

# 水稻籼粳品种对铊(I/III)吸收能力比较及根系草酸分泌特征

杨睿祺, 王亚男, 吴诗伊, 林晓丽, 梁秋雨, 姚焱\*

广州大学生命科学学院, 广东 广州

收稿日期: 2022年4月26日; 录用日期: 2022年5月20日; 发布日期: 2022年5月31日

## 摘 要

铊是一种高毒性的重金属元素, 具有Tl(I)和Tl(III)两种价态, Tl(III)比Tl(I)毒性更强, 通过植物富集进入食物链的方式严重威胁人类健康。本文通过水培方法培育4个籼粳水稻品种, 利用两种价态铊进行处理, 研究铊吸收量及水稻根系草酸分泌量的关系。结果表明: 籼稻的黄广金占与中嘉早17、粳稻的日本晴与秀水123, 在Tl(I)处理中的铊吸收量分别为0.21 mg·g<sup>-1</sup> FW与0.16 mg·g<sup>-1</sup> FW、0.19 mg·g<sup>-1</sup> FW与0.14 mg·g<sup>-1</sup> FW, 水稻对Tl的吸收量与所属亚种并无明显关系; 在Tl(III)处理中, 这四种水稻的铊吸收量分别下降至0.18 mg·g<sup>-1</sup> FW与0.13 mg·g<sup>-1</sup> FW、0.17 mg·g<sup>-1</sup> FW与0.11 mg·g<sup>-1</sup> FW, 均显著低于各品种在Tl(I)处理的铊吸收; 对铊吸收量与草酸分泌量进行二次函数回归分析, 相关系数 $r = 0.474$ , 相关性低。表明两种价态铊处理下根系草酸分泌量对铊吸收的影响较小, 水稻根系铊吸收受其他机制作用。

## 关键词

水稻, 品种, 铊吸收, 草酸分泌

# Comparison of Thallium (I/III) Absorption Capacity and Oxalic Acid Secretion Characteristics in Roots of Indica and Japonica Rice Varieties

Ruiqi Yang, Yanan Wang, Shiyi Wu, Xiaoli Lin, Qiuyu Liang, Yan Yao\*

College of Life Sciences, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

Received: Apr. 26<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2022; published: May 31<sup>st</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 杨睿祺, 王亚男, 吴诗伊, 林晓丽, 梁秋雨, 姚焱. 水稻籼粳品种对铊(I/III)吸收能力比较及根系草酸分泌特征[J]. 植物学研究, 2022, 11(3): 359-365. DOI: 10.12677/br.2022.113042

## Abstract

Thallium is a highly toxic heavy metal element with two valence states of Tl(I) and Tl(III). Tl(III) is more toxic than Tl(I). It seriously threatens human health by entering the food chain through plant enrichment. In this paper, four indica and japonica rice varieties were cultivated by hydroponic method and treated with two kinds of valence thallium to study the relationship between thallium absorption and oxalic acid secretion of rice roots. The results showed that the thallium absorption of Indica Rice Huangguangjinzhan and Zhongjiacao 17, japonica rice Nipponbare and Xiushui 123 in Tl(I) treatment are  $0.21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  FW and  $0.16 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  FW,  $0.19 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  FW and  $0.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  FW respectively. There is no significant relationship between the Tl absorption of rice and its subspecies; In Tl(III) treatment, the thallium absorption of the four kinds of rice decreased to  $0.18 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  FW and  $0.13 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  FW,  $0.17 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  FW and  $0.11 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  FW respectively, which are significantly lower than that of all varieties in Tl(I) treatment; the quadratic regression analysis of thallium absorption and oxalic acid secretion showed that the correlation coefficient is  $r = 0.474$ , and the correlation is low. The results showed that the secretion of oxalic acid in roots had little effect on thallium absorption under the treatment of two valence thallium, and thallium absorption in rice roots was affected by other mechanisms.

