

水稻幼苗对As(III)胁迫差异响应的离子组学研究

曾晋, 臧敏, 张瑞琪, 李利梅, 马丽

引用本文:

曾晋, 臧敏, 张瑞琪, 李利梅, 马丽. 水稻幼苗对As(III)胁迫差异响应的离子组学研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 511–519.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0830>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

臭氧浓度增加对不同敏感型水稻元素吸收与分配的影响

邵在胜, 沈士博, 贾一磊, 穆海蓉, 王云霞, 杨连新, 王余龙

农业环境科学学报. 2016, 35(9): 1642–1652 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015-1449>

叶施谷胱甘肽对水稻镉和矿质元素含量的影响

刘雅萍, 王常荣, 任兴华, 刘月敏, 黄永春, 刘仲齐, 张长波

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 1864–1874 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0118>

Delftia sp.B9对镉胁迫下水稻种子萌发及幼苗镉积累的影响

刘玉玲, 彭鸥, 铁柏清, 刘亦婷, 罗海艳, 李丹阳, 刘寿涛

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1855–1863 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0261>

接种伯克氏菌D54对东南景天吸收富集Cd的影响

张亚经, 马成仓, 郭军康, 韩磊, 冯人伟, 冯雪敏, 曹雪清, 王瑞刚

农业环境科学学报. 2017, 36(3): 449–457 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1280>

缺Fe/Zn及盐胁迫下莧菜对Cd及矿质元素的吸收与IRT1表达的关系

余丹萍, 李取生, 王立立, 徐智敏, 郭世鸿, 胡妮, 陈惠君

农业环境科学学报. 2016(2): 234–239 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.02.004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曾晋, 臧敏, 张瑞琪, 等. 水稻幼苗对 As(Ⅲ)胁迫差异响应的离子组学研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 511–519.

ZENG J, ZANG M, ZHANG R Q, et al. Ionomic studies of rice seedling differential responses to arsenite stresses [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 511–519.

水稻幼苗对 As(Ⅲ)胁迫差异响应的离子组学研究

曾晋, 臧敏, 张瑞琪, 李利梅, 马丽*

(河南农业大学林学院, 郑州 450002)

摘要: 重金属胁迫影响植物体内离子平衡, 探究植物离子网络应对胁迫环境的响应有助于挖掘有毒元素吸收和代谢的潜在机制。本研究以湖南省临武县9种主栽水稻品种为研究对象进行 As(Ⅲ)胁迫处理, 采用 ICP-MS 分析技术研究水稻幼苗茎叶和根部组织中离子组(P、K、Mg、Ca、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cr、Co、Cd、Ba、Pb 和 Sr)响应不同 As(Ⅲ)浓度胁迫的变化特征, 进一步借助多元统计分析阐明各组织离子组变化与 As 积累之间的关联。结果表明: 水稻根部和茎叶组织 As 含量均随处理浓度增加而增加, 且根部相比茎叶更容易积累 As; Fe、Ba、Pb 和 Sr 同样表现出根部含量高于茎叶的规律, 营养元素(P、K、Mg、Ca 和 Mn)分布则呈现茎叶组织高于根部的特征, 胁迫环境对水稻幼苗两个组织部位各元素分布的影响不同, 说明 As 胁迫干扰水稻组织中离子的分配。聚类热图和主成分分析表明离子组在茎叶和根部出现分离, Mg、K、P、Mn、Ca、Cr、Co、Zn 元素倾向于在茎叶富集, 而 Fe、Sr、Pb、Ba、Cu、As 和 Cd 元素则倾向于在根系中富集。As 胁迫处理后, 水稻同一组织的元素之间存在多组显著相关性, As 与 Fe、Cu、Cd、Ba、Pb、Sr 在 $P < 0.05$ 显著性水平下呈现正相关关系, As 与 P、K、Mg、Ca、Mn 在 $P < 0.05$ 显著性水平下呈现负相关关系, 说明水稻离子组对植株内 As 的迁移和积累具有调节作用。

关键词: 砷; 水稻; 离子组学; 聚类分析; 主成分分析

中图分类号: S511; X53; X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2023)03-0511-09 **doi:** 10.11654/jaes.2022-0830

Ionomic studies of rice seedling differential responses to arsenite stresses

ZENG Jin, ZANG Min, ZHANG Ruiqi, LI Limei, MA Li*

(College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Ionomic profiles of plants display correlations with the stress inducing heavy metals to which they are exposed. Investigation of ionomic variation can provide insights into the mechanisms that promote element uptake or detoxification in plants. In this research, nine main rice varieties obtained from Linwu County, Hunan Province were treated with arsenate during hydroponic growth. The elements P, K, Mg, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Cr, Co, Cd, Ba, Pb, and Sr in shoots and roots of rice seedlings subjected to As(Ⅲ) stress were quantitatively analyzed by ICP-MS. Associations between the ionome and arsenic in each tissue were further clarified using multivariate statistical analysis. Arsenic increased in both roots and shoots with increasing concentration of As(Ⅲ) exposure, and roots were more likely to accumulate arsenic than shoots. Fe, Ba, Pb, and Sr showed the same distribution trend as As, whereas the nutrient elements (P, K, Mg, Ca, and Mn) accumulated to higher levels in shoots than roots. The effects on distribution of each element in the two tissues of rice seedlings varied with stress condition, indicating that external As stress interfered with ion distribution in rice tissues. Cluster heat map and principal component analyses showed that ion groups appeared separately in shoots and roots, with Mg, K, P, Mn, Ca, Cr, Co, and Zn tending to be

收稿日期: 2022-08-18 录用日期: 2022-10-25

作者简介: 曾晋(1999—), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为生态毒理学。E-mail: zengjin1021@163.com

*通信作者: 马丽 E-mail: malizhk@henau.edu.cn

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(222102320396)

Project supported: Key Specialized Research and Development Breakthrough-International Science and Technology Cooperation Program in Henan Province, China (222102320396)

enriched in shoots, while Fe, Sr, Pb, Ba, Cu, As, and Cd tended to be enriched in roots. Multi-set significant correlations among elements could be found in rice tissues. As correlated positively with Fe, Cu, Cd, Ba, Pb, and Sr in roots and shoots ($P < 0.05$), while a significant ($P < 0.05$) negative correlation could be found between As and P, K, Mg, Ca, and Mn, suggesting that ion groupings in rice exert regulatory effects on As migration and accumulation. These study results are expected to provide theoretical references for reducing arsenic contamination in rice.

