

风险评估

深圳市居民通过蔬菜对镉的暴露风险评估

杨淋清,潘柳波,王舟,罗贤如,张慧敏,张锦周,黄薇

(深圳市疾病预防控制中心,广东深圳 518055)

摘要:目的 评估深圳市居民通过蔬菜对镉的暴露风险,并分析主要原因和可能的控制措施。方法 应用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法检测蔬菜中镉含量,根据2008年深圳市居民蔬菜消费量数据以及2015—2016年深圳市蔬菜中镉污染数据,应用@risk软件模拟计算深圳市居民通过蔬菜对镉的暴露水平,应用回归分析探讨影响镉暴露水平的主要原因,应用应力分析探索可能的控制措施。结果 95%的深圳市居民通过蔬菜对镉的暴露水平低于0.2966 μg/kg BW,按照经蔬菜摄入镉占总膳食中镉来源14%估计,有18.20%的深圳市居民通过蔬菜摄入镉超出世界卫生组织规定的暂定每月摄入耐受量(PTMI)值,叶菜的镉污染水平以及叶菜的消费量是影响通过蔬菜对镉暴露量的最主要因素,通过将叶菜中镉污染控制在现有污染水平的80%以内可以将通过蔬菜对镉的总暴露水平平均数下降35.58%,P95下降40.19%,镉摄入超PTMI值的人群比例降至10.50%。结论 深圳市居民通过蔬菜暴露于镉的风险较大,通过控制叶菜中高浓度镉污染可以在一定程度上降低居民通过蔬菜暴露于镉的风险。

关键词:蔬菜;镉;蒙特卡罗;食品安全;风险评估;重金属;食品污染物

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2018)04-0436-05

DOI:10.13590/j.cjfh.2018.04.020

Risk assessment of cadmium exposure of Shenzhen residents through vegetablesYANG Lin-qing, PAN Liu-bo, WANG Zhou, LUO Xian-ru, ZHANG Hui-min,
ZHANG Jin-zhou, HUANG Wei

(Shenzhen Center for Disease Control and Prevention, Guangdong Shenzhen 518055, China)

Abstract: Objective To assess the risk of cadmium exposure through vegetables in Shenzhen, and to analyze the main causes and possible control measures. **Methods** The content of cadmium in vegetables was detected by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Based on the data of vegetable consumption in Shenzhen in 2008 and the data of cadmium pollution in vegetables in Shenzhen from 2015 to 2016, the @risk software was applied to simulate and analyze the exposure for Shenzhen residents through vegetables. The main causes of cadmium exposure were analyzed by regression analysis, and the possible control measures were explored by stress analysis. **Results** 95% of Shenzhen citizens were exposed to cadmium by vegetables less than 0.2966 μg/kg BW. Assuming 14% of the total dietary cadmium intake were from vegetables, 18.20% of the Shenzhen residents were exposed to cadmium through vegetables beyond the provisional tolerable monthly intake (PTMI) value suggested by WHO. The cadmium pollution level and the consumption of leafy vegetables were the most important factors affecting the exposure of cadmium through vegetables. By controlling cadmium contamination in leafy vegetables within 80% of the existing pollution level, the total exposure of cadmium through vegetables would decrease by 35.58% in mean value and 40.19% in P95, and the proportion of people with cadmium intake above PTMI would reduce to 10.50%. **Conclusion** The exposure level of Shenzhen residents to cadmium through vegetables was a relatively high risk. By controlling cadmium pollution in leafy vegetables, the risk of cadmium exposure through vegetables could be reduced.

