

北京市蔬菜重金属含量及健康风险评价

王北洪^{1,2}, 马智宏^{1,2}, 冯晓元^{1,2}, 王纪华^{1,2*}

(1. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097;

2. 农业部农产品质量安全风险评估实验室(北京), 北京 100097)

摘要: **目的** 研究北京市本地地产蔬菜和市售外地地产蔬菜中重金属污染情况, 评价经蔬菜膳食途径摄入重金属对人体健康风险。**方法** 采用原子吸收光谱法和原子荧光光谱法测定4种蔬菜样品中Pb、Cd、Cr、As、Hg含量, 并与中国食品中污染物限量标准进行比较; 采用美国环保署(USEPA)(2000)提出的健康风险模型, 通过计算目标危害系数(THQ、TTHQ)的方法预测蔬菜中重金属产生的健康风险。**结果** 327份蔬菜样品中的5种重金属均不超标; 从单一重金属风险来看, 成人和儿童膳食摄入所调查的4种北京市本地地产蔬菜和市售外地地产蔬菜是安全的; 从多种重金属复合风险来看, 部分北京市本地地产韭菜对儿童存在一定的膳食摄入风险, 4种市售外地地产蔬菜对成人和儿童不存在健康风险; 成人和儿童的复合健康风险主要由As引起。**结论** 在所调查的5种重金属中, 部分韭菜中的As经膳食途径摄入后会对儿童健康构成潜在威胁, 儿童因摄食蔬菜导致的重金属健康风险高于成人。

关键词: 蔬菜; 重金属; 健康风险; 北京

Concentrations and health risk evaluation of heavy metals in vegetables in Beijing

WANG Bei-Hong^{1,2}, MA Zhi-Hong^{1,2}, FENG Xiao-Yuan^{1,2}, WANG Ji-Hua^{1,2*}

(1. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing 100097, China; 2. Risk Assessment Lab for Agro-products (Beijing), Ministry of Agriculture P. R. China, Beijing 100097, China)

ABSTRACT: Objective To study the heavy metals content characteristics and examine the human health risk of heavy metal in vegetables produced in Beijing and that sold in Beijing markets produced from other provinces. **Methods** The atomic absorption spectrometer (AAS) and atomic fluorescence spectrometer (AFS) were adopted to detect heavy metal content of total lead (Pb), total cadmium (Cd), total chromium (Cr), total arsenic (As) and total mercury (Hg) in 4 kinds of vegetable samples. Those of results were compared with main vegetable standards of China. Under the healthy risk model proposed by USEPA (2000), the health risks of heavy metals were forecasted by the method of calculating the risk index (the target hazard quotient, THQ and TTHQ). **Results** Concentrations of the 5 heavy metals in all vegetables were all below the maximum allowable limits; for adults and children, 4 kinds of vegetables produced in Beijing and those sold in Beijing markets produced from other provinces were safe by analyzing THQ of single heavy metal; for children, some

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX201203001, KJCX20140302)

Fund: Supported by Innovation and Capacity-Building Projects by Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences (KJCX201203001, KJCX20140302)

*通讯作者: 王纪华, 研究员, 主要研究方向为农产品质量检测技术与信息技术的交叉与集成。E-mail: wangjh@nercita.org.cn

*Corresponding author: WANG Ji-Hua, Research Fellow, Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing 100097, China. E-mail: wangjh@nercita.org.cn

Chinese chive samples produced in Beijing were danger by analyzing TTHQ of multiple heavy metal; for adults, 4 kinds of vegetables produced in Beijing and those sold in Beijing markets produced from other provinces were safe by analyzing TTHQ of multiple heavy metal; overall health risks were mainly caused by As.

Conclusion With 5 kinds of investigated heavy metals, some As levels in Chinese chive posed a health risk to children, health risks to consume vegetables caused by heavy metals for children were bigger than adults.

KEY WORDS: vegetable; heavy metal; health risk; Beijing

1 引言

随着人们生活水平的提高和大众对食品安全的日益关注,国内外学者对蔬菜中的重金属含量及其所带来的居民健康风险也颇为关注^[1-11]。像铅(Pb)、汞(Hg)、铬(Cr)、砷(As)、镉(Cd)等重金属,对人类健康危害最大。人们暴露于重金属的主要途径是通过膳食摄入了被污染的食物。在我国,蔬菜作为每日膳食中必不可少的组成部分,其中所含有的重金属主要来源于土壤和水的污染。当所积累的污染物超过标准限量值后,蔬菜就会对人类健康产生威胁。