Keywords: arsenic; *Oryza sativa*; ionomic; cluster analysis; principal component analysis

砷(As)是一种有毒类金属,因具有较强的生物毒性和高致癌性而备受关注^[1-2]。As在土壤环境中广泛存在,其已成为全球尤其是东南亚地区的重大环境问题之一^[3]。水稻(*Oryza sativa*)是世界上重要的粮食作物,全球约半数人口以稻米为主食。然而,水稻因其特殊的覆水环境,相比其他元素更容易富集土壤中的As元素,并通过食物链进入人体,从而威胁健康^[4]。As的生物有效性及其毒性与其在介质中的存在形态密切相关。目前已发现的水稻中As形态有亚砷酸盐[As(Ⅲ)]、砷酸盐[As(V)]、一甲基砷(MMA)、二甲基砷(DMA)、砷甜菜碱(AsB)和砷胆碱(AsC)^[5]。无机砷As(Ⅲ)和As(V)具有较高的生物毒性,被列为一级致癌物质。我国《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中规定大米中无机As的限量值为 $200 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。明确水稻中As,尤其是高毒形态As的吸收和富集机理是进行As污染控制的前提。

据报道,As(Ⅲ)和As(V)是大米中As的主要存在形态^[6],二者在水稻植株中的迁移转化直接影响As在籽粒中的积累。水稻根系对As(V)的吸收是借助磷酸根吸收通道进行的。无论是在土壤表面还是通过根系转运蛋白进入植株过程,磷酸根与As(V)均存在竞争吸附^[7]。提高培养环境中磷酸根含量可以抑制水稻根系对As(V)的吸收^[8]。此外,As(V)的吸收还受到Fe的影响,其机理与P的竞争吸附不同,主要是Fe的存在影响了As(V)向根系的迁移^[9]。As(V)进入水稻根系细胞后,被还原成As(Ⅲ)是其代谢的关键步骤。由于As(Ⅲ)(阴离子为 AsO_3^{3-})与硅酸根离子结构相近,水稻根系通过硅酸转运蛋白OsLi1和OsLi2吸收硅酸根的同时也会将As(Ⅲ)带入维管系统^[10]。向水培水稻实验中加入Se(Ⅳ),发现其不仅能降低水稻对As的吸收,同时还能显著提高植株对Fe、Mn、Co、Cu、Zn和Mo等营养元素的吸收^[11]。目前,已明确的水稻中As(Ⅲ)代谢途径主要有两条:一是与植物络合素(PCs)形成络合物,并通过液泡膜上的ABC转运子的介导作用穿过液泡膜并存储于液泡中,

该过程受环境介质与水稻植株中S含量的影响,因为S是植物体合成PCs的关键元素^[12-13]。另一条则是通过具有双向运输功能的Lsi1进行外排,而该通道只能解释15%~20%的As(Ⅲ)外溢,负责其余将近80% As(Ⅲ)外溢的机制仍不清楚^[14]。由此可见,水稻中As的吸收和传输并非受到单一元素的影响,究竟是哪个元素起到决定性作用,亦或是这些元素协同作用的结果,目前的研究尚无定论。从离子平衡角度探究水稻响应As胁迫的离子网络调控机理能为降低As在籽粒中的积累提供新的解决途径。

以往关于水稻离子响应As胁迫的研究着重于从单一As元素或从As与Fe、P、Si、Se等少数单元素相互作用的角度考虑问题,忽视了水稻作为一个有机整体,在As代谢过程中会对植株体内元素平衡造成干扰,且不同元素离子的存在也会促进或抑制As在水稻中的转运。鉴于此,本研究以As污染地区主栽水稻品种为研究对象,采用稻田土壤中As的主要存在形式As(Ⅲ)为胁迫形态,从植物体内元素的整体来探讨As胁迫下水稻各组织离子组的分配差异及其对As吸收和富集的影响作用,以期为进一步完善As在水稻中的迁移和代谢机理提供科学支撑。

1 材料和方法

1.1 供试材料

本研究所用9种晚稻种子购自郴州禾优种业有限责任公司,编号及其水稻品种分别为:L1(岳优518)、L2(林两优959)、L3(泰优新华粘)、L4(内5优263)、L5(圳两优2018)、L6(荃优丝苗)、L7(荃两优2118)、L8(Y两优9918)、L9(泰优553)。

1.2 试验设计与处理

试验设置 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ As(Ⅲ)胁迫处理,每处理设6个重复。水稻育苗及其培养方案参考Du等^[15]的方案进行。先挑选饱满水稻种子置于去离子水中浸泡0.5 h,再以70%酒精灭菌15 min,然后分别采用自来水和去离子冲洗浸泡,处理后的种子置于盛有适量1%植物组培抗菌剂的培养皿中,最后将培养

皿放入28℃生化培养箱中一周时间进行育苗。待种子萌芽后,挑选长势均匀一致的水稻幼苗移入不透光的培养盒中,于Yoshida水稻培养液中培养40 d^[16]。光照培养条件为每日以300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强度27℃光照培养14 h,20℃避光培养10 h。水稻在为期40 d的生长过程中,胁迫组前20 d不做胁迫处理。培养液每4 d更换一次,对照组水稻除不进行As(Ⅲ)胁迫处理外,其他同上述过程培养。

