

张瑞宁,谢婧,蒲晓,等.河北燕郊地区市售常见蔬菜重金属含量与健康风险评估[J].江苏农业科学,2018,46(23):221-225.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.056

河北燕郊地区市售常见蔬菜重金属含量与健康风险评估

张瑞宁¹,谢婧²,蒲晓¹,刘训良¹,李萌¹

(1.首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048;2.环境保护部环境规划院,北京 100012)

摘要:蔬菜是人们日常生活中必不可少的食物,但其受重金属污染后会对人体健康造成威胁。为探讨和分析河北省燕郊地区蔬菜重金属污染水平及其对人体健康的风险,采集该区市售的 24 种常见蔬菜,检测铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)3 种重金属的含量,结合单因子污染指数法和综合污染指数法揭示蔬菜重金属的超标因子和污染特征,采用健康风险分析法评价蔬菜重金属对人体的健康风险。结果表明,24 种蔬菜的重金属 Pb、Cd、Hg 含量范围分别为 0.05 ~ 0.27、0.22 ~ 0.38、0 ~ 0.009 mg/kg。Pb 和 Hg 低于 GB 2762—2005《食品中污染物限量》标准,Cd 则轻微超标。不同种类蔬菜的重金属综合污染程度趋势为叶菜类 > 豆菜类 > 果菜类 > 根菜类。以《食品中污染物限量》(GB 2762—2005)为标准,各种类蔬菜 Pb、Cd、Hg 单项污染指数平均值分别为 0.54、1.45、0.27,综合污染指数平均值为 1.12。食用叶菜类的重金属累积健康风险高于食用其他种类蔬菜,Cd 对人体潜在健康风险高于 Pb 和 Hg,经口摄入重金属对儿童的潜在风险高于成年人。

关键词:蔬菜;重金属;污染特征;健康评估

中图分类号:X835;X56 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)23-0221-05

蔬菜是人们日常生活中必不可少的食物,为人体提供各种微量元素和膳食纤维,其质量直接关系到人体健康。在蔬菜生产迅猛发展的同时,环境污染和不合理的农业措施导致蔬菜重金属污染问题如铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)等污染^[1-3]。由于重金属污染的不可逆累积性,重金属易于在蔬菜中富集,不易降解,使它们与其他微量元素共存,对植物生长造成不利影响,并能通过食物链传递危害人体健康,给人类社会、生态环境带来了负面影响^[4]。

我国蔬菜重金属的污染尚未达到十分严重的程度,但从局部地区来看情况比较严重^[5-8]。由于城郊与城市接壤,交通方便,是蔬菜生产的重要基地,但是城郊又往往和工业生产区、污灌区、交通干线接近,成为重金属污染的重要区域。北京、南京、杭州等大中城市都曾较系统地对外郊菜园土壤及蔬菜重金属污染状况做过一些调查研究工作,基本摸清了蔬菜重金属污染现状^[6-8]。

目前,针对全国各地蔬菜重金属的研究已有不少报道^[1-8],但多集中于部分蔬菜重金属及相应土壤的调查,而对市售常见蔬菜进行调查并系统评估经食用蔬菜摄入重金属对居民健康的风险研究较少。因此,本研究以河北燕郊地区超市提供的日常食用的 24 种蔬菜为调查对象,分析蔬菜中重金属含量水平以及污染特征,利用健康风险评估探讨蔬菜的潜

在健康风险,既可以为饮食健康、蔬菜种植以及日常生活饮食习惯提供依据,也对蔬菜中潜在污染风险的及时发现有所裨益。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

燕郊地区辖属于河北省廊坊市,位于潮白河东畔,西与北京市通州区隔河相望,总人口 60 万人,区域总面积为 105.2 km²,是以电子信息、生物医药、新型材料和旅游休闲为代表的现代化城市。该研究区为暖温带季风性大陆性半湿润半干旱气候,冬季受西伯利亚、蒙古高压控制,夏季受大陆低压和太平洋高压影响,四季分明,干湿冷暖变化明显,年平均气温为 10.8 ℃,降水季节性变化明显,多集中在夏秋季节。研究区土地利用以灌溉农业为主,种植冬小麦、夏玉米、棉花和蔬菜等。