据北京市统计局最新公布的数据显示,2013年北京市常住人口为2115万人。而社保部门则认为,北京市的常住人口实际上已经接近3000万。随着本市人口不断增多,蔬菜消费量逐年攀升。据2014年12月2日千龙网新闻报道,“目前,北京市正在推进以‘调粮保菜,做精畜牧水产业’为核心的第五次农业结构调整,到2020年,全市菜田面积将由2013年的59万亩增至70万亩”。面对不断膨胀的蔬菜消费需求市场和此次产业结构调整,保障北京蔬菜产品安全供应就显得极为重要。鉴于此,本文对北京市本地产蔬菜和市售外地产蔬菜的重金属含量进行了调查,并就经膳食途径的蔬菜重金属对居民的健康风险进行评价,以期为北京市本地产蔬菜和市售外地产蔬菜的质量控制,以及“产地准出”、“市场准入”管理提供依据。

2 材料与方法

2.1 蔬菜样品的采集与检测

2012年~2014年间,在京郊蔬菜种植区、新发地农产品批发市场、市区大型超市内采集了大白菜、番茄、黄瓜、韭菜等4个蔬菜品种的327份蔬菜样品,其中,269份为北京市本地产蔬菜(来自密云县和顺义区),58份为市售外地产蔬菜。样品采集后装入洁净的聚乙烯塑料袋,置于保温箱中低温运送至室内,检

测铅、镉、铬、砷、汞等5种重金属,检测依据分别为:GB 5009.12-2010《食品安全国家标准 食品中铅的测定》(第一法)、GB 5009.15-2003《食品中镉的测定(第一法)》、GB 5009.123-2003《食品中铬的测定》(第一法)、GB/T 5009.11-2003《食品中总砷及无机砷的测定》(第一法)、GB/T 5009.17-2003《食品中总汞及有机汞的测定》(第一法)。分析过程以国家生物成分分析标准物质 GBW 10021(GSB-12 豆角)进行分析质量控制。

2.2 污染评价标准与方法

蔬菜重金属评价的临界值以GB 2762-2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》的相关限量标准值作为参照(表1)。

2.3 健康风险评价方法与指标

采用美国环保署(USEPA)于2000年发布的目标危害系数(the target hazard quotient, THQ)法评价暴露人群的健康风险。其最大特点是不仅能评价单一重金属的健康风险,而且能评价多种重金属复合暴露的健康风险,目前已有不少学着运用此法进行健康风险评价^[2-5,7,8]。该方法假定污染物吸收剂量等于摄入剂量,以测定的污染物人体摄入剂量与参考剂量的比值作为评价标准,如果单一重金属风险THQ值<1,则说明暴露人群没有明显的健康风险,反之,则说明相关暴露人群就会有健康风险。THQ值越大,表明该污染物对人体健康风险越大。鉴于重金属对人体健康的影响一般是由多种元素共同作用的结果,因此,人们用TTHQ值表示多种重金属复合风险。如果TTHQ值<1,则表明没有明显的负面影响;反之,则说明对人体健康产生负面影响的可能性很大。计算公式见(1)和(2)。

单一重金属风险:

$$THQ=(E_F \times E_D \times F_{IR} \times C)/(R_{FD} \times W_{AB} \times T_A) \times 10^{-3} \quad (1)$$

多种重金属复合风险:

$$TTHQ=\sum THQ(\text{单一重金属}) \quad (2)$$

公式(1)中各项参数缩写、名称及取值见表2。

表 1 蔬菜中重金属最高允许限量标准
Table 1 The maximum allowable limits of heavy metals in vegetables

蔬菜类别 (名称)		最高残留限量(mg/kg)
铅 (Pb)	新鲜蔬菜 (芸薹类蔬菜、叶菜蔬菜、豆类蔬菜、薯类除外)	0.1
	芸薹类蔬菜、叶菜蔬菜(包括芸薹类叶菜)	0.3
镉 (Cd)	新鲜蔬菜 (叶菜蔬菜、豆类蔬菜、块根和块茎蔬菜、茎类蔬菜除外)	0.05
	叶菜蔬菜(包括芸薹类叶菜)	0.2
铬 (Cr)	新鲜蔬菜	0.5
汞 (Hg)	新鲜蔬菜	0.01
砷 (As)	新鲜蔬菜	0.5

表 2 蔬菜健康风险分析参数取值
Table 2 Values of the parameter used in the calculation of THQ for heavy metals

