



# 农业资源与环境学报

中文核心期刊  
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

## 贵州铜仁典型锰矿区土壤及蔬菜重金属污染特征及健康风险评价

蒋宗宏, 陆凤, 马先杰, 陈兰兰, 陈淼

引用本文:

蒋宗宏, 陆凤, 马先杰, 等. 贵州铜仁典型锰矿区土壤及蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 293–300.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0066>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 河北省蔬菜大棚土壤及蔬菜中重金属累积分析

孙硕, 李菊梅, 马义兵, 赵会薇

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 236–244 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0163>

### 平度市金矿区农田土壤-玉米系统重金属污染风险评价

陈璐, 王凯荣, 王芳丽, 宋宁宁, 刘君

农业资源与环境学报. 2018, 35(2): 161–166 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0258>

### 珠江河网淡水鱼、虾和河蚬重金属污染特性及安全性评价

谢文平, 马丽莎, 郑光明, 刘书贵

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 839–846 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0187>

### 新疆奴拉赛铜矿周边土壤理化特征和重金属污染生态风险评价

迪娜·吐尔生江, 李典鹏, 胡毅, 杨磊, 徐晓龙, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 17–23 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0159>

### 云南会泽铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征及健康风险评价

刘小燕, 陈棉彪, 李良忠, 胡国成, 黄建洪, 刘珊, 张丽娟, 于云江

农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 221–229 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0306>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蒋宗宏, 陆 风, 马先杰, 等. 贵州铜仁典型锰矿区土壤及蔬菜重金属污染特征及健康风险评估[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 293–300.  
JIANG Zong-hong, LU Feng, MA Xian-jie, et al. Characteristics and health risk assessments of heavy metals in soils and vegetables in manganese mining areas in Tongren County, Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 293–300.

# 贵州铜仁典型锰矿区土壤及蔬菜重金属污染特征及健康风险评估

蒋宗宏<sup>1</sup>, 陆 风<sup>2</sup>, 马先杰<sup>1</sup>, 陈兰兰<sup>2</sup>, 陈 淼<sup>1\*</sup>

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵阳建筑勘察设计院有限公司, 贵阳 550002)

**摘 要:** 为了解锰矿区土壤和蔬菜重金属的污染特征, 评价其健康风险, 以贵州铜仁杨立掌、白岩溪、盆架山与鹏程典型锰矿区土壤和蔬菜为研究对象, 按离矿区不同距离采集 2.0 km 范围内的土壤和蔬菜, 分析测试土壤、蔬菜(辣椒、白菜、南瓜、茄子、豇豆)样品中重金属组成及含量, 采用单因子污染指数法和综合污染指数法对土壤重金属污染进行评价, 以健康风险评估模型对人群长期食用矿区附近蔬菜可能产生的健康风险进行评价。结果显示, 矿区土壤 Mn、Hg 平均含量分别为贵州省土壤背景值的 2.56、1.55 倍, Cd 平均含量为《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中限值的 2.20 倍。综合污染指数分析表明: 盆架山矿区为重度污染, 杨立掌矿区为中度污染, 白岩溪与鹏程矿区为轻度污染。蔬菜重金属健康风险评估结果表明: 致癌风险( $R_T$ )平均值为  $4.31 \times 10^{-6} a^{-1}$ , 尚可接受; 非致癌风险( $HI_T$ )为  $4.21 \times 10^{-9} a^{-1}$ , 人体健康风险甚微。研究表明, 锰矿区土壤已受到不同程度的重金属污染, 蔬菜的食用风险尚在可接受范围内。

**关键词:** 重金属; 土壤; 蔬菜; 健康风险评估

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)02-0293-08

doi: 10.13254/j.jare.2019.0066

## Characteristics and health risk assessments of heavy metals in soils and vegetables in manganese mining areas in Tongren County, Guizhou Province, China

JIANG Zong-hong<sup>1</sup>, LU Feng<sup>2</sup>, MA Xian-jie<sup>1</sup>, CHEN Lan-lan<sup>2</sup>, CHEN Miao<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guiyang Architectural Design & Surveying Prospecting Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

**Abstract:** To explore the characteristics of manganese pollution in manganese mining areas, and evaluate the health risk of heavy metal pollution in vegetables, samples of soil and vegetables were collected in Yanglizhang, Baiyanxi, Penjiashan, and Pengcheng. These are manganese mining areas in Tongren County, Guizhou Province, China. Samples were collected from within a 2.0 km range, at different distances from the mining area. The composition and content of heavy metals in the soil and vegetables samples (including capsicums, cabbages, pumpkins, eggplants, and cowpeas) were analyzed and measured. Soil that was contaminated with heavy metals was evaluated using both the single pollution index method and the comprehensive pollution index method. The health risk assessment model was used to evaluate the chronic health risk caused by eating vegetables that were grown near mining areas. The results showed that the average content of Mn and Hg were 2.56 and 1.55 times, respectively, that of the soil background values in Guizhou, and the average Cd content was 2.20 times

收稿日期: 2019-02-04 录用日期: 2019-04-08

作者简介: 蒋宗宏(1996—), 男, 重庆垫江人, 硕士研究生, 从事矿区重金属污染研究。E-mail: 1503317526@qq.com

\*通信作者: 陈 淼 E-mail: chenmiao7879@126.com

基金项目: 贵州省环境保护厅环境科技项目(黔环科[2016]1号); 贵州省科技计划项目(黔科合LH字[2017]7291号)

