

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018012403

谢薇, 杨耀栋, 侯佳渝. 天津某菜地土壤——蔬菜中硒与重金属含量特征及绿色富硒蔬菜筛选[J]. 环境化学, 2018, 37(12): 2790-2799.

XIE Wei, YANG Yaodong, HOU Jiayu. Characteristics of selenium and heavy metals concentrations in soils and vegetables and screening of green selenium-enriched vegetables in a base of Tianjin[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(12): 2790-2799.

## 天津某菜地土壤——蔬菜中硒与重金属含量 特征及绿色富硒蔬菜筛选

谢 薇<sup>1,2\*</sup> 杨耀栋<sup>1,2</sup> 侯佳渝<sup>3</sup>

(1. 天津市地质矿产测试中心, 天津, 300191; 2. 国土资源部天津矿产资源监督检测中心, 天津, 300191;  
3. 天津市国土资源和房屋管理局地质事务中心, 天津, 300042)

**摘 要** 本文以天津某蔬菜基地为研究对象,对基地土壤中硒与重金属元素含量进行了分析,并利用单因子评价法对土壤中重金属元素进行了评价.结果表明,蔬菜基地的土壤 Se 含量范围为 0.71—1.23 mg·kg<sup>-1</sup>(干重),平均含量为 0.96 mg·kg<sup>-1</sup>,所有样品均达到富硒土壤(Se≥0.04 mg·kg<sup>-1</sup>)标准.但是蔬菜基地遭到重金属不同程度的污染,其中 Hg、Zn 和 Cu 的污染指数分别为 1.24、1.02 和 1.23,污染程度均为轻度,而 Cd 的污染指数为 2.26,达到中度污染.另外,对与土壤配套采集的青萝卜、圆白菜和菜花等 20 种蔬菜中的硒与重金属含量进行分析,结果表明该基地蔬菜的富硒(Se≥0.01 mg·kg<sup>-1</sup>)率达到 90%.蔬菜中青萝卜 1 号(本地)、青萝卜 2 号(天津青萝卜)和青萝卜 3 号(津卫一号)的硒含量较高,含量分别为 0.100、0.091、0.078 mg·kg<sup>-1</sup>(鲜重),硒含量较低的蔬菜为油菜 1 号(金品一夏)、油菜 2 号(改良金品雨季)和小白菜 2 号(佳美),含量分别为 0.007、0.007、0.009 mg·kg<sup>-1</sup>.每种蔬菜的 Cd、Zn 和 Cu 的含量均低于食品安全国家标准要求,但圆白菜 1 号(雅实绿)、圆白菜 2 号(珍美)、菜花 1 号(本地)和菜花 2 号(白雪)中的 Hg 含量分别为 0.022、0.018、0.019、0.016 mg·kg<sup>-1</sup>,均超过食品安全标准限值.同时,健康风险评价结果显示,食用本基地圆白菜(雅实绿、珍美)、菜花(本地、白雪)和香菜(本地)对人体造成健康风险较大.综合各类分析评价结果,该基地生产的 3 种青萝卜(本地、天津青萝卜、津卫一号)均为绿色富硒蔬菜,建议当地农户多种植该类蔬菜.

**关键词** 硒, 重金属, 菜地土壤, 蔬菜, 天津.

## Characteristics of selenium and heavy metals concentrations in soils and vegetables and screening of green selenium-enriched vegetables in a base of Tianjin

XIE Wei<sup>1,2\*</sup> YANG Yaodong<sup>1,2</sup> HOU Jiayu<sup>3</sup>

(1. Tianjin Geological Mineral Test Center, Tianjin, 300191, China; 2. Tianjin Supervision Center of Geology of Mineral Resources, the Ministry of Land and Resources, Tianjin, 300191, China;  
3. Tianjin Land-resources and Housing Management Bureau Geological Center, Tianjin, 300042, China)

**Abstract:** Concentrations of selenium and heavy metals were analyzed in soil of a vegetable base in Tianjin, and single factor index was used to evaluate heavy metals. The results showed that the selenium concentration of soil was 0.71—1.23 mg·kg<sup>-1</sup>(dry weight), and average concentration was 0.96 mg·kg<sup>-1</sup>. All samples reached the standard of selenium-enriched soil (Se≥0.04 mg·kg<sup>-1</sup>). However, the soil was polluted with Cd, Hg, Zn and Cu, and the pollution index was 2.26, 1.24, 1.02 and 1.23, respectively. The pollution level of Hg, Zn and Cu was mild, while Cd was moderate

2018 年 1 月 24 日收稿(Received: January 24, 2018).

\* 通讯联系人, Tel:022-23665595, E-mail:Chinav2012@163.com

Corresponding author, Tel:022-23665595, E-mail: Chinav2012@163.com

pollution. In addition, the concentrations of selenium and heavy metals in 20 vegetables such as green radish, cabbage and cauliflower were analyzed. The results showed that the selenium-enriched rate of vegetables reached 90%. High levels of selenium were detected in green radish No.1 (local), green radish No. 2 (Tianjin green radish) and green radish No. 3 (Jinwei No. 1), and the concentration was 0.100, 0.091 and 0.078  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively (fresh weight). Low levels of selenium were detected in Bok choy No. 1 (Jinpinyixia), Bok choy No. 2 (Improved jinpinyuji) and pakchoi No. 2 (Jiamei), and the concentration was 0.007, 0.007, and 0.009  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. The concentration of Cd, Zn, and Cu in each vegetable was lower than the national standard requirements for food safety, but the Hg concentration in cabbage No. 1 (Yashilv), cabbage No. 2 (Zhenmei), cauliflower No. 1 (local), and Cauliflower No. 2 (Baixue) was 0.022, 0.018, 0.019, and 0.016  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively and higher than the national standard requirements for food safety. Meanwhile, the health risk assessment showed that consumption of cabbage (Yashilv and Zhenmei), cauliflower (local and Baixue) and caraway could cause higher health risk. According to the results, 3 green radish produced in this vegetable base were green selenium-enriched vegetables, and the local farmers should be advised to grow vegetables.

