

DOI:10.7524/AJE.1673-5897.20170719002

李然, 徐应明, 王林, 等. 不同锰处理对镉胁迫下2种油菜重金属累积和根系形态的影响[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(2): 140-148

Li R, Xu Y M, Wang L, et al. Effects of different manganese treatments on heavy metals accumulation and root morphology of two cultivars of *Brassica chinensis* under cadmium stress [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(2): 140-148 (in Chinese)

不同锰处理对镉胁迫下2种油菜重金属累积和根系形态的影响

李然^{1,2,3}, 徐应明^{2,3}, 王林^{2,3,*}, 谷朋磊^{1,2,3}, 孙约兵^{2,3}, 梁学峰^{2,3}

1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161
2. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191
3. 农业部产地环境污染防治重点实验室, 天津 300191

收稿日期: 2017-07-19 录用日期: 2017-09-12

摘要: 采用水培试验, 研究 Cd 胁迫($10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)条件下, 不同浓度 Mn(0, 0.1, 1, 10, $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理对 2 种镉累积能力不同的油菜生物量、Cd 和 Mn 含量以及根系形态参数的影响。结果表明, 与正常营养处理 Mn1 相比, 缺 Mn 和 Mn 过量处理显著降低 2 种油菜的地上部和镉低积累油菜“华骏”的根部生物量, 而对普通油菜“寒绿”的根部生物量没有显著影响。与 Mn1 处理相比, 缺 Mn 处理下 2 种油菜的 Cd 累积总量和“华骏”地上部 Cd 含量显著降低; Mn 过量处理下 2 种油菜根部和地上部 Cd 含量均呈升高趋势, 2 种油菜的 Cd 累积总量无显著变化或显著降低。随 Mn 处理浓度升高, 2 种油菜地上部和根部 Mn 含量显著升高, 缺 Mn 处理下 2 种油菜根部的 Mn 含量低于 Mn 缺乏的临界值。与 Mn1 处理相比, 缺 Mn 处理下“华骏”的根长、表面积、体积、平均直径和根尖数显著降低; Mn 过量处理下“寒绿”的根长以及“华骏”的根系表面积、体积显著降低; 缺 Mn 处理下 2 种油菜细根表面积所占的比例增加, 粗根表面积比例降低; Mn 过量时, “寒绿”的粗根表面积比例增加, 细根比例降低, 而“华骏”则相反。总的来看, 缺 Mn 处理影响油菜根系和地上部生长, 减少地上部 Cd 含量和植株 Cd 累积总量; Mn 过量处理下油菜生长也受到抑制, 但是油菜地上部和根部 Cd 含量有所升高; 2 种油菜的根系形态学参数在不同 Mn 处理下变化规律不同, 表现出不同的响应策略。

关键词: 镉; 锰; 油菜; 交互作用; 低积累品种; 根系形态

文章编号: 1673-5897(2018)2-140-09 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Effects of Different Manganese Treatments on Heavy Metals Accumulation and Root Morphology of Two Cultivars of *Brassica chinensis* under Cadmium Stress

Li Ran^{1,2,3}, Xu Yingming^{2,3}, Wang Lin^{2,3,*}, Gu Penglei^{1,2,3}, Sun Yuebing^{2,3}, Liang Xuefeng^{2,3}

1. College of Land and Environment, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China
2. Agro-environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China
3. Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China

Received 19 July 2017 accepted 12 September 2017

基金项目: 国家自然科学基金(41571322); 天津市科技支撑计划重点项目(14ZCZDSF00004); 天津市农业科技成果转化与推广项目(201404100)

作者简介: 李然(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为农田重金属污染修复与安全利用, E-mail: lran0507@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: lwang2013@aliyun.com

Abstract: A solution-culture experiment was conducted to investigate the effects of different manganese (Mn) treatments (0, 0.1, 1.0, 10.0 and 100.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) on the biomass of two cultivars of *Brassica chinensis* with different cadmium (Cd) accumulation, as well as the influence on Mn and Cd concentrations in *Brassica chinensis* and the root morphological parameters under Cd treatment (10.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). Results show that the biomass of shoots of the two cultivars and roots of the low Cd accumulating cultivar “Huajun” was significantly reduced under low and high Mn treatments when compared with normal Mn treatment (1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), but it was not significantly different for root biomass of the common cultivar “Hanlv”. The total Cd accumulation of the two cultivars and the Cd concentrations in shoots of Huajun under low Mn treatments were significantly lower than those under Mn1 treatment. Under high Mn treatments, Cd concentrations in roots and shoots of the two cultivars were increased, but the total Cd accumulation did not significantly change or decrease in comparison with Mn1 treatment. Mn concentrations in shoots and roots of the two cultivars significantly increased with the increasing Mn levels in the solution. Under low Mn treatments, the Mn concentrations in roots of the two cultivars were lower than the critical value of Mn deficiency. Under low Mn treatments, root length, surface area, volume, average diameter and root tip number of “Huajun” significantly decreased compared to those under Mn1 treatment. In contrast with Mn1 treatment, root length of “Hanlv”, root surface area and volume of “Huajun” decreased significantly under high Mn treatments. Under low Mn treatments, the percentage of root surface area of fine roots (≤ 0.4 mm) in the two cultivars increased, and the percentage of thick roots (≥ 1.0 mm) decreased, when compared to Mn1 treatment. Under high Mn treatments, the percentage of root surface area of thick roots in “Hanlv” increased and that of fine roots decreased, and the opposite trend was seen in “Huajun”. In general, under low Mn treatments, the growth in roots and shoots of the two cultivars was affected, Cd concentrations in shoots and total Cd accumulation decreased. Under high Mn treatments, the growth of the two cultivars was also inhibited, but Cd concentrations in shoots and roots increased. The root morphological parameters of the two cultivars exhibited different response strategies under different Mn treatments.

