

邹金城, 龚玉莲, 陈丽红, 林丹萍, 曾碧健, 谢捷, 陈彩锋, 周晓妤. 根系分泌物对蕹菜 Cd 吸收积累的影响 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(5): 60–66.

根系分泌物对蕹菜 Cd 吸收积累的影响

邹金城, 龚玉莲, 陈丽红, 林丹萍, 曾碧健, 谢捷, 陈彩锋, 周晓妤
(广东第二师范学院生物与食品工程学院, 广东 广州 510303)

摘要: 【目的】研究根系分泌物对蕹菜 Cd 吸收积累的影响。【方法】采用水培–土培联合的方法, 通过水培种植蕹菜 (*Ipomoea aquatica* Forsk.) 典型低 Cd 积累品种 (QLQ) 和高 Cd 积累品种 (T308) 收集根系分泌物, 将 QLQ 根系分泌物施入种植 T308 的土壤中, 将 T308 根系分泌物施入种植 QLQ 的土壤中。【结果】蕹菜两个品种的生长差异不显著; QLQ 茎叶 Cd 质量浓度显著低于 T308。施加典型品种的根系分泌物, 总体上不影响两个蕹菜品种的生长。根系分泌物的施入总体上提高了供试蕹菜品种的茎叶、根 Cd 质量浓度和 Cd 积累量, 表现为促进植株对 Cd 的积累, 原因主要在于根系分泌物提高了植株对土壤 Cd 的吸收能力。不同 Cd 质量浓度处理收集的蕹菜根系分泌物对植株 Cd 积累的影响存在差异。低 Cd 品种 QLQ 的根系分泌物显著降低了高 Cd 品种 T308 的 Cd 转运系数, 0 mg/L Cd 条件下的转运系数降低 30.23%; 而 T308 根系分泌物对 QLQ 的 Cd 转运系数并未产生显著影响。【结论】根系分泌物的施加促进植株对 Cd 的积累; 低 Cd 品种 QLQ 表现出极强的低 Cd 转运能力。

关键词: 蕹菜 (*Ipomoea aquatica* Forsk.); 低 Cd 品种; 高 Cd 品种; 根系分泌物; Cd 积累

中图分类号: S636; Q948.116; X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004–874X (2019) 05–0060–07

Effects of Root Exudates on Cd Absorption and Accumulation in *Ipomoea aquatica* Forsk

ZOU Jincheng, GONG Yulian, CHEN Lihong, LIN Danping,
ZENG Bijian, XIE Jie, CHEN Caifeng, ZHOU Xiaoyu

(College of Biology and Food Engineering, Guangdong University of Education, Guangzhou 510303, China)

Abstract: 【Objective】The study was conducted to investigate the effect of root exudates on Cd absorption and accumulation of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.). 【Method】By using water–soil culture method, typical varieties of *I. aquatica* Forsk with low Cd accumulation (QLQ) and high Cd accumulation (T308) were planted in water culture to collect root exudates. QLQ root exudates were put into the soil of T308, and T308 root exudates into the soil of QLQ. 【Result】The results showed that there was no significant difference in the growth between QLQ and T308 ($P>0.05$). The Cd concentration in stems and leaves of QLQ was significantly lower than that of T308 ($P<0.05$). In general, the addition of root exudates of typical varieties had no significant effect on the growth of such two varieties of *I. aquatica* Forsk. Generally, the addition of root exudates improved the Cd concentration and Cd accumulation in the stems, leaves and roots of the experimental varieties of *I. aquatica* Forsk, and promoted Cd accumulation in plants. This was mainly because that root exudates improved plants' absorption of Cd from soil. Root exudates of *I. aquatica* Forsk collected under different Cd concentration treatments had different effects on plants' Cd accumulation. Root exudates of the low Cd–cultivar QLQ significantly lowered the Cd

收稿日期: 2019–02–18

基金项目: 广东省自然科学基金 (2017A030313191); 广东第二师范学院教学改革项目 (2018jxgg13); 广东第二师范学院大学生创新训练项目 (201814278035, 201814278034)

作者简介: 邹金城 (1997—), 男, 在读本科生, 研究方向为根际污染生态学, E-mail: 857982120@qq.com

通信作者: 龚玉莲 (1974—), 女, 博士, 教授, 研究方向为根际污染生态学, E-mail: gongyulian@gdei.edu.cn

translocation coefficient of the high-Cd cultivar T308 ($P < 0.05$), with the translocation coefficient being reduced by 30.23% under 0 mg/L Cd treatment. While root exudates of T308 had no significant effect on the Cd translocation coefficient of QLQ ($P > 0.05$). 【Conclusion】 The addition of root exudates promoted Cd accumulation in water spinach, and the low-Cd cultivar QLQ showed extremely low Cd translocation capacity.

