

# 佛山市某工业区周边蔬菜重金属富集特征的研究

李军辉<sup>1</sup>, 卢 瑛<sup>1</sup>, 尹 伟<sup>1</sup>, 聂呈荣<sup>2</sup>, 吴大付<sup>3</sup>, 张 朝<sup>1</sup>, 陈春霞<sup>1</sup>, 董 飞<sup>1</sup>

(1 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642; 2 佛山科学技术学院 作物遗传育种研究所, 广东 佛山 528231; 3 河南科技学院 环境科学系, 河南 新乡 453003)

**摘要:**采集佛山市某工业区周边农田种植的蔬菜可食部分和对应的土壤耕层样品,分析了蔬菜和土壤中 Zn、Cu、Pb、Cd 含量;根据国家食品中重金属限量标准,评价了蔬菜中重金属污染状况,并研究了不同种类蔬菜中重金属的积累特性。结果表明,除 2 个蕹菜样品中 Pb 和 1 个葱样品中 Cd 外,所有蔬菜样品中 Zn、Cu、Pb、Cd 含量均低于国家食品限量标准;不同重金属元素在蔬菜中的富集系数大小为 Cd > Zn > Cu > Pb;不同种类蔬菜对土壤重金属的富集系数为叶菜类 > 瓜类;蔬菜 Zn 含量与土壤 Zn 含量具有显著相关性,但蔬菜 Cu、Pb 和 Cd 含量与土壤中对对应元素含量没有显著相关性。就食品安全而言,瓜类蔬菜比叶菜类蔬菜更适宜在该工业区周边农田种植。

**关键词:**蔬菜; 重金属; 富集系数; 工业区

中图分类号:X173

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2008)04-0017-04

## Accumulation of Heavy Metals in Vegetables Grown Around an Industrial Area in Foshan

LI Jun-hui<sup>1</sup>, LU Ying<sup>1</sup>, YIN Wei<sup>1</sup>, NIE Cheng-rong<sup>2</sup>, WU Da-fu<sup>3</sup>,  
ZHANG Chao<sup>1</sup>, CHEN Chun-xia<sup>1</sup>, DONG Fei<sup>1</sup>

(1 College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2 Institute of Crop Genetics and Breeding, Foshan College of Science and Technology, Foshan 528231, China;

3 Department of Resources and Environment Science, He'nan College of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

**Abstract:** The concentrations of Zn, Cu, Pb and Cd in edible part of vegetables and corresponding surface soil samples collected from the fields near an industrial area in Foshan were investigated to evaluate safety for human consumption and calculate accumulation factors, i. e. the ratio of metal concentration (fresh mass) in edible part of vegetable to the total metal concentration in soil. The results indicated that the contents of Zn, Cu, Pb and Cd in vegetables were less than the national tolerance limit in foods with the exception of two water spinach (*Ipomoea aquatica*) samples for Pb and one spring onion (*Allium fistulosum*) sample for Cd. The accumulation factors of Zn, Cu, Pb and Cd in vegetables decreased in the order of Cd > Zn > Cu > Pb. The accumulation factors of heavy metals for different vegetable species were significantly different, and the order was leafy vegetables > gourd vegetables. Significant correlations did not exist between the heavy metal concentrations in soil and vegetable samples excepting Zn. With respect to food safety for human consumption, gourd vegetables are more suitable grown than leafy vegetables in this area.

**Key words:** vegetable; heavy metal; accumulation factor; industrial area

收稿日期:2007-11-29

作者简介:李军辉(1982—),男,硕士研究生; 通讯作者:卢 瑛(1966—),男,副教授,E-mail: luying@scau.edu.cn

基金项目:土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(0551000019);广东省科技计划项目(2004B33301012, 2007A020100002-7)

随着经济的快速发展和人口的不断增加,城市化和工业化的进程日益加快,由此导致的农田土壤和农产品重金属污染问题已引起普遍关注<sup>[1-7]</sup>. 污水灌溉、城市污泥的施用、工业和城市废弃物的排放等,使城市和工业区周边的农田土壤重金属积累,影响到农产品安全和人体健康<sup>[2-3,5,8]</sup>. 蔬菜是人们日常生活中常用的食物之一,其中积累的重金属可通过食物链进入人体而给人们健康带来潜在危害<sup>[1,4,6]</sup>. 研究表明,不同种类和品种的蔬菜由于基因型和吸收重金属元素的生理生化机制差异,其重金属元素的累积量差异较大<sup>[9-11]</sup>. 本文通过研究佛山某工业区周边种植的6种常见蔬菜(节瓜、瓠子、葱、莪菜、小白菜和西洋菜)中Zn、Cu、Pb和Cd富集特征,旨在筛选出对土壤重金属的吸收、富集能力低的蔬菜种类,为科学利用工业区周边农田土壤资源,合理进行蔬菜的生产布局,防止蔬菜重金属污染,增进人类健康提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集