**Keywords:** selenium, heavy metal, vegetable soil, vegetable, Tianjin.

硒是人体必需的微量元素,对于延缓衰老、提高免疫力和预防癌症均具有非常重要的意义<sup>[1-2]</sup>,因其特殊的健康价值,所以受到越来越多人的关注。随着人们对硒的生理功能、抗癌功能等认识的逐步加深,补硒理念已被世界大多数人所接受,全球对富硒绿色食品的需求正日益呈增长的态势。

蔬菜是膳食结构不可或缺的组成部分,同时也是人体摄入硒的主要途径,因此依托富硒土地资源种植富硒蔬菜,对于提高人民的健康水平具有重要的现实意义。近年来,富硒蔬菜成为学者们研究的热点问题之一。王亚国等<sup>[3]</sup>在陕西紫阳地区通过对 13 类蔬菜的富硒特征研究,发现白萝卜、大葱和大白菜等是富硒能力较强的蔬菜;刘超等<sup>[4]</sup>通过对青海乐都富硒区主要蔬菜的富硒能力研究,发现对硒富集能力较强的蔬菜主要有大蒜、萝卜和胡萝卜等;宋明义等<sup>[5]</sup>对浙江嘉兴地区的富硒作物品种进行筛选,认为莲藕和土豆是富硒率较高的蔬菜品种。以上这些研究均针对蔬菜的富硒能力开展研究,但对于蔬菜能否同时满足富硒低重金属的研究却鲜有报道。众所周知,土壤环境质量与蔬菜安全生产密切相关,然而随着中国工业化和城市化进程的不断加快,目前的土壤环境状况不容乐观,包括富硒土壤资源。重金属作为一类持久性潜在有毒污染物,一旦进入土壤,将不能被生物降解而长期存在于土壤中并不断累积,进而通过土壤间接转移到蔬菜中,威胁人体健康<sup>[3-5]</sup>。

本文选取具有代表性的蔬菜基地开展试验,并根据当地人的消费习惯选取 20 种不同的蔬菜进行研究。旨在不超出蔬菜重金属污染安全阈值的前提下,筛选出富硒能力强同时又满足重金属低积累型的蔬菜品种<sup>[6]</sup>,这对于充分利用耕地资源和从源头上保障健康富硒食品的开发具有重要意义。

## 1 材料与方法 (Materials and methods)

### 1.1 蔬菜基地概况

在天津市《多目标 1:5 万地球化学调查》成果的基础上,选取具有代表性的蔬菜基地开展试验。该蔬菜基地位于天津某城郊蔬菜种植区,面积约为 1320  $\text{m}^2$ ,2015 年 9 月种植 3 种青萝卜——本地、天津青萝卜、津卫一号;2 种大白菜——绿健 60、耕耘绿 75;1 种胡萝卜——郑参丰收红;2 种早萝卜——朝农板秋红、红丰三号;2 种圆白菜——雅实绿、珍美;2 种菜花——本地、白雪;2 种油菜——金品一夏、改良金品雨季;2 种小白菜——绿健 60、佳美;1 种茼蒿——天津青茼蒿;1 种芹菜——雅士;1 种莴笋——本地;1 种香菜——本地,共种植 20 种蔬菜(表 1)。每个小区面积为 3  $\text{m} \times 1 \text{m}$ ,小区间隔 1  $\text{m}$ ,各品种按完全随机排列,青萝卜每个小区 4 个重复,其余蔬菜均 3 个重复。各品种施肥及田间管理完全按照当地的种植习惯,并于蔬菜成熟期协同采集蔬菜与土壤样品。

表 1 蔬菜样品信息

Table 1 Information of vegetable samples

蔬菜种类 Vegetable type	品种 Vegetable variety	蔬菜种类 Vegetable type	品种 Vegetable variety
青萝卜 1 号	本地	菜花 1 号	本地
青萝卜 2 号	天津青萝卜	菜花 2 号	白雪
青萝卜 3 号	津卫一号	油菜 1 号	金品一夏
大白菜 1 号	绿健 60	油菜 2 号	改良金品雨季
大白菜 2 号	耕耘绿 75	小白菜 1 号	绿健 60
胡萝卜	郑参丰收红	小白菜 2 号	佳美
旱萝卜 1 号	朝农板秋红	苜蓿	天津青苜蓿
旱萝卜 2 号	红丰三号	芹菜	雅士
圆白菜 1 号	雅实绿	莴笋	雪冠王
圆白菜 2 号	珍美	香菜	本地

注：“本地”表示当地农户自家种子。

## 1.2 样品采集

为保证采集的土壤样品具有代表性,在每小区内按“S 形”布点法采集 0—20 cm 的表层土壤子样,去除杂草、石块等杂物后,每 5 个子样组合为 1 件样品,每件样品总重量为 1 kg。

蔬菜样品与土壤样品同步采集,蔬菜样品采集可食用部分,每小区内均由 10 个子样混合为 1 件样品,每件样品总重量大于 3 kg。

## 1.3 样品加工与测试

土壤样品在 25 °C 阴凉通风处自然风干,剔除样品中植物根系、残渣和石砾后,研磨过 20 目筛,置于干燥器内保存,备用。

蔬菜样品先剔除已萎蔫部分后,用自来水和蒸馏水依次清洗样品,清洗干净、擦干后立即称其鲜样质量,然后将鲜样置于冷冻干燥机中进行冷冻干燥,待样品完全干燥后,称重,计算干湿比。干样用高速破碎机制成粉样后,放入牛皮纸袋中,置于干燥器内保存,备用。

土壤 pH 测定采用电位法;土壤硒与重金属总量按美国 EPA 3052 相关方法进行消化后测定。蔬菜经 HNO<sub>3</sub> 微波消解后与土壤样品同步测定<sup>[7]</sup>。Se、Hg、As 元素采用原子荧光光谱仪测定,Cd、Zn、Cu、Ni、Pb、Cr 采用等离子体质谱仪测定。为了保证测试结果的准确性,进行样品测试时,同时进行空白、平行样及标准样品实验,对于每件蔬菜样品,均进行 3 次重复测试。土壤标准样品 GBW07425、GBW07428、GBW07453、GBW07456 以及蔬菜标准样品 GBW10015、GBW10048 的测试值均满足不确定度要求。土壤与蔬菜样品均由国土资源部天津矿产资源监督检测中心测试分析。

