

土壤铅、镉单一和复合污染及与钙、锌交互作用对韭菜生长和铅镉积累特性的影响

孙建伶^{1,2}, 罗立强^{1,2*}

(1.中国地质大学数理学院, 北京 100083; 2.国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要:通过盆栽试验研究了重金属铅、镉单一和复合污染及其与常量元素钙、微量元素锌的交互作用对韭菜植株生长发育和 Pb、Cd 在其根、叶中迁移富集规律的影响。韭菜中 Pb、Cd 的含量用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测得。结果表明,韭菜对 Pb 或 Cd 的吸收量与土壤单一 Pb 或 Cd 污染程度正相关;Pb/Cd 之间存在复杂的交互作用,低浓度复合时相互促进吸收,高浓度复合时优先吸收 Cd 而抑制韭菜对 Pb 的吸收;锌在高浓度 Pb/Cd 污染时表现出优良的拮抗作用,可有效降低 Pb、Cd 的生物有效性并促进韭菜生长。韭菜根是富集 Pb、Cd 的主要部位,但受代谢方式、迁移率等因素的影响,因而在根、叶中的分布存在差异;根与叶中 Cd 的浓度比为 1.5 左右,Pb 浓度比主要为 2.5~4.5 之间,显示 Cd 更易迁移至韭菜叶组织中。

关键词:土壤;铅镉复合污染;韭菜;生长发育;积累特性

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)06-1100-06 **doi:**10.11654/jaes.2014.06.007

Influences of Single and Combined Pollution of Lead and Cadmium and Their Interactions with Calcium or Zinc on Growth and Accumulation of Lead and Cadmium of Leeks

SUN Jian-ling^{1,2}, LUO Li-qiang^{1,2*}

(1.School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2.National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: Ecological effects of heavy metals are often dependent on the presence of other elements. A pot experiment was undertaken to understand the influences of different concentrations of heavy metals (Pb and Cd) and their combinations with Ca, or Zn in soil on growth and Pb and Cd concentrations in the roots and leaves of leeks. Concentrations of Pb or Cd in leeks were positively correlated with those in soils. Lead and Cd had synergism effects at their low concentrations. At high concentrations, however, Pb promoted Cd absorptions, but Cd inhibited Pb absorption. Zinc showed excellent antagonistic effects on Pb and Cd under severe pollution by reducing the bio-availability of Pb and Cd, and promoting the growth of leeks. Calcium increased Pb concentrations at low Pb and Cd combined soil, while it inhibited the absorption of Pb at high Pb and Cd combination. Calcium had a very weak inhibitory effect on Cd. Both Pb and Cd were mainly accumulated in roots of leeks. The ratios of Cd in roots to leaves were about 1.5, while those of Pb were 2.5~4.5, indicating easier translocation of Cd than Pb in leeks.

Keywords: soils; lead and cadmium combined pollution; leek; growth; accumulation characteristics

蔬菜是人体获取所需微量元素的主要来源之一,生长于重金属污染的土壤中或使用富含重金属的污

水灌溉,都会造成重金属在蔬菜植株中的富集。叶用蔬菜与其他蔬菜相比,重金属更容易富集在其可食用部分^[1],因此更易通过食物链的作用进入人体。调查显示,土壤重金属污染中,Cd 污染最为严重,Pb 次之^[2]。Cd 浓度范围一般为 1~20 mg·kg⁻¹,Pb 一般为 50~300 mg·kg⁻¹。各个国家对农耕土壤中重金属 Cd、Pb 最高允许含量的标准有所不同,我国的食品安全法(GB 2762—2012)规定叶用蔬菜中重金属 Cd、Pb 的含量

收稿日期:2013-10-13

基金项目:中国地质调查局地质调查工作项目(12120113015200);国家自然科学基金青年科学基金项目(41201527)

作者简介:孙建伶(1987—),女,硕士研究生,研究方向为生物地球化学、分析化学。E-mail:sunj10408@126.com

* 通信作者:罗立强 E-mail:luoliqiang@cags.ac.cn

必须分别低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{FW}$ 和 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{FW}$, 两者标准限值不同将对叶用蔬菜中重金属污染以及潜在效应评价造成困难。