**Project supported:** The Environmental Science & Technology Project of Guizhou Environmental Protection Agency (Guizhou E&S 2016-1); Guizhou Province Science and Technology Plan (Guizhou S&T Contract LH 2017-7291)

higher than that of the value specified in the *Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land* (GB 15618—2018). An analysis of the comprehensive pollution index showed that the Penjiashan mining area was heavily polluted, the Yanglizhang mining area was moderately polluted, and the Baiyanxi and Pengcheng mining areas were slightly polluted. The results of health risk assessment of heavy metals in the vegetable samples showed that the average value of  $R_r$  (carcinogenic risk) was  $4.31 \times 10^{-6} a^{-1}$ , which was acceptable. The  $HIr$  (non-carcinogenic risk) value was  $4.21 \times 10^{-9} a^{-1}$ , indicating that the risk of the occurrence of non-carcinogenic heavy metals in vegetables to human health was negligible. In other words, there have been varying degrees of heavy metal contamination in manganese mining areas, but the health risks by eating vegetables grown in these regions is still within an acceptable range.

**Keywords:** heavy metal; soil; vegetables; health risk evaluation

锰及其化合物是冶金、化工、建材等行业的关键材料,其中约90%~95%用于钢铁工业领域,因而使得我国对锰的需求越来越大<sup>[1]</sup>。但锰矿的开采、选矿及尾矿、废渣的任意堆放等都可造成大气、水体和土壤环境的污染,并通过土壤-植物-人的途径进入人体,长时接触会对人体健康造成严重的危害<sup>[2-5]</sup>。到目前为止,鲜见对铜仁锰矿区土壤及蔬菜重金属污染状况的研究报道,因此,开展铜仁锰矿区周边土壤、蔬菜中重金属污染现状研究和健康风险评估显得极其重要。陈春强等<sup>[6]</sup>对广西荔浦、平乐、来宾3个锰矿恢复区农作物中重金属含量进行健康风险评价,研究结果表明3个锰矿恢复区居民通过食用当地农作物摄入的Pb、Cd对其健康存在较高潜在风险。祝滔等<sup>[7]</sup>采用单因子污染指数法对重庆秀山锰矿区蔬菜的Mn污染水平进行评价,发现辣椒、萝卜的食用部分受Mn污染极严重,长期食用这些蔬菜会对人体健康产生很大风险。杨胜香等<sup>[8]</sup>对湘西花垣锰矿的部分蔬菜及其种植土壤进行了调查和重金属含量分析,通过污染指数法和经蔬菜途径重金属暴露接触对人体的健康风险进行了系统评价,结果表明矿区土壤Pb、Zn、Cd含量均超过GB 15618—1995《土壤环境质量标准》二级标准(pH<6.5)的污染警戒值,蔬菜受到了Pb、Cd的严重污染,Zn为轻-中度污染。唐文杰等<sup>[9]</sup>对广西3个锰矿恢复区的土壤和农作物进行调查和重金属含量分析,并采用污染指数法和靶标危害系数方法对人体的健康风险进行评价,结果表明矿区土壤Cd含量远超过GB 15618—1995《土壤环境质量标准》二级标准限值,居民通过食用当地农作物摄入的Cd对其健康存在较高潜在风险。

贵州铜仁锰矿资源赋存于南华系大塘坡组地层中,资源储量较丰富<sup>[10]</sup>。铜仁锰矿资源分布在松桃、万山、碧江、印江等,以分布在松桃为主;而松桃是我国“锰三角”(即湖南花垣、贵州松桃及重庆秀山)的重要组成部分。本研究以铜仁杨立掌、白岩溪、盆架山与鹏程典型锰矿区土壤和蔬菜为研究对象,分析测试

土壤、蔬菜样品中重金属组成、含量及蔬菜摄入风险,研究结果对降低矿区居民健康风险及蔬菜增产增值具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

铜仁位于贵州省东北部,东经 $107^{\circ}45'00''$ ~ $109^{\circ}28'06''$ ,北纬 $27^{\circ}07'40''$ ~ $29^{\circ}05'20''$ 。境内属中亚热带温暖湿润季风气候,平均气温 $17^{\circ}C$ ,年均降雨量1300~1400 mm。铜仁锰矿资源储量丰富,位居全国锰矿资源储量的前列,主要分布在松桃、碧江、万山等县(区)境内,锰矿资源是铜仁市经济社会发展的支柱产业。土壤及蔬菜采样布点如图1所示。

### 1.2 样品采集及分析测试

2017年8月对杨立掌、白岩溪、盆架山及鹏程4个锰矿区土壤及蔬菜进行采样,以矿区尾矿渣堆积点为中心,沿水流方向分别距0.3、0.5、0.8、1.0、1.5 km的位置对土壤及蔬菜进行样品的采集,每个采样点设置编号并将各样本与编号对应,土壤样品的采集采用对角线法则,采集0~20 cm的表层土壤,充分混合后,用四分法取舍,保留约0.5 kg,共采集土壤样本20个。将3~5株同种蔬菜混合作为一个样品,共采集蔬菜样品20个(辣椒、白菜、南瓜、茄子、豇豆5类)。将采集的土壤及蔬菜样品放入聚乙烯自封袋中,立即带回实验室处理分析。

采集的土壤样品置于干燥通风处,自然风干、破碎、用100目尼龙筛筛分后保存于自封袋中备用。蔬菜样品先用自来水冲洗干净,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,装入离心管保存于冰箱待测。将土壤和蔬菜样品送至贵州省地质矿产中心实验室分析重金属含量,土壤中As、Hg的测定采用微波消解/原子荧光法(HJ 680—2013)测定,Cd、Cr、Cu、Pb、Zn采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(HJ 350—2007)测定。Fe、Mn