1.3 样品处理与测定方法

水稻植株培养40 d后,用自来水冲洗干净,再用去离子水冲洗3遍,吸水纸擦干后对植株称量。将根与茎叶分开,根浸在冰吸附溶液[1 mmol·L⁻¹ K₂PO₄、0.5 mmol·L⁻¹ Ca(NO₃)₂和5 mmol·L⁻¹ MES, pH 6.0]中超声处理10 min除去根表面的非原质体As。将水稻茎叶和根系烘干并研磨后过0.20 mm尼龙筛。准确称取0.2 g水稻组织样于聚四氟乙烯消解罐,依次加入8 mL HNO₃(70%, ≥99.999%金属基,阿拉丁试剂有限公司)和2 mL H₂O₂(30%, 优级纯,阿拉丁试剂有限公司),待样品完全溶解后使用微波消解仪(MARS ONE, 美国CEM公司)消解。分析前,消化溶液通过0.45 μm 聚醚砜膜过滤处理,离子组(P、Mg、Ca、Cr、Mn、Fe、Co、Cu、Zn、As、Cd、Ba、Pb、K和Sr)含量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS, 7700x, 美国安捷伦科技有限公司)测定。等离子质谱条件参数设置为等离子气体(Ar气)流速15.0 L·min⁻¹,辅助气流速0.90 L·min⁻¹,载气流速0.80 L·min⁻¹,碰撞气体(He气)流速4.3 mL·min⁻¹,射频功率1 550 W。

1.4 As吸收能力评价

为评价水稻品种根系对As吸收的能力及由根部向茎叶的转运能力,引入水稻根系As吸收能力(Specific Arsenic Uptake, SAU)^[17]和转移系数(Transfer Factor, TF)^[18]。

$$\text{SAU} = [\text{水稻根系As含量}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}) \times \text{根系生物量}(\text{g}) + \text{茎叶As含量}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}) \times \text{茎叶生物量}(\text{g})] / \text{水稻根系生物量}(\text{g})$$

$$\text{TF} = \text{水稻茎叶As含量}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}) / \text{根系As含量}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$$

1.5 数据分析和处理

水稻根和茎叶组织对不同浓度As(Ⅲ)胁迫的离子组响应图采用Origin 2022进行描绘。通过Pearson's相关分析评价水稻根和茎叶组织内部离子间的相关关系,显著性水平为 $P < 0.05$ 。通过聚类分析(HCA)和主成分分析(PCA)对As(Ⅲ)胁迫的离子组

特征进行聚类分析,数据经Z-score标准化处理后进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同水稻品种响应As胁迫的离子组分布特征

图1为9个品种水稻植株在两种浓度As(Ⅲ)胁迫条件下的15种元素浓度。As(Ⅲ)可引起离子组重新分配,且离子变化与浓度有关。根和茎叶的离子含量区分明显,经过As(Ⅲ)处理的P、K、Mg、Co元素在根系的含量相较于对照组明显降低。如图1所示,所有品种水稻根和茎叶的As浓度相较于对照组明显增加,2 mg·L⁻¹处理下的As浓度高于1 mg·L⁻¹的,且所有处理组水稻根中的As浓度高于茎叶中的As浓度。As在不同水稻品种根和茎叶中的积累有明显区别。与As浓度分布相似的元素有Fe、Cd、Ba、Pb和Sr,其根系积累量较高且处理组含量高于对照组;而P、K、Mg、Ca、Mn等营养元素在茎叶中的积累高于根系,且P、K、Mg、Mn在对照组根中的浓度高于处理组,这可能与As(Ⅲ)限制了根对这些元素的吸收有关。Zn和Co在根系的变化相较于茎叶更加明显,根系处理组Zn浓度明显升高,Co的浓度则低于对照组。Cr和Cu元素浓度相较于对照组变化不明显,As(Ⅲ)的添加可能对这两种元素的转运影响较小。

2.2 不同水稻品种As吸收和转运差异

图2展示了在两种As(Ⅲ)浓度胁迫下对As的吸收能力差异,不同品种间的吸收能力差异显著,且各品种SAU值随胁迫浓度升高而增大。在1 mg·L⁻¹胁迫条件下,根系SAU值最大的是L3品种,其次为L9、L1品种,SAU值最小的是L5品种。2 mg·L⁻¹胁迫条件下,L3、L5仍是SAU值最大和最小的水稻品种。

水稻根系向茎叶部的转运系数见图3。由图3可知,除L4、L6品种外,其余品种的TF值均随着As(Ⅲ)浓度的增加而降低,浓度与TF值的规律并不明显。当处理浓度为1 mg·L⁻¹时,转运效率最高的品种为L3,最低为L6;处理浓度为2 mg·L⁻¹时,L9转运效率最高,L8品种最低。L9并不是吸砷能力最强的品种,其TF值最高,表明水稻品种的转运效率并未随着根部As积累量增多而增大。