自然环境下金属元素多以复合形式存在, 各种复合元素之间存在协同作用、加和作用和拮抗作用等相互作用形式, 都会影响植物对金属元素的吸收和代谢。Carlson 和 Bazzaz^[3]以美洲梧桐为研究对象发现, Pb、Cd 之间表现出协同效应。当土壤中 Pb、Cd 同时存在时, Pb 与 Cd 会竞争吸附土壤颗粒表面的吸附位点, 且在高浓度 Cd 时竞争吸附更强^[4], Pb 存在于土壤中可以增强植株对 Cd 的积累作用^[5-6]。重金属对植物体的影响方式及程度与其种类和浓度有关, 也与植物的种类和土壤类型有着密切的关系^[7-10]。土壤中的常量营养元素在很大程度上能决定其他痕量元素在土壤-植物体系中的行为方式和相互作用强度, 如 Ca、P、Mg 等可以有效拮抗其他痕量元素的吸收^[11]; Roivainen 等^[12]证实土壤中 K、Ca、Mg、Mn、P、S 的含量是影响植物元素吸收的最主要因素, 且多数情况下对其他元素表现为抑制或竞争作用。Zn 作为植物体内许多重要酶类的组分或辅基, 与 Cd 具有相同的核外电子构型, 性质相似, 可以通过竞争来抑制植物对 Cd 的吸收, 减少含 Zn 酶中的 Zn 被 Cd 取代, 从而减弱 Cd 对含 Zn 酶的破坏作用^[13]。McKenna 等^[14]研究表明, 土壤中 Cd 可以提高 Zn 在莴苣嫩叶中的积累量, 低浓度 Zn ($0.0316 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 则对 Cd 在莴苣和菠菜嫩叶中的积累起抑制作用。

矿区前期调研发现, 矿山的大规模开采和金属冶炼给周围生态环境和居民身体健康带来了很大的风险(如矿区农田土壤、作物重金属超标, 儿童血铅超标), 如何有效防止重金属污染以及了解重金属在土壤-植物系统的迁移和富集规律已成为各方关注的焦点。韭菜是矿区居民菜园中常见的叶用蔬菜, 在我国南北方均有广泛种植和食用。本文以韭菜为研究对象, 研究单一 Pb、Cd 和 Pb/Cd 复合污染, 以及与 Ca、Zn 元素的交互作用对韭菜生物量及重金属积累量的影响, 以期获得几种元素间的交互作用规律及 Pb、Cd 在韭菜根、叶中的迁移富集规律, 预测韭菜对重金属的积累能力和食用安全性。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试土壤为采集于北京延庆未受铅镉污染的菜园表层(0~20 cm)土壤, 土样自然风干、磨碎后过 20

表 1 供试土样的基本性质

Table 1 Properties of soil used in the experiment

土壤质地	pH	有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	重金属元素/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	
						Pb	Cd
壤土	7.6	24.70	298.70	1.2	16.58	24.6	0.13

目筛。土壤基本性质见表 1。

供试韭菜为供试土壤采集地菜园内生长旺盛、长势均匀, 未受铅、镉污染的韭菜。

金属试剂为 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 均为分析纯。

1.2 试验设计与实施

盆栽试验在延庆米粮屯村土壤样品采集菜园中进行, Pb 和 Cd 添加浓度根据作物生长土壤 ($\text{Pb } 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cd } 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和非作物生长地 ($\text{Pb } 2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Cd } 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Pb 和 Cd 含量设定^[15], 共设 15 种处理: ① Pb_0Cd_0 , ② $\text{Pb}_{500}\text{Cd}_0$, ③ $\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_0$, ④ Pb_0Cd_5 , ⑤ $\text{Pb}_0\text{Cd}_{20}$, ⑥ $\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5$, ⑦ $\text{Pb}_{500}\text{Cd}_{20}$, ⑧ $\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_5$, ⑨ $\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}$, ⑩ $\text{Pb}_0\text{Cd}_0\text{Zn}_{200}$, ⑪ $\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5\text{Zn}_{200}$, ⑫ $\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}\text{Zn}_{200}$, ⑬ $\text{Pb}_0\text{Cd}_0\text{Ca}_{1000}$, ⑭ $\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5\text{Ca}_{1000}$, ⑮ $\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}\text{Ca}_{1000}$ (表示 Pb 加入量为 $2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cd 加入量为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Ca 加入量为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 依此类推)。盆栽土壤 $1000 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$, Pb、Cd、Ca、Zn 以溶液形式加入, 每个处理重复 3 次。加入重金属溶液后, 充分混合均匀, 置于阴凉通风处, 干湿(50%~70%)循环 3 次, 使添加的金属离子尽可能均匀稳定, 以利于盆栽试验。