参数符号	参数名称	指标取值	指标取值来源
E_F (d/a)	暴露频率	365	[12]
E_D (a)	暴露区间	30 (成人)	[8]
		7 (儿童)	[5]
F_{IR} (g/d)	蔬菜摄入率	244.95 (成人)	[13]
		186.8 (儿童)	[13]
C (mg/kg)	蔬菜中重金属含量	见表 4	本文测定结果
T_A (d)	非致癌性平均暴露时间	10950 (成人)	[8]
		2555 (儿童)	[8]
W_{AB} (kg)	平均体重	63.45 (成人)	[13]
		25.6 (儿童)	[13]
R_{FD} (mg/kg · d)	参考剂量	$R_{FD}(\text{Pb})=0.0035$	[14]
		$R_{FD}(\text{Cd})=0.001$	[14]
		$R_{FD}(\text{Cr})=0.003$	[14]
		$R_{FD}(\text{As})=0.0003$	[14]
		$R_{FD}(\text{Hg})=0.0003$	[14]

3 结果与分析

3.1 蔬菜重金属元素含量及污染评价

从所抽检的 269 份北京市本地产蔬菜和 58 份市售外地产蔬菜来看,蔬菜中各项重金属元素含量的总体均值从大到小依次为 Cr、Pb、As、Cd、Hg。对照蔬菜重金属限量标准(表 1),所抽检的 269 份北京市本地产蔬菜和 58 份市售外地产蔬菜样品中的 Pb、Cd、Cr、As、Hg 均不超标(表 3、4)。

3.2 居民经蔬菜膳食途径摄入重金属的人体健康风险评价

利用公式(1)和公式(2)分别计算成人和儿童通过蔬菜摄入重金属的 THQ 值和 TTHQ 值,结果见表 5~表 8。

北京市本地产蔬菜单一重金属的 THQ 结果见表 5。虽然部分大白菜和韭菜中的 As 存在 THQ 值 ≥ 1 的情况,但各元素在成人中的 THQ 算术平均值 $\bar{x}$ 均 <1 ;虽然部分大白菜、黄瓜和韭菜中的 As,部分韭菜

表 3 北京市本地产蔬菜中重金属含量状况及污染评价
Table 3 Mass ratio and pollution assessment of heavy metals in vegetables produced in Beijing

蔬菜	元素	$\bar{x}\pm s$ (mg/kg)	范围 (mg/kg)	超标率 (%)
总体 (n=269)	Pb	0.033±0.043	0.001~0.220	0.00
	Cd	0.007±0.010	<0.001~0.096	0.00
	Cr	0.034±0.062	<0.001~0.438	0.00
	As	0.020±0.030	<0.001~0.390	0.00
	Hg	0.002±0.001	<0.001~0.010	0.00
大白菜 (n=99)	Pb	0.034±0.041	0.002~0.180	0.00
	Cd	0.011±0.016	0.001~0.096	0.00
	Cr	0.033±0.044	<0.001~0.240	0.00
	As	0.020±0.034	<0.001~0.280	0.00
	Hg	0.001±0.001	<0.001~0.004	0.00
番茄 (n=49)	Pb	0.015±0.032	0.002~0.130	0.00
	Cd	0.005±0.003	<0.001~0.014	0.00
	Cr	0.006±0.007	<0.001~0.026	0.00
	As	0.008±0.008	<0.001~0.029	0.00
	Hg	0.001±0.001	<0.001~0.003	0.00
黄瓜 (n=54)	Pb	0.015±0.031	0.001~0.157	0.00
	Cd	0.002±0.001	<0.001~0.007	0.00
	Cr	0.013±0.024	<0.001~0.114	0.00
	As	0.018±0.011	<0.001~0.052	0.00
	Hg	0.001±0.001	<0.001~0.003	0.00
韭菜 (n=67)	Pb	0.065±0.047	0.002~0.220	0.00
	Cd	0.007±0.006	0.001~0.032	0.00
	Cr	0.076±0.094	<0.001~0.438	0.00
	As	0.030±0.043	<0.001~0.390	0.00
	Hg	0.002±0.002	<0.001~0.010	0.00

注: n 代表蔬菜的样本数量

表 4 市售外地产蔬菜中重金属含量状况及污染评价
Table 4 Mass ratio and pollution assessment of heavy metals in vegetables sold in Beijing markets produced in other provinces

蔬菜	元素	$\bar{x}\pm s$ (mg/kg)	范围 (mg/kg)	超标率 (%)
总体 (n=58)	Pb	0.015±0.028	0.003~0.150	0.00
	Cd	0.004±0.003	<0.001~0.017	0.00
	Cr	0.033±0.046	0.002~0.170	0.00
	As	0.007±0.008	<0.001~0.038	0.00
	Hg	0.002±0.002	<0.001~0.010	0.00

