

芜湖市三山区蔬菜中重金属富集特征及健康风险评估

方凤满,汪琳琳,谢宏芳,王海东

(安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241003)

摘要:通过采集蔬菜 and 对应土壤样品进行室内分析测试,研究了芜湖市三山区蔬菜和土壤中重金属的含量分布、富集特征及其经食入途径对人体的健康风险评估。结果表明,与食品中污染物限量值相比较,蔬菜中 As、Zn、Cu、Pb 和 Cr 含量均未超标。不同品种蔬菜中重金属含量不同,花菜和青菜中 As、Zn、Pb、Cr、Fe、Ni、Co 和 Mn 的含量相对于其他蔬菜中的同种重金属含量要高。除 Cu、Cr 外,其他重金属在根茎类蔬菜中的含量最低,除 Pb 外,其他重金属在花果类中的含量最高。各元素平均富集系数大小为:Zn>Cu>Mn>Cr>Ni>Pb>As>Co>Fe。叶菜类对 As、Pb 的富集系数最大,花果类对其他重金属的富集明显。三山区蔬菜对重金属的富集系数总体偏低,主要是受土壤 pH 值偏高、周围良好的大气环境质量的影响。三山区蔬菜中重金属所致的健康风险主要来自化学致癌物 Cr,而花果类蔬菜中 Cr 含量最高,因此该区应加强土壤 Cr 的防治,居民应减少花果类蔬菜的种植和摄入,保障其饮食安全。

关键词:重金属;蔬菜;富集特征;健康风险评估;三山区

中图分类号:X835 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1471-06

Enrichment Characteristic and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Vegetables in Sanshan District, Wuhu City, China

FANG Feng-man, WANG Lin-lin, XIE Hong-fang, WANG Hai-dong

(College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China)

Abstract: Vegetables and corresponding soils were collected from Sanshan district in Wuhu City, China. Concentrations, accumulation features and health risk assessment of heavy metals were analyzed. Results showed that: In addition to Cr, Ni, other heavy metals concentration especially for As of soil in Sanshan district exceeded the soil background values, but heavy metals concentration in soil in Sanshan district were lower than those reported for other regions. Concentrations of As, Zn, Cu, Pb and Cr in the vegetables were not exceeded, compared to the value of the limited food contaminants. Different type vegetables had different metal concentration, As, Zn, Pb, Cr, Fe, Ni, Co and Mn concentration in cauliflower and cabbage were higher than those in other vegetables. In addition to Cu, Cr, other heavy metals in root vegetable had the lowest concentrations, in addition to Pb, other heavy metals concentration in the flowers and fruits were the highest. The order of vegetables enrichment factors of heavy metals from soil referred as to Zn>Cu>Mn>Cr>Ni>Pb>As>Co>Fe. Enrichment factor of Pb and As were the largest in leaf pairs, and enrichment factor of other heavy metals were the largest in flowers and fruits. Vegetables enrichment capacity of heavy metals from alkaline soil was low. Human health risks from heavy metals in vegetables in Sanshan district were mainly caused by chemical carcinogens Cr. In particular, Cr concentration was high in flowers and fruits vegetable, so we should strengthen prevention and control of soil Cr in this area, and local residents should reduce planting flowers and fruits vegetable and intake them, then to ensure their food security.

Keywords: heavy metals; vegetable; enrichment characteristic; health risk assessment; Sanshan district

解决危害群众健康的重金属污染问题被国家环境保护部列为 2010 年污染防治工作的头等大事^[1]。随

着工业化、城市化的发展,城市及郊区的土壤成为重金属的主要累积场所,土壤中的重金属可通过“土壤-植物-人”的途径进入人体,对人类健康产生潜在的威胁^[2-3]。目前有关土壤-蔬菜系统中重金属的研究很多,如探讨重金属在土壤-蔬菜系统的迁移富集特征、影响因素及对人体的健康风险评估^[2-6],但由于蔬菜的遗传特性、生长期以及对重金属敏感程度、外界环境等因素影响,不同种类蔬菜积累重金属的差异较大,加

