

水稻对重金属的吸收特性及其影响因素

韩娟英¹ 张宁² 舒小丽^{2*} 吴殿星²

(¹ 余姚市种子管理站, 浙江 余姚, 315400; ² 浙江大学原子核农业科学研究所, 杭州 310029; 第一作者: 1293288389@qq.com;

* 通讯作者: shuxl@zju.edu.cn)

摘要: 土壤重金属污染严重影响稻米的质量安全。水稻品种、重金属种类、根际环境及栽培农艺措施等都会影响水稻对重金属的吸收, 进而影响稻米中的重金属含量。本文对上述影响稻米重金属吸收的因素进行了综述, 并对今后培育和种植低重金属富集水稻提出了展望。

关键词: 水稻; 重金属; 吸收; 农艺调控

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8082(2018)03-0044-06

我国每年因重金属污染而损失的粮食达 1 200 万 t 左右, 造成直接经济损失超过 200 亿元。对我国 4 个水稻主产区 20 个省的农业机构、零售市场的 712 份稻米样品进行分析, 发现 Cd 含量为 0.001~0.740 mg/kg, 平均 0.050 mg/kg, 约 2.2% 的样品可能种于 Cd 污染土壤^[1]。稻米重金属污染已然成为我国发展安全稻米的重要制约因子。

针对水稻重金属污染的现状, 研究人员从栽种不同水稻品种、农艺措施调控以及重金属污染稻田修复等多方面着手开展工作, 但这项工作面广量大, 仍缺乏有效的重金属阻断措施, 预计在较长时间内很难改变水稻生产中土壤的重金属污染状况。研究水稻生长过程中重金属的吸收富集规律, 对低重金属富集水稻的培育、种植具有重要的理论指导意义和实用价值。

1 水稻不同器官对重金属元素的吸收

籽粒是水稻收获的主要产品, 其重金属含量直接关系到稻米品质和食品安全。一般来说, 重金属在水稻植株内的分布规律是新陈代谢旺盛的器官累积量大于营养器官的累积量, 在不同形态器官中的含量顺序为: 根部>根茎部>主茎>穗>籽粒>叶部^[2-3]。根部重金属吸收富集系数是地上各部位吸收富集系数的 2~100 倍。不同重金属在植株中的分布也不相同, 成熟期植株中 Cu 的质量分数为根>茎>叶>米粒>谷壳, Ni 的分布规律为根>叶>茎>米粒>谷壳, Cr 的分布规律为根>叶>谷壳>茎>米粒, Cd 的分布规律为根>茎>叶>米粒>谷壳; 且随着重金属处理量的增加, 水稻植株不同部位的重金属质量分数也呈上升趋势, 成熟期米粒中 Cu、Ni、Cr 和 Cd 的质量分数范围分别为: 4.50~6.19、1.86~4.63、

0.72~0.76 和 0.08~0.39 mg/kg^[4]。水稻籽粒胚中重金属浓度显著高于胚乳, 皮层和颖壳中重金属浓度也较高, 但因为胚乳占籽粒质量的绝大部分, 因此, 胚乳中重金属含量占绝对优势。

不同重金属种类在水稻籽粒中的分布积累也有差异, Cd 在籽粒中的分布为皮层>胚>胚乳>颖壳, 而 Cu 和 Pb 是表现为胚>皮层>胚乳>颖壳。籽粒经过加工后, 可有效去除重金属含量较多的胚、皮层和颖壳等器官, 降低食用大米的重金属含量。从稻谷到精米, 重金属 Pb、Cu 和 Cd 的去除率分别达到 56.93%、41.00% 和 24.10%^[5]。将无机 As 含量超标的糙米样品碾磨成国标三级大米后, 无机 As 含量显著降低至标准值内。此外, 水作为洗脱剂可减少米糠蛋白中的 As 含量, 脱 As 率达 75.6%。随着碾米精度的提高, 水稻中的重金属含量都会不同程度降低。有研究表明, 将稻米加工成三级米, Pb 含量可减少 35.1% 左右^[6]。

2 水稻对重金属元素吸收的品种差异

2.1 不同类型水稻对重金属元素的吸收

不同水稻品种间有理化特性的差异, 相同种植条件下对不同重金属吸收和转运机制明显不同, 籽粒中重金属的积累存在显著差异。Ueno 等^[7]发现, 146 个遗传多样性丰富的材料间, 其茎部含镉量相差 13 倍。有研究认为, 杂交稻对镉的吸收显著高于常规稻, 而籼稻对重金属的吸收又高于粳稻^[8-10]。仲维功等^[11]研究认为,

