

# 2016~2018 年甘肃省市售蔬菜中铅汞污染状况及 人体健康风险分析

李拥军<sup>1,2</sup>, 程 妍<sup>2</sup>, 李永才<sup>1\*</sup>

(1. 甘肃农业大学食品科学与工程学院, 兰州 730030; 2. 甘肃省疾病预防控制中心, 兰州 730020)

**摘要: 目的** 掌握 2016~2018 年甘肃省铅汞重金属污染的基本情况, 分析其对人体的健康风险。**方法** 在甘肃省 14 个市州共采集样品 1213 份, 依据国标方法测定铅含量、全自动测汞仪法测定汞含量, 采用尼梅罗综合污染指数法对蔬菜中铅和汞污染程度进行评价, 用目标危害指数法(target hazard index method, THQ)和危害指数(hazard index, HI)评价蔬菜中铅汞对成人和儿童的健康风险。**结果** 各类蔬菜中均检出了铅和汞, 其中鳞茎类中的铅和茎类蔬菜中的汞检出率均达到了 100%; 块根和块茎类蔬菜铅的超标率为 3.76%; 茎类蔬菜中汞含量超标率为 1.34%, 其余种类均未有超标。从铅汞的综合污染指数来看, 除茎类蔬菜以外, 其他都表现为 Pb > Hg, 铅对蔬菜重金属污染贡献较大, 其中块根块茎类蔬菜铅含量综合污染指数为 2.21 属中度污染, 鳞茎类的铅含量综合污染指数为 1.19, 属轻度污染。儿童通过蔬菜摄入铅汞的暴露风险高于成人, 但 THQ 和 HI 均小于 1, 对人体健康造成的影响不明显。**结论** 本次研究中甘肃省市售蔬菜中少数受到重金属铅的污染, 其余蔬菜中铅汞含量对健康影响均在安全范围内。

**关键词:** 蔬菜; 铅; 汞; 污染状况; 健康风险

## Analysis of lead and mercury pollution status and human health risks of vegetables sold in Gansu province from 2016 to 2018

LI Yong-Jun<sup>1,2</sup>, CHENG Yan<sup>2</sup>, LI Yong-Cai<sup>1\*</sup>

(1. School of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730030, China;  
2. Gansu Province Disease Prevention and Control Center, Lanzhou 730020, China)

**ABSTRACT: Objective** To grasp the basic situation of heavy metal lead and mercury pollution in Gansu province from 2016 to 2018 and analyze its health risks to human body. **Methods** A total of 1213 samples were collected from 14 cities and prefectures in Gansu province, and the lead content was determined according to the national standard method and the mercury content was determined by the automatic mercury meter method. The pollution degree of lead and mercury in vegetables was evaluated by the Nimelo comprehensive pollution index method, the health risks of lead and mercury in vegetables to adults and children were assessed by target hazard index method (THQ) and hazard Index (HI). **Results** Lead and mercury were detected in all kinds of vegetables, and the detection rate of lead in bulbs and mercury in stem vegetables reached 100%. The over standard rate of lead in tuber and root vegetables was 3.76%. The rate of excessive mercury content in stem vegetables was 1.34%, and none of the other

\*通讯作者: 李永才, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为食品检验及安全评价。E-mail: lyc@gsau.edu.cn

\*Corresponding author: LI Yong-Cai, Professor, School of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China. E-mail: lyc@gsau.edu.cn

types exceeded the standard. According to the comprehensive pollution index of lead and mercury, except for the stem vegetables, the other pollution indexes were  $Pb > Hg$ , and lead contributed a lot to heavy metal pollution of vegetables. The comprehensive pollution index of lead content in tuber and tuber vegetables was 2.21, which belonged to moderate pollution. The comprehensive pollution index of lead content in bulbs was 1.19, which was slightly polluted. Children had a higher risk of exposure to lead and mercury from vegetables than adults, but THQ and HI were both less than 1, with no significant impact on human health. **Conclusion** In this study, a small number of vegetables sold in Gansu province are contaminated by heavy metal lead, while the health effects of lead mercury content in other vegetables are all within the safe range.

