

兰州土壤-蔬菜系统铅污染特征及全钾速效钾与 pH 对其富集特性影响

罗永清¹, 陈银萍¹, 陶 玲¹, 李玉强²

(1.兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘 要:通过野外调查取样与实验测定相结合的方法,对兰州市农业生态系统土壤-蔬菜体系 49 个样点进行研究,分析探讨了研究区蔬菜与土壤的铅污染水平以及蔬菜铅富集效应特性。结果表明:①蔬菜种植地土壤铅平均含量为 $26.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,合格率为 93.62%,在不同县区存在显著差异,其大小顺序为红古区>榆中县>永登县;②蔬菜铅平均含量为 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,合格率为 60.78%,在不同县区存在显著差异,其大小顺序为永登县>榆中县>红古区;③蔬菜铅富集系数为 $(1.69 \pm 2.99)\%$,永登县蔬菜的铅富集能力显著高于榆中县和红古区,不同种类蔬菜铅富集能力在不同县区具有差异性;④土壤全钾除与白菜和甘蓝有正相关性以外,与其他蔬菜均为负相关性,其中与白菜、番茄、土豆显著相关,与胡萝卜为极显著相关;⑤土壤速效钾与各种蔬菜的铅富集能力均为正相关性,其中与胡萝卜、甜菜、甘蓝为显著正相关,与番茄、土豆、菜花为极显著正相关;⑥土壤 pH 值与胡萝卜、甜菜铅富集系数呈显著负相关,与菜花呈极显著负相关。研究表明,兰州市不同蔬菜产区的各类蔬菜对土壤铅的富集具有明显的差异性,同时不同形态的钾元素及土壤 pH 值对蔬菜铅富集能力具有显著的影响。

关键词:农业生态系统;铅污染;土壤-蔬菜体系;铅富集系数

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1477-06

Pb Pollution in Soil-vegetable System Related to the Effect of Total Soil K, Available K and pH in Lanzhou, China

LUO Yong-qing¹, CHEN Yin-ping¹, TAO Ling¹, LI Yu-qiang²

(1.School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2.Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Analyzing the data of Pb contents of soil and vegetable, soil total K, available K and pH from 49 plots around Lanzhou showed: ① The mean content of Pb in soils with vegetable cultivated was $26.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the rate of qualification (RQ) was 93.62%. The order of soil Pb contents was: Honggu District > Yuzhong County > Yongdeng County; ② The mean content of Pb in vegetables was $0.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the RQ was 73.47%. The order was: Yongdeng County > Yuzhong County > Honggu District; ③ The mean Pb enrichment index of vegetables was $(1.69 \pm 2.99)\%$. The enrichment index in Yongdeng County was significantly higher than that in Yuzhong County and Honggu District. Generally, the enrichment ability of different vegetables in different county or district had difference; ④ The correlation between Pb enrichment index and total soil K was positive in Chinese cabbage and cabbage and negative in others. The significant level was 0.05 for Chinese cabbage, tomato and potato, while 0.01 for carrot; ⑤ The correlation between Pb enrichment index and soil available K was positive in all vegetables. The significant level was 0.05 for carrot, beet, cabbage, and 0.01 for tomato, potato and cauliflower; ⑥ The correlation significant level between soil pH and Pb enrichment index was 0.05 for carrot and beet and 0.01 for cauliflower. This study indicated that, the enrichment ability of kinds of vegetables to soil had significant difference in different county or district of Lanzhou, meanwhile, different types of potassium and the pH value significantly effected the enrichment ability of vegetables.