2.3 水稻响应As胁迫的离子组关联分析

2.3.1 聚类分析和主成分分析

图4是聚类分析生成的双向树状热图,在HCA分析中,元素和样品分别聚类以识别同质亚组,树状图由紫色到黄色表示样品(行)中对应元素(列)的含量

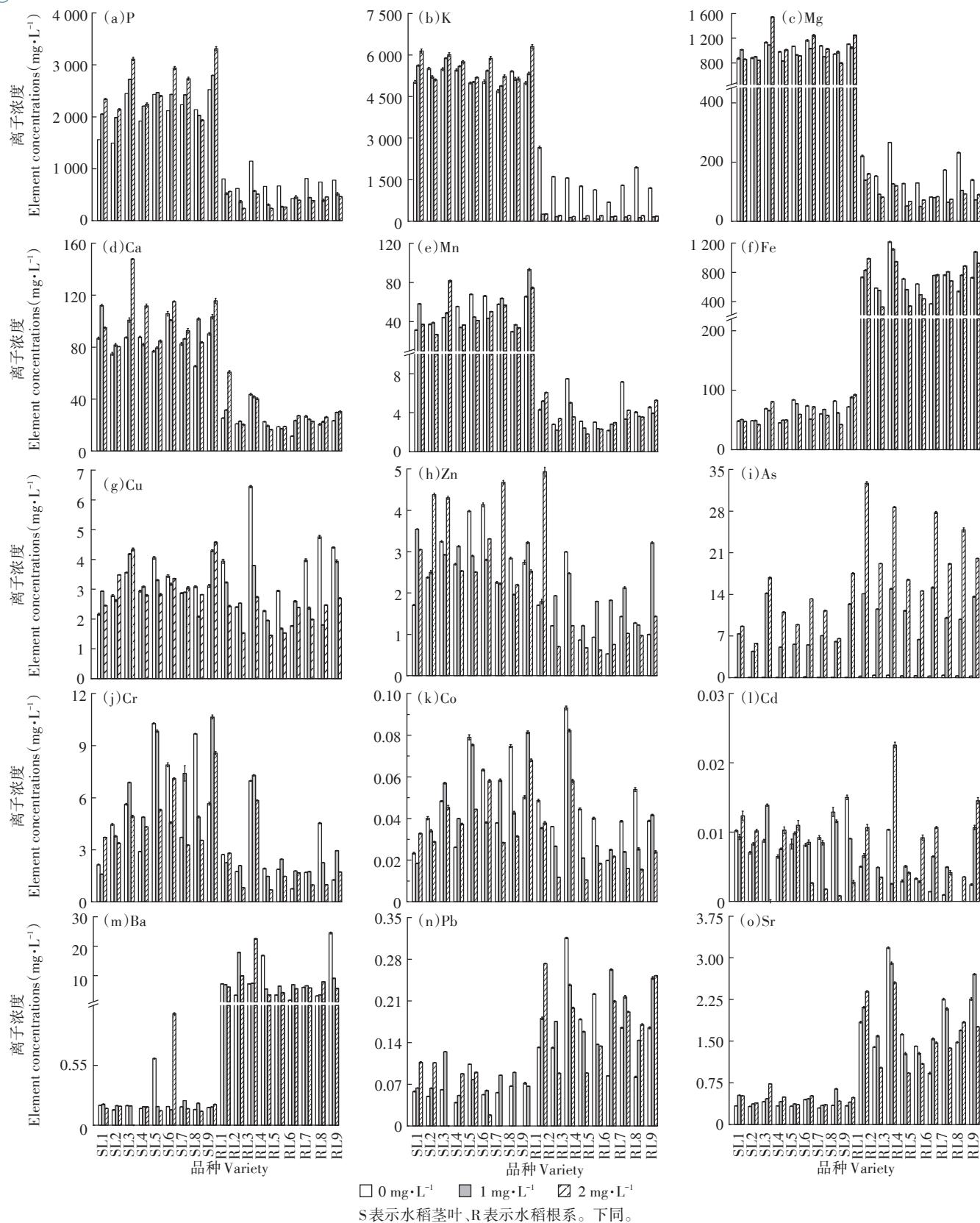
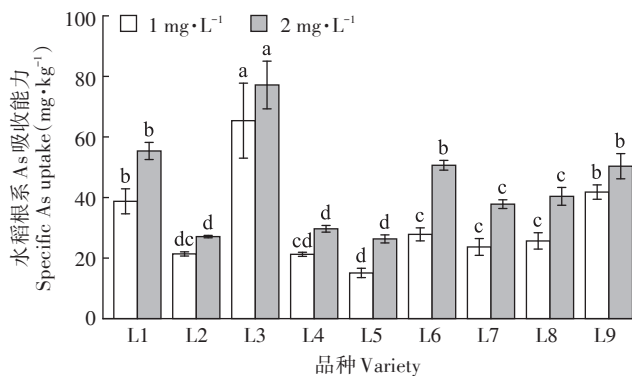


图1 不同浓度As(Ⅲ)处理的水稻根和茎叶的P、K、Mg、Ca、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cr、Co、Cd、Ba、Pb和Sr的含量

Figure 1 Concentrations of P, K, Mg, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Cr, Co, Cd, Ba, Pb and Sr in rice roots and shoots treated with different concentrations of As(Ⅲ)



不同小写字母表示不同品种间差异显著($P<0.05$)
Different lowercase letters indicate significant differences among different varieties

图2 不同品种水稻根系对As的吸收能力

Figure 2 Specific As uptake of different rice varieties

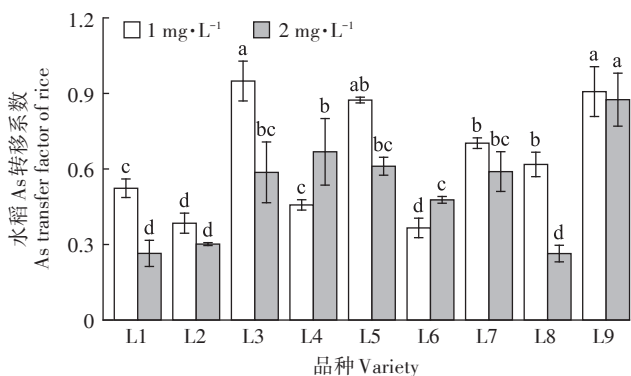


图3 不同品种水稻As的转移系数

Figure 3 As transfer factor of different rice varieties

由高到低。元素主要被分为两簇,簇1为Mg、K、P、Ca、Mn、Cr、Co、Zn元素,簇2为Fe、Sr、Pb、Ba、Cu、As、Cd元素。行的聚类结果显示根和茎叶明显的聚为两类。其中,Mg、K、P、Ca、Mn元素倾向于在茎叶聚类,而Fe、Sr、Pb、Ba、Cu、As、Cd元素倾向于在根系中聚类。从胁迫浓度的聚类结果来看,水稻茎叶对照组和胁迫组无明显区别;根系中可以看到,对照组以及两个处理组之间有明显分离,As和Cd倾向于在胁迫组聚类,说明As(Ⅲ)胁迫对水稻根系的离子组分配影响更大。

水稻根和茎叶的PCA分析结果如图5a所示,根和茎叶的差异明显,两个主成分解释了总方差的78.7%。由于P、K、Mg、Ca、Mn、Cr在PC1上有负载荷,Fe、Cu、As、Cd、Ba、Pb、Sr在PC1上有正载荷,而水稻根系样品分布在PC1正轴,茎叶样品分布在PC1负轴,与聚类结果一致。为了识别不同处理对水稻离子组的影响,对根和茎叶中的元素浓度进行PCA分析。

图5b和图5c分别表示茎叶和根的浓度主成分分析图,如图5b所示,在1 mg·L⁻¹胁迫条件下,茎叶中的P、Mg、Mn、Cu、Fe、Co在PC1上有强正负载;高浓度胁迫下,As对水稻茎叶Ca、Ba、Sr的积累和转运会受到影响;As和Cd在图5c中PC2有正负载,对根系离子组影响较大,这与HCA分析结果一致。