2006年4月采集了佛山市某工业区周边5个田块种植的节瓜、瓠子、葱、莪菜、小白菜和西洋菜共19个蔬菜样品,同时采集了对应的耕层土壤(0~15 cm),样点的分布如图1所示. 蔬菜样品选取可食部分,洗净之后,65℃烘干至恒质量,磨碎通过2 mm尼龙筛. 土壤样品风干后磨碎通过0.15 mm尼龙筛.

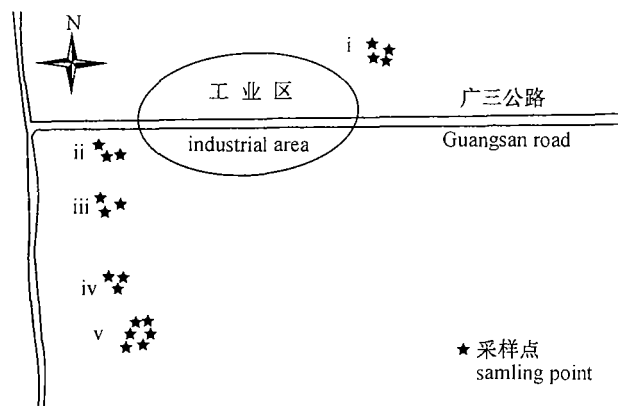


图1 采样点分布示意图

Fig.1 Distribution of sampling points

### 1.2 测定方法

蔬菜样品用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮<sup>[12]</sup>,土壤样品用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 消煮<sup>[12]</sup>. 待测液中Zn、Cu、Pb和Cd含量用原子吸收分光光谱仪测定(HITACHI Z-5300).

### 1.3 蔬菜质量评价及重金属富集特征

以食品中Zn、Cu、Pb和Cd限量卫生标准<sup>[13-16]</sup>作为蔬菜质量评价标准. 蔬菜中Zn、Cu、Pb和Cd的最大允许限量分别为20、10、0.2和0.05  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

单项污染指数<sup>[17]</sup>:  $P_i = C_i/S_i$ , 式中,  $P_i$ 为蔬菜中*i*元素的污染指数,  $C_i$ 为蔬菜中*i*元素含量,  $S_i$ 为蔬菜中*i*元素的最大允许限量.

综合污染指数<sup>[17]</sup>: 采用内梅罗综合污染指数法,  $P_{\text{综}} = \{[(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2]/2\}^{1/2}$ , 式中,  $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为蔬菜中重金属元素污染指数最大值,  $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为各污染指数的平均值.

蔬菜评价结果划分为5级:  $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 为安全,  $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$ 为警戒级,  $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$ 为轻污染,  $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$ 为中污染,  $P_{\text{综}} > 3.0$ 为重污染.

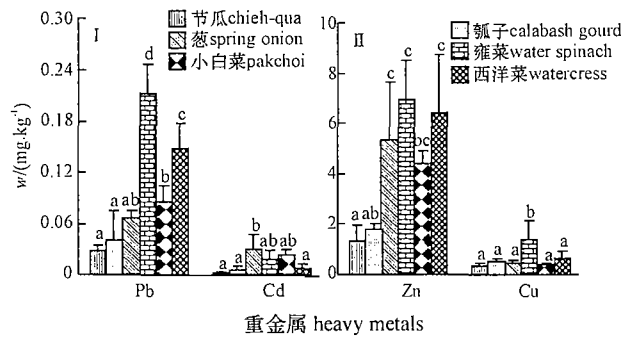
利用富集系数,即蔬菜可食部分的重金属含量与土壤重金属含量的比值,来衡量蔬菜中的重金属质量分数与土壤重金属质量分数的相关性. 根据不同种类蔬菜中重金属富集系数大小,筛选抗土壤重金属污染能力强的蔬菜种类.