Keywords: agro-ecosystem; Pb contamination; vegetable-soil system; Pb enrichment index

收稿日期: 2010-03-09

基金项目: 兰州交通大学“青蓝”人才工程基金(QL-08-14A); 国家自然科学基金(40901049); 兰州市科技计划资助项目(2008-1-175, 2009-2-20)

作者简介: 罗永清(1984—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士生, 主要从事农业生态方面的研究。E-mail: luoyongqing8401@sina.com

在城市化、工业化进程加快的过程中,城市生活废弃物和工业“三废”的排放日益增多,此外农药、杀虫剂、化肥的不合理使用等因素,均有可能导致土壤中金属元素的积累^[1-4]。重金属在土壤中的积累,不仅直接影响土壤理化性状、降低土壤生物活性、阻碍养分有效供给,而且通过食物链被植物、动物数十倍的富集,通过多种途径直接或间接地威胁人类安全和健康^[5-6],国内外对此进行了很多研究^[7-12]。蔬菜是人类赖以生存和发展的重要食物资源,其安全是关系人民身体健康和我国农产品进出口贸易的重大问题^[13-14],蔬菜中重金属含量已经受到人们广泛的重视^[15-17]。植物对重金属的吸收与土壤的重金属含量、理化性质、重金属在土壤内的存在形态、植物的类型、生长周期及大气环境质量等因素密切相关^[18]。此外,也有研究表明,土壤中钾元素对蔬菜铅的富集有一定影响^[19]。

本文通过对兰州主要蔬菜产区榆中县、永登县和红古区不同种类蔬菜及蔬菜地土壤铅污染及富集的研究,对兰州蔬菜及蔬菜地土壤铅污染程度进行初步评价,并对蔬菜铅富集的相关因子进行分析,旨在为兰州蔬菜品质的提高和蔬菜生产中铅污染的防治提供指导依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

兰州位于中国陆域版图的几何中心,总面积 13085.6 km²,处在东经 102°30'~104°30'、北纬 35°5'~38°之间,平均海拔 1 670 m。该地区年降水量 290~360 mm,蒸发量 1 400 mm,平均气温 6.5℃,无霜期平均 140 d,为北温带半干旱大陆性半季风气候。境内地貌复杂,土层深厚,质地良好,气候特点为干旱少雨,光热资源丰富,季节冷暖分明,昼夜温差大。虽然干旱少雨对农业生产特别是粮食生产制约较大,但黄河水、大通河、湟水、庄浪河、宛川河等水质优良的水系分布,是发展夏秋季节性蔬菜的极好条件^[20]。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集与处理

根据各县区农业发展状况及蔬菜种植面积,选取 49 个采样点,其中榆中县蔬菜种植面积较大,设置 27 个样点,永登县和红古区分别设置 10 个和 12 个采样点。土壤采样用梅花布点法,于每个样点设置 5~10 个采集点,在各个采集点表层(0~20 cm)等量取土,使混合后的土样达到约 2 kg。用木铲将混合后的土样装入塑料袋内,贴签,带回实验室备用。将采集的土样剔除

草根、玻璃、石块等异物后,晾晒在实验室通风避光处自然风干,按照四分法取样约 500 g 置于木盘中,用木棒碾碎,过 2 mm 尼龙筛,弃去沙子、石块等,装瓶贴签。

根据各个样点农田土壤蔬菜种植状况,取一到多种蔬菜样品(榆中县部分蔬菜地处于休耕期,未采集蔬菜样),共计 49 个蔬菜样。蔬菜样品分别用自来水和去离子水冲净,105℃杀青,65℃烘 48 h,取部分样品剪切后用玛瑙研钵研碎,过 40 目尼龙筛,装瓶贴签。

1.2.2 样品指标测定及分析

取过 2 mm 尼龙筛的土样,采用电位法测定 pH 值(水土比为 2.5:1)^[21];土样过 0.15 mm 尼龙筛,用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解、电感耦合等离子发射光谱法(ICP-AES)测定样品铅含量^[22];用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定全钾^[21];乙酸铵浸提-火焰光度法测定土样速效钾^[21]。蔬菜铅含量采用王水-高氯酸消煮-电感耦合等离子发射光谱法(ICP-AES)测定^[22],仪器工作状态为:高频发生器频率 27.12 MHz,功率 1.2 kW,观测高度 16 mm,载气流量 0.86 L·min⁻¹,最低检出限为 0.01 mg·kg⁻¹。

为了说明土壤重金属的含量对蔬菜重金属含量的直接影响,以及比较不同地区土壤生长的蔬菜对重金属的吸收和累积特性的差异,引用富集系数,即蔬菜中重金属含量与土壤中重金属含量的分数比值,来衡量蔬菜的重金属质量分数与土壤中重金属质量分数的相关性^[23]。