2.3.2 相关性分析

为明确水稻离子组与组织中As积累的关联,对水稻根系和茎叶元素浓度进行了相关分析。如图6所示,2 mg·L⁻¹胁迫条件下的水稻根系和茎叶的元素均显示71对相关性,而1 mg·L⁻¹胁迫条件下根系和茎叶中元素之间分别有72对和73对显著相关性。在2 mg·L⁻¹ As(Ⅲ)胁迫中,As和P、K、Mg、Ca、Mn、Zn元素呈显著负相关($P<0.05$),与Fe、Cu、Cd、Ba、Pb、Sr元素呈显著正相关($P<0.05$)。在1 mg·L⁻¹胁迫条件下,水稻根系中As和P、K、Mg、Ca、Mn、Cr呈显著负相关($P<0.05$),茎叶中As与其他元素的相关性与2 mg·L⁻¹处理一致。除此之外,两种处理条件下,水稻组织其他元素之间也存在关联。例如,营养元素P、K、Mg、Ca、Mn两两正相关($P<0.05$),Fe和P呈显著负相关($P<0.05$)。

3 讨论

通过不同品种间的对比发现,相同胁迫条件下,As积累量各不相同,基因型不同是造成植株吸收差异的重要原因^[19]。As、Cd、Pb在茎叶中的浓度远低于根系,可能是由于根系植物络合蛋白的螯合作用,通过将As(Ⅲ)等有害物质隔离在液泡中来阻止其转运。植物存在阻止外源物质和有毒化合物到达光合作用组织的行为^[20]。韧皮部和木质部在植物向上运输营养物质时发挥重要作用,元素从根到茎叶的转运取决于韧皮部的流动和木质部的运输^[21]。P、K、Mg、Ca、Mn这些营养元素经As(Ⅲ)胁迫后,倾向于在茎叶组织中积累而不是根系组织。P、K、Mg元素在植物韧皮部的运输效率较高,而Ca和Mn的运输则对木质部显示出高依赖性,这也可以解释其在茎叶中积累更高的原因^[22]。通过比较不同品种水稻As(Ⅲ)胁迫后的15种离子浓度变化,可以明显区分植株根和茎叶的区别。根部对As元素更敏感,P、K、Mg、Ca和Mn呈现在茎叶富集的特征。不同元素对As(Ⅲ)的胁迫的反应不尽相同,单个元素的变化不能说明植物根和茎叶对外界环境变化的反应情况,多元素检测的方法要更加全面。由此可见,水稻离子组的分配受基

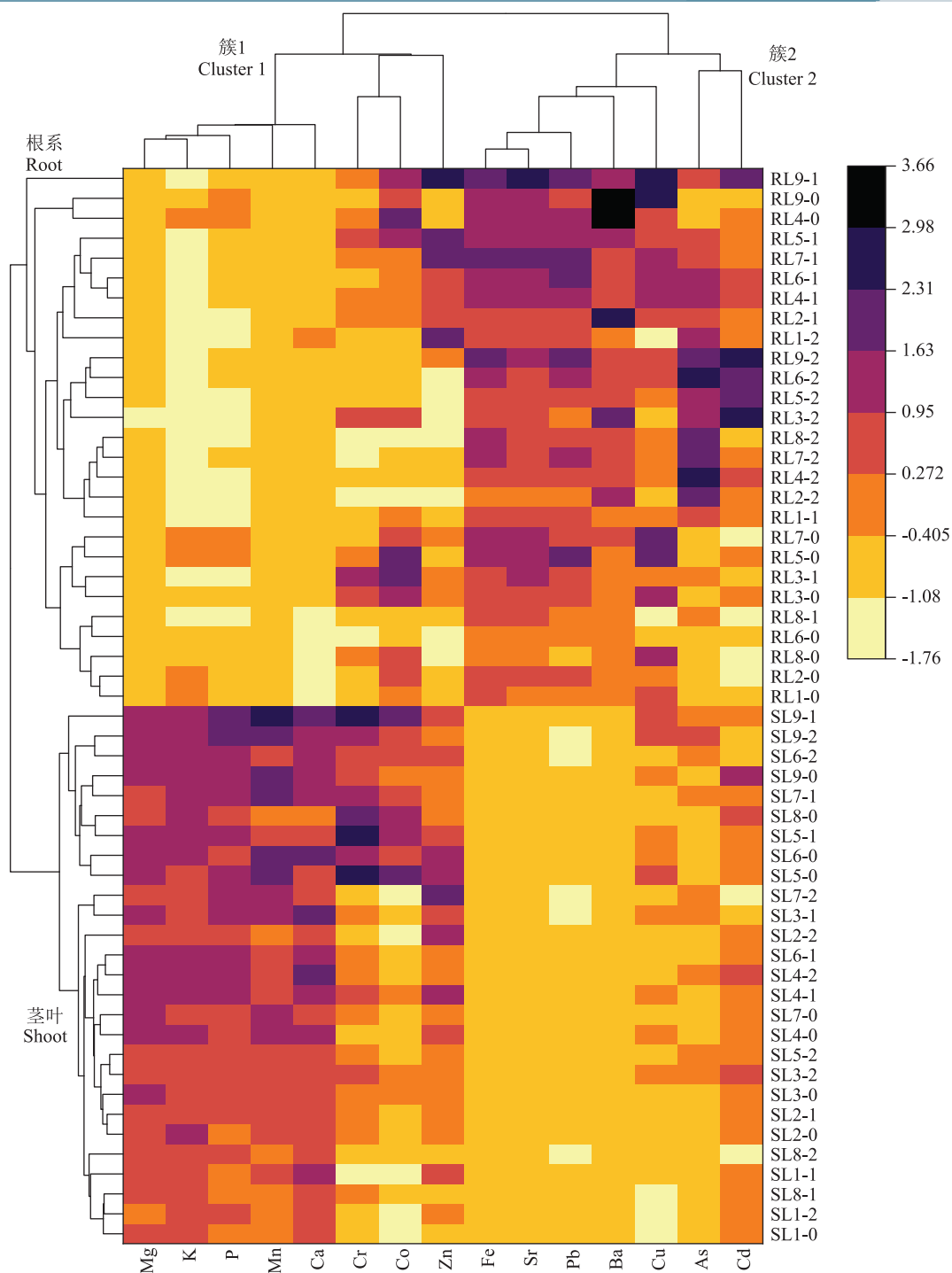


图4 不同浓度As(Ⅲ)胁迫的水稻幼苗中离子组热图分析

Figure 4 Heatmap analysis of ionomes in rice plants treated with different concentrations of As(Ⅲ)