**KEY WORDS:** vegetables; lead; mercury; pollution status; health risk

## 1 引言

随着农业生产和工业发展的现代化, 环境土壤和水质受到重金属污染日益严重。据统计, 我国受 Cd、As、Cr、Pb 等重金属污染的耕地面积近 2000 万  $hm^2$ <sup>[1]</sup>, 约占总耕地面积的 1/5, 因重金属污染而造成每年粮食减产超过 1000 万吨, 每年被重金属污染的粮食多达 1200 万吨, 合计经济损失至少 200 亿元<sup>[2]</sup>。我国大多数城市近郊土壤都有不同程度的重金属污染, 有许多地方粮食、蔬菜、水果等食物中镉、铬、砷、铅等重金属含量超标和接近临界值, 早在 2000 年有关部门对 10 个省会城市郊区农产品质量调查发现, 有 7 个城市重金属超标达监测产量的 30% 以上<sup>[3]</sup>。参考现有的蔬菜中重金属污染的研究发现, 蔬菜中重金属污染多以 Pb、Cr 和 Hg 这 3 种元素为主。这种现状不仅会影响蔬菜的品质和经济效益, 最主要的是会对人们的身体健康带来威胁。

甘肃风沙天气多、降水量偏少, 使用污水灌溉的农田较多, 部分地区尤其是工业区及城郊大气和土壤中重金属污染较为严重。铅和汞作为食品中重要的金属污染物, 普遍存在于大气、土壤和水中, 且难以迁移和降解, 会随着植物的生长和根系对土壤中重金属的吸附富集, 进入蔬菜等植物体中, 再通过食物链进入人体, 从而对人们的健康产生影响<sup>[4]</sup>。

鉴于此, 本研究通过对全省 14 个市州蔬菜中铅汞进行采样监测, 采用污染指数法对蔬菜中铅和汞污染程度进行评价, 用目标危害指数法(target hazard index method, THQ)和危害指数(hazard index, HI)对蔬菜中铅汞进行健康风险评价, 为相关监管单位的日常监管工作提供参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与分类

根据各市州人口分布情况和食品的消费、流通情况, 于 2016~2018 年在全省 14 个市州内覆盖 86 个县, 选取具有代表性、典型性的食品批发市场、农贸市场、商场超市等采样点按照 1:1:1 的比例, 依据代表性、随机性和适时

性的采样原则, 兰州市、天水市分别采 100 份, 定西市、陇南市、平凉市、庆阳市、临夏市分别采 90 份, 白银市、酒泉市、张掖市、武威市分别采 86 份, 其余各市州分别采 73 份共采集新鲜蔬菜样品 1213 份。按照蔬菜种类将样品分为茄果类、芸薹类、瓜菜类、茎类、块根和块茎类、鳞茎类、鲜豆类、叶菜类等 8 类。

### 2.2 检测方法

铅的含量根据 GB 5009.12-2017《食品安全国家标准 食品中铅的测定》进行检测, 此法最低检出限为 0.005 mg/kg, 汞含量用全自动测汞仪法进行检测, 此法最低检出限为 0.0002 mg/kg<sup>[5]</sup>。

### 2.3 数据处理与评价方法

#### 2.3.1 蔬菜中铅汞污染判定标准

参照 GB 2762-2017《食品安全国家标准 食品污染物限量》<sup>[6]</sup>对蔬菜中铅、汞含量进行卫生学评价。在芸薹类蔬菜、叶菜蔬菜中铅的限量值为(以 Pb 计)0.3 mg/kg; 豆类蔬菜、薯类铅的限量值为(以 Pb 计)0.2 mg/kg; 新鲜蔬菜(芸薹类蔬菜、叶菜蔬菜、豆类蔬菜、薯类除外)铅的限量值为(以 Pb 计)0.1 mg/kg。在新鲜蔬菜中总汞的限量值为(以 Hg 计)0.01 mg/kg。

#### 2.3.2 蔬菜中铅汞污染程度评价

为突出不同蔬菜类型中不同重金属的最高污染指数的作用, 引入尼梅罗综合污染指数评价方法即在单项污染指数的基础上采用尼梅罗污染指数法对蔬菜进行综合的评价<sup>[7]</sup>, 其公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

$$\bar{P}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{P_{\text{平均}}^2 + P_{\text{max}}^2}{2}} \quad (3)$$

式中:  $P_i$  为污染物的单项污染指数;

$C_i$  为污染物  $i$  的实际测定值;

