

## 风险评估

2001—2017年我国部分地区蔬菜中砷和重金属累积特征  
及膳食暴露风险

程家丽,任硕,刘婷婷,王同蕾

(中国疾病预防控制中心营养与健康所 卫计委微量元素重点实验室,北京 100050)

**摘要:**目的 探讨我国部分地区蔬菜中砷和重金属的累积特征,并分析潜在膳食暴露风险。方法 搜索论文数据库,收集2001—2017年发表文献中蔬菜铜(Cu)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、砷(As)及汞(Hg)含量的数据,分析我国根茎类、叶菜类及茄果类蔬菜中As和重金属的污染特性,并采用美国环保署推荐的健康风险评估模型评估蔬菜中砷和重金属的膳食暴露风险。结果 3类蔬菜中Cu、Pb、Cd、Cr、As和Hg均呈非正态分布,变异系数均 $<10\%$ 。根茎类、叶菜类及茄果类蔬菜中Cd、As、Hg的含量均差异有统计学意义( $P < 0.05$ ),叶菜类和茄果类蔬菜中Pb-Cr含量差异有统计学意义( $P < 0.05$ ),但3类蔬菜中Cu含量均差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。根茎类蔬菜中Pb、As和Hg的含量较高,叶菜类蔬菜中Cd含量较高。根茎类和叶菜类蔬菜中Pb-Cd及根茎类蔬菜中Pb-Cr相关性均较强( $P < 0.01$ )。3类蔬菜中Cu、Cd、Cr和As污染指数均在安全范围内,而根茎类和叶菜类蔬菜中的Pb和Hg均存在不同程度的污染,但基本属于轻度污染。根茎类和茄果类数值中As和重金属对成人和儿童的风险值均 $<1.0$ ,但叶菜类蔬菜中Pb对成人和儿童的风险值的第95百分位数分别是1.780和2.020,表明叶菜类蔬菜中的Pb存在潜在的人体非致癌风险。结论 中国蔬菜中Cu、Cd、Cr、As和Hg整体污染较轻,但叶菜类蔬菜中Pb污染应引起重视。

**关键词:**蔬菜;砷;重金属;累积;食品污染物;膳食暴露;风险评估

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2018)02-0187-07

DOI:10.13590/j.cjfh.2018.02.013

**Accumulation and dietary exposure risk of arsenic and heavy metals in the vegetables  
from some areas of China, 2001-2017**

CHENG Jia-li, REN Shuo, LIU Ting-ting, WANG Tong-lei

(Key Laboratory of Trace Element Nutrition of National Health and Family Planning Commission,  
National Institute for Nutrition and Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention,  
Beijing 100050, China)

**Abstract: Objective** To investigate the accumulation of arsenic and heavy metals and to better understand the health risks associated with chemicals in vegetables from China. **Methods** Statistical characteristics of the concentrations of six elements, i. e., Cu, Pb, Cd, Cr, As and Hg, in vegetables from some areas of China were investigated, and their health risks were assessed using the hazard model recommended by US Environmental Protection Agency, based on the available information regarding the concentrations of arsenic and heavy metals reported in published literatures. **Results** The Kolmogorov-Smirnov test indicated that all the six elements in three types of vegetables had skewed concentration distributions. And the coefficients of variation of element concentrations are less than 10%. The contents of Cd, As and Hg were significantly different ( $P < 0.05$ ) among rhizome vegetables, leafy vegetables and eggplant vegetables. The contents of Pb and Cr were significantly different ( $P < 0.05$ ) among leafy vegetables and eggplant vegetables. No significant differences ( $P > 0.05$ ) were observed for Cu. The contents of Pb, As and Hg in rhizome and Cd concentration in leafy vegetables were relatively higher, respectively. The linear correlation of Pb-Cd in rhizomes and leafy vegetables were all stronger ( $P < 0.01$ ). The linear correlation of Pb-Cr was stronger in rhizomes vegetables ( $P < 0.01$ ). The pollution indexes showed that the levels of Cu, Cd, Cr and As in three types of vegetables were within the limits of safety. But the levels of Pb and Hg in rhizome vegetables and leafy vegetables belong to slight pollution. The non-carcinogenic risk levels from exposure to arsenic and metals

收稿日期:2018-02-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41701554)

作者简介:程家丽 女 副研究员 研究方向为食品卫生与营养 E-mail:jlcheng77@163.com

(including Cu, Pb, Cd, Cr and Hg) were separately acceptable in rhizome vegetables and eggplant vegetables. However, health risk assessment indicated that the hazard quotients of Pb in leafy vegetables were 1.780 and 2.020 for adult and children at the 95th percentile, respectively. This indicated that the lead in leafy vegetables had a potentially non-carcinogenic risk via food exposure. **Conclusion** The pollution of arsenic, copper, mercury, chromium and cadmium in vegetables in China were generally low, but the lead pollution in leaf vegetables should be of concern.