1.2 样品的采集与处理

根据市售蔬菜供应和居民日常消费情况,选择市区某大型连锁超市为采样地点,按照均匀分散多点采集原则,随机抽取 3 个以上样品作为一个混合样并装于干净的塑料袋中。样品采集于 2015 年 6 月底完成,共采集蔬菜 24 种,分为 4 大类:叶菜类、果菜类、根菜类和豆菜类,其中叶菜类包括甘蓝、茴香、茼蒿、芹菜、白菜、生菜、韭菜、葱、油麦菜和菠菜;果菜类包括茄子、辣椒、苦瓜、西红柿、黄瓜和青椒;根菜类包括大蒜、洋葱、生姜、白萝卜、胡萝卜和马铃薯;豆菜类包括豇豆和荷兰豆。选取其中能区分部位的蔬菜进行单独消解,共分为 3 类:具备叶、茎、根的茴香、葱和菠菜,具备叶、茎的茼蒿、白菜和芹菜以及具备皮和种子的豇豆和荷兰豆。

每份样品采集约 100 g,装入密封袋带回实验室,去除枯死叶片和辣椒籽等,留取成熟的可食用部分,依次用自来水、

收稿日期:2017-08-02

基金项目:北京市自然科学基金面上项目(编号:8172015)。

作者简介:张瑞宁(1991—),女,河南安阳人,硕士研究生,主要研究方向为污染物环境行为。E-mail:861758148@qq.com。

通信作者:蒲晓,博士,讲师,主要研究方向为区域环境管理。Tel:(010)68903470;E-mail:xiao.pu@cnu.edu.cn。

去离子水清洗,并用滤纸吸取表面水分,切碎、混匀,称取混匀样品 2.0 g^[9]。浸入装有 5 mL HNO₃ 溶液和 1 mL H₂O₂ 溶液的消解罐中,将消解罐放入 MDS-2002A 微波消解仪(东京理化器械株式会社)中进行消解,消解完成后,将消解液倒入 50 mL 比色管中,用去离子水定容到 25 mL,供重金属测定使用^[10]。所用玻璃器皿用稀盐酸溶液浸泡过夜,用去离子水清洗,烘干后使用。

1.3 样品的测定

Pd 和 Cd 的含量测定采用 GGX-600 原子吸收分光光度计(北京海光仪器有限公司),试验过程中采用单一变量法,选择金属测定的最佳条件^[10],原子吸收分光光度计工作条件见表 1,其中采用 WCG-207 型微分测汞仪(吉林市北光分析仪器厂)测定 24 种蔬菜中 Hg 的含量。

表 1 原子吸收分光光度计工作条件

金属条件	分析线 (mm)	灯电流 (A)	助燃比	火焰高度 (mm)
Pb	283.30	5	1:4	8
Cd	228.88	6	1:4	7

制备金属标准储备液,绘制标准曲线,各金属元素标准曲线的 r^2 均在 0.999 以上。将待测的蔬菜消解液进样,测出蔬菜中各金属的浓度。所用方法精确度高,结果可靠。所有样品都做空白试验,并以标液进行质量控制。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2010 进行整理,采用 SPSS 19.0 进行统计分析,采用 Origin 8.0 进行作图。

1.5 污染评价方法和标准

本研究采用单因子污染指数法和综合污染指数法进行现状分析^[11-12],污染指数越小,表明蔬菜越清洁,越安全。

单因子污染指数法^[12-13]:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中: P_i 为蔬菜中重金属 i 的单项污染指数; C_i 为蔬菜中重金属 i 的实测值; S_i 为蔬菜中重金属 i 的评价标准。