Key words: *Ipomoea aquatica* Forsk.; low-Cd cultivar; high-Cd cultivar; root exudate; Cd accumulation

【研究意义】Cd (cadmium, Cd) 是一种危害极高的重金属元素。镉是对生物毒性最强的污染物之一。过量的镉能够抑制植物的生长和光合作用, 干扰矿质代谢并诱发氧化胁迫^[1]。2014年《全国土壤污染状况调查报告》指出, 我国土壤Cd污染点位超标率达到7.0%, 目前我国受Cd污染土壤的面积占总耕地面积的1/6。蔬菜等农作物受Cd污染的风险较高^[2]。根系作为植物与外界联系的门户, 在植物生长过程中向生长介质中分泌质子, 释放无机离子, 溢泌或分泌大量的有机物, 这些物质和根组织脱落物一起统称为根系分泌物^[3]。根系分泌物通过影响根际理化性质和生物学性质^[4], 改变土壤pH、络合及螯合作用、还原活化作用等方式, 影响植物对重金属的吸收积累^[3]。【前人研究进展】将根系分泌物施入土壤, 影响植株对土壤重金属的吸收积累。根系分泌物的施入可能促进或抑制重金属吸收积累^[5]。研究表明, Cd胁迫下根系分泌总量与根系分泌物活化土壤Cd能力呈极显著负相关^[6]; 根系分泌物中的有机酸能增加Cd的生物有效性, 使Cd更容易被植物所吸收^[7]。秦丽^[8]研究表明根系分泌物中的柠檬酸能促进续断菊和蚕豆对Cd的累积, 续断菊根系分泌物的草酸能促进续断菊对Pb的积累、而抑制蚕豆体内的Pb积累量。蒋先军等^[9]报道根系分泌物显著提高了印度芥菜地上部分的Cd质量分数。【本研究切入点】蕹菜(*Ipomoea aquatica* Forsk), 又名空心菜, 旋花科甘薯属植物, 是我国南方常见的叶用蔬菜, 具有较高的经济价值^[10-12]。蕹菜对Cd具有较高的积累能力, 因此极易受Cd污染^[13], 前期研究^[14-15]筛选得到了蕹菜典型的低Cd积累品种和高Cd积累品种, 并发现两个品种的根际土壤化学、生物学特征存在差异, 根际土壤低分子量有机酸、有机质结构特征也存在差异。上述研究结果直接显示了根系分泌物对于重金属吸收积累的作用。【拟解决的关键问题】为了解蕹菜典型品种根系分泌物对于Cd积累的直接影响, 本研究通过低Cd积累品种和

高Cd积累品种的根系分泌物分别直接施入土壤的试验, 研究典型品种根系分泌物对蕹菜Cd吸收积累的影响, 为了解蕹菜典型品种的根系分泌物对Cd积累的作用提供直接证据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试蕹菜采用2个Cd积累典型品种, 高Cd积累品种T308和低Cd积累品种QLQ^[7]。

1.2 试验方法

水培试验: 采用水培法分别收集T308、QLQ的根系分泌物。种子先用质量分数为2%次氯酸钠消毒20 min, 用蒸馏水清洗2~3次。待种子长出两片真叶后, 将幼苗移入1/2 Hoagland营养液中, 3 d后移入Hoagland全营养液^[16]中, 3 d换一次营养液, 每盆种4株植株。Hoagland全营养液设置质量浓度为0、2 mg/L Cd两个处理, 4次重复, 共16盆。15 d后将根用超纯水洗净, 放置于装有250 mL超纯水的烧杯中, 烧杯外壁由锡纸包裹, 自然光照6 h收集根系分泌物。0、2 mg/L Cd两个处理T308根系分泌物的pH值分别为6.13和6.15, Cd质量浓度分别为0.0025、0.0032 mg/L; QLQ根系分泌物的pH值分别为6.17和6.15, Cd质量浓度分别为0.0031、0.0036 mg/L, 各处理根系分泌物的pH值、Cd质量浓度的差异均不显著。