Key words: Vegetable; cadmium; Monte Carlo; food safety; risk assessment; heavy metal; food contaminations

收稿日期:2018-06-24

基金项目:国家自然科学基金项目(81172710);深圳市科技计划项目(JCYJ20160428143634086);深圳市现场流行病学培训项目四期

作者简介:杨淋清 女 副主任医师 研究方向为食品毒理学

E-mail:linqingyang@126.com

通信作者:张锦周 男 主任医师 研究方向为营养与食品卫生学

E-mail:857415617@126.com

由于自然地理条件和人类活动的影响,镉在水、土壤中分布有增高趋势^[1],不同类别的食物对镉具有不同程度的富集效应,因此人们通过饮食暴露于镉的风险较高^[2]。镉在人体内代谢过程缓慢,半衰期达15~30年,2010年粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)第73次报告中建议取消镉的暂定每周摄入耐受量

(provisional tolerable weekly intake, PTWI), 以 25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BW 的暂定每月摄入耐受量 (provisional tolerable monthly intake, PTMI)^[2] 替代。2015 年美国毒物管理委员会 (ATSDR) 综合考虑不同外来化学物质的暴露水平潜在毒性危害总结出物质优先列表 (substance priority list, SPL), 在 275 种化学物质中镉位列第 7, 镉作为最有可能危害人体健康的有毒物质之一在国际范围内受到关注。根据文献报道^[3] 和 WHO 的报告^[4], 我国居民通过膳食对镉的暴露处于较高水平, 仅次于日本, 高于欧洲 16 国、美国、澳大利亚、智利、黎巴嫩、韩国等。谷物是最主要膳食中镉的来源, 其次是蔬菜, 广东地区蔬菜中镉污染水平较全国普遍水平高^[5], 深圳市居民蔬菜消费量高于全国水平^[6], 因此本研究应用 @ risk 软件进行蒙特卡罗模拟对深圳市居民通过摄食蔬菜而暴露于镉的风险进行评估, 并探索可能的控制措施。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 蔬菜中镉污染水平

根据 2015—2016 年《深圳市食品安全风险监测工作方案》在深圳市采集瓜类、菌菇类、块根类、鳞茎类、茄果类、薯蕷类、鲜豆类、叶菜类、芸薹属类等 9 类市售蔬菜样品 385 份, 应用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 法对蔬菜样品中的镉元素含量进行分析, 检出限为 0.002 mg/kg , 应用 Microsoft Excel 2007 建立深圳市市售蔬菜中镉污染水平数据库。

1.1.2 居民蔬菜消费量调查

根据 2008 年黄薇等^[6] 开展的“深圳市居民食物消费量调查分析”中对深圳市居民蔬菜消费量的 3 d 入户调查原始数据, 应用 Microsoft Excel 2007 建立深圳市居民蔬菜消费量数据库。

1.2 方法

1.2.1 评价标准

GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[7] 中规定的蔬菜中镉限量标准为新鲜蔬菜 0.05 mg/kg , 叶菜蔬菜 0.2 mg/kg , 豆类蔬菜、块根和块茎蔬菜、茎类蔬菜 0.1 mg/kg , 芹菜 0.2 mg/kg 。

1.2.2 评估方法

根据对深圳市市售蔬菜中镉污染情况的监测数据和深圳市居民蔬菜消费水平的调查数据, 应用 @ risk 软件对深圳市居民对不同种类蔬菜的消费量、市售不同种类蔬菜的镉污染水平进行分布拟合, 根据最小信息量准则 (Akaike's information

criterion, AIC) 值选择最优分布, 对不同种类蔬菜的消费率和不同种类蔬菜中镉的检出率采用离散分布描述。首先通过 (全部被调查者每人每天单位体重摄入量数据 \times 人群消费率) (g/kg BW) \times (蔬菜样品中镉污染数据 \times 镉检出率) (mg/kg) 计算得出通过每种蔬菜的镉暴露水平 ($\mu\text{g}/\text{kg}$ BW), 最后通过相加得出深圳市居民通过蔬菜中镉的总暴露水平 ($\mu\text{g}/\text{kg}$ BW)。采用拉丁超立方体抽样方法从不同种类蔬菜消费量分布、不同种类蔬菜中镉污染水平分布中抽样计算, 进行 110 000 次迭代, 模拟深圳市居民通过摄食蔬菜对镉暴露的风险水平。