$S_i$  为污染物  $i$  的限量标准值;

$\bar{P}_i$  为污染物在某种蔬菜中的平均污染指数;

$P_{\max}$  为各类别蔬菜中各单项污染指数中最大值;

$P_{\text{平均}}$  为各类蔬菜中各单项污染指数  $P_i$  的平均值。

尼梅罗综合污染指数法评价标准可按照结果划分为 5 个等级:  $P \leq 0.7$  为安全;  $0.7 < P \leq 1.0$  为警戒级;  $1.0 < P \leq 2.0$  为轻度污染;  $2.0 < P \leq 3.0$  为中度污染;  $P > 3.0$  为重度污染<sup>[8]</sup>。

### 2.3.3 蔬菜中铅汞污染对人体健康风险评估

本研究采用目标危害系数法<sup>[9]</sup>(target hazard quotient, THQ)对蔬菜中铅汞污染健康风险进行评估, 该方法主要通过评估人体摄入食物中重金属的剂量是否超出相应的参考剂量来判断人体的暴露风险, 其计算公式如下:

$$EDI = \frac{EF \times ED \times FIE \times C}{WAB \times TA \times 1000} \quad (4)$$

$$THQ = EDI / RfD \quad (5)$$

$$HI = \sum_{i=1}^n THQ \quad (6)$$

式中  $EF$  为暴露频率(365 d/年);  $ED$  为居民平均寿命, 72 岁;  $FIE$  为食物摄取速率,  $g / (人 \cdot d)$ <sup>[10]</sup>;  $C$  为蔬菜中重金属元素的含量,  $\mu g/g$ ;  $WAB$  为人体平均体重, 成人取 60 kg, 儿童取 32.7 kg;  $TA$  为平均接触时间, d;  $RfD$  为参考暴露剂量, 铅取 0.0035  $mg/(kg \cdot d)$ , 汞取 0.00057  $mg/(kg \cdot d)$ <sup>[11]</sup>;  $THQ$  为单一重金属风险系数,  $HI$  为 2 种重金属复合风险系数, 国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)认为, Pb 为 2A 类可能致癌物质, 即对实验动物致癌性证据充分, 但对人类致癌证据有限, 本文旨在研究 Pb 对人类的健康风险, 因此将 Pb 和 Hg 均按照非致癌物进行风险评估, 当  $THQ \leq 1.0$  时, 表明对人体健康造成的影响不明显; 当  $THQ > 1.0$  时, 表明可对人体造成潜在的健康风险<sup>[12]</sup>。HI 评价标准同 THQ。

### 2.3.4 数据统计分析

实验结果用 Excel 2013 录入, SPSS24.0 进行统计学分析, 为便于分析, 在试验检测中把低于方法检出限的数据按照检出限的一半<sup>[13]</sup>(铅: 0.0025  $mg/kg$ , 汞: 0.0001  $mg/kg$ )列入计算。

## 3 结果与分析

### 3.1 蔬菜中铅汞的检测结果

对种类不同的蔬菜中铅含量进行分析, 块根和块茎类平均值含量最高(0.0609  $mg/kg$ ), 瓜菜类含量较低(0.0177  $mg/kg$ ), 从检出率来看鳞茎类蔬菜最高, 达到了 100%检出, 鲜豆类较低为 30%, 根据各类样品中铅汞超标样品的份数与此类样品总数的比值计算超标率, 结果得出块根和块茎类超标率最高 3.76%, 芸薹类、鲜豆类、瓜菜类、叶菜类和茎类蔬菜中铅含量均未超标。结果见表 1。进一步通过正态检验可知, 不同种类样品中铅含量均不服从正态分布, 因此对铅含量的比较进行秩和检验, 结果显示, 不同种类样品中铅的平均含量不全相同( $H=21.707$ ,  $df=7$ ,  $P<0.05$ ), 然后对每组的秩和进行方差分析, 并对秩次进行两两比较结果显示,  $F=18.24$ ,  $P<0.05$ , 差异有统计学意义。