富集系数(%)=蔬菜中铅含量(mg·kg⁻¹)/土壤中铅含量(mg·kg⁻¹)×100%

数据采用 Microsoft Excel 和 SPSS17.0 软件进行统计分析。用单因素方差分析(ANOVA)对不同区域之间的差异性进行显著性分析,用最小显著性差异(LSD)多重比较方法,在 95%的可靠性下对不同区域和不同类型之间差异性进行比较分析,并采用相关分析法对蔬菜铅富集系数与全钾、速效钾及 pH 的相关性进行分析。

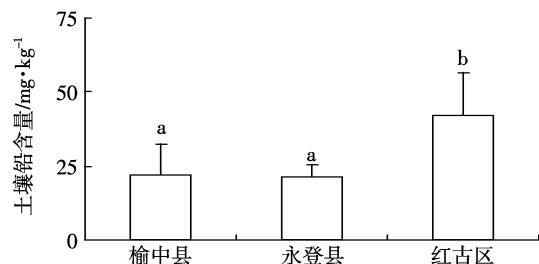
2 结果与分析

2.1 兰州蔬菜及土壤铅污染状况

2.1.1 蔬菜种植地土壤铅含量

兰州市蔬菜种植地土壤平均铅含量为(26.30±13.18)mg·kg⁻¹。不同县区中,红古区蔬菜地土壤铅含量最高,为研究区平均含量的 1.61 倍;榆中县和永登

县蔬菜地土壤铅含量均低于平均含量,分别为 $(22.21 \pm 10.13) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(21.28 \pm 4.39) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。方差分析表明($F=15.337, P<0.001$),红古区蔬菜地土壤铅含量极显著高于榆中县和永登县(图1)。此外,不同县区土壤铅含量呈现出不同的变异程度,其中永登县最小(变异系数为0.21),红古区次之(变异系数为0.34),榆中县变异程度最大(变异系数为0.46),兰州市蔬菜种植地土壤总体铅含量变异系数为0.50。



注: 相同字母表示 LSD 多重比较在 0.05 水平上不存在显著差异(下同)。

图1 兰州蔬菜种植地土壤铅含量

Figure 1 The content of Pb in vegetable cultivation soils

以相关标准(NY/T 391—2000)规定的 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为衡量标准,对兰州市郊蔬菜地土壤铅含量进行评价。兰州市蔬菜种植地土壤总体铅含量合格率为93.62%,其中榆中县和红古区有超标现象,合格率分别为96.30%和83.33%,永登县蔬菜种植地土壤铅含量均未超标。

2.1.2 蔬菜铅含量

本次研究结果表明,兰州市蔬菜平均铅含量为 $(0.59 \pm 1.35) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同县区中,永登县蔬菜铅含量最高,为平均含量的1.90倍;榆中县和红古区蔬菜铅含量均低于全市平均含量,分别为全市平均值的0.52倍和0.27倍。方差分析表明($F=2.805, P<0.05$),永登县蔬菜铅含量显著高于红古区(图2)。同蔬菜种植地土壤铅含量相比较,蔬菜对铅的富集有更强烈的变异,变异系数均在0.90以上。此外,各县区蔬菜铅含量变异程度不同,其中永登县最高(变异系数为1.81),榆中县次之(变异系数为1.00),红古区变异程度最小(变异系数为0.94)。

以国家标准(GB 2762—2005)规定的相关标准限额为衡量标准,对兰州蔬菜铅含量进行评价表明,兰州市蔬菜总体铅含量合格率为60.78%,其中永登县(57.89%)最低,红古区(63.63%)次之,榆中县(68.42%)最高。

2.2 兰州蔬菜地全钾、速效钾含量及 pH 值分布特征

兰州市蔬菜地全钾平均含量为 $(8.29 \pm 2.01) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,