收稿日期: 2017-12-27

基金项目: “十三五”重点研发项目(2016YFD0101801); 浙江省育种专项(2016C02052-6)

常规籼稻 Cd 和 Pb 积累量最高,杂交籼稻居中,常规粳稻含量最低。曾翔等^[12]对 7 种类型水稻镉积累的分析表明,特种稻>常规早籼稻>三系杂交晚稻>两系杂交晚稻>常规晚籼稻>常规粳稻>爪洼稻。冯文强等^[13]分析了四川省 20 个水稻育种材料的镉吸收能力,发现恢复系抗镉污染能力优于保持系。殷敬峰等^[14]研究了不同品种糙米对 Cd、Cu 和 Zn 积累特性,发现常规稻和杂交稻糙米的 Cd、Cu 和 Zn 含量差异不明显。张磊等^[15]研究认为,常规稻的耐镉特性优于杂交稻和超级稻。三系杂交稻的糙米 Cd 和 Cu 含量极显著高于两系杂交稻,而两系杂交稻糙米中 Zn 含量则显著高于三系杂交稻。周歆^[16]研究认为,两系杂交水稻和三系杂交水稻糙米中 Cd 含量存在显著差异。李波等^[17]对广东省主栽品种的研究认为,重金属综合污染严重程度依次是籼型常规稻>两系杂交稻>三系杂交稻。尽管这些研究都认为水稻品种类型间重金属富集能力差异显著,但结果间因研究条件与水稻品种的不同等存在差异或矛盾。因此,按类型筛选可能存在一定的风险。应根据育种目标,有针对性的筛选品种,并进一步对入选品种在不同环境条件下的适应性进行重点研究。

2.2 不同基因型水稻对重金属元素的吸收

蒋彬等^[18]研究了 239 个水稻精米的 Pb、Cd 和 As 含量,发现不同基因型稻米中的重金属含量差异极显著。王林友等^[19]研究了 20 个品种在 3 个试验点的糙米 Cd、Pb 和 As 含量,发现水稻籽粒对重金属积累存在明显的基因型差异,筛选了 5 个低 Cd 和 Pb 含量的基因型,1 个 Cd 和 As 含量低的基因型。李正文等^[10]研究了江苏省 57 个水稻品种对重金属 Cd、Cu 和 Se 的吸收积累,发现针对品种筛选重金属高/低积累水稻,其结论具一定的稳定性,例如武育梗 3 号和武育梗 7 号被一致认为属于重金属低积累品种,而汕优 63 和两优培九属于高积累品种,两优培九较汕优 63 有更强的抗重金属 Cd 毒害的能力。冯文强等^[13]研究发现,在所供试的各基因型水稻品种中,Y16 最不易被重金属污染,其次是 Y11;易被重金属污染的是 Y07,其次是 Y17。刘侯俊等^[20]对东北广泛种植的 32 个水稻品种进行盆栽试验,结果显示,不同水稻品种间 Cd 的吸收积累特性存在明显差异,越路早生是农业生产中较理想的品种,具有较强的耐 Cd 性,Cd 的富集能力强,但籽粒中 Cd 含量相对较低。叶秋明等^[21]对 15 个水稻品种进行 Cd 富集试验,认为辽优 2006 是较理想的水稻品种,而沈稻 6 号、辽星 20 号等品种则尽可能避免种在污染土壤

上。沈其文等^[22]将 18 个主栽水稻品种种在重金属污染的 2 个土壤下进行品比试验,认为早稻中 9 优 547、中稻新两优 223 和晚稻宜优 207 适宜在土壤取样区域种植。宁梗 1 号、南梗 44、镇稻 16、武运梗 24 和两优 6326 较南梗 5505、镇稻 10 及其他 2 个杂交稻盐两优 888 和苏两优 124 具有明显砷耐受性^[23]。高 Cd 品种有较强的将 Cd 从根转运到茎和从茎、叶转运到米的能力^[3]。镉因为与钙具有相似的吸收途径,可破坏水稻根系中的离子平衡,耐镉品种具有更快的根-茎转运速率^[24]。因此,对水稻品种进行栽培试验,挖掘其自身的遗传潜力,发挥根际与作物本身对污染物迁移的“过滤”和“屏障作用”,从中筛选低重金属富集品种是可行的。

