

# 大宝山矿区某农田蔬菜重金属污染状况及健康风险评估

邹素敏<sup>1,2,3</sup>, 杜瑞英<sup>1,3</sup>, 文典<sup>1,3</sup>, 陈岩<sup>1,3</sup>, 王富华<sup>1,2,3\*</sup>, 赵迪<sup>1,2,3</sup>, 朱娜<sup>1,2,3</sup>

(1.广东省农业科学院农产品公共监测中心, 广东 广州 510640; 2.华中农业大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070; 3.农业部农产品质量安全风险评估实验室(广州), 广东 广州 510640)

**摘要:**本研究通过大田试验,在对大宝山矿区某农田蔬菜中重金属 As、Hg、Pb、Cd、Cr 分析测试的基础之上,运用单因子污染指数法和综合污染指数法对该农田蔬菜的重金属污染状况进行评价;同时应用健康风险评估模型对人群经食物链途径长期食用本地农产品可能产生的健康风险进行评估,以期对蔬菜的安全生产以及人体健康提出合理的意见和建议。结果表明,农田土壤中重金属 As、Hg、Cr、Cd、Pb 的含量分别是国家土壤环境质量二级标准的 0.875、0.900、0.373、2.863 倍和 0.305 倍,可以看出这 5 种重金属中只有 Cd 的含量超过了国家土壤环境质量二级标准。蔬菜重金属污染结果表明,蔬菜综合污染指数  $P_{\text{综}}$  范围在 0.412~3.339,均值为 1.155,属于轻度污染。蔬菜单因子污染指数  $P_{\text{As}}$  范围在 0.013~0.085,均值为 0.030; $P_{\text{Hg}}$  范围在 0.000~0.154,均值为 0.076; $P_{\text{Pb}}$  的范围在 0.105~1.255,均值为 0.343; $P_{\text{Cd}}$  范围在 0.563~4.609,均值为 1.536; $P_{\text{Cr}}$  范围在 0.008~0.360,均值为 0.091;可以看出该蔬菜主要受到 Cd 污染。蔬菜重金属污染的健康风险评估结果表明:17 种蔬菜整体而言,  $\text{Risk}_{\text{总}}$  的平均值为  $3.50 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ,表示该批蔬菜品种重金属污染情况对人体健康存在一定的风险,但风险尚可接受; $\text{Risk}_{\text{T}}$  为  $3.50 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ,表明该批蔬菜品种中致癌重金属对人体健康存在一定的风险,但风险尚可接受,且在致癌风险中  $\text{Risk}_{\text{Cd}} > \text{Risk}_{\text{Cr}} > \text{Risk}_{\text{As}} > \text{Risk}_{\text{Pb}}$ ;  $\text{HI}_{\text{T}}$  为  $4.89 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ ,则表明该批蔬菜品种中非致癌重金属污染对人体健康存在的风险甚微,且在非致癌风险中  $\text{HI}_{\text{Pb}} > \text{HI}_{\text{Hg}}$ 。

**关键词:**大宝山;农田蔬菜;重金属污染;风险评估

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2016)06-0568-08 doi: 10.13254/j.jare.2016.0104

引用格式:

邹素敏,杜瑞英,文典,等.大宝山矿区某农田蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J].农业资源与环境学报,2016,33(6):568-575.

ZOU Su-min, DU Rui-ying, WEN Dian, et al. Heavy Metals Pollution in Vegetables Grown on Some Farmlands Around Dabaoshan Mine and Its Healthy Risk Evaluation[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(6):568-575.

## Heavy Metals Pollution in Vegetables Grown on Some Farmlands Around Dabaoshan Mine and Its Healthy Risk Evaluation

ZOU Su-min<sup>1,2,3</sup>, DU Rui-ying<sup>1,3</sup>, WEN Dian<sup>1,3</sup>, CHEN Yan<sup>1,3</sup>, WANG Fu-hua<sup>1,2,3\*</sup>, ZHAO Di<sup>1,2,3</sup>, ZHU Na<sup>1,2,3</sup>

(1.Public Monitoring Center for Agro-product of Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2.College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3.Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Agro-products(Guangzhou), Ministry of Agriculture, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** This study used the approaches of the single factor pollution index and the comprehensive factor pollution index to evaluate the heavy-metals pollution in vegetables by analyzing the data of the heavy metals(As, Hg, Cr, Cd, Pb) contents in vegetables grown around the area of Dabaoshan mine. Synchronously considering the potential healthy risks of the local people from long-term consumption of vegetables, we also applied the health risk assessment model to evaluate the health risks of vegetables polluted by heavy metals. The results showed that the contents of As, Hg, Cr, Cd, Pb in this farmland soil were 0.875, 0.900, 0.373, 2.863, 0.305 times as the threshold values from the national second-grading standard of environmental quality assessment for soils respectively, suggesting that only Cd content in soil was beyond the

收稿日期:2016-04-19

基金项目:国家自然科学基金(41401367);广东省省长专项

作者简介:邹素敏(1990—),女,硕士研究生,主要研究方向为农产品质量安全。E-mail: zsm9097@163.com

\*通信作者:王富华 E-mail: wfhwqs@163.com

standard level. The comprehensive pollution index of heavy metal pollution in vegetables ranged from 0.412 to 3.339 with the mean value being of 1.155, which belonged to the level of light pollution. The single factor pollution indexes of As, Hg, Pb, Cd and Cr were 0.412~3.339, 0.000~0.154, 0.105~1.255, 0.563~4.609 and 0.008~0.360 respectively, and the means of these five heavy metals were 0.030, 0.076, 0.343, 1.536 and 0.091 respectively, indicating that the pollution of vegetables was mainly suffered from Cd. Additionally, results from the data of health risk assessment of the heavy metal pollution in 17 vegetables showed: the mean of the total risk was  $3.50 \times 10^{-5} a^{-1}$ , suggesting that the situation of heavy metal pollution in vegetable varieties had a certain risk to human health, but the risk was acceptable; the mean of the carcinogenic risk for human health was  $3.50 \times 10^{-5} a^{-1}$ , this meant that the situation of heavy metal pollution in vegetable varieties had a certain risk to human health of the carcinogenic risk, but was acceptable with a degree order of the carcinogenic risk was  $Risk_{Cd} > Risk_{Cr} > Risk_{As} > Risk_{Pb}$ ; the total value from the non-carcinogenic risk was  $4.89 \times 10^{-10} a^{-1}$ , indicating that the non-carcinogenic risk showed little effects on human health with a order of  $HI_{Pb} > HI_{Hg}$ .