Keywords: cadmium; manganese; *Brassica chinensis*; interaction; low cadmium accumulating cultivar; root morphology

近年来,我国土壤镉(Cd)污染问题日益凸显,全国土壤 Cd 污染点位超标率高达 7%,居于各种污染物首位^[1]。由于利用强度高、化肥农药等投入量大、污水灌溉比例高等原因,菜地土壤 Cd 污染问题尤为突出。研究表明,我国菜地土壤样本 Cd 超标率高达 24.1%^[2]。以天津市为例,在长期使用污水灌溉的菜地中土壤 Cd 含量超标率达到 43.48%,生产的叶类蔬菜 Cd 含量超标率高达 45%^[3-4]。蔬菜是人体膳食 Cd 摄入的主要来源之一,累积在蔬菜中的 Cd 会通过食物链进入人体,进而造成毒害作用^[5]。因此,有必要探寻有效方法降低蔬菜 Cd 含量,保障蔬菜生产安全。

锰(Mn)是植物必需的微量元素,由于 Mn、Cd 在土壤-作物系统内迁移时多以二价阳离子形式存在,植物体内多种载体蛋白既可以转运 Mn^{2+} 也可以转运 Cd^{2+} ,因此二者在植物体内吸收转运过程中常

发生拮抗作用^[6-7]。基于这种拮抗作用,近年来人们开展了数项施用 Mn 肥减少作物 Cd 累积的研究^[8-10]。研究表明,在生长介质中 Mn 供应充足或过量(胁迫)条件下,Mn、Cd 互作会显著抑制普通植物和超富集植物对 Cd 的吸收转运^[11-12],然而在 Mn 缺乏状态下 Mn、Cd 互作对植物镉累积有何影响,还很少见诸报道。Mn、Cd 互作对植物 Cd 耐性也有显著影响,研究表明,添加外源 Mn 可以在光合作用、氧化还原系统、水分吸收等方面有效缓解植物 Cd 毒害^[13-14],然而 Mn、Cd 互作对根系形态影响的研究还未见报道。根系是植物与营养物质及污染物直接接触的器官,根系形态的变化不仅是植物对根际化学过程的重要生理响应,而且也会深刻影响植物对营养元素和污染物的吸收转运^[15],因此,研究 Mn、Cd 互作对植物根系形态的影响有助于揭示 Mn 缓解植物 Cd 毒害的生理机制。

本文以镉累积能力不同的2个叶用油菜(*Brassica chinensis*)品种为试验材料,采用水培方法,研究Cd胁迫条件下不同浓度Mn处理对油菜生物量、镉锰含量及根系形态的影响,明确不同Mn营养条件下油菜生物量和根系形态对Cd毒害的响应规律及基因型差异,揭示Mn/Cd互作对油菜Cd吸收转运的影响,以期为施用锰肥降低蔬菜镉累积提供理论依据。

1 材料与方 法 (Materials and methods)

1.1 试验材料与培养条件

供试叶用油菜采用前期研究筛选的镉低积累品种“华骏”和普通品种“寒绿”^[16],油菜种子由天津市农业科学院提供。

试验采用水培方法,营养液配方如下($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$): K_2SO_4 0.75, KCl 0.1, KH_2PO_4 0.25, MgSO_4 0.65, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 2.0; H_3BO_3 0.01, CuSO_4 1.0×10^{-4} , ZnSO_4 1.0×10^{-3} , $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 5.0×10^{-6} , Fe-EDTA 0.1 ^[17];营养液中 MnSO_4 根据试验处理设置不同浓度添加;营养液 pH 值为 6.5,用 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 和 NaOH 调节。配制营养液的药品均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。

水培试验于 2016 年 9—10 月在农业部环保所玻璃温室内开展,室内温度为 $15 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$,光照为自然光照。

1.2 试验处理与方 法

试验采用双因素完全组合设计,第一个因素为油菜品种,种植 2 种油菜;第二个因素为营养液的 Mn 营养水平,设置 Mn 浓度分别为 0, 0.1, 1.0, 10.0, $100.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,分别记作: Mn0、Mn0.1、Mn1、Mn10、Mn100,其中 Mn1 为正常营养水平,Mn0 和 Mn0.1 为缺乏,而 Mn10 和 Mn100 为过量。所有处理中 Cd 浓度全部设定为 $10.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯)溶液加入。共设 10 个处理,3 次重复,共计 30 盆。

油菜采用装有蛭石的穴盘育苗,幼苗生长过程中浇灌全素营养液。待长出 4 片真叶后,将油菜移栽到容积 1.5 L 的塑料水培皿中,每盆 4 棵,24 h 不间断曝气,每 2 天更换一次营养液。油菜移栽后就进行不同浓度的 Mn 处理,在 Mn 处理的第 4 天进行 Cd 处理,在 Mn+Cd 处理的第 12 天收样。

1.3 样品处理与分析

收获的油菜样品分为地上部和根部,根部采用

$0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Na_2EDTA 溶液浸泡 15 min,以去除表面残留的 Mn 和 Cd ^[18];浸泡后的根系和地上部样品使用去离子水和超纯水冲洗干净,吸干水分,称取鲜重,备用。

