

干旱区绿洲土壤镉-锌-铅复合污染物 在芹菜中的富集迁移规律

胡小娜,南忠仁,刘晓文,赵转军,李 媛,黄 璞

(兰州大学西部环境教育部重点实验室 资源环境学院,甘肃 兰州 730000)

摘 要:以干旱区绿洲土壤为供试土壤,采用盆栽实验研究了镉-锌-铅复合污染物在土壤/芹菜系统中的迁移富集特征。结果表明:随着外源添加重金属量的增大,芹菜根和叶中重金属含量也增大;芹菜根对 Cd、Pb、Zn 吸收量与土壤中 Cd、Pb、Zn 含量、外源添加 Cd、Pb、Zn 量之间都达到极显著正相关,芹菜叶对 Cd、Zn 的吸收量与土壤中 Cd、Zn 含量、外源添加 Cd、Zn 量之间都达到极显著正相关;多元线性回归分析可知,芹菜根吸收 Cd、Pb、Zn 并没有受到共存元素的影响;重金属元素从土壤中分别向芹菜根/叶的富集能力顺序都为 $Cd > Zn > Pb$,重金属元素在芹菜体内的迁移能力顺序为 $Zn > Cd > Pb$ 。

关键词:重金属;芹菜;迁移;富集

中图分类号: S636.3;S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)04-0163-04

采矿、金属的冶炼、金属工业、金属的腐蚀、废物的处置、农药和化肥的使用、森林与木材工业中防腐剂的的使用以及化石燃料的燃烧等都可能造成土壤重金属的污染^[1]。20 世纪 60 年代以来,土壤重金属污染严重的危害性已经引起了土壤学家、化学家以及环境学家对重金属在土壤环境中行为的广泛研究^[2-4],在自然界中,污染物很少单独存在于某一环境中,多具伴随性和综合性,往往是多种污染物进入环境并共存,即多种污染物形成的复合污染^[5-7]。目前,已有对水稻、小麦、玉米、大豆、小白菜和菠菜等复合污染的影响研究^[8-15]。而关于干旱区绿洲土壤镉-锌-铅复合污染物对芹菜的研究较少。事实上,复合污染不仅在灌溉区的土壤上,而且在城郊的菜田土壤上也普遍存在^[16],对于蔬菜而言,地上部分重金属的累积量很大,造成对人体健康的威胁。试验以干旱区绿洲土壤为供试土壤,芹菜为供试蔬菜,镉、铅、锌复合污染条件下,灌溉土中重金属向芹菜富集迁移作用进行初步研究。

1 材料与方法

1.1 材 料

供试土壤为河西城郊绿洲灌溉土,供试蔬菜为芹菜。其供试土壤的基本理化性质:pH 值为 8.16,有机质含量为 1.5486%,碳酸盐含量为 5.64%。阳离子交换量为 8.1 cmol/kg。三种被测元素的背景

值分别为: Cd 为 0.118 mg/kg, Pb 为 21.8 mg/kg, Zn 为 70.5 mg/kg。

1.2 方 法

试验采用 Cd、Pb、Zn 三因素九处理水平设计方案,每个处理水平设三个重复,其处理水平见表 1。

表 1 试验土壤耕作层中几种重金属污染物浓度设计(mg/kg)

Table 1 Design of concentrations of heavy metals added into tested soil			
处理 Treatments	Cd	Pb	Zn
1(CK)	0.00	0	0
2	0.35	75	50
3	0.75	150	100
4	1.25	230	180
5	1.80	320	300
6	2.50	450	450
7	3.50	700	600
8	5.00	1000	800
9	7.5	1350	1000

供试土壤风干压碎后过 2 mm 筛,称取若干份 1 kg 风干土样,重金属 Cd、Pb、Zn 按不同处理量以硝酸盐溶液形式加入土壤,然后分别放入若干个套袋花盆中,加入蒸馏水使得含水量为田间持水量的 60%。保持 2 d 后,播种芹菜籽。生长 1 周后间苗,每盆定苗 4 株,每 2 d 浇一次水,使芹菜生长期保持土壤湿度为田间持水量的 60%。生长 66 d 收获。

收稿日期:2008-12-11

基金项目:本研究获得国家自然科学基金项目(40671167)