土培试验: 土壤取自普通农田, 其理化性质为: pH值6.54、有机质质量分数37.52 g/kg、碱解氮质量分数81.01 mg/kg、有效磷质量分数71.41 mg/kg、速效钾质量分数155.23 mg/kg、重金属镉质量分数2.61 mg/kg。根据我国食用农产品产地环境评价标准(HJ332-2006), 供试土壤为Cd污染土。

土壤处理: 土壤风干, 过1 mm筛, 按照N 300 mg/kg、P 128 mg/kg、K 156 mg/kg的比例, 以尿素、磷酸二氢钾的形式施基肥, 彻底混匀, 平衡2周。每个花盆装土1.8 kg。

种子播种, 间苗, 每盆保留4株植株。待

植株长到 4~5 片真叶后, 将收集的不同 Cd 质量分数处理的根系分泌物施入土壤, 每盆土壤施入根系分泌物 250 mL。将 QLQ 根系分泌物施入种植 T308 的土壤中, 将 T308 根系分泌物施入种植 QLQ 的土壤中, 以不施入根系分泌物、仅施入超纯水的 T 308、QLQ 为对照, 共 24 盆。种植 40 d 后收获植株。

1.3 测定项目及方法

收获植株前测定株高, 收获后分别测定茎叶、根的鲜质量。70 °C 下烘干茎叶和根、测干质量。植物样品用硝酸: 双氧水 (5 : 2) 微波消解, 用原子吸收分光光度计测定 Cd 质量浓度, 测样过程采用国家标准参比物质进行分析质量控制。Cd 积累量 = 植株 Cd 质量浓度 × 植株干质量; 转运系数 = 茎叶 Cd 质量浓度 / 根 Cd 质量浓度; 富集系数 = 植株 Cd 质量浓度 / 土壤 Cd 质量浓度。

试验数据采用 SPSS 软件进行统计分析, 采

用 LSD 法进行差异显著性测验。

2 结果与分析

2.1 根系分泌物对蕹菜典型品种生长的影响

由表 1 可知, 不施加根系分泌物的对照条件下, 蕹菜品种 T308 的株高、鲜质量、干质量与 QLQ 的差异均不显著, 表明两个供试蕹菜品种的生长情况基本一致。

方差分析结果显示, QLQ 根系分泌物对 T308 株高、鲜质量、干质量的效应均显著, 其中 0 mg/L Cd 处理 T308 株高、鲜质量、干质量分别显著降低 20.88%、58.53%、58.73%; 2 mg/L Cd 处理 T308 株高、鲜质量、干质量与对照差异均不显著。T308 根系分泌物对 QLQ 株高、鲜质量、干质量的效应不显著。结果表明, 除 0 mg/L Cd 处理 QLQ 根系分泌物抑制 T308 生长外, 其余处理对两个品种的生长无显著影响。

表 1 根系分泌物对蕹菜典型品种生长的影响

Table 1 Effects of root exudates on growth of typical *Ipomoea aquatica* Forsk varieties

品种 Variety	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	鲜质量 Fresh quality (g)	干质量 Dry weight (g)
T308	CK	17.381 ± 0.83a	17.58 ± 2.22a	1.89 ± 0.25a
	QLQ ⁰	13.756 ± 4.13b	7.29 ± 5.96b	0.78 ± 0.61b
	QLQ ²	17.406 ± 1.28a	15.07 ± 2.51a	1.40 ± 0.35a
QLQ	CK	15.300 ± 0.261ab	14.49 ± 1.21a	1.57 ± 0.22a
	T308 ⁰	16.863 ± 1.14a	15.91 ± 4.52a	1.70 ± 0.59a
	T308 ²	16.869 ± 1.77a	16.63 ± 2.78a	1.63 ± 0.38a

注: 同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。QLQ⁰ 为施加 0 mg/L Cd 收集的 QLQ 根系分泌物处理, QLQ² 为施加 2 mg/L Cd 收集的 QLQ 根系分泌物处理, T308⁰ 为施加 0 mg/L Cd 收集的 T308 根系分泌物处理, T308² 为施加 2 mg/L Cd 收集的 T308 根系分泌物处理。

Note: The different lowercase letters in same column represent significant differences. QLQ⁰ represents the root exudate of QLQ treated with 0 mg/L Cd, QLQ² represents the root exudate of QLQ treated with 2 mg/L Cd, T308⁰ represents the root exudate of T308 treated with 0 mg/L Cd, and T308² represents the root exudate of T308 treated with 2 mg/L Cd.