Keywords: Dabaoshan; farmland vegetables; heavy metal pollution; healthy risk evaluation

蔬菜是人们每日餐桌上必不可少的食物之一,它能提供人体所必需的多种维生素和矿物质等营养物质。当前我国受 Cd、Hg、As、Cr、Pb 污染的耕地面积约  $2\,000 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,受污染粮食多达  $1\,200 \times 10^4 \text{ t}$ ,经济损失至少达  $200 \times 10^8$  元<sup>[1]</sup>。随着我国工业化和城市化的不断发展,工业三废、生活垃圾和农业投入品的不合理利用等致使各种重金属元素通过降尘、施肥、灌溉等途径进入农田土壤,给农田生态环境及人体健康带来了不同程度的危害<sup>[2-3]</sup>,尤其是矿区附近农田土壤受重金属污染程度更加严重<sup>[4-5]</sup>。土壤中的重金属经过蔬菜的富集通过食物链途径进入人体,将会对人体健康产生严重威胁,因此对重金属污染农田开展蔬菜污染现状研究和健康风险评估显得非常必要。

大宝山矿区位于广东省北部,地处广东曲江、翁源两县交界处,长期的开采使得矿区生态环境严重恶化,重金属污染问题尤为突出<sup>[6-7]</sup>。特别是大宝山周边的一些村落长期以来使用大宝山的矿水进行灌溉,导致该村的农田土壤、作物和饮用水受到了不同程度的重金属污染,村民通过消化道摄入使其中某些村落成为消化道恶性肿瘤疾病的高发区<sup>[8-9]</sup>,越来越多的新闻媒体和研究者开始重视这些区域的重金属污染问题以及由此引发的人体健康风险。本研究在对大宝山矿区农田土壤重金属污染调查和风险评估基础之上,选取代表该区域重金属污染水平的农田作为研究对象,运用单因子污染指数法和综合污染指数法对该农田种植的不同品种蔬菜进行重金属污染状况评价。由于不同重金属的毒性不同,因此本研究借鉴美国环保署 (USEPA) 推荐的致癌风险模型和非致癌风险模型分别对 As、Hg、Cr、Cd、Pb 进行健康风险评估,以期为该区域农田生态环境保护与农产品质量安全监管提供更加合理的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方案设计和样品采集

在对大宝山矿区农田土壤重金属污染调查和风险评估基础之上,选取代表该区域重金属污染水平的农田,开展试验。于 2015 年 9 月种植 1 种莴苣菜、1 种油麦菜、1 种茼蒿,4 种菜心、3 种芥菜、2 种豆类、2 种萝卜、3 种白菜共 17 种(类)蔬菜。每个小区面积为  $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ,小区间隔 1 m,各品种按完全随机排列,每个小区 3 个重复。施肥及田间管理完全按照当地的种植习惯,并于 2015 年 11 月上旬用 5 点采样法采集土壤和蔬菜样品。土壤样品采集深度为 0~20 cm,混合后装于塑料袋;蔬菜样品主要采集其可食性部分,混合后装入塑料袋,整个采样过程没有与金属工具接触。

### 1.2 样品处理与分析

采集的土壤样品置于干燥通风处自然晾干,混匀后过 20 目筛和 100 目筛保存待测。蔬菜样品先以自来水冲洗干净,再用去离子水洗 3 次,然后用滤纸吸干表面多余水分,最后用打样机均匀打碎,装入自封袋保存于冰箱待测。

分析测试的重金属元素主要包括 As、Hg、Pb、Cd、Cr 5 种重金属元素,As、Hg 的测定采用原子荧光光度法,分别参照《食品卫生检验方法理化部分》中的 GB/T 5009.11—2003 和 GB/T 5009.17—2003。蔬菜中 Pb、Cd 和 Cr 的测定采用电感耦合等离子体质谱法,Pb 和 Cd 参照标准为中华人民共和国出入境检验检疫行业标准 SN/T 0448—2011。土壤分析过程中用国家标准土壤样品 GBW07453(GSS-24)进行分析质量控制。蔬菜分析过程中用国家标准菠菜样品 GBW10015(GSB-6)进行分析质量控制。

### 1.3 数据处理

用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 18.0 软件对实验数据进行处理。

### 1.4 蔬菜重金属污染评价

蔬菜重金属污染评价方法采用单因子污染指数法和综合污染指数法<sup>[10]</sup>。

单因子污染指数法计算公式:

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

式中,  $P_i$  为单因子污染指数;  $C_i$  为蔬菜中重金属含量, 以鲜重计,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $S_i$  为重金属污染物限量标准,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 每种重金属在不同蔬菜中的限量标准参照食品安全国家标准《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)。

综合污染指数法计算公式:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中,  $P_{\text{综合}}$  为重金属污染综合指数;  $(C_i/S_i)_{\text{max}}$  为单因子污染指数最大的值;  $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$  为各单因子污染指数的平均值。

### 1.5 蔬菜健康风险评价方法

环境健康风险评价分为致癌物风险评价(无阈污染物健康风险评价)和非致癌物风险评价(有阈污染物健康风险评价)两大类。相关计算公式如下<sup>[11-14]</sup>:

致癌物风险评价:

$$\text{Risk}_i = [1 - \exp(-D_i \times q_i)] / L \quad (3)$$

式中,  $\text{Risk}_i$  为化学致癌物质  $i$  通过食入途径的平均个人致癌年风险,  $\text{a}^{-1}$ ;  $D_i$  为化学致癌物质  $i$  通过食入途径的单位体重日均暴露剂量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $q_i$  为化学致癌物质  $i$  经食入途径的致癌强度系数,  $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$ ;  $L$  为人的平均寿命, 年。

非致癌物风险评价:

$$\text{HI}_j = D_j \times 10^{-6} / (\text{RfD}_j \times L) \quad (4)$$

式中,  $\text{HI}_j$  为非致癌物质  $j$  经食入途径所致健康危害的平均个人年风险,  $\text{a}^{-1}$ ;  $D_j$  为非致癌物质  $j$  通过食入途径的单位体重日均暴露剂量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ;  $10^{-6}$  为 USEPA 标准调整值;  $\text{RfD}_j$  为非致癌污染物  $j$  的食入途径参考剂量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。

日均暴露剂量计算:

$$D_k = \frac{C \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (5)$$

式中,  $D_k$ : 污染物日均暴露剂量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\text{IR}$  为摄入量,  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $C$  为某环境介质中污染物的浓度,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $\text{EF}$  为暴露频率,  $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $\text{ED}$  为暴露持续时间, 年;  $\text{BW}$

为体重,  $\text{kg}$ ;  $\text{AT}$  为平均暴露时间,  $\text{d}$ 。

暴露评估模型参数参照《中国人群暴露参数手册(成人卷)》<sup>[15]</sup>, 中国城乡成人深色蔬菜日摄入量  $\text{IR}$  取  $90.8 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 中国成人 ( $\geq 18$  岁) 平均体重推荐值  $\text{BW}$  为  $60.6 \text{ kg}$ ; 中国人群平均期望寿命推荐值  $L$  为  $74.8$  岁; 暴露频率  $\text{EF}$  为  $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ , 参照文献, 将期望寿命作为暴露持续时间, 取  $\text{ED}$  为  $74.8 \text{ a}$ 。平均暴露时间  $\text{AT}$  为  $74.8 \text{ a} \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 。根据美国环保署综合风险信息数据库 (IRIS) 和国际癌症研究机构 (IARC) 的分类系统, 元素  $\text{As}$ 、 $\text{Cd}$  和  $\text{Cr}$  为明确的化学致癌物,  $\text{Pb}$  为可能的化学致癌物,  $\text{Hg}$  为化学非致癌物。本研究通过查阅相关资料, 得到相应重金属的口服参考剂量  $\text{RfD}$ ,  $\text{Pb}$  和  $\text{Hg}$  分别取  $3.57 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$  和  $3.00 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ; 相关致癌强度系数  $q_i$ :  $\text{As}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Cr}$  分别取  $1.5$ 、 $0.0085$ 、 $6.1 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$  和  $0.5 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$ <sup>[16-19]</sup>。

假定各重金属对人体健康的毒性作用呈相加关系, 而不是协同或拮抗关系, 则总非致癌风险  $\text{HI}_T$  和总致癌风险  $\text{Risk}_T$ , 分别见公式 (6) 和公式 (7)<sup>[11, 20-21]</sup>:

$$\text{HI}_T = \sum_{j=1}^n \text{HI}_j \quad (6)$$

$$\text{Risk}_T = \sum_{i=1}^n \text{Risk}_i \quad (7)$$

$$\text{Risk}_{\text{总}} = \text{HI}_T + \text{Risk}_T \quad (8)$$

式中,  $\text{HI}_T$  为总非致癌风险,  $\text{a}^{-1}$ ;  $\text{Risk}_T$  为总致癌风险,  $\text{a}^{-1}$ ;  $\text{HI}_j$  为第  $j$  种重金属非致癌风险,  $\text{a}^{-1}$ ;  $\text{Risk}_i$  为第  $i$  种重金属的致癌风险,  $\text{a}^{-1}$ ;  $n$  为重金属种类。  $\text{Risk}_{\text{总}}$  为由多种重金属引起的个人总健康风险,  $\text{a}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤和蔬菜重金属含量

#### 2.1.1 土壤重金属含量

该农田土壤中重金属全量和有效态含量如表 1 所示。土壤中有有效态的重金属元素易于转化和迁移, 最容易被农作物吸收利用而进入食物链, 从而对环境和人畜造成危害<sup>[2]</sup>。该区农田土壤  $\text{pH}$  值为  $4.67$ , 土壤有机质含量为  $30.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤中某重金属有效态含量除了受土壤中该重金属的全量影响外还受土壤  $\text{pH}$  值、土壤有机质含量、耕作方式等多种因素的影响<sup>[23-24]</sup>。土壤中 5 种重金属  $\text{As}$ 、 $\text{Hg}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Pb}$  全量值分别是国家土壤环境质量二级标准 (GB 15618—1995) 的  $0.875$ 、 $0.900$ 、 $0.373$ 、 $2.863$  倍和  $0.305$  倍, 只有  $\text{Cd}$  的含量超过了国家土壤环境质量二级标准, 该区土壤主要为  $\text{Cd}$  污染, 许多前人研究也发现在大宝山矿区土

表1 土壤重金属含量(mg·kg<sup>-1</sup>)  
Table 1 Contents of heavy metals in soils(mg·kg<sup>-1</sup>)

项目	As	Hg	Cr	Cd	Pb
土壤重金属全量	35.003	0.270	56.000	0.859	76.195
土壤重金属有效态	4.431	0.000 32	0.203	0.524	14.974
国家土壤环境质量二级标准, pH<6.5	40	0.30	150	0.30	250