## 1.4 土壤硒的丰缺性评价

根据谭见安对我国 Se 元素生态景观分级标准<sup>[8]</sup>,对基地土壤 Se 元素的丰缺情况进行评价,见表 2。

表 2 土壤 Se 丰缺评价标准

Table 2 Abundance and deficiency demarcation value of soil selenium

Se 含量 Selenium concentration/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	<0.125	0.125—0.175	0.175—0.4	0.4—3.0	>3.0
硒效应 Selenium effect	硒不足	潜在硒不足	足硒	富硒	硒中毒

## 1.5 土壤环境质量评价

### 1.5.1 评价方法

为衡量土壤中污染元素的污染程度,采用单因子评价法对各指标进行评价。单因子评价是指以土壤污染实测值和评价标准相比计算土壤各项污染物的污染指数,计算公式如下:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中, $P_i$ 为土壤中污染物  $i$  的污染指数; $C_i$ 为土壤中污染物  $i$  的实测浓度,单位为 mg·kg<sup>-1</sup>;  $S_i$ 为污染物  $i$

的评价标准,单位为  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

### 1.5.2 评价标准

《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)中的二级标准,是保障农业生产,维护人体健康的土壤限值,此次污染元素的评价标准采用该值.评价结果采用《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—2004)中推荐的评价标准(表3).

表3 土壤环境质量评价标准

Table 3 Classification criteria of soil environmental quality

等级 Grade	污染指数 Contamination index	评价结果 evaluation result
1	$\leq 0.7$	安全
2	0.7—1.0	预警
3	1.0—2.0	轻度污染
4	2.0—3.0	中度污染
5	$\geq 3.0$	重度污染

### 1.6 蔬菜摄入健康风险评价

污染物质由蔬菜摄入平均量计算公式如下:

$$\text{ADD} = \frac{C \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}}$$

式中,ADD 为污染物经蔬菜摄入的平均日摄入量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ );C 为蔬菜中污染物含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ );IR 为食物摄入率( $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ );EF 为蔬菜摄入频率( $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ );ED 为摄入时间(a);BW 为平均体重(kg);AT 为平均摄入时间(d).

蔬菜摄入的健康风险指数计算公式如下:

$$\text{HQ} = \text{ADD}/\text{RfD}$$

式中,HQ 为健康风险指数,ADD 为污染物经蔬菜摄入的平均日摄入量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ );RfD 为重金属参考剂量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )(表4).HQ>1 表明该污染物可引起人体的健康风险,健康风险指数越大,表明该污染物对人体健康风险越大;HQ<1,则表明该污染物不会引起人体的健康风险.

由于重金属对人体健康的影响一般是多种元素共同作用的结果,因此,将个体总风险 THQ 运用到全面评价 Cd 和 Hg 对人体的健康风险中,计算公式如下:

$$\text{THQ} = \text{HQ}_1 + \text{HQ}_2$$

如果  $\text{THQ} \leq 1$ ,表明没有明显的负面影响;THQ>1,表明对人体健康产生影响的可能性很大.

表4 Cd 和 Hg 健康风险评价风险参考剂量(RfD)

Table 4 Reference dose (RfD) values for Cd and Hg

重金属 Heavy metals	Cd	Hg
RfD/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )	0.001	0.0001

### 1.7 数据处理

应用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS19.0 软件对数据进行处理.

## 2 结果与讨论(Results and discussion)

### 2.1 土壤中硒与重金属含量水平

SPSS 软件对土壤样品中 Se 与重金属含量进行正态分布检验的结果显示,各元素含量均服从正态分布(K-S,  $P>0.05$ ),故用算数平均值表示各元素平均含量(表5).Se 的平均含量为  $0.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干重,下同),明显高于基地所在区域土壤 Se 的背景值  $0.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  及全国土壤 Se 含量平均值  $0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[9]</sup>,但含量远低于我国硒都—湖北恩施( $4.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[10]</sup>.参照我国 Se 元素生态景观分级标准<sup>[8]</sup>,所有土壤样品均达到富硒土壤标准,而且硒元素的变异系数仅为 16.6%,属于弱变异,说明基地

土壤中硒元素分布较为均匀,此基地可以称为富硒蔬菜基地.基地土壤中 Ni、As、Cr 的平均含量与背景值几乎一致,表明蔬菜基地未受外界该类元素的影响;而 Cd、Hg、Zn、Cu、Pb 的平均含量明显高于背景值,其中,Pb 的平均含量是背景值的 2.4 倍;Zn 和 Cu 的平均含量是背景值的 4 倍以上,而 Cd 和 Hg 平均含量分别高达背景值的 11 倍和 25 倍,可见基地土壤中 Cd、Hg、Zn、Cu 和 Pb 元素受到外界因素影响,其中 Cd 和 Hg 受影响的程度较大.

表 5 土壤中硒与重金属元素含量统计表( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,干重)

Table 5 Statistical values of selenium and heavy metals concentrations in soil ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , dw)

统计参数 Statistical parameters	pH	Se	Cd	Hg	Zn	Cu	Ni	As	Cr	Pb
最大值 Maximum/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	8.43	1.23	2.2	2.69	408.5	175.1	38.3	11.68	79.7	117.4
最小值 Minimum/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	7.55	0.71	1.1	0.8	199	59.4	31.9	9.56	65.4	44.5
平均值 Mean/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	7.96	0.96	1.38	1.25	303.69	121.3	35.12	10.65	73.39	55.9
标准偏差 Standard deviation/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.37	0.16	0.27	0.4	49.87	29.21	1.86	0.56	3.61	15.66
变异系数 Variation coefficient/%	4.7	16.6	19.4	31.7	16.4	24.1	5.3	5.2	4.9	28
背景值 Background value/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	—	0.11	0.12	0.05	74.8	26.2	33.9	10.95	67.1	23.5

注:背景值由实地采集深层土壤样品测试分析获取数据.

## 2.2 土壤环境质量评价

土壤的 pH 值均大于 7.5,平均值为 7.96(表 5),因此在进行土壤环境质量评价时,选取《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)中 pH>7.5 的二级评价标准.在采集的土壤样品中,所有样品的 Cd 均超过二级标准,超标率高达 100%;Hg、Zn 和 Cu 超过二级标准的比例分别为 87.9%、72.7%和 84.8%;其他元素如 Ni、As、Cr 和 Pb,含量均未超过该标准(表 6).