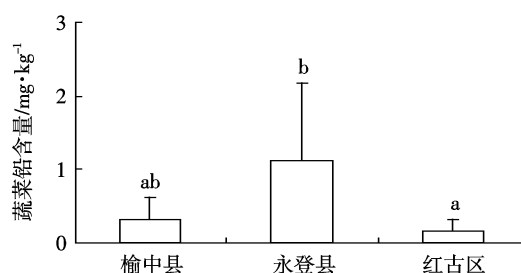


图2 兰州蔬菜铅含量

Figure 2 The content of Pb in vegetables

方差分析表明($F=4.821, P=0.013$),在不同县区蔬菜种植地土壤全钾含量存在显著差异(图3A),其中永登县蔬菜种植地土壤全钾含量为全市平均含量的0.78倍,显著低于榆中县和红古区;从变异程度来看,各县区土壤全钾变异程度较小,变异系数均小于0.30。

兰州市蔬菜地速效钾平均含量为 $(0.22 \pm 0.25) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,方差分析表明($F=4.371, P=0.018$),在不同县区土壤速效钾含量存在显著差异(图3B),其中榆中县蔬菜地土壤速效钾含量仅为全市平均含量的0.59倍,显著低于永登县和红古区;永登县和红古区蔬菜种植地土壤速效钾含量相对较高,分别为全市平均含量的1.45倍和1.54倍。同全钾相比,土壤速效钾具有更强的变异性,其变异系数均大于0.50,红古区高达1.16,全市平均为1.14。

兰州蔬菜地土壤平均 pH 为 8.63 ± 0.26 (表1),在不同县区无显著差异($F=0.610, P=0.548$),且变异程度较小,变异系数均小于0.05。

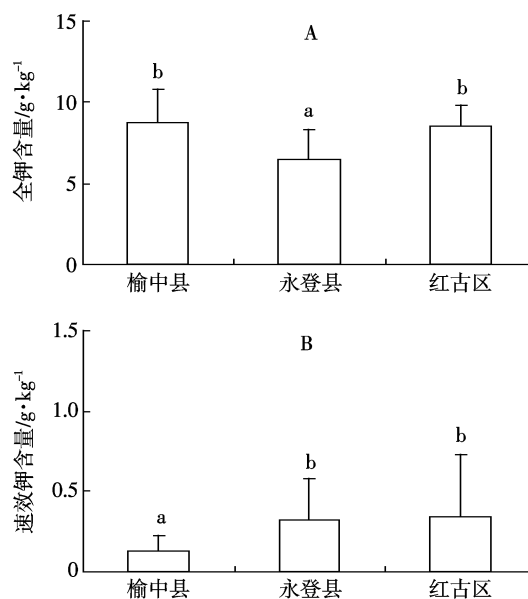


图3 兰州蔬菜种植地土壤全钾(A)及速效钾(B)含量

Figure 3 Content of potassium in vegetable cultivation soils

表 1 兰州蔬菜种植地土壤 pH 值						
Table 1 pH value in vegetable cultivation soils						
项目	样点数	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数
榆中县	27	8.67a	0.25	7.94	9.12	0.03
永登县	10	8.61a	0.23	8.05	8.81	0.03
红古区	12	8.58a	0.32	7.75	8.81	0.04
合计	49	8.63	0.26	7.75	9.12	0.03

注:相同字母表示 LSD 多重比较在 0.05 水平上不存在显著差异。

2.3 兰州蔬菜铅富集效应分析

2.3.1 不同县区蔬菜铅富集效应

从研究结果来看(表 2),除甜菜外,其他种类的蔬菜在 3 个县区的铅富集系数均存在显著的差异性($P<0.01$),其中永登县各类蔬菜铅富集系数均大于榆中县和红古区。从白菜铅富集系数来看,大小顺序为永登县>榆中县>红古区,且永登县白菜铅富集系数分别为榆中县和红古区的 13.67 倍和 15.94 倍;胡萝卜铅富集系数大小顺序为永登县>红古区>榆中县,其中永登县分别为红古区和榆中县的 7.34 倍和 18.27 倍;永登县番茄和甘蓝的铅富集系数为红古区的 22.18 倍和 7.32 倍(榆中县无番茄和甘蓝样品);永登县菜花铅富集系数显著高于榆中县($P=0.001\ 0$),而甜菜的铅富集系数在永登县和榆中县分别为 $(0.51\pm 0.09)\%$ 和 $(0.50\pm 0.61)\%$,二者不存在显著差异($F=0.003,P=0.961\ 0$),同时,榆中县甜菜铅富集系数具有较大的变异强度,变异系数高达 1.22。