收稿日期:2010-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(40901258);安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2009A137);安徽省自然地理学省级重点学科资助

作者简介:方凤满(1974—),女,安徽池州人,博士,教授,主要从事表生环境中污染物的迁移与转化研究。

E-mail: ffm1974@mail.ahnu.edu.cn

上土壤生态系统自身的复杂性,致使土壤蔬菜系统中重金属的迁移富集规律没有得到一致认识。

芜湖市位于安徽省东南部、隶属于长江三角洲经济圈。三山区地处芜湖市主城区西南部,是全国重要的蔬菜生产基地,每日约有250万kg的蔬菜瓜果从这里运往新疆、南京、上海等大中城市菜市场,其品质以及重金属污染状况与人们的身体健康密切相关。对芜湖市三山区蔬菜重金属污染现状调查,及探讨经食用暴露对芜湖居民的饮食健康风险已刻不容缓,并在一定程度上为农业环境污染的治理和蔬菜品种的选择提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

三山区蔬菜基地地形平坦,土壤肥沃。pH值范围在7.01~8.82之间,平均值为7.87,呈弱碱性。通过实地考察和资料收集,对三山区蔬菜基地进行近似网格布点,分别采集青椒、青菜、大白菜、花菜、白萝卜、橄榄和莴笋7种蔬菜可食部分,对应采集土壤样品,每个蔬菜和土壤样品的重量不少于500g。采集蔬菜和土壤样品各57个。

1.2 样品处理与测试

蔬菜用自来水和去离子水冲洗,滤纸吸干菜样表面的水分后,置于烘箱中105℃杀青30min后,65℃烘至恒重,在此过程中计算蔬菜样品的含水量。烘干后用玛瑙研钵研磨过40目尼龙筛。土壤样品经自然风干后,玛瑙研钵研磨过100目尼龙筛。蔬菜样品经HNO₃-HClO₄消煮、土壤经HF-HNO₃-HClO₄消煮,ICP-OES测定其重金属含量^[7]。样品分析过程中插入国家标准植物样品GSV-3和国家标准土壤样品GSS-1进行对照试验,符合质控要求。本实验所用试剂均为优级纯,所用器皿均在10%的硝酸中浸泡24h以上,所有样品均做相应的试剂空白,平行样的测定达到了20%。蔬菜中重金属含量以鲜重计。

1.3 蔬菜中重金属健康风险评价方法

健康风险评价是20世纪80年代以来的新兴研究领域,它以风险度作为评价指标,定量描述环境污染对人体健康产生的危害。蔬菜中As、Cr致癌物和Cu、Zn、Pb非致癌物质的健康风险评价模型如下^[8-9]。

$$R^c = \sum_{i=1}^k R_{ig}^c, R_{ig}^c = [1 - \exp(-D_{ig} \cdot q_{ig})] / 70 \quad (1)$$

$$R^n = \sum_{i=1}^k R_{ig}^n, R_{ig}^n = (D_{ig} \cdot 10^{-6}) / (PAD_{ig} \cdot 70) \quad (2)$$

