

李萍, 李阳, 李柯, 等. 土壤盐分离子对乌鲁木齐小白菜 Pb 含量的影响研究[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 147-154.

LI Ping, LI Yang, LI Ke, et al. Effect of Salt Ions in Soil on Pb Content of Chinese Cabbage (*Brassica campestris* L. ssp.) in Urumqi, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(2): 147-154.

土壤盐分离子对乌鲁木齐小白菜 Pb 含量的影响研究

李萍, 李阳, 李柯, 王文全*, 刘师豆, 吴相南

(新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为研究土壤中盐分离子对小白菜 Pb 含量的影响,采取正交试验 $L_{16} 4^5$ 和盆栽试验方法,分析了 5 种阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Pb^{2+})和 3 种阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^-)对小白菜地上部和根系中 Pb 含量的影响。结果表明,试验条件下小白菜地上部 Pb 含量为 $0.215\sim 0.930 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根系中 Pb 含量为 $1.648\sim 24.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可食用部分超标率达 81.3%。土壤盐分离子对小白菜地上部 Pb 含量影响顺序为: $\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}>\text{Na}^+>\text{Pb}^{2+}>\text{K}^+$ 。根据相关性分析,土壤中 Ca^{2+} 与小白菜地上部 Pb 含量呈显著负相关($r=-0.5403, P<0.05$), Na^+ 和 Pb^{2+} 呈正相关但不显著。 Mg^{2+} 和 K^+ 呈负相关,也不显著。 Cl^- 和 NO_3^- 与小白菜地上部 Pb 含量呈显著负相关($r=-0.540, P<0.05$), SO_4^{2-} 呈正相关,但不显著。对小白菜根系 Pb 含量影响顺序为: $\text{Pb}^{2+}>\text{K}^+>\text{Na}^+>\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}$,土壤中 Pb^{2+} 对小白菜根系 Pb 的含量呈显著正相关($r=0.483, P<0.05$), Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 相关性不显著。乌鲁木齐土壤中固有的盐分离子对小白菜可食用部分 Pb 的吸收没有抑制作用。

关键词:土壤;盐分;小白菜;Pb;影响

中图分类号:Q945.78

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)02-0147-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0209

Effect of Salt Ions in Soil on Pb Content of Chinese Cabbage (*Brassica campestris* L. ssp.) in Urumqi, China

LI Ping, LI Yang, LI Ke, WANG Wen-quan*, LIU Shi-dou, WU Xiang-nan

(College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to study the effect of soil salt ions on Pb content in Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp.), the methods of orthogonal experiment $L_{16} 4^5$ and pot experiment were adopted, and five cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Pb^{2+}) and three anions (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) in the soil on Pb content in the aboveground part and root of Chinese cabbage were analyzed. The results showed that the Pb content was $0.215\sim 0.930 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the aboveground part, $1.648\sim 24.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the root, and 81.3% in the edible part exceeded the limit. The impact of those factors on Pb content in the aboveground part of Chinese cabbage was: $\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}>\text{Na}^+>\text{Pb}^{2+}>\text{K}^+$. According to correlation analysis, Ca^{2+} in soil had a significantly negative correlation with Pb content in the aboveground part of Chinese cabbage ($r=-0.5403, P<0.05$), Na^+ and Pb^{2+} were positively correlated to an insignificant difference; Mg^{2+} and K^+ were negatively correlated but not significant either. Cl^- and NO_3^- in soil had a significantly negative correlation with Pb content in the aboveground part ($r=-0.5403, P<0.05$), and with SO_4^{2-} insignificantly and positively correlated. The impact of those factors on Pb content in the root of Chinese cabbage was: $\text{Pb}^{2+}>\text{K}^+>\text{Na}^+>\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}$; Pb^{2+} in soil had a significantly positive correlation with Pb in the root of Chinese cabbage, while Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- and NO_3^- , showing an insignificantly correlation. The salt ions inherent in the soil in Urumqi caused no inhibition on Pb absorption in the edible part of Chinese cabbage.

Keywords: soil; salt; Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp.); Pb; effect

收稿日期:2017-08-18 录用日期:2018-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(21267022);新疆维吾尔自治区土壤与植物生态过程重点实验室资助项目

作者简介:李萍(1992—),女,甘肃人,硕士研究生,研究方向为环境污染控制与修复。E-mail:949364818@qq.com

*通信作者:王文全 E-mail:wwq6804@163.com

随着经济的迅速发展,含 Pb 的污染物通过多种途径进入土壤,造成土壤污染。有研究表明,固体废物、大气沉降、农业灌溉水污染、化肥和农药的施用等均有可能导致土壤中 Pb 含量的增加^[1]。土壤一旦被 Pb 污染,则难以降解、去除,不仅可使农产品致毒,而且可通过土壤-作物系统进入食物链危害人体健康。随着生活水平的提高,人们对蔬菜的摄入量日益增加,食入 Pb 超标的蔬菜无疑将对人体健康造成极大危害^[2]。王灵等^[3]2006 年通过对乌鲁木齐市蔬菜基地和城乡结合部零散菜地采样测定表明,采集的 6 大类 28 种蔬菜中 Pb 的超标率达 85.3%,蔬菜 Pb 含量平均值为 0.346 mg·kg⁻¹(《食品安全国家标准—食品中污染物限量(GB 2762—2012)》,叶类蔬菜 Pb≤0.3 mg·kg⁻¹),污染指数(测定值/标准值)最大值达到 7.98,蔬菜 Pb 含量严重超标。然而其土壤 Pb 含量在 8.57~48.57 mg·kg⁻¹,平均值 25.41 mg·kg⁻¹,远低于《土壤环境质量标准(GB 15618—1995)》二级标准(300 mg·kg⁻¹,pH6.5~7.5),蔬菜产地土壤 Pb 并未超标。