2.2 根系分泌物对蕹菜典型品种 Cd 质量分数、Cd 积累量的影响

由表 2 可知, 蕹菜品种 T308 茎叶 Cd 质量浓度显著高于 QLQ, T308 茎叶 Cd 质量浓度比 QLQ 高 85.86%。两个品种的根 Cd 质量浓度和 Cd 积累量差异不显著。这与两个品种的 Cd 积累特性相一致。

方差分析结果显示, QLQ 根系分泌物对 T308 茎叶 Cd 质量浓度、根 Cd 质量浓度的效应显著。QLQ 根系分泌物使 T308 茎叶 Cd 质量浓度显著增加; 与对照比较, 0、2 mg/L Cd 处理 T308 茎叶 Cd 质量浓度分别增加 38.15% 和 40.20%。QLQ 根系

分泌物也提高了 T308 根 Cd 质量浓度, 其中 0 mg/L Cd 处理差异显著, 比对照提高 55.74%。QLQ 根系分泌物使 2 mg/L Cd 处理的 T308 Cd 积累量增加, 但 0 mg/L Cd 处理 Cd 积累量显著下降, 原因在于其干质量的降低 (表 2)。结果表明 QLQ 的根系分泌物促进 T308 茎叶和根对 Cd 的吸收。T308 根系分泌物对 QLQ 茎叶 Cd 质量浓度、Cd 积累量的效应不显著, 但对根 Cd 质量浓度的效应显著。T308 的根系分泌物使 QLQ 根部 Cd 质量浓度均显著增加, 0、2 mg/L Cd 处理 QLQ 根 Cd 质量浓度比对照分别增加 50.19% 和 59.76%。表明 T308 根系分泌物促进 QLQ 地下部分对 Cd 的积累。

与对照相比, 2 mg/L Cd 处理根系分泌物对 Cd 质量浓度的增加幅度(平均 46.40%) 高于 0 mg/L Cd 处理根系分泌物(平均 41.50%); QLQ

根系分泌物对 T308 根 Cd 质量浓度的增加幅度(平均 36.15%) 低于 T308 根系分泌物对 QLQ 根 Cd 质量浓度的影响(平均 74.95%)。

表 2 根系分泌物对蕹菜典型品种的 Cd 质量分数(以干质量为基数)、Cd 积累量的影响

Table 2 Effects of root exudates on Cd concentration (based on dry mass) and Cd accumulation of typical *Ipomoea aquatica* Forsk varieties

品种 Variety	处理 Treatment	Cd 质量浓度(以干质量为基数) Cd mass concentration (based on dry mass)		Cd 积累量 Cd accumulation
				干质量 Dry weight(10 ⁻⁶ g)
		茎叶 Stem and leaf (mg/kg)	根 Root (mg/kg)	
T308	CK	2.301 ± 0.30b	2.96 ± 0.24cd	9.34 ± 0.66a
	QLQ ⁰	3.179 ± 0.55a	4.61 ± 0.99a	6.39 ± 4.66b
	QLQ ²	3.226 ± 0.95a	3.45 ± 0.46bc	10.72 ± 0.71a
QLQ	CK	1.238 ± 0.19c	2.51 ± 0.82d	8.04 ± 0.30a
	T308 ⁰	1.509 ± 0.26c	3.77 ± 0.15abc	8.61 ± 1.75a
	T308 ²	1.599 ± 0.11c	4.01 ± 0.47ab	9.03 ± 1.86a

注: 同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。QLQ⁰ 为施加 0 mg/L Cd 收集的 QLQ 根系分泌物处理, QLQ² 为施加 2 mg/L Cd 收集的 QLQ 根系分泌物处理, T308⁰ 为施加 0 mg/L Cd 收集的 T308 根系分泌物处理, T308² 为施加 2 mg/L Cd 收集的 T308 根系分泌物处理。

Note: The different lowercase letters in same column represent significant differences. QLQ⁰ represents the root exudate of QLQ treated with 0 mg/L Cd, QLQ² represents the root exudate of QLQ treated with 2 mg/L Cd, T308⁰ represents the root exudate of T308 treated with 0 mg/L Cd, and T308² represents the root exudate of T308 treated with 2 mg/L Cd.