对种类不同的蔬菜中总汞含量进行分析, 茎类蔬菜平均值含量最高(0.0020  $mg/kg$ ), 茄果类较低(0.0005  $mg/kg$ ), 从检出率来看各类蔬菜中均检出了汞, 其中茎类蔬菜最高, 达到了 100%检出, 茄果类较低为 64.71%; 除茎类超标率为 1.34%外, 其余种类蔬菜总汞含量均未超标。结果见表 1。进一步通过正态检验可知, 不同种类样品中总汞含量均不服从正态分布, 对总汞含量的比较进行秩和检验, 不同种类样品中总汞的含量不完全相同( $H=31.92$ ,  $df=7$ ,  $P<0.05$ ), 然后对每组的秩和进行方差分析, 并对秩次进行两两比较结果显示,  $F=15.338$ ,  $P<0.05$ , 差异有统计学意义。

对不同种类蔬菜中铅汞含量分析的结果显示汞含量较高的是茎类蔬菜, 铅含量较高的是块根和块茎类蔬菜, 这可能是由于铅的迁移性较差, 不易被植物吸收, 即使吸收也主要集中在根部<sup>[14]</sup>, 因此分析铅污染主要来源于灌溉用水、土壤沉积和空气沉降。

表 1 不同种类蔬菜中铅汞检测结果( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=3$ )

Table 1 Detection results of lead and mercury in different kinds of vegetables ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=3$ )

蔬菜种类	检测份数	铅			汞		
		平均值/( $mg/kg$ )	检出率/%	超标率/%	平均值/( $mg/kg$ )	检出率/%	超标率/%
茄果类	255	0.0406±0.0007	41.76	2.88	0.0005±0.0001	64.71	0
芸薹类	142	0.0416±0.0011	44.83	0	0.0008±0.0002	82.76	0
瓜菜类	183	0.0177±0.0023	35.14	0	0.0007±0.0001	86.45	0
茎类	60	0.0203±0.0016	86.67	0	0.002±0.0004	100	1.34
块根/茎类	128	0.0609±0.0021	64.00	3.76	0.0011±0.0002	96	0
鳞茎类	75	0.0520±0.0015	100.0	1.14	0.0014±0.0003	80	0
鲜豆类	83	0.0228±0.0009	30.00	0	0.0013±0.0002	70	0
叶菜类	287	0.0403±0.0026	48.33	0	0.0011±0.0002	95	0

### 3.2 不同种类蔬菜中铅汞污染程度评价

根据公式(1)(2)(3)可以计算出不同种类蔬菜中铅汞的单项污染指数、平均污染指数和综合污染指数, 结果见表 2。结果显示, 块根/茎类中的白萝卜和鳞茎类韭菜的铅平均污染指数值较高, 分别为 0.61 和 0.52, 但都在安全范围内。从铅汞的综合污染指数来看, 除茎类蔬菜以外, 其他都表现为  $Pb > Hg$ , 鳞茎类和块根块茎类蔬菜的铅综合污染指数分别达到了 1.19(轻度污染)和 2.21(中度污染)。这可能是由于甘肃省属于干旱、半干旱地区年降雨量较少, 灌溉方式主要是河水灌溉及地下水灌溉, 由于近年来地表污水的渗透作用, 使地下水污染和河水污染日趋严重, 因此使用地下水或河水灌溉农田存在重金属污染风险<sup>[15,16]</sup>。其次农药化肥的使用也是导致土壤铅汞污染进而污染蔬菜作物的原因之一。

### 3.3 蔬菜中铅汞摄入的健康风险评估

根据公式(4)(5)(6)可计算出单一金属风险和 2 种重金属复合风险, 结果显示, 甘肃省市售蔬菜中铅和汞摄入对人体造成的健康风险为汞 > 铅, 但铅汞含量对成人和儿童的单一健康风险指数均小于 1, 说明单一金属对人体健康造成的影响不明显。从铅汞的总危害指数(HI)来看, 其值均小于 1, 说明蔬菜中铅和汞对人体健康造成的影响不明显,

对比分析成人和儿童的 THQ 和 HI 值发现, 铅和汞暴露接触对儿童的健康风险高于成年人。结果见表 3。8 类蔬菜中铅汞的综合污染指数( $P_{综合}$ )与 2 种重金属复合风险系数(HI)依存比来看, 铅污染相对汞污染在复合风险中贡献较小, 结果见如图 1。