## 2 结果与分析

### 2.1 蔬菜中重金属含量及质量评价

不同种类蔬菜中重金属Zn、Cu、Pb和Cd质量分数(鲜质量计)如图2所示. 图2的结果表明,蔬菜中Zn、Cu、Pb和Cd质量分数范围分别为:0.900~9.080、0.210~2.240、0.017~0.250、0.002~0.053  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 不同种类蔬菜之间重金属含量存在着显著差异,尤其是蔬菜中Zn和Pb的含量. 莪菜中Zn、Cu和Pb含量最高,其次为西洋菜;葱中Cd含量最高;节瓜中Zn、Cu、Pb和Cd的含量最低. 总体来讲,瓜类蔬菜(节瓜和瓠子)比叶菜类蔬菜(莪菜、小白菜、西洋菜和葱)重金属含量低. 相关分析结果(表1)表明,蔬菜中Zn与Pb、Cd含量之间、Cu与Pb含量之间有极显著或显著的相关性,这说明它们之间具有同源关系或复合污染.

根据国家Zn、Cu、Pb和Cd的限量卫生标准,仅有3个蔬菜样品重金属含量超标,分别是2个莪菜样品中的Pb(0.21和0.25  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和1个葱样品中的Cd(0.053  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),其他样品均低于重金属限量卫生标准. 不同种类蔬菜的Zn、Cu、Pb和Cd的单项污染指数,除莪菜Pb为1.06外,其余均小于1. 节瓜的Zn、Cu、Pb和Cd的单项污染指数最小,分别是0.032、0.051、0.067和0.130(图3-I). 不同种类蔬菜综合污染指数为莪菜(0.82) > 西洋菜(0.57) > 葱(0.47) > 小白菜(0.37) > 瓠子(0.17) > 节瓜

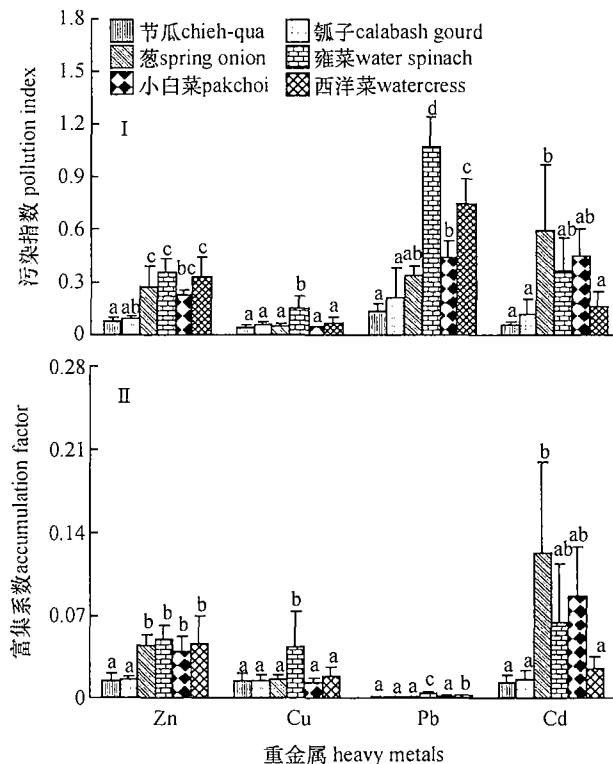


图中具有不同字母的表示不同蔬菜种类间重金属元素含量差异达 0.05 显著水平 Different letters are significantly different at the 0.05 level

图2 不同种类蔬菜中重金属平均含量

Fig. 2 Average concentrations of Zn, Cu, Pb and Cd in vegetable species

(0.10). 茼蒿的综合污染指数大于 0.7, 处于警戒级水平; 其余种类蔬菜均小于 0.7, 符合无公害食品要求. 这表明该区域种植的蔬菜基本上达到食品卫生标准, 还没有造成明显重金属污染. 建议农业或环保部门进行定期监测, 密切关注工业生产对周边农业环境和农产品重金属含量的影响.