根系形态特征分析采用的根系扫描仪为中晶 ScanMaker i800 Plus (上海中晶科技有限公司),分析软件为万深 LA-S 植物根系分析系统(杭州万深检测科技有限公司);分析指标包括:根长、表面积、体积、平均直径、根尖数,并将根系划分为:细根(直径 $\leq 0.4 \text{ mm}$)、中根(直径 $0.4 \sim 1.0 \text{ mm}$)、粗根(直径 $\geq 1.0 \text{ mm}$),分析不同直径范围根系的表面积。

完成根系形态分析后,将地上部和根部样品在 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min, $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,称量干重,粉碎混匀,加入浓 HNO_3 (优级纯),在电热消解仪上(DigiBlock ED54,北京莱伯泰科仪器股份有限公司)进行消解,消解后样品的 Mn、Cd 含量使用电感耦合等离子体质谱仪(ICAPQc, Thermo Fisher Scientific)测定,采用波兰核化学与技术学院提供的东方巴斯马烟叶 INCT-OBTL-5 作为油菜元素含量分析的质量控制样品,各元素回收率均在 $95\% \sim 105\%$ 范围内。

1.4 数据分析及统计

采用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行统计分析。通过单因素方差分析和最小显著差数法(LSD法)分析同一品种各处理间的差异显著性;采用配对 t 检验分析 2 个品种间的差异显著性。

2 结果与分析 (Results and analysis)

2.1 镉胁迫下不同浓度锰处理对油菜生长的影响

由图 1 可知,2 种油菜的根部和地上部生物量均受不同浓度 Mn、Cd 处理的影响。与正常 Mn 营养处理(Mn1)相比,Mn 缺乏和过量处理没有对普通品种“寒绿”的根部生物量造成显著影响;而与 Mn1 相比,除 Mn100 处理外,Mn 缺乏和过量处理均能显著减少($P < 0.05$)镉低积累品种“华骏”的根部生物量,最高降幅分别达到 51.7% 和 36.7%。就地上部来看,2 种油菜生物量随 Mn 浓度升高表现出相同的变化规律。与 Mn1 处理相比,Mn 缺乏和过量处理下油菜生物量都呈现降低趋势,其中 Mn0、Mn0.1、Mn100 处理显著降低“寒绿”和“华骏”的地上部生物量,降幅分别为 $32.0\% \sim 46.0\%$ 以及 $25.5\% \sim 42.0\%$,而 Mn10 处理下油菜生物量没有显著变化。

在油菜收获时发现 Mn100 处理下 2 种油菜均表现出明显的 Mn 中毒症状,即叶片皱缩,边缘发黄并伴有褐色斑点,根系呈现褐色,且分布有大量黑色

斑点^[19],其他处理下植株则没有这些症状。总的来看,“华骏”根系对 Mn 缺乏和过量的响应比“寒绿”

敏感,2 种油菜的地上部对 Mn 缺乏和过量的响应则没有显著差异。

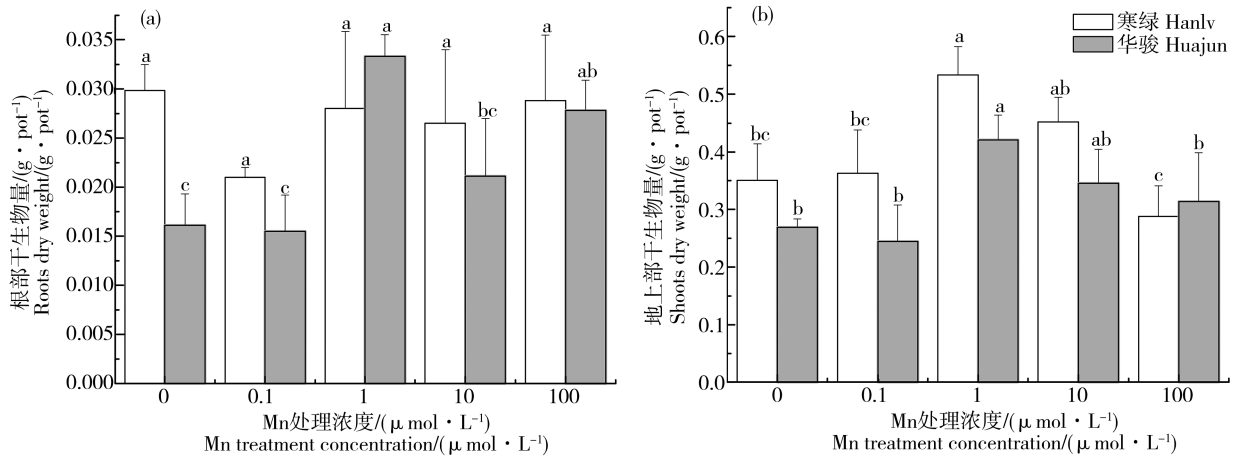


图 1 不同 Mn/Cd 处理下油菜生物量

注:(a)根部,(b)地上部;不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

Fig. 1 Root and shoot biomass of *Brassica chinensis* under different treatments of Mn and Cd

Note: (a) Roots, (b) Shoots; different letters show significant differences at the 0.05 level in the same cultivar, and the same below.