**Key words:** Vegetables; arsenic; heavy metals; accumulation; food contaminants; dietary exposure; risk assessment

蔬菜中含有丰富的营养物质,在居民的饮食消费中占较大的比例<sup>[1-2]</sup>。近年来,我国城市化和工业的快速发展导致土壤重金属污染较为突出,一定程度上威胁到农产品的安全<sup>[3-4]</sup>。陈涛等<sup>[5]</sup>研究发现,长期污灌已导致农田土壤受到重金属不同程度的污染,尤其汞(Hg)和镉(Cd)污染较明显。马瑾等<sup>[6]</sup>研究发现,珠江三角洲南部地区蔬菜中铅(Pb)、Cd、镍(Ni)3种元素含量超标严重,而且不同蔬菜对重金属的富集能力存在明显差异。

蔬菜对土壤中砷(As)和重金属等具有不同程度的富集,并可通过食物链进入人体而对人体健康构成危害<sup>[7-8]</sup>。张旭红等<sup>[9]</sup>研究发现,北京市市售蔬菜中铬(Cr)含量超标严重,对成人和儿童存在一定的健康风险。刘妍等<sup>[10]</sup>研究结果表明,湘中某矿区蔬菜中Pb和Cd的危险度均>1,居民通过蔬菜摄入Pb和Cd对人体健康存在潜在风险。先前的研究<sup>[11-13]</sup>表明,过量摄入Pb可能会损伤神经、内分泌和免疫系统;过量摄入Cd会引起心血管、肾脏及骨骼等疾病,因此,蔬菜中As和重金属对人体造成的健康风险问题值得关注。为全面了解我国蔬菜中As和重金属污染状况及人体健康风险,本研究基于文献报道数据,全面分析我国不同种类蔬菜的污染特征,并利用健康风险评价模型评估我国蔬菜中As和重金属对人体的潜在健康风险,以期对蔬菜的膳食选择及蔬菜中砷和重金属污染的防控提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 数据收集

通过中国知网、万方、维普、Elsevier ScienceDirect和Springer数据库,收集了2001—2017年发表文献中蔬菜铜(Cu)、Pb、Cd、Cr、As及Hg含量的数据<sup>[14-53]</sup>。选取数据的蔬菜主要包括根茎类、叶菜类及茄果类3类,其中根茎类蔬菜主要包括萝卜、甜菜根、芥菜头芜菁、芜菁甘蓝等,叶菜类蔬菜主要包括白菜、油菜、菜花、西兰花、菠菜、芹菜、生菜、香菜等,茄果类蔬菜主要包括茄子、西红柿、辣椒、冬瓜、黄瓜、南瓜、西葫芦、丝瓜等。为避免重污染区域的干扰,对临近工业污染区域的样品

以及研究中发现有确定污染源影响的样品进行筛选或剔除。经过整理和筛选,收集到有效数据2701个,根茎类、叶菜类和茄果类蔬菜的数据分别为425、1548和728个。本研究中,As和各重金属含量均以总含量计。

#### 1.1.2 筛选原则

文献的收集和筛选遵循以下原则:As和重金属含量的测定采取美国环保局(EPA)推荐的标准方法或国家标准方法,采用原子吸收光谱法或电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定;明确报道了蔬菜的种类及As和重金属;明确报道了采样区域为蔬菜基地或城近郊零散菜地,非工业污染区域菜地。在筛选相关文献的同时,对文献数据进行筛选:监测数据量至少20个以上;数据至少包括算数平均值或中位数及标准差等相关统计量;蔬菜中As和重金属含量为湿重含量,或明确给出了干重/湿重比例。为了使获得的数据具有可比性,将As和重金属全部转换为湿重含量。

可获得数据,主要报道了湖南、广东、贵阳、浙江、山东、山西、武汉、北京、上海、兰州、西安等地蔬菜的污染。对于西部地区报道的数据整体较少,数据筛选中尽可能选用了代表不同区域蔬菜的As和重金属含量数据。由于搜集的文献的研究时间跨度相对较长,不同采样时间的监测数据整合在一起易出现数据的时间偏倚。为了减少数据偏倚,对于同一区域若有不同时间的报道,则选用2010年以后的数据;对于报道的早期污染严重的数据也进行了剔除。对于同一小区域(镇以下),不同菜地类型给出不同统计值或直接给出各样品原始检测数值的文献数据,采用加权算法得出研究区域蔬菜中As和重金属含量均值。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 污染评价方法

采用单因子污染指数( $P_i$ )法来评价蔬菜中As和各重金属的污染状况,用 $P_i = C_i/S_i$ 评价,其中 $C_i$ 为As或重金属的实测值(mg/kg), $S_i$ 为各项评价标准值(mg/kg)。以GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》<sup>[54]</sup>规定的限值评价Pb、Cd、Cr、As和Hg含量,采用联合国粮农组织及世界卫生组织推荐的标准值<sup>[55]</sup>评价Cu含量。蔬菜 $P_i$

