

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0974

董如茵, 徐应明, 王林, 等. 2015. 土施和喷施锌肥对镉低积累油菜吸收镉的影响[J]. 环境科学学报, 35(8): 2589-2596

Dong R Y, Xu Y M, Wang L, et al. 2015. Effects of soil application and foliar spray of zinc fertilizer on cadmium uptake in a pakchoi cultivar with low cadmium accumulation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(8): 2589-2596

土施和喷施锌肥对镉低积累油菜吸收镉的影响

董如茵^{1,2}, 徐应明^{1,2}, 王林^{1,2,*}, 赵明阳³, 梁学峰^{1,2}, 孙约兵^{1,2}

1. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191

2. 农业部产地环境质量重点实验室, 天津 300191

3. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161

收稿日期: 2014-09-09

修回日期: 2014-10-20

录用日期: 2014-10-20

摘要: 采用盆栽试验, 研究了土施和喷施不同用量 $ZnSO_4$ 对镉(Cd)低积累油菜生长、Cd 吸收及微量元素含量的影响, 并通过分析 Cd 在油菜体内的累积分配规律及土壤 Cd 有效性变化来揭示其作用机理。结果表明, 土施锌(Zn)肥可以显著提高 Cd 低积累油菜的地上部生物量, 最大可使其比对照处理增加 71.4%; 而喷施 Zn 肥对 Cd 低积累油菜地上部生物量没有显著影响。土施和喷施 Zn 肥都可显著降低 Cd 低积累油菜的地上部 Cd 含量, 最大降幅为 41.4%; 在 Zn 肥用量相差 8~10 倍的情况下, 二者降低油菜地上部 Cd 含量的效果无显著差异。土施 Zn 肥可使 Cd 低积累油菜地上部 Cu 和 Fe 含量显著升高, 而喷施 Zn 肥对其没有显著影响, 土施和喷施 Zn 肥都使 Cd 低积累油菜地上部 Mn 含量显著降低。土施 Zn 肥可显著提高土壤有效态 Zn 含量, 但对土壤有效 Cd 含量没有显著影响; 土施和喷施 Zn 肥可以显著降低油菜根部 Cd 净吸收量和 Cd 转运系数, 油菜地上部 Cd 含量与根部 Cd 净吸收量呈显著的正相关关系($p < 0.01$), 而与 Cd 转运系数无显著的相关性, 这表明施用 Zn 肥降低油菜地上部 Cd 含量主要是由于抑制根部 Cd 吸收引起的。总之, 喷施 Zn 肥是调控 Cd 低积累油菜安全生产的较好措施。

关键词: 油菜; 镉; 锌肥; 土施; 喷施; 低积累品种

文章编号: 0253-2468(2015)08-2589-08

中图分类号: X53

文献标识码: A

Effects of soil application and foliar spray of zinc fertilizer on cadmium uptake in a pakchoi cultivar with low cadmium accumulation

DONG Ruyin^{1,2}, XU Yingming^{1,2}, WANG Lin^{1,2,*}, ZHAO Mingyang³, LIANG Xuefeng^{1,2}, SUN Yuebing^{1,2}

1. Agro-environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191

2. Key Laboratory of Original Agro-environmental Quality, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191

3. College of Soil and Environment, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161

Received 9 September 2014;

received in revised form 20 October 2014;

accepted 20 October 2014

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of soil and foliar application of $ZnSO_4$ with different dosages on growth and concentrations of cadmium (Cd) and other trace elements in a low cadmium accumulating cultivar of *Brassica chinensis*. The regulating mechanism was elucidated through analyses of Cd uptake and transport in the low cadmium accumulating cultivar and soil available Cd concentrations. Results show that soil zinc (Zn) application significantly increased shoot biomass of the tested low cadmium accumulating cultivar, with a maximal increase of 71.4% compared to the control. Meanwhile, foliar Zn treatments had insignificant effect on shoot biomass of the low cadmium accumulating cultivar. Soil and foliar Zn applications significantly decreased shoot Cd concentrations of the low cadmium accumulating cultivar, with a maximal reduction of 41.4% compared to the control. Although the difference between the Zn dosages of soil application and foliar spray were 8 to 10 folds, the reduction of shoot Cd concentration due to foliar Zn application was not significantly different from that due to soil Zn application. Soil Zn application increased significantly shoots copper and ferrum concentrations of the low cadmium accumulating cultivar, and foliar Zn application had insignificant effect on shoots copper and ferrum concentrations. However, soil and foliar Zn applications decreased significantly shoots manganese concentrations of the low cadmium accumulating cultivar. Soil Zn application increased the soil available Zn concentrations and had insignificant effect on the soil available Cd concentrations. Soil and foliar Zn applications

基金项目: 国家自然科学基金(No.40901154,21177068,21107056); 农业科技成果转化资金项目(No.2012GB23260546); 天津市自然科学基金(No.14JCYBJC30300)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40901154, 21177068, 21107056), the Agriculture Science Technology Achievement Transformation Fund (No.2012GB23260546) and the Natural Science Foundation of Tianjin (No. 14JCYBJC30300)

作者简介: 董如茵(1990—), 女, E-mail: yin1237@hotmail.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: lwang2013@aliyun.com

Biography: DONG Ruyin (1990—), female, E-mail: yin1237@hotmail.com; * **Corresponding author**, E-mail: lwang2013@aliyun.com

reduced significantly Cd net uptake via roots and Cd translocation factor of *Brassica chinensis*. The shoot Cd concentration was positively correlated with Cd net uptake via roots, and not significantly correlated with Cd translocation factor, which indicated that inhibition of Cd uptake by root resulted in decrease in shoot Cd concentration of *Brassica chinensis* under soil and foliar Zn treatments. In summary, foliar spray of $ZnSO_4$ is suitable for safe production of the low cadmium accumulating cultivar of *Brassica chinensis* in Cd polluted soils.