3 水稻对不同重金属元素的吸收

3.1 重金属形态和种类

除受水稻本身特性影响外,水稻对重金属的吸收还受重金属的种类及形态影响。在水稻生长季节,重金属在水稻植株中的迁移能力依次为 Cd>Cr>Zn>Cu>Pb^[2]。李正文等^[10]发现不同水稻品种对重金属 Cd、Cu 和 Se 的吸收积累差异分别达到 7 倍、3 倍和 4 倍,存在显著差异。仲维功等^[11]研究发现,水稻植株对 4 种重金属元素吸收富集和迁移能力的顺序为 Hg>Cd>Pb>As,且随土壤重金属含量的增加,水稻植株重金属含量呈上升趋势,其中 Hg 在米、谷、茎叶和根中的富集含量均极显著高于对照;稻米中 Cd 含量比对照增加 13 倍;Pb 在根中的富集量是对照的 5 倍以上,而 Pb 在米和谷中的含量与对照差异不显著,说明水稻吸收 Pb 后向籽粒转移较少^[11]。陈慧茹等^[25]研究认为,Cd、Cr、Pb 在水稻植株中的迁移能力依次为 Cd>Cr>Pb。

3.2 不同重金属元素的相互作用

在多种重金属元素的复合污染条件下,元素之间的复合效应对重金属在植物体内的积累分布影响较大。金属元素在籽粒中的吸收系数顺序为 Cd>Zn>Cu>Pb,随土壤 Cd 质量分数增加,水稻籽粒中各金属元素的积累量都有所降低^[26]。在 Cu、Cr、Ni 和 Cd 复合污染条件下,水稻植株中富集大小依次为 Cd>Cu>Ni>Cr^[4]。

李正文等^[10]研究发现,不同水稻品种对 Cu 和 Cd 的吸收积累有同步的趋势,而高 Se 品种显示出抑制重金属 Cu 和 Cd 积累的倾向。殷敬峰等^[14]对糙米中 Cd、Cu 和 Zn 含量的相关性分析表明,糙米中 Cu 和 Cd 间呈极显著正相关,Cu 和 Zn 间存在显著负相关,而 Cd 和 Zn 间相关性较差。说明 Cu 和 Cd 间存在协同作用,

Cu 和 Zn 间相互抑制吸收,而 Cd 和 Zn 间互作不明显。但也有研究认为,Zn 会促进 Cd 的吸收和向水稻植株地上部分转移,Pb 也可促进根中滞留的 Cd 进一步向地上部分迁移^[27]。康立娟等^[28]研究发现,Pb 能促进水稻根和茎对 Cu 的吸收,降低糙米对 Cu 的吸收;As 能促进水稻根对 Cu 的吸收,降低茎和糙米对 Cu 的吸收;Ni 能降低水稻茎对 Cu 的吸收,促进根和糙米对 Cu 的吸收。 Fe^{2+} 可与 Cd^{2+} 竞争转运蛋白(如 OsIRTs),降低水稻籽粒中 Cd 的富集^[29]。

4 农艺措施对水稻吸收重金属元素的影响

4.1 影响水稻重金属吸收的外界因素

由于重金属在土壤中的移动受多种因素影响,如沉淀/再溶解,吸收/再吸收,以及与有机/无机配体形成复合物等,水稻对重金属的吸收除受水稻本身特性影响外,水稻生长环境如 pH、Eh、土壤中其他元素含量、淹水时间、微生物等对重金属元素的形态和迁移也起重要影响。

pH 值是影响水稻根吸收重金属的最主要因素之一,当土壤 pH 值改变时,原有平衡就会改变,从而影响重金属的生物有效性及植物的吸收。Cd 在碱性条件下移动性显著下降,添加碳酸钙、Si 富集的矿渣可显著增加土壤 pH 值,降低土壤中重金属离子的可交换率,降低水稻籽粒中 Cd 的积累。碱性粘土矿物因具有较大的表面积且在环境 pH 下,表面带负电,可吸附 Cd^{2+} ,降低植物对 Cd 的吸收^[30]。

水稻根表铁胶膜对重金属吸收具有重要影响,这种影响与重金属形态和胶膜厚度相关,而且与水稻土壤肥力、水稻品种及其泌氧能力、铁锰肥的使用、水分管理等有关^[31]。铁氧化物胶膜可作为一种缓冲液或障碍物,增加或降低可能的金属或类金属离子的吸收^[32]。水稻缺铁性根分泌物可活化根际的难溶性镉,也可吸附包埋金属污染物。水稻根系的缺铁性分泌物,不但可活化土壤中难溶性的铁,也会活化土壤中的 Cd、Mn 和 Cu 等元素。根系分泌物对 Cd 的活化作用受质体中 Cd 浓度的影响,Cd 浓度较低,活化作用明显。