续表 4

蔬菜	元素	$\bar{x}\pm s$ (mg/kg)	范围 (mg/kg)	超标率 (%)
大白菜 (n=14)	Pb	0.007±0.004	0.003~0.017	0.00
	Cd	0.007±0.004	0.003~0.017	0.00
	Cr	0.021±0.043	0.002~0.169	0.00
	As	0.004±0.003	<0.001~0.010	0.00
	Hg	0.002±0.001	<0.001~0.003	0.00
番茄 (n=15)	Pb	0.005±0.005	0.003~0.018	0.00
	Cd	0.005±0.003	<0.001~0.014	0.00
	Cr	0.011±0.009	0.002~0.026	0.00
	As	0.001±0.001	<0.001~0.003	0.00
	Hg	0.001±0.001	<0.001~0.003	0.00
黄瓜 (n=17)	Pb	0.006±0.004	0.003~0.018	0.00
	Cd	0.002±0.001	<0.001~0.005	0.00
	Cr	0.026±0.033	0.002~0.114	0.00
	As	0.009±0.005	<0.001~0.015	0.00
	Hg	0.002±0.001	<0.001~0.003	0.00
韭菜 (n=12)	Pb	0.048±0.050	0.003~0.150	0.00
	Cd	0.004±0.002	0.003~0.006	0.00
	Cr	0.085±0.055	0.019~0.170	0.00
	As	0.017±0.012	<0.001~0.038	0.00
	Hg	0.003±0.003	<0.001~0.010	0.00

注: n 代表蔬菜的样本数量

表 5 北京市本地产蔬菜中单一重金属健康风险评价
Table 5 THQ of single heavy metal in vegetables produced in Beijing

蔬菜品种	元素	成人 THQ			儿童 THQ		
		$\bar{x}\pm s$	范围	THQ≥1 的份数(%)	$\bar{x}\pm s$	范围	THQ≥1 的份数(%)
总体 (n=269)	Pb	0.051±0.051	0.001~0.242	0(0.00)	0.095±0.097	0.002~0.458	0(0.00)
	Cd	0.041±0.052	0.001~0.371	0(0.00)	0.076±0.099	0.001~0.701	0(0.00)
	Cr	0.060±0.095	0.001~0.564	0(0.00)	0.091±0.166	0.001~1.066	2(0.60)
	As	0.319±0.439	0.001~5.019	3(0.90)	0.603±0.829	0.002~9.486	24(7.16)
	Hg	0.011±0.011	0.001~0.129	0(0.00)	0.021±0.021	0.001~0.243	0(0.00)
大白菜 (n=99)	Pb	0.043±0.047	0.002~0.199	0(0.00)	0.082±0.089	0.003~0.375	0(0.00)
	Cd	0.056±0.071	0.004~0.371	0(0.00)	0.105±0.133	0.007~0.701	0(0.00)
	Cr	0.053±0.058	0.001~0.309	0(0.00)	0.092±0.109	0.001~0.584	0(0.00)
	As	0.305±0.475	0.064~3.603	2(2.02)	0.576±0.897	0.122~6.810	7(7.07)
	Hg	0.011±0.010	0.001~0.052	0(0.00)	0.021±0.019	0.003~0.099	0(0.00)

续表 5

蔬菜品种	元素	成人 THQ			儿童 THQ		
		$\bar{x}\pm s$	范围	THQ ≥ 1 的份数(%)	$\bar{x}\pm s$	范围	THQ ≥ 1 的份数(%)
番茄 (n=49)	Pb	0.036 $\pm$ 0.052	0.002~0.143	0(0.00)	0.069 $\pm$ 0.098	0.003~0.270	0(0.00)
	Cd	0.023 $\pm$ 0.012	0.005~0.054	0(0.00)	0.044 $\pm$ 0.022	0.009~0.102	0(0.00)
	Cr	0.007 $\pm$ 0.004	0.001~0.013	0(0.00)	0.009 $\pm$ 0.009	0.077~0.373	0(0.00)
	As	0.209 $\pm$ 0.089	0.077~0.373	0(0.00)	0.395 $\pm$ 0.169	0.146~0.705	0(0.00)
	Hg	0.008 $\pm$ 0.002	0.005~0.014	0(0.00)	0.014 $\pm$ 0.003	0.010~0.026	0(0.00)
黄瓜 (n=54)	Pb	0.032 $\pm$ 0.046	0.001~0.173	0(0.00)	0.061 $\pm$ 0.087	0.002~0.328	0(0.00)
	Cd	0.005 $\pm$ 0.007	0.001~0.028	0(0.00)	0.008 $\pm$ 0.012	0.001~0.053	0(0.00)
	Cr	0.015 $\pm$ 0.014	0.007~0.045	0(0.00)	0.014 $\pm$ 0.023	0.001~0.086	0(0.00)
	As	0.281 $\pm$ 0.125	0.094~0.669	0(0.00)	0.531 $\pm$ 0.237	0.178~1.265	4(7.41)
	Hg	0.007 $\pm$ 0.002	0.003~0.008	0(0.00)	0.013 $\pm$ 0.003	0.005~0.016	0(0.00)
韭菜 (n=67)	Pb	0.075 $\pm$ 0.051	0.002~0.242	0(0.00)	0.142 $\pm$ 0.097	0.003~0.458	0(0.00)
	Cd	0.036 $\pm$ 0.023	0.005~0.124	0(0.00)	0.069 $\pm$ 0.044	0.010~0.234	0(0.00)
	Cr	0.101 $\pm$ 0.133	0.003~0.564	0(0.00)	0.179 $\pm$ 0.248	0.001~1.066	2(2.99)
	As	0.420 $\pm$ 0.600	0.001~5.019	1(1.49)	0.794 $\pm$ 1.135	0.195~9.486	13(19.40)
	Hg	0.016 $\pm$ 0.016	0.005~0.086	0(0.00)	0.030 $\pm$ 0.030	0.010~0.162	0(0.00)