Keywords: *Brassica chinensis*; cadmium; zinc fertilizer; soil application; foliar application; low cadmium accumulating cultivar

1 引言 (Introduction)

近年来,随着我国工农业的发展和城市化进程的加快,大量的重金属污染物被排放到环境中,造成大面积农田土壤受到镉(Cd)等重金属污染,并导致蔬菜等农产品受Cd污染的风险日益加重(周启星等, 2004).考虑到我国人口众多和农业生产压力大的现状,基于作物对Cd吸收的基因型差异,筛选和种植具有低量累积Cd能力的农作物品种即Cd低积累品种,已经成为综合利用重金属污染土壤、保障农业安全生产的最为简便且有效的方法之一(Grant *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009).然而,由于作物对重金属的吸收累积不仅取决于基因型,而且还受到土壤环境的影响,因此,辅以高效、安全的调控措施,降低土壤Cd的有效性,进一步减少作物Cd累积,就成为Cd低积累品种推广应用的必要条件(Gong *et al.*, 2010; 刘维涛等, 2010).

锌(Zn)是植物生长必需的微量元素,由于和Cd具有相似的地球化学和环境特性,因此,在土壤-作物系统中Cd、Zn经常发生拮抗作用(王吉秀等, 2010).基于这一原理,许多研究通过施用Zn肥来降低植物的Cd吸收.例如,陈贵青等(2010)和周坤等(2014)的研究表明,喷施 $50 \sim 600 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $ZnSO_4$ 可有效降低辣椒和番茄果实的Cd含量,最大降幅分别为21.8%和36.7%;而Hart等(2005)的研究发现,施用Zn肥可通过抑制小麦根部的Cd吸收,显著降低其籽粒Cd含量.然而,由于Cd、Zn交互作用易受许多环境因素的影响而表现出多种形式,因此,在施用Zn肥调控作物Cd吸收的研究中,植物基因型、Zn肥施用方法及土壤Cd、Zn含量等因素都会影响其调控效果.索炎炎(2012)通过大田实验研究了喷施Zn肥对不同水稻品种累积Cd的影响,结果表明,喷施 $ZnSO_4$ 对水稻累积Cd有极显著的影响,使大部分品种籽粒Cd含量显著降低,然而少数品种Cd含量却有所升高;罗婷(2013)的研究表明,土施和喷施 $ZnSO_4$ 都可以显著降低水稻籽粒和秸秆的Cd含量和吸收量,而喷施处理的效果要优于土施处理.因此,要使施用Zn肥成为调控Cd低积累品

种安全生产的有效方法,就必须确定适合于低积累品种的具体锌肥施用方法,但是该方面的研究还未见报道.

近年来,本课题组通过盆栽和小区试验从50个叶用油菜品种中筛选了5个Cd低积累品种,并初步揭示了其低量累积Cd的机理(Wang *et al.*, 2014).在上述研究基础上,本研究选择1个Cd低积累油菜品种和1个普通品种,通过盆栽实验,研究土施和喷施不同用量 $ZnSO_4$ 对不同品种油菜生长和Cd吸收的影响,探讨其作用机理,以期获得调控效果较好的Zn肥施用措施.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验材料

供试土壤取自湖南岳阳市湘阴县某Cd污染菜地,土壤类型为冲积土.其基本理化性质如下:pH=5.62,阳离子交换量为 $17.8 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量为 $35.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd、Zn总含量分别为0.937和 $123 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd、Zn有效态含量($0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl浸提)分别为0.596和 $12.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效S含量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (含P $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 溶液浸提).

供试的叶用油菜(*Brassica chinensis*)品种为前期研究筛选的Cd低积累品种华骏2号(Wang *et al.*, 2014)及在当地广泛栽种的普通品种寒绿.供试Zn肥为分析纯的 $ZnSO_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

2.2 试验方法

试验共设7个处理,分别为:①对照(CK),不施用Zn肥;②低水平土施处理(S1),每盆土施10 mg Zn;③中水平土施处理(S2),每盆土施40 mg Zn;④高水平土施处理(S3),每盆土施100 mg Zn;⑤低水平喷施处理(F1),每盆喷施1 mg Zn;⑥中水平喷施处理(F2),每盆喷施5 mg Zn;⑦高水平喷施处理(F3),每盆喷施10 mg Zn.每个处理设3次重复.

试验于2013年5—6月在农业部环保所玻璃温室内进行,室内温度为 $18 \sim 28 \text{ }^\circ\text{C}$,光照为温室自然光照,盆栽按随机区组排列.供试土壤风干后过5 mm筛,然后装入塑料盆中(直径18.0 cm,高

12.5 cm), 每盆装土 1.0 kg, 同时施入分析纯的 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ($\text{N } 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 $\text{K}_2 \text{HPO}_4$ ($\text{P } 45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{K } 115 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 作为底肥. 土施处理在拌土装盆时以溶液形式加入 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 充分混匀; 喷施处理在油菜撒播后第 20、27、34 d 进行, 按照处理配制 Zn 浓度分别为 66.7、333.3、666.7 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 3 种 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液, 用微型喷雾瓶每盆每次喷施 5 mL 溶液, 为了避免 Zn 溶液渗入土壤, 喷施 Zn 肥时采用塑料布覆盖于盆口. 拌土后平衡 30 d 播种, 待幼苗长至 4 片真叶时每盆间苗至 3 株. 油菜生长过程中每日以去离子水浇灌, 控制土壤含水量为田间持水量的 70% 左右. 油菜生长 45 d 后收获.