2.3 根系分泌物对蕹菜典型品种 Cd 转运系数、富集系数的影响

转运系数是指植物地上部(茎叶)重金属质量浓度与地下部(根)重金属质量浓度之比, 反映了重金属在植物体不同器官中的分配情况。由表 3 可知, 两个品种的转运系数均小于 1, T308 的转运系数显著高于 QLQ, 表明 T308 体内对 Cd 的转运能力高于 QLQ; T308 的富集系数与 QLQ 差异不显著, 表明两个品种的富集特性相似。

方差分析结果显示, QLQ 根系分泌物对 T308

体内 Cd 转运系数的效应显著。与对照比较, QLQ 根系分泌物使 T308 的转运系数降低, 0 mg/L Cd 处理的转运系数降低 30.23% ($P < 0.05$)。施加 T308 根系分泌物对 QLQ 转运系数的影响不显著。结果表明施加 QLQ 根系分泌物抑制了蕹菜品种 T308 体内 Cd 从根部向地上部分的转运能力, 且 0 mg/L Cd 处理的 QLQ 根系分泌物对 T308 转运能力的降低幅度高于 2 mg/L Cd 处理。

QLQ 根系分泌物对 T308 Cd 富集系数的效应显著。与对照比较, QLQ 根系分泌物使 T308 的

表 3 根系分泌物对蕹菜典型品种 Cd 转运系数、富集系数的影响

Table 3 Effects of root exudates on Cd translocation coefficient and Cd enrichment coefficient of typical *Ipomoea aquatica* Forsk varieties

品种 Variety	处理 Treatment	干质量转运系数 Translocation coefficient of dry weight	干质量富集系数 Enrichment coefficient of dry weight
T308	CK	0.86 ± 0.23a	2.62 ± 0.29b
	QLQ ⁰	0.60 ± 0.04b	4.43 ± 0.27a
	QLQ ²	0.70 ± 0.22ab	4.08 ± 0.37a
QLQ	CK	0.32 ± 0.07c	2.78 ± 0.24b
	T308 ⁰	0.42 ± 0.05bc	2.67 ± 0.25b
	T308 ²	0.40 ± 0.02c	2.93 ± 0.17b

注: 同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。QLQ⁰ 为施加 0 mg/L Cd 收集的 QLQ 根系分泌物处理, QLQ² 为施加 2 mg/L Cd 收集的 QLQ 根系分泌物处理, T308⁰ 为施加 0 mg/L Cd 收集的 T308 根系分泌物处理, T308² 为施加 2 mg/L Cd 收集的 T308 根系分泌物处理。

Note: The different lowercase letters in same column represent significant differences. QLQ⁰ represents the root exudate of QLQ treated with 0 mg/L Cd, QLQ² represents the root exudate of QLQ treated with 2 mg/L Cd, T308⁰ represents the root exudate of T308 treated with 0 mg/L Cd, and T308² represents the root exudate of T308 treated with 2 mg/L Cd.

Cd 富集系数显著增加, 0、2 mg/L Cd 处理 T 308 富集系数分别增加 69.08%、56.48%, 可见 0 mg/L Cd 处理 QLQ 根系分泌物对 T308 富集系数的增加幅度高于 2 mg/L Cd 处理。施加 T308 根系分泌物对 QLQ Cd 富集系数的影响不显著。表明施加 QLQ 根系分泌物促进了蔬菜品种 T308 对土壤中 Cd 的富集能力。

3 讨论

两个供试蔬菜典型品种的生长无显著差异, 但 Cd 吸收积累存在差异。高 Cd 品种 T308 的茎叶 Cd 质量浓度为低 Cd 品种 QLQ 的 1.86 倍。两个品种间根 Cd 质量分数、Cd 积累量和 Cd 富集系数的差异不显著, 而转运系数的差异高达 1.69 倍, 表明品种间 Cd 积累差异的原因主要在于 Cd 在植株体内从地下部分转运到茎叶的能力存在差异。这与前人^[10, 17]的研究结果一致。

本研究发现, 根系分泌物的施入提高了供试蔬菜品种的茎叶 Cd 质量浓度、根 Cd 质量浓度, 总体表现为促进植株对 Cd 的积累。乔冬梅^[18]报道黑麦草根系分泌物的施入促进重金属的吸收积累, 当土壤中 Pb 质量分数大于 100 mg/L 时, 黑麦草根系分泌物显著促进 Pb 的吸收积累。秦丽^[8]发现续断菊根系分泌物中的柠檬酸能促进续断菊和蚕豆对 Cd 的积累, 续断菊根系分泌物的草酸能促进续断菊对 Pb 的积累。