壤多重金属复合污染中 Cd 污染比较突出<sup>[7,25-26]</sup>。

### 2.1.2 蔬菜重金属含量

与《食品中污染物限量》标准(GB 2762—2012)相比,如表2所示,蔬菜中重金属含量平均值除了Cd超标外,其他重金属含量平均值及含量范围均在限量标准可接受范围内:As的含量范围0.006 4~0.042 3 mg·kg<sup>-1</sup>,Hg的含量范围为未检出~0.001 54 mg·kg<sup>-1</sup>,Cr的含量范围0.004 2~0.180 2 mg·kg<sup>-1</sup>,Pb的含量范围0.028~0.251 mg·kg<sup>-1</sup>。从变异系数来看蔬菜中Cr的变异系数最大,其他重金属的变异系数略小,表明了该批样品中不同蔬菜品种对重金属Cr的吸收差异比较大,宋相帝<sup>[27]</sup>研究了在基因型方面不同青菜对Cr积累吸收存在差异,然而对于本研究中该批蔬菜品种对Cr吸收差异的原因还有待进一步研究。从表2可以看出,蔬菜中各重金属含量的平均值大小为Cd>Pb>Cr>As>Hg,但是表1土壤中各重金属有效态含量大小却为Pb>As>Cd>Cr>Hg,蔬菜中各重金属含量多少与土壤中各重金属含量多少存在些许差异性,黄银晓等<sup>[28]</sup>对该差异做出的解释为作物重金属含量除了与各重金属在土壤中的活性有关外,还与各重金属在土壤-作物系统中的迁移特点有关。

### 2.2 蔬菜重金属污染评价

以《食品中污染物限量》标准(GB 2762—2012)作为参照,根据单因子污染指数法和综合污染指数法的判定标准:当P<sub>i</sub>≤1时,表示蔬菜未受污染;P<sub>i</sub>>1时,表示蔬菜受到污染。P<sub>综合</sub>≤0.7为安全等级,0.7<P<sub>综合</sub>≤1.0为警戒线,1.0<P<sub>综合</sub>≤2.0为轻度污染,2.0<P<sub>综合</sub>≤3.0为中度污染,P<sub>综合</sub>>3.0为重度污染<sup>[7,10]</sup>。从表3可

以看出,同种蔬菜的不同重金属单因子污染指数不同,不同种蔬菜品种对同种重金属的单因子污染指数也不同,这是由土壤污染状况和蔬菜本身的品种差异共同决定的。根据单因子污染指数法的判定标准,各蔬菜品种均未受到重金属As、Hg、Cr的污染,然而受到重金属Cd污染的蔬菜品种达到了64.7%,受重金属Pb污染的蔬菜品种为11.8%,出现这种结果的原因可能与土壤中各重金属含量分布有一定的联系。根据综合污染指数法的判定标准,除了芥菜1、芥菜2、芥菜3、萝卜1在安全线以内,所检测的其他品种蔬菜均受到不同程度的重金属污染。在这17个蔬菜品种中污染程度处于警戒线的有8种,轻度污染的有2种,中度污染的有2种,安全的有4种,重度污染的有1种。其中芫荽受污染程度最为严重,综合污染指数为3.339,单因子污染指数P<sub>Cd</sub>>P<sub>Pb</sub>>P<sub>Hg</sub>>P<sub>As</sub>>P<sub>Cr</sub>,且P<sub>Cd</sub>为4.609>1,因此芫荽主要受到Cd污染,且其P<sub>Cd</sub>、P<sub>As</sub>、P<sub>Hg</sub>都要明显大于其他蔬菜品种,从马建军等<sup>[29]</sup>对秦皇岛市售叶菜类蔬菜中重金属含量状况分析来看芫荽的重金属超标率达到了100%,由此可以看出芫荽对重金属的积累特性是有别于其他蔬菜品种的,然而其中机理有待进一步研究。芥菜1、芥菜2、芥菜3、萝卜1这4个蔬菜品种在安全范围之内,因此在发挥该农田土壤的最大利用价值时,建议可以种植这4类蔬菜品种。

### 2.3 当地居民经蔬菜途径摄入重金属的人体健康风险评估

USEPA 建议,有毒有害物质的健康风险水平在1.0×10<sup>-6</sup>~1.0×10<sup>-4</sup> a<sup>-1</sup>为可接受风险水平,<1.0×10<sup>-6</sup> a<sup>-1</sup>

表2 蔬菜重金属含量  
Table 2 Contents of heavy metals in vegetables

项目	As	Hg	Cr	Cd	Pb
最大值/mg·kg <sup>-1</sup>	0.042 3	0.001 54	0.180 2	0.922	0.251
最小值/mg·kg <sup>-1</sup>	0.006 4	未检出	0.004 2	0.074	0.028
平均值/mg·kg <sup>-1</sup>	0.014 8	0.000 76	0.045 7	0.315	0.078
变异系数/%	54.90	64.88	101.85	75.90	68.50
食品中污染物限量/mg·kg <sup>-1</sup>	0.5	0.01	0.5	0.2	0.3

注:食品中污染物限量参考《食品中污染物限量》标准(GB 2762—2012)。

表示风险甚微;在  $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4} a^{-1}$  之间表示存在一定的风险,但尚可接受; $>1.0 \times 10^{-4} a^{-1}$  表示风险较为显著<sup>[22]</sup>。由表 4 可以看出同种蔬菜品种不同种重金属

HI 或 Risk 值不同,不同蔬菜品种同种重金属的 HI 或 Risk 值也不同,由表 5 可以看出芫荽的 Risk<sub>总</sub> 为  $1.14 \times 10^{-4} a^{-1} > 1.0 \times 10^{-4} a^{-1}$ ,表示芫荽存在风险较为显

表 3 蔬菜重金属污染评价结果

Table 3 Single factor index and integrated pollution index of heavy metals contaminated vegetables