## Keywords

Rice, Varieties, Thallium Absorption, Oxalic Acid Secretion

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

铊(Tl)是一种高毒性的重金属元素,具有 Tl(I)和 Tl(III)两种价态, Tl(I)更稳定,反应性差,是环境中的主要形式,但 Tl(III)的毒性是 Tl(I)的数千倍[1]。我国是一个富铊资源国家,近年来由于采矿、冶炼、电镀等工业活动,大量含铊污水因此进入周边的天然水体[2],污染水源、耕地与粮食作物,并通过食物链的累积对人体造成危害[3],《重金属污染综合防治“十二五”规划》已将铊列为我国重点防控的重金属污染物之一。而水稻是我国重要的粮食作物,关注水稻对重金属铊的吸收积累规律有助于防控食品安全风险。

水稻分为籼稻与粳稻两大亚种。籼稻主要种植于热带与亚热带地区,粳稻主要种植于寒带与温带,两者在形态生理特性方面有明显差异。已有报道表明,水稻的籼粳亚种在对重金属的吸收能力上存在显著差异[4],能够通过筛选低镉吸收品种来保障稻米的安全与品质。但目前籼稻与粳稻在铊吸收能力上是否存在差异未见报道。

根系分泌地分析量有机酸是植物应对重金属胁迫时的一种重要的耐受机制。通过根系分泌有机酸,植物不仅能够调节根际微生物环境[5],并且能够与重金属离子螯合形成毒性较小的金属配位体复合物,从而降低重金属胁迫的危害[6]。有研究表明,籼稻在应对 Tl 胁迫时根系会分泌特异性有机酸草酸,且草酸的分泌能够有效降低水稻的铊吸收[7]。但不同籼粳稻品种在两种价态铊胁迫下铊吸收量是否存在差异,以及根系分泌草酸对两种价态铊处理下铊吸收的影响没有相关研究。

本实验以 4 个籼、粳稻品种为实验材料,分别使用 Tl(I)和 Tl(III)溶液处理水稻幼苗,测定单位鲜重下的铊吸收量与根系草酸分泌量,揭示不同价态铊胁迫下籼稻与粳稻铊吸收量以及草酸分泌特征,深入

水稻对铊的吸收及耐受机理。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验材料

供试水稻共四个品种，分别是粳稻：日本晴、秀水 123；籼稻：黄广金占、中嘉早 17。

各品种水稻种子经 0.1%高锰酸钾溶液浸泡 24 h 灭菌后，用去离子水清洗干净转移至育苗盆中均匀铺散，加入去离子水没过种子，于 25℃的智能人工气候箱中关闭光源培养。4 d 后用镊子挑出未发芽种子丢弃，开始光照下培养，光照 12 h/d，6 d 开始将培养用的去离子水换成霍格兰氏培养液，培养液每天定期更换，等到 10 d 以后，挑选出形态基本一致的水稻苗，经过 0.05 mol·L<sup>-1</sup>的 CaCl<sub>2</sub> 溶液处理 12 h，用于后续实验。

### 2.2. 试验方法

#### 2.2.1. 处理组与对照组

该实验分为两个处理组和一个对照组，分别是 5 mg·L<sup>-1</sup> Tl(I)处理、5 mg·L<sup>-1</sup> Tl(III)处理，以及对照组的去离子水处理，每个处理三个重复，每重复 50 mL 处理液，15 株水稻苗，处理 2 h。

#### 2.2.2. 铊吸收量的测定

处理开始前，在所有处理中各取 4 mL 溶液移入 10 mL 的离心管中，该批次标记为处理前溶液铊浓度。处理完成后，吸干水稻根表的液体，通过电子天平称重并记录。称重后再在所有处理中各取 4 mL 溶液移入另外一批 10 mL 离心管中，该批次溶液标记为处理后溶液铊浓度，并另外准备浓度分别为 0 mg·L<sup>-1</sup>、2 mg·L<sup>-1</sup>、4 mg·L<sup>-1</sup>、6 mg·L<sup>-1</sup>、8 mg·L<sup>-1</sup> 的 Tl 标准溶液。液体收集完成，用 0.45 μm 滤膜过滤，通过 TAS-990 型号火焰原子吸收分光光度计测定 Tl 标准溶液与各离心管中溶液的吸光度，以标准溶液的浓度与吸光度构建标准曲线，代入各离心管溶液的吸光度得到各离心管中 Tl 溶液的浓度，各样品的单位鲜重(Fresh weight, FW)下植株的铊吸收量为：

$$\text{铊吸收量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}) = [\text{处理前溶液铊浓度}(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) \cdot \text{处理液浓度 } 0.05 \text{ (L)} - \text{处理后溶液铊浓度} \cdot 0.046 \text{ (L)}] / \text{水稻植株鲜重}(\text{g})$$