QLQ 根系分泌物的施入使 T308 的 Cd 转运系数显著下降, T308 根系分泌物的施入对 QLQ 的 Cd 转运系数影响不显著。相反, QLQ 根系分泌物的施入使 T308 的 Cd 富集系数显著提高, T308 根系分泌物的施入也提高了 QLQ 的 Cd 富集系数, 但影响不显著。表明根系分泌物的施入促进两个供试蔬菜品种 Cd 积累的主要原因在于根系分泌物提高了植株对土壤 Cd 的吸收能力。根系分泌物能通过有效改变土壤的 pH 值来改变根际土壤中重金属的溶解度和移动性, 成为植物可吸收态重金属^[19]。根系分泌的有机酸能有效活化矿山废水沉淀物中的重金属, 从而促进植物对重金属的吸收^[20]。吴启堂^[7]研究发现玉米根系分泌物与 Cd 的络合可达到 1.28 mol/kg, 新鲜根系分泌物降低土壤对 Cd 的吸附, 提高其扩散性, 从而提高植物对 Cd 的吸收。前期研究发现两个蔬菜品种均降低了根际土壤 pH 和氧化还原电位, 并向

根际分泌柠檬酸等低分子量有机酸^[14], 这与本研究发现蔬菜根系分泌物促进 Cd 的积累有关。

不同 Cd 质量浓度处理收集的蔬菜根系分泌物对植株 Cd 积累的影响存在差异。原因可能在于不同 Cd 质量浓度处理收集的根系分泌物的组分存在差异。张玲等研究发现不同 Cd 质量浓度条件下, 小麦根系分泌物的组成和质量浓度都存在差异。电解质外渗率、糖类、氨基酸随 Cd²⁺ 质量浓度升高而增加; 在低质量浓度 Cd²⁺ (0.5 mg/L) 条件下, 随处理质量浓度的升高, 氨基酸分泌量增加; 当处理质量浓度高于相应质量浓度 (50 mg/L) 时, 氨基酸分泌量随质量浓度升高而减少。随 Cd²⁺ 质量浓度升高, 次生代谢物分泌种类减少^[21]。

有研究发现根系分泌物能提高 Cd 在植物体内的转运系数。王吉秀等^[22]报道玉米根系分泌物对小花南芥菜 Pb 的转运起到促进作用, 转运系数增加 22%, 相关分析结果表明 Pb 的转运系数与玉米根系分泌物中的有机酸显著相关。徐健程等^[23]研究表明, 豌豆根系分泌物能增加玉米地下部 Cu²⁺ 质量浓度, 降低玉米地上部 Cu²⁺ 质量浓度, 抑制 Cu 的转运系数, 本研究得到相似的结果。低 Cd 品种 QLQ 根系分泌物的施入, 使高 Cd 品种 T308 的 Cd 转运系数显著下降, 而高 Cd 品种 T308 根系分泌物的施入对低 Cd 品种 QLQ 的 Cd 转运系数影响也不显著; 虽然高 Cd 品种 T308 根系分泌物的施入显著提高了低 Cd 品种 QLQ 的根 Cd 质量浓度, 但对 QLQ 的茎叶 Cd 质量浓度并无显著增加。以上结果一方面表明低 Cd 品种 QLQ 具有较强的低 Cd 转运能力, 高 Cd 品种 T308 根系分泌物都未能影响其转运能力; 另一方面, 低 Cd 品种 QLQ 根系分泌物不但没有增加 T308 的 Cd 转运系数, 反而使其显著降低, 结果显示出低 Cd 品种 QLQ 根系分泌物在降低 Cd 转运能力方面的特征性的突出能力。进一步深入研究蔬菜低 Cd 品种 QLQ 根系分泌物对于降低 Cd 转运能力的作用及其机理, 有助于其低 Cd 机理的理解和应用。

4 结论

试验结果表明, 蔬菜典型低 Cd 品种 QLQ 和高 Cd 品种 T308 的生长差异不显著, QLQ 茎叶 Cd 积累显著低于 T308, 品种间 Cd 积累差异的原因主要在于植株体内 Cd 从地下部分转运到茎叶的能力存在差异。施加典型品种的根系分泌物总

体上不影响两个蔬菜品种的生长。根系分泌物的施加总体表现为促进植株对 Cd 的积累, 主要原因在于根系分泌物提高了植株对土壤 Cd 的吸收能力。不同 Cd 质量浓度处理收集的蔬菜根系分泌物对植株 Cd 积累的影响存在差异。低 Cd 品种 QLQ 的根系分泌物显著降低了高 Cd 品种 T308 的 Cd 转运系数, 而高 Cd 品种 T308 根系分泌物对低 Cd 品种 QLQ 的 Cd 转运系数并未产生显著影响; 低 Cd 品种 QLQ 表现出极强的低 Cd 转运能力。

