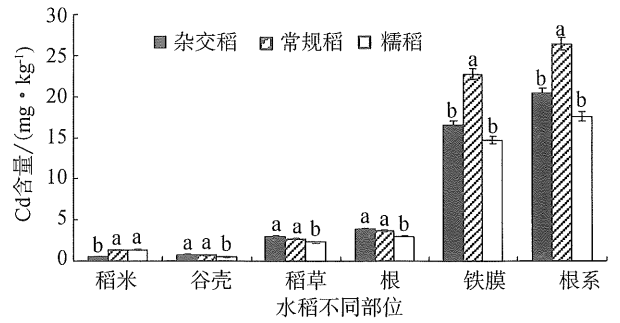


图 6 供试水稻品系不同部位 Cd 含量
Fig. 6 Cd concentrations in different parts of the experimental rice cultivars

2.2 不同金属元素在供试水稻各部位的富集系数

表为不同金属元素供试水稻体内不同部位的富集系数。如图 7 所示，Zn、Pb 和 As 在水稻不同部位的富集系数为根系 > 稻草 > 谷壳 > 稻米；Fe、Cu 和 Cd 的富集系数为根系 > 稻草 > 稻米 > 谷壳；除 Cu 外，其余金属元素在铁膜的富集系数均高于根部。地上部分的谷壳和稻草中各金属元素的富集能力高低排序相同，均为 Cd > Zn > As > Cu > Pb > Fe；稻米中略有不同，为 Cd > Zn > Cu > As > Pb > Fe。地下部分铁膜和根系各金属元素的富集能力高低排序大致相同，分别为 Cd > As > Fe > Zn > Pb > Cu 和 Cd > As > Fe > Pb > Zn > Cu，但却与根部 (Cd > As > Cu > Pb > Zn > Fe) 明显不同。

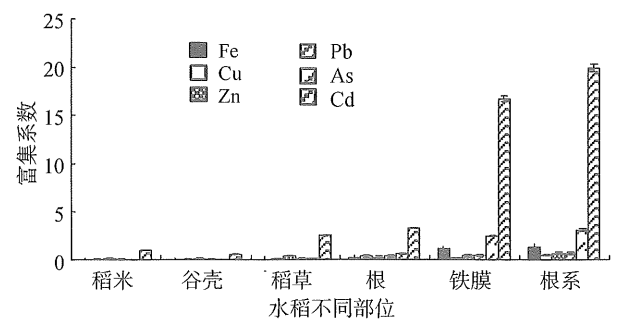


图 7 不同金属元素在水稻不同部位的富集系数
Fig. 7 The accumulation factors of different metals in different parts of rice

3 讨论

3.1 不同金属元素在水稻各部位的积累

本文结果表明，不同金属元素在水稻各部位含

量高低顺序如下: 稻米为 $Fe > Zn > Cu > Cd > Pb > As$; 谷壳为 $Zn > Fe > Cu > Pb > As > Cd$; 稻草为 $Fe > Zn > Cu > Pb > As > Cd$; 根中为 $Fe > Cu > Pb > Zn > As > Cd$; 铁膜为 $Fe > As > Zn > Pb > Cu > Cd$; 根系为 $Fe > As > Zn > Pb > Cu > Cd$ 。由此可见, 在水稻的不同部位, 不同金属元素的含量高低排序并不相同。这取决于各元素在植物体内的积累与传输特性, 不仅受到各元素生物地球化学性质的影响, 又受到元素在植物体内的吸收机制及生理生化过程的影响, 同时元素间的相互作用也对各金属元素的吸收积累起到了一定程度的影响^[22]。六种金属元素在水稻体内含量均为地下部 > 地上部, 这与众多学者的研究结论一致^[6,8,23]。

