

唐希望, 吉普辉, 同延安, 等. 生菜地上部镉累积规律及其与矿质元素浓度的关系[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 860–867.

TANG Xi-wang, JI Pu-hui, TONG Yan-an, et al. Cadmium accumulation in above-ground parts of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and its relationship between mineral nutrients concentration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(5): 860–867.

生菜地上部镉累积规律及其与矿质元素浓度的关系

唐希望^{1,2}, 吉普辉², 同延安^{2*}, 伊丽丽¹

(1.河北环境工程学院环境科学系, 河北 秦皇岛 066102; 2.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探究镉污染条件下日光温室生菜在整个生育期内对镉的吸收规律及其与矿质元素吸收的关系, 采取田间试验的方法, 以立生二号生菜作为供试材料, 种植在镉污染(Cd 浓度 $1.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)日光温室室内。在整个生育期不间断采样, 测定生菜地上部 Cd 及 Fe、Mn、Cu、Zn、Ca、Mg 含量。结果表明, 生菜地上部 Cd 浓度在苗期从 $2.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $3.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 器官形成期从 $3.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $2.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 抽薹期从 $2.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $1.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。单株生菜地上部 Cd 累积的速率可以用“S”型曲线方程进行描述($R^2=0.99$)。苗期、器官形成期和抽薹期 Cd 累积速率分别为 0.098 、 0.516 、 $0.056 \mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。Cd 与 Fe、Mn、Cu、Zn、Ca、Mg 浓度相关系数在整个生长阶段生菜分别为 -0.77 、 -0.31 、 -0.06 、 0.09 、 0.46 、 -0.10 , 在营养生长阶段分别为 -0.43 、 0.25 、 -0.06 、 0.16 、 0.56 、 0.41 , 在生殖生长阶段分别为 -0.82 、 -0.26 、 0.72 、 0.93 、 0.42 、 0 。可以得出如下结论:生菜地上部 Cd 浓度的变化与地上部生物量的变化高度相关, Cd 浓度在苗期增加, 在器官形成期和抽薹期降低。约 15%的 Cd 累积发生在苗期, 约 80%的 Cd 累积发生在器官形成期, 约 5%的 Cd 累积发生在抽薹期。整个生长阶段生菜地上部 Cd 浓度和 Fe 浓度变化呈显著负相关, 和 Ca 呈显著正相关; 在营养生长阶段, 生菜地上部 Cd 浓度和 Ca 浓度变化呈显著正相关; 在生殖生长阶段生菜地上部 Cd 浓度变化和 Fe 显著负相关, 和 Zn、Ca 显著正相关。

关键词:日光温室; 镉污染; 生菜; 镉吸收规律; 矿质元素

中图分类号: Q945.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)05-0860-08 doi:10.11654/jaes.2017-1350

Cadmium accumulation in above-ground parts of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and its relationship between mineral nutrients concentration

TANG Xi-wang^{1,2}, JI Pu-hui², TONG Yan-an^{2*}, YI Li-li¹

(1. Department of Environmental Science, Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao 066102, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To explore the characteristic of Cd concentrations and accumulation in above-ground parts of lettuce and its interactions with mineral nutrients uptake, a field study was conducted in a Cd-contaminated greenhouse. Lettuce named “Lisheng, erhao” was cultivated and the above-ground parts were sampled during the whole growth stage and the Cd and Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Mg content in lettuce aboveground parts were measured. The results showed that the Cd concentration in the above-ground parts of lettuce increased from 2.70 to $3.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ during the seedling stage, but decreased from 3.62 to $2.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ during organogenesis and from 2.40 to $1.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ during bolting. The Cd accumulation in the above-ground parts of an individual lettuce plant could be described by a sigmoidal curve ($R^2=0.99$). The Cd accumulate rate for seedling stage, organogenesis and bolting were 0.098 , 0.516 , $0.056 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. During the whole stage, the r value of Cd with Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Mg were -0.77 , -0.31 , -0.06 , 0.09 , 0.46 , -0.10 respectively. During the vegetative stage (seedling+ organogenesis stage) the r value of Cd with Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Mg were -0.43 , 0.25 , -0.06 , 0.16 , 0.56 , 0.41 respectively. During reproductive stage, the r

收稿日期: 2017-10-06 录用日期: 2017-12-01

作者简介: 唐希望(1991—), 男, 博士, 讲师, 从事土壤-植物体系重金属的迁移阻控研究。E-mail: txw@nwsuaf.edu.cn

* 通信作者: 同延安 E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203045); 河北环境工程学院博士启动基金项目(B201406)

Project supported: Special Scientific Research Fund of Agricultural Public Welfare Profession of China (201203045); Doctoral Starting Foundation of Hebei University of Environmental Engineering (B201406)

value of Cd with Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Mg were -0.82 , -0.26 , 0.72 , 0.93 , 0.42 , 0 . The conclusion were: The Cd content in lettuce above-ground parts was highly related to growth, the Cd content was increasing during seedling while decreasing during organogenesis and bolting. Cadmium uptake during seedling was 15%, during organogenesis was 80%, during bolting was 4.35%. During the whole stage, the concentration of Cd content in lettuce was negative related to the concentration of Fe ($r=-0.77$, $P<0.01$), significantly positive with the concentration of Ca ($r=0.46$, $P<0.05$). During vegetative stage, Cd concentration in lettuce was significant positive related to Ca ($r=0.56$, $P>0.05$). During reproductive stage, Cd concentration showed significant negative to Fe concentration ($r=-0.82$, $P<0.05$) while it was significant positive with Zn concentration ($r=0.93$, $P<0.01$).