土壤是蔬菜中 Pb 的重要来源之一^[4]。土壤盐离子对土壤-作物重金属 Pb 含量有一定的影响。刘平等^[5]研究发现,随着 KCl 施加量的增加,赤红壤土壤溶液 Pb 含量显著增加,KCl 用量 360 mg·kg⁻¹ 使土壤溶液 Pb 含量增加 106.9%;此外,随着 K⁺施入量的增加,土壤溶液 Pb 含量也显著增加。匡少平等^[6]试验表明,作物对土壤 Pb 的吸收受土壤中阴离子浓度影响,Cl⁻能促进玉米根系对土壤中 Pb 的强烈吸收,而 NO₃⁻有利于 Pb 在秸秆和籽实中累积。Ca²⁺对土壤重金属生物有效性的影响存在不确定性,高洪波等^[7]研究表明,外源添加 Ca²⁺能够缓解重金属胁迫对植物生长的抑制,增加植物对重金属的积累量,促进其抗氧化酶活性^[7]。Chen 等^[8]的研究表明,在水稻土中添加 CaCO₃ 显著降低了小麦地上部分对 Pb 的积累。当前共存阳离子对于重金属吸附的影响有相关研究^[9],伴随阴离子对土壤 Pb 吸附-解吸的影响也有报道^[10],但土壤多种盐离子综合作用下是否会影响蔬菜对重金属 Pb 的吸收则鲜有报道。

新疆位于我国西部内陆,受干旱气候和封闭内陆

盆地的影响,盐碱土在南北疆呈现面积大、类型多、积盐重、形成复杂的特点。刘蕾^[11]对新疆 5 个地州、9 个县市共计 209 个采样点(包括荒地、农田、草地、灌木林地)Mg²⁺、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻和总盐等监测表明,K⁺、Na⁺、SO₄²⁻、Cl⁻占土壤离子总和的 89.54%。闫金铎等^[12]对乌鲁木齐建成区和郊区城市不同土地利用类型表层土壤全盐量测定表明,郊区未利用地、郊区农用地土壤中 Cl⁻、Na⁺、Ca²⁺和 SO₄²⁻含量较高。在新疆土壤含盐量较高的背景下,研究多种盐离子综合作用下植物对重金属 Pb 的吸收具有重要意义。本文采用 L₁₆ 4⁵ 正交试验,通过设定不同的 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺和 Pb²⁺离子含量水平,研究土壤盐离子对小白菜 Pb 含量的影响,以期为乌鲁木齐市蔬菜的安全生产和 Pb 污染防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验采用盆栽方式,在新疆农业大学农科楼实验室进行。

供试土壤购自新疆乌鲁木齐市沙依巴克区明珠花卉市场,土壤理化性质见表 1。供试小白菜(*Brassica campestris* L. ssp.)品种为山东青州新世纪种苗有限公司生产的“正旺达 58 号”。2016 年 11 月 9 日种植小白菜,2017 年 1 月 9 日收获。

采用透明塑料布搭建温室大棚防止降尘落入。试验用盆钵为塑料花盆,内径 15 cm,高 12 cm。灌溉用水采用蒸馏水,以避免通过灌溉水向土壤引入重金属。供试土壤采用外源添加盐分离子的方式,首先每个处理组称取 3 kg 土样,按照表 2 的配比及含量要求称取相应的试剂充分溶于蒸馏水中;将溶解后的溶液均匀倒入土样中,并搅拌,每日定时搅拌 30 min,平衡一周,使盐分均匀分布在土壤中;然后将每个处理组的土样三等分,每个盆钵装土 1 kg 并加入适量的蒸馏水再平衡 12 h 后种植小白菜。每盆中撒入 20 粒小白菜种子,每 3 日用蒸馏水浇灌 1 次,每次浇水量为 100 mL。每周间苗 1 次,最后每盆留苗 3 株,定期调换盆钵的位置,均匀接受自然光照,定时记录小白

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

项目	NO ₃ ⁻ /g·kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻ /g·kg ⁻¹	HCO ₃ ⁻ /g·kg ⁻¹	Cl ⁻ /g·kg ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /g·kg ⁻¹	Ca ²⁺ /g·kg ⁻¹	Mg ²⁺ /g·kg ⁻¹	K ⁺ +Na ⁺ /g·kg ⁻¹	CEC/cmole·kg ⁻¹
数值	0.271	0.012	0.02	0.016	0.493	0.267	0.039	0.017	10.51
项目	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	电导率/mS·cm ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	pH
数值	1.36	1.42	20.22	42.35	88.09	159.42	6.41	10.434	7.50