$$D_{ig} = 0.34 \cdot C_i / 60 \quad (3)$$

$$PAD_{ig} = RfD_{ig} / \text{安全因子} \quad (4)$$

(1)(2)式中: R^c 和 R_{ig}^c 分别为 k 种化学致癌物产生的总致癌年风险和化学致癌物 i 通过食入途径产生的平均个人致癌年风险, a^{-1} 。 R^n 和 R_{ig}^n 分别为 k 种化学非致癌物产生的总致癌年风险和化学非致癌物 i 通过食入途径产生的平均个人致癌年风险, a^{-1} ; D_{ig} 为化学致癌物 i 经食入途径的单位体重日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; q_{ig} 为化学致癌物通过食入途径致癌系数, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$;70为人类平均寿命, a ; PAD_{ig} 为化学非致癌物 i 通过食入途径的调整剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。(3)(4)式中:0.34为每日对蔬菜的平均食用量,kg;(其中果菜类为0.1,叶菜类为0.2,根茎类0.04^[10]); C_i 为蔬菜中重金属 i 的浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;60为成人平均体重,kg; RfD_{ig} 为化学非致癌物的食入途径参考剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$;本研究安全因子取值为10。根据国际癌症研究机构(IARC)和世界卫生组织(WHO)编制的分类系统,As和Cr的 q_{ig} 值分别取15和14,Pb、Zn、Cu的 RfD_{ig} 的值分别取 1.4×10^{-3} 、0.3、 5.0×10^{-3} 。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量水平

芜湖市三山区蔬菜土壤中重金属平均含量及相关统计值见表1。除Cr、Ni外,土壤中其他重金属含量均高于其土壤背景值,存在较为明显的积累现象,各元素的超标率分别为:As96.49%、Zn94.74%、Cu89.47%、Pb47.37%、Cr5.26%、Fe85.96%、Ni38.60%、Co98.24%和Mn89.47%,尤其以As含量($29.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)最为突出,是土壤背景值的2.8倍。这与改革开放以来芜湖市的城市化建设、工业活动以及农药化肥的施用,排放大量的As,从而在土壤中积累密切相关。与《农产品安全质量无公害蔬菜产地环境要求》GB/T 18407.1—2001对土壤环境质量要求的限制相比(pH>7.5),只有As超标较为普遍,超标率为75.44%,Zn、Cu、Pb、Cr、Ni未出现超标现象。各元素的变异系数均大于15%,属中等强度变异。

2.2 蔬菜重金属含量水平

三山区蔬菜中重金属平均含量及相关统计值见表2。与《食品中污染物限量》(GB 2762—2005)中的限量值相比,对蔬菜品质影响较大的As、Zn、Cu、Pb和Cr含量均未超标。各种金属的变异性较强(69.44%~91.11%),大于相应土壤中重金属的变异程度,说明蔬菜品种对重金属的富集积累差异明显。崇明岛蔬菜中

表 1 三山区蔬菜基地土壤重金属含量(mg·kg⁻¹, n=57)

Table 1 Heavy metals concentration in vegetable field soil of Sanshan(mg·kg⁻¹, n=57)

元素	浓度范围	平均值	标准差	变异系数/%	土壤背景值	国家二级标准
As	9.47~44.03	29.66	7.12	24.02	10.6	25
Zn	54.94~257.67	122.08	40.00	32.77	76.8	300
Cu	16.44~59.96	45.24	8.71	19.26	32.2	100
Pb	11.13~35.50	26.03	4.83	18.54	24.8	350
Cr	21.43~69.23	44.00	10.65	24.21	59	250
Fe	21 349.40~54 843.01	41 897.43	6 310.63	15.06	33 800	—
Ni	12.78~49.20	34.68	7.14	20.59	35	60
Co	9.15~27.40	21.92	3.30	15.05	14	—
Mn	380.99~869.81	688.24	123.50	17.94	511	—

表 2 三山区蔬菜重金属含量(mg·kg⁻¹, 鲜重计, n=57)

Table 2 Heavy metals concentration of vegetables in Sanshan(mg·kg⁻¹, FW, n=57)

元素	浓度范围	平均值	标准差	变异系数/%	蔬菜卫生标准限值	富集系数/%
As	0~0.041	0.007	0.006	85.71	0.5	0.023
Zn	0.656~9.868	1.786	1.263	70.72	20	1.465
Cu	0.110~2.013	0.312	0.273	87.50	10	0.86
Pb	0.003~0.048	0.015	0.012	80.00	0.2	0.05
Cr	0.006~0.249	0.045	0.041	91.11	0.5	0.109
Fe	1.678~20.535	4.727	3.313	70.09	—	0.011
Ni	0.011~0.154	0.036	0.025	69.44	0.6	0.104
Co	0.001~0.029	0.005	0.004	80.00	—	0.022
Mn	0.305~7.223	1.276	0.989	77.51	—	0.176