Keywords: greenhouse; Cd pollution; lettuce; Cd uptake characteristic; mineral nutrients

二十世纪五十年代爆发于日本的痛痛病事件使人们开始关注镉(Cd)对人体的毒性作用^[1]。人体过量富集镉可以造成肾小管和骨骼的损害^[2],同时也会引起肺水肿、肝损伤、贫血以及高血压等症状^[3]。对非吸烟人群,食物是人体镉的主要摄入途径^[2]。世界卫生组织和联合国粮农组织规定人体日摄入镉的最高限量是 $70 \mu\text{g}$ ^[4],正常情况下人体通过食物的日均镉摄入量是 $8\sim 25 \mu\text{g}$ ^[2],低于限量标准。但是生活垃圾和工业废物的无序排放以及农业上磷肥的使用会造成土壤中镉富集^[5-6]。自然状况下土壤中重金属主要是难以被植物吸收的形态^[7-8],但人为活动输入土壤中的重金属很容易进入食物链,进而在人体中富集,危害人体健康。

生菜是一种在世界范围内被广泛消费的蔬菜,2010年生菜的全球消费量达到 0.236 亿 t^[9]。生菜对土壤中有毒元素的存在非常敏感,并且这些有毒元素可以富集到生菜的可食部分中^[10]。研究表明生长在 $15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ CdCl}_2$ 基质中的生菜,其叶片中镉的浓度可以超出蔬菜产品最高限量的 100 倍^[11]。然而这些生长在镉污染土壤中的生菜却没有表现出脱水,黄叶或者坏死等症状^[11-12],这表明生菜对镉具有很高的耐受性,生菜受镉污染不容易被发现。此外生菜也是研究植物富集的很好的模式植物,它可以被用来研究植物镉的吸收以及在可食部分的富集问题^[13],因此生菜在土壤镉污染研究中也经常作为供试作物^[7,14-18]。

作物对镉的吸收会受到矿质元素吸收的影响^[5,19-24]。Nan 等^[21]在田间状态下研究了春小麦和玉米中锌和镉的交互作用,发现锌和镉的吸收存在协同作用。然而 Sarwar 等^[23]通过叶面喷施锌的方法,有效降低了小麦籽粒中镉的含量。Liu 等^[19-20]研究了不同品种水稻镉与 5 种矿质元素吸收转运的关系,发现镉与铁、锰、铜存在协同转运关系。然而 Sarwar 等^[22]通过综述前人研究却认为钙、锌、铁、锰可以降低作物对镉的吸收和累积。而王丽香等^[24]采用盆栽试验,发现镉胁迫对花生籽粒矿质元素含量的影响不一致,随着镉浓度增

加钾、镁、钙、铁、锌元素呈现先增加后降低的趋势。虽然很多关于矿质元素对植物镉吸收影响的研究结果是矛盾的,但是利用矿质元素与镉的相互作用来降低作物对镉的吸收转运是可行的。

在本试验中,采用立生生菜作为供试品种,种植在一个年限超过 20 年的镉污染日光温室中,在生育期内不间断采样,测定生菜地上部镉与矿质元素含量,以了解在整个生育期生菜地上部镉累积规律及镉与矿质元素吸收的关系。本研究结果对保障生菜等叶类菜的安全生产具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 试验地和试验材料

试验地位于陕西杨凌五泉镇的一个日光温室里 ($34^{\circ}17'28''\text{N}$, $108^{\circ}00'27''\text{E}$),田间试验开展于 2014 年 5 月 20 日至 8 月 10 日。日光温室土壤是壤土,质地为重壤土,具体理化性质见表 1。本试验地位于半湿润地区,年均降水量 $595.9\sim 732.9 \text{ mm}$,年均温度 13.6°C ,年均辐射量 $440\sim 544 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ^[25-26]。供试生菜为立生生菜,商品名称“立生二号”,单株生物量为 $300\sim 500 \text{ g}$,生育期为 70 d。

1.2 田间试验方法

1.2.1 生菜种植

在日光温室的中部选取一片试验田块,使用微耕机翻耕田块表层土壤,最大可能使耕层土壤质地达到均一。将生菜种子密集而均匀的撒播在每一行,一共播种 9 行,每行长 9 m,行间距 30 cm。在种子出苗前,使用塑料薄膜覆盖在田块上以保持湿度,必要的时候喷洒水分,使土壤湿度保持在最大持水量的 60%。为避免肥料对试验结果的干扰,在田间试验前后阶段均不施入任何肥料。

1.2.2 采样方法

播种后 20 d 开始对生菜地上部分进行采样。每次随机采取 20 株生菜地上部分作为一个样品,重复

表1 试验场地土壤表层(0~20 cm)理化性质(n=3)

Table 1 Properties of the 0~20 cm soil layer in the experimental field(n=3)

项目 Parameter	值 Value
pH(水土比 5:1 Water:soil=5:1)	7.83±0.10
有机质 Soil organic matter/g·kg ⁻¹	36.1±1.2
全氮 Total nitrogen/g·kg ⁻¹	1.72±0.06
有效磷 Olsen phosphate/mg·kg ⁻¹	302.6±8.5
速效钾 Available potassium/mg·kg ⁻¹	721.6±14.4
Cd/mg·kg ⁻¹	1.87±0.07
有效态镉 Available Cd/mg·kg ⁻¹	0.36±0.03
Fe/%	3.3±0.2
Cu/mg·kg ⁻¹	25.9±2.3
Zn/mg·kg ⁻¹	73±3
Ca/%	5.20±0.17
Mg/%	1.34±0.02
Mn/%	1.45±0.03

注:有效态镉采用 DTPA(DTPA-TEA-CaCl₂, pH 7.3), 水土比 2:1, 25 °C 下浸提 2 h。

Note: Available Cd was extracted for 2 h at 25 °C with DTPA(DTPA-TEA-CaCl₂, pH 7.3) as buffer solution.