2.3.2 不同种类蔬菜铅富集效应

从表 2 可知,不同种类的蔬菜对铅的富集能力大小存在差异性($P<0.01$)。在不同县区,各类蔬菜铅富集能力不同,榆中县蔬菜铅富集系数大小顺序为胡萝

卜<白菜<菜花<甜菜<土豆,其中土豆富集能力显著高于其他种类蔬菜($P<0.01$),其余蔬菜铅富集系数则不存在显著差异性($P>0.01$);永登县各类蔬菜的铅富集系数在 0.51%到 7.94%之间,其大小顺序依次为甜菜<菜花<甘蓝<番茄<白菜<胡萝卜,其中甜菜和菜花的铅富集系数显著低于其他种类蔬菜(表 2);红古区各类蔬菜的铅富集系数范围为 0.22%到 1.02%之间,不同种类蔬菜间具有显著差异性($P<0.01$),其大小顺序依次为甘蓝≤番茄<白菜<胡萝卜。

2.4 pH、全钾、速效钾对蔬菜铅富集效应的影响

2.4.1 全钾对蔬菜铅富集的影响

不同蔬菜铅富集量与土壤中全钾的含量有不同的相关性(表 3)。白菜和甘蓝铅富集系数与土壤钾含量呈正相关,其中白菜铅富集系数与全钾呈显著正相关($P<0.05$)。番茄、胡萝卜、土豆、甜菜、菜花等蔬菜铅富集指数则与种植地土壤全钾含量呈负相关,其中土壤全钾与胡萝卜铅富集系数呈极显著负相关($P<0.01$),与番茄和土豆呈显著负相关($P<0.05$),甜菜和菜花铅富集系数与土壤全钾的负相关性不显著($P>0.05$),相关系数分别为-0.067 和-0.012。

2.4.2 速效钾对蔬菜铅富集的影响

与全钾不同,在各类蔬菜中,铅富集系数与速效钾含量均呈正相关(表 3),表明在兰州地区土壤-蔬菜体系中,随土壤中速效钾含量的升高,蔬菜对重金属铅的富集能力增加。但在不同种类蔬菜间,这种土壤速效钾含量与蔬菜铅富集的正相关性有所不同,其中番茄、土豆和菜花为极显著正相关($P<0.01$);胡萝卜、甜菜和甘蓝为显著正相关($P<0.05$);白菜铅富集系数与土壤速效钾含量的正相关性则不显著($R=$

表 2 兰州不同县区蔬菜铅富集系数(%)								
Table 2 Pb enrichment index(%) of vegetables in different county or district								
项目	榆中县		永登县		红古区		F	P
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差		
白菜	0.42a	0.18	5.74bc	1.53	0.36b	0.12	33.88	0.003 0
番茄	NS	—	4.88b	0.28	0.22a	0.02	1 426.04	0.000 0
胡萝卜	0.41a	0.17	7.49c	1.60	1.02c	0.01	42.53	0.000 7
土豆	2.05b	1.12	NS	—	NS	—		
甜菜	0.50a	0.61	0.51a	0.09	NS	—	0.003	0.961 0
菜花	0.43a	0.19	1.51a	0.25	NS	—	43.56	0.001 0
甘蓝	NS	—	1.61*	—	0.22a	0.01	26 661.68	0.000 0
F	5.955 0		22.787 0		142.903 0			
P	0.005 0		0.000 0		0.000 0			

注:NS 表示该点无采集样品。* 表示永登县的甘蓝采集样品数量为 1 个,故无标准差,不与其他蔬菜进行多重比较。相同字母表示 LSD 多重比较在 0.05 水平上不存在显著差异。

表 3 不同蔬菜种类铅富集系数与钾含量
及 pH 值的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation index between vegetable enrichment
index and the content of potassium and pH values