的 Pb、Cu 和 Zn 的含量明显高于三山区,这主要是由于崇明岛经济发达,蔬菜地离公路较近,机动车尾气排放等都造成蔬菜中重金属含量较高^[11]。东莞市蔬菜中的 Pb、As、Ni、Cr 和 Zn 的含量均比本研究区蔬菜中相应元素含量高,这是由于东莞市农田周边分布着密集的乡镇企业以及相对密集的公路交通造成的^[12]。总体来说,三山区蔬菜基地蔬菜中各种重金属平均含量较低,主要是因为蔬菜基地土壤金属(除 As 外)的含量较低,通过土壤-蔬菜系统在蔬菜中富集的较少,其次蔬菜基地周边无明显的污染源,大气中重金属含量较低,蔬菜通过叶片从大气中吸收的重金属含量也较低。

2.3 蔬菜重金属富集特征

重金属的富集系数是指蔬菜可食部分的重金属含量与土壤相应重金属含量之比,来衡量各种蔬菜对土壤重金属的吸收状况。富集系数愈大表明作物愈易从土壤中吸收该元素,即该元素的迁移性愈强。三山区各重金属的富集系数见表 2,远低于东莞市农田^[12]、湘江中下游农田^[13]、葫芦岛锌冶炼厂^[14]周边蔬菜地的重金属富集系数。分析其原因可知以上 3 处的土壤呈

酸性甚至强酸性,而三山区土壤呈碱性,可见土壤呈酸性有利于重金属随营养物质迁移到蔬菜中。三山区蔬菜中各种金属元素平均富集系数大小为:Zn>Cu>Mn>Cr>Ni>Pb>As>Co>Fe(表 2)。其中 Zn、Cu 的吸收系数明显高于其他元素,说明其迁移能力较强,容易被蔬菜吸收,Mn、Ni、Cr 的移动性次之,而 Pb、As、Co、Fe 的迁移能力最差。这与湘江中下游^[13]和东莞市^[12]农田蔬菜中重金属富集系数大小顺序基本一致。Zn、Cu 的富集系数完全一致,而 As、Cr、Pb 等的富集系数有一定的差异,应该与菜样品种、土壤中该元素的赋存形态及大气中该元素的含量等因素有关。施泽明等^[15]研究发现,Cu、Zn 为高富集元素,As、Cr 为中等富集元素,Pb 为低富集元素,可见目前的研究基本达成共识,Zn、Cu 元素较易在蔬菜中富集。

2.4 蔬菜重金属健康风险评价

三山区蔬菜中的重金属通过食入途径所致的人健康危害年风险见表 3。As 和 Cr 的致癌个人年平均风险相差较大,Cr(1.49×10⁻⁴a⁻¹)的致癌风险水平是 As(8.50×10⁻⁶a⁻¹)的 17.5 倍。由化学非致癌重金属 Pb、Zn 和 Cu 通过蔬菜食入途径所引起的健康危害的个

表 3 化学致癌物和化学非致癌物通过蔬菜食入途径的健康危害个人平均年风险(a⁻¹)

化学致癌重金属个人年风险			化学非致癌重金属个人年风险				总个人年风险
As	Cr	合计	Pb	Zn	Cu	合计	
8.50×10 ⁻⁶	1.49×10 ⁻⁴	1.57×10 ⁻⁴	8.67×10 ⁻⁹	4.82×10 ⁻⁹	5.05×10 ⁻⁸	6.40×10 ⁻⁸	1.57×10 ⁻⁴