韭菜移栽前先剪掉地上部分, 预留 5 cm, 以减少叶面蒸发。将韭菜连根铲出, 用自来水冲洗掉根部土壤, 剪去须根前端, 保留 2~3 cm, 以促进新根发育, 维持根系吸收和叶面蒸发平衡。将韭菜均分为 45 份, 每份 7 棵, 移栽于预先浇水软化的花盆土壤中。充分浇水, 置于阴凉处 3 d 后移至菜园中, 自然生长。定期浇水, 注意避雨。为防止污染菜园土壤, 花盆底部均设有塑料托盘, 并在花盆放置处铺设两层塑料薄膜。韭菜种植 33 d 后取地上部分样品 1 次, 62 d 后全部收获。

1.3 样品处理与分析

清水洗净韭菜, 并用去离子水冲洗 3 次。称量根和叶的鲜重, 其中分别称取两次地上部分作为总叶鲜重。实验室内自然晾干后称量地上部分和地下部分的干重^[16]。韭菜经研磨, $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解, 定容稀释后, 用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定 Cd、Pb 含量。

2 结果与讨论

2.1 Pb、Cd 单一和复合处理对韭菜生长和 Pb、Cd 积累特性的影响

土壤中 Pb 与 Cd 含量对韭菜长势影响情况和韭菜根、叶中 Pb、Cd 的富集情况详见表 2。表 3 为韭菜根、叶中 Pb、Cd 积累量与 Pb/Cd 相关性的方差分析 F 值。由表 2 可见,单一 Pb、Cd 污染时,Pb₅₀₀ 和 Cd₅ 作用下韭菜鲜重分别增加 23.42%和 6.01%,而在 Pb₂₀₀₀ 和 Cd₂₀ 作用下,韭菜鲜重分别减少 31.84%和 0.16%。与对照组相比,低浓度的重金属离子暴露可以促进韭菜的生长,高浓度污染时抑制韭菜的生长。当 Pb₅₀₀ 与不同浓度 Cd 复合污染时,20 mg·kg⁻¹ Cd 对韭菜鲜重的影响小于 5 mg·kg⁻¹;继续增大 Pb 浓度至 2000 mg·kg⁻¹ 时,韭菜鲜重随土壤中 Cd 浓度的增加不降反升,说明高浓度的含 Pb 土壤中添加 Cd 可以起到一定的解毒

表 2 Pb、Cd 单一和复合污染对韭菜叶鲜重和 Pb、Cd 积累量的影响

Table 2 Effects of Pb and Cd alone and in combination on fresh weight of leaves and Pb and Cd contents of leeks

处理条件	根金属含量/mg·kg ⁻¹		叶金属含量/mg·kg ⁻¹		鲜叶重/g
	¹¹¹ Cd	²⁰⁸ Pb	¹¹¹ Cd	²⁰⁸ Pb	
Pb ₀ Cd ₀	0.091	1.858	0.174	2.657	8.04
Pb ₀ Cd ₅	7.209	4.513	4.916	4.214	8.52
Pb ₀ Cd ₂₀	13.54	2.356	8.798	5.057	8.03
Pb ₅₀₀ Cd ₀	0.119	33.08	0.248	10.88	9.92
Pb ₅₀₀ Cd ₅	5.748	32.01	3.967	9.172	7.90
Pb ₅₀₀ Cd ₂₀	22.11	48.69	12.17	15.59	8.24
Pb ₂₀₀₀ Cd ₀	0.364	299.8	0.234	76.03	5.48
Pb ₂₀₀₀ Cd ₅	9.133	424.6	7.401	132.4	6.56
Pb ₂₀₀₀ Cd ₂₀	24.08	297.2	13.73	66.48	7.85