4.2 施肥对水稻重金属元素吸收的影响

施加动物肥可导致水稻籽粒中 Cd 的聚集,且随施肥量的增加效果愈加显著^[33]。每 hm^2 添加 1.5 t 和 3.0 t 的污泥生物炭可显著降低稻米籽粒中的 Cd 含量^[34]。外源施加 50 μM 硝酸钠可显著缓解种植于 50 μM Cd 处理土壤的水稻毒害,抑制水稻对镉的吸收^[35]。外源补充

钙和硅可通过抑制幼苗中过氧化损伤消除镉的毒害。Bian 等^[36]研究发现,添加碳酸钙、硅酸钙等可显著降低水稻对 Cd 的吸收。施加碳酸钙可显著降低 Pb、Cd 和 Zn 的生物有效性,但未能有效抵制 Pd 和 Cd 向糙米中转运,可显著降低土壤中交换态 As 含量,但土壤中 As 的生物有效性并未有效降低^[37]。胡正义等^[38]研究发现,土壤 S 能影响水稻根表胶膜,进而影响水稻对重金属的吸收,施硫能显著减少水稻对 As 的吸收。

在重金属复合污染条件下,叶面施用硅制剂可以缓解水稻的毒害效应,且施有机硅对水稻重金属毒害的缓解效果更显著。籽粒中 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的吸收量在喷施硅制剂后均显著降低;籽粒中重金属元素的吸收系数和积累量均表现出降低的趋势。随着 Cd 处理质量分数的增高,施硅对重金属在籽粒中积累的抑制效应越显著,叶面喷施硅酸钠和正硅酸乙酯剂可缓解水稻重金属毒害效果,显著降低籽粒对重金属 Cd、Zn、Cu 和 Pb 的吸收量^[26,39]。硅以细胞壁结合有机复合物形式聚集在细胞壁上,显著降低细胞内 Cd 的浓度^[29]。在硅存在的条件下,植株中 *OsHMA2* 和 *OsHMA3* 表达水平下降,而硅转运相关基因表达上调,植株中 Cd/Cu 浓度显著降低^[40]。硅肥可抑制 Cd 相关的转录水平,有效逆转镉对水稻的毒害,降低水稻对 Cd 和 Pb 的吸收^[41-42]。

张海波等^[43]研究表明,有机酸、EDTA 能有效降低水稻对 Cd 的吸收,并能抵制 Cd 向水稻籽粒中转移以及在籽粒中的累积。施加 $\text{Na}_2\text{Fe}^-\text{EDTA}$,可大大降低水稻根、茎及籽粒中的 Cd 含量,但随着 Fe 用量的增加,籽粒中 Cd 的累积也增加^[44]。磷酸氢二钠和羟基灰磷灰石可通过降低土壤中重金属交换态含量从而减少重金属向水稻中的迁移,在培养基质中添加这两种物质可明显降低水稻各器官中 Pb 和 Cd 的含量^[45]。钙镁磷肥和过磷酸钙对降低水稻茎叶和糙米中 Cd 含量的效果最好。 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 在水稻吸收和转运过程存在竞争,在缺锌土壤中施加有机物质可降低水稻对 Ni 的吸收,但种子中 Cd 和 Zn 的含量降低不明显^[46]。生物质炭与含硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸盐的硫硝铵氮肥配施可降低籽粒中重金属 Cu、Zn 和 Cd 的质量分数^[47]。在土壤中施加 KH_2PO_4 ,对 Cu 的吸附效果最好,继而是 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 HN_4NO_3 、 KCl 、 NH_4Cl 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ^[48]。在盆栽试验下,碱性煤渣对降低污染土壤中植株和糙米中的 Pb 和 Cd 含量效果最好,基施 5.0kg 碱性煤渣,早稻糙米中 Pb 和 Cd 含量分别降低 78.6%和 75.4%^[49]。