人年平均风险,以 Cu(5.05×10⁻⁸a⁻¹)最大,Pb(8.67×10⁻⁹a⁻¹)次之,Zn(4.82×10⁻⁹a⁻¹)最小。

3 讨论

3.1 蔬菜重金属含量差异分析

三山区同种重金属在不同蔬菜中的含量不同,花菜和青菜中 As、Zn、Pb、Cr、Fe、Ni、Co 和 Mn 的含量相对于其他蔬菜中相同重金属含量要高,尤其以 Fe、Ni、Cr、Pb 和 Zn 的含量明显,但各种蔬菜中 As、Cu 和 Co 的平均含量差异不大(图 1)。Zurera-Cosan 等^[16]调查结果也表明,蔬菜品种间重金属含量呈极显著差异,不同种类的蔬菜具有不同的生物学特性,对重金属的吸收积累量明显不同。按人们对蔬菜取食部分的

不同,将本次所采集的蔬菜分为叶菜类(包括橄榄、大白菜、青菜)、花果类(包括辣椒和花菜)以及根茎类(包括萝卜和莴笋),这 3 类蔬菜中 Fe、Zn、Mn、Ni、Co 和 As 的平均含量高低顺序为花果类>叶菜类>根茎类;Cu 和 Cr 的平均含量高低顺序为花果类>根茎类>叶菜类;Pb 的平均含量顺序为叶菜类>花果类>根茎类(图 2)。除 Pb 外,其他重金属在花果类中最高,除 Cu、Cr 外,其他重金属在根茎类中最低。贡冬梅等^[17]研究发现果菜类 Cu 含量高于叶菜类和根菜类,叶菜与根菜含量接近,与本研究相符。大量研究表明叶菜 Pb 含量最大,说明叶菜类可能对大气中气态或尘态 Pb 具有较强的表面吸附能力,也即 Pb 可能以大气污染为主要来源^[18-19]。