蔬菜种类	单因子污染指数					综合污染指数	污染程度
	As	Hg	Cr	Cd	Pb		
油麦菜	0.027	0.069	0.033	3.023	0.160	2.189	中度污染
苜蓿菜	0.024	0.100	0.175	3.571	0.266	2.592	中度污染
芫荽	0.085	0.154	0.042	4.609	0.246	3.339	重度污染
菜心 1	0.020	0.118	0.010	1.162	0.128	0.846	警戒线
菜心 2	0.033	0.111	0.104	1.489	0.354	1.094	轻度污染
菜心 3	0.017	0.128	0.229	1.133	0.349	0.843	警戒线
菜心 4	0.022	0.091	0.044	1.072	0.151	0.782	警戒线
白菜 1	0.022	0.099	0.059	1.033	0.304	0.761	警戒线
白菜 2	0.039	0.120	0.079	1.157	0.382	0.856	警戒线
白菜 3	0.024	0.066	0.027	1.174	0.242	0.858	警戒线
芥菜 1	0.013	0.060	0.014	0.563	0.105	0.412	安全
芥菜 2	0.028	0.083	0.108	0.820	0.154	0.604	安全
芥菜 3	0.024	0.092	0.019	0.576	0.163	0.425	安全
荷兰豆	0.017	0	0.360	0.846	1.255	0.954	警戒线
黄豆(毛豆)	0.042	0	0.115	2.338	0.185	1.696	轻度污染
萝卜 1	0.029	0	0.008	0.742	0.283	0.546	安全
萝卜 2	0.036	0	0.127	0.813	1.105	0.835	警戒线

表 4 蔬菜重金属污染的健康风险评估 ( $a^{-1}$ )

Table 4 Health risk assessment of heavy metals pollution in vegetables ( $a^{-1}$ )

蔬菜种类	HI <sub>Pb</sub>	HI <sub>Hg</sub>	Risk <sub>Pb</sub>	Risk <sub>Cd</sub>	Risk <sub>Cr</sub>	Risk <sub>As</sub>
油麦菜	$2.69 \times 10^{-10}$	$4.63 \times 10^{-11}$	$8.16 \times 10^{-9}$	$7.37 \times 10^{-5}$	$1.63 \times 10^{-7}$	$4.08 \times 10^{-7}$
苜蓿菜	$4.48 \times 10^{-10}$	$6.65 \times 10^{-11}$	$1.36 \times 10^{-8}$	$8.70 \times 10^{-5}$	$8.75 \times 10^{-7}$	$3.67 \times 10^{-7}$
芫荽	$4.14 \times 10^{-10}$	$1.03 \times 10^{-10}$	$1.26 \times 10^{-8}$	$1.12 \times 10^{-4}$	$2.08 \times 10^{-7}$	$1.27 \times 10^{-6}$
菜心 1	$2.15 \times 10^{-10}$	$7.85 \times 10^{-11}$	$6.53 \times 10^{-9}$	$2.84 \times 10^{-5}$	$5.09 \times 10^{-8}$	$3.05 \times 10^{-7}$
菜心 2	$5.96 \times 10^{-10}$	$7.44 \times 10^{-11}$	$1.81 \times 10^{-8}$	$3.63 \times 10^{-5}$	$5.23 \times 10^{-7}$	$5.03 \times 10^{-7}$
菜心 3	$1.59 \times 10^{-10}$	0	$4.82 \times 10^{-9}$	$9.07 \times 10^{-6}$	$4.23 \times 10^{-8}$	$4.41 \times 10^{-7}$
菜心 4	$6.20 \times 10^{-10}$	0	$1.88 \times 10^{-8}$	$9.92 \times 10^{-6}$	$6.35 \times 10^{-7}$	$5.36 \times 10^{-7}$
白菜 1	$5.11 \times 10^{-10}$	$6.62 \times 10^{-11}$	$1.55 \times 10^{-8}$	$2.52 \times 10^{-5}$	$2.98 \times 10^{-7}$	$3.26 \times 10^{-7}$
白菜 2	$6.44 \times 10^{-10}$	$8.04 \times 10^{-11}$	$1.95 \times 10^{-8}$	$2.82 \times 10^{-5}$	$3.97 \times 10^{-7}$	$5.91 \times 10^{-7}$
白菜 3	$4.07 \times 10^{-10}$	$4.44 \times 10^{-11}$	$1.24 \times 10^{-8}$	$2.87 \times 10^{-5}$	$1.33 \times 10^{-7}$	$3.67 \times 10^{-7}$
芥菜 1	$1.76 \times 10^{-10}$	$4.03 \times 10^{-11}$	$5.35 \times 10^{-9}$	$1.37 \times 10^{-5}$	$6.95 \times 10^{-8}$	$1.92 \times 10^{-7}$
芥菜 2	$2.58 \times 10^{-10}$	$5.51 \times 10^{-11}$	$7.84 \times 10^{-9}$	$2.00 \times 10^{-5}$	$5.41 \times 10^{-7}$	$4.25 \times 10^{-7}$
芥菜 3	$2.74 \times 10^{-10}$	$6.14 \times 10^{-11}$	$8.31 \times 10^{-9}$	$1.41 \times 10^{-5}$	$9.57 \times 10^{-8}$	$3.61 \times 10^{-7}$
荷兰豆	$5.87 \times 10^{-10}$	$8.54 \times 10^{-11}$	$1.78 \times 10^{-8}$	$2.77 \times 10^{-5}$	$1.15 \times 10^{-6}$	$2.61 \times 10^{-7}$
黄豆(毛豆)	$2.53 \times 10^{-10}$	$6.07 \times 10^{-11}$	$7.69 \times 10^{-9}$	$2.62 \times 10^{-5}$	$2.22 \times 10^{-7}$	$3.26 \times 10^{-7}$
萝卜 1	$1.41 \times 10^{-10}$	0	$4.27 \times 10^{-8}$	$1.03 \times 10^{-5}$	$1.80 \times 10^{-6}$	$2.49 \times 10^{-7}$
萝卜 2	$2.07 \times 10^{-10}$	0	$6.29 \times 10^{-9}$	$2.85 \times 10^{-5}$	$5.78 \times 10^{-7}$	$6.36 \times 10^{-7}$
最大值	$1.41 \times 10^{-9}$	$1.03 \times 10^{-10}$	$4.27 \times 10^{-8}$	$1.12 \times 10^{-4}$	$1.80 \times 10^{-6}$	$1.27 \times 10^{-6}$
最小值	$1.59 \times 10^{-10}$	0	$4.82 \times 10^{-9}$	$9.07 \times 10^{-6}$	$4.23 \times 10^{-8}$	$1.92 \times 10^{-7}$
平均值	$4.38 \times 10^{-10}$	$5.07 \times 10^{-11}$	$1.33 \times 10^{-8}$	$3.41 \times 10^{-5}$	$4.58 \times 10^{-7}$	$4.45 \times 10^{-7}$