蔬菜类型	全钾	速效钾	pH
白菜	0.687*	0.296	0.433
番茄	-0.855*	0.994**	0.568
胡萝卜	-0.910**	0.724*	-0.816*
土豆	-0.506*	0.958**	-0.267
甜菜	-0.067	0.803*	-0.833*
菜花	-0.012	0.882**	-0.925**
甘蓝	0.317	0.885*	0.216

注: * 表示在 0.05 水平上存在显著性; ** 表示在 0.01 水平上存在显著性。

0.296, $P > 0.05$)。

2.4.3 不同 pH 值对蔬菜铅富集的影响

由表 4 可知,不同种类蔬菜的铅富集系数与土壤酸碱度的相关性有所不同,说明土壤的酸碱状况对不同种类的蔬菜铅富集的影响不同。白菜、番茄、甘蓝的铅富集系数与 pH 值呈正相关,胡萝卜、土豆、甜菜和菜花铅富集系数与 pH 值均为负相关。其中胡萝卜和甜菜为显著负相关($P < 0.05$),菜花为极显著负相关($P < 0.01$),白菜、番茄、土豆和甘蓝的铅富集系数与土壤 pH 值的相关性均不显著($P > 0.05$)。

3 讨论

从本次研究结果来看,蔬菜铅含量的变异范围比较大,变异系数维持在 0.90 以上,而蔬菜地土壤铅含量变异相对较小,变异系数均小于 0.50。同土壤铅含量的变异系数相比,蔬菜具有更高的变异强度,说明蔬菜铅除受土壤铅含量影响外,更受到其他(耕作、管理措施、种植制度、水体及大气污染状况等)外界因素的干扰^[2]。有研究表明,土壤母质作用、含有重金属的废水废气废渣的间接和直接作用以及农药化肥等农业措施可导致蔬菜的重金属污染^[24-26]。施泽明等对成都市郊不同类型的蔬菜重金属富集研究表明,蔬菜叶的重金属来源与大气环境质量密切相关^[18]。此外,不同植物在重金属的吸收上存在生态型差异和基因型差异^[27]。

影响植物对重金属富集的因素除上述因子外,还与土壤微环境的阴阳离子含量及种类有关,但目前的研究主要集中在 Cl^- 和 SO_4^{2-} 对镉的富集^[28-29]。在本次研究中,不同形态的钾元素与蔬菜铅富集能力具有相关性,尤其是速效钾的含量,除白菜外,与其他蔬菜的富

集系数呈显著或极显著的正相关。刘平等^[9]通过盆栽实验研究发现, KCl 有促进植物吸收铅的趋势(钾肥通过改变土壤中铅的赋存形态来促进植物对铅的吸收, KCl 通过提高土壤中水溶性铅和碳酸盐态铅含量,来促进植物铅吸收),这与本研究结果相同。有研究表明,钾肥的效果主要是伴随阴离子(Cl^- 和 SO_4^{2-} 等)的交换、配位等反应影响重金属在土壤中的有效性^[30],但对于阳离子,尤其是 K^+ 对植物重金属富集的研究较少。从生理学来看, K^+ 是植物生长的必需元素,是植物遭遇胁迫时渗透调节的主要无机离子^[31]。据此推断,土壤速效钾含量的提高可能会促进蔬菜渗透调节从而增加对铅胁迫的抗逆性。

4 结论

(1)兰州蔬菜种植地土壤铅的平均含量为 $26.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,以国家相关标准(NY/T 391—2000)衡量,合格率为 93.62%,且红古区蔬菜地土壤铅含量显著高于榆中县和永登县。

(2)研究区蔬菜平均铅含量为 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,合格率为 60.78%,同县区蔬菜铅含量存在显著差异,各个县区蔬菜铅含量大小顺序为榆中县>红古区>永登县。

(3)兰州蔬菜产区蔬菜对铅的富集系数为 $(1.69 \pm 2.99)\%$ 。从空间分布来看,永登县蔬菜铅富集能力显著高于榆中县和红古区,同时具有更强的变异程度;从蔬菜种类来看,不同县区各类蔬菜对铅的富集能力存在差异。