表 3 韭菜根、叶中 Pb、Cd 积累量方差分析 F 值

Table 3 Analysis of variance for concentrations of Cd and Pb in leeks

根、叶中重金属浓度	变异来源		
	Pb	Cd	Pb×Cd
R-Cd	2.487	54.703*	2.793
R-Pb	65.141*	1.011	1.385
L-Cd	28.081*	562.715**	26.157**
L-Pb	15.936	0.829	1.066
L-FW	7.719	0.244	4.678

注: $F_{0.05}(2,2)=19.0$, $F_{0.01}(2,2)=99.0$, $F_{0.05}(4,2)=6.94$, $F_{0.01}(4,2)=18.0$; Pb、Cd 及 Pb×Cd 的自由度分别为 2、2、4, 误差自由度为 2; * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 的显著水平。下表同。

作用,促进韭菜生长,实际表现为生物量的增加。进一步通过方差分析 Pb、Cd 对韭菜鲜重的影响可知,从处理间差异来看,韭菜叶鲜重与 Pb、Cd、Pb/Cd 复合污染处理间的差异均不显著($P>0.05$)。

单一 Cd 及 Pb 与 Cd 复合污染条件下 Cd 在韭菜根、叶中的富集情况表明,随着土壤中 Cd 浓度的增加,韭菜根、叶中的 Cd 含量都增加,均达到显著水平(表 3)。在不添加 Cd 的条件下,土壤中 Pb 含量从 0 增大至 2000 mg·kg⁻¹ 时,韭菜根、叶中吸收的 Cd 含量很低没有显著变化;当土壤中 Cd 添加量为 5 mg·kg⁻¹ 时,韭菜根、叶中 Cd 含量在 Pb 500 mg·kg⁻¹ 复合暴露时分别降低 20.27%和 19.30%,Pb 2000 mg·kg⁻¹ 复合时分别升高 26.69%和 50.54%;继续加大土壤中 Cd 污染量至 20 mg·kg⁻¹,韭菜根、叶中 Cd 的含量随 Pb 含量增加显著提高,由此可见土壤中 Pb 含量增加,能促进韭菜对 Cd 的吸收,且在高 Cd 污染时 Pb 的促进作用更显著。Adriano 等在对美洲梧桐等的研究中也发现了同样的结果^[3-4,17]。方差分析结果显示,韭菜叶中 Cd 含量与土壤 Pb 含量达到显著水平($P<0.05$),与 Pb/Cd 交互作用也达到极显著水平($P<0.01$)。

单一 Pb 及 Pb 与 Cd 复合污染条件下 Pb 在韭菜根、叶中的富集情况表明,单一 Pb 污染下,韭菜根、叶中 Pb 含量随污染程度增加而显著增加。500 mg·kg⁻¹ Pb 条件下,高浓度 Cd(20 mg·kg⁻¹)复合时韭菜根、叶中 Pb 含量有所增加;Pb₂₀₀₀Cd₅ 复合处理下,韭菜根、叶中 Pb 含量增加,说明一定浓度的 Pb、Cd 复合,Cd 对植物吸收 Pb 有促进作用。而 Pb₂₀₀₀Cd₂₀ 与 Pb₂₀₀₀Cd₀ 复合相比,并没有增加韭菜根、叶对 Pb 的吸收,可能是由于此时韭菜对 Cd 的吸收在 9 个处理浓度中达到最大,对 Pb 的吸收起到一定的抑制作用。此处理组韭菜中的 Pb 含量与土壤 Cd 和 Pb/Cd 复合污染均未达到显著水平(表 3)。

整体来看,Pb/Cd 复合污染影响复杂。在一定浓度下,土壤 Pb/Cd 间相互促进对方在韭菜植株中的吸收,韭菜叶中 Cd 含量与 Pb/Cd 复合污染浓度达到极显著水平,存在协同作用,与前人的研究结果类似^[4-6]。其原因可能与土壤中 Pb 和 Cd 发生竞争吸附有关,土壤中 Pb 污染程度的增加减少了土壤对 Cd 的吸附,提高了 Cd 的生物有效性^[18],从而表现为高浓度下 Cd 被优先吸收。