本研究涉及水稻各部位金属含量指标中, 大部分指标品系间含量差异极显著 ($P < 0.01$)。如 Pb、Cd 和 Zn 在水稻各部位含量品系间差异均极显著, Fe 在水稻地下部分(根、铁膜及根系), Cu 在水稻的地上部分(稻米、谷壳、稻草)以及 As 在水稻稻草以及地下部分的含量品系间差异均极显著。这与以往学者研究认为水稻品种不同对重金属吸收积累不同具有一致性。如冯文强等利用盆栽实验研究了四川 20 个水稻育种材料对外源污染物 Pb、Cd 的吸收能力及这两种重金属在稻草和稻米中的分配差异, 结果表明, 在 Pb 或 Cd 胁迫下, 水稻不同基因型对其吸收存在明显差异^[24]。又如吴启堂等人利用盆栽和水培实验研究水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理时发现, 水稻的不同品种对 Cd 的吸收累积具有明显差异, 食用部位含 Cd 量可相差 1 倍以上^[25]。本文研究结果中水稻各部位金属含量个别指标品系间差异不显著, 如 Fe 在三个水稻品系地上部分中的含量, Cu 在三个水稻品系地下部分中的含量以及 As 在 3 个水稻品系稻米和谷壳中的含量。一方面本研究是在大田实验条件下进行, 不可控因素较多, 而以往的研究也表明大田实验条件与室内模拟实验(盆栽或水培实验)条件下水稻的生长状况以及对重金属元素的吸收、积累和转运往往具有一定的差异^[17-21]; 其次供试土壤属于矿山重金属复合污染, 成分复杂, 各金属间存在较为复杂的交互作用, 有研究表明复合污染土壤中重金属在土壤-植物系统中的迁移积累比单一污染要复杂得多, 重金属种类多少以及浓度大小对其在植物体内的积累均有一定影响^[16]; 以往的研究多集中于重金属在水稻地上一地下两部分或稻米-稻草-根系三部分中的积累, 本研究将水稻分为六部分, 对不同金属元素在水稻每一部位的积累特

性进行研究, 使研究内容及所得结论更加复杂。另一方面, 尽管供试土壤 Fe 元素含量较高, 但对植物毒性不强; 本研究供试土壤 Cu 含量 (328.6 mg/kg) 未超过我国土壤最大允许浓度 (400.0 mg/kg)^[16], 可能未对水稻造成较大的毒性作用; 另外 As 与 P 是同族元素, 与 P 具有相似的理化特性, 低浓度时会对植物生长起到促进作用^[23]。综合以上原因, 本实验中 Fe、Cu 和 As 在某种程度上可以作为营养元素而非毒性元素供给植物生长。尽管水稻品系有所不同, 但其对同种营养素的需求相差不会太大。因此这些可能是导致 Fe、Cu 和 As 在 3 个水稻品系某部位含量差异不显著的重要有因。尽管 Zn 也属于植物必须元素, 但由于其活泼的化学特性, 在本实验中可能对植物产生了较为严重的毒性作用, 因此与毒性元素 Pb、Cd 表现出相同的积累特性, 在水稻各部位积累量品系间差异均极显著。其作用机理以及其它影响因素有待于以后进行更加深入细致的研究论证。

3.2 不同金属元素在供试水稻品系稻米中的积累

不同金属元素在 3 个供试水稻品系稻米中含量排序如下: Cu 和 Cd 均为常规稻 > 糯稻 > 杂交稻; Zn 和 Pb 均为糯稻 > 常规稻 > 杂交稻; Fe 为糯稻 > 杂交稻 > 常规稻; As 为杂交稻 > 常规稻 > 糯稻。由此可见, 常规稻和糯稻的稻米对 Cu、Zn、Pb、Cd、Fe 的积累能力较高, 杂交稻则较低, 但杂交稻稻米对 As 的积累能力高于其它两个品系。Rahman 等在温室条件下对孟加拉国不同品系(品种)水稻对 As 的积累转运规律进行的研究结果也表明, As 由杂交稻品种的根部转移至稻草、谷壳的能力要强于非杂交稻品种^[7]。因此, 在 Fe、Cu、Zn、Pb、Cd 污染土壤中较适宜种植杂交稻品种; 在 As 污染土壤中则不适宜种植杂交稻品种, 而应种植非杂交稻品种(糯稻最优, 常规稻次之)。这与本文作者等利用琼脂培养基模拟水稻厌氧的环境条件下研究不同品系水稻对 As 的积累转运规律所得结论具有一致性^[23]。

3.3 不同金属元素在水稻体内的富集系数

不同金属元素在稻米和谷壳中的富集系数相差并不大, 但不同金属元素在地上部与地下部的富集能力大小排序有较大区别。这说明即便是同种元素, 其由土壤转移至根系与由根系转移至地上部的能力不同, 通常情况下前者大于后者。有研究表明, 被根系吸收后的金属元素还有一部分通过原生质的流动运送给邻近的细胞, 并通过胞间运输, 穿过根部的中柱鞘输送到导管中, 然后植物的蒸腾作

用促使原生质连同金属元素一同向地上部迁移, 随后积累于地上部的茎叶和籽实中^[26]。在此积累转运过程中, 根部起着吸收金属元素的重要作用, 由于根中的细胞壁上存在有大量的交换位点, 可以将金属离子固定于此。因此大多数的重金属进入水稻体内后, 大部分被积累固定于根部, 很少向地上部迁移^[27-28]。