表5 蔬菜重金属污染的健康总风险评估(a<sup>-1</sup>)  
Table 5 Total health risk assessment of heavy metals pollution in vegetables(a<sup>-1</sup>)

蔬菜种类	HI <sub>T</sub>	Risk <sub>T</sub>	Risk <sub>总</sub>
油麦菜	3.15×10 <sup>-10</sup>	7.43×10 <sup>-5</sup>	7.43×10 <sup>-5</sup>
苜蓿菜	5.14×10 <sup>-10</sup>	8.82×10 <sup>-5</sup>	8.82×10 <sup>-5</sup>
茺荳	5.18×10 <sup>-10</sup>	1.14×10 <sup>-4</sup>	1.14×10 <sup>-4</sup>
菜心1	2.94×10 <sup>-10</sup>	2.87×10 <sup>-5</sup>	2.87×10 <sup>-5</sup>
菜心2	6.71×10 <sup>-10</sup>	3.74×10 <sup>-5</sup>	3.74×10 <sup>-5</sup>
菜心3	1.59×10 <sup>-10</sup>	9.56×10 <sup>-6</sup>	9.56×10 <sup>-6</sup>
菜心4	6.20×10 <sup>-10</sup>	1.11×10 <sup>-5</sup>	1.11×10 <sup>-5</sup>
白菜1	5.77×10 <sup>-10</sup>	2.59×10 <sup>-5</sup>	2.59×10 <sup>-5</sup>
白菜2	7.24×10 <sup>-10</sup>	2.92×10 <sup>-5</sup>	2.92×10 <sup>-5</sup>
白菜3	4.51×10 <sup>-10</sup>	2.92×10 <sup>-5</sup>	2.92×10 <sup>-5</sup>
芥菜1	2.17×10 <sup>-10</sup>	1.40×10 <sup>-5</sup>	1.40×10 <sup>-5</sup>
芥菜2	3.14×10 <sup>-10</sup>	2.10×10 <sup>-5</sup>	2.10×10 <sup>-5</sup>
芥菜3	3.35×10 <sup>-10</sup>	1.45×10 <sup>-5</sup>	1.45×10 <sup>-5</sup>
荷兰豆	6.73×10 <sup>-10</sup>	2.91×10 <sup>-5</sup>	2.91×10 <sup>-5</sup>
黄豆(毛豆)	3.14×10 <sup>-10</sup>	2.67×10 <sup>-5</sup>	2.67×10 <sup>-5</sup>
萝卜1	1.41×10 <sup>-10</sup>	1.24×10 <sup>-5</sup>	1.24×10 <sup>-5</sup>
萝卜2	2.07×10 <sup>-10</sup>	2.98×10 <sup>-5</sup>	2.98×10 <sup>-5</sup>
最大值	1.41×10 <sup>-9</sup>	1.14×10 <sup>-4</sup>	1.14×10 <sup>-4</sup>
最小值	1.59×10 <sup>-10</sup>	9.56×10 <sup>-6</sup>	9.56×10 <sup>-6</sup>
平均值	4.89×10 <sup>-10</sup>	3.50×10 <sup>-5</sup>	3.50×10 <sup>-5</sup>

著,明显高于其他蔬菜品种;在茺荳中 Risk<sub>T</sub>=1.14×10<sup>-4</sup> a<sup>-1</sup>>HI<sub>T</sub>=5.18×10<sup>-10</sup> a<sup>-1</sup>,且 Risk<sub>T</sub>为 1.14×10<sup>-4</sup> a<sup>-1</sup>>1.0×10<sup>-4</sup> a<sup>-1</sup>,说明茺荳存在的人体健康风险主要是由致癌重金属引起的。而菜心3在17种蔬菜品种中 Risk<sub>总</sub>最低,主要原因是与其他蔬菜品种相比其致癌重金属风险评估值比较低,但菜心3 Risk<sub>总</sub>为 9.56×10<sup>-6</sup> a<sup>-1</sup>仍在 1.0×10<sup>-6</sup>~1.0×10<sup>-4</sup> a<sup>-1</sup>之间,表示仍存在一定的风险水平。就17种蔬菜整体而言:Risk<sub>总</sub>的平均值为 3.50×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>,在 1.0×10<sup>-6</sup>~1.0×10<sup>-4</sup> a<sup>-1</sup>之间,表示该批蔬菜品种重金属污染情况对人体健康存在一定的风险,但风险尚可接受;Risk<sub>T</sub>为 3.50×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>,在 1.0×10<sup>-6</sup>~1.0×10<sup>-4</sup> a<sup>-1</sup>之间,表示该批蔬菜品种中致癌重金属对人体健康存在一定的风险,但风险尚可接受,且在致癌风险中 Risk<sub>Cd</sub>>Risk<sub>Cr</sub>>Risk<sub>As</sub>>Risk<sub>Pb</sub>;HI<sub>T</sub>为 4.89×10<sup>-10</sup> a<sup>-1</sup><1.0×10<sup>-6</sup> a<sup>-1</sup>,表示该批蔬菜品种中非致癌重金属污染对人体健康存在的风险甚微,且在非致癌风险中 HI<sub>Pb</sub>>HI<sub>Hg</sub>,且由表5可以看出该批蔬菜中5种重金属所引起的致癌风险要远远大于非致癌风险。