2.2 Ca、Zn 与 Pb/Cd 交互作用对韭菜鲜重和 Cd、Pb 吸收量的影响

表 4 为 Ca、Zn 与 Pb/Cd 交互作用下韭菜的鲜重

表 4 Ca、Zn 与 Pb/Cd 交互作用对韭菜鲜重和
Pb、Cd 积累量的影响

Table 4 Effects of Pb and Cd interactions with Ca or Zn on fresh
weight of leaves and absorption of Pb and Cd of leeks

处理条件	根金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		叶金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		鲜叶重/g
	^{111}Cd	^{208}Pb	^{111}Cd	^{208}Pb	
Pb_0Cd_0	0.091	1.858	0.174	2.657	8.04
$\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5$	5.748	32.01	3.967	9.172	7.90
$\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}$	24.08	297.2	13.73	66.48	7.85
$\text{Pb}_0\text{Cd}_0\text{Zn}_{200}$	0.150	3.802*	0.229	6.440*	7.66
$\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5\text{Zn}_{200}$	3.227*	42.22	2.539	16.25	7.73
$\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}\text{Zn}_{200}$	14.33**	153.4**	10.76	51.75	9.45
$\text{Pb}_0\text{Cd}_0\text{Ca}_{1000}$	0.274*	5.729*	0.177	6.303	7.49
$\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5\text{Ca}_{1000}$	4.883	39.54	3.068	13.33	6.37
$\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}\text{Ca}_{1000}$	23.56	279.8	12.42	70.50	6.39

和 Cd、Pb 的吸收量。在低浓度 $\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5\text{Zn}_{200}$ 复合污染时,韭菜鲜重略有下降,高浓度 $\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}\text{Zn}_{200}$ 复合污染时,韭菜鲜重增加 20.34%;不论在低、高浓度的 Pb、Cd 复合下,Ca $1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 都使韭菜鲜重下降。Zn $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Ca $1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 促进韭菜对土壤中 Pb、Cd 的吸收效果显著。低浓度 $\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5$ 复合污染下,Zn、Ca 的添加可以促进韭菜对 Pb 的吸收,Zn 的促进作用优于 Ca;而在高浓度 $\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}$ 时,Zn、Ca 均可以降低韭菜对 Pb 的吸收,且 Zn 的降低作用更明显,在根中甚至达到显著水平。Pb/Cd 复合污染土壤中添加 Zn 对韭菜吸收 Cd 表现为显著的抑制作用,而 Ca 对韭菜吸收 Cd 影响很小。Zn 在高浓度污染下能有效拮抗 Pb 和 Cd,降低其生物有效性,Ca 对 Pb 的吸收影响是低浓度促进,高浓度抑制,在整个浓度范围内对 Cd 的抑制作用微弱。韭菜鲜重与韭菜重金属含量存在一定的相关性,即低浓度复合污染时,因为 Zn、Ca 存在可以促进 Pb 的吸收,所以韭菜鲜重下降;高浓度复合污染时,Zn 对 Pb、Cd 吸收起到拮抗作用,韭菜鲜重增加。

Ca、Zn 作为土壤中的营养元素,可以有效拮抗其他重金属元素的吸收,改变重金属在植物体内的吸收强度。《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)规定土壤中 Zn 含量应小于 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,故本试验选择 Zn 添加量为 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Ca 是常量元素,在已报道土壤修复试验中,Ca 加入量高达 $4000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,获得了最佳的修复效果,Cd 修复率为 91.36%^[9]。综合考虑其他元素的添加和用量,本试验选择 Ca $1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,为 Zn 浓度的 5 倍。结果表明,Ca 的拮抗作用微弱,Zn