三次。采样时间分别为播种后第 20、25、27、30、32、33、34、35、36、38、40、42、44、46、48、51、53、57、59、61、67、70、73 d。所有采集的样品均使用同一方法进行前处理。

1.3 样品前处理及金属元素的测定

1.3.1 样品前处理

从田间采集的鲜样抖尽泥土, 先用自来水冲洗, 再用去离子水清洗, 最后用高纯水清洗干净。然后晾干, 称取鲜重。随后放入烘箱中, 105 °C 杀青 1 h, 80 °C 烘干至恒重后称重。烘干样品采用不锈钢植物粉碎机(LD-Y500A, 上海)进行粉碎混匀。所有样品都采用相同处理方法。

1.3.2 重金属分析

在耐高温石英消煮管中加入 1.000 0 g 样品, 9 mL HNO₃(GR)和 3 mL HClO₄(GR), 敞口消解(160 °C 电热板加热)至近干, 呈黄色或无色脓状物, 判定为消解完全。然后将消解后的液体转移到 25 mL 容量瓶中, 使用高纯水定容^[26]。使用日立 Z-2000 原子吸收仪(AAS)法测定样品中 Cd、Fe、Mn、Cu、Zn、Ca、Mg 8 种元素, 其中 Ca、Mg 测定以 SrCl₂ 为掩蔽剂。样品分析过程中使用环境标准物质 GBW10015(菠菜)进行质量控制, 回收率为 95%±5%, 每批次两个重复。

1.4 数据分析

数据分析采用 SigmaPlot 12.5(Systat Software Inc.)

和 Excel 2010 软件。采用 Pearson 相关性检验对生菜镉浓度和矿质元素浓度相关性进行检验。显著性水平为 0.01 和 0.05。

2 结果与讨论

2.1 生菜生长状况

田间试验从 2014 年 5 月 20 日开始到 8 月 10 日结束, 相对应的采样时间从播种后 20 d 到播种后 73 d。图 1 是在采样周期内生菜地上部分单株生物量的变化情况。根据生菜生长情况将其分为苗期(播种后 20~30 d), 器官形成期(播种后 30~57 d)和抽薹期(播种后 57~73 d)。从图 1a 可以看出生菜地上部分鲜物质生物量呈“S”型曲线增加。在器官形成期初期, 生菜单株鲜重迅速从 2.8 g 增加到 88.1 g, 随后在 74.7~92.9 g 之间波动。在抽薹期之前, 生菜地上部单株干重也符合“S”型增长曲线, 从 0.1 g 增加到了 6.4 g, 然而在抽薹期生菜地上部分单株干重迅速从 6.4 g 增加到了 11.2 g(图 1b)。

2.2 镉累积状况

2.2.1 镉浓度

图 2 是整个生育期生菜地上部分 Cd 含量。在苗

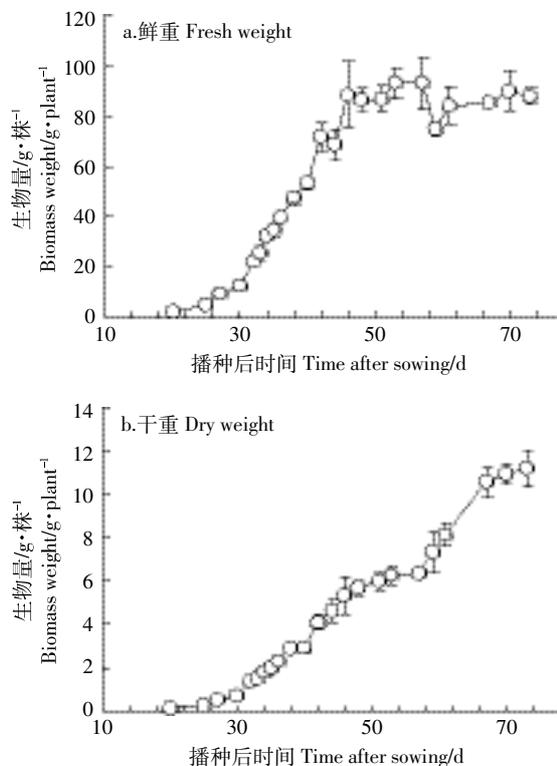


图1 采样期(播种后 20~73 d)生菜地上部生物量(n=3)

Figure 1 Biomass of lettuce above-ground parts during the experimental period(day 20 to 73 after sowing, n=3)