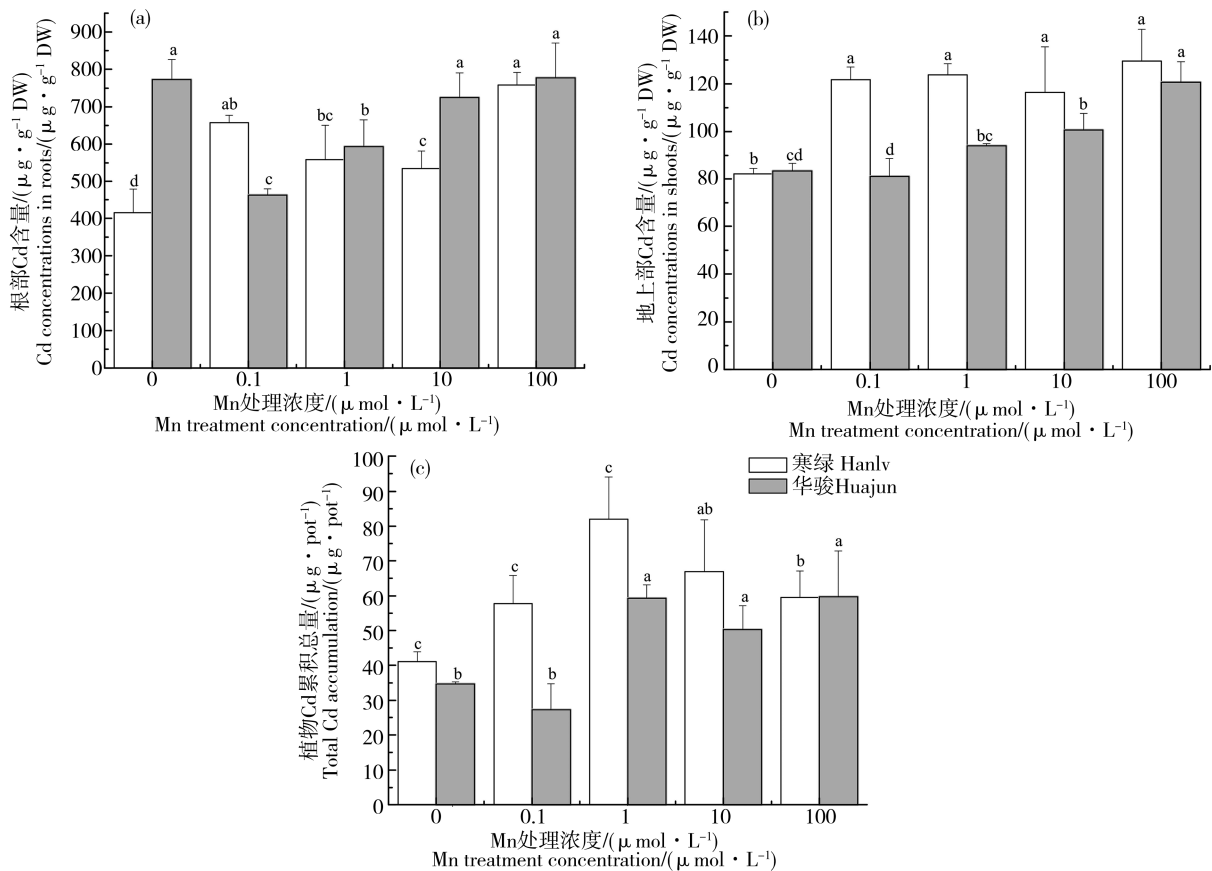


图 2 不同 Mn/Cd 处理下油菜 Cd 累积

注:(a)根部 Cd 含量,(b)地上部 Cd 含量,(c)植株 Cd 累积总量。

Fig. 2 Cd accumulation in *Brassica chinensis* under different treatments of Mn and Cd

Note: (a) Cd concentrations in roots, (b) Cd concentrations in shoots, (c) total Cd accumulation.

2.2 镉胁迫下不同浓度锰处理对油菜镉累积的影响

由图 2(a)可知, Cd 胁迫下, 不同浓度 Mn 处理对 2 种油菜根部 Cd 含量产生了不同影响。就“寒绿”来说, 与 Mn1 处理相比, Mn0 处理能显著降低其根部 Cd 含量且降幅达 25.6%, Mn100 处理能显著增加根部 Cd 含量且增幅达 35.9%, 而 Mn0.1 和 Mn10 处理均没有显著影响; 就“华骏”来说, 其根部 Cd 含量随 Mn 处理浓度的增加呈现先降低后升高的趋势, Mn0.1 处理下根部 Cd 含量显著低于 Mn1 处理且降幅为 22.0%, 而 Mn0、Mn10 和 Mn100 处理下根部 Cd 含量显著高于 Mn1 处理, 增幅为 22.2%~31.1%。

图 2(b)表明, 2 种油菜地上部 Cd 含量随 Mn 处理浓度升高呈上升趋势。对于“寒绿”, Mn0 处理下 Cd 含量显著低于其他处理, 而其他处理间没有显著差异; 对于“华骏”, 与 Mn1 处理相比, Mn0.1 处理显著降低地上部 Cd 含量且降幅为 13.8%, Mn100 处理显著提高地上部 Cd 含量, 增幅达 28.4%, 而 Mn0 和 Mn10 处理对地上部 Cd 含量没有显著影响。配对 *t* 检验表明, 2 个品种的根部 Cd 含量没有显著差异, 而“华骏”的地上部 Cd 含量显著低于“寒绿”, 与前期研究结果一致^[16]。

植株 Cd 累积总量表示植株整体(包括根部和地上部)对 Cd 的累积量, 能反映根系对 Cd 的吸收能力^[20]。如图 2(c)所示, 对于“寒绿”, 与正常 Mn 营养处理相比, 缺 Mn 和 Mn 过量处理均能降低植株 Cd