能有效抑制 Pb、Cd 的吸收,促进韭菜生长。

土壤中重金属的归宿由一系列复杂的物理化学反应和生物过程所控制。Cd 和 Zn 是同族元素,有着相似的地球化学和环境特性^[20]。土壤中 Zn 和 Cd 的形态转化主要是粘土矿物对它们的吸附作用,吸附强度相近($K_{\text{Zn}}=0.79, K_{\text{Cd}}=0.72$),当二者共存于土壤溶液时必然会相互竞争吸附位点^[21]。研究证明,向土壤中施 Zn 可抑制植物对 Cd 的吸收,Zn 对 Cd 在植物的吸收过程表现为拮抗作用。如 Zn 可使凤眼莲、烟草、甘蓝、玉米对 Cd 的吸收减弱,说明 Cd、Zn 复合污染中 Zn 对 Cd 的植物吸收产生了抑制作用^[22]。在本试验中,Zn 对 Cd 的吸收表现为低浓度下促进,高浓度下抑制。Zn 的加入量是 Cd 的 40 倍时($\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5\text{Zn}_{200}$),在浓度上处于绝对优势,使得 Zn 在土壤溶液中大量存在,与 Cd 竞争土壤的吸附位点,增加 Cd 在土壤溶液中的含量,所以在轻度 Cd 污染时,韭菜对 Cd 的吸收增加。前人也有研究表明,污染土壤中的 Cd 和 Zn 相互促进对方在作物体内(小麦和玉米)的吸收和积累^[20]。土壤中重金属的解吸率为 $\text{Zn}>\text{Cd}>\text{Pb}$ ^[23],Pb 与吸附位点结合能力最强,Zn 最弱,在复合条件下,可以间接地增加 Zn、Cd 的解吸能力,降低 Pb 的解吸能力。这就使得在 Zn 离子浓度没有明显优势的 $\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}\text{Zn}_{200}$ 复合污染情况下,韭菜优先吸收 Zn 而拮抗 Pb、Cd 的吸收,Pb、Cd 吸收率显著降低,对植株起到保护作用。Pb 降低率为叶 22.16%、根 48.37%;Cd 降低率为叶 21.66%、根 40.50%。此机理也可以解释 Pb/Cd 复合时韭菜优先吸收 Cd 的试验结果。

2.3 Pb、Cd 在韭菜体内的吸收和迁移率比较

表 5 为所有处理条件下韭菜吸收 Pb、Cd 的总量和根与叶 Pb、Cd 浓度的比值。对所有 Cd_5 和 Cd_{20} 处理,韭菜整株 Cd 含量分别在 $3.040\sim 8.603\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $11.88\sim 20.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,大约分别是处理土壤含量($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 61%~172%和 59%~104%;对于 Pb_{500} 和 Pb_{2000} ,韭菜 Pb 含量在 $24.73\sim 36.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $116.8\sim 335.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,大约是相应土壤处理浓度的 4.9%~7.4%和 5.8%~16.8%。由于 Pb 和 Cd 在两种处理浓度下,土壤 Cd 浓度增加 4 倍,韭菜吸收 Cd 含量增加不足 4 倍,而土壤 Pb 浓度增加 4 倍,韭菜 Pb 吸收量远大于 4 倍,说明 Cd 吸收量达到饱和而 Pb 未达饱和。但从吸收量与土壤含量的百分比来看,韭菜对 Cd 的吸收力度远远大于对 Pb 的吸收。作为叶用蔬菜,重金属从地下部分向地上部分迁移率的大小直接影响叶中的含量和毒性大小。虽

表5 各处理韭菜植株中 Pb、Cd 总含量和根/叶浓度比
Table 5 Ratios of Pb and Cd concentrations in roots to leaves and total concentrations of Pb and Cd in leeks

处理条件	根/叶浓度比		总量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	^{111}Cd	^{208}Pb	^{111}Cd	^{208}Pb
Pb_0Cd_0	0.52	0.699	0.119	2.128
$\text{Pb}_{500}\text{Cd}_0$	0.479	3.041	0.168	24.73
$\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_0$	1.55	3.942	0.320	224.4
Pb_0Cd_5	1.466	1.071	6.443	4.413
$\text{Pb}_0\text{Cd}_{20}$	1.539	0.465 9	11.88	3.303
$\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5$	1.449	3.490	5.271	25.89
$\text{Pb}_{500}\text{Cd}_{20}$	1.817	3.124	18.55	36.85
$\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_5$	1.234	3.208	8.603	335.1
$\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}$	1.753	4.471	20.82	224.5
$\text{Pb}_0\text{Cd}_0\text{Zn}_{200}$	0.653	0.590 4	0.171	4.496
$\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5\text{Zn}_{200}$	1.271	2.598	3.040	35.16
$\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}\text{Zn}_{200}$	1.331	2.965	13.04	116.8
$\text{Pb}_0\text{Cd}_0\text{Ca}_{1000}$	1.55	0.908 9	0.240	5.929
$\text{Pb}_{500}\text{Cd}_5\text{Ca}_{1000}$	1.592	2.965	4.265	30.60
$\text{Pb}_{2000}\text{Cd}_{20}\text{Ca}_{1000}$	1.896	3.969	19.61	205.5

