

土壤持水量对生菜生长和镉浓度的影响*

唐明灯 艾绍英[†] 王艳红 杜瑞英 李盟军 杨少海 余丹妮 罗英健

(广东省农业科学院土壤肥料研究所, 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 农业部南方植物营养与肥料重点实验室, 广州 510640)

摘要 通过不同水分含量处理的盆栽试验和培养试验, 探索土壤持水量对生菜生物量与 Cd 浓度, 土壤 pH 和土壤 Cd 有效态的影响。结果表明, 土壤持水量显著影响生菜的生物量, 75% 田间持水量 (water holding capacity, WHC) 处理生菜地上部鲜重最高, 生菜鲜重与土壤持水量呈倒 V 型关系。土壤持水量也显著影响生菜地上部及根中 Cd 浓度, 两者均与土壤持水量呈显著负相关关系, 土壤持水量从 45% WHC 增加到 65% WHC, 地上部 Cd 浓度降低 41%, 生菜 Cd 含量从超过无公害标准到低于标准。盆栽试验中, 乙酸铵-Cd 浓度与水分处理水平没有显著相关性, 生菜地上部 Cd 浓度与土壤的乙酸铵-Cd 态也没有显著相关性。水分对土壤 pH 没有显著影响, 但培养试验中土壤乙酸铵-Cd 与水分处理水平显著负相关。初步推测土壤水分影响生菜地上部 Cd 浓度, 不是通过影响土壤 pH 和 Cd 有效态来实现的。因此, 可以通过调节土壤水分来控制中轻度重金属污染的设施菜地上叶菜可食部分的 Cd 浓度, 这是一种具有较好应用前景的绿色调控措施。

关键词 持水量; 生菜; 镉; 土壤

中图分类号 X53 **文献标识码** A

我国城郊菜地土壤重金属超标严重, 而且以毒性较强的重金属 Cd 污染最严重^[1-2], 进而导致蔬菜重金属超标, 但不同蔬菜对重金属的富集有较大差异, 其中富集最强的是叶菜^[1-3], 因此, 城郊重金属污染菜地土壤上的叶菜具有很大的身体健康风险。

土壤重金属污染的修复主要包括物理、化学和植物修复技术。植物修复技术是当今研究的热点^[4-6]; 但目前植物修复技术的限制因素主要有: 重金属生物有效性低, 重金属向地上部迁移能力差, 大多数重金属超富集植物的生长速率慢、生物量小^[7], 而且对污染面积大、污染程度低的菜地土壤的修复效果更低。

土壤水分是控制土壤物理、化学和生物特性的重要因子, 能影响土壤 pH、Eh、有机质和碳酸钙的浓度^[8]。因此能间接地影响土壤重金属的迁移和分配, 进一步影响重金属的植物有效性。土壤持水量能否影响叶菜可食部分的重金属浓度, 目前国际上这方面的研究还比较少。因此, 本文对重金属污染土壤设置了 6 个水分处理水平, 探索水分处理对供试叶菜地上部 Cd 浓度的影响, 进而为重金属中

轻度污染土壤上叶菜重金属浓度的“绿色”调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

盆栽试验土壤取自广州市近郊, 系由沉积物发育而来的普通肥熟旱耕人为土 (Typic Fimi-orthic Anthrosols)。取 0~20 cm, 风干, 过 1 cm 筛, 备用。土壤的部分性状如下: pH 5.70, 有机质 40.8 g kg⁻¹, Cd 全量 1.34 mg kg⁻¹, 全氮 2.12 g kg⁻¹, 碱解氮 172 mg kg⁻¹、有效磷 135 mg kg⁻¹、速效钾 362 mg kg⁻¹。

1.2 供试叶菜

意大利耐抽苔生菜 (*Lactuca sativa* Linn. var. *ramosa* Hort.), 可以全年栽种, 其地上部 Cd 浓度较高^[9]。

1.3 试验设计和实施

试验设 6 个土壤持水量水平, 分别为田间持水量 (water capacity holding, WHC, 水/烘干土 × 100% = 55%) 的 95% (W1)、85% (W2)、75% (W3)、65%