注: n 代表蔬菜的样本数量

表 6 市售外地产蔬菜中单一重金属健康风险评价
Table 6 THQ of single heavy metal in vegetables sold in Beijing markets produced in other provinces

蔬菜品种	元素	成人 THQ			儿童 THQ		
		$\bar{x}\pm s$	范围	THQ ≥ 1 的份数(%)	$\bar{x}\pm s$	范围	THQ ≥ 1 的份数(%)
总体 (n=58)	Pb	0.018 $\pm$ 0.031	0.003~0.165	0(0.00)	0.034 $\pm$ 0.059	0.005~0.313	0(0.00)
	Cd	0.023 $\pm$ 0.015	0.002~0.066	0(0.00)	0.044 $\pm$ 0.029	0.003~0.124	0(0.00)
	Cr	0.052 $\pm$ 0.061	0.002~0.219	0(0.00)	0.098 $\pm$ 0.115	0.004~0.413	0(0.00)
	As	0.109 $\pm$ 0.110	0.001~0.489	0(0.00)	0.207 $\pm$ 0.208	0.002~0.924	0(0.00)
	Hg	0.013 $\pm$ 0.034	0.001~0.129	0(0.00)	0.024 $\pm$ 0.064	0.001~0.243	0(0.00)
大白菜 (n=14)	Pb	0.008 $\pm$ 0.004	0.003~0.019	0(0.00)	0.015 $\pm$ 0.008	0.005~0.035	0(0.00)
	Cd	0.031 $\pm$ 0.015	0.012~0.066	0(0.00)	0.058 $\pm$ 0.029	0.023~0.124	0(0.00)
	Cr	0.037 $\pm$ 0.064	0.002~0.217	0(0.00)	0.070 $\pm$ 0.121	0.004~0.411	0(0.00)
	As	0.070 $\pm$ 0.046	0.001~0.126	0(0.00)	0.132 $\pm$ 0.087	0.002~0.238	0(0.00)
	Hg	0.001 $\pm$ 0.000	0.001~0.001	0(0.00)	0.001 $\pm$ 0.000	0.001~0.001	0(0.00)

续表 6

蔬菜品种	元素	成人 THQ			儿童 THQ		
		$\bar{x}\pm s$	范围	THQ ≥ 1 的份数(%)	$\bar{x}\pm s$	范围	THQ ≥ 1 的份数(%)
番茄 (n=15)	Pb	0.010 $\pm$ 0.009	0.003~0.029	0(0.00)	0.019 $\pm$ 0.017	0.005~0.054	0(0.00)
	Cd	0.026 $\pm$ 0.014	0.002~0.054	0(0.00)	0.050 $\pm$ 0.026	0.003~0.102	0(0.00)
	Cr	0.017 $\pm$ 0.011	0.002~0.034	0(0.00)	0.032 $\pm$ 0.020	0.004~0.063	0(0.00)
	As	0.015 $\pm$ 0.038	0.001~0.108	0(0.00)	0.028 $\pm$ 0.071	0.002~0.204	0(0.00)
	Hg	0.001 $\pm$ 0.000	0.001~0.001	0(0.00)	0.001 $\pm$ 0.000	0.001~0.001	0(0.00)
黄瓜 (n=17)	Pb	0.007 $\pm$ 0.005	0.003~0.020	0(0.00)	0.014 $\pm$ 0.010	0.005~0.038	0(0.00)
	Cd	0.004 $\pm$ 0.006	0.002~0.017	0(0.00)	0.008 $\pm$ 0.012	0.003~0.033	0(0.00)
	Cr	0.050 $\pm$ 0.046	0.002~0.147	0(0.00)	0.095 $\pm$ 0.087	0.004~0.278	0(0.00)
	As	0.112 $\pm$ 0.064	0.001~0.193	0(0.00)	0.211 $\pm$ 0.122	0.002~0.365	0(0.00)
	Hg	0.001 $\pm$ 0.000	0.001~0.001	0(0.00)	0.001 $\pm$ 0.000	0.001~0.001	0(0.00)
韭菜 (n=12)	Pb	0.053 $\pm$ 0.055	0.003~0.165	0(0.00)	0.100 $\pm$ 0.103	0.005~0.313	0(0.00)
	Cd	0.020 $\pm$ 0.004	0.015~0.025	0(0.00)	0.038 $\pm$ 0.007	0.028~0.047	0(0.00)
	Cr	0.109 $\pm$ 0.071	0.025~0.219	0(0.00)	0.206 $\pm$ 0.134	0.047~0.413	0(0.00)
	As	0.216 $\pm$ 0.158	0.001~0.489	0(0.00)	0.408 $\pm$ 0.298	0.002~0.924	0(0.00)
	Hg	0.042 $\pm$ 0.054	0.001~0.129	0(0.00)	0.080 $\pm$ 0.103	0.001~0.243	0(0.00)