曾希柏等<sup>[11]</sup>对当前中国菜地土壤重金属含量的一项调查统计结果表明中国菜地土壤中重金属含量以 Cd 的超标率较高,所有样本中 Cd 的超标率达 24.1%;由此可见 Cd 污染对当前蔬菜安全生产造成较大威胁.此外,根据单因子污染指数法的判定标准,Cd 为中度污染,Hg、Zn 和 Cu 均为轻度污染,而 Pb 为安全程度(表 6).可见,该蔬菜基地的土壤主要受到 Cd、Hg、Zn 和 Cu 的污染.根据实地调研发现,蔬菜基地每年施用的有机肥(包括牛粪、鸡粪和猪粪等)高达每亩 5000 kg,而已有的研究资料表明,我国牛粪、鸡粪和猪粪等有机肥中均存在不同程度的 Cd、Hg、Zn 和 Cu 的超标问题,由此可以看出,施用有机肥是造成蔬菜基地 Cd、Hg、Zn 和 Cu 污染的重要原因之一<sup>[12-13]</sup>.另外,人类生产生活过程中产生的废气、废烟、粉尘经过大气干湿沉降进入土壤,也会引起 Cd、Hg、Zn 和 Cu 的污染问题<sup>[14]</sup>.

表 6 土壤环境质量评价结果

Table 6 Evaluation results of soil environmental quality

重金属 Heavy metal	Cd	Hg	Zn	Cu	Ni	As	Cr	Pb
超标率 Unattainment rate/%	100.0	87.9	72.7	84.8	0	0	0	0
平均污染指数 Average contamination index	2.26	1.24	1.02	1.23	0.59	0.43	0.29	0.16
污染程度 Contamination degree	中度	轻度	轻度	轻度	安全	安全	安全	安全

## 2.3 蔬菜中硒的含量与评价

SPSS 的检验结果显示,蔬菜中硒与重金属元素含量均服从正态分布,因此可用算数平均值来表示其平均含量(K-S,  $P>0.05$ ).由表 7 可以看出,不同种类蔬菜中硒含量的差异较大,其中硒含量较高的蔬菜为青萝卜 1 号(本地)、青萝卜 2 号(天津青萝卜)和青萝卜 3 号(津卫一号),含量分别为 0.100、0.091、0.078  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中青萝卜 1 号(本地)的硒含量与青海乐都富硒区出产萝卜中的硒含量(0.103  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )较为一致.硒含量较低的蔬菜为油菜 1 号(金品一夏)、油菜 2 号(改良金品雨季)和小白菜 2 号(佳美),含量分别为 0.007、0.007、0.009  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .本基地种植的大白菜、芹菜、香菜和胡萝卜中硒的含量分别为 0.037、0.067、0.010、0.031  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,明显高于广州市同种类型蔬菜,广州上述 4 种蔬菜

的硒含量分别为 0.006、0.002、0.006、0.008  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相比于陕西紫阳高硒区出产的大白菜 (0.967  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 本基地大白菜的硒含量明显偏低。

通过将本研究中蔬菜的硒含量与其它地区研究结果比较, 发现同种蔬菜在不同地区种植硒含量却存在较大的差异, 这表明蔬菜对土壤中硒元素的吸收受到土壤类型、蔬菜种类以及硒元素本身的性质等多种因素的影响<sup>[3-4, 15-17]</sup>。

根据《湖北省关于富硒食品地方标准》(DB42/211—2002) 中果蔬类标准, 蔬菜中 Se 含量  $\geq 0.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (鲜重) 即满足富硒蔬菜要求, 该基地内除 2 种油菜 (金品一夏、改良金品雨季) 和小白菜 2 号 (佳美) 不满足富 Se 蔬菜要求外, 其余种类蔬菜样品均为富 Se 蔬菜。说明富硒土壤具有培育天然富硒蔬菜的潜在优势, 应加强开发利用。

表 7 蔬菜中硒与重金属元素平均含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 鲜重)

Table 7 Average concentration of selenium and heavy metals of different vegetables ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , fw)

蔬菜种类 Vegetable type	Se	Hg	Cd	Cu	Zn
青萝卜 1 号	0.100±0.047e	0.004±0.003ab	0.011±0.002bcd	0.305±0.058cdef	2.254±0.743cde
青萝卜 2 号	0.091±0.047de	0.004±0.004ab	0.013±0.002cd	0.349±0.043fgh	2.562±0.377def
青萝卜 3 号	0.078±0.041cde	0.003±0.002ab	0.015±0.005de	0.361±0.039gh	2.489±0.202def
菜花 1 号	0.041±0.002abc	0.019±0.001ef	0.005±0.001a	0.471±0.007i	3.767±0.033g
菜花 2 号	0.081±0.003cde	0.016±0.002e	0.004±0.001a	0.346±0.008efgh	2.713±0.014ef
圆白菜 1 号	0.027±0.003ab	0.022±0.001f	0.008±0.000ab	0.140±0.002a	1.425±0.002a
圆白菜 2 号	0.050±0.002abcd	0.018±0.002e	0.005±0.001a	0.115±0.003a	1.338±0.009a
大白菜 1 号	0.037±0.030abc	0.005±0.005abc	0.015±0.004de	0.284±0.005cd	1.974±0.295bc
大白菜 2 号	0.038±0.030abc	0.002±0.000a	0.018±0.003e	0.291±0.100cde	2.091±0.430cd
早萝卜 1 号	0.018±0.002a	0.006±0.001bcd	0.016±0.002de	0.476±0.010i	2.750±0.015f
早萝卜 2 号	0.015±0.001a	0.006±0.002bcd	0.010±0.001bc	0.267±0.016cd	2.084±0.021cd
小白菜 1 号	0.024±0.001ab	0.003±0.000ab	0.061±0.001j	0.255±0.002bc	2.115±0.008cd
小白菜 2 号	0.009±0.001a	0.006±0.001bcd	0.045±0.003i	0.215±0.004b	1.442±0.003a
油菜 1 号	0.007±0.001a	0.003±0.000ab	0.026±0.004gh	0.311±0.001defg	2.321±0.015cdef
油菜 2 号	0.007±0.001a	0.005±0.001bcd	0.029±0.002h	0.393±0.004h	2.686±0.015ef
茼蒿	0.042±0.003abc	0.005±0.000abc	0.013±0.003cd	0.340±0.004efgh	2.654±0.004ef
芹菜	0.067±0.002bcde	0.005±0.001bcd	0.026±0.002gh	0.313±0.008defg	2.141±0.001cd
胡萝卜	0.031±0.020ab	0.002±0.001a	0.023±0.003fg	0.505±0.032i	2.249±0.165cde
莴笋	0.027±0.002ab	0.008±0.001cd	0.019±0.004ef	0.766±0.024j	1.629±0.010ab
香菜	0.010±0.001a	0.009±0.001d	0.078±0.001k	1.143±0.003k	4.679±0.010h