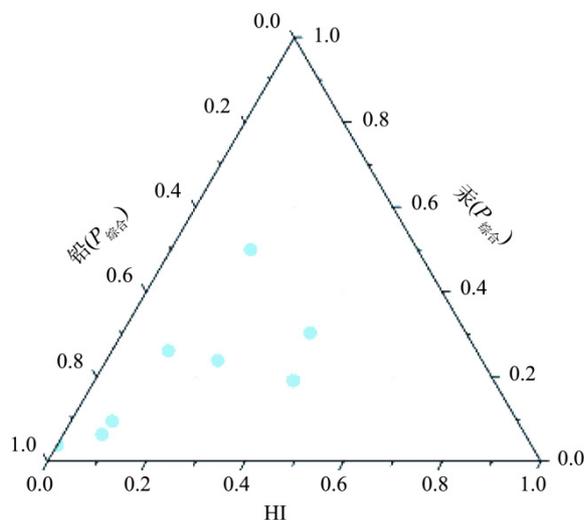


图 1 铅汞单项污染指数与 2 种重金属复合风险系数(HI)依存比  
Fig.1 Dependence ratio of single pollution index of lead and mercury and composite risk coefficient (HI) of two heavy metals

表 2 不同种类蔬菜铅汞污染指数  
Table 2 Pollution index of lead and mercury in different kinds of vegetables

蔬菜种类	检测份数	铅平均污染指数 ( $\bar{P}_i$ )	铅综合污染指数( $P_{综合}$ )	汞平均污染指数( $\bar{P}_i$ )	汞综合污染指数( $P_{综合}$ )
茄果类	255	0.28	1.06	0.05	0.19
芸薹类	142	0.14	0.55	0.08	0.23
瓜菜类	183	0.18	0.78	0.07	0.23
茎类	60	0.20	0.63	0.20	0.93
块根/块茎类	128	0.61	2.21	0.10	0.33
鳞茎类	75	0.52	1.19	0.14	0.53
鲜豆类	83	0.11	0.50	0.13	0.48
叶菜类	287	0.14	0.85	0.11	0.40

表 3 蔬菜中铅汞摄入量及健康风险评价  
Table 3 Intake of lead and mercury in vegetables and health risk assessment

重金属	EDI		THQ		HI	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Pb	$1.53 \times 10^{-5}$	$1.89 \times 10^{-5}$	0.00428	0.00529		
Hg	$3.86 \times 10^{-4}$	$4.78 \times 10^{-4}$	0.678	0.836	0.682	0.841

## 4 结 论

蔬菜的摄入量占到全天人均各类膳食摄入量的 30% 左右, 所以蔬菜中的重金属污染不容忽视。此次研究通过污染指数法对蔬菜中铅和汞污染程度进行分析, 结果表明蔬菜中铅汞含量均在安全范围内, 用目标危害指数法对蔬菜中铅汞进行健康风险评价, 发现蔬菜中铅和汞的暴露对儿童的健康风险高于成人, 但 *THQ* 和 *HI* 值均小于 1, 证明蔬菜中铅汞含量均在安全范围内, 说明甘肃省售蔬菜的安全性较好, 铅和汞暴露对人体健康影响不明显。