2 结果

2.1 蔬菜样品中镉的含量及分布拟合

9 类蔬菜中镉的总体检出率为 68.57% (264/385), 超标率为 1.56% (6/385), 其中菌菇类、芸薹属类、块根类蔬菜有超标样品; 所有种类蔬菜均检出镉, 检出率从高到低依次为叶菜类 > 茄果类 > 鳞茎类 > 芸薹属类 > 薯蕷类 > 菌菇类 > 块根类 > 鲜豆类 > 瓜类。根据以上数据, 应用 @ risk 软件的分布拟合工具对数据进行拟合, 结果显示, 9 种蔬菜的镉污染水平均呈指数分布, 分布模型主要参数见表 1。

2.2 深圳市居民蔬菜消费量及分布拟合

被调查人数 853 人, 各种蔬菜的消费率为 27.43% ~ 94.26%, 其中最高的为叶菜类, 其次为瓜类, 鳞茎类最低; 消费量也是叶菜类居首, 均值为 2.581 2 g/kg BW, 最低是菌菇类, 均值为 0.144 8 g/kg BW, 见表 2。根据以上数据, 应用 @ risk 软件的分布拟合工具对数据进行拟合, 结果显示, 9 种蔬菜的消费量呈指数分布, 分布模型主要参数见表 2。

2.3 深圳市居民通过蔬菜对镉的暴露风险评估

经 @ risk 软件模拟计算, 95% 的深圳市居民通过食用 9 种蔬菜对镉的暴露量低于 0.296 6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BW, 平均值为 0.075 6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BW, P50 为 0.031 3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BW, 见表 3。2008 年蒋定国^[8] 对镉的膳食摄入量评估研究结果显示, 中国居民通过蔬菜对镉的暴露水平约占总体水平的 14%, 根据 WHO 提出的 25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BW 的 PTMI 限量计算, 通过蔬菜对镉的暴露水平应低于 0.117 0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ BW, 模拟计算结果显示有 18.20% 的深圳市居民通过蔬菜暴露于镉的水平高于此值, 见图 1。

应用回归分析的方法探讨 36 个输入变量 (9 种蔬菜中镉污染水平、检出率、单位体重消费水平、消费率) 对镉暴露量的影响, 结果显示, 前四位影响深圳市居民通过蔬菜暴露于镉的最主要因素依次

表1 2015—2016年深圳市市售蔬菜中镉污染情况

Table 1 Cadmium pollution level in vegetables sold in Shenzhen in 2015 and 2016 year

蔬菜种类	国标限量 /(mg/kg)	样品 份数	检出份数 (%)	超标份数 (%)	均值 /(mg/kg)	最大值 /(mg/kg)	镉含量分布/(mg/kg)			
							分布函数	平均值	P50	P95
菌菇类	0.05	24	15(62.50)	3(12.50)	0.014 3	0.079 0	Expon(0.013 956)	0.014 0	0.009 7	0.041 8
块根类	0.1	39	22(56.41)	1(2.56)	0.012 7	0.104 9	Expon(0.012 224)	0.012 2	0.008 5	0.036 6
鳞茎类	0.1	55	39(70.91)	0(0.00)	0.011 4	0.075 0	Expon(0.011 128)	0.011 1	0.007 7	0.033 3
茄果类	0.05	27	20(74.07)	0(0.00)	0.008 8	0.035 0	Expon(0.008 501 2)	0.008 5	0.005 9	0.025 5
薯蓣类	0.1	39	27(69.23)	0(0.00)	0.014 0	0.092 0	Expon(0.013 684)	0.013 7	0.009 5	0.041 0
鲜豆类	0.1	42	19(45.24)	0(0.00)	0.005 6	0.060 2	Expon(0.004 913 1)	0.004 9	0.003 4	0.014 7
叶菜类	0.2	109	98(89.91)	0(0.00)	0.030 8	0.130 0	Expon(0.030 707)	0.030 7	0.021 3	0.092 0
芸薹属类	0.05	24	17(70.83)	2(8.33)	0.011 1	0.068 0	Expon(0.010 785)	0.010 8	0.007 5	0.032 3
瓜类	0.05	26	7(26.92)	0(0.00)	0.004 5	0.046 0	Expon(0.003 624 6)	0.003 6	0.002 5	0.010 9
合计	—	385	264(68.57)	6(1.56)	0.012 6	0.130 0	—	—	—	—