然韭菜根部的 Pb 和 Cd 浓度均高于叶部,但 Pb 和 Cd 在根、叶的分布有很大差别。根与叶的 Cd 浓度比一般在 1.5 左右,而 Pb 浓度比则主要为 2.5~4.5 之间。这表明韭菜吸收的 Cd 较易迁移到地上部,而 Pb 的迁移性较弱。此结果与王浩等^[18]的研究结果类似。迁移率的不同,可能与两种金属参与植物耐性和生长代谢方式不同有关,且迁移率大的 Cd,所带来的食用潜在危害更大。

蔬菜中 Pb、Cd 的允许浓度分别是 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{FW}$ 和 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{FW}$, 本研究中韭菜叶的干湿比为 11.22%, 将叶 Cd、叶 Pb 含量按此比例换算成鲜重浓度。Cd $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下叶 Cd 含量为 $0.28\sim 0.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 低度污染下 Cd 含量均已超过蔬菜允许水平, Pb 含量超过 $2.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 就是超标的, 所以只有未添加外源金属的原土壤种植的韭菜可以食用, 增加 Pb、Cd、Zn、Ca 任何一种元素都会增加韭菜对 Pb、Cd 的吸收, 致使韭菜叶 Pb、Cd 含量超过蔬菜标准限值。

3 结论

单一 Pb 或 Cd 污染下, 韭菜对 Pb 或 Cd 的吸收量与土壤污染程度正相关。Pb/Cd 复合污染作用复杂, 不同复合条件下, Pb、Cd 间表现为促进或抑制的作用。韭菜叶中的 Cd 含量与土壤 Pb 和 Pb/Cd 复合含量相关性显著, 存在协同作用。

高浓度污染下 Zn 能有效拮抗 Pb 和 Cd, 降低其生物有效性; Ca 对 Pb 的吸收是低浓度促进, 高浓度抑制, 在两组对照处理浓度下对 Cd 的抑制作用都很微弱。

韭菜根是 Pb、Cd 的主要富集部位, 但 Pb、Cd 的迁移率不同, Cd 更易迁移至韭菜的地上部分。

致谢: 真诚感谢国家地质实验测试中心储彬彬、曾远、袁静、柳检在实验过程中的热情帮助。

参考文献:

- [1] Khodaverdilo H, Dashtaki G S, Rezapour S. Lead and cadmium accumulation potential and toxicity threshold determined for land cress and spinach[J]. *International Journal of Plant Production*, 2011, 5(3):275-281.
- [2] 魏秀国, 何江华, 陈俊坚, 等. 广州市蔬菜地土壤重金属污染状况调查及评价[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(3):252-254.
WEI Xiu-guo, HE Jiang-hua, CHEN Jun-jian, et al. Investigation and evaluation on heavy metal pollution of vegetable farm soils in Guangzhou [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(3):252-254.
- [3] Carlson R W, Bazzaz F. Growth reduction in American sycamore (*Platanus occidentalis* L.) caused by Pb/Cd interaction[J]. *Environmental Pollution*, 1977, 12(4):243-253.
- [4] Adriano D C. Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals[M]. Berlin: Springer, 2001.
- [5] Carlson R W, Rolfe G L. Growth of rye grass and fescue as affected by lead-cadmium-fertilizer interaction[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1979, 8(3):348-352.
- [6] Lai H Y, Chen Z S. The influence of EDTA application on the interactions of cadmium, zinc, and lead and their uptake of rainbow pink (*Dianthus chinensis*) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(3):1710-1718.
- [7] 华 璐, 白铃玉, 韦东普, 等. 土壤镉锌复合污染的植物效应与有机肥的调控作用[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(3):291-296.
HUA Luo, BAI Ling-yu, WEI Dong-pu, et al. Plant effects of Cd and Zn combined pollution and adjustment of organic manure[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(3):291-296.
- [8] 郭观林, 周启星. 土壤-植物系统复合污染研究进展[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(5):823-828.
GUO Guan-lin, ZHOU Qi-xing. Advances of research on combined pollution in soil-plant systems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5):823-828.
- [9] 李博文, 谢建治, 郝晋珉. 不同蔬菜对潮褐土镉铅锌复合污染的吸收效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(3):286-288.
LI Bo-wen, XIE Jian-zhi, HAO Jin-min. Effects of complex contamination of cadmium, lead and zinc on vegetables grown in meadow cinnamon soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3):286-288.
- [10] 李博文, 杨志新, 谢建治. 土壤 Cd, Zn, Pb 复合污染对植物吸收重