#### 2.2.3. 根分泌草酸含量测定

取出经过铊处理后的水稻，用去离子水对水稻根系表面稍加清洗并用吸水纸吸干。将各处理水稻移入装有 10 mL 去离子水的小塑料瓶中，每个小塑料瓶标上样品对应标签，处理 6 h 进行吐酸。吐酸结束后取出植物，封装好小塑料瓶后置于冰箱中冻结 24 h，冻结后用冷冻干燥机将根系分泌物冻干，再重新向各处理的小塑料瓶中加入 1 mL 溶液，从而对样品浓度进行浓缩，并另外准备浓度梯度分别为 0 mg·L<sup>-1</sup>、0.1 mg·L<sup>-1</sup>、0.2 mg·L<sup>-1</sup>、0.3 mg·L<sup>-1</sup>、0.4 mg·L<sup>-1</sup> 的标准草酸溶液。最后再用 0.22 μm 滤膜对各样品与标准溶液进行过滤后转移到进样瓶中，通过高效液相色谱仪(仪器型号：LC-20A)测定各溶液的吸收值，高效液相色谱仪的检测波长为 210 nm，色谱柱为 18 μm，流速 1 mL·min<sup>-1</sup>，流动相为 3%的甲醇以及 0.01 mol/L 的 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (pH 2.7)溶液，柱温 30℃，进样体积为 20 μL。以标准溶液的浓度与吸收值构建标准曲线，代入各样品溶液的吸收值，得到各样品的草酸浓度，各样品的单位鲜重(FW)下植株根系的草酸分泌量为：

$$\text{草酸分泌量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}) = \text{各样品的草酸浓度}(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) \cdot \text{浓缩后各样品溶液体积 } 0.001 \text{ (L)} / \text{水稻植株鲜重}(\text{g})$$

### 2.3. 数据分析

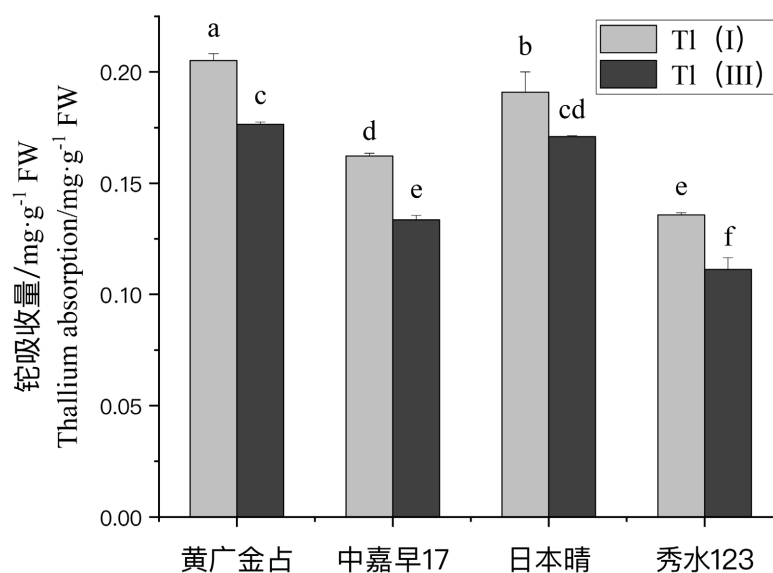
实验数据用 Excel 2007 进行统计，并通过 SPSS 16.0 软件采用 LSD 算法进行单因素方差分析(ANOVA)

以及曲线回归分析, 通过 Origin 2019 软件进行作图。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 水稻籼粳品种在两种价态铊处理后铊吸收量比较