作者简介:胡小娜(1984—),女,山西运城人,硕士研究生,研究方向为重金属污染过程与生态修复。E-mail: huxn03@lzu.cn。

通讯作者:南忠仁,教授,博士生导师。E-mail: nanzhongren@lzu.edu.cn。

收获时用去离子水洗净其根茎和叶,分别用于测定 Cd、Pb、Zn 的吸收量,同时收取作物生长后的土壤,测定土壤中 Cd、Pb、Zn 的含量。

1.3 样品分析

1.3.1 土壤样品全量分析 采用硝酸—氢氟酸—高氯酸三酸消解,用原子吸收光谱仪测试 3 种重金属的含量^[17]。

1.3.2 植物样品重金属含量分析 采用硝酸—高

氯酸消解方法,用原子吸收光谱仪测定重金属元素的含量^[17]。

2 结果与分析

2.1 Cd、Pb、Zn 在芹菜不同器官中的含量分布特征

芹菜从土壤中吸收重金属元素量,与外源添加重金属量有很大关系,芹菜地上部/地下部中所含重金属量与外源添加重金属量之间的关系见图 1。

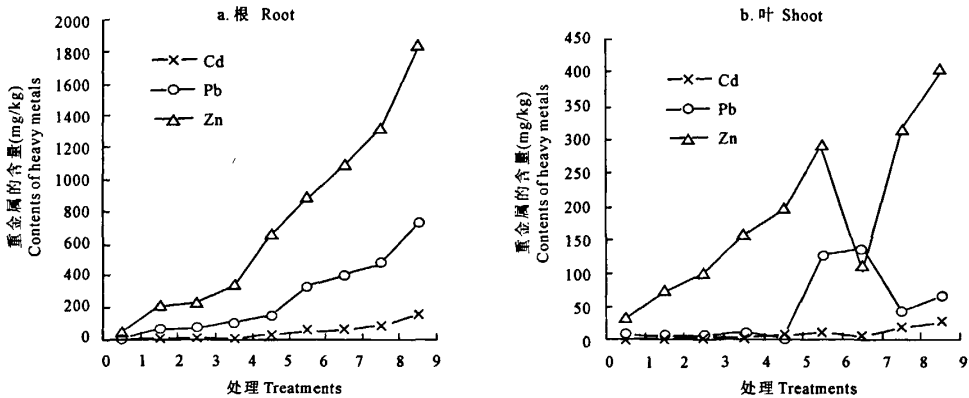


图 1 芹菜叶/根重金属含量与外源添加重金属量之间的关系

Fig. 1 Relationship between contents of heavy metals in celery and amounts of heavy metals added to the soil

由图 1 可知,随着土壤中添加重金属含量的增大,芹菜根重金属含量也随之增大。为了探求复合污染条件下土壤—蔬菜体系中重金属化学行为的差异性,对土壤—芹菜中 Cd、Pb、Zn 含量进行相关分析。相关分析结果表明:芹菜根对 Cd 的吸收量与土壤中 Cd 含量、外源添加 Cd 量的相关系数分别为 0.991、0.990,芹菜根对 Pb 的吸收量与土壤中 Pb 含量、外源添加 Pb 量的相关系数为 0.986、0.986,芹菜根对 Zn 的吸收量与土壤中 Zn 的含量、外源添加 Zn 量的相关系数为 0.995、0.995,均达到极显著的正相关。表明复合污染条件下,其添加量和土壤含量在一定程度上代表着土壤中 Cd、Pb、Zn 的有效量,在这种条件下,研究重金属 Cd、Pb、Zn 的关系,既能反映它们的植物有效性,又能说明土壤中重金属的含量,因此具有较强的代表性^[18]。

由图 1 可知,随着外源重金属添加量的增加,芹菜叶中重金属含量也随之增大,当外源添加 Zn 浓度为 600 mg/kg 时,芹菜叶中 Zn 含量呈现下降趋势,这说明外源重金属添加量达到一定时,随着添加浓度的提高,芹菜叶对重金 Zn、Pb 的吸收量有所下降,可能由于一定的外源添加量对芹菜叶的 Zn、Pb 吸收有抑制作用;外源添加 Zn、Pb 浓度分别大于 600 mg/kg、1 000 mg/kg 时,芹菜叶中 Zn、Pb 含量有增加