富集系数一方面反映了植物对重金属富集程度的高低或富集能力的强弱, 另一方面在一定程度上反映了土壤—植物系统元素迁移的难易程度^[29]。有研究表明 Cd 进入土壤主要以物理化学吸附为主, 与土壤中的 OH^- 和 Cl^- 形成络离子则易于移动^[26]。本研究结果也显示与其它元素相比 Cd 在水稻的各部位更加容易富集, 且迁移能力较强。吴燕玉等人研究 Cd、Pb、Cu、Zn 和 As 复合污染在农田生态系统的迁移动态时也表明水稻对 Cd 的吸收率(地上部分污染物带走量与施入污染物质之比)比其它元素更高, 并且 Cd 在其它作物小麦、大豆中也表现出相同的富集特性^[30]。土壤中 Pb 主要以化学吸附为主, Pb 与土壤中的 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 离子形成溶解度较小的 PbCO_3 、 $\text{Pb}_3(\text{SO}_4)_2$ 和 PbSO_4 , 因此在土壤中较难移动^[26,31]。由本文结果也可看出 Pb 在水稻各部位的富集能力均较弱。例如王新等在研究 Cd-Pb 复合污染在土壤—水稻系统中的生态效应时表明 Cd 比 Pb 元素更易于向地上部分迁移, Pb 元素大部分积累于水稻根部^[26]。As 较易在根系富集, 但不宜向地上部迁移, 这与众多学者的研究结论一致^[8,32]。由本研究结果可看出除 Cu 外, 其余金属元素在铁膜的富集系数均高于根部, 且铁膜对不同金属的富集能力不同。本研究中铁膜对不同金属的富集能力排序如下: $\text{Cd} > \text{As} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu}$ 。本文结果支持以往学者的观点, 即水稻等禾本科湿地植物通过根系表层铁膜的吸附作用将一部分金属固定于铁膜中, 植物根表红棕色的铁膜可能是植物吸收重金属的屏障, 即根系吸收金属后, 主要被固定于根表铁膜中^[21,33]。

4 结 论

(1) 复合污染土壤中, 各金属元素 Fe、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 在水稻体内含量均为地下部(根系) > 地上部。水稻各部位重金属含量指标中, 大部分指标品系间含量差异极显著。

(2) 常规稻和糯稻对 Fe、Cu、Zn、Pb、Cd 的积累能力较高, 杂交稻则较低。但杂交稻对 As 的积累能力高于其它两个品系。在 Fe、Cu、Zn、Pb、

Cd 污染土壤中较适宜种植杂交稻品种; 在 As 污染土壤较适宜种植糯稻, 不适宜种植杂交稻。

(3) Zn、Pb 和 As 在水稻不同部位的富集系数为根系 > 稻草 > 谷壳 > 稻米, Fe、Cu 和 Cd 的富集系数为根系 > 稻草 > 稻米 > 谷壳。

(4) 除 Cu 外, 其余金属元素 (Fe、Zn、Pb、As、Cd) 在铁膜的富集系数均高于根部。铁膜对不同金属的富集能力不同, 本研究中铁膜对不同金属的富集能力排序如下: $\text{Cd} > \text{As} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu}$ 。

参考文献:

- [1] 徐卓. 土壤中镉铜复合污染对水稻生长效应的影响[J]. 农村生态环境, 1993 (3): 48-64.
- [2] 蔡美芳, 党志, 文震, 等. 矿区周围土壤中重金属危害性评估研究[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 6-8.
- [3] 李惠英, 陈素英, 王骞. 土壤中镉、铅、铜、锌复合污染生态效应的研究[J]. 生态农业研究, 1993, 1(3): 69-73.
- [4] ABEDIN M J, FELDMANN J, MEHARG A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice plants[J]. Plant Physiology, 2002, 128(3): 1120-1128.
- [5] 刘春阳, 张宇峰, 崔志强. 土壤中重金属污染修复的研究进展[J]. 江苏环境科技, 2005, 18(增刊): 139-141.
- [6] SIMMONS R W, PONGSAKUL P, SAIYASITPANICH D, et al. Elevated levels of cadmium and zinc in paddy soils and elevated levels of cadmium in rice grain downstream of a zinc mineralized area in Thailand: Implication for public health[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2005, 27(5/6): 501-611.
- [7] RAHMAN M A, HASEGAWA H, RAHMAN M M, et al. Arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) varieties of Bangladesh: a glass house study[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2007, 185(1): 53-61.
- [8] 刘文菊, 胡莹, 毕淑芹, 等. 苗期水稻吸收和转运砷的基因型差异研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(6): 356-360.
- [9] SAHRAWAT K L. Iron toxicity in wetland rice and the role of other nutrients[J]. Journal of Plant Nutrients, 2004, 27(8): 1471-1504.
- [10] TSUTSUMI M. Intensification of arsenic toxicity to paddy rice by hydrogen sulfide and ferrous iron: I. Induction of bronzing and iron accumulation in rice by arsenic[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1980, 26(4): 561-569.
- [11] TSUTSUMI M. Comparative toxicity of arsenite and arsenate to the rice seedling under various levels of phosphate supply[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1983, 29(1): 63-69.
- [12] 王建林, 徐正进, 马殿荣. 北方杂交稻与常规稻籽粒