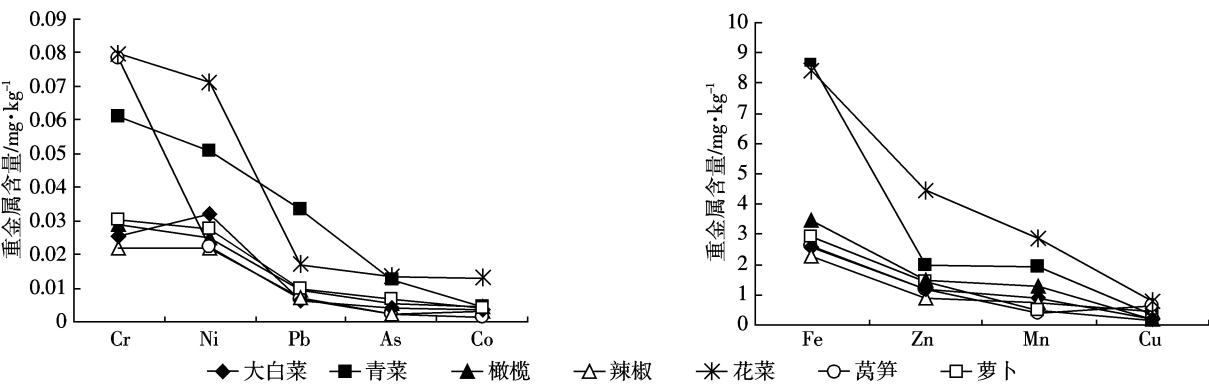


图 1 重金属在不同蔬菜中含量变化趋势

Figure 1 Trends of heavy metals in different vegetables

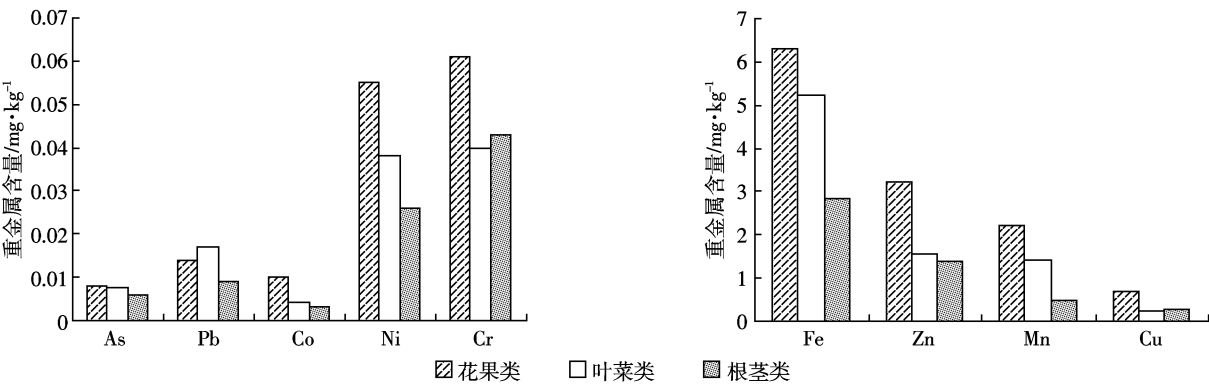


图 2 不同种类蔬菜中同种重金属含量(mg·kg⁻¹)

Figure 2 Concentration of heavy metal in the different type vegetable(mg·kg⁻¹)

3.2 蔬菜重金属富集特征分析

三山区不同种类蔬菜对不同重金属的富集系数见表 4。叶菜类对 As、Pb 的富集系数最大,花果类对其他重金属的富集最大,根茎类对 Cr、Cu 的富集系数较大。同一种蔬菜对不同元素的富集能力不同,大白菜、青菜、橄榄、花菜、萝卜对 Zn 的富集能力最大,辣椒、莴笋对 Cu 的富集最大。总体上,Zn、Cu 的富集系数最大,但因其是人体必需的微量元素,其正常摄入量 and 有害作用剂量之间范围较宽,人体一般不易发生 Zn、Cu 中毒,往往表现出缺乏。本研究蔬菜中 Zn、Cu 含量相对于国家食品卫生标准要比其他元素低得多。花果类对 Zn、Cu 的富集系数最大,当地居民为避免 Zn、Cu 的缺乏可多食用花果类蔬菜。而针对有毒金属 Pb、As 来讲,尽量减少叶菜类蔬菜的摄入,因此总体上通过对人体有益元素和有毒元素的分析,该区应多种植花果类和根茎类蔬菜,居民也应该以食用该类蔬菜为主,以利于避免有益元素的缺失和有毒元素的侵害。根据不同蔬菜对不同重金属的富集系数差异,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。如土壤中 Pb、As 含量较大的地区,应避免种植叶菜类蔬菜,而 Cr、Cu 含量高的土壤应避免种植花果类。

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。土壤重金属来源不同,其赋存形态差异较大,是导致其在土壤中迁移转化存在明显差异的主要因素,因此要加强土壤中重金属的生物有效性研究,才能更好地理解土壤-蔬菜系统中重金属的富集特征。当然土壤中重金属的生物有效性又与土壤 pH、有机质、粘粒含量、共存元素等因素有关,还受大气沉降物、灌溉水中重金属含量等环境因素的影响,因此仅从富集系数来反映蔬菜从土壤中吸收重金属的特征还存在一定的缺陷。特别是那些在大气中以高含量存在的重金属,对蔬菜重金属的富集影响较大。