## 参考文献

- [1] 柯庆明, 郑龙, 方加龙. 蔬菜重金属污染研究现状与展望[J]. 吉林蔬菜, 2008, (3): 79–81.  
Ke QM, Zheng L, Fang JL. Research status and Prospect of heavy metal pollution in vegetables [J]. Jilin Veget, 2008, (3): 79–81.
- [2] 覃志英, 黄兆勇, 陈广林, 等. 食品重金属污染的研究进展[J]. 广西预防医学, 2003, (9): 5–8.  
Qin ZY, Huang ZY, Chen GL, et al. Research progress of heavy metal pollution in food [J]. Guangxi Prev Med, 2003, (9): 5–8.
- [3] 孙光闻, 朱祝军, 方学智, 等. 我国蔬菜重金属污染现状及治理措施[J]. 北方园艺, 2006, (2): 66–67.  
Sun GW, Zhu ZJ, Fang XZ, et al. Heavy metal pollution of vegetables in China and its control measures [J]. Northern Hortic, 2006, (2): 66–67.
- [4] 张丹, 夏品华, 李存雄. 贵阳市售蔬菜重金属含量状况及对人体健康风险分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(7): 3867–3868.  
Zhang D, Xia PH, Li CX. Analysis of heavy metal content and health risk of vegetables sold in Guiyang [J]. Anhui Agric Sci, 2011, 39(7): 3867–3868.
- [5] 刘雪芳, 闫兆凤. 某地市售蔬菜重金属污染状况及其健康风险分析[J]. 中国卫生产业, 2018, 21(7): 150–152.  
Liu XF, Yan ZF. Heavy metal pollution and health risk analysis of vegetables sold in a certain city [J]. China's Health Ind, 2018, 21(7): 150–152.
- [6] GB 2762-2017 食品安全国家标准 食品污染物限值[S].  
GB 2762-2017 National food safety standard-Limit of pollutants in food [S].
- [7] Fisher JW, Brundage SI. The challenge of eliminating cervical cancer in the United States: A story of politics, prudishness, and prevention [J]. Women Health, 2009, 49(2/3): 246–261.
- [8] 钱翌, 刘峥延, 杨立杰. 青岛市蔬菜重金属污染及铅、镉健康风险评估[J]. 中国农学通报, 2011, 27(22): 176–181.  
Qian Y, Liu ZY, Yang LJ. Heavy metal pollution of vegetables and heal [J]. China Agron Bull, 2011, 27(22): 176–181.
- [9] 程家丽, 张贤辉, 卓勤, 等. 我国海洋食用贝类重金属污染特征及其健康风险[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(2): 175–180.  
Cheng JL, Zhang XH, Zhuo Q, et al. Heavy metal pollution characteristics and health risks of marine edible shellfish in China [J]. Chin J Food Hyg, 2016, 28(2): 175–180.
- [10] 王陇德. 中国居民营养与健康状况调查报告(2002 综合报告)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2005.  
Wang LD. A survey report on the nutritional and health status of Chinese residents (2002 comprehensive report) [M]. Beijing: People's Health Press, 2005.
- [11] Yang G, Shen F, Zhong GJ, et al. Concentration and health risk of heavy metals incropsand soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions [J]. Acta Sci Circumst, 2011, 31(9): 2014–2021.
- [12] 李金辉, 翁贵英, 吴汉福, 等. 六盘水某污水处理厂污泥农用价值与所含重金属的健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2018, 35(5): 438–441.  
Li JH, Weng GY, Wu HF, et al. Agricultural value and health risk assessment of heavy metals in sludge of a sewage treatment plant in Liupanshui [J]. J Environ Health, 2018, 35(5): 438–441.
- [13] 李拥军, 孙建云. 2010 年甘肃省各类蔬菜中农药残留监测分析[J]. 卫生研究, 2012, 41(5): 843–845.  
Li YJ, Sun JY. Monitoring and analysis of pesticide residues in various vegetables in Gansu province in 2010 [J]. J Hyg Res, 2012, 41(5): 843–845.
- [14] 杨刚, 李燕, 巫林, 等. 成都平原表层水稻土重金属污染健康风险分析[J]. 环境化学, 2014, 33(2): 269–275.  
Yang G, Li Y, Wu L, et al. Health risk analysis of heavy metal pollution in surface paddy soil of Chengdu plain [J]. Environ Chem, 2014, 33(2): 269–275.
- [15] 覃志英, 唐振柱, 吴祖军, 等. 广西南宁市蔬菜铅镉污染监测分析[J]. 广西医学, 2006, 10(28): 1505–1507.  
Qin ZY, Tang ZZ, Wu ZJ, et al. Monitoring analysis on lead & cadmium contamination of the vegetable in Nanning city, Guangxi [J]. Guangxi Med, 2006, 10(28): 1505–1507.
- [16] 刘景红, 陈玉成. 中国主要城市蔬菜重金属污染格局的初步分析[J]. 微量元素与健康研究, 2004, 21(5): 42–44.  
Liu JH, Chen YC. Preliminary analysis of heavy metal pollution pattern of vegetables in major cities of China [J]. Trace Elem Health Res, 2004, 21(5): 42–44.

(责任编辑: 韩晓红)

## 作者简介

李拥军, 副主任技师, 主要研究方向为食品检验及安全评价。  
E-mail: lyj\_555@126.com

李永才, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为食品检验及安全评价。  
E-mail: lyc@sau.edu.cn