注: n 代表蔬菜的样本数量

表 7 北京市本地产蔬菜重金属复合健康风险评价
Table 7 TTHQ of heavy metal in vegetables produced in Beijing

蔬菜	成人 TTHQ			儿童 TTHQ		
	$\bar{x}\pm s$	范围	TTHQ ≥ 1 的份数(%)	$\bar{x}\pm s$	范围	TTHQ ≥ 1 的份数(%)
总体(n=269)	0.399 $\pm$ 0.482	0.006~5.170	12(4.46)	0.754 $\pm$ 0.912	0.010~9.771	52(19.33)
大白菜(n=99)	0.404 $\pm$ 0.533	0.006~3.840	6(6.06)	0.764 $\pm$ 1.007	0.010~7.259	19(19.19)
番茄(n=49)	0.187 $\pm$ 0.159	0.007~0.536	0(0.00)	0.354 $\pm$ 0.301	0.013~1.014	1(2.04)
黄瓜(n=54)	0.302 $\pm$ 0.158	0.007~0.773	0(0.00)	0.570 $\pm$ 0.298	0.014~1.462	6(11.11)
韭菜(n=67)	0.593 $\pm$ 0.619	0.076~5.170	6(8.96)	1.121 $\pm$ 1.170	0.144~9.771	26(38.81)

注: n 代表蔬菜的样本数量

表 8 市售外地产蔬菜重金属复合健康风险评价

Table 8 TTHQ of heavy metal in vegetables sold in Beijing markets produced in other provinces

蔬菜	成人 TTHQ			儿童 TTHQ		
	$\bar{x}\pm s$	范围	TTHQ ≥ 1 的份数(%)	$\bar{x}\pm s$	范围	TTHQ ≥ 1 的份数(%)
总体($n=58$)	0.155 $\pm$ 0.184	0.008~0.950	0(0.00)	0.292 $\pm$ 0.349	0.015~1.795	56(16.72)
大白菜($n=14$)	0.109 $\pm$ 0.066	0.008~0.251	0(0.00)	0.205 $\pm$ 0.124	0.015~0.475	0(0.00)
番茄($n=15$)	0.042 $\pm$ 0.036	0.009~0.171	0(0.00)	0.080 $\pm$ 0.068	0.018~0.323	0(0.00)
黄瓜($n=17$)	0.151 $\pm$ 0.074	0.008~0.332	0(0.00)	0.286 $\pm$ 0.139	0.016~0.628	0(0.00)
韭菜($n=12$)	0.412 $\pm$ 0.293	0.096~0.950	0(0.00)	0.779 $\pm$ 0.554	0.181~1.795	3(25.00)

注: n 代表蔬菜的样本数量

中的 Cr, 存在 THQ 值 ≥ 1 的情况, 但各元素在儿童中的 THQ 算术平均值 $\bar{x}$ 均 <1 。说明整体上从单一重金属风险来看, 成人和儿童经膳食途径摄入所调查的 4 种北京市本地产蔬菜是安全的。另外, As 的 THQ 算术平均值 $\bar{x}$ 在 5 种重金属中是最高的, 高于其他 4 种元素 3~60 倍。

由表 6 结果可以看出, 5 种重金属在成人和儿童中的 THQ 算术平均值 $\bar{x}$ 均 <1 , 而且也不存在 THQ 值 ≥ 1 的情况。说明从单一重金属风险来看, 成人和儿童食用这 4 种市售外地产蔬菜是安全的。