累积总量, 其中 Mn0、Mn0.1 和 Mn100 处理下植株 Cd 累积总量显著低于 Mn1 处理, 降幅为 27.4%~49.9%。对于“华骏”, 与 Mn1 处理相比, Mn0 和 Mn0.1 处理下植株 Cd 累积总量显著降低, 降幅分别为 41.4% 和 53.9%; 而 Mn10 和 Mn100 处理下 Cd 累积总量没有显著变化。

2.3 镉胁迫下不同浓度锰处理对油菜锰含量的影响

由表 1 可知, 不同浓度 Mn 处理下, 2 种油菜根部和地上部 Mn 含量变化规律相同, 随着营养液中 Mn 浓度升高, 油菜体内 Mn 含量呈现逐步升高的趋势。其中, Mn0、Mn0.1、Mn1 3 个处理下油菜 Mn 含量没有显著差异; 而在 Mn 过量处理下, 除了 Mn10 处理下的“寒绿”地上部 Mn 含量外, 油菜体内 Mn 含量显著高于 Mn1 处理。另外, 配对 *t* 检验结果表明, 2 种油菜的根部和地上部 Mn 含量都没有显著差异。

2.4 镉胁迫下不同浓度锰处理对油菜根系形态的影响

在 Cd 胁迫下, 不同浓度 Mn 处理对 2 种油菜根系形态参数有不同影响。对于“寒绿”, 其根长随 Mn 处理浓度增加呈现先升高后降低的趋势, Mn0.1 处理下根长值最大, 显著高于其他处理, Mn10 和 Mn100 处理下根长值显著低于 Mn1 处理, 降幅分别为 28.5% 和 33.3%; 其余 4 个形态参数, 包括表面积、体积、平均直径和根尖数, 在不同浓度 Mn 处理下均无显著变化。对于“华骏”, 根据各参数随 Mn

表 1 不同 Mn 处理下油菜根部和地上部 Mn 含量

Table 1 Mn concentrations in roots and shoots of *Brassica chinensis* under different treatments of Mn

品种 Cultivars	Mn 处理浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	根部 Mn 含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ DW)	地上部 Mn 含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ DW)
	Mn treatment concentration ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	Mn concentrations in roots ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ DW)	Mn concentrations in shoots ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ DW)
“寒绿” Hanlv	0	7.35±1.90c	20.61±1.01c
	0.1	9.99±0.27c	49.91±6.62c
	1	23.83±2.63c	115.05±7.47bc
	10	60.80±1.30b	206.68±42.73b
	100	279.79±42.01a	1133.78±151.06a
“华骏” HuaJun	0	7.26±0.15c	39.07±7.31c
	0.1	11.07±0.73c	45.53±6.37c
	1	14.67±2.50c	50.74±6.71c
	10	104.03±10.65b	208.32±21.19b
	100	318.1±41.195a	1 090.27±120.23a

注: 平均值±标准差($n=3$)。同列不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$), 下同。

Note: Values are Means ± SD ($n = 3$). Different letters in the same column show significant differences at the 0.05 level in the same cultivar, and the same below.

处理浓度变化的趋势可以将其分为 2 组。第一组为根长和根尖数,随 Mn 处理浓度升高呈上升趋势, Mn0 和 Mn0.1 处理下 2 个参数值大部分显著低于 Mn1 处理,而 Mn10 和 Mn100 处理下参数值与 Mn1 处理相比没有显著变化;第二组包括表面积、体积和平均直径,随 Mn 处理浓度升高呈现先升高后降低的趋势, Mn1 处理下各参数值最大,其余处理下绝大部分显著降低,其中根体积变化幅度最大,与 Mn1 处理相比, Mn0、Mn0.1、Mn10 和 Mn100 处理下的降幅分别为 85.1%、81.4%、71.0% 和 57.5%,其次是表面积,相应的降幅分别为 70.2%、65.7%、49.4% 和 36.3%。

表面积是根系与环境介质直接接触的重要指标。分析不同直径范围内的根系表面积分布可知(图 3),Cd 胁迫条件下不同浓度 Mn 处理对油菜细根和粗根的表面积影响较大,而对中根的表面积影响较小。对于“寒绿”,随着 Mn 处理浓度升高,细根表面积所占比例明显降低,从 50.3% 降低至 36.6%,而粗根表面积所占比例呈现升高趋势,从 31.4% 升高至 44.4%。对于“华骏”,在 Mn1 处理下细根表面积所占比例最低,为 27.4%,而在 Mn 缺乏和过量处理下,细根比例都明显提高;相应地,粗根表面积所占比例在 Mn1.0 处理下最大,为 51.4%,而在 Mn 缺乏和过量处理下,粗根比例都明显降低。