注: 同列中不同小写字母表示同一元素在不同种类蔬菜中的含量差异显著 ( $P < 0.05$ )。

#### 2.4 蔬菜中重金属的含量与评价

蔬菜样品中 Cd 含量最高的蔬菜为香菜, 含量为 0.078  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其次为小白菜和油菜。但含量均低于中华人民共和国食品安全卫生标准 (叶类  $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  鲜重, 根茎类  $\leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  鲜重)。高 Cd 土壤中可以生产出低 Cd 蔬菜, 与土壤富 Se 有关, 已有的研究成果表明土壤中适量的 Se 可以显著降低蔬菜对 Cd 的吸收。铁梅等<sup>[18]</sup> 通过盆栽试验的方法研究硒镉复合作用对萝卜生理生化特征影响, 结果表明土壤中 Se 的浓度低于 1.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时对 Cd 含量  $< 5.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  具有拮抗作用, 同时可以促进萝卜的生长。梁程等<sup>[19]</sup> 采用水培方法对水稻幼苗进行研究, 发现在加入一定浓度的 Se 后, Cd 的毒性作用得到缓解。

郭锋<sup>[20]</sup> 采用盆栽试验的方式对菠菜进行研究, 发现 Se 可以有效的抑制菠菜根部对 Cd 的吸收、富集和向地上部的转运, 使菠菜地上部和根部 Cd 含量显著降低。本研究通过对基地蔬菜中 Se 与 Cd 和 Hg 等重金属进行相关分析 (表 8), 仅发现 Se 与 Cd 呈显著的负相关 ( $P < 0.05$  水平), 说明富 Se 土壤既有生产富硒蔬菜优势, 同时又能够抑制蔬菜对 Cd 的吸收。

蔬菜中 Hg 含量较高的蔬菜主要有圆白菜和菜花, 其中圆白菜 1 号 (雅实绿) 和圆白菜 2 号 (珍美)

的 Hg 含量分别为  $0.022 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.018 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 菜花 1 号(本地)和菜花 2 号(白雪)的 Hg 含量分别为  $0.019 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.016 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 参照中华人民共和国食品安全卫生标准(蔬菜 $\leq 0.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜重), 上述 4 种蔬菜的 Hg 含量均超过标准, 表明不同种类蔬菜对重金属的选择性吸收和积累作用是不同的。

表 8 蔬菜中 Se 与重金属相关性

Table 8 Correlation analyses of selenium and heavy metals in vegetables

元素 Element	Cd	Hg	Zn	Cu
Se	-0.464 *	0.025	-0.033	-0.226

注:  $n=20$ , \* 在 0.05 水平显著相关。

相比于其他种类蔬菜, 香菜中的 Zn 和 Cu 含量均最高, 含量分别为  $4.679 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $1.143 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 均低于中华人民共和国食品安全卫生标准( $\text{Zn}\leq 20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜重,  $\text{Cu}\leq 10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜重)。一方面是由于 Zn 和 Cu 作为植物生长必需元素被植物吸收, 但植物本身很可能有一定的调控机制以便控制对 Zn 和 Cu 的吸收量, 使得植物可以在土壤中 Zn 和 Cu 含量超标的环境下依然正常生长。同时, 也有可能是由于土壤中 Zn 和 Cu 含量较高, 已影响到蔬菜的正常生长, 导致体内被动吸收大量 Zn 和 Cu, 根系活力下降, 从而对 Zn 和 Cu 的吸收能力减弱<sup>[21]</sup>。

FAO/WHO 暂定的每人每日膳食中 Zn 和 Cu 的需要量分别为每人  $18 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$  和  $0.99 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$ 。以成人每天摄入 0.355 kg 蔬菜汁, 居民从基地蔬菜摄入的 Zn 和 Cu 约占需求的 4.6% 和 13.1%。说明基地蔬菜主要表现为缺 Zn 和 Cu, 而不是 Zn 和 Cu 的污染<sup>[21-22]</sup>。

## 2.5 蔬菜摄入健康风险评价

根据美国 EPA 暴露因子手册、Superfund 风险评价导则内容<sup>[23-25]</sup>, 并结合现有研究资料, 确定了本次健康风险评价暴露参数, 如表 9 所示<sup>[26-30]</sup>。

表 9 健康风险评价暴露参数

Table 9 Parameters of assessment model

参数 Parameters	IR/ ( $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ )	EF/ ( $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ )	ED/ (a)	BW/kg	AT/d
	0.355	350	30	58.5	365×30

本次研究运用计算健康风险指数(HQ)的方法, 对成年居民食用该基地生产的蔬菜进行了健康风险评价, 结果如表 10 所示。对于成人而言, 该基地蔬菜中 Cd 元素的每日摄入量均低于参考剂量(表 4), 即健康风险指数  $\text{HQ}_{\text{Cd}}$  均小于 1, 表明食用该基地蔬菜不会因为 Cd 而对成人造成健康危害。但是, 该基地的圆白菜 1 号(雅实绿)、圆白菜 2 号(珍美)和菜花 1 号(本地)中 Hg 的健康风险指数均大于 1, 说明食用该类蔬菜会对成人造成健康风险。该评价结果与前文蔬菜中 Hg 污染评价结果一致。