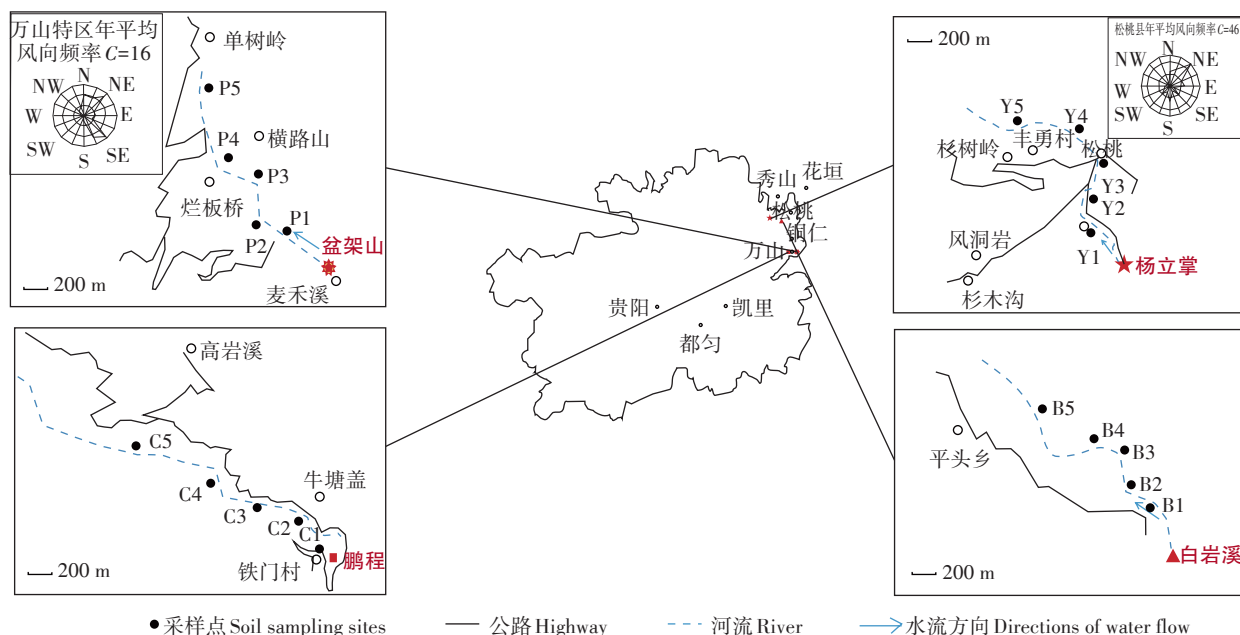


图1 采样点分布示意

Figure 1 Distribution of sampling sites

测定参照地球化学普查规范(1:50 000)(DZ/T 0011—2015)。蔬菜中As、Hg、Cd、Cr、Pb、Zn、Cu的测定采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法,Fe、Mn采用食品中铁、锰的测定方法(GB/T 5009.90—2003)。

### 1.3 重金属污染评价方法

以贵州省土壤背景值<sup>[11]</sup>作为参比,采用单因子污染指数与综合污染指数法<sup>[12]</sup>对矿区土壤重金属污染水平进行评价,蔬菜健康风险评价<sup>[13-15]</sup>分为致癌物风险评价和非致癌物风险评价,评估模型参数参照《中国人群暴露参数手册(成人卷)》<sup>[16]</sup>。

#### (1) 单因子污染指数法

单因子污染指数计算公式:

$$P_i = C_i / S_i$$

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 $i$ 的实际测量值; $S_i$ 为土壤中污染物 $i$ 的评价标准值。

#### (2) 综合污染指数法

综合污染指数计算公式:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2}{2}}$$

式中: $P_{\text{综}}$ 是土壤中污染物的综合污染指数; $P_{\text{ave}}$ 为土壤污染中单因子污染指数的平均值; $P_{\text{max}}$ 为土壤污染中单因子污染指数的最大值。

#### (3) 蔬菜健康风险评价计算公式:

$$HI_T = \sum_{j=1}^n HI_j = \sum_{j=1}^n D_j \times 10^{-6} / (RfD_j \times L)$$

式中: $HI_T$ 为总非致癌风险, $a^{-1}$ ;  $HI_j$ 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, $a^{-1}$ ;  $D_j$ 为非致癌物质 $j$ 通过食入途径的单位体质量日均暴露剂量, $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ ;  $10^{-6}$ 为USEPA(美国环保署)标准调整值; $RfD_j$ 为非致癌污染物 $j$ 的食入途径参考剂量, $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ ;  $L$ 为人的平均寿命, $a$ 。

$$R_T = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n [1 - \exp(-D_i \times q_i)] / L$$

式中: $R_T$ 为总致癌风险, $a^{-1}$ ;  $R_i$ 为化学致癌物质 $i$ 通过食入途径的平均个人致癌年风险, $a^{-1}$ ;  $D_i$ 为化学致癌物质 $i$ 通过食入途径的单位体质量日均暴露剂量, $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ ;  $q_i$ 为化学致癌物质 $i$ 经食入途径的致癌强度系数, $kg \cdot mg^{-1} \cdot d^{-1}$ 。