注:—表示该项不进行合计或不能计算给出具体参数或数值

表2 2008年深圳市居民蔬菜消费情况($n=853$)

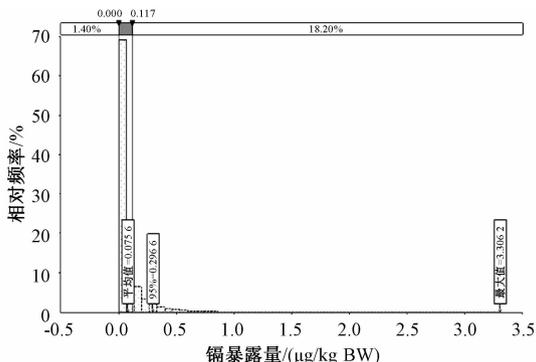
Table 2 Vegetable consumption data in Shenzhen in 2008

蔬菜种类	消费人数	消费率/%	均值 /(g/kg BW)	最大值 /(g/kg BW)	消费量分布/(g/kg BW)			
					分布函数	平均值	P50	P95
块根类	400	46.89	0.436 2	5.555 6	Expon(0.436 21)	0.436 2	0.302 4	1.306 8
鲜豆类	301	35.29	0.320 3	3.250 0	Expon(0.320 25)	0.320 3	0.222 0	0.959 4
茄果类	510	59.79	0.578 9	6.666 7	Expon(0.578 85)	0.578 9	0.401 2	1.734 1
瓜类	545	63.89	0.837 5	8.800 0	Expon(0.837 53)	0.837 5	0.580 5	2.509 0
鳞茎类	234	27.43	0.187 7	4.058 0	Expon(0.187 67)	0.187 7	0.130 1	0.562 2
叶菜类	804	94.26	2.581 2	16.666 7	Expon(2.581 2)	2.581 2	1.789 2	7.732 6
菌菇类	293	34.35	0.144 8	3.948 2	Expon(0.144 77)	0.144 8	0.100 3	0.433 7
芸薹属类	282	33.06	0.322 7	4.545 5	Expon(0.322 73)	0.322 7	0.223 7	0.966 8
薯蓣类	414	48.53	0.506 4	6.166 7	Expon(0.506 43)	0.506 4	0.351 0	1.517 1

表3 深圳市居民通过不同种类蔬菜对镉的暴露评估($\bar{x} \pm s$)

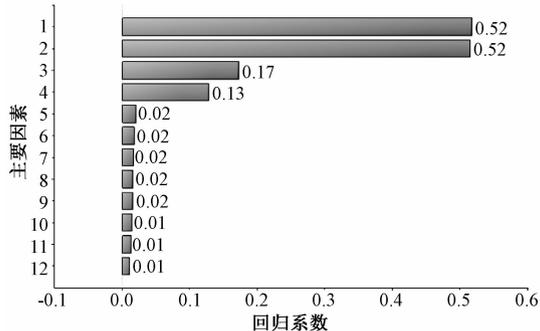
Table 3 Evaluation of cadmium exposure in Shenzhen residents through different vegetables