综合污染指数法^[12-13]:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{(P_{\text{max}}^2 + P_{\text{ave}}^2)/2} \tag{2}$$

式中: $P_{\text{综合}}$ 为蔬菜重金属的综合污染指数; P_{max} 为各单项污染指数 P_i 的最大值; P_{ave} 为各单项污染指数 P_i 的平均值。

采用表 2 蔬菜质量分级标准对蔬菜的质量状况进行分析评价^[12-13]。

表 2 蔬菜质量分级标准

等级划分	综合污染指数	污染程度	污染水平
1	$P \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P \leq 1$	警戒级	尚清洁
3	$1 < P \leq 2$	轻度污染	开始受污染
4	$2 < P \leq 3$	中度污染	受到中度污染
5	$P > 3$	重度污染	受污染已相当严重

1.6 健康风险评估

蔬菜中重金属含量关系到人类食品安全,健康风险评估采用风险系数(HQ),它被运用于评估重金属经口摄入后的非致癌健康风险。HQ 是某种污染物(重金属)的确定剂量与参考剂量的比率,重金属的风险系数由公式(3)进行

计算^[13-17]:

$$HQ = \frac{EDI}{RfD} = \frac{C_{\text{veg}} \times IR_{\text{veg}} \times EF_{\text{veg}} \times ED}{BW \times AT \times RfD} \tag{3}$$

式中: EDI 为每日摄入重金属的估计值,mg/(kg·d),其取决于蔬菜中重金属含量与蔬菜的消耗量; RfD 为非致癌口服参考剂量,mg/(kg·d); C_{veg} 为各蔬菜重金属的含量,mg/kg; IR_{veg} 为蔬菜人均日消耗量,kg/(d·人); EF_{veg} 为重金属年暴露天数,d/年; ED 为暴露年限,年; BW 为人体平均体质量,kg; AT 为非致癌暴露总时间($ED \times 365$),d。蔬菜重金属的风险系数(HQ)分别对儿童(3~12 岁)与成年人(18~45 岁)进行计算^[14-15]。

危害指数(HI)表示当几种重金属同时存在时,所有重金属的风险系数之和,即鉴定重金属对人体健康的影响一般是多种重金属共同作用的结果,其计算公式(4)如下:

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i \tag{4}$$

式中: HQ_i 为第 i 种重金属的风险系数。

如果 $HI \leq 1$,表明没有明显的负面影响; $HI > 1$,表明对人体健康产生负面影响的可能性大。蔬菜重金属经口摄入的风险系数计算参数见表 3。

表 3 蔬菜重金属经口摄入的风险系数

计算参数	数据	文献
Pb 的 RfD 值[mg/(kg·d)]	0.004	[13]
Cd 的 RfD 值[mg/(kg·d)]	0.001	[13]
Hg 的 RfD 值[mg/(kg·d)]	0.000 72	[14]
C_{veg} (mg/kg)	见表 4	本研究
IR_{veg} [kg/(d·人)]	儿童:0.233;成人:0.355	[13]
EF_{veg} (d/年)	350	[13]
ED (年)	儿童:6;成人:30	[13]
BW (kg)	儿童:24.5;成人:60.3	[13]
AT (d)	儿童:2 190;成人:10 950	[13]

2 结果与分析

2.1 蔬菜重金属含量

研究区蔬菜重金属含量统计结果见表 4。由变异系数可以看出,24 种蔬菜中重金属 Cd 含量相对均匀,而 Pb 和 Hg 变化性明显较强,即不同蔬菜重金属含量波动性较大。24 种蔬菜重金属 Pb、Cd、Hg 的含量范围分别为 0.05~0.27、0.22~0.38、0~0.009 mg/kg,Cd 含量超过 GB 2762—2005《食品中污染物限量》标准中重金属 Cd 的最高允许含量 1.1~1.9 倍,Pb、Hg 均不超标;与 GB 18406.1—2001《农产品质量安全 无公害蔬菜安全要求》相比,Hg 不超标,Pb 和 Cd 分别是其要求最高允许含量的 0.25~1.35 倍和 4.4~7.6 倍。因为无公害蔬菜安全要求比较严格,所以以其为标准,蔬菜重金属含量就偏高。由于蔬菜中重金属含量除了与土壤重金属的污染程度和重金属元素的性质相关,还与蔬菜本身的外部形态及内部结构对不同重金属的选择性吸收有关,因此对重金属的吸收积累量差异较大^[15]。