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

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

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属含量及污染评价

铜仁典型锰矿区(杨立掌、白岩溪、盆架山及鹏程)土壤重金属Mn、Fe、Pb、Hg、Cd、As、Cr、Zn、Cu的含量见表1。

由表1可知,土壤样品中Mn、Fe、Pb、Cd、Cr、As、

Hg、Zn、Cu 含量范围分别为 210~7200、13 500~38 100、22.80~44.50、0.23~1.32、18.70~73.40、0.43~13.90、0.08~0.30、57.30~157.00、11.10~30.50  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 呈现出  $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$  的趋势。其中 Mn、Hg 和 Cd 的平均含量超过贵州省土壤背景值, 分别是背景值的 2.56、1.55 倍和 1.02 倍; Cd 超过农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618—2018), 是标准限值的 2.20 倍。唐文杰等<sup>[9]</sup>对广西 3 个锰矿区土壤中的重金属组成及含量进行了研究, 结果也表明锰矿区土壤 Cd 含量远超土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995)。赖燕平<sup>[17]</sup>对广西锰矿区土壤调查研究后发现锰矿区土壤 Mn 和 Cd 有效态的绝对含量分别超过了

广西土壤背景值和土壤环境质量二级标准限值。

土壤中 Mn 最高含量出现在距离盆架山矿渣堆点 0.3 km, 该采样点地势低洼, 并处于主导风向(东南风)的下风向, 尾矿渣堆积产生的无组织粉尘的扩散、沉降及长期受河流径流的影响, 致使土壤 Mn 含量增加。Hg 的最高含量出现在距离鹏程矿渣堆点 1.5 km, 土壤类型为黄壤, 与鹏程矿区其他土壤样品类型(棕壤)不同。有研究表明, Hg 是土壤中受人类活动影响最大的元素之一, 土壤 Hg 含量分布与土地利用类型可以反映人类活动对土壤环境的影响程度<sup>[18]</sup>。

采用单因子污染指数法和综合污染指数法对矿

表 1 土壤重金属含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Table 1 The content of heavy metals in soil( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

| 矿区<br>Mining areas                                                    | 采样点<br>Sampling sites | 位置<br>Position/km | pH   | Mn   | Fe     | Pb    | Cd   | Cr     | As    | Hg   | Zn     | Cu    |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|------|------|--------|-------|------|--------|-------|------|--------|-------|
| 杨立掌                                                                   | Y1                    | 0.3               | 5.60 | 1100 | 30 200 | 30.70 | 0.49 | 48.00  | 6.04  | 0.13 | 109.00 | 21.90 |
|                                                                       | Y2                    | 0.5               | 5.32 | 1100 | 15 100 | 31.00 | 0.39 | 40.10  | 8.38  | 0.21 | 57.30  | 13.50 |
|                                                                       | Y3                    | 0.8               | 7.28 | 4700 | 26 100 | 44.50 | 1.27 | 60.40  | 5.62  | 0.15 | 137.00 | 24.70 |
|                                                                       | Y4                    | 1.0               | 6.32 | 1900 | 29 500 | 36.90 | 0.95 | 64.70  | 7.41  | 0.15 | 111.00 | 24.10 |
|                                                                       | Y5                    | 1.5               | 7.06 | 2900 | 36 600 | 34.80 | 0.66 | 73.40  | 5.88  | 0.11 | 116.00 | 24.70 |
|                                                                       | 均值                    |                   | 6.32 | 2340 | 27 500 | 35.57 | 0.75 | 57.35  | 6.66  | 0.15 | 105.97 | 21.77 |
| 白岩溪                                                                   | B1                    | 0.3               | 6.39 | 490  | 13 500 | 23.30 | 0.62 | 18.70  | 0.64  | 0.14 | 70.30  | 12.90 |
|                                                                       | B2                    | 0.5               | 6.44 | 420  | 17 900 | 28.70 | 0.67 | 43.80  | 2.52  | 0.15 | 79.10  | 14.30 |
|                                                                       | B3                    | 0.8               | 6.00 | 210  | 22 000 | 34.80 | 0.62 | 56.90  | 7.10  | 0.16 | 84.70  | 27.70 |
|                                                                       | B4                    | 1.0               | 6.84 | 2900 | 22 700 | 31.40 | 0.90 | 43.60  | 5.39  | 0.17 | 113.00 | 28.70 |
|                                                                       | B5                    | 1.5               | 6.04 | 280  | 25 500 | 23.90 | 0.41 | 49.40  | 4.65  | 0.12 | 85.70  | 21.30 |
|                                                                       | 均值                    |                   | 6.34 | 860  | 20 320 | 28.42 | 0.64 | 42.48  | 4.06  | 0.15 | 86.56  | 20.98 |
| 盆架山                                                                   | P1                    | 0.3               | 7.75 | 7200 | 23 200 | 24.80 | 0.61 | 25.30  | 0.43  | 0.08 | 157.00 | 17.20 |
|                                                                       | P2                    | 0.5               | 7.21 | 4300 | 23 800 | 29.50 | 0.63 | 31.10  | 7.88  | 0.21 | 86.90  | 19.60 |
|                                                                       | P3                    | 0.8               | 6.76 | 3000 | 23 400 | 30.40 | 0.78 | 29.90  | 5.57  | 0.18 | 85.60  | 18.30 |
|                                                                       | P4                    | 1.0               | 6.22 | 990  | 27 100 | 29.00 | 0.51 | 30.70  | 4.89  | 0.14 | 85.70  | 13.30 |
|                                                                       | P5                    | 1.5               | 6.88 | 1600 | 26 100 | 22.80 | 0.70 | 32.20  | 4.98  | 0.11 | 78.50  | 15.40 |
|                                                                       | 均值                    |                   | 6.96 | 3418 | 24 720 | 27.30 | 0.65 | 29.84  | 4.75  | 0.14 | 98.74  | 16.76 |
| 鹏程                                                                    | C1                    | 0.3               | 5.47 | 1000 | 30 200 | 28.00 | 0.35 | 57.80  | 5.26  | 0.17 | 88.90  | 24.70 |
|                                                                       | C2                    | 0.5               | 7.30 | 1600 | 30 800 | 24.70 | 0.52 | 46.30  | 8.52  | 0.25 | 123.00 | 30.50 |
|                                                                       | C3                    | 0.8               | 6.42 | 2800 | 37 300 | 30.70 | 1.32 | 38.80  | 13.90 | 0.17 | 110.00 | 26.60 |
|                                                                       | C4                    | 1.0               | 4.96 | 1000 | 38 100 | 32.20 | 0.44 | 45.50  | 7.68  | 0.21 | 116.00 | 22.10 |
|                                                                       | C5                    | 1.5               | 6.20 | 1200 | 31 300 | 24.10 | 0.23 | 30.40  | 7.02  | 0.30 | 88.60  | 11.10 |
|                                                                       | 均值                    |                   | 6.07 | 1520 | 33 540 | 27.94 | 0.57 | 43.76  | 8.48  | 0.22 | 105.30 | 23.00 |
| 均值                                                                    |                       |                   | 6.42 | 2035 | 26 520 | 29.81 | 0.66 | 43.10  | 5.99  | 0.17 | 99.14  | 20.63 |
| 贵州省土壤背景值                                                              |                       |                   |      | 794  | 41 700 | 35.20 | 0.66 | 95.90  | 20.00 | 0.11 | 182.00 | 32.00 |
| 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)<br>(GB 15618—2018) $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ |                       |                   |      | —    | —      | 90.00 | 0.30 | 150.00 | 40.00 | 1.80 | 200.00 | 50.00 |