菜的生长状况。

1.2 试验处理设计

采用 $L_{16} 4^5$ (5 个因素, 4 个水平, 共 16 种处理) 正交试验, 设置 5 个因素 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 和 Pb^{2+})、4 种水平 (空白、低、中、高), 共 16 个处理, 每个处理重复 3 次。根据乌鲁木齐市本地土壤盐分含量, 并参考相关文献^[9-10], 制定了 4 个水平阳离子的因素水平表 (不包括土壤固有离子含量), 如表 2 所示。土壤盐分离子水平, 采用外源添加无水 CaCl_2 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 K_2SO_4 、无水 Na_2SO_4 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 的方式实现, 保证添加离子后的土壤离子含量达到设计离子含量水平。

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素				
	A $\text{Ca}^{2+}/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	B $\text{Mg}^{2+}/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	C $\text{K}^+/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	D $\text{Na}^+/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	E $\text{Pb}^{2+}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
1	0	0	0	0	0
2	0.1	0.02	0.005	0.1	5
3	1	0.2	0.05	1	50
4	5	2	0.5	5	300

注: 表中数值均为外源添加的浓度。水平 1 为“不添加”; 水平 2 为“低水平”; 水平 3 代表“中水平”; 水平 4 为“高水平”。

1.3 测定项目与方法

将小白菜收获后用自来水冲洗干净后再用去离子水清洗, 并分为地上部和根系。小白菜地上部和根系采用硝酸-高氯酸消解^[13], 消解所用仪器为 LWY-84B 控温式远红外消煮炉 (四平电子技术研究所)。小白菜和土壤中 Pb 含量分析测定采用 TAS-990 石墨炉原子吸收光谱仪 (北京普析通用仪器有限责任公司); 土样的基本理化指标均采用常规法测定^[14]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel、正交设计助手 3.1、SPSS Statistics 19.0 进行统计分析; 采用 Origin7.5 版绘图, 数据用平均值±标准差 (Mean±SD) 来表示。

2 结果与分析

2.1 小白菜中 Pb 含量分析

小白菜中 Pb 含量测定结果见表 3。各处理地上部 Pb 含量在 $0.215 \sim 0.930 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 根系 Pb 含量 $1.648 \sim 24.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 根系 Pb 含量均高于地上部分。依据《食品安全国家标准—食品中污染物限量 (GB 2762—2012)》, 叶类蔬菜 Pb 含量限值为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 本试验小白菜地上部分 Pb 含量中除处理 10、14、16 外均超标, 超标率达 81.3%。处理 1 为未添加任何离子的土壤, 小白菜地上部 Pb 含量也是超标的。

表 3 小白菜地上部分和根系 Pb 含量

Table 3 Pb content in aboveground part and root of Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp.)

处理	$\text{Ca}^{2+}/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{Mg}^{2+}/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{K}^+/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{Na}^+/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{Pb}^{2+}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Pb^{2+} 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	
						地上部	根系
1	1	1	1	1	1	0.569±0.074	6.608±5.405
2	1	2	2	2	2	0.666±0.067	14.890±0.803
3	1	3	3	3	3	0.386±0.056	6.831±2.356
4	1	4	4	4	4	0.840±0.130	15.648±11.457
5	2	1	2	3	4	0.902±0.072	24.330±3.783
6	2	2	1	4	3	0.723±0.181	6.239±1.711
7	2	3	4	1	2	0.467±0.056	7.548±0.557
8	2	4	3	2	1	0.504±0.001	4.738±0.278
9	3	1	3	4	2	0.930±0.469	2.675±0.867
10	3	2	4	3	1	0.215±0.093	5.092±2.011
11	3	3	1	2	4	0.589±0.065	16.523±3.804
12	3	4	2	1	3	0.447±0.071	3.588±1.156
13	4	1	4	2	3	0.483±0.031	1.648±0.161
14	4	2	3	1	4	0.292±0.122	6.407±1.324
15	4	3	2	4	1	0.317±0.081	14.003±4.784
16	4	4	1	3	2	0.279±0.080	19.910±2.227