参考文献 (References):

- [1] 刘彩凤, 史刚荣, 余如刚, 张铮. 硅缓解植物镉毒害的生理生态机制 [J]. 生态学报, 2017, 37 (23): 7799-7810. doi:10.5866/stxb201610072005.
LIU C F, SHI G R, YU R G, ZHANG Z. Physiological and ecological mechanisms of silicon in mitigating cadmium toxicity in plants [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (23): 7799-7810. doi:10.5866/stxb201610072005.
- [2] 蔡云梅, 张艳林, 任露陆, 李彩霞, 王固宁, 黄涵书. 广州市区菜地土壤重金属污染特征及生态风险评价 [J]. 广东农业科学, 2019, 46 (2): 73-78. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2019.02.011.
CAI Y M, ZHANG M L, REN L L, LI C X, WANG G N, HUANG H S. Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Vegetable Land of Guangzhou City [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*. 2019, 46 (2): 73-78. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2019.02.011.
- [3] 梅平, 李升锦, 李中, 陈武. 根系分泌物及其在植物修复污染土壤中的作用 [J]. 油气田环境保护, 2017 (4): 1-5. doi:10.3969/j.issn.1005-3158.2017.0.001.
MEI P, LI S J, LI Z, CHEN W. Root exudates and their role in phytoremediation of contaminated soils [J]. *Environmental Protection of Oil and Gas Fields*. 2017 (4): 1-5. doi:10.3969/j.issn.1005-3158.2017.0.001.
- [4] 肖明礼, 刘高, 韦建玉, 金亚波, 王军, 王行, 王维. 烤烟根系分泌物对植烟土壤酶及养分活化作用的影响 [J]. 广东农业科学, 2017, 44 (12): 59-66. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2017.12.010.
XIAO M L, LIU G, WEI J Y, JIN Y B, WANG J, WANG X, WANG W. Effect of root secretions of flue-cured tobacco on soil enzyme and nutrient activation [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*. 2017, 44 (12): 59-66. doi:10.16768/j.issn.1004-874X.2017.12.010.
- [5] 陈美静, 刘倩雯, 谭佳缘, 李雪梅, 重金属胁迫对植物有机酸代谢影响研究进展 [J]. 广东农业科学, 2015, 42 (24): 86-91.
CHEN M J, LIU Q W, TAN J Y, LI X M. Research Progress on Effects of Heavy Metal Stress on Plant Organic Acid Metabolism [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*. 2015, 42 (24): 86-91.
- [6] 唐希望, 同延安, 何鑫. 生菜根系分泌物对镉胁迫的响应 [J]. 北方园艺, 2018 (19): 16-22.
TANG X W, TONG Y A, HE X. Response of root exudates of lettuce to cadmium stress [J]. *Northern Horticulture*, 2018 (19): 16-22.
- [7] 吴启堂. 根系分泌物对镉生物有效性的影响 [J]. 土壤, 1993 (5): 257-259.
WU Q T. Effects of root exudates on the bioavailability of cadmium [J]. *Soils*, 1993 (5): 257-259.
- [8] 秦丽. 间作系统中续断菊与作物 Cd、Pb 累积特征和根系分泌低分子有机酸机理 [D]. 昆明: 云南农业大学, 2017.
QIN L. Accumulation characteristics of Cd and Pb and mechanism of low molecular organic acid secretion from root system of *Dipsacus chrysanthemum* and crops in intercropping system [D]. Yunnan Agricultural University, 2017.
- [9] 蒋先军, 骆永明, 赵其国, 葛元英. 镉污染土壤植物修复的 EDTA 调控机理 [J]. 土壤学报, 2003 (2): 205-209.
JIANG X J, LUO Y M, ZHAO Q G, GE Y Y. EDTA regulation mechanism of phytoremediation of cadmium-contaminated soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003 (2): 205-209.
- [10] GONG Y, YUAN G J, YANG Z, LV B, ZHOU Y, WANG J. Cadmium and lead accumulations by typical cultivars of water spinach under different soil conditions [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2010, 19 (2): 190-197.
- [11] 操家顺, 李欲如, 陈娟. 水菠菜对重污染河道净化及克藻功能 [J]. 水资源保护, 2006 (2): 36-38, 41.
CAO J S, LI Y R, CHEN J. Purification and algae control of water spinach on heavily polluted rivers [J]. *Water Resources Protection*, 2006 (2): 36-38, 41.
- [12] 冯艳芬, 王芳, 杨木壮. 广州市典型作物投入产出与生产经营绩效研究 [J]. 广东农业科学, 2010 (7): 392-395.
FENG Y F, WANG F, YANG M Z. Research on input-output and production and operation performance of typical crops in Guangzhou [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*. 2010 (7): 392-395.
- [13] 左元梅, 张福锁. 不同单作组合和单作方式对花生铁营养状况的影响 [J]. 中国农业科学, 2003, 36 (3): 300-306.
ZUO Y M, ZHANG F S. Effects of different single cropping combinations and methods on iron nutritional status of peanut [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36 (3): 300-306.
- [14] 龚玉莲, 杨中艺. 蔬菜不同镉积累品种的根际土壤化学特征 [J]. 应用生态学报, 2014, 25 (8): 2377-2384.
GONG Y L, YANG Z Y. Chemical characteristics of rhizosphere soils of different Cadmium-accumulating cultivars of water spinach [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (8): 2377-2384.
- [15] 龚玉莲, 杨中艺, 陈爱葵, 曾小龙, 曾碧健, 王平洁, 汤域巍. 蔬菜镉积累品种根际土壤水溶性有机质的结构特征研究 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2015, 54 (4): 121-126. doi:10.13471/j.cnki.acta.snus.2015.04.022.
GONG Y L, YANG Z Y, CHEN A K, ZENG X L, ZENG B J, WANG P J, TANG G W. Structural characteristics of water-soluble organic matter in rhizosphere soil of Cadmium-accumulating cultivars of water spinach [J]. *J Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*. 2015, 54 (4): 121-126. doi:10.13471/j.cnki.acta.snus.2015.04.022.