的趋势,说明当外源重金属添加量大于 Zn、Pb 抑制量时,芹菜叶中 Zn、Pb 含量也会增加。而随着外源添加 Cd 量的增加,芹菜叶中的 Cd 一直表现为升高趋势,可能由于 Cd 添加浓度小,还没有达到抑制吸收重金属的趋势。相关分析表明:芹菜叶对 Cd 的吸收量与土壤中 Cd 含量、外源添加 Cd 量的相关系数分别为 0.945、0.957;芹菜叶对 Zn 的吸收量与土壤中 Zn 的含量、外源添加 Zn 量的相关系数为 0.848、0.848,其相关系数均达到了极显著水平。芹菜叶对 Pb 的吸收量与土壤中 Pb 含量、外源添加 Pb 量的相关系数为 0.514、0.485,说明芹菜叶对 Pb 的吸收较少,Pb 在芹菜体内较难迁移。由图 1a、b 可以看出:在 Cd、Pb、Zn 复合污染条件下,无论是低浓度还是高浓度,芹菜体内 Cd、Pb、Zn 含量分布均表现为根部 > 叶部。

大量研究表明重金属复合污染条件下,共存元素对作物中元素含量及分配有重要影响^[19]。为研究 Cd—Pb—Zn 复合污染对芹菜吸收重金属的影响,本文对芹菜中的 Cd、Pb、Zn 含量与土壤中重金属含量进行多元线性回归分析,见表 2。

由表 2 看出,土壤中重金属 (Cd、Pb、Zn) 含量与芹菜根部重金属含量进行多元线性回归分析, F 值都很大, P 值小于 0.05,说明芹菜根中重金属量与

土壤中重金属量线性关系非常好。方程 1 中 P_1 小于 0.05,说明芹菜根吸收 Cd 与土壤中 Cd 含量有关;方程 3 中 P_3 小于 0.05,说明芹菜根吸收 Zn 与土壤中 Zn 含量有关;方程 2 中 P 值虽然小于 0.05,但 P_1 、 P_2 、 P_3 都大于 0.05,说明芹菜吸收 Pb 与土壤中 Pb 并不存在线性关系。进行线性回归分析可知芹菜根吸收重金属并没有受到共存元素的影响。

土壤中重金属(Cd、Pb、Zn)含量与芹菜叶中的重金属含量进行多元线性回归,方程 5、6 可以进行多元线性回归,但 F 值不显著,表明芹菜叶对 Pb、Zn 的吸收可能与土壤中的重金属量没有线性关系。与李忠海等^[20]研究镉、锌、铅共存元素对芹菜影响的结果不符,可能由于土壤的种类不同。

表 2 芹菜根和叶中重金属含量与土壤重金属含量的逐步线性回归分析
Table 2 Liner regressions between heavy metals content in the root/shoot of celery and the content in the soil

序号 No	多元线性回归方程 Liner regression equation	F	R^2	P	P_1	P_2	P_3
1	$YCd(\text{根,Root}) = 1.437 + 24.455XCd + 0.011XPb - 0.054XZn$	110.152	0.976	0.000	0.041	0.861	0.393
2	$YPb(\text{根,Root}) = -30.287 + 44.256XCd - 0.078XPb + 0.456XZn$	130.598	0.987	0.000	0.304	0.775	0.126
3	$YZn(\text{根,Root}) = -49.524 + 9.774XCd + 0.098XPb + 1.473XZn$	182.982	0.986	0.000	0.908	0.862	0.036
4	$YCd(\text{叶,Shoot}) = 0.750 + 4.157XCd - 0.003XPb - 0.004XZn$	14.152	0.831	0.007	0.335	0.909	0.867
5	$YPb(\text{叶,Shoot}) = -36.626 + 15.770XCd - 0.576XPb + 0.733XZn$	5.982	0.651	0.041	0.669	0.056	0.022
6	$YZn(\text{叶,Shoot}) = 31.269 + 2.937XCd - 0.123XPb + 0.442XZn$	4.329	0.555	0.074	0.976	0.852	0.498