图中具有不同字母的表示不同蔬菜种类间重金属元素含量差异达 0.05 显著水平 Different letters are significantly different at the 0.05 level

图3 不同种类蔬菜重金属污染指数和富集系数

Fig. 3 Pollution indexes and accumulation factors of heavy metals in vegetable species

## 2.2 蔬菜中重金属富集特征

研究结果(图 3-II)表明, Zn、Cu、Pb 和 Cd 元素在蔬菜中的富集特征明显不同. 其中, Pb 的富集系

数最小, 在 0.001 3(葱)~0.004 5(茼蒿)之间, 平均值为 0.002 0, 与 Cu (0.020)、Zn (0.350)、Cd (0.540)相差极大; Cd 的富集系数最大; 各重金属元素在蔬菜中富集系数顺序为  $Cd > Zn > Cu > Pb$ . 不同种类蔬菜之间 Zn、Cu、Pb 和 Cd 元素的富集系数也存在较大差异, 瓜类蔬菜(瓠子和节瓜) Zn、Cu、Pb 和 Cd 元素的富集系数最小.

## 2.3 土壤和蔬菜重金属的相关性分析

为了了解土壤和蔬菜中 Zn、Cu、Pb 和 Cd 含量之间的关系, 对土壤和蔬菜中 Zn、Cu、Pb 和 Cd 含量进行了相关分析. 相关分析的结果表明(表 1), 蔬菜中 Zn 含量与土壤 Zn 含量之间的相关性达到了显著水平, 而蔬菜中 Cu、Pb 和 Cd 含量与土壤含量之间均无显著的相关性.

表1 蔬菜重金属与土壤重金属相关关系<sup>1)</sup>

Tab. 1 Correlations between the contents of heavy metals in soils and those in vegetables  $n = 19$

| 项目 item         | Zn <sub>菜</sub> | Cu <sub>菜</sub> | Pb <sub>菜</sub> | Cd <sub>菜</sub> | Zn <sub>土</sub> | Cu <sub>土</sub> | Pb <sub>土</sub> | Cd <sub>土</sub> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Zn <sub>菜</sub> | 1               | 0.425           | 0.728 **        | 0.482 *         | 0.518 *         | 0.357           | 0.43            | 0.338           |
| Cu <sub>菜</sub> |                 | 1               | 0.635 **        | 0.156           | 0.163           | 0.122           | 0.16            | 0.051           |
| Pb <sub>菜</sub> |                 |                 | 1               | 0.006           | 0.335           | 0.271           | -0.004          | 0.011           |
| Cd <sub>菜</sub> |                 |                 |                 | 1               | 0.027           | 0.132           | 0.455           | 0.367           |

1) 采用 Pearson 相关分析, 双尾检验, \*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$

## 3 讨论与结论

Kabata-Pendias 研究表明<sup>[18]</sup>, 污染土壤中 Zn、Cu、Pb 和 Cd 向溶液中迁移系数大小是  $Cd > Zn > Cu > Pb$ , 这与本研究蔬菜中的富集系数大小顺序完全一致. Zheng 等<sup>[6]</sup>对葫芦岛锌厂周围土壤和蔬菜的研究也得出了完全相同的结果. Cd 的富集系数最大, 也被认为是最容易通过土壤-植物-动物食物链被富集的元素<sup>[19]</sup>. 由于作物主要是通过根系从土壤溶液中吸收元素, 因此土壤中的元素向土壤溶液中迁移能力直接影响到作物对该元素的吸收和富集.

众多研究一致表明, 不同种类蔬菜对重金属元素的吸收、富集存在明显的差异, 土壤中的重金属元素最容易向叶菜类蔬菜中迁移积累<sup>[1-2, 6-7, 9-10]</sup>. 从以上分析得知, 瓜类蔬菜(瓠子和节瓜) Zn、Cu、Pb 和 Cd 元素的富集系数最小. 这表明在相同土壤条件下, 瓜类蔬菜比叶菜类蔬菜从土壤中吸收、积累更少的重金属, 蔬菜中重金属含量低, 食用更安全. 这与蔬菜的遗传特性、生长期以及对污染物敏感程度等因素有关. 不同种类蔬菜积累重金属元素的差异, 可指导工业区周边土壤的合理利用和蔬菜的科学布

局,降低蔬菜中重金属的积累,保障蔬菜食用安全.根据本研究结果,就食品安全而言,研究区域种植的蔬菜样品中,除2个莴菜样品 Pb 超标和1个葱样品 Cd 超标外,其余样品均处于清洁水平,该区域种植的蔬菜基本达到食品卫生标准,瓜类蔬菜比叶菜类蔬菜更适宜在该工业区周边农田种植.