蔬菜种类	平均值/($\mu\text{g/kg BW}$)	P50/($\mu\text{g/kg BW}$)(95%可信区间)	P95/($\mu\text{g/kg BW}$)(95%可信区间)
叶菜类	0.067 2 \pm 0.129 2	0.020 9(0.010 8, 0.024 0)	0.287 9(0.223 1, 0.413 0)
鳞茎类	0.000 4 \pm 0.001 8	0.000 0(0.000 0, 0.000 0)	0.002 3(0.001 4, 0.004 5)
鲜豆类	0.000 3 \pm 0.001 2	0.000 0(0.000 0, 0.000 0)	0.001 4(0.000 7, 0.002 9)
薯蓣类	0.002 3 \pm 0.007 6	0.000 0(0.000 0, 0.000 0)	0.013 1(0.009 0, 0.021 9)
块根类	0.001 4 \pm 0.005 4	0.000 0(0.000 0, 0.000 0)	0.008 3(0.005 3, 0.014 7)
茄果类	0.002 2 \pm 0.006 2	0.000 0(0.000 0, 0.000 0)	0.011 7(0.008 4, 0.018 4)
瓜类	0.000 5 \pm 0.002 3	0.000 0(0.000 0, 0.000 0)	0.002 8(0.001 5, 0.005 5)
菌菇类	0.000 4 \pm 0.001 8	0.000 0(0.000 0, 0.000 0)	0.002 5(0.001 5, 0.004 5)
芸薹属类	0.000 8 \pm 0.003 3	0.000 0(0.000 0, 0.000 0)	0.004 7(0.002 9, 0.008 5)
合计	0.075 6 \pm 0.129 7	0.031 3(0.029 0, 0.035 0)	0.296 6(0.232 0, 0.422 0)

图1 深圳市居民通过蔬菜暴露于镉的概率密度图
Figure 1 Probability density plot of cadmium exposed to vegetables in Shenzhen

是:叶菜类镉浓度,叶菜类消费量,叶菜类镉检出率,叶菜类消费率,见图2。应用@ risk软件中单变量求解分析显示,在保证叶菜类消费率和消费量不变的前提下,如果要保证95%的人群通过蔬菜对镉的暴露水平低于0.117 0 $\mu\text{g/kg BW}$,在叶菜类中镉污染分布不变的情况下,需要将叶菜类中镉污染浓度控制在0.013 9 mg/kg范围内。

将影响总镉暴露量的主要因素:叶菜类镉浓度、叶菜类消费量、叶菜类镉检出率以及叶菜类消费率作为输入项,观察其百分位数对总镉暴露量的影响。结果显示,随着叶菜类镉浓度和叶菜类消费量百分位数的增加,总镉暴露水平持续升高,具有良好的相关性;叶菜类消费率和叶菜类镉检出率在



注:1. 叶菜类镉浓度;2. 叶菜类消费量;3. 叶菜类镉检出率;4. 叶菜类消费率;5. 茄果类镉浓度;6. 薯蕷类消费率;7. 茄果类消费量;8. 薯蕷类消费量;9. 薯蕷类镉浓度;10. 茄果类消费率;11. 块根类镉浓度;12. 瓜类镉浓度

图2 影响深圳市居民通过蔬菜暴露于镉的风险的主要因素

Figure 2 Main factors affecting the risk of exposure to cadmium through vegetables in Shenzhen

P20 百分位数前,随着百分位数的增加对总镉暴露量的影响较大,之后进入平台阶段,百分位数的增加对总镉的暴露量不再有影响,见图3。

因叶菜类镉污染的数据呈指数分布,因此尾端的高污染值对均数影响较大,应用@ risk 软件中的应力分析,分别根据叶菜类镉污染数据的 0% 至 90%,以及 0% 至 80% 施加应力,每次进行 20 000

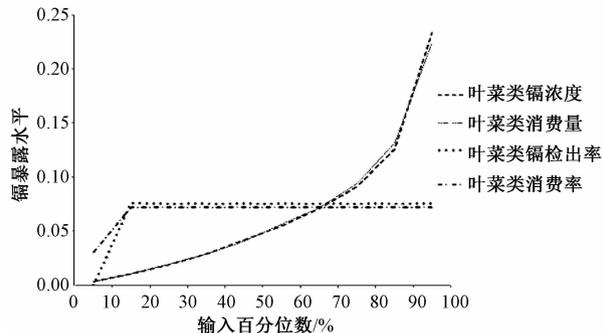


图3 主要因素百分位数对总镉暴露量影响的蛛网图

Figure 3 Spider diagram of the influence of main factors on total cadmium exposure