2.2 复合条件下芹菜对 Cd、Pb、Zn 的富集效应
生物富集系数可以反映作物/蔬菜对重金属的

富集能力。不同处理浓度下,芹菜对 Cd、Pb、Zn 的富集特征见图 2。

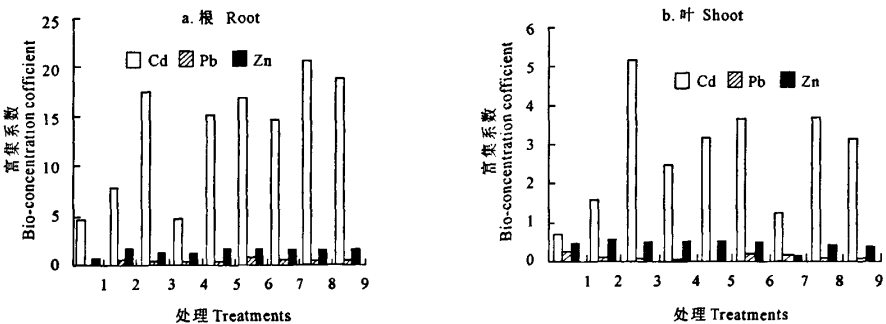


图 2 重金属在芹菜中的富集系数
Fig.2 The bio-concentration coefficient of heavy metals in celery

由图 2 可知,芹菜根和叶对重金属的富集能力均表现为: Cd > Zn > Pb,即 Cd 最易于被芹菜所吸收,而 Pb 在芹菜体内的富集能力最弱,这可能由于铅进入土壤时,开始以硝化物形态存在,但它们在土壤中可以很快转化为难溶性化合物,使得铅的移动性和被农作物的吸收量都大大降低^[21]。
本实验条件下,在外源添加 Cd、Pb、Zn 量均为处理 8 时,芹菜根对 Cd、Pb、Zn 的富集能力最大,外源添加 Cd 的处理为 3、Pb 的处理为 1、Zn 的处理为 2 时,芹菜叶对 Cd、Pb、Zn 的富集能力达到最大,总体来说随着外源重金属元素添加量的增大,其富集率呈下降趋势,这主要是由于随着土壤重金属元素浓度升高,土壤中重金属向芹菜的富集能力逐渐降低,

植物吸收可能会受到阻碍。根中的重金属含量明显比叶中的含量高,这说明芹菜对这 3 种元素的富集能力是根系 > 茎叶,芹菜通过根系吸收的重金属主要存在于根系组织中,向地上部分迁移量较小,说明芹菜吸收 Cd、Pb、Zn 后,只有少部分向地上迁移。其中 Pb 的规律与王松良等研究蔬菜中 Pb 结果一致,而 Zn 正好相反^[22],可能由于蔬菜种类以及土壤类型的不同,导致吸收重金属的机制不同。

2.3 重金属 Cd、Pb、Zn 在芹菜中的迁移特征
迁移率是植物体地上部分的重金属含量与地下部分重金属含量之间的比值,常用来反应重金属元素在植物体内的迁移能力。重金属 Cd、Pb、Zn 在芹菜中的迁移特征见表 3。

表 3 芹菜中 Cd、Pb、Zn 的迁移系数

Table 3 The transfer coefficient of heavy metals in celery

项目 Item		处理 Treatments								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
迁移系数 Transfer coefficient	Cd	0.1613	0.1963	0.2942	0.5248	0.2059	0.2162	0.0862	0.1778	0.1646
	Pb	0.5273	0.1203	0.0922	0.0908	0.0076	0.3781	0.3332	0.0837	0.0886
	Zn	0.6799	0.3452	0.4345	0.4605	0.2945	0.3264	0.0876	0.2383	0.2198

由表 3 可知,重金属元素在芹菜体内迁移能力大小顺序为 $Zn > Cd > Pb$ 。其中 Pb 迁移能力最弱,有研究表明 Pb 进入植物根部后,易在根部淀积而失去活性^[20],而 Zn 是植物生长的必需元素,在芹菜体内迁移能力最大。随着添加重金属量增大,迁移率基本呈减小趋势,表明随着施加重金属量的增大,根系重金属向茎叶中转移能力逐渐降低,Pb 和 Zn 在对照中迁移率最大。说明添加外源重金属后,芹菜根中 Pb 和 Zn 难以向芹菜叶中迁移。重金属元素在土壤—植物体系中迁移性的差异,对同一植物来说,除了元素本身的特性外,还与其在土壤中的化学行为如土壤对元素的吸持特性等密切相关^[20]。