注:贵州省土壤 Cd、Cr、As、Zn、Cu、Pb、Mn、Fe、Hg 背景值来源于中国环境监测总站,1990。—表示标准中未规定。

Note: Background value of soil heavy metal (Cd, Cr, As, Zn, Cu, Pb, Mn, Fe, Hg) in Guizhou Province derived from China Environmental monitoring Station, 1990. — represents that the standard does not specify.

区土壤进行评价,结果见图2、图3。

根据单因子污染指数法和综合污染指数法的判定标准: $P_i \leq 0.7$ 为清洁,  $0.7 < P_i \leq 1.0$ 为警戒线,  $1 < P_i \leq 2$ 为轻度污染,  $2 < P_i \leq 3$ 为中度污染,  $P_i > 3$ 为重度污染。单因子污染指数分析结果(图2)表明,土壤样品受9种不同重金属元素污染程度由大到小为  $Mn > Hg > Cd > Pb > Cu > Fe > Cr > Zn > As$ , 其中盆架山矿区土壤受  $Mn$  重度污染,杨立掌矿区土壤受  $Mn$  中度污染,白岩溪与鹏程矿区土壤受  $Mn$  轻度污染。4个矿区土壤样品均受  $Hg$  轻度污染。杨立掌矿区土壤受  $Pb$ 、 $Cd$  轻度污染,其他矿区土壤  $Pb$ 、 $Cd$  的污染程度为警戒线等级。综合污染指数分析结果(图3)表明,盆架山矿区土壤达到重度污染,杨立掌矿区土壤为中度污染,白岩溪与鹏程矿区土壤为轻度污染。

## 2.2 蔬菜重金属含量及健康风险评价

据研究区(杨立掌、白岩溪、盆架山及鹏程)现场蔬菜种植情况,采集的蔬菜作物有辣椒、白菜、南瓜、茄子、豇豆,各蔬菜基于其鲜质量的重金属含量分布见表2。

由表2可知,蔬菜品中  $Mn$ 、 $Fe$ 、 $Pb$ 、 $Cd$ 、 $Cr$ 、 $As$ 、 $Zn$  含量范围分别为  $1.89 \sim 16.80$ 、 $1.88 \sim 20.20$ 、 $0.008 \sim 0.109$ 、 $0.001 \sim 0.410$ 、 $0.022 \sim 0.144$ 、 $0.002 \sim 0.019$ 、 $1.07 \sim 4.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 呈现出  $Fe > Mn > Zn > Cd > Cr > Pb > As$  的趋势,而  $Hg$ 、 $Cu$  含量低于检出限。所采集的蔬菜对  $Mn$ 、 $Fe$ 、 $Pb$  的累积规律为白菜  $>$  豇豆  $>$  辣椒  $>$  南瓜  $>$  茄子;  $Cd$  的累积规律为茄子  $>$  白菜  $\sim$  辣椒  $\sim$  豇豆  $>$  南瓜;  $Cr$  的累积规律为白菜  $>$  辣椒  $>$  豇豆  $>$  南瓜  $>$  茄子;  $As$  的累积规律为白菜  $>$  豇豆  $>$  辣椒  $\sim$  茄子  $>$  南瓜;  $Zn$  的累积规律为白菜  $>$  豇豆  $>$  南瓜  $>$  辣椒  $>$  茄子。由以上结果发现,白菜对重金属元素( $Mn$ 、 $Fe$ 、 $Pb$ 、 $Cr$ 、 $As$ 、 $Zn$ )的累积能力比其他几种蔬菜累积能力强;钟