可根据结果划分为 5 个等级:  $P_i \leq 0.7$  时,安全、未受污染;  $0.7 < P_i \leq 1$  时,警戒线;  $1 < P_i \leq 2$  时,轻度污染;  $2 < P_i \leq 3$  时,中度污染;  $P_i > 3$  时,严重污染。 $P_i$  值越大,污染越严重<sup>[56]</sup>。

### 1.2.2 健康风险评价方法

采用健康风险评价模型评价蔬菜中 As 和重金属污染人体的健康暴露非致癌风险<sup>[57]</sup>。该方法主要通过污染物的人体平均日摄入量(ADD)与摄入途径下人体暴露每日参考剂量(RfD)的比值作为评价标准。风险值(HQ)的计算公式为  $HQ = ADD/RfD$ ,  $ADD = C \times I/W$ , 其中  $C$  为蔬菜中 As 或重金属的含量(mg/kg),  $I$  为人体对蔬菜的每日消费量(g),  $W$  为体重(kg)。若  $HQ < 1$ , 没有明显风险; 若  $HQ \geq 1$ , 存在非致癌风险<sup>[57]</sup>。本研究中成人体重以 60 kg 计算, 儿童体重以 32.7 kg 计算<sup>[58]</sup>。成人蔬菜每日消费量以 378.4 g 计算, 其中叶菜类 244 g、茄果类 85.8 g、根茎类 48.6 g<sup>[59]</sup>。儿童每日蔬菜的消费量以 231.5 g 计算<sup>[60]</sup>, 不同种类蔬菜摄入比例假设与成人一致, 其叶菜类 150.5 g、茄果类 50.9 g、根茎类 30.1 g。Cu、Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 的 RfD 分别为 40、1.5、1.0、3.0、3.0 和 0.14  $\mu\text{g}/\text{kg BW}$ <sup>[61-65]</sup>。

### 1.3 统计学分析

采用 SPSS 18.0 分析蔬菜中各 As 和重金属含

量的最大值、最小值、标准差、变异系数、偏度、分布形态等统计学特征以及 As 和重金属污染健康风险值的统计学特征, 其中正态分布的判定采用 Kolmogorov-Smirnov 检验,  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。As 和重金属含量差异性分析采用非参数 Mann-Whitney U (两个独立样本) 检验或 Kruskal-Wallis H 检验(两个以上独立样本)。

## 2 结果

### 2.1 蔬菜中 As 和重金属的统计分析

我国部分地区蔬菜中 Cu、Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 含量及其统计学特征如表 1~3 所示。整体上, 根茎类、叶菜类及茄果类蔬菜差异性较小, 3 类蔬菜中 6 种元素的变异系数均  $< 10\%$ 。经检验, 3 类蔬菜中 6 种元素均呈非正态分布( $P < 0.05$ ), 所有元素呈现右偏, 即向右拖尾, 数据主要分布在低值范围内。经 Pearson 相关分析, 根茎类蔬菜中 Pb-Cu ( $r = 0.295$ ,  $P < 0.05$ ) 相关性较弱, 而 Pb-Cd ( $r = 0.650$ ,  $P < 0.01$ ) 和 Pb-Cr ( $r = 0.780$ ,  $P < 0.01$ ) 相关性较强; 叶菜类蔬菜中 Pb-Cd ( $r = 0.601$ ,  $P < 0.01$ ) 相关性较强; 茄果类蔬菜中 Pb-Cu ( $r = 0.284$ ,  $P < 0.01$ ) 相关性较弱, 这表明蔬菜中 Pb、Cd、Cr 和 Cu 可能具有相似的来源。

表 1 我国部分地区根茎类蔬菜中 As 和重金属含量的统计学特征( $\bar{x} \pm s$ )

Table 1 Summary of arsenic and heavy metal concentrations, with basic statistical parameters, for rhizome vegetables from some areas of China

检测项目	含量范围 /(mg/kg)	均值 /(mg/kg)	P25 /(mg/kg)	P50 /(mg/kg)	P75 /(mg/kg)	变异系数 /%	偏度	食品中污染物含量 限值/(mg/kg)
Cu	0.006 ~ 8.410	0.522 ± 1.090	0.059	0.213	0.561	2.09	5.64	10.0
Pb	ND ~ 1.940	0.140 ± 0.262	0.009	0.037	0.158	1.92	4.41	0.3
Cd	ND ~ 0.480	0.034 ± 0.066	0.002	0.013	0.030	1.89	4.11	0.1
Cr	ND ~ 1.560	0.101 ± 0.236	0.009	0.040	0.081	2.33	4.89	0.5
As	ND ~ 0.589	0.040 ± 0.105	0.003	0.005	0.017	2.62	4.37	0.5
Hg	ND ~ 0.048	0.005 ± 0.008	0.001	0.003	0.007	1.60	4.15	0.01