注: 水平 1 为“不添加”; 水平 2 为“低水平”; 水平 3 为“中水平”; 水平 4 为“高水平”。

2.2 土壤盐分离子对小白菜 Pb 含量的影响

2.2.1 土壤阳离子对小白菜 Pb 含量的影响

对小白菜地上部、根系 Pb 含量数据运用正交设计助手进行极差分析,结果见表 4。根据 R 值可以看出对小白菜中地上部 Pb 含量影响顺序为: $A(Ca^{2+}) > B(Mg^{2+}) > D(Na^+) > E(Pb^{2+}) > C(K^+)$, Ca^{2+} 对小白菜地上部分 Pb 含量的影响最大。根据均值水平 K 可以看出,小白菜地上部分 Pb 含量达最高水平的组合为: $A2B1C2D4E4$, 即外源添加 $Ca^{2+}(0.1 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Mg^{2+}(0)$ 、 $K^+(0.005 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Na^+(5 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Pb^{2+}(300 mg \cdot kg^{-1})$, 由于起作用的不仅仅是外源添加离子,也包括土壤固有离子,因此基于外源添加与土壤固有离子总和,促使小白菜地上部 Pb 含量达最高水平组合的实际离子浓度为 $Ca^{2+}(0.367 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Mg^{2+}(0.039 g \cdot kg^{-1})$ 、 $K^+(0.007 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Na^+(5.015 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Pb^{2+}(310.43 mg \cdot kg^{-1})$; 小白菜地上部分 Pb 含量最低的水平组合为: $A4B3C4D1E1$, 即外源添加 $Ca^{2+}(5 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Mg^{2+}(0.2 g \cdot kg^{-1})$ 、 $K^+(0.5 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Na^+(0)$ 、 $Pb^{2+}(0)$, 实际离子浓度为 $Ca^{2+}(5.267 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Mg^{2+}(0.239 g \cdot kg^{-1})$ 、 $K^+(0.502 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Na^+(0.015 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Pb^{2+}(10.434 mg \cdot kg^{-1})$ 。

根据 R 值可以看出对小白菜根系 Pb 含量影响顺序为: $E(Pb^{2+}) > C(K^+) > D(Na^+) > A(Ca^{2+}) > B(Mg^{2+})$, Pb^{2+} 对小白菜根系 Pb 含量影响最大。根据均值水平 K 得出,小白菜根系 Pb 含量达最高水平的组合为: $A1B3C2D3E4$, 即外源添加 $Ca^{2+}(0)$ 、 $Mg^{2+}(0.2 g \cdot kg^{-1})$ 、 $K^+(0.005 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Na^+(1 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Pb^{2+}(300 mg \cdot kg^{-1})$, 实

际离子浓度为 $Ca^{2+}(0.267 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Mg^{2+}(0.239 g \cdot kg^{-1})$ 、 $K^+(0.007 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Na^+(1.015 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Pb^{2+}(310.434 mg \cdot kg^{-1})$; 小白菜根系 Pb 含量最低的水平组合为: $A3B2C3D1E3$, 即外源添加 $Ca^{2+}(1 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Mg^{2+}(0.02 g \cdot kg^{-1})$ 、 $K^+(0.05 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Na^+(0)$ 、 $Pb^{2+}(50 mg \cdot kg^{-1})$, 实际离子浓度为 $Ca^{2+}(1.267 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Mg^{2+}(0.059 g \cdot kg^{-1})$ 、 $K^+(0.052 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Na^+(0.015 g \cdot kg^{-1})$ 、 $Pb^{2+}(60.434 mg \cdot kg^{-1})$ 。

阳离子对小白菜 Pb 含量影响的方差分析结果见表 5。由 F 检验可以看出对小白菜地上部 Pb 含量影响顺序为: $A(Ca^{2+}) > B(Mg^{2+}) > D(Na^+) > E(Pb^{2+}) > C(K^+)$, 土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Pb^{2+} 对小白菜地上部 Pb 含量的影响达到了极显著水平,而 K^+ 的影响不显著;对小白菜根系 Pb 含量影响顺序为: $E(Pb^{2+}) > C(K^+) > D(Na^+) > A(Ca^{2+}) > B(Mg^{2+})$, Pb^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 对小白菜根系 Pb 含量的影响达到了极显著水平,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 影响不显著,和极差分析结果一致。

2.2.2 土壤阳离子各因素对小白菜 Pb 含量的影响分析

以阳离子含量水平为横坐标、 K 值为纵坐标绘制小白菜地上部、根系 Pb 含量趋势图,见图 1。土壤中阳离子对小白菜中 Pb 含量的线性关系见表 6。由图 1 及表 6 可知,土壤 Ca^{2+} 含量与小白菜地上部 Pb 含量呈显著负相关,即土壤中 Ca^{2+} 浓度的增加抑制小白菜地上部 Pb 含量;土壤中 Na^+ 和 Pb^{2+} 与小白菜地上部 Pb 含量呈正相关,但不显著;土壤中 Mg^{2+} 和 K^+ 与小白菜地上部 Pb 含量呈负相关,不显著。