3 结 论

1) 随着土壤中重金属含量增大,芹菜根和叶中重金属含量也随之增大,当 Pb 和 Zn 浓度分别达到 700 mg/kg 和 600 mg/kg 时,芹菜叶中重金属含量有下降趋势。

2) 芹菜根对 Cd、Pb、Zn 的吸收量与土壤中 Cd、Pb、Zn 含量、外源添加 Cd、Pb、Zn 量的相关系数都达到极显著正相关。芹菜叶对 Cd、Zn 的吸收量与土壤中 Cd、Zn 含量、外源添加 Cd、Zn 量的相关系数也达到极显著正相关。

3) 对土壤中污染重金属(Cd、Pb、Zn)和芹菜根和叶中重金属(Cd、Pb、Zn)进行多元线性回归分析,得出芹菜吸收 Cd、Pb、Zn 并没有受到共存元素的影响。

4) 芹菜根和叶对重金属的富集能力表现为 $Cd > Zn > Pb$,重金属元素在芹菜体内迁移能力大小顺序为 $Zn > Cd > Pb$ 。

致谢:衷心感谢南忠仁教授的精心指导,以及师兄师姐在实验过程中给予的帮助和支持。

参 考 文 献:

- [1] 周启星,宋玉芳.污染土壤修复原理与方法[M].北京:科学出版社,2004:16—18.
- [2] Elrashidi M A, Connor G A. Influence of Solution Composition on Sorption of Zinc by Soils[J]. Soil Sci Soc Am,1982,46:1153—1158.

- [3] Zhou LX, Wong JWC. Effect of Dissolved Organic Matter from Sludge and Sludge Compost on Soil Copper Sorption[J]. Environ. Qual, 2001,30:878—883.
- [4] Naidul R, Sumner ME, Harter RD. Sorption of heavy metals in strongly weathered soils: an overview[J]. Environmental Geochemistry and Health, 1998,20:5—9.
- [5] Dahmani - Muller H, Oort F V, Gelie, et al. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metallurgical plant[J]. Environmental Pollution, 2000,109:231—238.
- [6] 许中坚,吴灿辉,刘 芬,等.典型铅锌冶炼厂周边土壤重金属复合污染特征研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007,22(1):111—114.
- [7] Teutsch N, Erel Y, Halicz L, et al. Distribution of natural and anthropogenic lead in Mediterranean soils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001,65(17):2853—2864.
- [8] 郑春荣,陈怀满.土壤—水稻体系中污染重金属的迁移及其对水稻的影响[J].环境科学学报,1990,10(2):145—151.
- [9] 郑春荣,陈怀满.复合污染对水稻生长影响[J].土壤,1989,21(1):10—14.
- [10] 罗厚枚,王宏康.土壤重金属复合污染对作物的影响[J].环境化学,1994,13(5):427—432.
- [11] 余国营,吴燕玉.重金属复合污染对大豆生长的影响及其综合评价研究[J].应用生态学报,1995,6(4):433—439.
- [12] 宋 菲,郭玉文,刘孝义,等.镉、锌、铅复合污染对菠菜的影响[J].农业环境保护,1996,15(1):9—14.
- [13] 吴燕玉,余国营,王 新,等. Cd、Pb、Cu、Zn、As 复合污染对水稻的影响[J].农业环境保护,1998,17(2):49—54.
- [14] 王 新,吴燕玉.不同作物对重金属复合污染物吸收特性的研究[J].农业环境保护,1998,17(5):193—196.
- [15] 游植麟.土壤受镉铬铅复合污染的生物效应研究[J].农业环境保护,1997,16(3):131—137.
- [16] 沈阳农业大学.沈阳市部分蔬菜区灌溉用水、菜田土壤及蔬菜中重金属含量情况的调查报告[R].沈阳:沈阳农业大学,1988:5—8.
- [17] 环境污染分析科研协作组.环境污染分析方法[M].北京:北京出版社,1982.
- [18] 胡 斌,张丽娟,李东艳,等.土壤 Pb、Zn 复合污染对作物吸收重金属的影响[J].河南农业科学,2007,4:68—71.
- [19] 翁高艺,孙小峰,吴龙华,等.铜锌铅复合污染土壤上香薷植物的生长和重金属吸收动态[J].土壤,2006,38(5):602—608.
- [20] 李忠海,王海燕,梁文彬,等.土壤镉、锌、铅复合污染对芹菜的影响[J].中南林业学院学报,2002,3(1):36—39.
- [21] 李一棍.土壤—蔬菜系统重金属富集规律研究[J].沿海企业与科技,2007,2(5):20—23.
- [22] 王松良,郑金贵.13 种小白菜基因型对 Cd、Pb、As 累积特征比较[J].福建农林大学学报,2005,34(3):304—308.