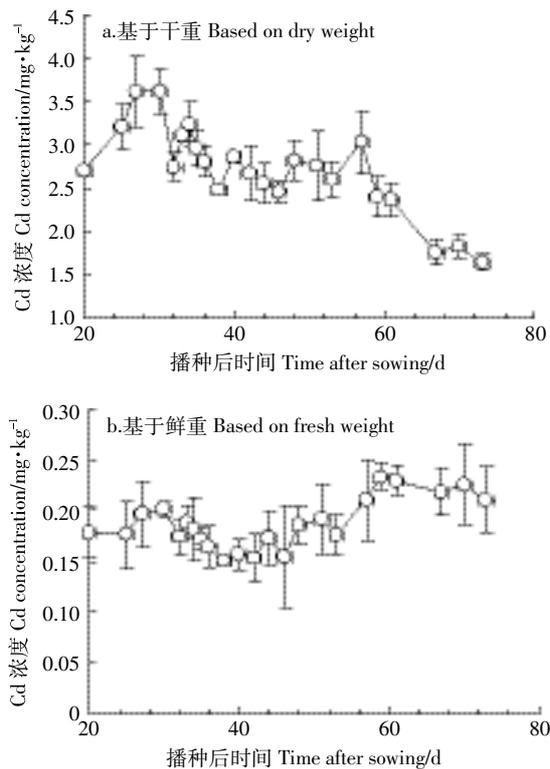


图2 基于干重和鲜重的生菜地上部 Cd 浓度($n=3$)

Figure 2 Cd concentrations in lettuce above-ground parts based on dry weight and fresh weight($n=3$)

期生菜地上部分 Cd 的浓度从 $2.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升到 $3.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,然而在器官形成期生菜地上部 Cd 的浓度从 $3.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 波动下降到 $2.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而在抽薹阶段生菜地上部 Cd 的浓度从 $2.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 几乎直线下降到 $1.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2a)。基于 Pearson 相关性检测数据表明生菜地上部 Cd 的浓度与生菜生长时间显著负相关($r=-0.76, P<0.01$)。

由于蔬菜相关的 Cd 限量标准是基于鲜重的浓度,为便于分析比较生菜地上部 Cd 浓度与限量标准的关系,本试验计算了基于鲜重的生菜地上部 Cd 浓度(图 2b)。根据图 2b,在抽薹期之前生菜地上部分 Cd 鲜重浓度非常接近可允许的最大限量值($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),在抽薹期高于生菜可允许的最大限量值。我国对于如生菜的叶类菜,可允许的 Cd 最高限量值为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (GB 2762—2012)。考虑到误差,在抽薹期之前生菜 Cd 含量有可能超标,因此该日光温室生产出的生菜对消费者来说是有健康风险的。

从图 2 可以看出在整个生育期内生菜地上部 Cd 浓度的变化并没有保持相同的趋势。对于限定的土壤和限定的一株生菜,生菜组织中 Cd 浓度是由其生长

状况所决定的。植物的根和叶片都可以吸收 Cd^[27-28],但根吸收是 Cd 的主要吸收途径。植物根系吸收 Cd 的规律可以用 Michaelise-Menten 动力学模型(1)及其衍生模型来描述^[29-31]。

$$J = \frac{J_{\max} \times C}{K_m + C} \quad (1)$$

式中: J 是植物根部微量元素汇入率, $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; C 是土壤溶液中的微量元素浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; J_{\max} 是 J 的最大值; K_m 是 $J=50\%J_{\max}$ 时 C 的值。

但是这个方程并不能直接用于描述田间试验,因为在田间试验状态下根系不能被准确地测定。根的生长是和地上部生物量的累积高度相关的^[17,32],而地上部分生物量的累积趋势遵循“S”型曲线方程(2):

$$B(t) = \frac{B_{\max}}{1 + \exp\left[\frac{-b_1(t-t_1)}{b_1}\right]} \quad (2)$$

式中: $B(t)$ 是生菜地上部在生长时期 $t(\text{d})$ 的生物量, $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$; B_{\max} 代表最大生物量, t_1 是 $B(t)=50\%B_{\max}$ 时的生长时间, d ; b_1 是生长速率的倒数, $\mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

根据 Chen 等^[33-34]和 Molina 等^[17]的研究结果,田间状态下微量元素根吸收模型可以用公式(3)描述:

$$\frac{dM(t)}{dt} = J \times R_{\text{root-shoot}} \times B(t) \quad (3)$$

式中: $M(t)$ 代表根吸收的微量元素量, $\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$; $R_{\text{root-shoot}}$ 代表根冠比(根长/生物量), $\text{cm} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

根据公式(3),根冠比和地上部生物量决定着生菜地上部 Cd 的累积。在播种后 57 d 之前地上部生物量的增长趋势符合“S”型曲线,而在此之后的抽薹期地上部生物量又开始迅速增长(图 1b)。在整个生育期,地上部生物量增长率符合低-高-低-高的趋势。当生菜地上部生物量累积速率比 Cd 累积速率低时,地上部 Cd 浓度就会上升,反之则下降。假设在公式(3)中 J 值不变,则 Cd 浓度在苗期升高而在器官形成期和抽薹期下降。抽薹期 Cd 吸收速率的下降大于器官形成期。

2.2.2 镉累积

根据图 3,生菜地上部 Cd 单株累积量可以用逻辑斯特方程(4)进行拟合。

$$U(t) = \frac{U_{\max}}{1 + \exp\left[\frac{-(t-t_2)}{b_2}\right]} \quad (4)$$

式中: $U(t)$ 代表生菜地上部 Cd 单株累积总量, $\mu\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$; U_{\max} 代表 $U(t)$ 的最大值, t_2 是当 $U(t)$ 的值等于 $50\%U_{\max}$ 的时间, d ; b_2 是 Cd 吸收速率的倒数, d 。在本研究