次迭代,模拟计算结果显示,将叶菜类镉污染水平控制在现有水平的 90%、80% 以内,可以将深圳市居民通过蔬菜暴露于镉的均数从 0.075 6 $\mu\text{g}/\text{kg BW}$ 降至 0.058 0、0.048 7 $\mu\text{g}/\text{kg BW}$, 分别降低了 23.28% 和 35.58%; P95 百分位数分别降低了 26.06% 和 40.19%; 镉暴露水平超过 PTMI 的人群比例从 18.20%, 分别降至 14.10% 和 10.50%, 见表4。通过控制叶菜类中高浓度镉污染可以在一定程度上降低深圳市居民通过蔬菜暴露于镉的风险。

表4 对叶菜类蔬菜中镉污染水平控制的应力分析

Table 4 Stress analysis of cadmium pollution level in leafy vegetables

叶菜类中镉浓度范围/%	镉暴露量					
	平均值 /($\mu\text{g}/\text{kg BW}$)	最大值 /($\mu\text{g}/\text{kg BW}$)	P50 /($\mu\text{g}/\text{kg BW}$)	P5 /($\mu\text{g}/\text{kg BW}$)	P95 /($\mu\text{g}/\text{kg BW}$)	超 PTMI 比例 /%
0~100	0.075 6	3.306 2	0.031 3	0.001 1	0.296 6	18.20
0~90	0.058 0	1.449 3	0.028 3	0.001 1	0.219 3	14.10
0~80	0.048 7	0.979 0	0.025 2	0.001 1	0.177 4	10.50

3 讨论

环境中的镉通过农作物的种养殖过程进入食品,通过食物链的富集效应,对人群食品安全产生较大影响,在世界范围内受到关注。不同国家和地区因环境污染程度的不同以及饮食习惯的差异,通过食物对镉的暴露水平各不相同^[9-11]。从食物来源看,我国不同区域镉的膳食来源差距较大,沿海地区以及经济发达地区居民从谷物、水产品、肉类中摄入镉比例较高,内陆和经济欠发达地区则从谷物、蔬菜中摄入镉比例较高,全国范围内的调查显示谷物类是我国居民最主要的膳食中镉来源,占总摄入量的 65%,其次为蔬菜,约占总摄入量的 14%^[8]。既往深圳市调查也显示居民膳食中镉暴露风险处于较高水平,从食物来源看,淡水鱼、粮食类、畜肉类(包括畜肉和畜肉内脏)、蔬菜类食品是主要的镉来源^[12]。

本研究利用 2015—2016 年深圳市食品安全风险监测中蔬菜中镉污染水平数据,与既往报道的珠江流域蔬菜中镉污染水平相当,均在中国未污染土地蔬菜中镉污染水平范围内^[13],其中有 3 份菌菇类、2 份芸薹属类、1 份块根类蔬菜超出国家标准,叶菜类蔬菜中镉的检出率最高,其余样品均未超出国家标准。结合蔬菜消费量数据进行模拟计算,发现在当前国家标准限量的水平下,居民通过蔬菜暴露于镉的风险仍较大。对蔬菜而言,叶菜类蔬菜对总镉摄入量的影响最大,一方面是叶菜类蔬菜中镉检出率以及检出值较高,另一方面是叶菜类蔬菜消费率及消费量较大。既往报道证实,相同的土壤环境和种植条件下,叶菜类蔬菜对镉的富集明显高于其他作物^[14],并且大部分镉是通过根系直接从土壤吸收,并在叶部位富集^[15],大气沉降及土壤扬尘对叶菜类蔬菜中镉污染水平影响均较小,通过浸泡、清洗的方式并不能有效降低叶菜类蔬菜中镉的含