北京市本地产蔬菜多种重金属的 TTHQ 结果见表 7。对成人来说, 虽然部分大白菜和韭菜的重金属 TTHQ 算术平均值 $\bar{x}\geq 1$, 但 4 种蔬菜重金属的 TTHQ 总体算术平均值 $\bar{x}<1$ 。说明整体上从多种重金属复合风险来看, 成人经膳食途径摄入所调查的 4 种北京市本地产蔬菜是安全的。对儿童来说, 4 种蔬菜均存在一定比例重金属 TTHQ 值 ≥ 1 的情况, 尤其是韭菜重金属的 TTHQ 算术平均值 $\bar{x}\geq 1$, 4 种蔬菜重金属的 TTHQ 总体算术平均值 $\bar{x}<1$ 。说明从多种重金属复合风险来看, 儿童经膳食途径摄入北京市本地产韭菜存在一定的健康风险。

市售外地产蔬菜多种重金属的 TTHQ 结果见表 8。对成人来说, 4 种蔬菜的重金属 TTHQ 算术平均值 $\bar{x}$ 均 <1 , 而且也不存在 TTHQ 值 ≥ 1 的情况。说明从多种重金属风险来看, 成人食用这 4 种市售外地产蔬菜是安全的。对儿童来说, 4 种蔬菜中, 虽然韭菜存在一定比例重金属 TTHQ 值 ≥ 1 的情况, 但 4 种蔬菜重金属的 TTHQ 算术平均值 $\bar{x}$ 均 <1 。说明从多种重金属复合风险来看, 儿童食用这 4 种市售外地产蔬菜是

安全的。

由表 9 可知, 4 种蔬菜对成人和儿童的复合健康风险主要由 As 引起(贡献率最高), 暴露风险最大, 说明从多种重金属复合风险来看, As 是所调查的 4 种蔬菜中的主要重金属污染物。

4 讨 论

本文研究了北京市 4 种蔬菜中的污染因子, 尤其是对国内外其他研究学者^[1-11,15,16]鲜有报道的总汞进行了研究。在所抽取的 327 份蔬菜样品中, Pb、Cd、Cr、As、Hg 等 5 种重金属含量均未超过蔬菜中重金属最高允许限量标准。从单一重金属风险来看, 4 种北京市本地产蔬菜和市售外地产蔬菜对成人和儿童不存在健康风险, 这与 Fang 等^[16]的研究结论一致, 而杜景东^[2]、张旭红等^[3]则认为北京地区的成人和儿童均存在因膳食蔬菜导致的 Cr 潜在健康风险。从多种重金属复合风险来看, 4 种市售外地产蔬菜对成人和儿童不存在健康风险, 而部分北京市本地产韭菜对儿童存在一定的膳食摄入风险。4 种蔬菜的复合健康风险主要由 As 引起, 这一结果与 Song 等^[8]的研究结论一致, 而杜景东^[2]则认为蔬菜的复合健康风险主要由 Cr 引起。尽管儿童的蔬菜摄入量低于成人(表 2), 但由于儿童身体各组织器官尚未发育完全, 特别是肝肾等代谢器官的解毒、排泄功能较弱, 因此, 他们对重金属污染更为敏感。这就造成了儿童因摄食蔬菜导致的重金属健康风险高于成人(表 5~8), 叶劲松等^[15]的研究也证明了这一点。

本研究中重金属污染物对人体健康暴露风险评价只考虑了居民通过食用蔬菜途径摄入的重金属污

表 9 单一重金属对成人和儿童的复合健康风险贡献率
Table 9 Contribution ratio of single heavy metal to TTHQ of adults and children in vegetables

蔬菜品种	元素	成人(%)	儿童(%)
总体(n=327)	Pb	9.76	9.78
	Cd	7.12	6.98
	Cr	11.61	11.59
	As	66.23	66.34
	Hg	5.28	5.31
大白菜(n=113)	Pb	9.39	9.38
	Cd	10.91	10.86
	Cr	10.41	10.32
	As	64.72	64.75
	Hg	4.57	4.69
番茄(n=64)	Pb	10.12	10.09
	Cd	10.71	10.41
	Cr	4.76	4.73
	As	63.69	63.72
	Hg	10.71	11.04
黄瓜(n=71)	Pb	5.70	5.68
	Cd	2.68	2.66
	Cr	5.70	5.68
	As	79.53	79.57
	Hg	6.38	6.39
韭菜(n=79)	Pb	11.88	11.88
	Cd	4.62	4.54
	Cr	16.01	16.07
	As	63.37	63.41
	Hg	4.13	4.10

注: n 代表蔬菜的样本数量

染物, 没有考虑其他暴露途径, 例如通过摄入其他类别食物及饮用水等途径, 实际上可能低估了重金属污染物的暴露风险。另一方面, 通过膳食途径摄入的蔬菜重金属暴露风险还与消费者的生活方式、消费习惯及职业类型密切相关, 因而需要探索更加合理的暴露评价方法, 来评估消费人群接触污染物的暴露剂量。