* 广东省科学技术厅重大专项 (2007A032303001)、广东省科学技术厅农业领域重点专项 (2011A020101007)、广东省科学技术厅社会发展项目 (2010B031800013)、广东省科学技术厅农业攻关项目 (2011B020309003) 资助

[†] 通讯作者, E-mail: shaoyingai@21cn.com

作者简介: 唐明灯 (1968—), 男, 博士, 湖南省武冈人, 助理研究员, 主要从事土壤重金属污染及其调控措施研究。E-mail: njautmd@163.com, Tel: 020-32885209

收稿日期: 2011-10-20; 收到修改稿日期: 2012-05-11

(W4)、55% (W5)、45% (W6), 每处理 5 次重复, 共 30 盆, 每盆装土 4.0 kg。肥料总量为 $N:0.16 \text{ g kg}^{-1}$, $P_2O_5:0.08 \text{ g kg}^{-1}$, $K_2O:0.10 \text{ g kg}^{-1}$ (以尿素、磷酸二氢钙和硫酸钾施入), 磷酸二氢钙以底肥施入。盆栽试验时间为 2010 年 12 月 16 日至 2011 年 2 月 16 日, 移栽生菜苗 1 周后施第 1 次追肥 (N、K 总量的 20%), 第 3 周后追肥 30%, 第 5 周后 20%, 第 7 周后 20%。称重法控制土壤水分。

另在室内进行同样的水分处理、不施肥且不种生菜的培养试验 (土壤 500 g 盆^{-1}), 试验时间为 2010 年 11 月 10 日至 2011 年 2 月 19 日。

1.4 样品前处理及分析

记录生菜地上部及地下部鲜重、洗净、擦干表面水分, 用塑料打浆机匀浆制成鲜样, 称取 10.00 g (不足 10 g 全部称取) 于三角瓶中, 加入 10.0 ml 混酸 (体积比 $HNO_3:HClO_4=9:1$, 优质纯试剂) 消煮、定容到 25 ml, 石墨炉原子吸收分光光度计 (Hitachi Z-2000) 测定叶菜样本 Cd 浓度, 同时称取蔬菜标准样品进行质量监控。土壤样本自然风干, 过 1 mm 尼龙筛, 用 1 mol L^{-1} 乙酸铵溶液浸提土壤有效态 Cd (土液质量比为 1:5), 石墨炉原子吸收分光光度计 (Hitachi Z-2000) 测定过滤液中 Cd 浓度; 称取 10 g 土壤, 电位法测定土壤 pH (土水质量比为 1:2.5)。

1.5 数据处理和统计

数据采用 Excel 2003 处理, SPSS10.0 统计 (差异显著水平为 $p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生菜生物量

土壤持水量显著影响生菜的生长和生物量。W3 处理生菜地上部生物量最大, 随着土壤持水量的增大或减少, 生菜地上部生物量均降低, 生菜地上部的生物量与水分处理呈倒 V 型曲线 (图 1), 这是因为土壤水分含量为 70% WHC 左右时, 土壤中水分和空气均比较充分, 利于植物生长。当土壤持水量低于 55% WHC 时, 生菜的生物量显著降低, 而且 W6 处理的生菜叶片易失水萎蔫。理论上生菜根系鲜重的规律与地上部一致, 但生菜根系规律性不明显, 可能是很难从土壤中收获到完整的生菜根系。