闹桢<sup>[19]</sup>对锰矿区尾矿坝及锰镉复合污染的植物生态毒理学研究表明,不同作物对同种重金属的转移能力有差异,白菜对  $Mn$  的转移能力在几种蔬菜中最差,说明白菜更容易吸收累积  $Mn$ 。矿区蔬菜中重金属  $Pb$ 、 $Cd$ 、 $As$ 、 $Cr$  含量均未超过《食品中污染物限量》(GB 2762—2017)规定限值。黄晓燕等<sup>[20]</sup>对湖南省湘潭锰矿区蔬菜中的重金属污染特征进行了研究,结果表明矿区蔬菜中重金属  $Pb$  的含量远远高于食品卫生标准限值。杨胜香等<sup>[8]</sup>对湘西花垣锰矿区农作物的重金属污染情况进行了研究,表明矿区的蔬菜中  $Pb$ 、 $Zn$ 、 $Cd$  污染严重,长期食用矿区周边的农作物会对身体健康造成严重危害。

为了进一步研究蔬菜作物重金属污染对人体产生的潜在健康风险,本研究通过致癌物风险评价和非致癌物风险评价方法进行健康风险评价。根据USEPA综合风险信息系统(IRIS)和国际癌症研究机构(IARC)的分类系统,元素  $As$ 、 $Cd$  和  $Cr$  为明确的化学致癌物,  $Pb$  为可能的化学致癌物,  $Mn$  为化学非致

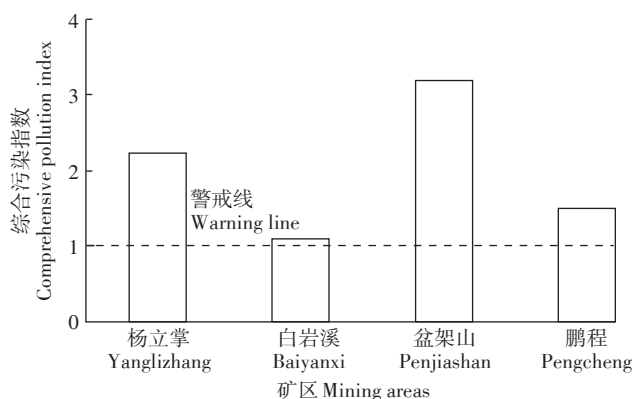


图3 土壤重金属综合污染指数

Figure 3 Comprehensive pollution index of heavy metals in soil

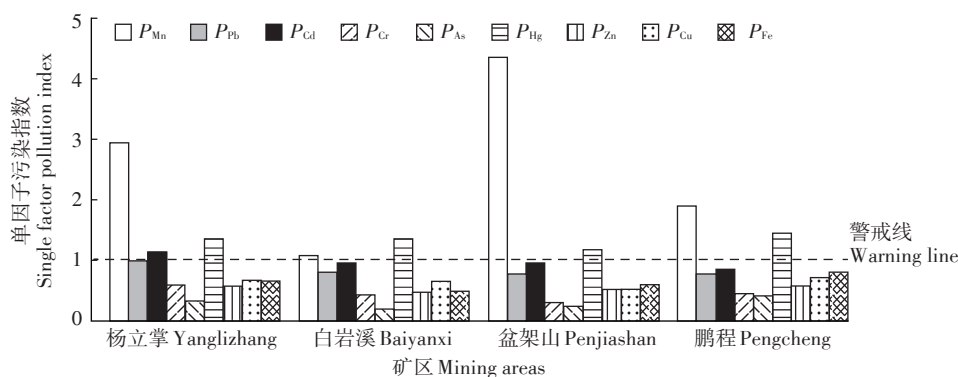


图2 土壤重金属单因子污染指数

Figure 2 Single factor pollution index of heavy metals in soil

表2 蔬菜重金属含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )Table 2 The content of heavy metals in vegetables( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 元素<br>Element | 项目<br>Items | 辣椒 Chilli<br>( $n=9$ ) | 南瓜 Pumpkin<br>( $n=3$ ) | 茄子 Eggplant<br>( $n=2$ ) | 豇豆 Cowpea<br>( $n=3$ ) | 白菜 Chinese cabbage<br>( $n=3$ ) | 卫生标准<br>Hygienic standard |
|---------------|-------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Mn            | 范围          | 2.62~16.10             | 2.37~4.47               | 1.89~2.23                | 7.98~12.20             | 3.99~16.80                      | —                         |
|               | 均值          | 5.07                   | 3.21                    | 2.06                     | 9.43                   | 9.51                            | —                         |
| Fe            | 范围          | 1.88~6.65              | 3.35~4.26               | 1.92~2.71                | 4.67~6.66              | 9.79~20.20                      | —                         |
|               | 均值          | 4.46                   | 3.91                    | 2.32                     | 5.89                   | 13.32                           | —                         |
| Pb            | 范围          | 0.010~0.050            | 0.012~0.046             | 0.008~0.013              | 0.011~0.109            | 0.016~0.046                     | 0.3(0.2)                  |
|               | 均值          | 0.025                  | 0.024                   | 0.011                    | 0.051                  | 0.034                           | —                         |
| Cd            | 范围          | 0.010~0.057            | 0.001~0.004             | 0.018~0.074              | 0.002~0.004            | 0.014~0.410                     | 0.2(0.1)                  |
|               | 均值          | 0.028                  | 0.002                   | 0.046                    | 0.003                  | 0.028                           | —                         |
| Cr            | 范围          | 0.022~0.144            | 0.018~0.063             | 0.022~0.024              | 0.034~0.085            | 0.071~0.090                     | 0.5(1.0)                  |
|               | 均值          | 0.074                  | 0.037                   | 0.023                    | 0.052                  | 0.079                           | —                         |
| As            | 范围          | 0.005~0.011            | 0.002~0.002             | 0.002~0.011              | 0.006~0.010            | 0.014~0.019                     | 0.5(0.5)                  |
|               | 均值          | 0.007                  | 0.002                   | 0.007                    | 0.008                  | 0.016                           | —                         |
| Zn            | 范围          | 1.14~2.80              | 1.07~2.84               | 1.40~1.44                | 2.82~4.29              | 2.93~4.56                       | —                         |
|               | 均值          | 1.79                   | 1.91                    | 1.42                     | 3.60                   | 3.61                            | —                         |
| Hg            | 范围          | —                      | —                       | —                        | —                      | —                               | 0.01(0.01)                |
|               | 均值          | —                      | —                       | —                        | —                      | —                               | —                         |
| Cu            | 范围          | —                      | —                       | —                        | —                      | —                               | —                         |
|               | 均值          | —                      | —                       | —                        | —                      | —                               | —                         |