今后, 为向北京市蔬菜的质量控制, 以及“产地准出”、“市场准入”管理提供依据, 仍需对北京市本地地产蔬菜和市售外地地产蔬菜加强监测, 并持续开展

污染源溯源调查研究。

5 感 谢

本研究得到了北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX201203001; KJCX20140302)的资助, 向检测技术部各位同事在取样和样品分析过程中的辛勤付出表示感谢。

参考文献

[1] Sarojni R, Supriya G, Poonam CM. Dietary intakes and health risk of toxic and essential heavy metals through the food chain in agricultural, Industrial, and coal mining areas of northern India [J]. Hum Ecol Risk Assess, 2015, 21: 913–933.

[2] 杜景东, 高凡, 王敬贤, 等. 京郊蔬菜重金属含量特征及安全评价[J]. 北京农学院学报, 2014, 29(3): 42–46.

Du JD, Gao F, Wang JX, *et al.* Concentration analysis and health risk assessment of heavy metals in vegetables of Beijing suburban [J]. J Beijing Agric Coll, 2014, 29(3): 42–46.

[3] 张旭红, 李蔓. 北京市售叶菜类蔬菜重金属含量特征及其健康风险评价[J]. 北京城市学院学报, 2014, (3): 8–13.

Zhang XH, Li M. The health risks assessment and characteristics of heavy metal concentrations of leaf vegetables in Beijing market [J]. J Beijing City Coll, 2014, (3): 8–13.

[4] Hu WY, Chen Y, Huang B, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from a typical greenhouse vegetable production system in China [J]. Hum Ecol Risk Assess, 2014, 20: 1264–1280.

[5] Chang CY, Yu HY, Chen JJ, *et al.* Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the Pearl River Delta, South China [J]. Environ Monit Assess, 2014, 186: 1547–1560.

[6] Huang Z, Pan XD, Wu PG, *et al.* Heavy metals in vegetables and the health risk to population in Zhejiang, China [J]. Food Control, 2014, 36: 248–252.

[7] Yan S, Ling Q, Bao Z, *et al.* Cadmium accumulation in pak choi (*Brassica chinensis* L.) and estimated dietary intake in the suburb of Hangzhou city, China [J]. Food Addit Contam B, 2009, 2: 74–78.

[8] Song B, Lei M, Chen TB, *et al.* Assessing the health risk of heavy metals in vegetables to the general population in Beijing, China [J]. J Environ Sci-China, 2009, 21: 1702–1709.

[9] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1343–1353.

Song B, Chen TB, Zheng YM, *et al.* A survey of cadmium

- concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health [J]. *Acta Sci Circumst*, 2006, 26(8): 1343–1353.
- [10] 宋波, 高定, 陈同斌, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(10): 1707–1715.
- Song B, Gao D, Chen TB, *et al.* A survey of chromium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health [J]. *Acta Sci Circumst*, 2006, 26(10): 1707–1715.
- [11] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(8): 1589–1597.
- Chen TB, Song B, Zheng YM, *et al.* A survey of lead concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risks [J]. *Sci Agric Sin*, 2006, 39(8): 1589–1597.
- [12] USEPA. Risk-based concentration table[R]. Philadelphia PA: United States environmental protection agency, Washington DC. 2000.
- [13] 金水高. 中国居民营养与健康状况调查报告之十-2002 营养与健康状况数据集[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008.
- Jin SG. Chinese National Nutrition and Health Survey Report (Volume No.10)– Dataset of Nutrition and Health in 2002 [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2008.
- [14] United States Environmental Protection Agency(USEPA). (2002). Region 9, preliminary remediation goals [EB/OL]. <http://www.epa.gov/region09/waste/sfund/prg>.
- [15] 叶劲松, 吴克, 俞志敏, 等. 合肥市售蔬菜 Pb 和 Cd 含量调查及健康风险预警评价[J]. *安全与环境学报*, 2013, 13(2): 85–90.
- Ye JS, Wu K, Yu ZM, *et al.* Investigation on the Pb and Cd contents in Hefei vegetables and the evaluation of the health risk alert [J]. *J Saf Environ*, 2013, 13(2): 85–90.
- [16] Fang YY, Nie ZQ, Liu F, *et al.* Concentration and health risk evaluation of heavy metals in market-sold vegetables and fishes based on questionnaires in Beijing, China [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2014, 21: 11401–11408.

(责任编辑: 李振飞)

作者简介



王北洪, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全检测技术。
E-mail: wangbh@nercita.org.cn



王纪华, 研究员, 主要研究方向为农产品质量检测技术与信息技术的交叉与集成。
E-mail: wangjh@nercita.org.cn