2.3 样品分析

油菜收获后分为地上部和根部, 依次用自来水和去离子水洗净, 称量鲜重, 先 90 °C 杀青 30 min, 然后 70 °C 烘干至恒重, 称量干重, 粉碎备用; 采集盆栽土样, 具体方法为: 将盆中土壤倒入大塑料盘中, 平铺后按照四分法均匀取样, 取样量为 100 g 左右. 土样经风干后研磨, 依次过 1.00 和 0.15 mm 筛, 备用.

植物样 Cd、Zn、Fe、Mn、Cu 含量分析采用 HNO_3 - HClO_4 法 (体积比 3:1) 消解. 土壤 Cd、Zn 全量分析采用 HNO_3 -HF- HClO_4 法消解; 有效态 Cd、Zn 分析采用 0.1 mol·L⁻¹ HCl 浸提, 土液比为 1:5, 25 °C 振荡 1.5 h 后离心过滤 (鲍士旦, 2000). 上述待测液中的重金属含量均采用原子吸收光谱仪 (Zeenit 700P, Analytik Jena AG, Germany) 测定. 采用中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所提供的土壤成分标准物质 GBW07401 (Cd (4.3 ± 0.4) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn (680 ± 25) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 作为土壤样品 Cd、Zn 含量分析的质量控制样品, 测定其 Cd 含量为 (4.5 ± 0.3) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 含量为 (670 ± 12) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 采用波兰核化学与技术学院提供的东方巴斯马烟叶 INCT-OBT5 (Cd (2.64 ± 0.14) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn (52.4 ± 1.8) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 作为植物样品 Cd、Zn 含量分析的质量控制样品, 测定其 Cd 含量为 (2.53 ± 0.22) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 含量为 (51.9 ± 1.2) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 土壤基本理化性质按照土壤农化常规分析方法测定 (鲍士旦, 2000).

2.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 11.5 软件进行统计分析. 采用单因素方差分析和新复极差法 (Duncan 法) 分析同一品种内不同施肥处理间的差异显著性, 采用配对 *t* 检验分析两个品种间的差异显著性.

3 结果与分析 (Results and analysis)

3.1 施用 Zn 肥对油菜生物量的影响

如图 1 所示, 不同 Zn 肥处理对油菜地上部生物量的影响不仅与 Zn 肥施用方法和剂量有关, 而且与供试品种有关. 对于低积累品种华骏 2 号, 只有土施中等水平的 Zn 肥可以显著提高其地上部鲜重 ($p < 0.05$), 增幅为 71.4%, 而其余施 Zn 处理对其地上部鲜重都没有显著影响. 而对于普通品种寒绿, 土施 Zn 肥处理都可显著提高其地上部生物量, 最大增幅为 117.2%; 而喷施 Zn 肥也可提高其地上部生物量, 增幅为 15.8%~37.2%, 但只有低水平喷 Zn 处理增产效果显著. 因此, 无论是从增产幅度还是增产作用的显著性来看, 施用 Zn 肥对普通品种的增产效果优于低积累品种, 土施 Zn 肥的增产作用优于喷施 Zn 肥. 另外, 配对 *t* 检验表明, 所有处理下两个品种的地上部鲜重无显著差异.

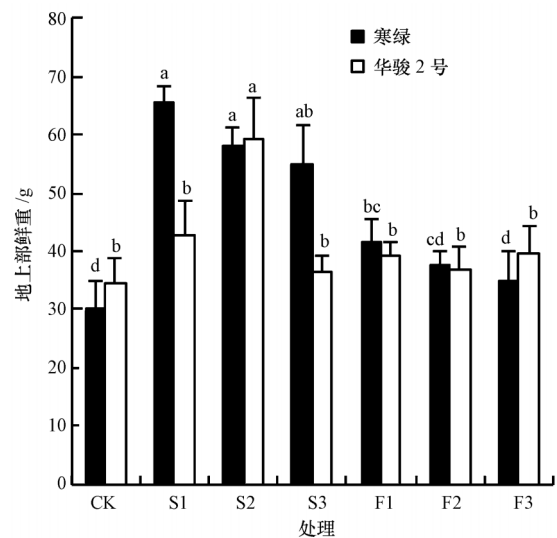


图 1 不同施 Zn 处理对两种油菜地上部鲜重的影响 (图中数据为 3 次重复的平均值 \pm 标准差, 不同小写字母表示同一品种内不同处理间差异显著, $p < 0.05$, 下同)

Fig. 1 Effects of different Zn treatments on shoots fresh weight of two cultivars of *B. chinensis*

3.2 施用 Zn 肥对油菜 Cd 和 Zn 累积的影响

由图 2a 可知, 两个油菜品种的地上部 Cd 含量对施用 Zn 肥的响应规律不同. 对于低积累品种华骏 2 号, 土施中、高水平及喷施低水平和高水平的 Zn 肥都可显著降低其地上部 Cd 含量, 降幅为 23.8%~41.4%, 这 4 个处理间没有显著差异; 另外, 在土施中水平 Zn 肥处理下, 华骏 2 号的地上部 Cd 含量仅为 0.181 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于食品安全标准 GB2762-2012

规定的叶菜类 Cd 含量最大值 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (国家食品安全风险评估中心, 2012). 而对于普通品种寒绿, 只有土施高水平 Zn 肥才可显著降低其地上部 Cd 含量, 降幅为 45.4%, 其余处理对其地上部 Cd 含量无显著影响, 喷施高水平 Zn 肥甚至使其地上部 Cd 含量略高于对照处理. 因此, 从施 Zn 降低地上部 Cd 含量的幅度和显著性来看, 施用 Zn 肥对低积累品种 Cd 吸收的调控效果优于普通品种. 另外, t 检验表明, 所有处理下低积累品种地上部 Cd 含量都显著低于普通品种, 前者的平均值比后者低 34.9%, 这表明施用 Zn 肥并没有影响油菜 Cd 积累的基因型差异, 该差异具有较强的稳定性.