注:蔬菜中 Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 限量参照《食品中污染物限量》(GB 2762—2017)。—表示含量低于检出限或标准中未规定, $n$ 表示采样数量。卫生标准栏的括号内为豇豆的限值。

Note: The limits of Pb, Cd, Cr, As and Hg in vegetables refer to the *Maximum Levels of Pollutants in Foods* (GB 2762—2017). — represents that the content is below the detection limit or is not specified in the standard,  $n$  represents the number of samples. The value in the brackets of hygienic standard is the limits of cowpea.

癌物质。依据 USEPA 标准<sup>[21]</sup>, Pb 与 Mn 的 RfD 取  $3.57\times 10^{-3}$ 、 $0.14\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ; As、Pb、Cd、Cr 的致癌强度系数  $q_i$  分别取 1.5、0.008 5、6.1、0.5  $\text{kg}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。评价结果见表3。

根据 USEPA 建议,有毒有害物质的健康风险水平在  $1.0\times 10^{-6}$ ~ $1.0\times 10^{-4}\text{ a}^{-1}$  之间表示存在一定风险,但尚可接受,大于  $1.0\times 10^{-4}\text{ a}^{-1}$  表示风险较为显著,小于  $1.0\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$  表示风险甚微。由表3可看出,不同蔬菜同种重金属的  $\text{HI}_i$  与  $R_i$  值不同,且同种蔬菜不同重金属的  $\text{HI}_i$  与  $R_i$  值也不同。所采集的蔬菜非致癌风险为

豇豆>白菜>辣椒>南瓜>茄子,致癌风险为茄子>白菜>辣椒>豇豆>南瓜。就5种蔬菜整体而言, $R_T$  的平均值为  $4.31\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$ ,大于 USEPA 建议的健康风险阈值( $1.0\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$ ),但超出较少,即可认为蔬菜中致癌重金属污染对人体健康存在一定的风险,但尚可接受,重金属致癌风险大小依次为  $R_{\text{Cd}}>R_{\text{Cr}}>R_{\text{As}}>R_{\text{Pb}}$ 。  $\text{HI}_T$  的平均值为  $4.21\times 10^{-9}\text{ a}^{-1}$ ,远小于  $1.0\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$ ,则表明蔬菜中非致癌重金属污染对人体健康存在的风险甚微。总体而言,蔬菜中的5种重金属所引起的致癌风险远大于非致癌风险。

表3 蔬菜重金属污染的健康风险评价( $\text{a}^{-1}$ )Table 3 Health risk assessment on heavy metals pollution in vegetable( $\text{a}^{-1}$ )

| 蔬菜 Vegetable | $\text{HI}_{\text{Pb}}$ | $\text{HI}_{\text{Mn}}$ | $R_{\text{Pb}}$      | $R_{\text{Cd}}$      | $R_{\text{Cr}}$      | $R_{\text{As}}$      | $\text{HI}_T$         | $R_T$                |
|--------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 辣椒           | $1.40\times 10^{-10}$   | $5.88\times 10^{-10}$   | $4.26\times 10^{-9}$ | $3.42\times 10^{-6}$ | $7.41\times 10^{-7}$ | $2.10\times 10^{-7}$ | $7.28\times 10^{-10}$ | $4.38\times 10^{-6}$ |
| 南瓜           | $1.35\times 10^{-10}$   | $3.72\times 10^{-10}$   | $4.09\times 10^{-9}$ | $2.44\times 10^{-7}$ | $3.71\times 10^{-7}$ | $6.01\times 10^{-8}$ | $5.07\times 10^{-10}$ | $6.79\times 10^{-7}$ |
| 茄子           | $6.17\times 10^{-11}$   | $2.39\times 10^{-10}$   | $1.87\times 10^{-9}$ | $5.62\times 10^{-6}$ | $2.30\times 10^{-7}$ | $2.10\times 10^{-7}$ | $3.01\times 10^{-10}$ | $6.06\times 10^{-6}$ |
| 豇豆           | $2.86\times 10^{-10}$   | $1.09\times 10^{-9}$    | $8.68\times 10^{-9}$ | $3.67\times 10^{-7}$ | $5.21\times 10^{-7}$ | $2.40\times 10^{-7}$ | $1.38\times 10^{-9}$  | $1.14\times 10^{-6}$ |
| 白菜           | $1.91\times 10^{-10}$   | $1.10\times 10^{-9}$    | $5.79\times 10^{-9}$ | $3.42\times 10^{-6}$ | $7.91\times 10^{-7}$ | $4.81\times 10^{-7}$ | $1.29\times 10^{-9}$  | $4.70\times 10^{-6}$ |
| 均值           | $8.14\times 10^{-10}$   | $3.39\times 10^{-9}$    | $5.81\times 10^{-9}$ | $3.36\times 10^{-6}$ | $5.75\times 10^{-7}$ | $3.76\times 10^{-7}$ | $4.21\times 10^{-9}$  | $4.31\times 10^{-6}$ |