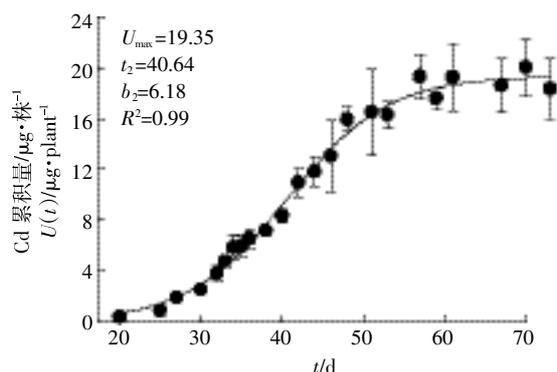


图3 生菜地上部 Cd 单株累积量的逻辑斯特拟合方程

Figure 3 A logistic curve was used to fit the trend of cadmium accumulation in above-ground lettuce parts

中 $U_{\max}=19.35 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$, $t_2=40.64 \text{ d}$, $b_2=6.18 \text{ d}$ 。

在器官形成期生菜地上部累积的 Cd 总量为 $15.48 \mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$, 远高于抽薹期(表 2)。在器官形成期 Cd 的累积速率也是最高的, 此阶段累积的 Cd 占全部生长阶段的 80%, 而抽薹期累积的 Cd 只占 4.35%。由此可见, 器官形成期是生菜地上部 Cd 累积的主要时期。抽薹期虽然生物量增长很快, 其 Cd 累积速率却是最低的。McKenna 等^[35]的研究结果表明在研究设置的所有 Cd 输入水平下, 都是生菜老叶 Cd 含量大于新叶, Moustakas 等^[36]的研究结果也表明生菜外叶 Cd 含量大于内叶 Cd 含量。这些研究结果与本研究结果可以相互印证, Cd 在生菜各组织器官迁移性较低, 但两者均没有比较新叶与老叶 Cd 累积速率。

在抽薹期, 部分叶片枯萎脱落也可能造成部分累积 Cd 的减少。根据图 1, 在抽薹期干鲜比的增加可能也降低了 Cd 从生菜根部到地上部的转移速率。鉴于此, 当把生菜作为 Cd 研究供试植物时应在抽薹期之前进行采摘。根据方程(3), 根冠比是生菜地上部 Cd 累积的影响因素。使用生长素例如吲哚乙酸(IAA)和赤霉素(GA)均可以调节根冠比^[25, 37]。生菜地上部累积 Cd 的途径主要是根部的转运, 而根部到地上部的转移速率在器官形成期最高。因此可以使用生长素在器

官形成期对生菜 Cd 累积进行调节。

2.2.3 矿质元素浓度

图 4 是生菜在整个生育期地上部矿质元素 Fe、Mn、Cu、Zn、Ca、Mg 含量的变化情况。从图 4 可以看出, 与生育期内生菜地上部 Cd 浓度的变化情况不同, Fe、Mn、Cu、Zn 4 种元素浓度的变化与生长时间呈显著正相关(相关系数分别为 $r=0.71, P<0.01$; $r=0.58, P<0.01$; $r=0.42, P<0.05$; $r=0.39, P<0.05$), 即随着生长时间的增加, 生菜地上部 Fe、Mn、Cu、Zn 4 种元素的干物质浓度增加。而不同生育期内生菜地上部 Ca 和 Mg 元素含量变化则与生长时间没有显著相关性。这可能与研究区域土壤状况有关, 根据表 1, 该区域土壤 Ca 和 Mg 的含量较高, 分别为 5.2% 和 1.34%, 而 Ca 和 Mg 是生菜体内的大量元素, 其在生菜体内的浓度受外界因素影响较小, 因此其在生育期内浓度基本保持恒定。

2.2.4 生菜镉与其他元素含量的相关性

本文在 2.1 部分根据图 1 将生菜生长分为苗期、器官形成期和抽薹期, 根据生长规律可以进一步将苗期和器官形成期划归至生菜的营养生长阶段, 抽薹期划归至生菜的生殖生长阶段。对生菜整个生育期内、营养生长阶段以及生殖生长阶段 Fe、Mn、Cu、Zn、Ca、Mg 元素含量与 Cd 含量进行 Pearson 相关性分析, 结果见表 3。可以看出整个生长阶段生菜地上部体内 Cd 浓度和 Fe 浓度变化呈极显著负相关($r=-0.77, P<0.01$), 和 Ca 呈正相关($r=0.46, P<0.05$); 在营养生长阶段, Cd 浓度和 Ca 浓度变化呈显著正相关($r=0.56, P<0.05$); 在生殖生长阶段生菜 Cd 浓度变化和 Fe 浓度显著负相关($r=-0.82, P<0.05$), 和 Zn、Ca 显著正相关($r=0.93, P<0.01$; $r=0.42, P<0.05$)。

在整个生育期以及生殖生长阶段, 生菜地上部 Fe 与 Cd 的浓度变化呈显著负相关。Fe 元素虽然与 Cd 在生物体内功能不同, 但是 Fe 与 Cd 存在交互作用, Cd 胁迫可以诱导植物缺 Fe, 而足量供 Fe 可以降

表 2 不同生育期生菜地上部 Cd 累积

Table 2 Cadmium accumulation in above-ground parts of lettuce plants during different growth stages