2.2 生菜 Cd 浓度及其 Cd 去除量

土壤持水量显著影响生菜地上部和根的 Cd 浓度, Cd 浓度随土壤持水量的减少而显著增加, 生菜地上部的生物量与其 Cd 浓度没有显著相关性 (相

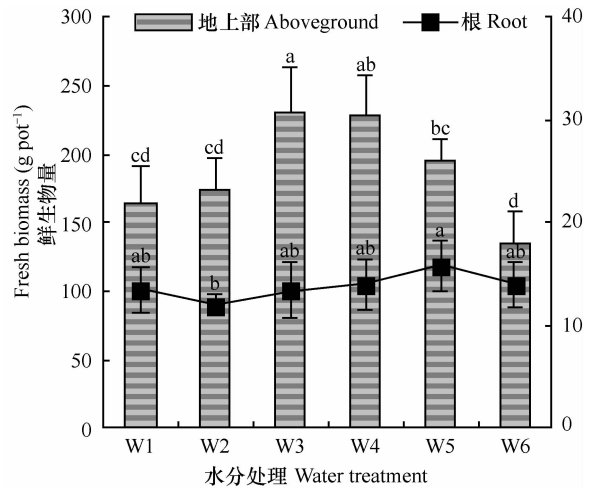


图 1 生菜生物量 (地上部为左纵坐标, 根为右纵坐标)
Fig. 1 Fresh biomass of lettuce (Left vertical ordinate for aboveground and right one for root)

关系数 $r = -0.016$, $n = 30$, $p > 0.05$), 初步可以推断生菜生物量对生菜地上部 Cd 浓度没有显著的稀释效应。生菜地上部 Cd 浓度与根 Cd 浓度显著正相关 ($r = 0.847$, $n = 30$, $p < 0.01$); 对相同处理而言, 生菜根 Cd 浓度大于地上部 Cd 浓度, 经 t 检验, 除 W3 和 W5 外, 根与地上部 Cd 浓度有显著差异 (图 2)。图 2 还可见, 生菜地上部和根 Cd 浓度均低于食品中污染物限量中 Cd 的标准 (0.2 mg kg^{-1})^[10], 但处理 W6 地上部 Cd 浓度和处理 W5、W6 根 Cd 浓度, 超过无公害蔬菜要求中 Cd 的标准 (0.05 mg kg^{-1})^[11]。生菜地上部和根中 Cd 浓度与土壤持水量显著负相关 (相关系数 r 分别为 -0.911 、 -0.762 , $n = 30$, $p < 0.01$), 土壤持水量从 45% WHC 增加至比较适合生菜生长的持水量 (65% WHC) 时, 其地上部 Cd 浓度

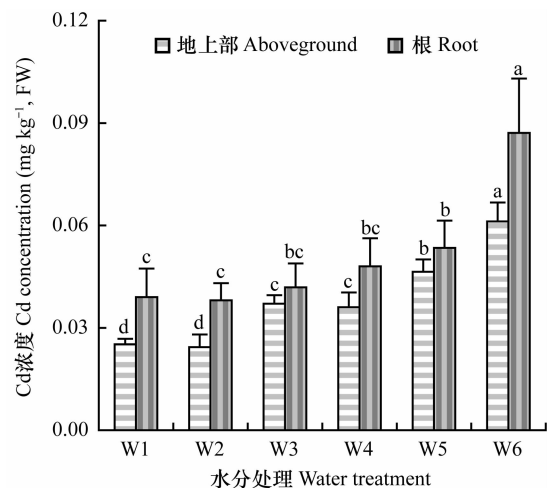


图 2 生菜 Cd 浓度

Fig. 2 Cd concentration in lettuce

降低 41%，即从超过无公害标准 (0.061 mg kg^{-1}) 降低至低于标准 (0.036 mg kg^{-1})，提高了蔬菜的品质。因此初步推测，提高生菜菜地土壤持水量可以降低生菜可食部分中 Cd 浓度。

将生菜地上部生物量或地下部生物量分别与其 Cd 浓度相乘，得到地上部或根 Cd 的去除量 (表 1)。可见，处理 W1 和 W2 地上部 Cd 去除量显著低于处理 W3、W4、W5 和 W6；处理 W6 根 Cd 去除量显著高于其他处理；地上部和根 Cd 去除量均与土壤水分含量显著负相关 (相关系数 r 分别为 -0.704 、 -0.800 ， $n=30$ ， $p<0.01$)。每盆土壤 Cd 总量为 5.36 mg ，生菜地上部 Cd 去除量较根大，其中处理 W5 最大，但仅为土壤 Cd 总量的 0.17% ，因此生菜 Cd 去除量较低，对土壤 Cd 总量而言可忽略不计。