同一种 K 肥,其来源不同对 Cd 的吸收影响较大,

Cl⁻能增加土壤中 Cd 的有效性,将土壤中的 Cd 解离出来,以 CdCl_n²⁻ⁿ形式存在于土壤溶液中,增加水稻对 Cd 的吸收,KCl 会导致水稻对 Cd 的吸收增加,而 SO₄²⁻经系列转化后与 Cd 能形成 CdS 沉淀,降低了土壤中 Cd 的有效性,K₂SO₄ 则可降低水稻对 Cd 的吸收^[50]。但水培时,营养液中的大部分 Cd 以离子形式存在,Cl⁻与 Cd 形成 CdCl_n²⁻ⁿ,反而限制 Cd 的移动性而不利根对 Cd 的吸收^[51]。

4.3 水稻根际环境与重金属元素的吸收

土壤微生物对重金属的生物活性作用很大,一方面根际微生物将大分子分泌物转化为小分子化合物,另一方面微生物可分泌质子、有机酸及铁载体等物质,增加水稻根际 Cd 等重金属的活化能力。根际土壤 pH 值和脲酶活性均低于非根际土壤,根际土壤有效态 Cd 和 Zn 含量低于非根际土壤,有效态 Pb 和 Cu 含量高于非根际土壤。土壤 pH 值与有效态 Pb 和有效态 Zn 均呈显著负相关,有效态 Cd、有效态 Pb 和有效态 Cu 含量与微生物量碳均呈显著正相关,有效态 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量与土壤脲酶活性呈显著负相关,有效态 Cd、Pb 和 Cu 含量与蔗糖酶活性呈显著正相关^[52]。Arbuscular mycorrhizal 真菌可将 Cd 转化成活性态形式,提高水稻对 Cd 的耐受性,显著降低水稻根、茎中 Cd 的含量,且在高 Cd 浓度下,可降低细胞壁中 Cd 浓度^[53]。Lin 等^[54]研究发现,Cd 抗性细菌可有效降低水稻籽粒中的 Cd 含量。

4.4 耕作方式对水稻重金属元素吸收的影响

单一农艺措施或不同农艺措施组合可降低土壤重金属的有效性,控制水稻对重金属的吸收和积累。纪雄辉等^[55]研究表明,长期淹水处理的水稻根系、茎叶和糙米中镉含量均极显著降低,其中糙米镉含量比间歇灌溉和湿润灌溉平均分别降低 41.3%和 70.7%。Santiago 等^[56]报道,免耕可显著提高土壤有机质含量,降低土壤 pH 值,使得土壤中 Mn、Cu 和 Zn 有效量增加,作物对重金属的吸收量提高。常同举^[57]通过研究常规平作、水旱轮作、免耕冬水、垄作免耕和厢作免耕 5 种耕作方式对紫色水稻土壤重金属含量及有效性的影响发现,耕作方式主要通过影响土壤 pH 值进而影响土壤重金属的有效量及水稻中的重金属含量。

值得注意的是,通过单一的农艺措施降低控制污染土壤重金属向稻米中转移可取得一定的效果,但实际生产中不易推广,生产的稻米也很难达到食品安全的要求。对重金属高积累品种,即使在非污染土地上,

其可食用部位重金属含量也可能超过安全标准。因此,结合筛选对重金属抗性强、低吸收的水稻品种,探讨不同农艺调控措施及其组合是未来的研发重点。如沈欣等^[58]分析证明,通过种植对镉吸收量较低的水稻品种和提高土壤 pH 值,可有效降低稻米中镉的积累量,长期淹水虽无直接降镉效果,但与土壤 pH 值提高存在显著互作。因而,筛选和培育对重金属吸收较低的水稻品种,结合土壤 pH 值调节和淹水灌溉等农艺措施,可有效解决稻田重金属污染问题。

鉴于重金属对水稻品质安全和人类健康的重要影响,应加强以下三个方面的协调研究:一是加强水稻低重金属积累品种的筛选和推广;二是加强土壤-水稻各器官重金属的动态变化规律研究;三是加强对重金属吸收较低的水稻分子机制研究,为通过农艺措施降低水稻对重金属元素的吸收提供科学依据,其中,对重金属吸收较低的水稻的创制与选育是关键。