项目 Items	苗期 Seedling stage	器官形成期 Organogenesis stage	抽薹期 Bolting stage
Cd 累积量 Total accumulation/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.93	18.41	19.35
各阶段 Cd 累积量 Stage-specific accumulation/ $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$	2.93	15.48	0.84
占总量比例 Partition/%	15.14	80.00	4.35
Cd 累积速率 Cd accumulation rate/ $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	0.098	0.516	0.056

注: Cd 累积量=干重×基于干重的 Cd 浓度; 阶段 Cd 累积量=该生育期 Cd 累积量-上一生育期 Cd 累积量; 比例=阶段 Cd 累积/全生育期 Cd 累积总量×100%; Cd 累积速率=阶段 Cd 累积量/阶段天数。

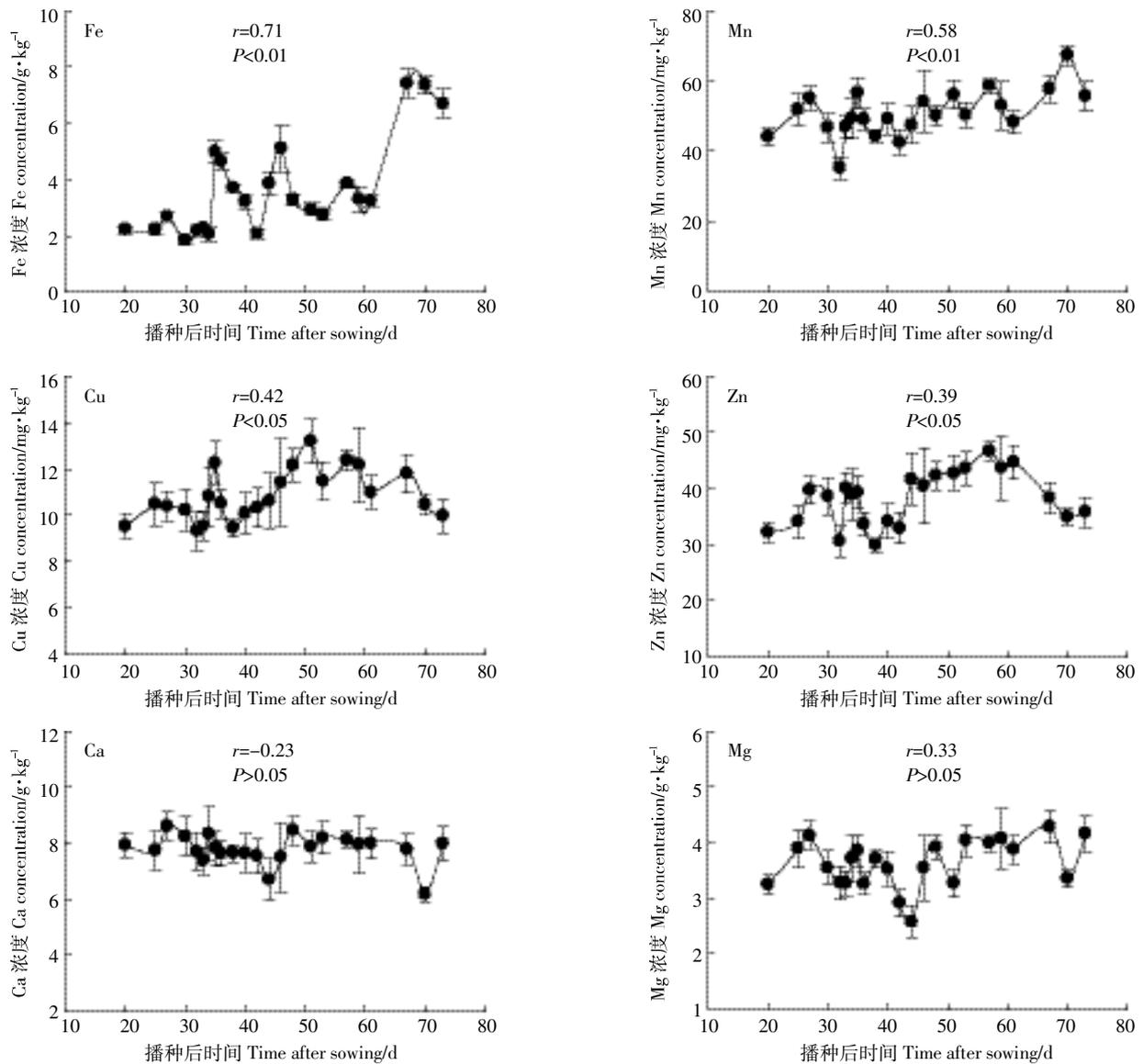


图4 生菜地上部 Fe、Mn、Cu、Zn、Ca、Mg 的浓度(n=3)

Figure 4 Fe, Mn, Cu, Zn, Ca and Mg concentration in the above ground parts of lettuce(n=3)

表3 整个生育期、营养生长阶段以及生殖生长阶段生菜 Cd 含量与 Fe、Mn、Cu、Zn、Ca、Mg 元素含量的相关性

Table 3 Pearson correlation analysis of lettuce Cd content with lettuce Fe, Mn, Cu, Zn, Ca and Mg content respectively, during the whole growth stage, vegetative stage and reproductive stage

		Fe	Mn	Cu	Zn	Ca	Mg
Cd	整个生育期 Whole stage, n=23	-0.77**	-0.31	-0.06	0.09	0.46*	-0.10
	营养生长阶段 Vegetative stage, n=18	-0.43	0.25	-0.06	0.16	0.56*	0.41
	生殖生长阶段 Reproductive stage, n=6	-0.82*	-0.26	0.72	0.93**	0.42*	0

注: * 显著; ** 极显著。

Note: *significant, ** extremely significant.