因型、外部环境以及不同组织的共同影响^[22-23]。

水稻As吸收能力与品种有关,说明基因型是导致As积累的重要原因^[24],供试水稻的根系吸As能力与环境中As含量关系密切。当水稻SAU值较大时,其对应的TF值并未增大,说明As在茎叶中的积累量

不仅与环境中的As(Ⅲ)含量有关,其转移系数也起到了重要作用^[25]。水稻品种的SAU值靠前而TF值低,这可能与As(Ⅲ)在水稻根部与植物螯合蛋白的络合作用有关。络合作用限制了As从根到茎叶的运输,却能促进As在水稻根系的积累^[26]。通过As积累

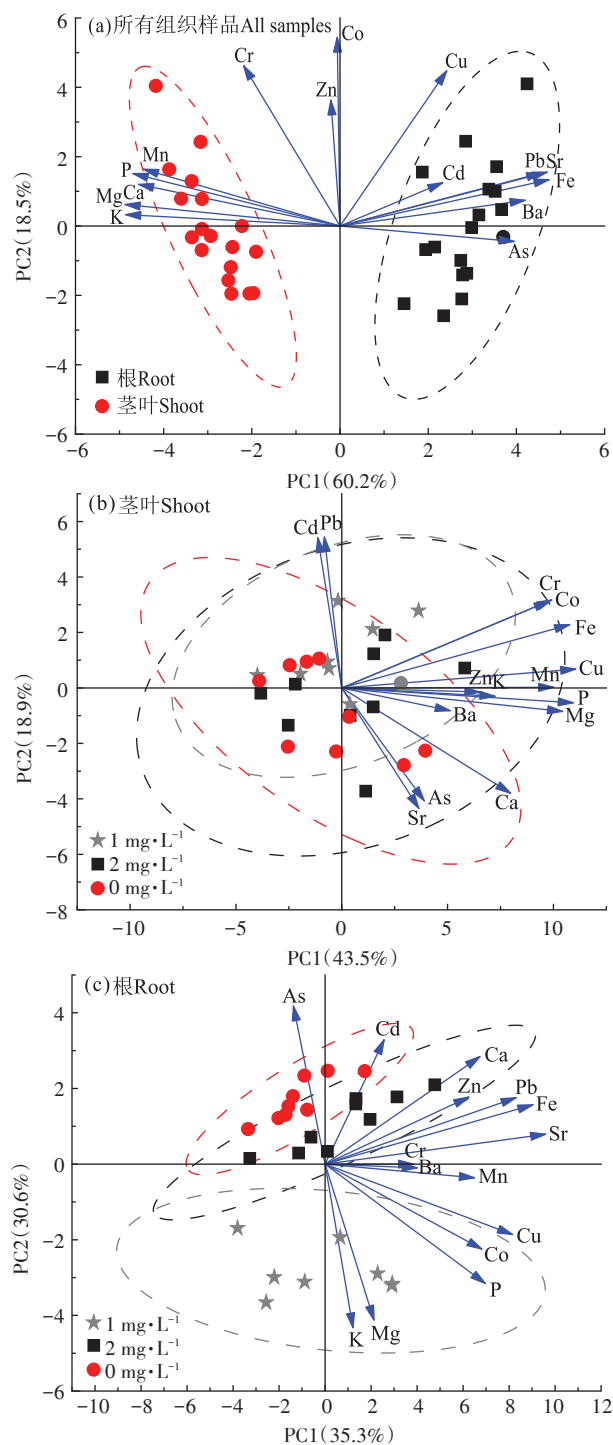


图5 主成分分析的得分图和加载图组合

Figure 5 Combination of score plot and loading plot generated from PCA

量来筛选耐As品种,是减少As在稻米中积累最简单高效的方式^[24]。

HCA分析与PCA分析中水稻根和茎叶之间的聚类结果一致,可以发现根和茎叶有明显的分离。有毒元素As、Cd、Ba、Pb和Sr倾向于在水稻根部富集,P、

K、Mg、Ca、Mn等营养元素倾向于在茎叶富集,说明离子组可以反映植物不同组织的特异性和相关性^[27]。离子的吸收和转运可能与浓度有关,高浓度条件下As对Ca、Ba、Sr的转运和积累有明显影响。水稻根系中P、K、Mg、Co并未受到As吸收的影响,这也与HCA结果相对应。通过热图分析和主成分分析表征不同As浓度对水稻体内离子组的影响,多元素的方法区分外部环境和基因型对离子组的影响比单一元素更可靠^[28]。