### 3 结论

(1)农田土壤中重金属 As、Hg、Cr、Cd、Pb 的含量

分别是国家土壤环境质量二级标准的 0.875、0.900、0.373、2.863 倍和 0.305 倍,可以看出这 5 种重金属中只有 Cd 的含量超过了国家土壤环境质量二级标准。

(2)在 17 个蔬菜品种中污染程度处于警戒线的有 8 种,轻度污染的有 2 种,中度污染的有 2 种,安全的有 4 种,重度污染的有 1 种。其中茺荳受污染程度最为严重,芥菜 1、芥菜 2、萝卜 1、芥菜 3 这 4 个蔬菜品种在安全范围之内,因此建议在发挥该区域农田土壤最大利用价值的基础之上种植这 4 种在安全范围内的蔬菜品种,从而最大程度的降低人体所面临的潜在健康风险。

(3)就 17 种蔬菜整体而言:Risk<sub>总</sub>的平均值为 3.50×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>,表示该批蔬菜品种重金属污染情况对人体健康存在一定的风险,但风险尚可接受;Risk<sub>T</sub>为 3.50×10<sup>-5</sup> a<sup>-1</sup>,表示该批蔬菜品种中致癌重金属对人体健康存在一定的风险,但风险尚可接受,且在致癌风险中 Risk<sub>Cd</sub>>Risk<sub>Cr</sub>>Risk<sub>As</sub>>Risk<sub>Pb</sub>;HI<sub>T</sub>为 4.89×10<sup>-10</sup> a<sup>-1</sup>,表示该批蔬菜品种中非致癌重金属污染对人体健康存在的风险甚微,且在非致癌风险中 HI<sub>Pb</sub>>HI<sub>Hg</sub>,总体而言该批蔬菜中 5 种重金属所引起的致癌风险要远远大于非致癌风险。

### 参考文献:

[1] CHENG Shui-ping. Heavy metal pollution in China: Origin, pattern and control[J]. Environ Sci Pollute R, 2003,10(3): 192-198.

[2] WU Gang, KANG Hu-biao, ZHANG Xiao-yang, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(13): 1-8.

[3] 柴世伟,温琰茂,韦献革,等. 珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(4): 90-94.

CHAI Shi-wei, WEN Yan-mao, WEI Xian-ge, et al. Heavy metal content characteristics of agricultural soils in the Pearl River Delta[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(4): 90-94. (in Chinese)

[4] Saria L, Shimaoka T, Miyawaki K. Leaching of heavy metals in acid mine drainage[J]. Waste Management and Research, 2006, 24(2):134-140.

[5] Ramos Arroyoa Y R, Siebe C. Weathering of sulphide minerals and trace element speciation in tailings of various ages in the Guanajuato mining district, Mexico[J]. Catena, 2007, 71:497-506.

[6] 陈家栋,潘宝宝,张金池,等. 广东大宝山矿区土壤重金属含量及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 237-246.

CHEN Jia-dong, PAN Bao-bao, ZHANG Jin-chi, et al. Heavy metal concentrations in soils of Dabaoshan Mine and their affecting factors, Guangdong Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012,