参考文献

- [1] Qian Y, Chen C, Qi Z, et al. Concentrations of cadmium, lead, mercury and arsenic in Chinese market milled rice and associated population health risk[J]. *Food Control*, 2010, 21 (12): 1 575-1 563.
- [2] 关共涛,徐颂,黄金国. 重金属在土壤-水稻体系中的分布、变化及迁移规律分析[J]. *生态环境学报*, 2006, 15(2): 315-318.
- [3] 蔡秋玲,林大松,王果,等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. *农业环境科学学报*. 2016, 35(6): 1 028-1 033.
- [4] 林华,张学洪,梁延鹏,等. 复合污染下 Cu、Cr、Ni 和 Cd 在水稻植株中的富集特征[J]. *生态环境学报*, 2014(23): 1 991-1 995.
- [5] 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*, 2000, 21 (3): 52-55.
- [6] 鞠兴荣,丁哲慧,高瑀珑,等. 重金属在水稻中的分布及加工过程对其影响的探讨[J]. *粮食与食品工业*, 2016(23): 1-6.
- [7] Ueno D, Kono I, Yokosho K, et al. A major quantitative trait locus controlling cadmium translocation in rice (*Oryza sativa*) [J]. *New Phytol*, 2009, 182: 644-653.
- [8] Arao T, Ae N. Genotypic variations in cadmium levels of rice grain [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2003, 287: 223-233.
- [9] 李坤权. 水稻不同品种对土壤镉的耐性、积累与分配的差异研究[D]. 扬州:扬州大学, 2003.
- [10] 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 (3): 112-115.
- [11] 仲维功,杨杰,陈志德,等. 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[J]. *江苏农业学报*, 2006, 22(4): 331-338.
- [12] 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, 2006.
- [13] 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.
- [14] 殷敬峰, 李华兴, 卢维盛, 等. 不同品种水稻糙米对 Cd Cu Zn 积累特性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5):844-850.
- [15] 张磊, 杨惟薇, 张超兰, 等. 不同水稻类型对镉的耐性、累积性与转动性质研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(6):2185-2188.
- [16] 周歆. 重金属低累积水稻品种筛选及稻田化学改良技术研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2013.
- [17] 李波, 杜瑞英, 文典, 等. 广东省主栽水稻品种糙米重金属含量差异研究[J]. 热带农业科学, 2014, 34(5):5-10.
- [18] 蒋彬, 张慧萍. 水稻糙米中铅镉砷含量基因型差异的研究[J]. 云南师范大学学报:自然科学版, 2002, 22(3):37-40.
- [19] 王林友, 竺朝娜, 王建军, 等. 水稻镉、铅、砷低含量基因型的筛选[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(1):133-138.
- [20] 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.
- [21] 叶秋明, 李军, 黄元财, 等. 15 个水稻品种对镉的积累特性[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(8):1156-1159.
- [22] 沈其文, 甘小泽, 樊丹, 等. 重金属污染土壤水稻品种筛选[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(12):59-61.
- [23] 李仁英, 沈孝辉, 张耀鸿, 等. 无机砷对不同水稻品种种子萌发和幼苗光合生理的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6):1067-1074.
- [24] Wang F J, Wang M, Liu Z P, et al. Different responses of low grain-Cd-accumulating and high grain-Cd-accumulation rice cultivars to Cd stress[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2015, 96: 261-269.
- [25] 陈慧茹, 董亚玲, 王琦, 等. 重金属污染土壤中 Cd、Cr、Pb 元素向水稻的迁移累积研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(12):236-241.
- [26] 王世华, 罗群胜, 刘传平, 等. 叶面施硅对水稻籽粒重金属积累的抑制效应[J]. 生态环境学报, 2007, 16(3):875-878.
- [27] 吴燕玉, 余国营. Cd Pb Cu Zn As 复合污染对水稻的影响[J]. 农业环境保护, 1998(2):49-54.
- [28] 康立娟, 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.
- [29] Liu J, Ma J, He C, et al. Inhibition of cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells by a wall-bound form of silicon [J]. *New Phytol*, 2013, 200: 691-699.
- [30] Sun J, Wu Q T, Lee C C, et al. Cadmium sorption characteristics of soil amendments and its relationship with the cadmium uptake by hyperaccumulator and normal plants in amended soils [J]. *Int J Phytoremediation*, 2014, 16(5): 496-508.
- [31] Chen Z, Zhu Y G, Liu W J, et al. Direct evidence showing the effect of root surface iron plaque on arsenite and arsenate uptake into rice (*Oryza sativa*) roots[J]. *New Phytol*, 2005, 165: 91-97.
- [32] Tripathi R D, Tripathi P, Dwivedi S, et al. Roles for root iron plaque in sequestration and uptake of heavy metals and metalloids in aquatic and wetland plants[J]. *Metallomics*, 2014, 6: 1789-1800.
- [33] Duan G, Zhang H, Liu Y, et al. Long-term fertilization with pig-bio-gas residues results in heavy metal accumulation in paddy field and rice grain in Jiaying of China [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2012, 58: 637-646.
- [34] Zhang Y, Chen T, Liao Y, et al. Modest amendment of sewage sludge biochar to reduce the accumulation of cadmium into rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environ Pollut*, 2016, 216: 819-825.
- [35] Singh P, Shah K. Evidences for reduced metal-uptake and membrane injury upon application of nitric oxide donor in cadmium stressed rice seedlings[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2014, 83:180-184.
- [36] Bian R, Li L, Bao D, et al. Cd immobilization in a contaminated rice paddy by inorganic stabilizers of calcium hydroxide and silicon slag and by organic stabilizer of biochar[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 13(10):10028-10036.
- [37] 钟倩云, 曾敏, 廖柏寒, 等. 碳酸钙对水稻吸收重金属 (Pb、Cd、Zn) 和 As 的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(4):1242-1248.
- [38] 胡正义, 夏旭, 吴丛, 等. 硫在稻根微域中化学行为及其对水稻吸收重金属的影响机理[J]. 土壤, 2009, 41(1):27-31.
- [39] Wang H, Wen S, Chen P, et al. Mitigation of cadmium and arsenic in rice grain by applying different silicon fertilizers in contaminated fields[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23(4): 3781-3788.
- [40] Kim Y H, Khan A L, Kim D H, et al. Silicon mitigates heavy metal stress by regulating P-type heavy metal ATPase, *Oryza sativa* low silicon genes, and endogenous phytohormones [J]. *BMC Biol*, 2014, 14: 13-25.
- [41] Farooq M, Detterbeck A, Clemens S, et al. Silicon-induced reversibility of cadmium toxicity in rice [J]. *J Exp Bot*, 2016, 67(11): 3573-3585.
- [42] Xiao R, Huang Z, Li X, et al. Lime and phosphate amendment can significantly reduce uptake of Cd and Pb by field-grown rice[J]. *Sustainability*, 2017, 9(3): 430-439.
- [43] 张海波, 李仰锐, 徐卫红, 等. 有机酸、EDTA 对不同水稻品种 Cd 吸收及土壤 Cd 形态的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(9):2625-2631.
- [44] Shao G, Chen M, Wang D, et al. Using iron fertilizer to control Cd accumulation in rice plants: A new promising technology[J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2008, 51(3): 245-253.
- [45] 雷明, 曾敏, 胡立琼, 等. 不同含磷物质对重金属污染土壤-水稻系统中重金属迁移的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(6):1527-1533.
- [46] Kashem M A, Sinh B R. Metal availability in contaminated soil: II. Uptake of Ca, Ni and Zn in rice plants grown under flooded culture with organic matter addition[J]. *Nutri Cycl Agroecosy*, 2001, 62(3): 257-266.
- [47] 陈少毅, 许超, 张文静, 等. 生物质炭与氮肥配施降低水稻重金属含量的盆栽试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14):189-197.
- [48] 黄晓武, 刘杰, 张学洪, 等. 不同化肥对水稻土中 Cu 吸附行为的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(1):29-33.
- [49] 王凯荣, 张玉焯, 胡荣桂. 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.
- [50] 衣纯真, 傅桂平, 张福锁. 不同钾肥对水稻镉吸收和转运的影响[J]. 中国农业大学学报, 1996(1):65-71. (下转第 54 页)