注:ND 为含量小于检出限

表 2 我国部分地区叶菜类蔬菜中 As 和重金属含量的统计学特征( $\bar{x} \pm s$ )

Table 2 Summary of arsenic and heavy metal concentrations, with basic statistical parameters, for leafy vegetables from some areas of China

检测项目	含量范围 /(mg/kg)	均值 /(mg/kg)	P25 /(mg/kg)	P50 /(mg/kg)	P75 /(mg/kg)	变异系数 /%	偏度	食品中污染物含量 限值/(mg/kg)
Cu	ND ~ 10.800	0.681 ± 1.300	0.042	0.240	0.730	1.91	4.56	10.0
Pb	ND ~ 1.200	0.136 ± 0.223	0.002	0.006	0.038	1.63	5.93	0.3
Cd	ND ~ 2.060	0.045 ± 0.139	0.002	0.011	0.042	3.08	10.20	0.1
Cr	ND ~ 1.460	0.091 ± 0.152	0.007	0.030	0.120	1.66	4.25	0.5
As	ND ~ 1.090	0.038 ± 0.098	0.003	0.005	0.031	2.57	6.69	0.5
Hg	ND ~ 0.100	0.004 ± 0.011	0.000	0.001	0.003	2.67	6.29	0.01

注:ND 为含量小于检出限

与 GB 2762—2017<sup>[54]</sup> 比较, 3 类蔬菜中 Cu、Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 平均含量均小于标准限值。经统计学检验, 叶菜类和茄果类蔬菜中 Pb 和 Cr 含量差异

有统计学意义( $P < 0.05$ ), 3 类蔬菜中 Cd、As 和 Hg 含量均差异有统计学意义( $P < 0.05$ ), 但 3 类蔬菜中 Cu 含量均差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。Cd 平

表3 我国部分地区茄果类蔬菜中As和重金属含量的统计学特征( $\bar{x} \pm s$ )

Table 3 Summary of arsenic and heavy metal concentrations, with basic statistical parameters, for eggplant vegetables from some areas of China

检测项目	含量范围/(mg/kg)	均值/(mg/kg)	P25/(mg/kg)	P50/(mg/kg)	P75/(mg/kg)	变异系数/%	偏度	食品中污染物含量限值/(mg/kg)
Cu	0.001 ~ 2.740	0.323 ± 0.411	0.033	0.166	0.501	1.27	2.51	10.0
Pb	ND ~ 1.610	0.070 ± 0.165	0.005	0.015	0.081	2.35	5.98	0.3
Cd	ND ~ 1.150	0.022 ± 0.103	0.001	0.002	0.016	4.49	9.39	0.1
Cr	ND ~ 0.896	0.075 ± 0.158	0.004	0.024	0.068	2.11	3.57	0.5
As	ND ~ 0.402	0.029 ± 0.075	0.001	0.005	0.013	2.59	3.43	0.5
Hg	ND ~ 0.590	0.003 ± 0.009	0.000	0.001	0.002	2.78	4.67	0.01

注:ND为含量小于检出限

均含量为叶菜类 > 根茎类 > 茄果类, Pb、As 和 Hg 平均含量为根茎类 > 叶菜类 > 茄果类。可见, 叶菜类和根茎类蔬菜污染相对较重, 而茄果类蔬菜污染较小。叶菜类蔬菜对 Cu、Pb 和 Cd 3 种元素的富集能力较强, 而根茎类蔬菜易于富集 Cr、As 和 Hg。

### 2.2 蔬菜中As和重金属污染评价

通过  $P_i$  对 3 类蔬菜中 As 和重金属含量进行了污染评价(图 1)。根茎类、叶菜类及茄果类蔬菜中 Cu、Cd、Cr 和 As 污染指数均在安全范围内, 茄果类蔬菜中 Pb 和 Hg 也均在安全范围内。根茎类和叶菜类蔬菜中 Pb 和 Hg 均存在不同程度的污染, 其中 14.29% (5/35) 的根茎类蔬菜中 Hg 污染达到了轻度污染水平, 9.85% (13/132) 的叶菜类蔬菜中 Hg 污染达到了警戒线以上。根茎类蔬菜中 Pb 含量, 8.60% (8/93) 达到了轻度污染水平, 13.98% (13/93) 达到了警戒线以上。叶菜类蔬菜中 Pb 含量, 6.85% (23/336) 达到了轻度污染水平, 18.75% (63/336) 达到了警戒线。由此可见, 我国部分地区蔬菜中 As 和重金属污染水平整体较低。