(4)种植地土壤全钾、速效钾及 pH 值均对不同种类蔬菜铅富集能力有不同程度的影响。

参考文献:

- [1] Jinadasa K B P N, Milham P J, Hawkins C A. Survey of cadmium levels in vegetables and soils of greater Sydney, Australia[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 924-933.
- [2] Mac Nicol R D, Beckett P H T. Critical tissue concentrations of potentially toxic elements[J]. *Plant and Soil*, 1985, 85, 107-109.
- [3] 李天杰. 土壤环境学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
Li Tian-jie. *Environmental agrology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1995.
- [4] Wong S C, Li X D, Zhang G, et al. Heavy metal in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China[J]. *Environment and Pollution*, 2002, 119: 33-44.
- [5] Alam M G M, Snow E T, Tanaka A. Arsenic and heavy metal contamination of vegetables grown in Samta village, Bangladesh[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 308: 83-96.
- [6] Türkdogan M K, Kilicel Fevzi, Kazim Kara, et al. Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region

- of Turkey[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2003, 13(3):175-179.
- [7] Hassanin A S E. Potential Pb, Zn, Cd contamination of sandy soil after different irrigation periods with sewage effluent[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1993, 66(3/4):239-249.
- [8] Naidu R, Kookanar S, Sumner E. Cadmium sorption and transportation variable charge soils[J]. *Environ Qual*, 1997, 26:602-617.
- [9] HU X F, WU H X, HU X. Impact of urbanization on Shanghai's soil environmental quality[J]. *Pedosphere*, 2004, 14(2):151-158.
- [10] Julie A Marcus, Alex B McBratney. An urban soil study: Heavy metals in Glebe, Australia[J]. *Soil Res*, 1996, 34:453-465.
- [11] Julita Markiewicz-Patkowska, Andrew Hursthouse, Hanna Przybyla-Kij. The interaction of heavy metals with urban soils: Sorption behavior of Cd, Cu, Cr, Pb and Zn with a typical mixed brown field deposit[J]. *Environmental International*, 2005(31):513-521.
- [12] LI Jing, XIE Zheng-miao, ZHU Yong-guan, et al. Risk assessment of heavy metal contaminated soil in the vicinity of a lead/zinc mine[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(6):881-885.
- [13] 周 聪, 刘洪升, 冯信平, 等. 海南垃圾肥的重金属含量及对无公害果蔬的影响[J]. 热带作物学报, 2003(2):86-90.
- ZHOU Cong, LIU Hong-sheng, FENG Xin-ping, et al. Heavy metal in garbage compost in Hainan and their influences on fruit trees and vegetables[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2003(2):86-90.
- [14] 王多加, 金肇熙. 深圳市永久性菜地蔬菜重金属污染状况分析[J]. 广东农业科学, 2000(1):20-22.
- WANG Duo-jia, JIN Zhao-xi. Analysis of contaminate conditions of heavy metals in perpetuity vegetable cultivation of Shenzhen City[J]. *Guangdong Agriculture Science*, 2000(1):20-22.
- [15] 傅绍清, 苏方康, 宋 怡, 等. 成都平原菜园土壤及主要蔬菜作物重金属背景值的研究[J]. 西南农业学报, 1992, 5(1):34-40.
- FU Shao-qing, SU Fang-kang, SONG Yi, et al. Background values of heavy metal in garden soil and vegetables in Chengdu plain[J]. *South-west China Journal of Agricultural Sciences*, 1992, 5(1):34-40.
- [16] 魏秀国, 何江华, 王少毅, 等. 广州市菜园土和蔬菜中镉含量水平及污染评价[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2):129-132.
- WEI Xiu-guo, HE Jiang-hua, WANG Shao-yi, et al. Concentration and evaluation on pollution of Cd in vegetable farm soils and vegetables of Guangzhou[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(2):129-132.
- [17] 祖艳群, 李 元, 陈海燕, 等. 昆明市蔬菜及其土壤中铅、镉、铜和锌含量水平及污染评价[J]. 云南环境科学, 2003, 22(增刊):55-57.