土壤中 Pb^{2+} 与小白菜根系 Pb 含量呈显著正相

表 4 阳离子对小白菜 Pb 含量影响的极差分析表

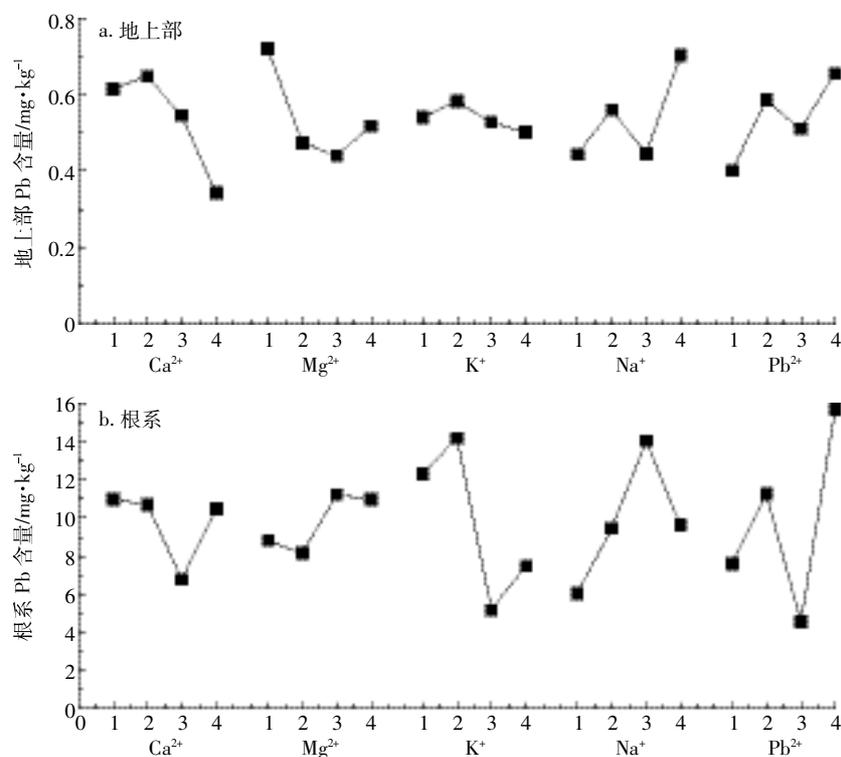
Table 4 Range analysis of cation effect on Pb content in Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp.)

蔬菜样品	参数	A: Ca^{2+}	B: Mg^{2+}	C: K^+	D: Na^+	E: Pb^{2+}
地上部	K1	0.615	0.721	0.540	0.444	0.401
	K2	0.649	0.474	0.583	0.560	0.586
	K3	0.545	0.440	0.528	0.446	0.510
	K4	0.343	0.517	0.501	0.703	0.656
	R	0.306	0.281	0.082	0.259	0.255
主次顺序 $A(Ca^{2+}) > B(Mg^{2+}) > D(Na^+) > E(Pb^{2+}) > C(K^+)$ 最高水平 A2B1C2D4E4 最低水平 A4B3C4D1E1						
根系	K1	10.994	8.815	12.320	6.038	7.610
	K2	10.714	8.157	14.203	9.450	11.256
	K3	6.790	11.226	5.163	14.041	4.577
	K4	10.492	10.971	7.484	9.641	15.727
	R	4.024	3.069	9.040	8.003	11.150
主次顺序 $E(Pb^{2+}) > C(K^+) > D(Na^+) > A(Ca^{2+}) > B(Mg^{2+})$ 最高水平 A1B3C2D3E4 最低水平 A3B2C3D1E3						

表 5 阳离子对小白菜 Pb 含量影响的方差分析表

Table 5 Variance analysis of cation effect on Pb content in Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp.)

蔬菜样品	方差来源	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F	Sig.
地上部	A(Ca ²⁺)	0.677	3	0.226	10.70	<0.01**
	B(Mg ²⁺)	0.572	3	0.191	9.040	<0.01**
	C(K ⁺)	0.042	3	0.014	0.658	0.584
	D(Na ⁺)	0.540	3	0.180	8.534	<0.01**
	E(Pb ²⁺)	0.428	3	0.143	6.764	<0.01**
	误差	0.675	32	0.021	—	—
根系	A(Ca ²⁺)	111.434	3	37.145	2.885	0.051
	B(Mg ²⁺)	110.967	3	36.989	2.872	0.052
	C(K ⁺)	586.013	3	195.338	15.170	<0.01**
	D(Na ⁺)	470.768	3	156.923	12.186	<0.01**
	E(Pb ²⁺)	883.123	3	294.374	22.860	<0.01**
	误差	412.064	32	12.877	—	—



图中横坐标 1 为“不添加”; 2 为“低水平”; 3 为“中水平”; 4 为“高水平”

图 1 土壤中阳离子对小白菜中 Pb 含量的影响

Figure 1 Effect of soil cations on Pb content in Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp.)

关, 即土壤中 Pb²⁺浓度增加会促进小白菜根系 Pb 含量的增加; Ca²⁺、Mg²⁺和 Na⁺与小白菜根系 Pb 含量呈正相关, 但不显著; K⁺与小白菜根系 Pb 含量呈负相关, 不显著。

2.2.3 土壤阴离子对小白菜中 Pb 含量的影响分析

无水 CaCl₂、Ca(NO₃)₂·4H₂O、MgSO₄·7H₂O 等化合

物在带入阳离子的同时, 也带入了相应的阴离子。根据表 2 制定的阳离子的浓度梯度值, 计算出带入的阴离子 Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻的浓度梯度值, 土壤中阴离子对小白菜地上部和根系 Pb 含量的线性关系见表 7。从表 7 看出, Cl⁻和 NO₃⁻与小白菜地上部 Pb 含量均呈显著负相关, SO₄²⁻呈正相关, 但不显著。土壤中 3 种阴离子与

表 6 土壤中阳离子对小白菜中 Pb 含量的线性关系

Table 6 Linear relationship between cations in soil and Pb content in Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp.)