低 Cd 的生理毒性,减少植物对 Cd 的吸收转运^[38-40]。在本研究中,生菜生育期内地上部 Cd 与 Fe 的浓度变化呈显著负相关正是体现了这一点。不过需要指出的是,有研究表明对于 Cd 富集作物来说,植物对 Fe

和 Cd 的吸收是显著正相关的^[41]。表 3 结果表明生菜 Cd 浓度与 Zn、Ca 浓度变化呈正相关,而相关研究表明,在生物体内 Cd 和 Zn、Ca 两种元素在生理上存在拮抗作用,后两种元素可以缓解 Cd 对生物的毒害作

用^[42-43],而 Cd 与 Zn、Ca 两种元素存在生理拮抗是因为元素之间价态相同、性质相似,因此生菜对 Cd、Zn、Ca 吸收转运路径可能存在共同之处。根据图 1 中生菜生长状况,可以判断出生菜的生长没有受到 Cd 的胁迫,其对 Cd 的吸收未受到抑制。因此可以推测在本研究中这 3 种元素从根部到地上部的转运没有发生竞争,因而生菜地上部 Cd 浓度与 Zn、Ca 浓度变化呈正相关。

3 结论

(1)地上部 Cd 浓度的变化与地上部生物量的变化高度相关。Cd 浓度在苗期增加,在器官形成期和抽薹期降低。

(2)单株生菜地上部 Cd 累积的速率可以用“S”型曲线进行描述,约 15% 的 Cd 累积发生在苗期,约 80% 的 Cd 累积发生在器官形成期,约 5% 的 Cd 累积发生在抽薹期,苗期、器官形成期和抽薹期 Cd 累积速率分别为 0.098、0.516、0.056 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

(3)整个生长阶段生菜地上部 Cd 浓度和 Fe 浓度变化呈极显著负相关,和 Ca 呈显著正相关;在营养生长阶段,生菜地上部 Cd 浓度和 Ca 浓度呈显著正相关;在生殖生长阶段生菜地上部 Cd 浓度变化和 Fe 显著负相关,和 Zn、Ca 显著正相关。

参考文献:

- [1] Hagino N, Kono M. A study on the cause of Itai-itai-disease[C]. Proc 17th Mtg Japanese Soc of Clinical Surgeons, 1955.
- [2] Järup L, Åkesson A. Current status of cadmium as an environmental health problem[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2009, 238(3): 201-208.
- [3] Baldantoni D, Morra L, Zaccardelli M, et al. Cadmium accumulation in leaves of leafy vegetables[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 123:89-94.
- [4] FAO, WHO. List of maximum levels recommended for contaminants by the joint FAO/WHO[R]. Rome:FAO, WHO, 1978.
- [5] Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils: To mobilize or to immobilize?[J]. *J Hazard Mater*, 2014, 266:141-166.
- [6] Noll M R. Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals, 2nd Edition[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(1):374.
- [7] Das P, Samantaray S, Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants: A review[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 98(1):29-36.
- [8] Tyler G, P Hlsson A M B, Bengtsson G, et al. Heavy-metal ecology of terrestrial plants, microorganisms and invertebrates[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1989, 47(3/4):189-215.
- [9] Liu Y, Vijver M G, Peijnenburg W J G M. Impacts of major cations(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) and protons on toxicity predictions of nickel and cadmium to lettuce(*Lactuca sativa* L.) using exposure models[J]. *Ecotoxicology*, 2014, 23(3):385-395.
- [10] Do Nascimento Da Silva E, Heerd G, Cidade M, et al. Use of *in vitro* digestion method and theoretical calculations to evaluate the bioaccessibility of Al, Cd, Fe and Zn in lettuce and cole by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Microchemical Journal*, 2015, 119:152-158.
- [11] Zorrig W, El Khouni A, Ghnaya T, et al. Lettuce(*Lactuca sativa*): A species with a high capacity for cadmium (Cd) accumulation and growth stimulation in the presence of low Cd concentrations[J]. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 2013, 88(6):783-789.
- [12] Pereira B, Rozane D E, Araujo S R, et al. Cadmium availability and accumulation by lettuce and rice[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2011, 35(2):645-654.
- [13] Rashid A, Mahmood T, Mehmood F, et al. Phytoaccumulation, competitive adsorption and evaluation of chelators-metal interaction in lettuce plant[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2014, 13(10):2583-2592.
- [14] Fontes R, Pereira J, Neves J. Uptake and translocation of Cd and Zn in two lettuce cultivars[J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2014, 86(2):907-922.
- [15] Kukier U, Chaney R L, Ryan J A, et al. Phytoavailability of cadmium in long-term biosolids-amended soils[J]. *J Environ Qual*, 2010, 39(2):519-530.
- [16] Melo L, Alleoni L, Swartjes F A, et al. Cadmium uptake by lettuce (*Lactuca sativa* L.) as basis for derivation of risk limits in soils[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2012, 18(4):888-901.
- [17] Molina M, Escudey M, Chang A C, et al. Trace element uptake dynamics for maize (*Zea mays* L.) grown under field conditions[J]. *Plant and Soil*, 2013, 370(1/2):471-483.
- [18] Podar D, Ramsey M H. Effect of alkaline pH and associated Zn on the concentration and total uptake of Cd by lettuce: Comparison with predictions from the CLEA model[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 347(1/2/3):53-63.
- [19] Liu J G, Liang J S, Li K Q, et al. Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress[J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9):1467-1473.
- [20] Liu J G, Li K Q, Xu J K, et al. Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes[J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(3):271-281.
- [21] Nan Z R, Li J J, Zhang J M, et al. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions[J]. *Sci Total Environ*, 2002, 285(1/2/3):187-195.
- [22] Sarwar N, Malhi S S, Zia M H, et al. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(6):925-937.
- [23] Sarwar N, Ishaq W, Farid G, et al. Zinc-cadmium interactions: Impact on wheat physiology and mineral acquisition[J]. *Ecotoxicology and En-*