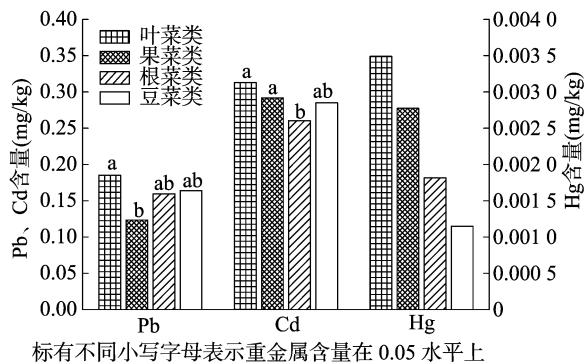
2.2 不同菜类重金属元素比较

图 1 为 3 种重金属在各菜类中含量对比图,3 种重金属在叶菜类中的含量均属于最高,可能跟叶菜类的内部结构有

表 4 蔬菜重金属含量参数统计

项目	Pb	Cd	Hg
最大值 (mg/kg)	0.27	0.38	0.009
最小值 (mg/kg)	0.05	0.22	ND
平均值 (mg/kg)	0.16	0.29	ND
变异系数 (%)	178.5	111.0	187.6
食品中污染物限量 ^[16] (mg/kg)	0.30	0.20	0.01
无公害蔬菜安全要求 ^[17] (mg/kg)	0.20	0.05	0.01

注:ND 表示未检测出。



标有不同小写字母表示重金属含量在 0.05 水平上具有显著性差异

图1 不同菜类重金属含量

关,对重金属有一定的吸收和富集作用;相对于其他 2 种重金属,Cd 在各菜类中含量较高,且远远高于 Hg 含量;Hg 和 Cd 这 2 种重金属含量在叶菜类和果菜类中均高于根菜类和豆菜类。Pb 在叶菜类和果菜类中有显著性差异 ($P < 0.05$),Cd 在叶菜类和果菜类与根菜类均有显著性差异 ($P < 0.05$),Hg 在 4 类蔬菜中均没有显著性差异 ($P > 0.05$)。总体来看,Pb 的污染排序为叶菜类 > 豆菜类 > 根菜类 > 果菜类;Cd 的污染排序为叶菜类 > 果菜类 > 豆菜类 > 根菜类;Hg 的污染排序为叶菜类 > 果菜类 > 根菜类 > 豆菜类。大量研究表明,叶菜类蔬菜之所以重金属含量高,是由于叶片的蒸发量大,极易吸收和富集重金属等污染物,同时叶菜类蔬菜叶片较多,与空气接触面积大,易吸收大气中粉尘污染物^[13-15]。

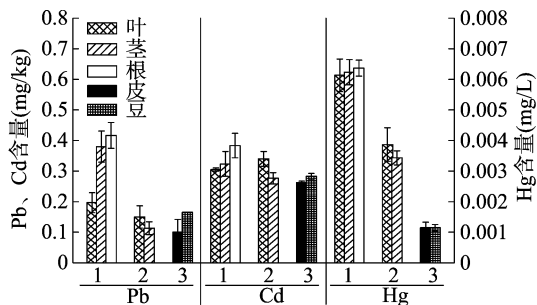
2.3 蔬菜各部位重金属含量比较

选取几种不同蔬菜来研究其不同部位对 Pb、Cd、Hg 的富集作用及差异,结果如图 2 所示。其中,Pb、Cd、Hg 在根茎叶类蔬菜中含量范围分别为 0.19 ~ 0.42、0.30 ~ 0.38、0.006 1 ~ 0.006 3 mg/kg;在叶茎类蔬菜中,Pb、Cd、Hg 浓度平均值分别为 0.13、0.31、0.003 6 mg/kg;在豆菜类中皮和种子的 Pb、Cd、Hg 含量的平均值分别为 0.10、0.27、0.001 1 mg/kg。