2.3 土壤 pH 和乙酸铵提取态 Cd 浓度

通过盆栽试验和培养试验可以看出，各处理土

壤 pH 显著大于基础土壤，但处理之间没有显著差异 (盆栽试验 W2 处理、培养试验 W1 处理除外) (表 1)。盆栽试验土壤的乙酸铵-Cd 浓度规律性不明显；但培养试验中，乙酸铵-Cd 浓度随土壤水分处理水平的降低而增加 (表 1)，且乙酸铵-Cd 浓度与水分处理水平显著负相关 (相关系数 $r = -0.821$ ， $n=30$ ， $p<0.01$)，盆栽试验土壤乙酸铵-Cd 浓度与培养试验有区别，其原因可能在于前者受生菜根系和施肥的影响。因此在土壤 pH、土壤 Cd 的生物有效性和生菜 Cd 浓度三者当中，土壤水分处理最容易影响生菜 Cd 浓度，其次是土壤 Cd 的生物有效性，最难影响土壤 pH。换言之，土壤水分可能不是通过影响土壤 pH、进而影响土壤中 Cd 的有效性来影响生菜对 Cd 的吸收。那么，水分如何影响生菜地上部和根中 Cd 浓度，其机制是引人感兴趣的问题。

表 1 生菜 Cd 去除量、土壤 pH 及乙酸铵-Cd 浓度

Table 1 Cd removal through harvest of lettuce, soil pH and NH_4OAc extractable Cd concentration

处理 Treatment	Cd 去除量 Cd removal through harvest of lettuce ($\mu\text{g pot}^{-1}$)			pH	$\text{NH}_4\text{OAc-Cd}$ (mg kg^{-1})	
	地上部 Aboveground	根 Root	盆栽 Pot experiment		盆栽 Pot experiment	培养试验 Incubation experiment
	W1	$4.09 \pm 0.50\text{b}$	$0.48 \pm 0.06\text{cd}$	$6.49 \pm 0.23\text{a}$	$6.69 \pm 0.12\text{a}$	$0.095 \pm 0.003\text{ab}$
W2	$4.25 \pm 0.87\text{b}$	$0.46 \pm 0.09\text{d}$	$6.21 \pm 0.10\text{b}$	$6.51 \pm 0.12\text{b}$	$0.097 \pm 0.002\text{a}$	$0.084 \pm 0.002\text{c}$
W3	$8.58 \pm 1.83\text{a}$	$0.57 \pm 0.18\text{cd}$	$6.43 \pm 0.18\text{a}$	$6.42 \pm 0.17\text{b}$	$0.092 \pm 0.002\text{b}$	$0.081 \pm 0.003\text{c}$
W4	$8.55 \pm 1.52\text{a}$	$0.72 \pm 0.20\text{bc}$	$6.44 \pm 0.12\text{a}$	$6.49 \pm 0.15\text{b}$	$0.088 \pm 0.002\text{c}$	$0.089 \pm 0.002\text{b}$
W5	$9.04 \pm 0.61\text{a}$	$0.85 \pm 0.18\text{b}$	$6.51 \pm 0.16\text{a}$	$6.47 \pm 0.11\text{b}$	$0.091 \pm 0.005\text{bc}$	$0.091 \pm 0.001\text{ab}$
W6	$8.21 \pm 2.00\text{a}$	$1.22 \pm 0.28\text{a}$	$6.46 \pm 0.10\text{a}$	$6.48 \pm 0.13\text{b}$	$0.094 \pm 0.004\text{ab}$	$0.093 \pm 0.003\text{a}$