- [23] 胡培松, 翟虎渠, 唐邵清, 等. 利用 RVA 快速鉴定稻米蒸煮及食味品质的研究[J]. 作物学报, 2004, 30(6): 519-524.
- [24] 张欣, 施利利, 丁得亮, 等. 74 份优质粳稻品种的理化特征和食味特性研究[J]. 食品科技, 2010, 35(9): 178-181.
- [25] 蔡一霞, 王维, 朱智伟, 等. 不同类型水稻支链淀粉理化特性及其与米粉糊化特性的关系[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1 122 - 1 129.
- [26] 丁毅, 华泽田, 王芳, 等. 粳稻蛋白质与蒸煮食味品质的关系[J]. 作物学报, 2012, 33(23): 42-46.
- [27] 贾良, 丁雪云, 王平荣, 等. 稻米淀粉 RVA 谱特征及其与理化品质性状相关性的研究[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 790-794.
- [28] 丁得亮, 张欣, 赵梅, 等. 粳稻品质性状间的相关关系研究[J]. 作物杂志, 2010(5): 60-63.
- [29] 李先品, 徐庆国, 刘红梅. 不同地域水稻的 RVA 谱特征值及其与蛋白质含量的关系[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2016, 42(1): 1-5.
- [30] 陈书强. 粳稻米蒸煮食味品质与其他品质性状的典型相关分析[J]. 西北农业学报, 2015, 24(1): 60-67.
- [31] 闫清平, 朱永义. 大米淀粉、蛋白质与食用品质的关系[J]. 粮食与油脂, 2001(5): 29-32.
- [32] 刘红梅, 刘建丰, 范峰峰, 等. 杂交稻淀粉 RVA 谱特征值的配合力及杂种优势研究[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(2): 203-208.