因此,Pb、Cd、Hg 在根茎叶不同器官的富集量由多到少为根 > 茎 > 叶,这可能与蔬菜根系对重金属的吸收富集高于茎和叶有关。在茎叶部位富集排序为叶 > 茎,3 种重金属含量在豆菜类皮和豆子中差不多,皮略大于豆子。不同器官 3 种重金属的含量有差异,但无明显差异。不同蔬菜的生理机能对不同重金属元素有不同的吸收富集作用,结果有待进一步研究证明。

2.4 蔬菜重金属的污染评价

利用单因子污染指数法、综合污染指数法的评价方法和 GB 2762—2005《食品中污染物限量》、GB 18406.1—2001《农



1—茴香、葱和菠菜具备叶茎根;2—苋兰、白菜和芹菜具备叶茎;3—豇豆和荷兰豆具备皮和种子

图2 蔬菜不同部位 Pb、Cd、Hg 含量

产品安全质量 无公害蔬菜安全要求》,计算蔬菜重金属的单项污染指数和综合污染指数,结果如表 5 所示。

以 GB 2762—2005《食品中污染物限量》为标准,24 种蔬菜中,66.7% 的蔬菜 Pb 单因子污染指数 < 0.7,属于清洁水平,且单因子污染指数最大值为 0.88;Cd 单项污染指数为 1.11 ~ 1.91,均属于轻度污染程度;所有蔬菜 Hg 都处于安全范围之内,单项污染指数变化范围为 0 ~ 0.92,均处于清洁水平。就综合污染指数来看,所有蔬菜综合污染指数 < 2,属于轻度污染,其中综合污染指数最小值和最大值分别为 0.91、1.56。各种类蔬菜 Pb、Cd、Hg 单项污染指数平均值分别为 0.54、1.45、0.27,综合污染指数平均值为 1.12。

研究结果表明,在 24 种蔬菜中,以 GB 18406.1—2001《农产品安全质量 无公害蔬菜安全要求》为标准,Pb 超标(即单项污染指数 $P_i \geq 1$)的种类占 33.33%,并以韭菜单项污染指数最大,为 1.33,均处于开始受污染水平,属于轻度污染;其他蔬菜的污染程度都属于安全或警戒级,污染水平都属于清洁。24 种蔬菜 Cd 含量均超标,最小污染指数为 4.44,最大为 7.64。就综合污染指数来看,所有蔬菜均 > 3.0,其中最小的综合污染指数为 3.41,最大的为 5.74。因为无公害蔬菜安全要求比较严格,所以蔬菜的污染指数较高,故本研究区蔬菜达不到无公害蔬菜要求的标准。

结合单项污染指数和综合污染指数,该研究区 3 种重金属污染程度排序为 Cd > Pb > Hg。总体上,叶菜类、果菜类、根菜类和豆菜类的综合污染指数平均值为 1.26、1.11、1.04、1.12(以 GB 2762—2005《食品中污染物限量》为标准),因此 3 种重金属的污染排序为叶菜类 > 豆菜类 > 果菜类 > 根菜类。蔬菜对重金属的富集除了由叶片对大气中气态铅、汞等吸收外,还可以经植物根系从土壤中吸收,重金属经土壤-植物体系进入蔬菜叶片中又受到根系-土壤界面与根-茎叶界面的阻隔影响,而若植物果实部分吸收重金属,还会受到茎叶-果实界面的阻隔^[18-21]。因此,叶菜类蔬菜对重金属的富集能力较强。