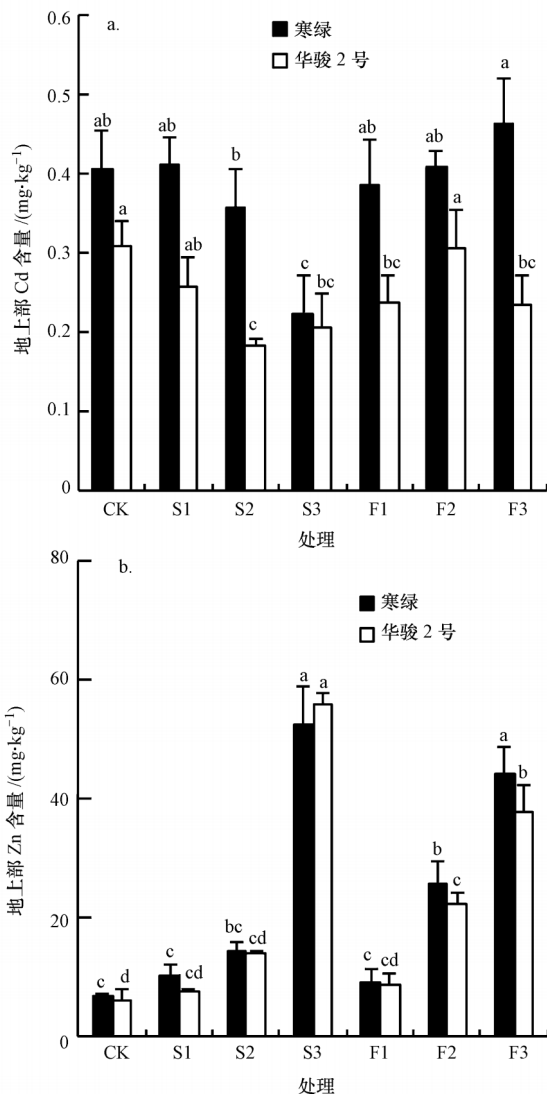


图 2 不同施 Zn 处理下两种油菜地上部 Cd (a) 和 Zn (b) 含量 (鲜基)

Fig.2 Shoot Cd concentrations (fresh weight basis) of two cultivars of *B. chinensis* under different Zn treatments

不同 Zn 肥处理下油菜地上部 Zn 含量见图 2b. 随着施 Zn 水平提高, 华骏 2 号和寒绿的地上部 Zn 含量逐步提高, 土施高水平和喷施中、高水平的 Zn 肥处理都使地上部 Zn 含量显著高于对照处理, 最大增幅分别为 8.0 倍和 6.5 倍. 另外, 尽管喷施处理的施 Zn 量仅为土施处理的 1/8~1/10, 然而除了华骏 2 号在高水平喷施处理下 Zn 含量显著低于高水平土施处理外, 其余水平下土施和喷施处理的 Zn 含量并无显著差异, 这表明喷施处理下油菜的 Zn 肥利用率要远高于土施处理.

根部 Cd 净吸收量为植株整体 (包括地上部和根部) Cd 累积量与根系干重的比值, 与 Cd 累积/吸收量相比, 该指标能更准确地反映植物根系对 Cd 的吸收能力 (Xin *et al.*, 2013). 如表 1 所示, 除了中水平喷 Zn 处理外, 其余施 Zn 处理都可使华骏 2 号的根部 Cd 净吸收量显著低于对照处理, 降幅为 30.5%~57.6%; 而对于普通品种寒绿, 只有土施高水平 Zn 肥可显著降低其根部 Cd 净吸收量, 降幅为 50.9%, 而其余处理对其根部 Cd 净吸收量无显著影响. 另外, t 检验表明, 所有处理下低积累品种的根部 Cd 净吸收量都显著低于普通品种.

表 1 不同施 Zn 处理下油菜根部 Cd 净吸收量和 Cd 转运系数 (干基)

Table 1 Cd net uptake via roots and Cd translocation factors (dry weight basis) of *B. chinensis* under different Zn treatments

处理	根部 Cd 净吸收量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		转运系数	
	寒绿	华骏 2 号	寒绿	华骏 2 号
CK	$369 \pm 55^{\text{ab}}$	$331 \pm 46^{\text{a}}$	$0.627 \pm 0.075^{\text{b}}$	$0.574 \pm 0.067^{\text{a}}$
S1	$349 \pm 38^{\text{b}}$	$230 \pm 41^{\text{bc}}$	$0.729 \pm 0.054^{\text{b}}$	$0.294 \pm 0.032^{\text{b}}$
S2	$386 \pm 10^{\text{ab}}$	$155 \pm 45^{\text{bc}}$	$0.757 \pm 0.045^{\text{ab}}$	$0.536 \pm 0.075^{\text{a}}$
S3	$181 \pm 34^{\text{c}}$	$140 \pm 25^{\text{c}}$	$0.680 \pm 0.034^{\text{b}}$	$0.585 \pm 0.069^{\text{a}}$
F1	$453 \pm 31^{\text{a}}$	$174 \pm 25^{\text{bc}}$	$0.750 \pm 0.089^{\text{ab}}$	$0.287 \pm 0.012^{\text{b}}$
F2	$467 \pm 35^{\text{a}}$	$238 \pm 28^{\text{ab}}$	$0.904 \pm 0.110^{\text{a}}$	$0.464 \pm 0.039^{\text{a}}$
F3	$375 \pm 30^{\text{ab}}$	$166 \pm 26^{\text{bc}}$	$0.918 \pm 0.078^{\text{a}}$	$0.531 \pm 0.068^{\text{a}}$

注: 表中数据为平均值 \pm 标准差 ($n = 3$), 同一行不同小写字母表示各处理间差异显著 ($p < 0.05$), 下同.