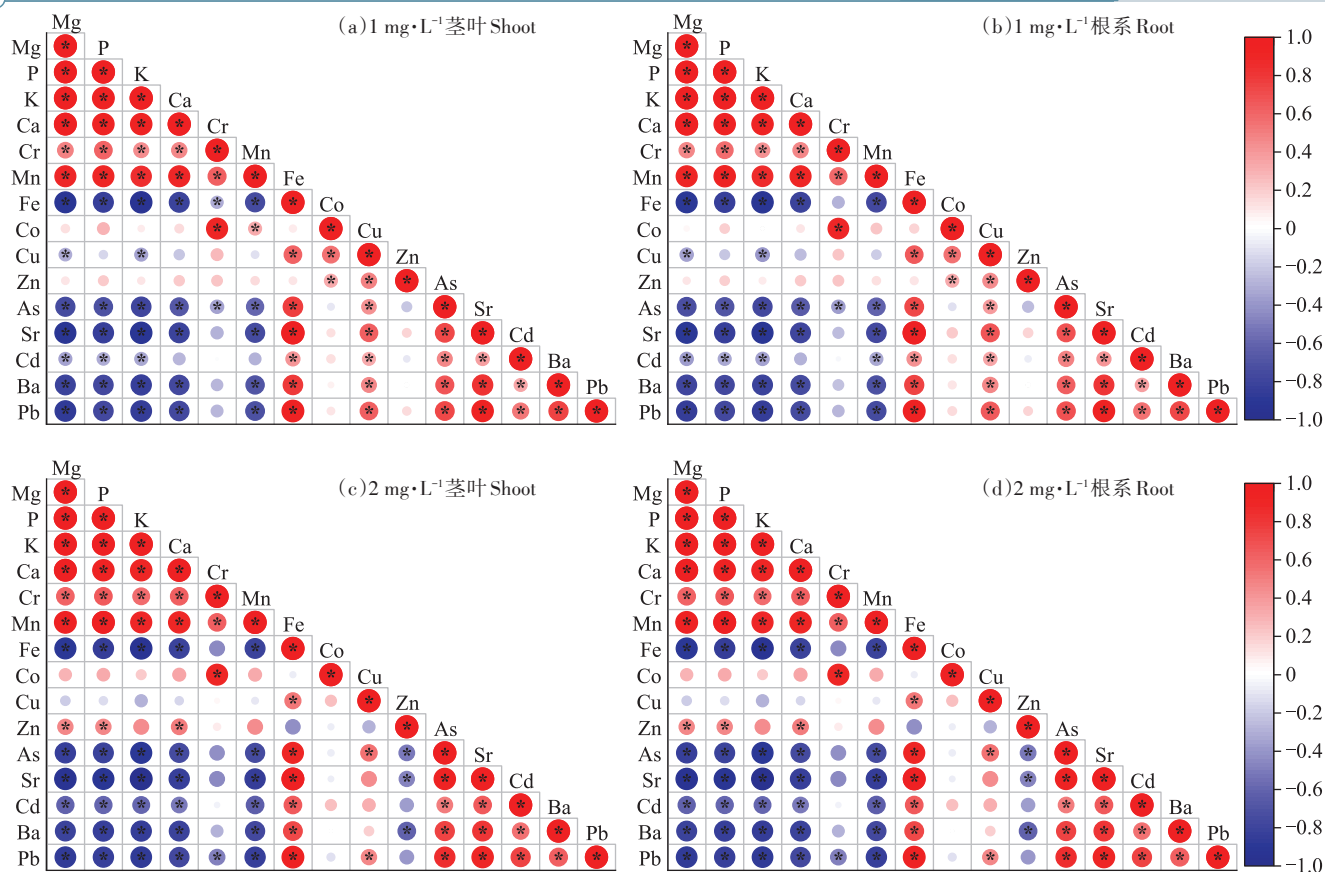
一定浓度的As可以改变元素之间的竞争关系,抑制元素的吸收^[29]。Baxter等^[30]认为植物离子组不是简单的元素组合,这些元素之间存在相关关系。简单的元素组合并不能解释所有的离子变化,因此有必要了解目标元素与其他元素之间的关联^[31]。As和P、K、Mg、Ca、Mn元素的负相关关系,说明这些元素可能是抑制As吸收的关键元素;而As与Fe、Cu、Cd、Ba、Pb、Sr元素的负相关关系,推测这些元素可能抑制水稻对As的吸收,并且水稻对As的吸收和转运受控于不同的通路。Mg、Ca和Mn元素具有相似的化学性质和相同的化合价,在根与茎叶的转运过程中可能享有同样的离子通道,这或许是几种元素之间具有相关性的原因^[32]。P、K、Mg尽管并不共享相同的吸收机制,仍存在相关性,这和Pinson等^[33]的研究结果一致。也有研究发现P和Fe之间有很强联系,在拟南芥中,通过平衡Fe的含量来缓解P的缺乏^[34]。水稻的生长发育必受到营养元素吸收和积累的影响,微量元素在蛋白质合成、光合作用、碳水化合物代谢和酶激活方面发挥调节作用^[35]。通过调节营养物质的吸收来改善As毒性的影响是缓解植物As胁迫的机制之一^[36]。

4 结论

(1)As(Ⅲ)胁迫会引起水稻离子组的重新分配,根系对As更敏感,且其As积累量多于茎叶;与As分布相似的元素有Fe、Cd、Ba、Pb和Sr,As(Ⅲ)限制P、K、Mg、Mn元素的吸收导致其在根系处理组的含量低于对照组。

(2)水稻根系As积累量随浓度升高而增大,但茎叶中的As含量并不取决于As吸收量,而与其转移系数有关。

(3)As(Ⅲ)胁迫影响矿质元素的吸收。As和P、K、Mg、Ca、Mn元素呈显著负相关($P<0.05$),而与Fe、Cu、Cd、Ba、Pb、Sr元素呈显著正相关($P<0.05$)。离子组对As的迁移也有一定的调节作用。



红色表示正相关关系,蓝色表示负相关关系。*表示 $P \leq 0.05$ 。
Red indicates a positive correlation, blue indicates a negative correlation. * indicates $P \leq 0.05$.

图6 As(Ⅲ)处理的水稻根和茎叶中两组元素之间的相关分析

Figure 6 Correlation analysis between elements in the roots and shoots of rice under As(Ⅲ) treated

参考文献:

- [1] JIA Y Y, WANG L, LI S, et al. Species-specific bioaccumulation and correlated health risk of arsenic compounds in freshwater fish from a typical mine-impacted river[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625:600-607.
- [2] ZHAO F J, MA Y, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2):750-759.
- [3] UPPAL J S, ZHENG Q, LE X C. Arsenic in drinking water: Recent examples and updates from Southeast Asia[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2019, 7:126-135.
- [4] MA L, WANG L, JIA Y, et al. Accumulation, translocation and conversion of six arsenic species in rice plants grown near a mine impacted city[J]. *Chemosphere*, 2017, 183:44-52.
- [5] DU F, YANG Z G, LIU P, et al. Bioaccessibility and variation of arsenic species in polished rice grains by an *in vitro* physiologically based extraction test method[J]. *Food Chemistry*, 2019, 293:1-7.
- [6] ZHAO F J, WANG P. Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies[J]. *Plant and Soil*, 2020, 446(1/2):1-21.
- [7] LI H, CHEN X W, WONG M H. Arbuscular mycorrhizal fungi reduced the ratios of inorganic/organic arsenic in rice grains[J]. *Chemosphere*, 2016, 145:224-230.
- [8] SURIYAGODA L D B, DITTERT K, LAMBERS H. Arsenic in rice soils and potential agronomic mitigation strategies to reduce arsenic bioavailability: A review[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(3):363-382.
- [9] 吴川, 安文慧, 薛生国, 等. 土壤-水稻系统砷的生物地球化学过程研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7):1429-1439. WU C, AN W H, XUE S G, et al. Arsenic biogeochemical processing in the soil-rice system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7):1429-1439.
- [10] TANG Z, ZHAO F J. The roles of membrane transporters in arsenic uptake, translocation and detoxification in plants[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2021, 51(21):2449-2484.
- [11] CHAUHAN R, AWASTHI S, TRIPATHI P, et al. Selenite modulates the level of phenolics and nutrient element to alleviate the toxicity of arsenite in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 138:47-55.
- [12] RAGHUVANSHI R, RAUT V V, PANDEY M, et al. Arsenic and cadmium induced macronutrient deficiencies trigger contrasting gene ex-