2.5 蔬菜健康风险评估

根据 24 种蔬菜重金属含量的平均值和儿童、成人的各自蔬菜摄取量,对儿童与成人 2 种人群分别进行蔬菜中重金属的每日摄入量(EDI)及风险系数(HQ)的估算。结果表明,Cd 的 EDI 值超出 RfD 值,可能对人体具有潜在的健康隐患,Pb 和 Hg 的 EDI 值均远小于 RfD 值,对人体没有健康风险,这与陈志良等的研究结果^[15]相同。结合图 3 可知,蔬菜重金属对儿童可能造成的健康风险要高于成年人。24 种蔬菜中重金

表 5 蔬菜重金属污染评价结果

样品	以 GB 2762—2005《食品中污染物限量》为标准				以 GB 18406.1—2001《农产品安全质量 无公害蔬菜安全要求》为标准			
	单项污染指数			综合污染指数	单项污染指数			综合污染指数
	Pb	Cd	Hg		Pb	Cd	Hg	
叶菜类								
甘蓝	0.77	1.38	0.23	1.12	1.15	5.50	0.23	4.21
茴香	0.73	1.35	0.90	1.19	1.10	5.40	0.90	4.20
茺兰	0.75	1.87	0.85	1.56	1.13	7.48	0.85	5.74
芹菜	0.17	1.91	0.19	1.45	0.25	7.64	0.19	5.73
白菜	0.57	1.32	0.03	1.04	0.86	5.28	0.03	4.01
生菜	0.32	1.46	0.10	1.12	0.48	5.84	0.10	4.40
韭菜	0.88	1.87	0.00	1.47	1.33	7.46	0.00	5.67
葱	0.49	1.58	0.26	1.24	0.74	6.30	0.26	4.78
油麦菜	0.75	1.34	0.18	1.09	1.13	5.36	0.18	4.10
菠菜	0.74	1.60	0.75	1.34	1.11	6.38	0.75	4.91
果菜类								
茄子	0.36	1.65	0.12	1.27	0.54	6.60	0.12	4.97
辣椒	0.30	1.40	0.92	1.17	0.46	5.60	0.92	4.29
苦瓜	0.47	1.37	0.19	1.08	0.70	5.48	0.19	4.16
西红柿	0.50	1.59	0.21	1.25	0.75	6.36	0.21	4.82
黄瓜	0.57	1.19	0.09	0.95	0.85	4.76	0.09	3.62
青椒	0.27	1.21	0.14	0.94	0.41	4.84	0.14	3.65
根菜类								
大蒜	0.72	1.13	0.25	0.94	1.08	4.50	0.25	3.47
洋葱	0.73	1.11	0.15	0.91	1.10	4.44	0.15	3.41
生姜	0.42	1.63	0.24	1.27	0.63	6.50	0.24	4.91
白萝卜	0.43	1.25	0.13	0.98	0.65	4.98	0.13	3.77
胡萝卜	0.63	1.51	0.17	1.20	0.95	6.04	0.17	4.59
马铃薯	0.26	1.20	0.15	0.93	0.40	4.80	0.15	3.62
豆菜类								
豇豆	0.57	1.30	0.14	1.03	0.85	5.20	0.14	3.96
荷兰豆	0.53	1.55	0.09	1.21	0.79	6.20	0.09	4.69

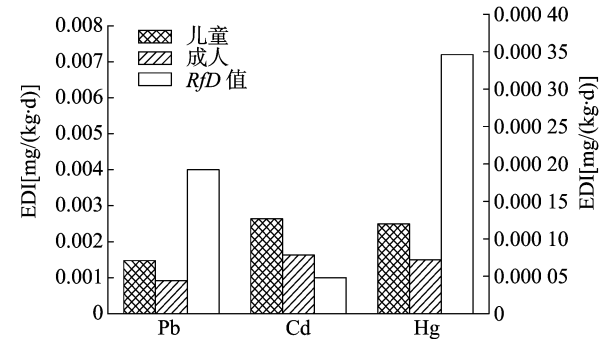


图3 儿童及成人的每日摄入重金属量(EDI)