Cd 转运系数为植物地上部 Cd 含量与根部 Cd 含量的比值, 它反映了 Cd 在植物体内由根部向地上部的转运能力 (Liu *et al.*, 2009). 由表 1 可知, 土施和喷施低水平 Zn 肥使华骏 2 号的 Cd 转运系数显著低于对照处理, 降幅分别为 48.8% 和 50.0%, 而其余处理对其 Cd 转运系数无显著影响. 对于普通品种寒绿, 土施锌肥和喷施低水平 Zn 肥对 Cd 转运系数无显著影响, 喷施中、高水平的 Zn 肥即使 Cd 转运系数显

著高于对照处理.另外, t 检验表明,所有处理下低积累品种的 Cd 转运系数都显著低于普通品种.

3.3 施用 Zn 肥对油菜 Cu、Mn、Fe 含量的影响

施用 Zn 肥对油菜地上部 Cu、Mn、Fe 等微量元素的含量有着显著且不同的影响(表 2).土施高水平 Zn 肥显著提高华骏 2 号和寒绿的地上部 Cu 含量,增幅分别为 1.2 和 1.5 倍,而其余施 Zn 处理则对两个品种地上部 Cu 含量无显著影响.施用 Zn 肥对油菜地上部 Mn 含量的影响因品种而异.对于华骏 2 号,施用 Zn 肥降低其地上部 Mn 含量,其中,土施中、高水平和喷施中、低水平的 Zn 肥使地上部 Mn

含量显著低于对照处理,降幅为 30.9%~50.1%;而对于寒绿,施用 Zn 肥增加其地上部 Mn 含量,其中,土施高水平 Zn 肥处理的 Mn 含量显著高于对照处理,增幅为 2.3 倍.施用 Zn 肥对油菜地上部 Fe 含量的影响也因品种而异.土施中、高水平的 Zn 肥可显著提高华骏 2 号地上部 Fe 含量,增幅分别为 41.8% 和 23.1%,其余施 Zn 处理对其 Fe 含量无显著影响;而对于寒绿,所有 Zn 肥处理对其地上部 Fe 含量都无显著影响.另外,对比两个品种的地上部 Cu、Mn、Fe 含量发现,华骏 2 号地上部 Cu 含量显著低于寒绿,而二者的 Mn、Fe 含量无显著差异.

表 2 不同施 Zn 处理下油菜地上部 Cu、Mn、Fe 含量(干基)

Table 2 Concentrations of Cu, Mn and Fe in shoots of *B. chinensis* (dry weight basis) under different Zn treatments

处理	Cu/(mg·kg ⁻¹)		Mn/(mg·kg ⁻¹)		Fe/(mg·kg ⁻¹)	
	寒绿	华骏 2 号	寒绿	华骏 2 号	寒绿	华骏 2 号
CK	11.62±2.14 ^b	9.73±0.79 ^b	272±35 ^b	682±71 ^a	164±24 ^{ab}	221±28 ^b
S1	12.26±2.91 ^b	11.03±0.74 ^b	422±66 ^b	615±80 ^{ab}	191±24 ^a	165±25 ^b
S2	10.47±1.35 ^b	11.11±0.68 ^b	430±43 ^b	429±56 ^c	112±25 ^b	313±24 ^a
S3	25.08±3.92 ^a	24.27±1.56 ^a	900±75 ^a	434±48 ^c	115±23 ^b	272±18 ^a
F1	10.96±0.96 ^b	10.83±0.76 ^b	326±45 ^b	340±32 ^c	117±13 ^b	188±24 ^b
F2	14.97±2.47 ^b	12.04±1.02 ^b	384±13 ^b	471±66 ^{bc}	205±30 ^a	188±9 ^b
F3	11.16±0.31 ^b	9.76±1.17 ^b	425±53 ^b	593±26 ^{ab}	202±26 ^a	198±13 ^b

3.4 施用 Zn 肥对土壤有效态 Cd 和 Zn 含量的影响

不同施 Zn 处理下土壤有效态 Cd 含量如图 3a 所示.种植两个品种的土壤有效态 Cd 占全量的比例都超过 55%,这说明供试土壤中 Cd 的有效性较高.而方差分析和 t 检验表明,土壤有效态 Cd 含量在种植同一品种的不同 Zn 肥处理间和两个品种间均无

显著差异.就土壤有效态 Zn 含量来看,土施中、高水平的 Zn 肥可以显著提高有效态 Zn 含量,而喷施 Zn 肥则对土壤有效态 Zn 含量没有显著影响.另外, t 检验表明,种植两个品种的土壤有效态 Zn 含量无显著差异.