量^[16],烹饪过程对蔬菜中镉浓度影响也比较轻微,蔬菜中镉的生物利用率较高^[17]。控制居民通过叶菜对镉的摄入水平,最关键是在“农田”环节对种植环境和种植过程综合治理;在环境和农业综合整治的基础上,鉴于我国叶菜类蔬菜消费量较大的现实情况,在“市场”环节对叶菜类蔬菜中镉的限量标准进行修订;在“餐桌”环节加强健康教育,呼吁居民在蔬菜选择上要多样化。既往研究提示,我国10岁以下儿童中镉暴露水平远高于WHO建议的安全范围,且有年龄越小暴露水平越高的趋势^[8],值得引起关注。

本次研究是利用有限的膳食调查和污染物监测数据,采用模拟运算的方式对深圳市居民通过蔬菜对镉暴露水平的评估,数据的局限可能对评估模型具有一定影响;评价依据中采用了蔬菜中镉摄入量占总膳食镉的14%,这一数据是中国疾病预防控制中心2008年基于全国范围内膳食中镉调查和食品污染物监测数据得出的,与深圳市的情况可能存在一定差距;在今后工作中搜集并利用更广泛、更充分的膳食调查和污染物监测数据进行模拟计算,对整体膳食中镉暴露水平评估,可以更加全面、准确反映深圳市居民膳食中镉暴露风险。

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京:环境保护部,2014:1-5.
- [2] World Health Organization. WHO Food Additives Series 64: safety evaluation of certain food additives and contaminants [R]. Geneva: WHO, 2011:305-380.
- [3] YU G G, ZHENG W R, WANG W, et al. Health risk assessment of Chinese consumers to cadmium via dietary intake [J]. *J Trace Elem Med Biol*, 2017, 44(7):137-145.
- [4] World Health Organization. WHO Technical Report Series 960: evaluation of certain food additives and contaminants [R]. Geneva: WHO, 2010:149-161.
- [5] SUN F F, WANG F H, WANG X, et al. Soil threshold values of total and available cadmium for vegetable growing based on field data in Guangdong Province, South China[J]. *J Sci Food Agric*, 2013, 93(8):1967-1973.
- [6] 黄薇, 潘柳波, 王舟, 等. 深圳市居民食物消费量调查分析[J]. *中国食品卫生杂志*, 2015,27(1):57-61.
- [7] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量:GB 2762—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [8] 蒋定国. 铅镉污染与膳食暴露的实证研究[D]. 北京:中国疾病预防控制中心, 2008: 150-152.
- [9] NORTON G J, DEACON C M, MESTROT A, et al. Cadmium and lead in vegetable and fruit produce selected from specific regional areas of the UK[J]. *Sci Total Environ*, 2015,533(6):520-527.
- [10] CHEN M Y, CHAN B T, LAM C H, et al. Dietary exposures to eight metallic contaminants of the Hong Kong adult population from a total diet study[J]. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*, 2014, 31(9):1539-1549.
- [11] BUI A T, NGUYEN H T, NGUYEN M N, et al. Accumulation and potential health risks of cadmium, lead and arsenic in vegetables grown near mining sites in Northern Vietnam [J]. *Environ Monit Assess*, 2016,188(9):525-536.
- [12] 罗贤如, 黄薇, 张锦周, 等. 深圳市居民铅镉膳食摄入水平评估[J]. *中国热带医学*, 2016, 16(12):1204-1207.
- [13] LIU Y, XIAO T, BAVEYE P C, et al. Potential health risk in areas with high naturally-occurring cadmium background in southwestern China [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2015, 112(10):122-131.
- [14] RIZWAN M, ALI S, ADREES M, et al. A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables [J]. *Chemosphere*, 2017, 182(5):90-105.
- [15] BALDANTONI D, MORRA L, ZACCARDELLI M, et al. Cadmium accumulation in leaves of leafy vegetables [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2016, 123(5):89-94.
- [16] 程珂, 杨新萍, 赵方杰, 等. 大气沉降及土壤扬尘对天津城郊蔬菜重金属含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(10):1837-1845.
- [17] ZHUANG P, LI Y W, ZOU B, et al. Oral bioaccessibility and human exposure assessment of cadmium and lead in market vegetables in the Pearl River Delta, South China[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2016, 23(23):24402-24410.