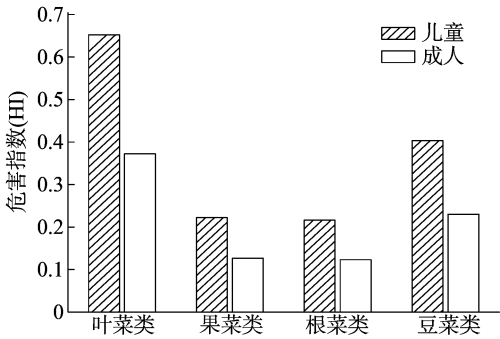


图4 蔬菜重金属的危害指数(HI)

属的危害指数(HI)呈现与EDI值类似的趋势(图4),即不同种类蔬菜重金属对儿童的危害指数均高于成人。同时,尽管重金属Pb和Hg的EDI值均小于E_d值,但不能保证人体健康是安全的,因为Rattan等研究表明,除了蔬菜暴露外,人体还可从大气、水、其他食物等渠道富集重金属^[22],所以EDI值并不能完全代表人体中富集的所有重金属的健康风险。

2.6 不同地区蔬菜重金属含量比较

目前我国城市蔬菜中重金属污染一般有Pb、Cd、Hg、Zn,其他地区Pb、Cd、Hg重金属含量如表6所示,3种重金属含量比较均为Pb>Cd>Hg,本研究结果与之不一致,可能因为河

表 6 不同地区蔬菜重金属含量

地区	不同重金属含量(mg/kg)			文献
	Pb	Cd	Hg	
甘肃	0.014~0.056	0.006~0.024	0.001 0~0.006 0	[18,21]
四川	0.017~1.308	0.001~0.048	0.000 3~0.011 5	[4]
山西	0.096~0.267	0.016~0.044	0.001 6~0.007 2	[22]
河北	0.004~0.020	0.006~0.018	0.000 1~0.001 0	[23~24]
广东	0.020~0.450	0.010~0.070	0~0.010 0	[15,25]

北平原地区土壤Cd污染大于其他2种重金属^[26,28~29]。另外,蔬菜对重金属的吸收和富集作用还取决于其他因素,如气

候、施肥、灌溉、大气污染状况以及综合因素,因此上述分析仅是蔬菜重金属含量和富集作用的一种趋势^[29]。

3 结论

河北燕郊超市市售的 24 种蔬菜 Pb 和 Hg 的含量均低于食品中污染物限量,重金属 Cd 轻微超标,是主要污染物,3 种重金属污染程度排序为 Cd > Pb > Hg。Hg 在叶菜类蔬菜中的富集能力最强,其次为果菜类,后为根菜类,最后为豆菜类;蔬菜对 Pb 的富集能力叶菜类 > 豆菜类 > 根菜类 > 果菜类;叶菜类蔬菜对 Cd 的富集能力强于其他 3 类蔬菜,而根菜类、豆菜类和果菜类蔬菜基本一致,这与淮南煤矿区蔬菜^[13]、广州蔬菜^[30]等重金属污染情况相似,可能与叶菜类对重金属的富集能力较强有关。

结合单项污染指数和综合污染指数,该研究区 3 种重金属污染程度排序为 Cd > Pb > Hg。以 GB 2762—2005《食品中污染物限量》为标准,叶菜类、果菜类、根菜类和豆菜类的综合污染指数平均值分别为 1.26、1.11、1.04、1.12。

健康风险评估表明,河北燕郊居民日常食用的叶菜类重金属累积健康风险较高,且经膳食摄入重金属 Cd 对人体健康可能会造成危害,对人体具有潜在的健康风险。经口摄入蔬菜重金属对儿童可能造成的暴露风险要高于成年人。因此,需进一步研究燕郊蔬菜中 Cd 的污染来源并进行有效防治,保障居民饮食安全以降低健康风险。本研究采集样品有限,还需大批量采样作进一步研究。