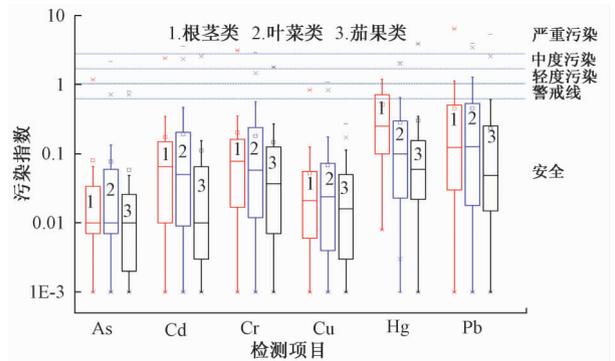


图1 我国部分地区蔬菜中重金属和As的污染水平

Figure 1 Single pollution index of heavy metals and arsenic in vegetables from some areas of China

### 2.3 健康风险评价

我国部分地区蔬菜中 As 和重金属的成人及儿童暴露的非致癌风险值见表 4。根茎类和茄果类蔬菜中 As 和重金属对成人和儿童的 HQ 均 < 1.0, 表明根茎类和茄果类蔬菜对成人及儿童均不会构成明显的健康危害。叶菜类蔬菜中 Pb 对成人 HQ 的 90 百分位值和 95 百分位值分别为 1.090 和 1.780,

表4 我国部分地区蔬菜中As和重金属的人体非致癌健康风险

Table 4 Non-carcinogenic risks for adults and children because of exposure to arsenic and heavy metals in vegetable form some areas of China

检测项目	百分位	根茎类		叶菜类		茄果类	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Cu	50%	0.040	0.005	0.024	0.028	0.006	0.007
	90%	0.023	0.027	0.179	0.203	0.030	0.033
	95%	0.038	0.043	0.282	0.319	0.039	0.042
Pb	50%	0.019	0.022	0.103	0.117	0.015	0.016
	90%	0.183	0.208	1.090	1.240	0.153	0.167
	95%	0.294	0.334	1.780	2.020	0.296	0.323
Cd	50%	0.011	0.012	0.041	0.046	0.003	0.003
	90%	0.066	0.075	0.361	0.409	0.044	0.048
	95%	0.126	0.143	0.689	0.779	0.086	0.093
Cr	50%	0.010	0.012	0.039	0.044	0.009	0.010
	90%	0.036	0.042	0.336	0.381	0.079	0.086
	95%	0.136	0.155	0.431	0.488	0.209	0.228
As	50%	0.001	0.002	0.007	0.008	0.002	0.003
	90%	0.039	0.044	0.135	0.153	0.020	0.021
	95%	0.048	0.0537	0.265	0.300	0.116	0.127
Hg	50%	0.014	0.016	0.029	0.033	0.007	0.008
	90%	0.062	0.071	0.315	0.357	0.097	0.106
	95%	0.121	0.138	0.384	0.435	0.287	0.312

对儿童 HQ 的 90 百分位值和 95 百分位值分别为 1.240 和 2.020, 这表明叶菜类蔬菜中 Pb 对成人和儿童存在潜在非致癌风险, 且儿童非致癌风险较成人高。

### 3 讨论

本研究中蔬菜主要来自我国部分地区蔬菜基地或郊区零散菜地为主, 污染企业周边的菜地不在此范围内。总体上, 根茎类、叶菜类及茄果类蔬菜中 Cu、Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 污染较轻, 6 种元素平均值均低于 GB 2762—2017 规定。3 类蔬菜中, 除部分蔬菜 Pb 和 Hg 处于轻度污染外, 其他 4 种元素含量均在安全范围内。有研究报道<sup>[66]</sup>, 胡萝卜根中 Pb、Ni、Cr、Cu 和 锰 (Mn) 等含量均较高。陈同斌等<sup>[67]</sup>研究发现, 根茎类中 Pb 含量高于瓜果和叶菜类, 这些与本研究结果一致, 表明有些元素更易于在根茎部累积。

研究发现, 我国内地蔬菜与其他区域蔬菜中 As 和重金属含量差异较小。如中国香港叶菜类蔬菜中 Pb 和 Cd 的平均含量分别为 0.11 和 0.045 mg/kg, 根茎类蔬菜中 Pb 和 Cd 的平均含量分别为 0.10 和 0.053 mg/kg<sup>[68]</sup>。沙特阿拉伯根茎类蔬菜中 Pb 和 Cd 的平均含量分别为 0.329 和 0.112 mg/kg, 叶菜类蔬菜中 Pb 和 Cd 的平均含量分别为 0.313 和 0.196 mg/kg<sup>[69]</sup>, Pb 和 Cd 的污染高于我国。SHAHEEN 等<sup>[8]</sup>研究发现, 孟加拉国根茎类蔬菜中 Cd 含量为 0.013 ~ 0.056 mg/kg, Pb 含量为 0.005 ~ 0.029 mg/kg, 与我国蔬菜污染相似。