3 讨 论

土壤水分是植物生长的最重要因子，也是植物水分的重要来源。已有文献报道，土壤水分既能影响植物的生物量，也能影响植物重金属浓度^[12-16]；其中水稻籽粒、油菜、小麦、伴矿景天的 Cd 浓度在淹水条件下均降低^[12-14]。崔立强等^[12]研究表明，伴矿景天在 70% WHC 处理时鲜重最大，鲜重与土壤持水量近似倒 V 型曲线，而且伴矿景天茎叶 Cd 浓度在 70% WHC 处理时最大，茎叶镉浓度与土壤水分处理间也呈倒 V 型曲线；本试验 75% WHC 处理时生菜地上部鲜重最大，生菜地上部鲜重与土壤持水量也呈倒 V 型关系，但该处理生菜地上部 Cd 浓

度居于中间，生菜地上部 Cd 浓度与土壤水分处理水平显著负相关，且根 Cd 浓度也如此，因此，本文地上部和根中 Cd 浓度-土壤水分关系较崔立强等^[12]的规律性更佳 (图 2)。据此推测，可以通过水分来调控叶菜可食部分中 Cd 浓度，因该措施绿色环保，对中轻度重金属污染土壤上叶菜 Cd 浓度的调控将有广阔的应用前景。此外，Angle 等^[16]报道，在 80% WHC 或 100% WHC 的土壤中，遏蓝菜等超富集植物叶片中的重金属浓度会提高；Ye 等^[15]也报道，在淹水条件下生长在尾矿渣上的芦苇重金属吸收量会增加。鉴于叶菜的生物多样性，从理论上讲，其他叶菜地上部 Cd 浓度与土壤水分的关系很可能呈现与本文生菜不同的规律性，但缺乏相关文献支持。

水分含量影响土壤重金属的形态,但大部分报道为淹水土壤^[13,17-19]。土壤中含有较多的有机质、黏土矿物和氧化物,土壤水分通过影响土壤的氧化还原状态和胶体性质,影响土壤矿物的吸附解吸、铁锰氧化物的沉淀溶解、含硫化合物和碳酸盐的共沉淀、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的配位、DOM的竞争与络合作用等,从而影响重金属在土壤各相中的再分配和生物有效性^[17,20]。随着土壤水分增加,土壤中 Cd^{2+} 的活性降低,重金属有效性的顺序为65% WHC处理>100% WHC处理>淹水处理^[13],本文培养试验土壤的有效态Cd与之类似;但也有报道在淹水条件下Cd的生物有效性会先提高后降低^[18]。本文盆栽试验土壤的乙酸铵提取态与以上文献^[13,18]不一致,可能与可交换态-稳定态之间的转化需要一定时间有关^[19],另一方面,也可能盆栽试验中施肥、生菜根系和微生物干扰而迟滞了稳定态-交换态之间的转化过程。淹水条件下土壤pH升高,从而降低土壤Cd的有效态^[18-19],但是本文盆栽试验中水分处理pH没有显著变化,且土壤重金属形态的变化与pH之间没有相关性。水分处理下重金属有效态只能向较低级的稳定态转化,很难向残渣态转化^[19]。总之,淹水土壤镉形态变化的机制尚未完全弄清楚,其他水分含量土壤Cd形态的变化仍知之甚少^[21]。

郭利敏等^[22]报道显示,土壤Cd有效态变化不一定引起植物Cd浓度的显著差异;CK土壤的DTPA-Cd浓度为 0.198 mg kg^{-1} ,石灰处理的DTPA-Cd浓度与小白菜地上部Cd浓度显著正相关,且只有当石灰处理的DTPA-Cd浓度下降 $\geq 0.045 \text{ mg kg}^{-1}$ 时,才能使小白菜地上部Cd浓度达显著差异,即引起小白菜地上部Cd出现显著差异的DTPA-Cd浓度临界差值为 0.045 mg kg^{-1} 。另一方面,唐明灯等^[23]利用与郭利敏等^[22]同样的土壤进行试验,试验后CK土壤DTPA-Cd浓度最低(0.279 mg kg^{-1}),T2处理土壤DTPA-Cd浓度最高(0.305 mg kg^{-1}),比CK提高了 0.026 mg kg^{-1} ,但T2处理生菜地上部的Cd浓度与CK相比没有显著差异;初步可以判断,引起生菜地上部Cd出现显著差异的DTPA-Cd浓度临界差值一定大于 0.026 mg kg^{-1} 、且很可能达到小白菜所需要的土壤DTPA-Cd浓度临界差值(按比例计算,DTPA-Cd浓度临界差值 $\geq 0.063 \text{ mg kg}^{-1}$)。本文供试土壤与以上文献^[22-23]一致,在盆栽试验中W6土壤的乙酸铵-Cd浓度为 0.094 mg kg^{-1} ,同样按比例计算,如果乙酸铵-Cd浓度提高或下降的差