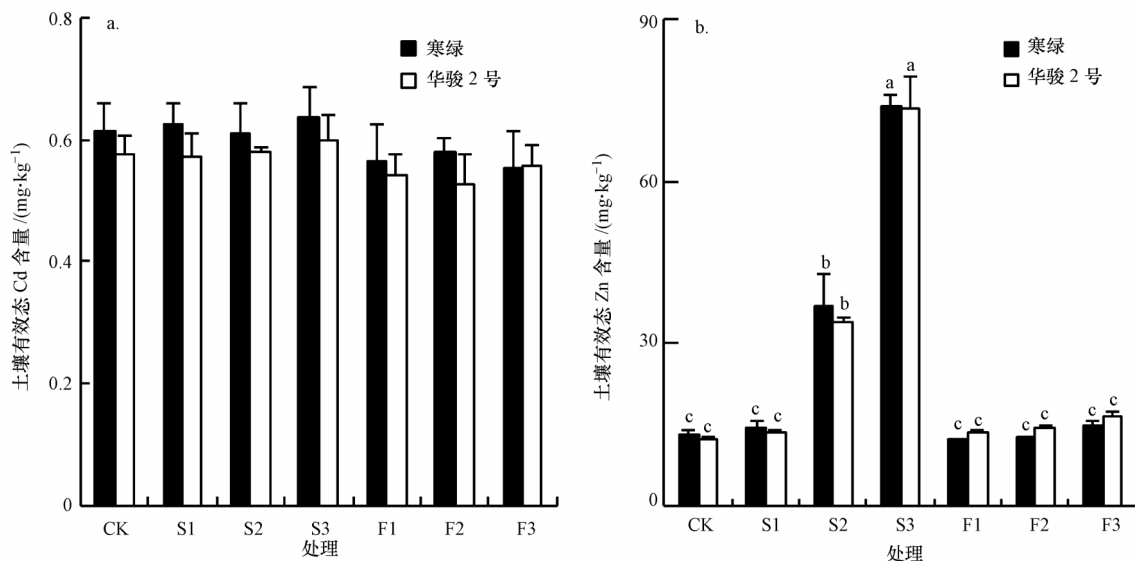


图 3 不同施 Zn 处理下对土壤有效态 Cd (a) 和 Zn (b) 含量的影响

Fig.3 Effects of different Zn treatments on soil available Cd (a) and Zn (b) concentrations

4 讨论 (Discussion)

Zn 作为植物必需的微量营养元素之一,是植物体内多种酶的活性组分和激活剂,在叶绿素合成、光合作用、呼吸作用、蛋白质合成及转运等过程中发挥重要作用,还能促进植物生殖器官发育,提高植物抗逆性(Wu *et al.*, 2010).在 Zn 缺乏或活性低的土壤中施用 Zn 肥可以通过提高作物 Zn 营养而有效促进作物生长,而在镉污染土壤上施用 Zn 肥,则可通过 Zn/Cd 拮抗作用缓解 Cd 毒害,从而改善作物生长.宋正国等(2008)研究发现,在 Cd 含量为 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的赤红壤上土施 $16\sim 64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Zn 肥,可以通过缓解 Cd 毒害而明显促进油菜生长.周坤等(2014)研究表明,在有效 Zn 含量为 $1.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤上喷施 $50\sim 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ZnSO_4 ,可以通过改善作物 Zn 营养和缓解 Cd 毒害的作用,显著提高番茄产量.在本研究中,土施和喷施 Zn 肥可以不同程度地提高两种油菜的地上部产量.由于供试土壤有效态 Zn 含量为 $12.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于酸性土壤缺 Zn 临界值 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (鲍士旦, 2000),在该土壤上施用 Zn 肥的肥效不佳;同样地,供试土壤有效 S 含量为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于南方土壤有效 S 临界值 $10\sim 16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (刘崇群等, 1990),通过施用 ZnSO_4 补充 S 的肥效也不佳.因此,在本研究中,施用 Zn 肥促进油菜生长可能是由于 Zn/Cd 拮抗作用缓解了 Cd 对油菜的毒害.另外,本研究中两个品种施用 Zn 肥的增产效果有差异,这可能与两个品种的 Cd 耐性和 Zn 敏感性不同有关.索炎炎(2012)的研究也发现,在镉污染农田中喷施 Zn 肥可以显著提高部分水稻品种的籽粒产量,但是也有部分品种的籽粒产量并未受影响.

Zn 和 Cd 具有相同的离子结构和相似的化学性质,二者在土壤-植物系统中有复杂的交互作用,可以表现为拮抗、协同或者独立,Zn/Cd 交互作用对 Cd 在土壤-植物系统中迁移累积的影响主要体现在:①Zn、Cd 竞争土壤胶体表面的离子交换吸附位点,表现为拮抗作用,Zn 抑制 Cd 的吸附,促进 Cd 的解吸,最终导致水溶或有效态 Cd 含量升高,促进植物对 Cd 的吸收(田园等, 2008);②Zn、Cd 竞争植物细胞膜表面吸收位点及细胞内的转运蛋白,表现为拮抗或协同作用,Zn 会抑制或促进植物对 Cd 的吸收和转运(Kuo *et al.*, 2004; McKenna *et al.*, 1993).本研究中土施 Zn 肥虽然使土壤有效 Zn 含量显著

升高,但有效 Cd 含量并未受到显著影响,因此,Zn、Cd 在土壤中的交互作用对油菜 Cd 吸收没有明显的影响.宋正国等(2008)研究也发现,在 Cd 含量为 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的赤红壤上土施 $16\sim 64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Zn 肥,土壤溶液中 Cd 含量并没有显著变化,他推测这可能是植物吸收和土壤离子交换吸附共同作用的结果.