- 19(6): 237-246. (in Chinese)
- [7] 陈三雄, 张金池. 广东大宝山矿区土壤重金属污染状况评价[J]. 珠江现代建设, 2014(5): 31-36.  
CHEN San-xiong, ZHANG Jin-chi. Soil heavy metal pollution evaluation in Dabaoshan mine of Guangdong Province[J]. Pearl River Modern Construction, 2014(5): 31-36. (in Chinese)
- [8] 林初夏, 卢文洲, 吴永贵, 等. 大宝山矿水外排的环境影响: II. 农业生态系统[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 169-172.  
LIN Chu-xia, LU Wen-zhou, WU Yong-gui, et al. Environmental impacts of acid mine drainage from the Dabaoshan Mine: II. Agricultural ecosystem[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(2): 169-172. (in Chinese)
- [9] 刘奕生, 高怡, 王康玮, 等. 广东消化道恶性肿瘤高发村的病因学研究[J]. 中国热带医学, 2005, 5(5): 1139-1141.  
LIU Yi-sheng, GAO Yi, WANG Kang-wei, et al. Etiologic study on alimentary tract malignant tumor in villages of high occurrence[J]. China Tropical Medicine, 2005, 5(5): 1139-1141. (in Chinese)
- [10] 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): 1077-1085.  
LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, et al. Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetable plots from a typical nonferrous metals mine city[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1077-1085. (in Chinese)
- [11] 曲亚斌, 林立丰, 张建鹏, 等. 广东省十城市饮用水中部分元素健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(5): 434-437.  
QU Ya-bin, LIN Li-feng, ZHANG Jian-peng, et al. Health risk assessment of metal elements in drinking water in 10 cities, Guangdong Province[J]. J Environ Health, 2012, 29(5): 434-437. (in Chinese)
- [12] 王彩霞, 郭蓉, 程国霞, 等. 陕西省谷物中重金属污染状况及健康风险评估[J]. 卫生研究, 2016, 45(1): 35-44.  
WANG Cai-xia, GUO Rong, CHENG Guo-xia, et al. Dietary exposure and health risk assessment of heavy metal in grains of Shaanxi Province[J]. Journal of Hygiene Research, 2016, 45(1): 35-44. (in Chinese)
- [13] 谢恺, 陈美珠, 陈惠琴, 等. 新罗区学龄前儿童食用海鱼摄入汞、砷的健康风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2016, 26(3): 406-408.  
XIE Kai, CHEN Mei-zhu, CHEN Hui-qin, et al. Health risk assessment of mercury and arsenic ingesting from marine fish among pre-school children in Xinluo district[J]. Chin J Health Lab Tec, 2016, 26(3): 406-408. (in Chinese)
- [14] 王晓波, 陈海珍, 刘冬英, 等. 广州市蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. 中国公共卫生, 2011, 27(5): 549-551.  
WANG Xiao-bo, CHEN Hai-zhen, LIU Dong-ying, et al. Contents of heavy metal in vegetables and their potential risks to human health in Guangzhou City[J]. Chin J Public Health, 2011, 27(5): 549-551. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 221-796.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population(adults)[M]. Beijing: Chinese Environmental Press, 2013: 221-796. (in Chinese)
- [16] Sipter E, Rozsa E, Gruiz K, et al. Site-specific risk assessment in contaminated vegetable gardens[J]. Chemosphere, 2008, 71: 1301-1307.
- [17] ZHANG Xin-ying, TANG Xiao-lan, ZHAO Cai-liu, et al. Health risk evaluation for the inhabitants of a typical mining town in a mountain area, South China[J]. Ann N Y Acad Sci, 2008, 1140: 263-273.
- [18] 于云江, 胡林凯, 李定龙, 等. 某典型农业区农田土壤重金属污染的健康风险初步评价[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(8): 693-696.  
YU Yun-jiang, HU Lin-kai, LI Ding-long, et al. Health risk assessment of heavy metals pollution in farmland soils in a typical agricultural area: A preliminary report[J]. J Environ Health, 2010, 27(8): 693-696. (in Chinese)
- [19] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2261-2270.  
LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, CHEN Jing, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling City[J]. China Environmental Science, 2012, 32(12): 2261-2270. (in Chinese)
- [20] 张丽娥, 莫招育, 覃健, 等. 广西大厂矿区下游农村土壤重金属污染及儿童健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(6): 512-516.  
ZHANG Li-e, MO Zhao-yu, TAN Jian, et al. Contamination of heavy metals in soils and health risk assessment in children in a downstream village of Dachang mining area in Guangxi[J]. J Environ Health, 2014, 31(6): 512-516. (in Chinese)
- [21] USEPA. EPA/540/1-89/002, Risk assessment guidance for superfund Volume I: human health evaluation manual (Part A)[S]. Washington: 1989.
- [22] 高砚芳, 段增强, 郇恒福. 太湖地区温室土壤重金属污染状况调查及评价[J]. 土壤, 2007, 39(6): 910-914.  
GAO Yan-fang, DUAN Zeng-qiang, XUN Heng-fu, et al. Investigation and evaluation of heavy metal contamination of greenhouse soils in Tai Lake region[J]. Soils, 2007, 39(6): 910-914. (in Chinese)
- [23] 丁琮, 陈志良, 李核, 等. 长株潭地区农业土壤重金属全量与有效态含量的相关分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(12): 2002-2006.  
DING Cong, CHEN Zhi-liang, LI He, et al. Correlation analysis of the heavy metal total contents and the available contents of agricultural soil in Chang-Zhu-Tan area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(12): 2002-2006. (in Chinese)
- [24] 王凌, 张国印, 张小龙, 等. 蔬菜土壤重金属生物有效性及有效态与全量相关性研究[J]. 华北农学报, 2011, 26(增刊): 85-88.  
WANG Ling, ZHANG Guo-yin, ZHANG Xiao-long, et al. Study on the bioavailability of heavy metal and correlation between the available concentration and the total in vegetable soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2011, 26(supplement): 85-88. (in Chinese)
- [25] 许超, 夏北成, 秦建桥, 等. 广东大宝山矿山下游地区稻田土壤的重金属污染状况的分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 549-553.  
XU Chao, XIA Bei-cheng, QIN Jian-qiao, et al. Analysis and evaluation on heavy metal contamination in paddy soils in the lower stream of

- Dabaoshan area, Guangdong Province[J]. *Journal Agro-environment Science*, 2007, 26(supplement): 549-553. (in Chinese)
- [26] 郑佳佳, 姜晓, 张晓军, 等. 广东大宝山矿区周围土壤重金属污染状况评价[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(11): 137-145.
- ZHENG Jia-jia, JIANG Xiao, ZHANG Xiao-jun, et al. Pollution Assessment of heavy metals in soil around Dabaoshan Polymetallic Ore Deposit[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(11): 137-145. (in Chinese)
- [27] 宋相帝. 青菜对铬吸收积累的基因型差异[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- SONG Xiang-di. The differences of absorption and accumulation of Cd in different genotypes of *Brassica Chinensis* L[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011. (in Chinese)
- [28] 黄银晓, 林舜华, 任继凯, 等. 北京东郊作物-土壤系统中重金属的迁移、分布、积累[J]. *植物生态学与地植物学学报*, 1986, 10(2): 131-144.
- HUANG Yin-xiao, LIN Shun-hua, REN Ji-kai, et al. The translocation, distribution, and accumulation of heavy metals in crop-soil system in the eastern suburbs of Beijing[J]. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1986, 10(2): 131-144. (in Chinese)
- [29] 马建军, 任艳军, 任学军, 等. 秦皇岛市售叶菜类蔬菜中重金属含量状况及其健康风险分析[J]. *河北科技师范学院学报*, 2013, 27(1): 13-22.
- MA Jian-jun, REN Yan-jun, REN Xue-jun, et al. Concentrations and health risk assessment of heavy metals in foliage vegetables from markets of Qinhuangdao City[J]. *Journal of Hebei Normal University of Science & Technology*, 2013, 27(1): 13-22. (in Chinese)