另外, 个体总风险 THQ 也是对蔬菜摄入健康风险的一种评价手段, 通过对蔬菜内污染元素的 HQ 求和, 同样可以判断出食用某种蔬菜有无健康风险, 并且也是对单污染元素评价结果进行补充。如表 10 所示, 圆白菜 1 号(雅实绿)、圆白菜 2 号(珍美)和菜花 1 号(本地)的个体总风险值与单污染元素结果一致, 而香菜和菜花 2 号(白雪)的个体总风险值虽然小于 1, 但是均大于 0.95, 表明食用该基地内香菜和菜花 2 号(白雪)同样存在较高的健康风险。可见, 评价基地内某种蔬菜的健康风险并不能仅靠单污染元素的 HQ 值, 还要参考个体总风险 THQ 值。

## 2.6 绿色富硒蔬菜筛选

通过对上述土壤及蔬菜中硒和重金属元素分析, 并结合蔬菜摄入健康风险评价结果, 可以得出该基地为富硒蔬菜基地, 生产的蔬菜大多数也满足富硒蔬菜的要求, 但是由于人为活动等因素的影响, 造成该基地土壤遭受 Cd、Hg、Zn 和 Cu 等元素的污染, 进而造成 Cd 和 Hg 元素在富硒蔬菜中富集, 蔬菜摄入健康风险评价显示食用该类富硒蔬菜会对人体健康带来危害。

本研究希望在综合各类评价的基础上, 筛选出绿色富硒蔬菜类型, 即既有较强的富硒能力同时又是重金属低积累型蔬菜。为此, 本文引入富集系数这一指标, 即将蔬菜中元素含量与土壤中同种元素含量进行比值, 富集系数可以反映在相同土壤条件下, 植物对元素的富集能力。

表 10 蔬菜摄入健康风险指数

Table 10 Intake and health risk of Cd and Hg by consumed vegetables

蔬菜品种 Vegetable type	HQ <sub>Hg</sub>	HQ <sub>Cd</sub>	THQ	蔬菜品种 Vegetable type	HQ <sub>Hg</sub>	HQ <sub>Cd</sub>	THQ
青萝卜 1 号	0.2083	0.0639	0.2722	菜花 1 号	1.1026	0.0276	1.1302
青萝卜 2 号	0.2275	0.0737	0.3013	菜花 2 号	0.9487	0.0250	0.9737
青萝卜 3 号	0.1808	0.0874	0.2682	油菜 1 号	0.1836	0.1539	0.3375
青萝卜 4 号	0.0514	0.1178	0.1693	油菜 2 号	0.3016	0.1662	0.4678
大白菜 1 号	0.2814	0.0881	0.3695	小白菜 1 号	0.1692	0.3566	0.5257
大白菜 2 号	0.0979	0.1056	0.2035	小白菜 2 号	0.3386	0.2607	0.5992
胡萝卜	0.1006	0.1334	0.2340	苜蓿	0.2832	0.0763	0.3596
早萝卜 1 号	0.3640	0.0921	0.4561	芹菜	0.2936	0.1489	0.4425
早萝卜 2 号	0.3376	0.0588	0.3964	莴笋	0.4478	0.1077	0.5555
圆白菜 1 号	1.2782	0.0450	1.3232	香菜	0.5010	0.4536	0.9546
圆白菜 2 号	1.0276	0.0298	1.0575				

5 种元素在 20 种蔬菜中的富集系数如表 11 所示,Se 在不同蔬菜中的富集系数不同,但同类别蔬菜如青萝卜 1 号(本地)、2 号(天津青萝卜)和 3 号(津卫一号)之间的富硒能力无显著差别.基本上 Se 在青萝卜 1 号(本地)、2 号(天津青萝卜)和 3 号(津卫一号)、菜花 2 号(白雪)、芹菜和圆白菜 2 号(珍美)中的富集系数较大,在油菜中的富集系数最小,青萝卜富硒能力几乎是油菜的 20 倍,且青萝卜与油菜的富 Se 能力存在显著差别.重金属 Hg 在菜花和圆白菜中富集系数较大,其中,菜花 1 号(本地)和 2 号(白雪)对 Hg 的积累能力存在差异,而圆白菜 1 号(雅实绿)和 2 号(珍美)则无明显差异.重金属 Cd 则在小白菜 1 号(绿健 60)、小白菜 2 号(佳美)、油菜 1 号(金品一夏)、油菜 2 号(改良金品雨季)和芹菜中的富集系数较大,且此 5 种蔬菜对 Cd 的富集能力无显著差异.Zn 和 Cu 在不同种类蔬菜中的富集系数值相近,但不同种类蔬菜对这两种元素的富集能力存在显著差别.可见,蔬菜对 Se 与重金属的富集除了与蔬菜本身的生理特性和遗传因素有关外,还与各元素在土壤-蔬菜系统中的迁移转化特点有关,因此不同种类蔬菜对同种元素的富集状况不同,同种蔬菜对不同元素的富集状况也会有所差异.