籼稻黄广金占及中嘉早 17, 粳稻日本晴及秀水 123, 这四个品种水稻在两种价态铊处理 2 h 后, 对植株鲜重下的铊吸收量进行测定, 结果如图 1 所示。两个籼稻品种, 黄广金占与中嘉早 17, 在 Tl(I)处理中, 铊吸收量分别为  $0.21 \pm 0.00 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ 、 $0.16 \pm 0.00 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ , 而在 Tl(III)处理中, 两种水稻的铊吸收量则显著下降为  $0.18 \pm 0.00 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ 、 $0.13 \pm 0.00 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ ; 两个粳稻品种, 日本晴与秀水 123, 在 Tl(I)处理中, 铊吸收量分别为  $0.19 \pm 0.01 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ 、 $0.14 \pm 0.00 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ , 而在 Tl(III)处理中, 两种水稻的铊吸收量则显著下降为  $0.17 \pm 0.00 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ 、 $0.11 \pm 0.01 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ ; 在 Tl(III)处理中, 黄广金占、中嘉早 17、日本晴、秀水 123 的铊吸收量相对 Tl(I)处理分别降低了 14.3%、18.8%、10.5%、21.4%, Tl(III)处理能够显著降低各籼稻品种的铊吸收量。

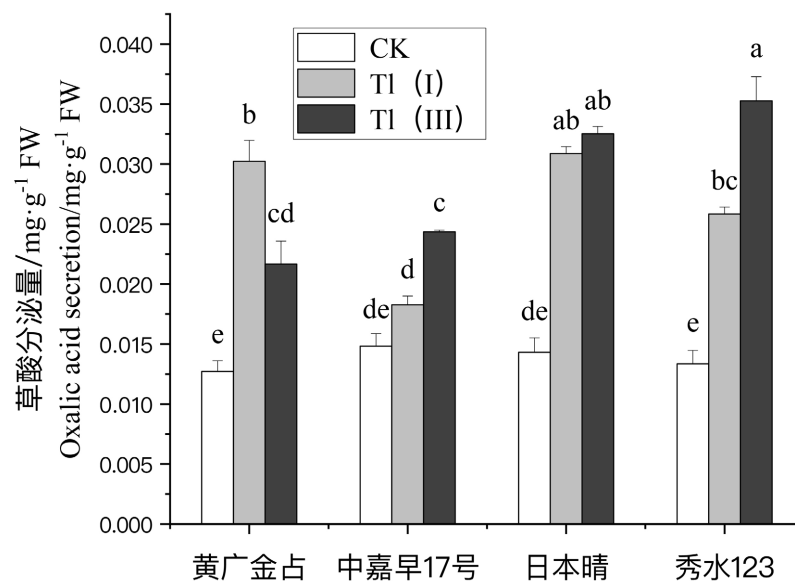


**Figure 1.** Comparisons of thallium absorption of four indica and japonica rice varieties under two valence thallium stress

**图 1.** 四个籼粳稻品种在两种价态铊胁迫下的铊吸收量比较

#### 3.2. 水稻籼粳品种在两种价态铊处理后根系草酸分泌量比较

籼稻黄广金占及中嘉早 17, 粳稻日本晴及秀水 123, 这四个品种水稻在两种价态铊处理 2 h 后, 对植株鲜重下根系的草酸分泌量进行测定, 结果如图 2 所示。在对照组中, 根系的草酸分泌量在  $0.013 \pm 0.001 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$  ~  $0.015 \pm 0.001 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$  范围, 各对照组间草酸分泌量无显著差异, 说明去离子水处理水稻植株, 也会刺激根系分泌一定量的草酸; 中嘉早 17 和秀水 123 在 Tl(I)处理中, 草酸分泌量分别为  $0.018 \pm 0.001 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ 、 $0.026 \pm 0.001 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ , 在 Tl(III)处理中则上升为  $0.024 \pm 0.000 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ 、 $0.035 \pm 0.002 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ , 这两种水稻在 Tl(III)处理中草酸分泌量均高于 Tl(I)处理; 另外两种水稻的草酸分泌规律则不同, 黄广金占在 Tl(I)处理中草酸分泌量为  $0.030 \pm 0.002 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ , 显著高于 Tl(III)处理的  $0.022 \pm 0.002 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ ; 日本晴在 Tl(I)和 Tl(III)处理中的草酸分泌量则分别为  $0.031 \pm 0.001 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$  和  $0.032 \pm 0.001 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ , 两个处理间不具备显著性差异。