- ZU Yan-qun, LI Yuan, CHEN Hai-yan, et al. Concentration and evaluation on pollution of Pb, Cd, Cu and Zn in vegetable farm soil and vegetable of Kunming[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2003, 22(Suppl):55-57.
- [18] 施泽明, 倪师军, 张成江. 成都城郊典型蔬菜中重金属元素的富集特征[J]. 地球与环境, 2006, 34(2):52-56.
- SHI Ze-ming, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang. The characteristics of heavy metal enrichment in representative vegetables in Chengdu[J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(2):52-56.
- [19] 刘 平, 徐明岗, 李菊梅, 等. 不同钾肥对土壤铅植物有效性的影响及其机制[J]. 环境科学, 2008, 29(1):202-206.
- LIU Ping, XU Ming-gang, LI Ju-mei, et al. Effects of different potassium fertilizers on the phytoavailability of Pb in soil and its mechanisms[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1):202-206.
- [20] 苏勇功, 柴银军. 兰州市无公害农产品生产现状与思考[J]. 农业环境与发展, 2004, 5:3-4.
- SU Yong-gong, CHAI Yin-jun. Evolution and consideration to the manufacture actuality of the pollution free agriculture products in Lanzhou city[J]. *Agro-Environment & Development*, 2004, 5:3-4.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 12.
- BAO Shi-dan. Analysis of agricultural soil[M]. 3rd Edition. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000:12.
- [22] 窦 磊, 马 瑾, 周永章, 等. 广东东莞地区土壤-蔬菜系统重金属分布与富集特征分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(1):98-102.
- DOU Lei, MA Jin, ZHOU Yong-zhang, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in soil-vegetable system of Dongguan Area, Guangdong Province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(1):98-102.
- [23] 李晓晨, 马海涛, 冯士龙, 等. 污泥中重金属的形态及在小麦幼苗中的富集[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(3):1-6.
- LI Xiao-chen, MA Hai-tao, FENG Shi-long, et al. Fraction distribution of heavy metals in sludge and their enrichment in wheat seedling[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 30(3):1-6.
- [24] 姚春霞, 陈振楼, 张 菊, 等. 上海浦东部分蔬菜重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4):761-765.
- YAO Chun-xia, CHEN Zhen-lou, ZHANG Ju, et al. Heavy metal pollution assessment of vegetable in Pudong zone Shanghai[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(4):761-765.
- [25] 李其林, 刘兴德, 魏朝富, 等. 重庆市蔬菜区重金属污染现状[J]. 土壤通报, 2005, 36(1):104-107.
- LI Qi-lin, LIU Xing-de, WEI Chao-fu, et al. Heavy metals in vegetable-planting areas in Chongqing[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(1):104-107.
- [26] 李 静, 谢正苗, 徐建明, 等. 铅锌矿污染土壤与蔬菜的安全风险评估[M]//城乡生态环境建设原理和实践. 北京: 中国环境科学出版社, 2004:332-338.
- [27] Laurie S H, Mantey J A. The chemistry and role of metal ion chelation in plant uptake process[M]//M Antheyja, et al eds. Biochemistry of metal micronutrients in the rhizosphere. USA: Lewis Publishers, 1994: 165-182.
- [28] McLaughlin M J, Mair N A, Freeman K. Effect of potassic and phosphatic fertilizer type, fertilizer Cd concentration and zinc rate on cadmium uptake by potatoes[J]. *Fertil Res*, 1995, 40:63-70.
- [29] Weggler K, Michael J, McLaughlin M J. Effect of chloride in soil solution on the plant availability of biosolid-borne cadmium[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2):496-504.
- [30] Grant C A, Bailly L D, McLaughlin M J, et al. Management factors which influence cadmium concentrations in crops[C]//McLaughlin M J, Singh B R. Cadmium in soils and plants. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishing, 1999:98-151.
- [31] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 第五版. 北京: 高等教育出版社, 2004:6, 282-286.
- PAN Rui-chi. Plant physiology[M]. 5th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2004:6, 282-286.