- 灌浆特性的比较[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(5): 425-430.
- [13] 陈永华, 赵森, 严钦泉, 等. 不同淹涝胁迫强度对杂交稻和常规稻农艺性状和生化特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(5): 512-516.
- [14] 刘宇峰, 萧浪涛, 童建华, 等. 超级杂交稻与常规稻剑叶维管组织结构比较研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(7): 151-155.
- [15] 黎华寿, 聂呈荣, 胡永刚. 模拟酸雨对杂交稻常规稻野生稻影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 284-287.
- [16] 宗良纲, 丁园. 土壤重金属(Cu Zn Pb)复合污染的研究现状[J]. 农业环境保护, 2001, 20(2): 126-128.
- [17] CREGER T L, PERVEY F J. Phosphate fertilizer enhances arsenic uptake by apricot liners grown in lead-arsenate-enriched soil[J]. American Society for Horticultural Science, 1994, 29(2): 88-92.
- [18] JIANG Q Q, SINGH B R. Effect of different forms and arsenic on crop yield and arsenic concentration[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1994, 74(3): 1573-2932.
- [19] WOOLSON E A, AXLEY J H, KEARNY P C. The chemistry and phytotoxicity of arsenic in soils: II. Effects of time and phosphorus[J]. Soil Science Society of America Journal, 1973, 37(2): 254-259.
- [20] WOOLSON E A. Effect of fertilizer materials and combinations on the phytotoxicity, availability and content of arsenic in corn (maize)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1972, 23: 1477-1481.
- [21] LIU W J, ZHU Y G, HU Y, et al. Arsenic sequestration in iron plaque, its accumulation and speciation in mature rice plants (*Oryza sativa* L.)[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40(18): 5730-5736.
- [22] 余国营, 吴燕玉, 王新. 重金属复合污染对大豆生长的影响及其综合评价研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 433-439.
- [23] 刘志彦, 陈桂珠, 田耀武. 不同水稻品系幼苗对砷(As)的吸收、积累及转运[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3228-3235.
- [24] 冯文强, 涂仕华, 秦鱼生, 等. 水稻不同基因型对铅镉吸收能力差异的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 447-451.
- [25] 吴启堂, 陈卢, 王广寿. 水稻不同品种对Cd吸收积累的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 104-107.
- [26] 王新, 梁仁禄, 周启星. Cd-Pb复合污染在土壤-水稻系统中生态效应的研究[J]. 农村生态环境, 2001, 17(2): 41-44.
- [27] 马成仓, 洪法水. Hg浸种对玉米种子萌发过程中几种酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 1997, 8(1): 110-112.
- [28] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 84-85.
- [29] 唐立娟, 赵明宪, 庄国臣. 铜的单元及复合污染中水稻对Cu吸收累积规律的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4): 503-504.
- [30] 吴燕玉, 王新, 梁仁禄, 等. Cd、Pb、Cu、Zn、As复合污染在农田生态系统的迁移动态研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(4): 407-414.
- [31] 史瑞和, 鲍士旦, 秦怀英, 等. 土壤农化分析[M]. 2版. 北京: 农业出版社, 1994: 213-215.
- [32] 崔瑞平. 砷(As)在整株水稻各部位的分布研究[J]. 贵州环保科技, 1995, 1(1): 31-32.
- [33] TAYLOR G J, CROWDER A A. Uptake and accumulation of heavy metals by *Typha latifolia* L. in wetlands of Sudbury, Ontario region[J]. Canadian Journal of Botany, 1983, 61(11): 63-73.