- pression changes in rice[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 300: 118923.
- [13] SAEED M, QURAIISHI U M, MALIK R N. Arsenic uptake and toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.): A review of multi-omics approaches to identify tolerance mechanisms[J]. *Food Chemistry*, 2021, 355:129607.
- [14] ZHAO F J, AGO Y, MITANI N, et al. The role of the rice aquaporin Lsi1 in arsenite efflux from roots[J]. *New Phytologist*, 2010, 186(2): 392–399.
- [15] DU F, LIU P, WANG K, et al. Influence of different arsenic species on uptake, speciation and efflux of arsenic in hydroponic rice plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 186:109791.
- [16] YOSHIDA S, FORNO D A, COCK J H. Laboratory manual for physiological studies of rice[M]. Los Baños, Philippines: The International Rice Research Institute, 1971:62–63.
- [17] 张世杰, 付洁, 王晓美, 等. 叶面施硅对水稻吸收和转运无机砷和甲基砷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7):1529–1536. ZHANG S J, FU J, WANG X M, et al. Effects of foliar application of silicon on uptake and transport of inorganic and methyl arsenic in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7):1529–1536.
- [18] PAN D, LIU C, YI J, et al. Different effects of foliar application of silica sol on arsenic translocation in rice under low and high arsenite stress[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 105:22–32.
- [19] 胡莹, 黄益宗, 刘云霞. 砷污染土壤中不同基因型水稻根表铁膜的形成及其对砷吸收和转运影响[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(6): 923–930. HU Y, HUANG Y Z, LIU Y X. Genotypic differences in iron plaque formation on root surface and their effect on arsenic uptake and translocation in rice (*Oryza sativa*) grown in arsenic contaminated soil[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(6):923–930.
- [20] LINDSAY E R, MAATHUIS F J M. New molecular mechanisms to reduce arsenic in crops[J]. *Trends in Plant Science*, 2017, 22(12): 1016–1026.
- [21] DU F, LIU P, WANG K, et al. Ionic responses of rice plants to the stresses of different arsenic species in hydroponics[J]. *Chemosphere*, 2020, 243:125398.
- [22] WATANABE T, MAEJIMA E, YOSHIMURA T, et al. The ionic study of vegetable crops[J]. *PLoS One*, 2016, 11(8):e0160273.
- [23] JEYASINGH P D, GOOS J M, THOMPSON S K, et al. Ecological stoichiometry beyond redfield: An ionic perspective on elemental homeostasis[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8:722.
- [24] 王玉峰. 砷低积累型水稻品种的筛选及硅对水稻砷吸收和转运的影响[D]:南京农业大学, 2017:46–47. WANG Y F. Screening of low-arsenic rice genotypes and effects of silicon on arsenic accumulation and translocation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017:46–47.
- [25] 刘志彦, 陈桂珠, 田耀武. 不同水稻品系幼苗对砷(As)的耐性、吸收及转运[J]. 生态学报, 2008, 28(7):3228–3235. LIU Z Y, CHEN G Z, TIAN Y W. Arsenic tolerance, uptake and translocation by seedlings of three rice cultivars[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7):3228–3235.
- [26] CARBONELL-BARRACHINA A, SIGNES-PASTOR A J, LAURA V A, et al. Presence of arsenic in agricultural products from arsenic-endemic areas and strategies to reduce arsenic intake in rural villages [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2009, 53(5):531–541.
- [27] FENG X, HAN L, CHAO D, et al. Ionic and transcriptomic analysis provides new insight into the distribution and transport of cadmium and arsenic in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 331: 246–256.
- [28] XIAO W, LIU P, WANG K, et al. Relationship between ionomics and transcriptomics of rice plant in response to arsenite stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, 189:104565.
- [29] DUAN G, LIU W, CHEN X, et al. Association of arsenic with nutrient elements in rice plants[J]. *Metallomics*, 2013, 5(7):784–792.
- [30] BAXTER I. Should we treat the ionome as a combination of individual elements, or should we be deriving novel combined traits?[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(8):2127–2131.
- [31] BAXTER I, DILKES B P. Elemental profiles reflect plant adaptations to the environment[J]. *Science*, 2012, 336(6089):1661–1663.
- [32] SHAIBUR M R, SERA K, KAWAI S. Effect of arsenic on concentrations and translocations of mineral elements in the xylem of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, 39(3):365–376.
- [33] PINSON S R M, TARPLEY L, YAN W, et al. Worldwide genetic diversity for mineral element concentrations in rice grain[J]. *Crop Science*, 2015, 55(1):294–311.
- [34] WANG X, WANG Z, ZHENG Z, et al. Genetic dissection of Fe-dependent signaling in root developmental responses to phosphate deficiency[J]. *Plant Physiology*, 2018, 179(1):300–316.
- [35] SCHMIDT S B, HUSTED S. The Biochemical properties of manganese in plants[J]. *Plants*, 2019, 8(10):381.
- [36] BHADWAL S, SHARMA S. Selenium alleviates carbohydrate metabolism and nutrient composition in arsenic stressed rice plants[J]. *Rice Science*, 2022, 29(4):385–397.

(责任编辑:叶飞)