值小于 $0.0087 \text{ mg kg}^{-1}$ 时,肯定不能使生菜地上部Cd浓度具有显著差异;本文盆栽试验中W2处理乙酸铵-Cd浓度最高,较W6提高 0.003 mg kg^{-1} ,W4处理乙酸铵-Cd浓度最低,较W6下降 0.006 mg kg^{-1} ,可见,W2和W4处理与W6处理的DTPA-Cd浓度差异,均不能使生菜地上部或根Cd浓度显著提高或降低,即本文盆栽试验中生菜Cd浓度的显著差异不是由土壤Cd有效态变化引起的。

水是小分子,主要通过植物根系的水通道蛋白完成吸收^[24];Cd是生物的非必需元素,通过Zn等元素的跨膜蛋白和载体跨越各种生物膜,并在导管和筛管的协助下完成远距离迁移,最终在生物体内形成动态平衡^[25]。土壤水分首先影响生菜Cd浓度,其次土壤水分影响Cd的有效态,但Cd的有效态浓度差值对生菜地上部或根部Cd浓度的显著差异没有显著贡献,加之生菜地上部Cd浓度随根部Cd浓度增加而增加(即正相关或具有同样的归趋规律)。因此,初步可以推测,土壤水分含量对生菜Cd浓度的影响过程发生在生菜的根-土界面,尤其是土壤水分引起生菜根系表皮细胞跨膜载体蛋白的结构偶联过程(即水通道蛋白与Zn等元素跨膜载体蛋白之间的偶联)的变化。但这方面尚未见文献报道,有待通过差异蛋白组学和分子生物学等方法来探索生菜根系跨膜蛋白的变化,进而揭示水分影响生菜Cd吸收的相关机理,并为研究植物吸收其他营养元素的机制提供一定参考。

4 结 论

土壤持水量显著影响生菜的生物量,75% WHC处理生菜地上部鲜重最大,生菜鲜重与土壤持水量呈倒V型关系。土壤持水量显著影响生菜地上部和根中Cd浓度,生菜地上部或根Cd浓度与土壤持水量显著负相关;生菜根Cd浓度大于地上部Cd浓度。盆栽试验中,乙酸铵-Cd浓度与水分处理水平没有显著相关性,生菜地上部Cd浓度与土壤的乙酸铵-Cd形态也没有显著相关性。水分对土壤pH没有显著影响,但培养试验中土壤乙酸铵-Cd浓度与水分处理水平显著负相关。初步推测土壤水分影响生菜地上部Cd浓度,不是通过影响pH和土壤重金属有效态来实现的,有待通过差异蛋白质组学和分子生物学等方法研究生菜根系跨膜蛋白的变化来揭示其机理。因此,可以通过调节土壤水分来控制中轻度重金属污染的设施菜地土壤上叶菜可