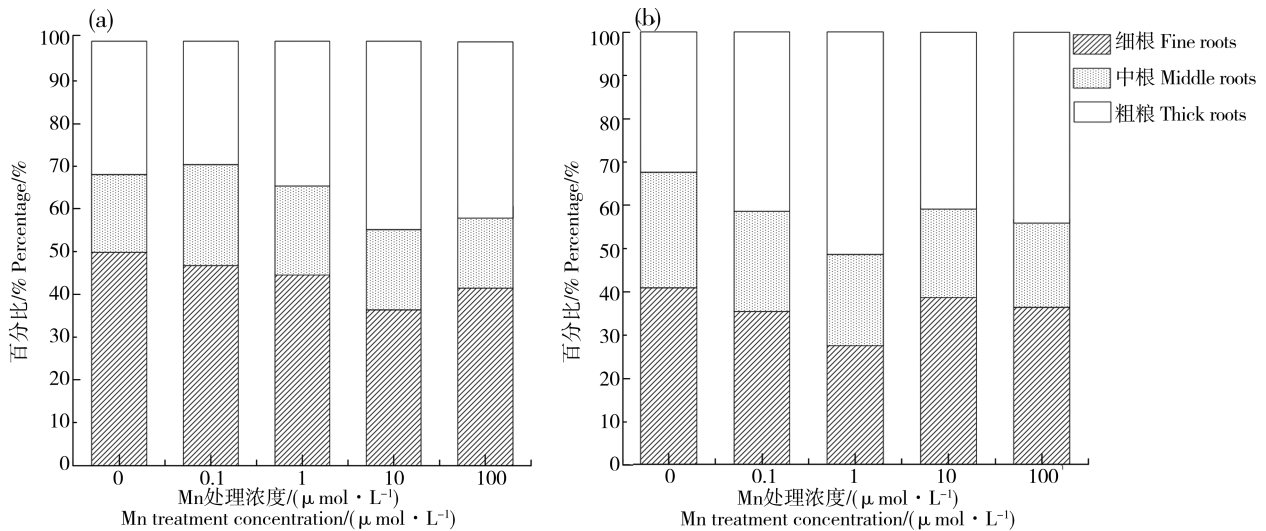


图 3 不同 Mn 处理下油菜细根、中根及粗根的表面积所占比例

注:(a)“寒绿”,(b)“华骏”。

Fig. 3 The proportion of root surface area of fine, middle and thick roots of *Brassicica chinensis* under different Mn treatments

Note: (a) Hanlv, (b) Huajun.

表 2 不同 Mn 处理下油菜根系形态参数

Table 2 Root morphology parameters of *Brassicica chinensis* under different Mn treatments

品种 Cultivars	Mn 处理浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) Mn treatment concentration /($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	根长/m Root length/m	表面积/ cm^2 Surface area/ cm^2	体积/ cm^3 Volume/ cm^3	平均直径/mm Average diameter /mm	根尖数 Tips number
“寒绿” Hanlv	0	1.57±0.21bc	22.45±6.26a	0.34±0.08a	0.47±0.08a	1 346±146.92a
	0.1	2.25±0.21a	33.33±7.73a	0.88±0.70a	0.50±0.07a	1 489±320.99a
	1	1.86±0.22b	22.44±6.29a	0.50±0.31a	0.48±0.04a	1 155±179.88a
	10	1.33±0.231c	22.43±7.19a	0.60±0.27a	0.47±0.04a	1 444±317.41a
	100	1.24±0.15c	19.98±5.13a	0.77±0.69a	0.49±0.03a	1 473±180.89a
“华骏” Huajun	0	0.76±0.14b	11.39±4.41c	0.33±0.21b	0.45±0.05c	978±103.22bc
	0.1	0.75±0.11b	13.14±4.01c	0.41±0.27b	0.54±0.06bc	834±58.52c
	1	1.11±0.17a	38.27±9.95a	2.21±1.20a	0.65±0.03a	1 271±344.60ab
	10	1.17±0.29a	19.36±5.06bc	0.64±0.30b	0.51±0.05bc	1 316±331.10ab
	100	1.37±0.19a	24.39±5.33b	0.94±0.54b	0.55±0.06ab	1 446±209.43a

3 讨论 (Discussion)

Mn 既是植物必需的微量元素,也是一种重金属元素,因此它在植物体内的作用具有两面性。一般认为,植物体内的正常 Mn 含量范围为 20~600 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,体内 Mn 含量低于 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 可能会导致 Mn 缺乏。由于 Mn 在植物体内光合作用和氮代谢过程中发挥重要作用,因此 Mn 缺乏会显著影响植物光合作用和干物质积累,进而导致植物生长受到抑制,严重的会出现叶片失绿黄化症状^[17-18]。在本研究中,缺 Mn 处理下 2 种油菜根系 Mn 含量都低于 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但是只有“华骏”的根系生物量显著降低,而“寒绿”则没有明显变化,这可能与二者对 Mn 缺乏的耐受能力不同有关;而 2 种油菜地上部 Mn 含量在缺 Mn 条件下都高于 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但是地上部生物量与正常 Mn 营养处理相比都显著降低。研究发现,在严重缺 Mn 土壤上不施用 Mn 肥的条件下,多个品种的小麦地上部生物量显著降低,而其 Mn 含量却高于 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且不同品种间没有显著差异,研究者据此认为地上部 Mn 含量不宜作为评价小麦耐缺 Mn 能力的指标^[22]。当 Mn 含量超过 600 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,植物可能会出现 Mn 中毒症状,包括叶片萎蔫坏死、叶片厚度减小、节间缩短和生物量降低等^[19]。在本研究中,Mn100 处理下,2 种油菜地上部 Mn 含量明显高于 600 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这是导致该处理下油菜出现 Mn 中毒症状的主要原因。

研究表明,同种植物的不同基因型对 Mn 缺乏和毒害的耐受能力不同,生理生化响应也存在差异^[23-24]。本研究中在 Mn 缺乏和过量处理下,2 种镉吸收能力不同的油菜生物量、根系形态以及镉累积也表现出不同的变化规律。对于“华骏”,在 Mn 缺乏时,根部 Mn 含量低于临界水平,根系生长受到严重影响,从而制约了其对养分的吸收,根部干重和 5 个根系形态参数大部分都显著降低,其 Cd 累积总量、地上部 Cd 含量大部分也显著降低。而在 Mn 过量时,由于 Mn 毒害作用,“华骏”根部干重以及表面积、体积、平均直径等根系形态参数受到了严重影响。有研究表明,Mn 毒害会严重影响多种植物的根系质膜透性和完整性^[25],这可能会削弱根系镉吸收的屏障,进而提高植物被动镉吸收量,在 Mn 过量处理下“华骏”根部和地上部镉含量升高可能与此有关,但是由于根部和地上部生物量都明显降低,最终植株 Cd 累积总量并没有显著变化。