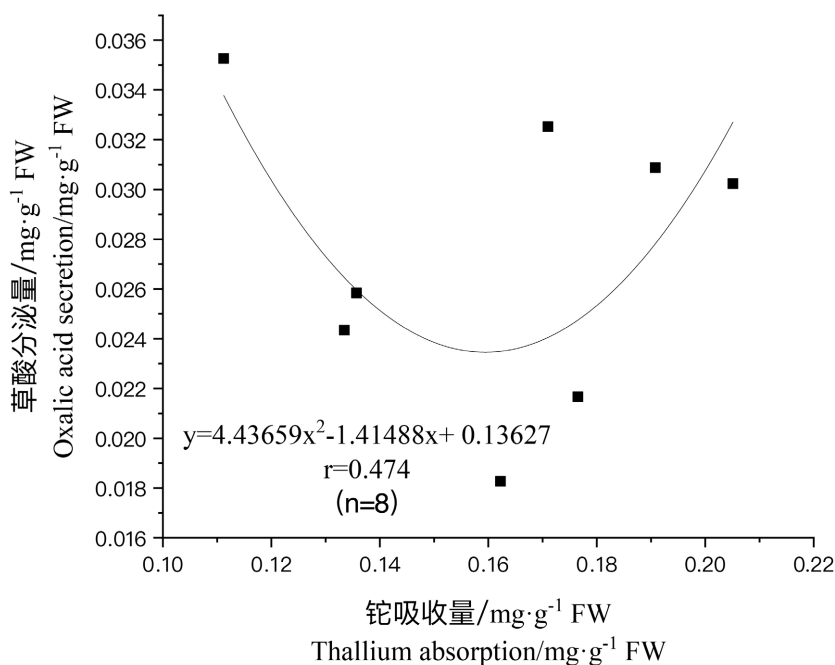


**Figure 2.** Comparisons of oxalic acid secretions of four indica and japonica rice varieties under two valence thallium stress

**图 2.** 四个籼粳稻品种在两种价态铊胁迫下的草酸分泌量比较

### 3.3. 水稻籼粳品种在两种价态铊处理后铊吸收量与根系草酸分泌量的相关性

通过 SPSS 对四种籼粳水稻铊吸收量及根系草酸分泌量进行曲线估计, 在多种曲线模型中, 散点分布与二次函数模型的拟合度最高, 对铊吸收量与根系草酸分泌进行二次函数回归分析的结果如图 3 所示, 两者之间的相关系数  $r = 0.474$ , 相关性低。



**Figure 3.** Correlation between thallium absorption and oxalate secretion of four indica and japonica rice varieties under two valence thallium stress

**图 3.** 四个籼稻品种在两种价态铊胁迫下铊吸收量与草酸分泌量的相关性

## 4. 讨论

前人实验中曾以 46 个籼稻品种和 30 个粳稻品种作为实验材料, 研究在镉处理下不同籼、粳稻的镉积累水平, 结果发现籼稻组整体平均镉含量低于粳稻组, 水稻在镉胁迫时的镉吸收量受到水稻分属亚种的影响[4]。在本实验中, 尽管 4 个籼粳水稻对两种价态铊的吸收量存在一定差异, 但这种差异与该水稻属于籼稻亚种或粳稻亚种关系不明显, 这可能与测试水稻品种的数量有限有关, 但是水稻在面对铅胁迫时, 铅吸收量与水稻所属亚种的关系也并不明显[8], 说明水稻在应对不同重金属胁迫的时候, 对重金属的吸收模式有所不同; 甘蓝在两种价态铊胁迫下, Tl(I)处理中的铊吸收量要高于 Tl(III)处理[9], 本实验测定的四种籼粳水稻, 在 Tl(I)处理中的铊吸收量也均显著高于 Tl(III)处理中的铊吸收量, 表明水稻对铊的吸收能力也受到铊价态的影响。