植物地上部 Cd 累积主要受根部吸收和由根部向地上部转运两个过程的控制.本研究中,油菜地上部 Cd 含量与根部 Cd 净吸收量及 Cd 转运系数的相关性分析如图 4 所示.油菜地上部 Cd 含量与根部 Cd 净吸收量呈显著的正相关关系($p<0.01$),而它与 Cd 转运系数的相关性却不显著,另外两个品种地上部 Cd 含量变化规律与根部 Cd 净吸收量变化规律一致(见图 2a 和表 1),由此可知,本研究中施用 Zn 肥降低油菜地上部 Cd 含量主要是由于抑制根部 Cd

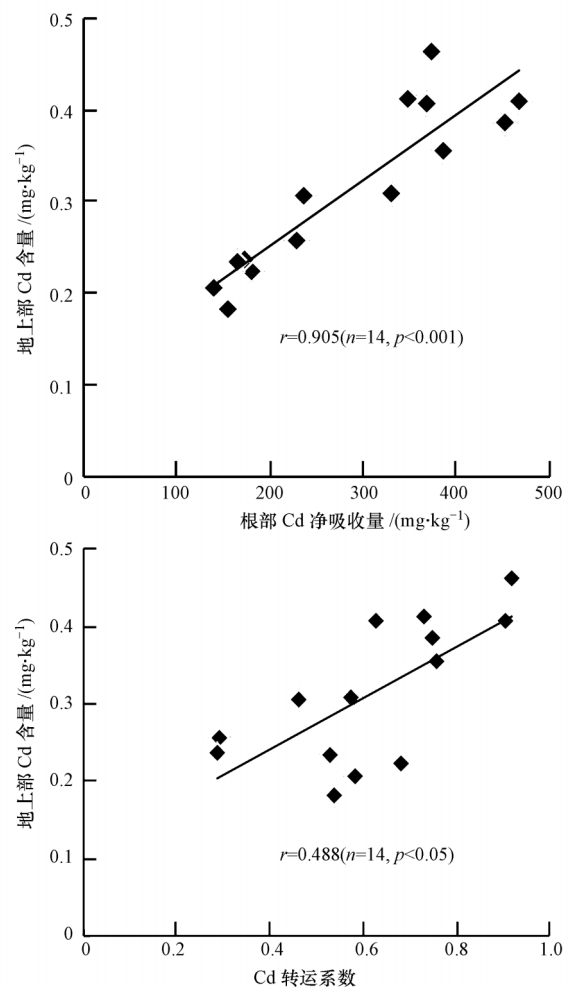


图4 油菜地上部 Cd 含量与根部净吸收量以及 Cd 转运系数的相关性

Fig.4 Relationships of shoots Cd concentrations of *B. chinensis* to Cd net uptake via roots and Cd translocation factors

吸收引起.Hart 等(2005)通过水培试验也发现,在营养液中添加足量的 Zn 可以通过抑制硬质小麦根部 Cd 吸收,从而显著降低小麦籽粒及其他器官 Cd 含量.在大田作物水稻和小麦上的研究表明,植物可以利用相同的转运蛋白进行 Cd、Zn 的吸收和运输,如 Zn 转运蛋白 OsZNT1 (Ramesh *et al.*, 2003) 及重金属 ATP 酶 OsHMA2 (Yamaji *et al.*, 2013) 等,而提高生长介质中的 Zn 浓度促进植物 Zn 吸收,一方面会与 Cd 竞争这些转运蛋白上的重金属结合位点,抑制 Cd 跨膜运输 (Hart *et al.*, 2002),另一方面也会调控这些转运蛋白的基因表达和蛋白合成 (Ramesh *et al.*, 2003),通过这两方面的作用最终会抑制植物根系的 Cd 吸收.施用 Zn 肥调控油菜 Cd 吸收是否有相同的分子生物学机理,需要进一步研究证实.

土施和喷施是 Zn 肥是最常用的两种施用方法.以小麦和水稻为供试作物的 Zn 肥施用试验表明,土施 Zn 肥增产效果明显,但提高作物 Zn 含量的作用要比喷施的效果差;而喷施 Zn 肥提高作物 Zn 含量的效果显著,但增产作用明显比土施 Zn 肥差 (Wissuwa *et al.*, 2008; Yilmaz *et al.*, 1997).在本研究中对于 Cd 低积累品种华骏 2 号,土施 Zn 肥对其地上部的增产效果明显优于喷施 Zn 肥,与上述研究结果一致;而在降低地上部 Cd 含量和提高 Zn 含量方面,土施和喷施处理的调控效果相当,考虑到喷施处理的 Zn 肥用量仅为土施处理的 1/8~1/10,因此,就降低油菜 Cd 吸收的作用来说,喷施处理下 Zn 肥的利用效率要远高于土施,经济成本远低于土施.在中轻度镉污染土壤上要保证叶用油菜的安全生产,降低其地上部 Cd 含量显然要比提高其地上部产量更为重要,另外,在土壤中长期施用 Zn 肥也会增加土壤 Zn 污染的风险 (Cakmak, 2008).因此,综合考虑调控效果、经济成本及环境风险因素,喷施 Zn 肥是调控 Cd 低积累油菜安全生产的较好措施.

5 结论 (Conclusions)

1) 土施 Zn 肥可以显著提高 Cd 低积累油菜的地上部生物量,最大可使其比对照处理增加 71.4%;而喷施 Zn 肥对 Cd 低积累油菜地上部生物量没有显著影响,土施 Zn 肥的增产效果优于喷施 Zn 肥.

2) 土施和喷施 Zn 肥都可显著降低 Cd 低积累油菜的地上部 Cd 含量,最大降幅为 41.4%;在 Zn 肥用量相差 8~10 倍的情况下,二者降低油菜地上部

Cd 含量的效果无显著差异,因此,喷施 Zn 肥的利用效率明显高于土施.