Relationship between RVA Profile Characteristics and Eating Value of *Japonica* Two Line Hybrid Rice in Northern China

ZHEN Yingjie, YU Yahui*, LI Zhenyu, CHEN Guanghong, XIA Ming, QUE Buchao

(Liaoning Provincial Saline-Alkali Land Utilization and Research Institute, Panjin, Liaoning 124010, China; 1st author: lnpjzyj@163.com; *Corresponding author: yyh666@sina.com)

Abstract: A field experiment was conducted using 36 cross combinations of two-line *japonica* hybrid rice and 4 conventional *japonica* rice varieties in Northern China, the RVA profile characteristics, amylose content, protein content and eating value of rice were measured, and the correlation of which were analyzed. The results showed that there existed significant correlation among multiple RVA profile characteristics. Amylose content had significantly positively correlation with setback, consistency, pasting temperature, respectively, whereas amylose content had significantly or very significantly negative correlation with breakdown and peak viscosity. Protein content had significantly or very significantly positive correlation with trough viscosity and pasting temperature, protein content had no significant correlation with the rest of RVA profile characteristics. The palatability value of cooked rice had very significantly positive correlation with peak viscosity and breakdown. Moreover, the palatability value of cooked rice had very significantly negative correlation with setback, consistency, pasting temperature, respectively. RVA profile characteristics could fully reflect the advantage and disadvantage of eating value, and it could be used as the main basis of breeding fine quality two-line *japonica* hybrid rice.

Key words: *japonica* two line hybrid rice; RVA profile characteristics; eating quality

(上接第 48 页)

- [51] 陈爱葵, 王茂意, 刘晓梅, 等. 水稻对重金属镉的吸收及耐性机理研究进展[J]. 生态科学, 2013, 32(4): 514-522.
- [52] 许超, 陈旭磊, 陈倩倩, 等. 水稻根际酶活性对土壤重金属污染的响应[J]. 中国农学通报, 2014(30): 28-33.
- [53] Li H, Luo N, Zhang L, et al. Do arbuscular mycorrhizal fungi affect cadmium uptake kinetics, subcellular distribution and chemical forms in rice[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 571: 1 183-1 190.
- [54] Lin X, Mou R, Cao Z, et al. Characterization of cadmium-resistant bacteria and their potential for reducing accumulation of cadmium in rice grains[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 569-570: 97-104.
- [55] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 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制[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3 930-3 939.
- [56] Santiago W R, Vasconcelos S S, Kato O R, et al. Nitrogênio mineral e microbiano do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia oriental[J]. *Acta Amazonica*, 2013, 43, 395-406.
- [57] 常同举. 耕作方式对紫色水稻土重金属积累和有效性的影响特性[D]. 重庆: 西南农业大学, 2014.
- [58] 沈欣, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 农艺调控措施对水稻镉积累的影响及其机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1 449-1 454.

Absorption of Heavy Metals in Rice and the Influence factors

HAN Juanying¹, ZHANG Ning², SHU Xiaoli^{2*}, WU Dianxing²

(¹ Zhejiang Yuyao Municipal Seed Administration Station, Yuyao, Zhejiang 315400, China; ² Institute of Nuclear Agricultural Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 1st author: 1293288389@qq.com; *Corresponding author: shuxl@zju.edu.cn)

Abstract: Pollution of heavy metal on soil is the focus for rice quality and safety. The absorption of heavy metals in rice was affected by rice varieties, types of heavy metal, rhizosphere and the cultivation methods and etc. In this review, the factors influencing the absorption of heavy metals mentioned above were summarized, and proposed how to grow and breed good rice with less heavy metal.

Key words: rice; heavy metal; absorption; cultivation regulation