我国部分地区蔬菜中, Cu、Cd、Cr、As 和 Hg 对成人和儿童的 HQ 均 < 1.0, 但部分叶菜类蔬菜中 Pb 对成人和儿童的 HQ > 1.0, 应引起高度重视。Pb 的半衰期较长, 在人体长期蓄积<sup>[70]</sup>。研究<sup>[71]</sup>还表明, Pb 可以通过胎盘屏障进入胎儿体内, 同时还可通过乳汁引起婴儿中毒。世界卫生组织已将 Pb 定为引起主要公共卫生问题的十大化学品之一<sup>[72]</sup>。

本研究的数据来源基于文献统计学, 尽管筛选过程中努力消除数据偏倚, 但仍然存在较大的不确定性。收集的研究数据时间跨度较大, 会导致一定的数据偏倚。选取文献的研究区域有限, 难以全面的反映整个国家的蔬菜污染水平。此外, 由于工业污染具有很大的区域局限性, 本研究对工业区或有确定污染源影响区的研究数据进行了剔除, 导致一些重污染区的风险没有在研究结论中被反映。对于蔬菜污染的健康风险, 本研究采用了 EPA 推荐的评价模型, 评价中没有考虑元素的生物有效性, 可能导致评价结果偏高。另外, 本研究没有考虑其

他食物的摄入和皮肤接触、呼吸途径等摄入对风险的贡献, 可能导致评价结果过低。此外, 我国人口众多, 不同区域不同人群对蔬菜的摄入种类和摄入量可能存在较大差距, 不同人群体重差异也较大, 这会导致健康风险评估结果存在一定的不确定性。

### 参考文献

- [1] 于岩, 辛秀琛, 孙秀波, 等. 蔬菜的营养功能及某些蔬菜中的天然有害成分 [J]. 现代园艺, 2008(6): 45-47.
- [2] 黄婕, 何洁仪, 梁伯衡, 等. 广州市城区居民蔬菜水果消费现状 [J]. 职业与健康, 2017, 33(2): 179-182.
- [3] GU Y G, LIN Q, GAO Y P. Metals in exposed lawn soils from 18 urban parks and its human health implications in southern China's largest city, Guangzhou [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 115(12): 122-129.
- [4] LUO X S, YU S, ZHU Y G, et al. Trace metal contamination in urban soils of China [J]. Science of the Total Environment, 2012, 421(3): 17-30.
- [5] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评估 [J]. 农业环境科学环保, 2012, 31(11): 2152-2159.
- [6] 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.
- [7] 王洋, 刘建祥. 重金属暴露与神经系统变性疾病帕金森病的相关性 [J]. 吉林医学, 2015, 36(14): 3021-3022.
- [8] SHAHEEN N, IRFAN N M, KHAN I N, et al. Presence of heavy metals in fruits and vegetables; health risk implications in Bangladesh [J]. Chemosphere, 2016, 152(2): 431-438.
- [9] 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估 [J]. 北京城市学院学报, 2014, 121(3): 8-12.
- [10] 刘妍, 甘国娟, 朱晓龙, 等. 湘中某工矿区农户菜园重金属污染分析与健康风险评估 [J]. 环境化学, 2013, 32(9): 1737-1742.
- [11] STEENLAND K, BOFFETTA P. Lead and cancer in humans: where are we now? [J]. American Journal of Industrial Medicine, 2000, 38(3): 295-299.
- [12] JÄRUP L. Hazards of heavy metals contamination [J]. British Medical Bulletin, 2003, 68(1): 167-182.
- [13] LI Z Y, MA Z W, JAN T, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2014, 468/469(3): 843-853.
- [14] 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): 43-46.
- [15] 闻剑, 梁辉, 胡曙光, 等. 2013—2014 年广东省基地蔬菜重金属污染状况调查 [J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(2): 160-163.
- [16] 王灵秋, 董钧铭, 徐林, 等. 安顺市城郊零散蔬菜重金属含量分析及健康风险评估 [J]. 现代预防医学, 2015, 42(8): 1408-1412.
- [17] 邵昭明, 欧阳静茹, 张珊珊, 等. 佛山市禅城区蔬菜重金属污染现状及对人体健康风险分析 [J]. 华南预防医学, 2012, 38(3): 14-20.