食部分的 Cd 浓度,这是一种值得研究的、具有广阔应用前景的绿色调控措施。

参考文献

- [1] 邓绍坡, 骆永明, 宋静, 等. 典型地区多介质环境中多氯联苯、镉致癌风险评估. 土壤学报, 2011, 48(4): 731—742. Deng S P, Luo Y M, Song J, et al. Carcinogenic risk assessment of polychlorinated biphenyls and cadmium in multi-media of a typical area (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 731—742
- [2] Tan W N, Li Z A, Qiu J, et al. Lime and phosphate could reduce cadmium uptake by five vegetables commonly grown in south China. Pedosphere, 2011, 21(2): 223—229
- [3] Peris M, Micó C, Recataló L, et al. Heavy metal contents in horticultural crops of a representative area of the European Mediterranean region. Science of the Total Environment, 2007, 378: 42—48
- [4] Mulligan C N, Galvez-Cloutier R. Bioremediation of metal contamination. Environmental Monitoring and Assessment, 2003, 84: 45—60
- [5] Cunningham S D, Ow D W. Promises and prospects of phytoremediation. Plant Physiology, 1996, 110: 715—719
- [6] 沈振国, 陈怀满. 土壤重金属污染生物修复的研究进展. 农村生态环境, 2000, 16(2): 39—44. Shen Z G, Chen H M. Bioremediation of heavy metal polluted soils (In Chinese). Rural Eco-Environment, 2000, 16(2): 39—44
- [7] Salt D E, Prince R C, Pickering I J. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. Plant Physiology, 1995, 109: 1 427—1 433
- [8] van den Berg G A, Loch J. Decalcification of soils subject to periodic waterlogging. European Journal of Soil Science, 2000, 51(1): 27—33
- [9] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 信息叠加法田间初步筛选镉、铅低富集叶菜. 土壤, 2011, 43(2): 226—231. Tang M D, Ai S Y, Li M J, et al. Preliminary screening for leaf vegetables with lower Cd or Pb contents by using information superposition in fields (In Chinese). Soils, 2011, 43(2): 226—231
- [10] GB 2762—2005. 食品中污染物限量. 北京: 中国标准出版社, 2005. GB 2762—2005. Maximum levels of contaminants in foods (In Chinese). Beijing: China Standard Press, 2005
- [11] GB 18406.1—2001. 农产品安全质量无公害蔬菜安全要求. 北京: 中国标准出版社, 2005. GB 18406.1—2001. Safety qualification for agricultural product—Safety requirements for non-environmental pollution vegetable (In Chinese). Beijing: China Standard Press, 2001
- [12] 崔立强, 吴龙华, 李娜, 等. 水分特征对伴矿景天生长和重金属吸收性的影响. 土壤, 2009, 41(4): 572—576. Cui L Q, Wu L H, Li N, et al. Effects of soil moisture on growth and uptake of heavy metals of *Sedum plumbizincicola* (In Chinese). Soils, 2009, 41(4): 572—576
- [13] 张大庚. 水分和有机物料对土壤重金属镉、锌行为的影响. 沈阳: 沈阳农业大学土地与环境学院, 2006. Zhang D G. Effects of water and organic on soil cadmium and zinc behavior (In Chinese). Shenyang: College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, 2006
- [14] 张丽娜, 宗良纲, 付世景, 等. 水分管理方式对水稻在 Cd 污染土壤上生长及其吸收 Cd 的影响. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 49—52. Zhang L N, Zong L G, Fu S J, et al. Effects of water control on rice growth and its intake of cadmium on Cd contaminated soil (In Chinese). Journal of Safety and Environment, 2006, 6(5): 49—52
- [15] Ye Z H, Wong M H, Baker A J M, et al. Comparison of biomass and metal uptake between two populations of *Phragmites australis* grown in flooded and dry conditions. Annals of Botany, 1998, 82: 83—87
- [16] Angle J C, Baker A J M, Whiting S N, et al. Soil moisture effects on uptake of metals by *Thlaspi*, *Alyssum*, and *Berkheya*. Plant and Soil, 2003, 256: 325—332
- [17] 李义纯, 葛滢. 淹水土壤中镉活性变化及其制约机理. 土壤学报, 2011, 48(4): 480—486. Li Y C, Ge Y. Variation of cadmium activity in flooded soils and its controlling mechanisms (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 480—486
- [18] 陈莉娜, 葛滢, 张春华, 等. 淹水还原作用对红壤镉生物有效性的影响. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2 333—2 337. Chen L N, Ge Y, Zhang C H, et al. Effect of submergence on the bioavailability of Cd in a red soil (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(11): 2 333—2 337
- [19] Zheng S N, Zhang M K. Effect of moisture regime on the redistribution of heavy metals in paddy soil. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(3): 434—443
- [20] 张磊, 孟湘潭. 不同水分条件下镉在土壤中形态转化的动态过程. 安徽农业科学, 2008, 36(17): 7 332—7 334. Zhang L, Meng X P. Dynamic process of the morphological transformation of cadmium in soil under different moisture conditions (In Chinese). Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(17): 7 332—7 334
- [21] 李义纯, 葛滢. 淹水还原条件下土壤铁氧化物对镉活性制约机理的研究进展. 土壤, 2009, 41(2): 160—165. Li Y C, Ge Y. Influence of iron oxides on activity of Cd in soils under reductive conditions: a review (In Chinese). Soils, 2009, 41(2): 160—165
- [22] 郭利敏, 艾绍英, 唐明灯, 等. 不同改良剂对土壤-叶菜系统 Cd 迁移累积的调控作用. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1 520—1 525. Guo L M, Ai S Y, Tang M D, et al. Effect of different amendments on translocation and accumulation of cadmium in the soil-*Brassica chinensis* system (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(8): 1 520—1 525
- [23] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 紫云英对污染土壤上叶菜生长及其镉和铅含量的影响. 中国环境科学, 2011, 31(3): 461—465. Tang M D, Ai S Y, Li M J, et al. Effect of *Astragalus sinicus* on the growth, Cd and Pb concentration of leafy vegetables (In Chinese). China Environmental Sciences, 2011, 31(3):