表 11 不同种类蔬菜富集系数

Table 11 Bioaccumulation factors of different vegetables

蔬菜种类 Vegetable type	Se	Hg	Cd	Cu	Zn
青萝卜 1 号	0.130±0.070e	0.003±0.002abc	0.009±0.002cd	0.002±0.001bcde	0.007±0.002cde
青萝卜 2 号	0.117±0.075de	0.003±0.003abc	0.010±0.002cd	0.003±0.000de	0.007±0.001cdefh
青萝卜 3 号	0.100±0.062cde	0.003±0.002abc	0.011±0.003de	0.003±0.001g	0.008±0.001fg
菜花 1 号	0.044±0.002abc	0.013±0.000e	0.004±0.001a	0.003±0.000cde	0.011±0.000hi
菜花 2 号	0.094±0.003bcde	0.020±0.002g	0.004±0.001a	0.003±0.000c	0.009±0.000g
圆白菜 1 号	0.026±0.003a	0.017±0.000f	0.005±0.000ab	0.001±0.000a	0.005±0.000ab
圆白菜 2 号	0.052±0.002abc	0.015±0.001ef	0.004±0.000a	0.001±0.000b	0.004±0.000a
大白菜 1 号	0.033±0.027abc	0.004±0.003abc	0.010±0.000cd	0.003±0.001f	0.007±0.000cd
大白菜 2 号	0.039±0.033abc	0.002±0.000ab	0.014±0.001e	0.003±0.000cde	0.008±0.001efg
早萝卜 1 号	0.019±0.002a	0.004±0.000abc	0.012±0.001de	0.004±0.000bc	0.009±0.000cd
早萝卜 2 号	0.015±0.001a	0.005±0.002cd	0.008±0.001bc	0.002±0.000bed	0.007±0.000cdefh
小白菜 1 号	0.025±0.001a	0.003±0.000abc	0.034±0.001hg	0.003±0.000ef	0.009±0.000a
小白菜 2 号	0.007±0.001a	0.005±0.001cd	0.020±0.001fg	0.002±0.000bed	0.005±0.000ab
油菜 1 号	0.006±0.001a	0.003±0.000abc	0.019±0.003fg	0.002±0.000bed	0.008±0.000defgh
油菜 2 号	0.006±0.001a	0.004±0.000bcd	0.022±0.001g	0.003±0.000de	0.009±0.000gh
苜蓿	0.041±0.023ab	0.003±0.000abc	0.010±0.002cd	0.002±0.000a	0.008±0.000defg
芹菜	0.064±0.001abcd	0.005±0.001cd	0.020±0.001fg	0.002±0.000g	0.006±0.000bch
胡萝卜	0.029±0.020ab	0.001±0.000a	0.019±0.002fg	0.005±0.002bed	0.008±0.001defg
莴笋	0.027±0.002ab	0.005±0.000cd	0.017±0.003f	0.006±0.000ef	0.005±0.000ab
香菜	0.010±0.001a	0.007±0.000d	0.007±0.000i	0.007±0.000h	0.007±0.000j

注:同列中不同小写字母表示同一元素在不同种类蔬菜中富集能力差异显著( $P<0.05$ ).

综合上述分析结果,本研究认为青萝卜1号(本地)、青萝卜2号(天津青萝卜)和青萝卜3号(津卫一号)为该基地产出的优质蔬菜类型,可以同时满足富硒低重金属的要求,因此建议当地农户多种植该种类型的蔬菜。

### 3 结论 (Conclusion)

(1)该蔬菜基地土壤样品中 Se 含量范围为 0.71—1.23  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值为 0.96  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,所有样品均达到富硒土壤标准,此基地可称之为富硒蔬菜基地。

(2)该富 Se 蔬菜基地土壤中 Cd、Hg、Zn、Cu 的平均含量分别为 1.38、1.25、303.69、121.30  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,4 种重金属超过土壤环境质量二级标准的比例分别为 100%、87.9%、72.7%和 84.8%。根据污染指数判定标准,Hg、Zn、Cu 为轻度污染,Cd 达到中度污染程度。

(3)本基地蔬菜的富硒率高达 90.0%,蔬菜中青萝卜1号(本地)、青萝卜2号(天津青萝卜)和青萝卜3号(津卫一号)的硒含量较高,含量分别为 0.100、0.091、0.078  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,硒含量较低的蔬菜为油菜1号(金品一夏)、油菜2号(改良金品雨季)和小白菜2号(佳美),含量分别为 0.007、0.007、0.009  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(4)所有蔬菜样品的 Cd 含量均未超过食品中污染物含量限值,而圆白菜1号(雅实绿)、圆白菜2号(珍美)、菜花1号(本地)和菜花2号(白雪)中 Hg 的平均含量分别为 0.022、0.018、0.019、0.016  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,此4种蔬菜 Hg 的含量均超过食品中污染物含量限值。

(5)蔬菜摄入健康风险指数和个体总风险指标显示,食用该基地产出的圆白菜、菜花和香菜存在较高的健康风险。

(6)综合各类评价结果,该基地生产的青萝卜1号(本地)、青萝卜2号(天津青萝卜)和青萝卜3号(津卫一号)均为绿色富硒蔬菜,建议当地农户多种植该种类型的蔬菜。

### 参考文献 (References)

- [1] 陈娟,宋帅,史亚娟,等.富硒农业生产基地土壤硒资源空间分布特征及评价[J].环境化学,2015,34(12):2185-2190.  
CHEN J, SONG S, SHI Y J, et al. Spatial distribution and assessment of selenium in soils of a Se-enrich agricultural production base[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(12): 2185-2190(in Chinese).
- [2] 李福燕,漆智平,李许明.海口市农田土壤硒含量特征及农作物硒特征[J].土壤通报,2016,47(3):630-635.  
LI F Y, QI Z P, LI X M. Survey and research of selenium contents in farmland soil and crops of Haikou City [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(3): 630-635(in Chinese).
- [3] 王亚国,张百忍,李瑜,等.天然高硒种植区不同农作物对硒的富集特征研究[J].陕西农业科学,2014,60(3):6-9.  
WANG Y G, ZHANG B R, LI Y, et al. Enrichment characteristics analysis of different vegetables in natural Se-enriched area[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2014, 60(3): 6-9(in Chinese).
- [4] 刘超,王晋民,魏廷珍,等.青海乐都富硒区6种主要蔬菜富硒能力研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(5):157-161.  
LIU C, WANG J M, WEI T Z, et al. Selenium enrichment capacities of six major vegetables in selenium-rich region of Ledou, Qinghai Province[J]. Journal of Northwest A&F University, 2014, 42(5): 157-161(in Chinese).
- [5] 宋明义,岑静,黄春雷,等.浙江嘉兴富硒土壤类型与作物品种筛选[J].安徽农业科学,2012,40(31):15199-15201.  
SONG M Y, CEN J, HUANG C L, et al. Study on selenium-rich soil types and crop variety screening in Jiaxing, Zhejiang Province[J]. Journal of Anhui Agri. Sci, 2012, 40(31): 15199-15201(in Chinese).
- [6] 张开军,魏迎春,徐友宁.小秦岭某金矿区土壤-农作物重金属元素富集规律[J].地质通报,2015,34(11):2018-2023.  
ZHANG K J, WEI Y C, XU Y N. The discussion on heavy metal accumulation regularity in the soil and crop of the Xiaoqinling gold mining area. Geological Bulletin of China, 2015, 34(11): 2018-2023(in Chinese).
- [7] EPA. Method 3052 Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices [S]. Washington DC: Environmental Protection Agency.1996.
- [8] 谭见安.环境硒与健康[M].北京:人民卫生出版社,1989:219-224.  
TAN J A. Selenium and health in the environment[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1989: 219-224(in Chinese).
- [9] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990:28-87.  
Environmental Monitoring of China. The background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 28-87(in Chinese).
- [10] 朱建明,郑宝山,毛大均,等.鱼塘坝微地域硒分布的景观地球化学研究[J].地球化学,2000,29(1):43-49.  
ZHU J M, ZHENG B S, MAO D J, et al. Landscape geochemistry of distribution of selenium in Yutangba mini-landscape, Enshi, Hubei Province, China[J]. Geochemica, 2000, 29(1): 43-49(in Chinese).