此外, 有研究表明, 籼稻在 Tl(I)胁迫下铊吸收量与根系草酸分泌量呈现线性负相关的关系, 水稻根系分泌的草酸能够有效抑制籼型水稻对铊的吸收[7]。但是本实验四种籼粳水稻在两种价态铊处理中的草酸分泌量, 只有籼稻中嘉早 17 与粳稻秀水 123 在 Tl(III)处理中根系草酸分泌量均显著高于 Tl(I)处理, 且草酸分泌量较高的品种铊吸收量较低; 籼稻黄广金占与粳稻日本晴的铊吸收量与草酸分泌情况则不具备相同规律。通过对两种价态铊胁迫下四种籼粳水稻的铊吸收量与草酸分泌量进行回归分析, 发现两者之间的相关性低。这表明两种价态铊处理下根系草酸分泌量对铊吸收的影响较小, 水稻根系铊吸收可能主要受其他机制作用。水稻在正常情况下根系分泌的有机酸组成多样, 包括草酸、酒石酸、柠檬酸、苹果酸和乙酸等[10]。在本实验中, 四种籼粳水稻在对照组中与 Tl 处理组一样, 根系均分泌草酸, 这可能说明草酸分泌并非铊胁迫的结果。曾有研究报告, 钾缺乏会使香蕉根系分泌更多的草酸[11], 本实验中对对照组使用去离子对水稻进行处理, 可以视作一个营养缺乏的环境, 这可能也导致对照组分泌草酸。白羽扇豆在缺磷环境下, 根系会释放大量有机酸使环境酸化并溶解获取土壤中的磷酸盐, 在这个过程中, 根系质膜的  $H^+$ -ATP 酶浓度会显著提高, 并且在添加 ATP 酶抑制剂  $Na_3VO_4$  后, 根系的  $H^+$ -ATP 酶活性和有机酸分泌都会被抑制[12]; 在铝胁迫中, P 缺乏时会促使油菜质膜  $H^+$ -ATP 酶活力会比 P 丰富油菜更强, 且分泌更多柠檬酸[13]。本研究水稻根系的草酸分泌是否与  $H^+$ -ATP 酶有关联, 仍需要进一步扩大检测的水稻种类与指标数目进行验证。

## 5. 结论

本试验结果表明, 黄广金占、中嘉早 17、日本晴、秀水 123 这四个品种的籼粳水稻在 Tl(I)处理中的铊吸收量分别为  $0.21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$  与  $0.16 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ 、 $0.19 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$  与  $0.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ , 而在 Tl(III)处理中的铊吸收量则分别为  $0.18 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$  与  $0.13 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ 、 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$  与  $0.11 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ , 不同水稻在两种价态铊胁迫中, 铊吸收量各有差异, 但该差异与水稻所属亚种无明显关系, 同种水稻在 Tl(I)处理中, 铊吸收量均显著高于 Tl(III)处理, 水稻对 Tl(I)可能比 Tl(III)更容易吸收, 想要验证这个规律, 后续需要扩大水稻品种的数量, 检测它们在两种价态铊处理下的铊吸收能力; 这四种水稻在 Tl(I)处理中的草酸分泌量分别为  $0.030 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$  与  $0.018 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ 、 $0.031 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$  与  $0.026 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ , 而在 Tl(III)处理中的草酸分泌量则为  $0.022 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$  与  $0.024 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ 、 $0.035 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$  与  $0.032 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}$ , 尽管中嘉早 17 和秀水 123 这两种水稻在 Tl(III)处理中草酸分泌量均显著高于 Tl(I)处理, 具有相似的草酸分泌规律, 但是黄广金占在 Tl(I)处理分泌更多的草酸, 日本晴在两种价态铊胁迫下草酸分泌量无明显差异, 水稻在两种价态铊胁迫时的根系草酸分泌情况, 不具备明显的规律; 通过 SPSS 对四种水稻的铊吸收量及根系草酸分泌量进行二次函数回归分析, 两者之间相关系数  $r = 0.474$ , 相关性低, 说明水稻应对铊胁迫时, 根系草酸分泌量对铊吸收量的影响较小, 如果要验证该结论, 后续可以扩大检测水稻的品种, 进一步提高结论的可信度; 此外, 水稻在对照组用去离子水处理时, 与前人实验中, 水稻通常情况下分泌