- [18] 龚梦丹, 王小雨, 顾燕青, 等. 杭州市菜地蔬菜重金属含量特征研究[J]. 杭州师范大学学报, 2015, 14(3):292-299.
- [19] 刘尧兰, 陈焕晟, 蒋建华, 等. 环鄱阳湖区部分叶菜类蔬菜重金属污染评价与来源分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(20):12310-12312.
- [20] 赵长盛, 刘金凤, 李建. 济南市售蔬菜中重金属污染状况及质量评价[J]. 中国蔬菜, 2015, 35(6):41-47.
- [21] 王丽华, 张世勇, 李玉芸. 重庆市蔬菜中铅、镉、汞、砷污染状况分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25(12):1994-1996.
- [22] 钟皎, 杜凤龄, 董天明. 2013年文山州蔬菜中铅、镉、汞、砷存在情况调查分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(S):43-46.
- [23] 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.
- [24] 张莉, 刘玲. 贵阳市售蔬菜重金属含量状况的分析与评价[J]. 贵州农业科学, 2006, 34(增刊):59-60.
- [25] 秦波, 白厚义. 南宁市郊蔬菜重金属污染及防治对策[J]. 广西农学报, 2004(4):1-4.
- [26] 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.
- [27] 田应桥, 蒲朝文, 张仁平, 等. 重庆市涪陵区部分粮食蔬菜中部分重金属污染调查[J]. 职业卫生与病伤, 2014, 29(5):372-373.
- [28] 石彦召, 刘小莉, 何晓静. 郑州市郊区菜地土壤及蔬菜中重金属含量状况调查与评价[J]. 陕西农业科学, 2009(1):44-46.
- [29] 王波, 刘晓青, 冯昌伟. 芜湖市部分市售蔬菜重金属含量及其健康风险研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(31):143-146.
- [30] 师荣光, 赵玉杰, 高怀友, 等. 天津市郊蔬菜重金属污染评价与特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):169-173.
- [31] 颜治, 王丙涛, 丁晶, 等. 深圳市售叶类蔬菜中五种重金属污染调查及评价[J]. 中国卫生检验杂志, 2013, 23(9):2162-2164.
- [32] 王晓釐. 上海市蔬菜重金属污染效应研究[D]. 上海:华东师范大学, 2014.
- [33] 段敏, 马往校, 李岚. 陕西省部分城市蔬菜中重金属污染研究[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(4):89-93.
- [34] 徐来潮, 樊伟, 陈理, 等. 2007—2014年绍兴地区蔬菜中重金属污染调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(6):687-691.
- [35] 闻剑, 梁辉, 胡曙光, 等. 2013—2014年广东省基地蔬菜重金属污染状况调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(2):160-163.
- [36] XU L, LU A, WANG J, et al. Accumulation status, sources and phytoavailability of metals in greenhouse vegetable production systems in Beijing, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 122(7):214-220.
- [37] 王灵秋, 董钧铭, 徐林, 等. 安顺市城郊零散蔬菜重金属含量分析及健康风险评价[J]. 现代预防医学, 2015, 42(8):1408-1412.
- [38] 栗利曼, 刘菊梅, 沈渭寺, 等. 包头工业区蔬菜重金属富集及人群健康评价[J]. 中国蔬菜, 2016, 1(1):54-59.
- [39] 韦伟, 金琳山. 不同蔬菜的重金属污染评价与特征分析[J]. 长江蔬菜, 2014(14):55-27.
- [40] 杨基峰, 李文军, 周诗彪, 等. 常德市典型蔬菜生产基地重金属污染特征及风险评价[J]. 土壤通报, 2015, 46(2):490-493.
- [41] 薄博. 大同县蔬菜中重金属污染状况与质量评价研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(14):6793-6794.
- [42] 刘柯, 何君, 张瑞斌, 等. 德州市郊蔬菜中重金属的含量检测及对策研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(1):346-348.
- [43] 刘柯, 万洪富, 杨国义, 等. 东莞市蔬菜重金属污染状况研究[J]. 生态环境, 2006, 15(2):319-322.
- [44] 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):234-239.
- [45] 殷飞, 王晶. 喀什市上市蔬菜重金属污染现状分析及评价[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(23):12671-12672.
- [46] 冯玉兰, 周静. 兰州市部分蔬菜重金属含量及健康风险评价[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2013, 34(90):74-79.
- [47] 尚庆伟, 徐敏权, 于洋, 等. 连云港市蔬菜中重金属含量与健康风险评价[J]. 天津农业科学, 2016, 22(2):121-126.
- [48] 夏凤英, 李政一, 杨阳. 南京市郊设施蔬菜重金属含量及健康风险分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(2):183-187.
- [49] 刘家琴, 刘恒豪, 郑钰刚, 等. 彭州市某蔬菜基地蔬菜中重金属含量特征及健康风险评价[J]. 周口师范学院学报, 2016, 33(2):94-98.
- [50] 任金萍. 平凉市地产蔬菜重金属污染检测及其对人体健康风险评估[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 5(48):126-129.
- [51] 何健飞, 王国彬, 潘明亮, 等. 清远市郊地产蔬菜重金属含量调查与评价[J]. 职业与健康, 2014, 30(2):193-195.
- [52] 马往校, 孙新涛, 段敏. 西安市不同蔬菜中重金属污染分析[J]. 山西农业大学, 2010, 30(5):399-442.
- [53] 余忠, 胡学玉, 刘伟, 等. 武汉市城郊蔬菜种植区重金属积累特征及健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2014, 27(8):881-886.
- [54] 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.
- [55] FAO/WHO (Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization). Joint FAO/WHO Food Standards Programme Codex Committee on Contaminants in Foods [R]. Food CF/5 INF/1, 2011:1-89.
- [56] 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.
- [57] 程家丽, 张贤辉, 唐阵武. 典型燃煤电厂周边蔬菜重金属累积特征及人体健康风险[J]. 卫生研究, 2016, 45(2):241-245.
- [58] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 基于THQ的锌冶炼厂周围人群食用蔬菜的健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4):672-678.
- [59] 余光辉. 广州市居民食品中硒、砷含量和膳食摄入的安全性研究[D]. 广州:中山大学, 2007.
- [60] WANG X, SATO T, XING B, et al. Health risk of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of