- 金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5):908-911.
- LI Bo-wen, YANG Zhi-xin, XIE Jian-zhi. Effects of soil compound contamination with cadmium, zinc and lead on adsorption of the metals by rape[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5):908-911.
- [11] Ehlken S, Kirchner G. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: A review[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, 58(2): 97-112.
- [12] Roivainen P, Makkonen S, Holopainen T, et al. Element interactions and soil properties affecting the soil-to-plant transfer of six elements relevant to radioactive waste in boreal forest[J]. *Radiation and Environmental Biophysics*, 2012:1-10.
- [13] 叶海波, 杨肖娥, 何冰, 等. 东南景天对锌镉复合污染的反应及其对锌镉吸收和积累特性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5):513-518.
- YE Hai-bo, YANG Xiao-e, HE Bing, et al. Response of sedum *Alfredii* towards Cd/Zn complex-pollution and accumulation of the heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5):513-518.
- [14] 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.
- [15] Chen H L, Lai H Y, Wang S M, et al. Effect of biosolids and Cd/Pb interaction on the growth and Cd accumulation of *Brassica rapa* grown in Cd-contaminated soils[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2010, 206(1): 385-394.
- [16] 王晓芳, 罗立强. 铅锌银矿区蔬菜中重金属吸收特征及分布规律[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1):143-148.
- WANG Xiao-fang, LUO Li-qiang. Uptake of heavy metal in vegetables grown in Pb-Zn-Ag mine, Nanjing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1):143-148.
- [17] Council Directive 86/278/EEC. Council directive on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture[J]. *EC Official Journal L*, 1986, 181(4/7):6-12.
- [18] 王浩, 顾国平, 施彩仙, 等. 土壤铅、镉污染对小白菜生长与积累的影响[J]. 浙江农业科学, 2009(2):398-400.
- WANG Hao, GU Guo-ping, SHI Cai-xian, et al. Effects of Pb and Cd pollution in soil on the growth and Pb, Cd accumulation of *Brassica rapa chinensis*[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2009(2): 398-400.
- [19] Hamon R E, McLaughlin M J, Cozens G. Mechanisms of attenuation of metal availability in in situ remediation treatments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(18):3991-3996.
- [20] Nan Z, Zhang J, Cheng G. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 285(1):187-195.
- [21] 朱波, 汪涛, 王艳强, 等. 锌、镉在紫色土中的竞争吸附[J]. 中国环境科学, 2006, 26(B07):73-77.
- ZHU Bo, WANG Tao, WANG Yan-qiang, et al. Competitive sorption-desorption of zinc and cadmium in purple soil[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(B07):73-77.
- [22] 李森林, 王焕, 吴玉树. 凤眼莲中锌对镉的拮抗作用[J]. 环境科学学报, 1990, 10(2):249-254.
- LI Sen-lin, WANG Huan, WU Yu-shu. Antagonistic effects of zinc on cadmium in *Waterhyacinth*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1990, 10(2):249-254.
- [23] 宋菲, 郭玉文, 刘孝义, 等. 土壤中重金属镉锌铅复合污染的研究[J]. 环境科学学报, 1996, 16(4):431-436.
- SONG Fei, GUO Yu-wen, LIU Xiao-yi, et al. Pollution of cadmium, zinc and lead in brown earth[J]. *Science of the Total Environment*, 1996, 16(4):431-436.