离子	地上部		根系	
	r 值	P 值	r 值	P 值
Ca ²⁺	-0.540 3*	0.015	0.037	0.445
Mg ²⁺	-0.085	0.377	0.137	0.306
K ⁺	-0.103	0.352	-0.222	0.205
Na ⁺	0.413	0.056	0.087	0.375
Pb ²⁺	0.318	0.115	0.483*	0.029

注:* 表示两个变量在 P<0.05 水平上显著相关。下同。

表 7 土壤中阴离子对小白菜中 Pb 含量的线性关系

Table 7 Linear relationship between anions in soil and Pb content in Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp.)

离子	地上部		根系	
	r 值	P 值	r 值	P 值
Cl ⁻	-0.540*	0.015	0.037	0.445
SO ₄ ²⁻	0.267	0.159	0.142	0.30
NO ₃ ⁻	-0.540*	0.015	0.037	0.445

小白菜根系 Pb 含量均呈不显著的正相关。

3 讨论

盐分离子与重金属同时存在于土壤中,影响着土壤中的植物对重金属的吸收^[5-16]。在本研究中,促使小白菜地上部 Pb 含量达最高水平的组合为 A2B1C2D4E4,即在土壤中低浓度外源添加 Ca²⁺(0.1 g·kg⁻¹)、Mg²⁺(0)、K⁺(0.005 g·kg⁻¹)、高浓度外源添加 Na⁺(5 g·kg⁻¹)和 Pb²⁺(300 mg·kg⁻¹),可使小白菜食用部分 Pb 含量达到最大。

研究表明,土壤中 Ca²⁺对小白菜地上部 Pb 含量的影响最大,表现为显著负相关($r=-0.540 3, P<0.05$),这与周华^[17]、高洪波等^[7]的试验结果相似。一般认为, Ca²⁺通过与重金属离子竞争植物根系吸收位点来降低根系对重金属的吸收,减缓了重金属对植物的毒害作用^[18]。但也有研究表明, Ca²⁺的加入反而显著增强了苋菜对 Pb 的吸收,这可能是由于重金属通过共质体进入质外体,这个过程是依赖 Ca²⁺的, Ca²⁺的增加会增强植物对重金属的吸收^[19]。本试验中不添加或低浓度添加 Ca²⁺后土壤 Ca²⁺的浓度为 0.267~0.367 g·kg⁻¹,这与闫金铎等^[12]对乌鲁木齐市建成区与郊区农用地表层土壤中 Ca²⁺浓度均值的测定结果 0.324、0.316 g·kg⁻¹ 非常接近,由此可见,乌鲁木齐市表层土壤中固有的 Ca²⁺对小白菜可食用部分 Pb 的吸收没有

抑制作用。

Mg²⁺对小白菜中地上部 Pb 含量的影响次之,表现为负相关,但不显著($r=-0.085, P>0.05$)。不添加及低浓度添加 Mg²⁺后土壤中 Mg²⁺浓度为 0.039 4~0.059 4 g·kg⁻¹,与闫金铎等^[12]对乌鲁木齐市建成区与郊区农用地表层土壤中 Mg²⁺浓度均值的测定结果 0.052、0.058 g·kg⁻¹ 非常接近,即乌鲁木齐市的表层土壤中固有的 Mg²⁺不能抑制小白菜可食用部分对 Pb 的吸收。而土壤中 Na⁺对小白菜地上部分 Pb 含量的影响较小,一般认为 Na⁺对重金属离子的吸收竞争作用较弱^[20]; K⁺、Pb²⁺影响最小。

不同盐分离子对植物吸收累积重金属的影响是不同的, Na⁺、Ca²⁺、K⁺和 Mg²⁺等阳离子主要通过与重金属竞争植物根系的吸收位点等方式来影响植物对重金属的吸收累积^[21],而 Cl⁻、NO₃⁻和 SO₄²⁻等阴离子主要通过络合作用来影响植物对重金属的吸收和转运^[22]。本试验土壤 NO₃⁻对小白菜地上部 Pb 含量的影响表现为显著负相关($r=-0.540, P<0.05$)。有研究表明,外源的 NO₃⁻进入土壤后被植物根系吸收,释放出 OH⁻,造成根际 pH 升高,影响了根际土壤中重金属的有效性,进而影响植物对重金属的吸收^[23]。匡少平^[6]的研究表明, Cl⁻能明显促进玉米地上部分的秸秆和籽实对土壤 Pb 的吸收。本试验土壤 Cl⁻对小白菜地上部 Pb 含量的影响表现为显著负相关($r=-0.540, P<0.05$),即 Cl⁻对小白菜可食用部分吸收 Pb 含量表现为抑制作用。这可能是因为引入 Pb(NO₃)₂ 为可溶态, Cl⁻通过络合作用,降低了小白菜可食用部分对 Pb 的吸收^[24]。而本试验不添加和低浓度添加 Cl⁻(土壤中 Cl⁻为 0.002~0.09 g·kg⁻¹)略低于闫金铎等^[12]试验中的 Cl⁻(0.159 g·kg⁻¹ 及 0.170 g·kg⁻¹),表明土壤中固有的 Cl⁻对小白菜地上部分 Pb 的吸收没有抑制作用。土壤中不添加外源离子的处理 1,小白菜地上部 Pb 含量也超标,是因为土壤本身含有相应的离子,这说明了土壤固有的盐分离子对小白菜可食用部分吸收 Pb 没有抑制作用,可能有一定的促进作用。