参考文献:

- [1] 李晓晨,赵 丽,赵星明. 南京市郊区蔬菜重金属污染特征的研究[J]. 安徽农业科学,2007,35(30):9650-9651.
- [2] Zheng N, Wang Q C, Zheng D M. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables[J]. Science of the Total Environment, 2007,383(1/2/3):81-89.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Zhuang P, McBride M B, Xia H P, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China[J]. Science of the Total Environment, 2009,407(5):1551-1561.
- [6] 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(4):742-747.
- [7] 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.
- [8] 吴新民,李恋卿,潘根兴,等. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. 环境科学,2003,24(3):105-111.
- [9] Khan S, Cao Q, Zheng Y M, et al. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2008,152(3):686-692.
- [10] 徐小艳,孙远明,苏文焯,等. 微波消解-石墨炉原子吸收光谱

- 法连续测定水果和蔬菜中铅铬镉[J]. 食品科学,2009,30(10):206-208.
- [11] 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.
- [12] 李如忠,潘成荣,徐晶晶,等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. 环境科学,2013,34(3):1076-1085.
- [13] 程家丽,张贤辉,唐阵武. 淮南煤矿区蔬菜重金属污染特征及其健康风险[J]. 环境与健康杂志,2016,33(2):127-130.
- [14] 陆素芬,宋 波,伏凤艳,等. 南丹矿业活动影响区蔬菜重金属含量及健康风险[J]. 生态与农村环境学报,2016,32(3):478-485.
- [15] 陈志良,黄 玲,周存宇,等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. 环境科学,2017,38(1):389-398.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 食品中污染物限量:GB 2762—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局. 农产品安全质量 无公害蔬菜安全要求:GB 18406.1—2001[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [18] 方风满,汪琳琳,谢宏芳,等. 芜湖市三山区蔬菜中重金属富集特征及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报,2010,29(8):1471-1476.
- [19] 郑袁明,宋 波,陈同斌,等. 北京市菜地土壤和蔬菜中铜含量及其健康风险[J]. 农业环境科学学报,2006,25(5):1093-1101.
- [20] 王彦斌,杨一鸣,曾 亮,等. 甘肃省榆中县菜地土壤与蔬菜中重金属含量及健康风险评估[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(6):234-241.
- [21] 李非里,刘丛强,杨元根,等. 贵阳市郊菜园土-辣椒体系重金属的迁移特征[J]. 生态与农村环境学报,2007,23(4):52-56.
- [22] Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, et al. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater — A case study[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005,109(3/4):310-322.
- [23] Yves U J, 蒋煜峰,孙 航,等. 兰州市西固区蔬菜重金属污染现状与健康风险评价研究[J]. 环境科学与管理,2016,41(11):107-111.
- [24] 崔 旭,葛元英,张小红. 晋中市部分蔬菜中重金属含量及其健康风险[J]. 中国农学通报,2009,25(21):335-338.
- [25] 贡冬梅,茹淑华,张国印,等. 永年县典型蔬菜田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.
- [26] 茹淑华,耿 暖,张国印,等. 河北省典型蔬菜产区土壤和蔬菜中重金属累积特征研究[J]. 生态环境学报,2016,25(8):1407-1411.
- [27] Cai L M, Huang L C, Zhou Y Z, et al. Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010,20(1):121-134.
- [28] 郭海全,郝俊杰,李天刚,等. 河北平原土壤重金属人为污染的富集因子分析[J]. 生态环境学报,2010,19(4):786-791.
- [29] 李书幻,温祝桂,陈亚茹,等. 我国蔬菜重金属污染现状与对策[J]. 江苏农业科学,2016,44(8):231-235.
- [30] 王佛娇,邓敬颂,程小会,等. 广东省部分基地蔬菜重金属污染评价[J]. 农业资源与环境学报,2014,31(5):446-449.