对于“寒绿”,情况更为复杂。在 Mn0.1 处理

下,根系生物量并未受到显著影响,根长反而显著升高,这说明“寒绿”根系对 Mn 缺乏耐受能力较强,在 Mn 缺乏时会提高根系吸收能力,以获取更多营养,然而这也提高了其根部 Cd 含量,但是由于地上部生物量显著降低,最终其 Cd 累积总量显著降低;而在 Mn100 处理下,“寒绿”根系生物量虽未受到影响,但是其根长显著降低,地上部生物量也明显降低,并表现出 Mn 毒害症状,这表明 Mn 过量处理同样严重影响了“寒绿”的生长发育,与“华骏”类似,其镉吸收的屏障也可能遭到破坏,进而导致根系镉含量显著升高,但是由于地上部生物量显著降低和镉含量没有显著变化,造成其 Cd 累积总量显著降低。

总的来看,在 Mn 缺乏时,2 种油菜根系生长发育和养分吸收功能会受到显著影响,同时地上部生物量也显著降低,地上部 Cd 含量有所降低,最终导致植株 Cd 累积总量显著降低;而在 Mn 过量时,由于 Mn 的毒害作用,根系镉吸收屏障被破坏,对镉的吸收随之提高,造成根系 Cd 含量升高,但是由于生物量降低,Cd 累积总量没有变化或显著降低。

在植物生长过程中,不同直径的根系发挥不同的生理功能,其中直径较小的细根是根-土界面物质交换的主要位置,在养分和水分吸收方面发挥主要作用;而直径较大的粗根,其内部运输组织发育完全,是水分和养分储存运输的主要部位,因此不同直径根系比例的变化和根系的养分吸收功能密切相关^[26]。从根系表面积分级的变化规律来看,在缺 Mn 时 2 个品种策略一致,即增加细根比例,降低粗根比例,增强对养分的吸收能力,“华骏”的变化更明显,有研究发现,在低氮胁迫下,玉米主要通过增加细根比例,增加根表面积,从而使植物能吸收更多的氮素^[27],这和本研究的结果相似;在 Mn 过量时 2 个品种策略不同,“寒绿”提高了粗根比例,减少细根比例,力图减少吸收,降低过量 Mn 的毒害,在研究硒镉互作对水稻根系的影响时也发现,添加硒会提高水稻粗根比例,降低细根比例,从而抑制根系对镉的吸收^[28];而“华骏”则提高了细根比例,减少粗根比例,增强根系的养分和水分吸收能力,提高对 Mn 毒害的抗性,在研究 CO₂ 浓度升高对 2 个黑麦草属植物根系和 Cd 累积影响时也发现,在镉胁迫条件下 CO₂ 浓度升高会提高植物细根比例,增强根系吸收水分和养分能力,从而有效缓解 Cd 毒害^[29]。

通讯作者简介:王林(1980—),男,生态学博士,副研究员,主

要从事农田重金属污染修复与安全利用研究,在国内外学术期刊发表20余篇相关论文。

参考文献(References):