本研究中,土壤 Pb 含量对小白菜根系 Pb 的含量影响最大。汪霖^[25]针对八仙花的研究表明, Pb 积累在根系较多,八仙花的生长受到明显影响,这与本试验研究结果是相似的。植物根的生长通常比其他器官更易受到毒害作用,这与根作为植物从污染土壤中摄取 Pb 的最初部位有关。

乌鲁木齐市蔬菜的 Pb 超标现象比较严重,而乌鲁木齐市土壤中固有的盐分离子浓度及配比,不仅没

有抑制反而可能促进了小白菜可食用部分对 Pb 的吸收,这可能是造成乌鲁木齐市蔬菜 Pb 污染的原因之一。土壤中盐分离子种类比较复杂和多样,它们之间协同或拮抗作用对植物吸收重金属的影响还有待进一步研究。此外,本试验用土购自乌鲁木齐市明珠花卉市场,该土样为市郊南山的森林土,土壤的有机质含量丰富,是否会促进蔬菜对土壤中 Pb 的吸收,也有待于进一步的研究。

4 结论

(1)土壤盐分离子对小白菜地上部 Pb 含量影响顺序为: $\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}>\text{Na}^{+}>\text{Pb}^{2+}>\text{K}^{+}$,土壤中 Ca^{2+} 对小白菜地上部 Pb 含量的影响最大,表现为显著负相关($r=-0.5403, P<0.05$),即土壤中较高的 Ca^{2+} 浓度能抑制小白菜地上部(可食用部分)对 Pb 的吸收。

(2)对小白菜根系 Pb 含量影响顺序为: $\text{Pb}^{2+}>\text{K}^{+}>\text{Na}^{+}>\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}$,土壤中 Pb^{2+} 的浓度对小白菜根系 Pb 的含量影响最大,呈显著正相关($r=0.483, P<0.05$)。即土壤中 Pb^{2+} 浓度增加会促进小白菜根系 Pb 含量的增加。

(3)土壤 Cl^{-} 和 NO_3^{-} 对小白菜地上部 Pb 含量具有显著影响,表现为负相关($r=-0.540, P<0.05$),即 Cl^{-} 和 NO_3^{-} 浓度的增加会抑制小白菜可食用部分对 Pb 的吸收。

(4)乌鲁木齐市土壤固有盐分离子浓度及比例,对小白菜可食用部分吸收 Pb 没有抑制作用。

参考文献:

- [1] Kelepertzis E. Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterranean: Insights from Argolida basin, Peloponnese, Greece [J]. *Geoderma*, 2014, 221, 82–90.
- [2] 杨 菲, 吴 琦, 季 辉, 等. 土壤重金属 Pb 和 Cd 在小白菜中的富集特征及产地环境安全临界值[J]. *中国农学通报*, 2011(13): 194–198.
YANG Fei, WU Qi, JI Hui, et al. Soil Pb and Cd accumulation characteristics of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) and their environmental critical values in pakchoi production area for food security[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011(13): 194–198. (in Chinese)
- [3] 王 灵, 朱建雯, 钱 翌, 等. 乌鲁木齐市菜地土壤和蔬菜铅含量及风险评价[J]. *新疆农业大学学报*, 2008, 31(1): 46–50.
WANG Ling, ZHU Jian-wen, QIAN Yi, et al. Lead content in vegetable and soil of vegetable plot in Urumqi City and its risk evaluation[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2008, 31(1): 46–50. (in Chinese)
- [4] 倪玮怡. 上海市郊土壤-蔬菜系统中重金属来源及贡献研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
NI Wei-yi. The sources and contribution research of heavy metals in soil vegetable system at suburban areas in Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016. (in Chinese)
- [5] 刘 平, 徐明岗, 申华平, 等. 不同钾肥对赤红壤和水稻土中铅有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 139–144.
LIU Ping, XU Ming-gang, SHEN Hua-ping, et al. Effects of different potassium fertilizers on phytoavailability of Pb in red later soil and paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 139–144. (in Chinese)
- [6] 匡少平. 玉米对 Pb 的吸收及阴离子影响效应[J]. *青岛化工学报*, 2003, 23(3): 222–224.
KUANG Shao-ping. Effect of anion in soils on corns lead absorption[J]. *Journal of Qingdao Institute of Chemical Technology*, 2003, 23(3): 222–224. (in Chinese)
- [7] 高洪波, 郭世荣, 刘艳红, 等. 低氧胁迫下 Ca^{2+} , La^{3+} 和 EGTA 对网纹甜瓜幼苗活性氧代谢的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2005, 28(2): 17–21.
GAO Hong-bo, GUO Shi-rong, LIU Yan-hong, et al. Effect of Ca^{2+} , La^{3+} and EGTA on reactive oxygen species metabolism in muskmelon seedlings under hypoxia stress[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2005, 28(2): 17–21. (in Chinese)
- [8] Chen Z S, Lee G J, Liu J C. The effects of chemical remediation treatments on the extractability and speciation cadmium and lead in contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 235–242.
- [9] 徐明岗, 李菊梅, 陈世宝. 共存阳离子对土壤吸附 Cu^{2+} 的影响特征[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5): 935–938.
XU Ming-gang, LI Ju-mei, CHEN Shi-bao. Adsorption of Cu^{2+} by soils under different co-existing cations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5): 935–938. (in Chinese)
- [10] 刘 平, 徐明岗, 宋正国. 伴随阴离子对土壤中铅和镉吸附-解吸的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007(1): 252–256.
LIU Ping, XU Ming-gang, SONG Zheng-guo. Effects of accompanying anions on adsorption-desorption of Pb and Cd by two typical soils of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007(1): 252–256. (in Chinese)
- [11] 刘 蕾. 新疆土壤盐分的组成和分布特征[J]. *干旱环境监测*, 2009, 23(4): 227–229.
LIU Lei. Constituent and distributing character of salinity in soil in Xinjiang[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2009, 23(4): 227–229. (in Chinese)
- [12] 闫金铎, 陈学刚, 李江宏. 乌鲁木齐城市表层土壤盐分特征分析[J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2015, 16(5): 671–676.
YAN Jin-duo, CHEN Xue-gang, LI Jiang-hong. Analysis on salinity characteristics of topsoil in Urumqi[J]. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 2015, 16(5): 671–676. (in Chinese)
- [13] 王吉秀, 祖艳群, 陈海燕, 等. 中药材圆果中重金属检测的消解方法研究[J]. *云南农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 26(6): 856–860.
WANG Ji-xiu, ZU Yan-qun, CHEN Hai-yan, et al. Determination of heavy metal contents in Chinese medicinal materials by different pre-treatment methods[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2011, 26(6): 856–860. (in Chinese)

- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:65-100.
LU Ru-kun. Soil argrochemistry analysis protocols[M]. Beijing: China Agriculture Science Press, 2000:65-100. (in Chinese)
- [15] Sayyad G, Afyuni M, Mousavi S F, et al. Transport of Cd, Cu, Pb and Zn in a calcareous soil under wheat and safflower cultivation: A column study[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3):311-320.
- [16] Fritioff A, Kautsky L, Greger M. Influence of temperature and salinity on heavy metal uptake by submersed plants [J]. *Environmental Pollution*, 2005, 133(2):265-274.
- [17] 周 华. 不同改良剂对 Cd、Pb 污染土壤改良效果的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003:40-41.
ZHOU Hua, Effects of different modifiers on plant growth and Pb-Cd-contaminated soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2003: 40-41. (in Chinese)
- [18] 丁凌云, 蓝崇钰, 林建平, 等. 不同改良剂对重金属污染农田水稻产量和重金属吸收的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(6):1204-1208.
DING Ling-yun, LAN Chong-yu, LIN Jian-ping, et al. Effects of different modifiers on rice yield and heavy metal absorption of heavy metal contaminated farmland[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6): 1204-1208. (in Chinese)
- [19] Seregin I V, Kozhevnikova A D. Enhancement of nickel and lead accumulation and their toxic growth-inhibitory effects on amaranth seedlings in the presence of calcium[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2009, 5(1):92-96.
- [20] Helal H M, Haque S A, Ramadan A B, et al. Salinity-heavy metal interactions as evaluated by soil extraction and plant analysis[J]. *Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27(6):1355-1361.(in Chinese)
- [21] 张乾坤, 刘亚男, 李取生, 等. 多种盐分离子作用下苋菜对重金属的吸收累积特征[J]. 生态与农村环境学报, 2012(1):61-66.
ZHANG Qian-kun, LIU Ya-nan, LI Qu-sheng, et al. Absorption and accumulation of heavy metals in amaranth under stress of multiple salt ions[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012(1):61-66. (in Chinese)
- [22] Scheffer F, Schachtschabel P. Lehrbuch der Bodenkunde[J]. *Anzeiger für Sch dlingskunde*, 2002, 44(3):46.
- [23] 楼玉兰. 不同形态氮肥对土壤中重金属化学行为变化及植物吸收的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2004:2-55.
LOU Yu-lan. Effects of nitrogen forms on the chemical behavior of heavy metals in the soils amended with sewage sludge and uptake by plant[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004:2-55. (in Chinese)
- [24] 王碧玲, 谢正苗, 李 静, 等. 氯和磷对土壤中水溶-可交换态铅的影响[J]. 环境科学, 2008(6):1724-1728.
WANG Bi-ling, XIE Zheng-miao, LI Jing, et al. Effect of chlorine and phosphorus on water soluble and exchangeable lead in a soil contaminated by lead and zinc mining tailings[J]. *Environmental Science*, 2008(6):1724-1728. (in Chinese)
- [25] 汪 霖. 铅与 NaCl 胁迫对八仙花抗性生理的影响[D]. 南昌:江西财经大学, 2009, 12: 54-55.
WANG Lin. Effects of lead and NaCl stress on physiological response of hydrangea macrophylla[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2009, 12: 54-55. (in Chinese)