蔬菜 Zn 含量与土壤 Zn 含量具有显著相关性,但蔬菜 Cu、Pb 和 Cd 含量与土壤中对对应元素含量没有显著相关性.蔬菜重金属含量与土壤含量之间表现出弱的相关性表明研究区域蔬菜中重金属的积累并不完全决定于土壤重金属的全量,可能与重金属在土壤中的化学结合形态和影响土壤重金属的生物有效性的土壤条件(如土壤 pH、Eh、有机质、粘粒含量、黏土矿物类型、共存元素等)有关,还可能受到其他环境因素(如大气沉降物和灌溉水中重金属含量等)影响. Voutsas 等<sup>[20]</sup>研究表明,希腊某工业区种植的叶菜类蔬菜中 Pb 和 Cd 高积累是由于大气沉降物而导致的. Kisku 等<sup>[21]</sup>报道在利用工业污水灌溉条件下,土壤中重金属含量与农作物(包括蔬菜)中重金属含量没有显著的相关性.其他一些工业区周边的研究<sup>[2,5]</sup>也有相类似的报道.

#### 参考文献:

- [1] CUI Y J, ZHU Y G, ZHAI R H, et al. Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nan-ning, China [J]. *Environment International*, 2004 (30): 785-791.
- [2] FYTIANOS K, KATSIANIS G, TRIANTAFYLOU P, et al. Accumulation of heavy metals in vegetables grown in an industrial area in relation to soil [J]. *Environmental Contamination and Toxicology*, 2001 (67): 423-430.
- [3] KACHENKO A G, SINGH B. Heavy metals contamination in vegetables grown in urban and metal smelter contaminated sites in Australia [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2006 (169): 101-123.
- [4] LI Y, WANG Y B, GOU X, et al. Risk assessment of heavy metals in soils and vegetables around non-ferrous metals mining and smelting sites, Baiyin, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006 (18): 1124-1134.
- [5] YAN S, LING Q C, BAO Z Y. Metals contamination in soils and vegetables in metal smelter contaminated sites in Huangshi, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 7(9): 361-366.
- [6] ZHENG N, WANG Q C, ZHENG D M. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Hualiao zinc plant in China via consumption of vegetables [J]. *Science of the Total Environment*, 2007 (383): 81-89.
- [7] 谢正苗,李静,徐建明,等.杭州市郊蔬菜基地土壤和蔬菜中 Pb、Zn 和 Cu 含量的环境质量评价[J]. *环境科学*, 2006(27): 742-747.
- [8] ALLOWAY B J. *Heavy Metals in Soils* [M]. 2nd ed. London: Blackie Academic & Professional, 1995.
- [9] ALEXANDER P D, ALLOWAY B J, DOURADO A M. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables [J]. *Environmental Pollution*, 2006 (144): 736-745.
- [10] WANG G, SU M Y, CHEN Y H, et al. Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in southeastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2006 (144): 127-135.
- [11] 薛艳,沈振国,周东美.蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理[J]. *土壤*, 2005(37): 32-36.
- [12] 陈亚华,黄少华,刘胜环,等.南京地区农田土壤和蔬菜重金属污染状况研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2006(15): 356-360.
- [13] 中华人民共和国卫生部. GB 14935—94 食品中铅限量卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [14] 中华人民共和国卫生部. GB 15201—94 食品中镉限量卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [15] 中华人民共和国卫生部. GB 15199—94 食品中铜限量卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [16] 中华人民共和国卫生部. GB 13106—91 食品中锌限量卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [17] 姚春霞,陈振楼,张菊,等.上海市浦东新区土壤及蔬菜重金属现状调查及评价[J]. *土壤通报*, 2005, 36 (6): 884-887.
- [18] KABATA-PENDIAS A. Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue [J]. *Geoderma*, 2004 (122): 143-149.
- [19] PEIJNENBURG W, BAERSELMAN R, GROOT A D, et al. Quantification of metal bioavailability for lettuce (*Lactuca sativa* L.) in field soils [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000 (39): 420-430.
- [20] VOUTSA D, GRIMANIS A, SAMARA C. Trace elements in vegetables grown in an industrial area in relation to soil and air particulate matter [J]. *Environmental Pollution*, 1996(94): 325-335.
- [21] KISKU G C, BARMAN S C, BHARGAVA S K. Contamination of soil and plants with potentially toxic elements irrigated with mixed industrial effluent and its implication on the environment [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000(120): 121-137.

【责任编辑 周志红】