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17) [2017-07-19]. http://www.mlr.gov.cn/xwtdt/jrxw/201404/t20140417_1312998.htm.
- [2] Zeng X B, Li L F, Mei X R, et al. Heavy metal content in Chinese vegetable plantation land soils and related source analysis [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(9): 1115-1126
- [3] 徐震, 田丽梅, 江应松, 等. 天津市污灌区农田环境质量现状分析[J]. *天津农林科技*, 1999, 152(6): 26-28
Xu Z, Tian L M, Jiang Y S, et al. Analysis on present situation of farmland environmental quality in sewage irrigation district of Tianjin [J]. *Tianjin Agricultural Science and Technology*, 1999, 152(6): 26-28 (in Chinese)
- [4] 师荣光, 赵玉杰, 高怀友, 等. 天津市郊蔬菜重金属污染评价与特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(S1): 169-173
Shi R G, Zhao Y J, Gao H Y, et al. Metals influencing the level of heavy metal contamination of vegetables in Tianjin City as derived by principal components analysis [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(S1): 169-173 (in Chinese)
- [5] Videz J P, Lopez M L, Narayan M, et al. The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain [J]. *The International Journal of Biochemistry and Cell Biology*, 2009, 41(8-9): 1665-1677
- [6] Sasaki A, Yamaji N, Yokosho K, et al. Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice [J]. *The Plant Cell*, 2012, 24(5): 2155-2167
- [7] Yang M, Zhang Y Y, Zhang L J, et al. Nramp5 contributes to manganese translocation and distribution in rice shoots [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(17): 4849-4861
- [8] 蓝兰, 喻华, 冯文强, 等. 不同中微量及有益元素对小麦吸收镉的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 54-58
Lan L, Yu H, Feng W Q, et al. Effects of secondary, micro-and beneficial elements on wheat growth and cadmium uptake [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 54-58 (in Chinese)
- [9] 覃都. 水稻镉积累的锰、氮调控研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009: 63
Tan D. Investigation of manganese, nitrogen regulation on cadmium accumulation in rice plants [D]. Chongqing: Southwest University, 2009: 63 (in Chinese)
- [10] 周相玉, 冯文强, 秦鱼生, 等. 镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(14): 4289-4296
Zhou X Y, Feng W Q, Qin Y S, et al. Effects of magnesium, manganese, activated carbon and lime and their interactions on cadmium uptake by wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14): 4289-4296 (in Chinese)
- [11] Hernández L E, Lorodrque E L, Gárate A, et al. Influence of cadmium on the uptake, tissue accumulation and sub-cellular distribution of manganese in pea seedlings [J]. *Plant Science*, 1998, 132(2): 139-151
- [12] Peng K J, Luo C L, You W X, et al. Manganese uptake and interactions with cadmium in the hyperaccumulator—*Phytolacca americana* L [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154(1-3): 674-681
- [13] Liu H M, Zhang Y X, Chai T Y, et al. Manganese-mitigation of cadmium toxicity to seedling growth of *Phytolacca acinosa* Roxb. is controlled by the manganese/cadmium molar ratio under hydroponic conditions [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 73: 144-153
- [14] Zornoza P, Sánchezpard O B, Carpena R O. Interaction and accumulation of manganese and cadmium in the manganese accumulator *Lupinus albus* [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167: 1027-1032
- [15] 何俊瑜, 王阳阳, 任艳芳, 等. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1863-1868
He J Y, Wang Y Y, Ren Y F, et al. Effect of cadmium on root morphology and physiology characteristics of rice seedlings [J]. *Ecology and Environment*, 2009, 18(5): 1863-1868 (in Chinese)
- [16] Wang L, Xu Y M, Sun Y B, et al. Identification of pak-choi cultivars with low cadmium accumulation and soil factors that affect their cadmium uptake and translocation [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 8(6): 877-887
- [17] 王景安, 张福锁. 锌对不同基因型玉米缺锌后的恢复效果及胚乳在缺锌中的作用[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3): 78-81
Wang J A, Zhang F S. Effects of different zinc concentrations on maize restoration after zinc deficiency and the function of endosperm in zinc deficiency [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3): 78-81 (in Chinese)
- [18] 代晶晶, 徐应明, 王林, 等. 不同锌营养下喷施锌肥对油菜生长和元素含量的影响[J]. *环境化学*, 2017, 36(5): 1017-1025
Dai J J, Xu Y M, Wang L, et al. Effect of foliar zinc application on growth and elements concentrations of pak-

- choi under different zinc nutrition status [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(5): 1017-1025 (in Chinese)
- [19] 张玉秀, 李林峰, 柴团耀, 等. 锰对植物毒害及植物耐锰机理研究进展[J]. *植物学报*, 2010, 45(4): 506-520
Zhang Y X, Li L F, Chai T Y, et al. Mechanisms of manganese toxicity and manganese tolerance in plants [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2010, 45(4): 506-520 (in Chinese)
- [20] Xin J L, Huang B F, Dai H W, et al. Characterization of cadmium uptake, translocation, and distribution in young seedlings of two hot pepper cultivars that differ in fruit cadmium concentration [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(12): 7449-7456
- [21] 安振锋, 方正. 植物锰营养研究进展[J]. *河北农业科学*, 2002, 4(6): 35-42
An Z F, Fang Z. The advance of manganese nutrition in plant [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2002, 4(6): 35-42 (in Chinese)
- [22] 陆景陵. 植物营养学(上册)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2005: 87-91
Lu J L. *Plant Nutrition (volume one)* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2005: 87-91 (in Chinese)
- [23] 张福锁, 吕世华, 方正. 不同小麦品种(品系)耐缺锰能力的比较研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(3): 277-283
Zang F S, Lv S H, Fang Z. Study on tolerance of different wheat cultivars or lines to manganese deficiency [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 1998, 4(3): 277-283 (in Chinese)
- [24] 严炜. 大豆适应锰毒害的生理和分子机理研究[D]. 海口: 海南大学, 2010: 58
Yan W. Physiological and molecular mechanisms of soybean (*Glycine max*) adaptation to manganese stress [D]. Haikou: Hainan University, 2010: 58 (in Chinese)
- [25] 任立民, 刘鹏, 蔡妙珍, 等. 水蓼、小飞蓬、杠板归和美洲商陆对锰毒的生理响应[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 81-85
Ren L M, Liu P, Cai M Z, et al. Physiological response of *Polygonum hydropiper*, *Comnyza canadensis*, *Polygonum perfoliatum* and *Phytolacca americana* to manganese toxicity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3): 81-85 (in Chinese)
- [26] Wang R G, Dai S X, Tang S R, et al. Growth, gas exchange, root morphology and cadmium uptake responses of poplars and willows grown on cadmium-contaminated soil to elevated CO₂ [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(1): 1-13
- [27] 屈佳伟, 高聚林, 王志刚, 等. 玉米根系特征的基因型差异及与氮吸收效率的关系[J]. *玉米科学*, 2016, 24(2): 72-78
Qu J W, Gao J L, Wang Z G, et al. Genotype differences in root characteristics by maize and its relations to nitrogen uptake efficiency [J]. *Journal of Maize Science*, 2016, 24(2): 72-78 (in Chinese)
- [28] Ding Y Z, Feng R W, Wang R G, et al. A dual effect of Se on Cd toxicity: Evidence from plants growth, root morphology and responses of the antioxidative systems of paddy rice [J]. *Plant and Soil*, 2014, 375(1-2): 289-301
- [29] Jia Y, Tang S R, Ju X H, et al. Effects of elevated CO₂ levels on root morphological traits and Cd uptakes of two lolium species under Cd stress [J]. *Journal of Zhejiang University-Science*, 2011, 12(4): 313-325 ◆