- vegetables and fish [J]. Science of the Total Environment, 2005, 35(1):28-37.
- [61] JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). Evaluation of certain food additives and contaminants [R]. 72th Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additive, WHO Technical Report Series 959, 2010.
- [62] National Research Council (US). Recommended dietary allowance: 10<sup>th</sup> edition [M]. Washington DC: National Academies Press (US), 1989.
- [63] DOE (the US Department of Energy). Integrated risk information system database [DB/OL]. [2017-06-02]. <https://rais.ornl.gov/>.
- [64] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific opinion on lead in food [J]. EFSA Journal, 2010, 8(4): 1570.
- [65] 谢华, 刘晓海, 陈同斌, 等. 大型古老锡矿影响区土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3503-3507.
- [66] GERASOPOULOS D, OLYMPIOS C H, PASSAM H. International symposium on quality of fruit and vegetables: influence of pre- and post-harvest factors and technology [M]. ISHS Acta Horticulturae ISBN: 978-90-66053-46-5, 1995.
- [67] 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.
- [68] HU J, WU F, WU S, et al. Bioaccessibility, dietary exposure and human risk assessment of heavy metals from market vegetables in Hong Kong revealed with an in vitro gastrointestinal model [J]. Chemosphere, 2013, 91(4): 455-461.
- [69] ALIA M H H, AL-QAHTANIA K M. Assessment of some heavy metals in vegetables, cereals and fruits in Saudi Arabian markets [J]. The Egyptian Journal of Aquatic Research, 2012, 38(1): 31-37.
- [70] Seventy-seventh Meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Safety evaluation of certain food additives and contaminants [J]. World Health Organization Technical Report, 2000, 62 (S1/2):165-166.
- [71] 张懋奎, 周晓明, 王蓓兰, 等. 铅对人类的危害及铅中毒的预防[J]. 社区卫生保健, 2007, 6(5):359-360.
- [72] WHO (World Health Organization). Lead poisoning and health [R/OL]. (2016-03-30) [2017-06-02]. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/en/>. 2016.

## 风险评估

# 基于3种模型的市售腐乳中蜡样芽胞杆菌风险的比较性评估研究

王晔茹, 宋筱瑜

(国家食品安全风险评估中心, 北京 100022)

**摘要:**目的 应用修正指数模型、对数概率模型和 Gamma 威布模型对某市市售腐乳中蜡样芽胞杆菌进行定量风险比较评估研究。方法 利用某市抽检数据, 获得市售腐乳中蜡样芽胞杆菌的初始污染水平, 分别按照修正的指数模型、对数概率模型和 Gamma 威布模型计算市售腐乳蜡样芽胞杆菌的风险。结果 使用市售腐乳蜡样芽胞杆菌的初始污染水平均值作为消费量, Gamma 威布模型计算所得风险略低于另外两个模型, 使用初始污染水平最高值作为消费量, Gamma 威布模型计算所得风险略高于另外两个模型。结论 本研究以蜡样芽胞杆菌风险评估为样本, 为其他微生物开展风险评估提供了研究方法和思路。

**关键词:**蜡样芽胞杆菌; 剂量-效应关系; 暴露评估; 腐乳; 修正指数模型; 对数概率模型; Gamma 威布模型; 风险评估; 食源性致病菌

中图分类号: R155 文献标识码: A 文章编号: 1004-8456(2018)02-0193-04

DOI: 10.13590/j.cjfh.2018.02.014

## Evaluation of the risk of *Bacillus cereus* in commercial fermented bean curd based on three models

WANG Ye-ru, SONG Xiao-yu

(China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China)

**Abstract: Objective** The risks of *Bacillus cereus* in commercial fermented bean curd were compared using the existing

收稿日期: 2018-03-22

基金项目: 国家食品安全风险评估中心高层次人才队伍建设 523 项目

作者简介: 王晔茹 女 助理研究员 研究方向为微生物风险评估 E-mail: wangyeru@cfssa.net.cn

通信作者: 宋筱瑜 女 副研究员 研究方向为微生物风险评估 E-mail: xiaoyu.song@cfssa.net.cn