3.3 健康风险评价

Cr 的致癌风险指数分别是国际辐射防护委员会(ICRP)和美国环境保护署(USEPA)推荐的最大可接

受风险水平 5×10^{-5} 和 1×10^{-4} 的 3 倍和 1.5 倍。As 的致癌风险低于 ICRP 和 USEPA 推荐的最大可接受风险水平。假设蔬菜中各种重金属对人体健康的毒性作用呈相加关系,则食入三山区蔬菜 As 和 Cr 的个人年风险总和为 $1.57 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$ 。Cr 和 As 的个人年风险分别占化学致癌重金属个人总年风险的 94.9% 和 5.1%。由此可见,Cr 是蔬菜产生健康风险的主要污染物。尤其是花果类蔬菜中的 Cr 含量较高,在该区土壤治理过程中,应加强 Cr 的防治,或是减少花果类蔬菜的种植,当地居民应减少花果类蔬菜的摄入,保障其饮食安全,降低健康风险。3 种非致癌重金属的健康危害的个人年平均风险均远低于 ICRP 和 USEPA 推荐的最大可接受风险水平。总体来说,三山区蔬菜中化学非致癌物对人体健康危害的个人年风险较低,处于安全水平。

4 结论

(1)三山区土壤中重金属除 Cr、Ni 外,其余重金属均超过土壤背景值。尤以 As 超标严重,总体相对于其他地区处于较低水平。

(2)与《食品中污染物限量》(GB 2762—2005)中的限量值相比较,蔬菜中重金属含量均未超标。不同品种蔬菜中的金属含量不同,总体上花菜和青菜中的重金属含量相对于其他蔬菜中同种重金属含量高。3 类蔬菜中 Fe、Zn、Mn、Ni、Co 和 As 的平均含量高低为花果类>叶菜类>根茎类;Cu 和 Cr 的平均含量高低为花果类>根茎类>叶菜类;Pb 的平均含量高低为叶菜类>花果类>根茎类。蔬菜各金属元素平均富集系数大小为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Co} > \text{Fe}$,其中,叶菜类对 As、Pb 的富集系数最大,花果类对其他重金属的富集最大。同一种蔬菜对不同元素的富集能力不同。相对其他地区,该区蔬菜对土壤中重金属的富集能力偏低,主要因为该区土壤呈碱性,但当土壤出现酸化趋势时,土壤中的重金属可溶性增强,容易迁移到蔬菜体内,造成潜在的危害。因此要注意加强土壤理化性质及重金属含量的监测,做好预防。

(3)由化学致癌重金属和化学非致癌重金属通过

表 4 不同种类蔬菜中重金属的富集系数(%)

Table 4 Enrichment factor of heavy metals in different types vegetables(%)

项目	As	Zn	Pb	Co	Ni	Fe	Mn	Cr	Cu
叶菜类	0.027	1.274	0.067	0.019	0.107	0.012	0.205	0.087	0.54
花果类	0.024	2.98	0.051	0.040	0.141	0.014	0.283	0.138	1.335
根茎类	0.019	1.033	0.036	0.016	0.082	0.007	0.071	0.104	0.695

蔬菜食入途径所引起的健康危害的总个人年风险为 $1.57 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$,三山区蔬菜中的重金属所致的健康风险主要来自化学致癌重金属Cr,尤其是花果类蔬菜中的Cr含量较高。因此,该区应加强土壤Cr的防治,居民应减少花果类蔬菜的种植和摄入,保障其饮食安全,降低健康风险。

参考文献:

- [1] 防治重金属污染列为环保部2010年头等大事[N]. 光明日报, 2010-01-13.
- [2] Rajesh K S, Madhoolika Agrawal, Fiona M Marshall. Heavy metals in vegetables collected from production and market sites of a tropical urban area of India[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2009, 47:583-591.
- [3] Hao X Z, Zhou D M, Huang D Q, et al. Heavy metal transfer from soil to vegetable in Southern Jiangsu Province, China[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(3):305-311.
- [4] 尹伟, 卢瑛, 甘海华, 等. 佛山市某工业区周边蔬菜土壤重金属含量与评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3):508-512.
YIN Wei, LU Ying, GAN Hai-hua, et al. Heavy metals concentrations and evaluation in soils around an industrial area in Foshan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):508-512.
- [5] 马瑾, 周永章, 窦磊, 等. 汕头韩江三角洲南部蔬菜重金属污染及因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):71-77.
MA Jin, ZHOU Yong-zhang, DOU Lei, et al. Investigation of heavy metals pollution in vegetables and influencing factors in South Hanjiang Delta, Shantou[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):71-77.
- [6] 秦文淑, 邹晓锦, 仇荣亮. 广州市蔬菜重金属污染现状及对人体健康风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1638-1642.
QIN Wen-shu, ZOU Xiao-jin, QIU Rong-liang. Health risk of heavy metals to the general public in Guangzhou, China via consumption of Vegetables[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1638-1642.
- [7] 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, 1999:205-227.
LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999:205-227.
- [8] 孙卉, 韩晋仙, 马建华. 开封市化肥河灌区小麦重金属含量及其健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2332-2337.
SUN Hui, HAN Jin-xian, MA Jian-hua. Health risk assessment of wheat seeds heavy metals in the sewage irrigation area of Huafei River, Kaifeng City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2332-2337.
- [9] 马瑾, 周永章, 窦磊, 等. 广东汕头市农业土壤和蔬菜铅含量及健康风险评估[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(6):77-79.
MA Jin, ZHOU Yong-zhang, DOU Lei, et al. Investigation in Shantou city, Guangdong, over the lead content in the soil and vegetables[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(6):77-79.
- [10] 谢华, 廖晓勇, 陈同斌, 等. 污染农田中植物的砷含量及其健康风险评估——以湖南郴州邓家塘为例[J]. 地理研究, 2005, 24(1):151-159.
XIE Hua, LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-bin, et al. Arsenic in plants of farmland and its healthy risk: A case study in an As-contaminated site in Dengjiatang, Chenzhou City, Hunan province[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(1):151-159.
- [11] 王军, 陈振楼, 王初, 等. 上海崇明岛蔬菜土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 环境科学, 2007, 28(3):647-651.
WANG Jun, CHEN Zhen-lou, WANG Chu, et al. Heavy metal content and ecological risk warning assessment of vegetable soils in Chongming Island, Shanghai City[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(3):647-651.
- [12] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[J]. 地理学报, 2008, 63(9):994-1003.
CAI Li-mei, MA Jin, ZHOU Yong-zhang, et al. Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong Province, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(9):994-1003.
- [13] WANG Li-xia, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables in the midstream and downstream of the Xiangjiang River, Hunan Province[J]. *Journal of Geography Science*, 2008, 18:353-362.
- [14] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 锌冶炼厂周围重金属在土壤—蔬菜系统中的迁移特征[J]. 环境科学, 2007, 28(6):1349-1355.
ZHENG Na, WANG Qi-chao, ZHENG Dong-mei. Transfer characteristics of mercury, lead, cadmium, zinc and cuprum from soil to vegetable around zinc smelting plant[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6):1349-1355.
- [15] 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):52-55.
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):52-55.
- [16] Zurera-Cosano G, Moreno-Rojas R, Salmeron-Egea, et al. Heavy metal uptake from green-house border soils for edib vegetables[J]. *J Sci Food Agric*, 1989, 49:307-314.
- [17] 贡冬梅, 茹淑华, 张国印, 等. 永年县典型蔬菜土壤和蔬菜重金属含量状况研究[J]. 河北农业科学, 2008, 12(7):88-90, 97.
GONG Dong-mei, RU Shu-hua, ZHANG Guo-yin, et al. Content of heavy metals in soil and vegetables from vegetable land of Yongnian County[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2008, 12(7):88-90, 97.
- [18] 朱兰保, 高升平, 盛蒂, 等. 蚌埠市蔬菜重金属污染研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(12):2772-2773.
ZHU Lan-bao, Gao Sheng-pin, Shen Di, et al. Analysis and evaluation on contamination of heavy metal in vegetables of Bengbu City[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, 34(12):2772-2773.
- [19] Voutsas D, Griman ISA, Samara A 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.