草酸、酒石酸、苹果酸与乙酸等多种有机酸不同, 对照组中水稻与两种价态铊处理中一样分泌专一性的草酸, 结合前人实验中部分植物的有机酸分泌与根系  $H^+$ -ATP 酶浓度息息相关, 且营养缺乏时也有促进  $H^+$ -ATP 酶活与有机酸分泌提高的案例, 未来也可以从  $H^+$ -ATP 酶作为切入点, 测定水稻在两种价态铊胁迫时, 根系的  $H^+$ -ATP 酶活性与编码该蛋白基因的相对表达量, 进一步验证水稻根系草酸分泌是否与铊吸收相关。

## 基金项目

大学生创新创业训练项目(CX2019264; CX2020); 广州大学生命科学学院科创杯项目。

## 参考文献

- [1] Lan, C.H. and Lin, T.S. (2005) Acute Toxicity of Trivalent Thallium Compounds to *Daphnia Magna*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **61**, 432-435. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.12.021>
- [2] Liu, J., Wang, J., Chen, Y., Shen, C.C., Jiang, X., Chen, D., Lippold, H. and Wang C. (2016) Thallium Dispersal and Contamination in Surface Sediments from South China and Its Source Identification. *Environmental Pollution*, **213**, 878-887. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.023>
- [3] Xiao, T., Guha, J., Boyle, D., Liu, C.Q., Zheng, B., Wilson, G.C., Rouleau, A. and Chen, J. (2004) Naturally Occurring Thallium: A Hidden Geoenvironmental Health Hazard? *Environment International*, **30**, 501-507. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.10.004>
- [4] 周全. 粳、籼稻镉积累差异及机理的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [5] 傅晓萍, 豆长明, 胡少平, 陈新才, 施积炎, 陈英旭. 有机酸在植物对重金属耐性和解毒机制中的作用[J]. 植物生态学报, 2010, 34(11): 1354-1358.
- [6] Brunner, I. and Sperisen, C. (2013) Aluminum Exclusion and Aluminum Tolerance in Woody Plants. *Frontiers in Plant Science*, **4**, Article No. 172. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00172>
- [7] 刘芳, 王摸云, 杨睿祺, 杨钊楠, 张平, 姚焱. 重金属铊胁迫下水稻(*Oryza sativa* L.)根系草酸含量与铊吸收的关系[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(3): 34-40.
- [8] 刘建国. 水稻品种对土壤重金属镉铅吸收分配的差异及其机理[D]: [博士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2004.
- [9] 王摸云, 郑婉铭, 杨睿祺, 张平, 刘文峰, 姚焱. 铊胁迫下甘蓝根系有机酸分泌特征及对铊吸收的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2020, 43(5): 47-50.
- [10] 关强, 蒲瑶瑶, 张欣, 王媛媛, 李大明, 李辉信, 胡锋, 焦加国, 管晓进. 长期施肥对水稻根系有机酸分泌和土壤有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 115-121.
- [11] 吴宇佳, 张文, 肖彤斌, 符传良, 吉清妹, 谢良商. 缺钾对不同基因型香蕉根系分泌物产生及土壤钾活化的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(3): 624-628.
- [12] Yan, F., Zhu, Y., Müller, C., Zörb, C. and Schubert, S. (2002) Adaptation of  $H^+$ -Pumping and Plasma Membrane  $H^+$  ATPase Activity in Proteoid Roots of White Lupin under Phosphate Deficiency. *Plant Physiology*, **129**, 50-63. <https://doi.org/10.1104/pp.010869>
- [13] Ligaba, A., Shen, H., Shibata, K., Yamamoto, Y., Tanakamaru, S. and Matsumoto, H. (2004) The Role of Phosphorus in Aluminium-Induced Citrate and Malate Exudation from Rape (*Brassica napus*). *Physiologia Plantarum*, **120**, 575-584. <https://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.0290.x>