(英文摘要下转第 170 页)

- [3] 王念启,尹桥良.机械化深松作业技术对土壤性能的影响[J].生产率系统,2003,(13):49—51.
- [4] Nidal H. Abu - Hamdeh. Compaction and subsoiling effects on corn growth and soil bulk density[J]. Soil Science Society of America, 2003,67(4):1212—1218.
- [5] Henderson H D, Almassi M, Malik A A, et al. Deep tillage in the Beqa'a valley, Lebanon[J]. Transactions of the ASAE, 1981,23(6):1466—1470.
- [6] 宰松梅,仵峰.粘质土旱作深松保墒试验研究[J].灌溉排水,1999,18(3):51.
- [7] 丁昆仑,Hann M J.深松耕作对土壤水分物理特性及作物生长的影响[J].中国农村水利水电,1997,(11):13—16.
- [8] 黄毅,邹洪涛,虞娜,等.东北半干旱区秋后玉米地不同处理方式对土壤水分状况的影响[J].水土保持研究,2006,2(13):34—36.
- [9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

Effect of deep loosening cultivation on soil nutrients and corn yield in semiarid region of Western Liaoning Province

ZHANG Yu-ling, ZHANG Yu-long, HUANG Yi, ZOU Hong-tao, XIN Dong-xu, ZHANG Zhe-yuan

(College of Land and Environment / Liaoning Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment,
Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110161, China)

Abstract: This paper discussed the effect of inter-tillage on soil nutrients and corn yield by field experiment in dry-farming agricultural demonstration area of Fuxin in Liaoning Province. The results showed that, compared with traditional cultivation, deep loosening cultivation increased the content of soil organic in 0 ~ 30 cm soil layer and the content of total N, P and K in 0 ~ 20 cm soil layer, and it improved significantly the content of soil total N ($P < 5\%$). It increased the content of alkaline hydrolytic nitrogen in 0 ~ 20 cm soil layer and the content of available potassium in 0 ~ 30 cm soil layer, and increased significantly the amount of available potassium in 0 ~ 10 cm soil layer ($P < 5\%$). Deep loosening cultivation also increased significantly the content of available phosphorus in 10 ~ 30 cm layer ($P < 5\%$). Thus it increased the corn yield in this area, and the range of increase was 7.80%.

Key words: deep loosening cultivation; soil nutrient; corn yield; semiarid region of Western Liaoning Province

(上接第 166 页)

Enrichment and transfer characters of compound pollution with cadmium, zinc and lead in celery in arid oasis soil

HU Xiao-na, NAN Zhong-ren, LIU Xiao-wen, ZHAO Zhuan-jun, LI Yuan, HUANG Huang

(National Laboratory of Western China's Environmental System & College of Resources and
Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The soil for test was sampled from arid oasis region and the characteristics of transfer and enrichment of Cd, Zn and Pb in soil-celery system was investigated through pot experiments. The results show that with the increase of concentrations of heavy metals added into the soil, the concentrations of heavy metals in celery roots and leaves also increase; There are extremely significant linear relationship between the contents of the three heavy metals accumulated in celery roots and their contents in soil; The linear relationship between the contents of Cd and Zn accumulated in celery leaves and their contents in soil is also extremely significant. The regression analysis shows that the uptake of Cd, Pb and Zn by celery is not affected by co-existent elements; The enrichment factors of heavy metals from soil to root and leaf is in the order of $Cd > Zn > Pb$, and the transfer factors of heavy metals in celery is in the order of $Zn > Cd > Pb$.

Key words: heavy metal; celery; transfer; enrichment