3) 土施 Zn 肥可使 Cd 低积累油菜地上部 Cu 和 Fe 含量显著升高,而喷施 Zn 肥没有显著影响,土施和喷施 Zn 肥都使 Cd 低积累油菜地上部 Mn 含量显著降低.

4) 土施 Zn 肥可显著提高土壤有效态 Zn 含量,但对土壤有效 Cd 含量没有显著影响;土施和喷施 Zn 肥可以显著降低油菜根部 Cd 净吸收量和 Cd 转运系数,油菜地上部 Cd 含量与根部 Cd 净吸收量呈显著的正相关关系 ($p < 0.01$),而与 Cd 转运系数的无显著的相关性.这些结果表明,施用 Zn 肥降低油菜地上部 Cd 含量主要是由于抑制根部 Cd 吸收引起.

责任作者简介:王林(1980—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事重金属污染土壤修复研究.E-mail: lwang2013@aliyun.com.

参考文献 (References):

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社. 132-135; 67-68; 25-114
- Cakmak I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? [J]. *Plant and Soil*, 302(1/2): 1-17
- 陈贵青, 曾红军, 熊治庭, 等. 2010. 不同 Zn 水平下辣椒体内 Cd 的积累、化学形态及生理特性 [J]. *环境科学*, 31(7): 1657-1662
- Gong Y L, Yuan J G, Yang Z Y, *et al.* 2010. Cadmium and lead accumulations by typical cultivars of water spinach under different soil conditions [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 19(2): 190-197
- Grant C A, Clarke J M, Duguid S, *et al.* 2008. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation [J]. *Science of the Total Environment*, 390(2/3): 301-310
- 国家食品安全风险评估中心. 2012. GB 2762-2012 食品中污染物限量 [S]. 北京: 中国标准出版社
- Hart J J, Welch R M, Norvell W A, *et al.* 2002. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings [J]. *Physiologia Plantarum*, 116(1): 73-78
- Hart J J, Welch R M, Norvell W A, *et al.* 2005. Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration [J]. *New Phytologist*, 167(2): 391-401
- Kuo S, Huang B, Bembek R. 2004. The availability to lettuce of zinc and cadmium in a zinc fertilizer [J]. *Soil Science*, 169(5): 363-373
- 刘崇群, 曹淑卿, 陈国安, 等. 1990. 中国南方农业中的硫 [J]. *土壤学报*, 27(4): 398-404
- Liu W T, Zhou Q X, Sun Y B, *et al.* 2009. Identification of Chinese cabbage genotypes with low cadmium accumulation for food safety

- [J]. *Environmental Pollution*, 157(6): 1961-1967
- 刘维涛,周启星.2010.不同土壤改良剂及其组合对降低大白菜镉和铅含量的作用[J].*环境科学学报*,30(9): 1846-1853
- 罗婷.2013.镁、锌和石灰等物质抑制土壤镉有效性及水稻吸收镉的研究[D].雅安:四川农业大学.40-50
- McKenna I M, Channey R L, Williams F M.1993.The effects of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue distribution of zinc and cadmium in lettuce and spinach [J]. *Environmental Pollution*,79(2): 113-120
- Ramesh S A, Shin R, Eide D J, *et al.* 2003. Differential metal selectivity and gene expression of two zinc transporters from rice [J]. *Plant Physiology*, 133(1): 126-134
- 宋正国,徐明岗,刘平,等.2008.锌对土壤镉有效性的影响及其机制[J].*农业环境科学学报*,27(3): 889-893
- 索炎炎.2012.镉污染条件下叶面喷施锌肥对水稻镉积累的影响[D].杭州:浙江大学.49-57
- 田园,王晓蓉,林仁漳,等.2008.土壤中镉铅锌单一和复合老化效应的研究[J].*农业环境科学学报*,27(1): 156-159
- Wang J L, Yuan J C, Yang Z Y, *et al.* 2009. 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*, 57(19): 8942-8949
- 王吉秀,祖艳群,李元.2010.镉锌交互作用及生态学效应研究进展[J].*农业环境科学学报*,29(增刊): 256-260
- Wang L, Xu Y M, Sun Y B, *et al.* 2014. Identification of pakchoi cultivars with low cadmium accumulation and soil factors that affect their cadmium uptake and translocation [J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 8(6): 877-887, doi: 10.1007/s11783-014-0676-7
- Wissuwa M, Ismail A M, Graham R D.2008.Rice grain zinc concentrations as affected by genotype, native soil-zinc availability, and zinc fertilization [J].*Plant and Soil*,306(1/2): 37-48
- Wu C Y, Lu L L, Yang X E, *et al.* 2010. Uptake, translocation, and remobilization of zinc absorbed at different growth stages by rice genotypes of different Zn densities [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 58(11): 6767-6773
- Xin J L, Huang B F, Liu A Q, *et al.* 2013. Identification of hot pepper cultivars containing low Cd levels after growing on contaminated soil: uptake and redistribution to the edible plant parts [J]. *Plant and Soil*, 373(1/2): 415-425
- Yamaji N, Xia J X, Mitani-Ueno N, *et al.* 2013. Preferential delivery of zinc to developing tissues in rice is mediated by P-type heavy metal ATPase OsHMA₂ [J]. *Plant Physiology*, 162(2): 927-939
- Yilmaz A, Ekiz H, Torun B, *et al.* 1997. Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat cultivars grown on zinc-deficient calcareous soils [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 20(4/5): 461-471
- 周坤,刘俊,徐卫红,等.2014.外源锌对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响[J].*环境科学学报*, 34(6): 1592-1599
- 周启星,宋玉芳.2004.污染土壤修复原理与方法[M].北京:科学出版社.14-20