- [16] 谢新太. 不同配方营养液对水培空心菜的影响 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2014.
XIE X T. Effects of different nutrient solutions on hydroponic hollow cabbage [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2014.
- [17] WANG J, YUAN J, YANG Y, HUANG B, ZHOU Y, XIN J, GONG Y, YU H. Variation in cadmium accumulation among 30 cultivars and cadmium subcellular distribution in 2 selected cultivars of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(19):8942–8949.
- [18] 乔冬梅. 基于黑麦草根分泌有机酸的铅污染修复机理研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
QIAO D. Study on remediation mechanism of lead contamination by organic acid secreted from ryegrass root [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [19] 孙亚萍, 王永显, 王海波, 颜庆阳, 阮桂丽, 李海平. 土壤重金属污染植物修复强化技术研究进展 [J]. 农业开发与装备, 2017(5): 57–58.
ZHANG Y P, WANG Y X, WANG H B, YAN Q Y, RUAN G L, LI H P. Advances in phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2017(5):57–58.
- [20] 徐秀月, 吴永贵, 饶益龄, 付天岭, 吴兴玉. 模拟湿地植物根系分泌物对酸性矿山废水沉淀物中 Fe、Mn 释放及形态的影响 [J]. 环境工程, 2017, 35(6): 39–43.
XU X Y, WU Y G, RAO Y L, FU T L, WU X Y. Effects of simulated wetland plant root exudates on the release and morphology of Fe and Mn from acid mine wastewater sediments [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(6):39–43.
- [21] 张玲, 王焕校. 镉胁迫下小麦根系分泌物的变化 [J]. 生态学报, 2002, 22(4): 496–502.
ZHANG L, WANG H X. Changes of root exudates of wheat under cadmium stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(4):496–502.
- [22] 王吉秀, 湛方栋, 李元, 祖艳群, 秦丽, 何永美, 李明锐. 铅胁迫下小花南芥与玉米间作对根系分泌物有机酸的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 365–372.
WANG J X, ZHAN F D, LI Y, ZU Y Q, QIN L, HE Y M, LI M R. Effects of intercropping *Arabidopsis floreta* and maize on organic acids in root exudates under lead stress [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*. 2016, 24(3): 365–372.
- [23] 徐健程, 王晓维, 聂亚平, 罗杰, 杨潇一, 杨文亭. 不同铜浓度下玉米间作豌豆对土壤铜的吸收效应研究 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1508–1514. doi:10.11654/jacs.2015.08.011.
XU J C, WANG X W, NIE Y P, LUO J, YANG X Y, YANG W T. Effects of intercropping maize with pea on soil copper uptake under different copper concentrations [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8): 1508–1514. doi:10.11654/jacs.2015.08.011.

(责任编辑 杨贤智)