- [11] 曾希柏, 李连芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2507-2517.  
ZENG X B, LI L F, MEI X R. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(11): 2507-2517(in Chinese).
- [12] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392-397.  
LIU R L, LI S T, WANG X B, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(2): 392-397(in Chinese).
- [13] 孙清斌, 尹春芹, 邓金锋, 等. 大冶矿区土壤-蔬菜重金属污染特征及健康风险评估[J]. 环境化学, 2013, 32(4): 671-677.  
SUN Q B, YIN C Q, DENG J F, et al. Characteristics of soil-vegetable pollution of heavy metals and health risk assessment in Daye mining area[J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(4): 671-677(in Chinese).
- [14] 程珂, 杨新萍, 赵方杰. 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.  
CHENG K, YANG X P, ZHAO F J. Effects of atmospheric and dust deposition on content of heavy metals in vegetables in suburbs of Tianjin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(10): 1837-1845(in Chinese).
- [15] 余光辉, 温琰茂, 张磊, 等. 广州市蔬菜中硒含量特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 1045-1048.  
YU G H, WEN Y M, ZHANG L, et al. Analysis of selenium contents in vegetable in Guangzhou City[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(3): 1045-1048(in Chinese).
- [16] 邹素敏, 杜瑞英, 文典, 等. 不同品种蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4): 714-720.  
ZOU S M, DU R Y, WEN D, et al. Enrichment characteristics analysis and assessment on heavy metal contamination of different vegetables[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(4): 714-720(in Chinese).
- [17] 全双梅, 李晓燕, 邵树勋, 等. 开阳富硒农作物筛选研究[J]. 地球与环境, 2009, 37(3): 270-274.  
TONG S M, LI X Y, SHAO S X, et al. Research on how to select of Se-enriched crops in Kaiyang, Guizhou Province[J]. Earth and Environment, 2009, 37(3): 270-274(in Chinese).
- [18] 铁梅, 刘阳, 李华为, 等. 硒镉处理对萝卜硒镉吸收的影响及其交互作用[J]. 生态学报, 2014, 33(6): 1587-1593.  
TIE M, LIU Y, LI H W, et al. Uptake of Se and Cd in radish and their effects on growth[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6): 1587-1593(in Chinese).
- [19] 梁程, 林匡飞, 张雯, 等. 不同浓度硫处理下硒镉交互胁迫对水稻幼苗的生理特性影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 857-866.  
LIANG C, LIN K F, ZHANG W, et al. Effects of sulfur and selenium treatment on plant growth and some physiological characteristics of rice under cadmium stress[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(5): 857-866(in Chinese).
- [20] 郭锋, 樊文华, 冯两蕊, 等. 硒对镉胁迫下菠菜生理特性、元素含量及镉吸收转运的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 524-531.  
GUO F, FAN W H, FENG L R, et al. Effects of selenium on the physiological characteristics, element contents, uptake and transportation of Cd in spinach under Cd stress[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(2): 524-531(in Chinese).
- [21] 黄泽春, 宋波, 陈同斌, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜的锌含量及其健康风险评估[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 439-448.  
HUANG Z C, SONG B, CHEN T B, et al. A survey of zinc concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risk[J]. Geographical Research, 2006, 25(3): 439-448(in Chinese).
- [22] 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.  
ZHENG Y M, SONG B, CHENG T B, et al. A survey of copper concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risk[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(5): 1093-1101(in Chinese).
- [23] US EPA. Exposure factors handbook[R]. EPA/600/8-89/043. Washington, DC: Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 1989.
- [24] US EPA. Exposure factors handbook[R]. EPA/600/P-95/002F. Washington, DC: Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 1997.
- [25] US EPA. Exposure factors handbook[R]. EPA/600/R-09/052F. Washington, DC: Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2011.
- [26] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评估中我国居民暴露参数探讨[J]. 环境科学研究, 2009, 22(10): 1164-1170.  
WANG Z S, DUAN X L, LIU P, et al. Human exposure factors of chinese people in environmental health risk assessment[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(10): 1164-1170(in Chinese).
- [27] 刘发欣. 区域土壤及农产品中重金属的人体健康风险评估[D]. 雅安: 四川农业大学, 2007.  
LIU F X. The regional health risk assessment of heavy metals in the agricultural products and Soils[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2007(in Chinese).
- [28] 王兰化, 李明明, 张莺, 等. 华北地区某蔬菜基地土壤重金属污染特征及健康风险评估[J]. 地球学报, 2014, 35(2): 191-196.  
WANG L H, LI M M, ZHANG Y, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil of a vegetable base in north China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2014, 35(2): 191-196(in Chinese).
- [29] 麻冰涓, 王海邻, 李小超, 等. 豫北典型农田作物中重金属污染状况及健康风险评估[J]. 生态环境学报, 2014, 23(8): 1351-1358.  
MA B J, WANG H L, LI X C, et al. Pollution of heavy metals in typical crops of northern Henan Province and health risk assessment[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(8): 1351-1358(in Chinese).
- [30] 谭科艳, 陈燕芳, 汤奇峰, 等. 南方某工业区周边土壤和蔬菜中铅的健康风险评估[J]. 地球学报, 2012, 33(5): 801-806.  
TAN K Y, CHEN Y F, TANG Q F, et al. The evaluation of health risks in soils and vegetables around an industrial area in south China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2012, 33(5): 801-806(in Chinese).