461—465

[24] Zhao C X, Shao H B, Chu L Y. Aquaporin structure-function relationships: Water flow through plant living cells. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, 62: 163—172

[25] Mendoza-Cózatl D G, Jobe T O, Hauser F, et al. Long-distance transport, vacuolar sequestration, tolerance, and transcriptional responses induced by cadmium and arsenic. *Current Opinion in Plant Biology*, 2011, 14: 554—562

EFFECT OF SOIL MOISTURE ON GROWTH OF AND Cd CONCENTRATION IN *LACTUCA SATIVA*

Tang Mingdeng Ai Shaoying[†] Wang Yanhong Du Ruiying Li Mengjun Yang Shaohai Yu Danni Luo Yingjian
(*Soil and Fertilizer Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences; Guangdong Key Lab of Nutrient Cycling and Farmland Conservation; Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510640, China*)

Abstract A pot experiment and an incubation experiment were conducted to investigate effects of soil moisture content [percentage of water holding capacity (WHC)] on the fresh biomass of and Cd concentration in lettuce (*Lactuca sativa*), soil pH and Cd availability in soil. Results show that soil moisture affected significantly biomass of the plant. In Treatment 75% WHC, The plant was the highest in fresh biomass, and an inverse “V” shaped curve of relationship was observed between fresh biomass and soil moisture. Soil moisture also affected markedly Cd concentration in shoots and roots of lettuce, and what’s more, a significantly negative relationship was found between the former and the latter. When soil moisture was increased from 45% WHC to 65% WHC, Cd concentration in the shoots decreased by 41%, which means that the Cd concentration in the vegetable is lowered from the grade of higher-than-the-hazard-free-standard down to the grade of lower-than-the hazard-free-standard. Cd concentration was significantly higher in roots than in shoots in all the treatments except Treatments 55% WHC and 75% WHC through T test. It was also found in the pot experiment that concentration of NH₄OAc extractable Cd in the soil was insignificantly related with soil moisture and with Cd concentration in shoots of the plant, too. Besides, soil moisture did not have much effect on soil pH, either. But in the incubation experiment, concentration of NH₄OAc extractable Cd in soil was markedly correlated with soil moisture, showing a negative relationship. It is preliminarily assumed that the effect of soil moisture on Cd concentration in shoots is not rendered through its effect on pH and NH₄OAc extractable Cd concentration of the soil. Anyway, it is feasible to control Cd concentration in the edible part of leafy vegetables growing in greenhouses with soils slightly polluted with heavy metals by regulating soil moisture content, which is a green environment-friendly measure that enjoys broad prospect of application.

Key words Water holding capacity; Lettuce; Cadmium; Soil