- Environmental Safety*, 2015, 122:528-536.
- [24] 王丽香, 陈 虎, 郭 峰, 等. 镉胁迫对花生生长和矿质元素吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6):1106-1110.
- WANG Li-xiang, CHEN Hu, GUO Feng, et al. Effects of cadmium on peanut growth and mineral nutrient uptake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6):1106-1110.
- [25] Ji P, Jiang Y, Tang X, et al. Enhancing of phytoremediation efficiency using indole-3-acetic acid(IAA)[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2015, 24(8):909-916.
- [26] Tang X W, Pang Y, Ji P H, et al. Cadmium uptake in above-ground parts of lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 125:102-106.
- [27] Fismes J F, Echevarria G, Leclerc-Cessac E, et al. Uptake and transport of radioactive nickel and cadmium into three vegetables after wet aerial contamination[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(5):1497-1507.
- [28] Zorrig W, Rouached A, Shahzad Z, et al. Identification of three relationships linking cadmium accumulation to cadmium tolerance and zinc and citrate accumulation in lettuce[J]. *J Plant Physiol*, 2010, 167(15):1239-1247.
- [29] Alexander P D, Alloway B J, Dourado A M. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables[J]. *Environ Pollut*, 2006, 144(3):736-745.
- [30] Cataldo D A, Garland T R, Wildung R E. Cadmium uptake kinetics in intact soybean plants[J]. *Plant Physiol*, 1983, 73(3):844-848.
- [31] Stritsis C, Claassen N. Cadmium uptake kinetics and plants factors of shoot Cd concentration[J]. *Plant and Soil*, 2013, 367(1/2):591-603.
- [32] Casper B A, Cahill J F, Hyatt L A. Above-ground competition does not alter biomass allocated to roots in *Abutilon theophrasti*[J]. *New Phytologist*, 1998, 140(2):231-238.
- [33] Chen W P, Li L Q, Chang A C, et al. Modeling uptake kinetics of cadmium by field-grown lettuce[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(1):147-152.
- [34] Chen W P, Li L Q, Chang A C, et al. Cadmium uptake by lettuce in fields treated with cadmium spiked phosphorus fertilizers[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2009, 40:1124-1137.
- [35] Mckenna I M, Chaney R L, Williams F M. The effects of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue distribution of zinc and cadmium in lettuce and spinach[J]. *Environmental Pollution*, 1993, 79(2):113-120.
- [36] Moustakas N K, Akoumianakis K A, Passam H C. Cadmium accumulation and its effect on yield of lettuce, radish, and cucumber[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(11/12):1793-1802.
- [37] Ji P, Tang X, Jiang Y, et al. Potential of gibberellic acid 3(GA3) for enhancing the phytoremediation efficiency of *Solanum nigrum* L. [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, 95(6):810-814.
- [38] 黄益宗, 朱永官, 黄凤堂, 等. 镉和铁及其交互作用对植物生长的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(3):406-409.
- HUANG Yi-zong, ZHU Yong-guan, HUANG Feng-tang, et al. Effects of cadmium and iron and their interactions on plants growth: A review [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(3):406-409.
- [39] 万亚男, 张 燕, 余 垚, 等. 铁营养状况对黄瓜幼苗吸收转运镉和锌的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):409-414.
- WAN Ya-nan, ZHANG Yan, YU Yao, et al. Effects of iron supply on cadmium and zinc uptake and translocation by cucumber seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):409-414.
- [40] 杨 芸, 周 坤, 徐卫红, 等. 外源铁对不同品种番茄光合特性、品质及镉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4):1006-1015.
- YANG Yun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, et al. Effect of exogenous iron on photosynthesis, quality, and accumulation of cadmium in different varieties of tomato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4):1006-1015.
- [41] 张晗芝, 郭庆军, 杨俊兴, 等. 镉胁迫下蓖麻对镉及矿质元素的富集特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2):323-328.
- ZHANG Han-zhi, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, et al. Cadmium and mineral nutrients accumulation in various genotypes of castor under cadmium stress[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2015, 24(2):323-328.
- [42] 关昕昕, 严重玲, 刘景春, 等. 钙对镉胁迫下小白菜生理特性的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2011, 50(1):132-137.
- GUAN Xin-xin, YAN Chong-ling, LIU Jing-chun, et al. Effect of calcium on physiological property of *Brassica chinensis* L. under cadmium stress[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2011, 50(1):132-137.
- [43] 郭秀璞, 孔祥生, 张妙霞, 等. 锌对小麦镉毒害的缓解效应[J]. 河南农业大学学报, 1999, 33(2):211-214.
- GUO Xiu-pu, KONG Xiang-sheng, ZHANG Miao-xia, et al. Buffer effect of zinc on cadmium toxic of wheat[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 1999, 33(2):211-214.