### 3 结论

通过对贵州铜仁杨立掌、白岩溪、盆架山与鹏程4个典型锰矿区2.0 km范围内土壤、蔬菜重金属组成与含量分析测试及蔬菜摄入健康风险评价,得出以下结论:

(1)杨立掌、白岩溪、盆架山与鹏程土壤样品中Mn、Fe、Pb、Cd、Cr、As、Hg、Zn、Cu含量范围分别为210~7200、13 500~38 100、22.80~44.50、0.23~1.32、18.70~73.40、0.43~13.90、0.08~0.30、57.30~157.00、11.10~30.50 mg·kg<sup>-1</sup>,其中Mn和Hg的平均含量超过贵州省土壤背景值,分别是背景值的2.56、1.55倍,Cd平均含量超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)规定限值,是标准限值的2.20倍。

(2)综合污染指数分析表明,盆架山土壤为重度污染,杨立掌土壤为中度污染,白岩溪与鹏程土壤为轻度污染。

(3)蔬菜样品中重金属Pb、Cd、As、Cr含量均未超过《食品中污染物限量》(GB 2762—2017)规定限值。

(4)蔬菜重金属健康风险评价结果表明,蔬菜中致癌重金属对人体健康存在一定的风险,但尚可接受,其中4种致癌重金属的风险大小依次为Cd>Cr>As>Pb;蔬菜中非致癌重金属污染对人体健康存在的风险甚微。

#### 参考文献:

- [1] 卢镜丞. 湘潭锰矿尾矿库重金属锰淋溶实验研究[D]. 湘潭:湖南科技大学, 2014.  
LU Jing-cheng. Leaching experimental study of heavy metal manganese in Xiangtan manganese tailings[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2014.
- [2] Zhuang P, Li N Y, Li Z A. Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: Implication for human health[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, 31(6): 707-715.
- [3] Yusuf A A, Arowolo T A, Bamgbose O. Cadmium, copper and nickel levels in vegetables from industrial and residential areas of Lagos City, Nigeria[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2003, 41(3): 375-378.
- [4] Muhammad K J, Tasneem G K, Muhammad B A, et al. Heavy metal accumulation in different varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in soil amended with domestic sewage sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2/3): 1386-1391.
- [5] Song B, Lei M, Chen T B, et al. Assessing the health risk of heavy metals in vegetables to the general population in Beijing, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(12): 1702-1709.

- [6] 陈春强, 邓 华, 陈小梅. 广西3个锰矿恢复区农作物重金属健康风险评价[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2017, 35(4): 127-135.  
CHEN Chun-qiang, DENG Hua, CHEN Xiao-mei. Assessment on human health risk of heavy metal in the food crops from three manganese mine recovery areas in Guangxi[J]. *Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition)*, 2017, 35(4): 127-135.
- [7] 祝 滔, 江长胜, 郝庆菊, 等. 重庆秀山锰矿区土壤和植物锰污染调查与评价[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(9): 167-172.  
ZHU Tao, JIANG Chang-Sheng, HAO Qing-ju, et al. Investigation and assessment of contaminated soils and plants by Mn in manganese mining area in Xiushan Autonomous County of Chongqing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(9): 167-172.
- [8] 杨胜香, 易浪波, 刘 佳. 湘西花垣矿区蔬菜重金属污染现状及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 17-23.  
YANG Sheng-xiang, YI Lang-bo, LIU Jia. Heavy metals concentrations and health risk in vegetables grown on Mn and Pb/Zn mineland in Huayuan County, west Hunan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1): 17-23.
- [9] 唐文杰, 黄江波, 余 谦, 等. 锰矿区农作物重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(S1): 464-468, 473.  
TANG Wen-Jie, HUANG Jiang-bo, YU Qian, et al. Analysis on the content of heavy metal in the food crops and assessment on human health risk of manganese mine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(S1): 464-468, 473.
- [10] 兰天龙. 贵州铜仁地区锰矿资源现状及开发利用前景[J]. 地质与资源, 2011, 20(5): 396-400.  
LAN Tian-long. Present situation and developing prospect of the manganese resources in Tongren area, Guizhou Province[J]. *Geology and Resources*, 2011, 20(5): 396-400.
- [11] 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.  
China National Environmental Monitoring Centre. Background values of elements in soils of China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [12] 李 礼, 徐龙君, 李 斗. 重庆秀山锰矿区土壤重金属污染分析与评价[J]. 地球与环境, 2014, 42(5): 646-651.  
LI Li, XU Long-jun, LI Dou. Analysis and evaluation of soil heavy metal pollution in Chongqing Xiushan manganese mine-zone[J]. *Earth and Environment*, 2014, 42(5): 646-651.
- [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、砷的健康风险评价[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]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2016, 26(3): 406-408.
- [14] 张越男, 李忠武, 陈志良, 等. 大宝山尾矿库区及其周边地区地下水重金属健康风险评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 587-594.  
ZHANG Yue-nan, LI Zhong-wu, CHEN Zhi-liang, et al. Assessment of health risk from heavy metals in groundwater of the Dabaoshan tail-

- ing zone and its surrounding areas, Guangdong Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):587-594.
- [15] 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.
- [16] 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.  
Ministry of Environmental Protection. Chinese population exposure parameter manual (Adult volume) [M]. Beijing: China Environmental press, 2013.
- [17] 赖燕平. 广西锰矿区农业利用恢复模式的安全性研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2007.  
LAI Yan-ping. Study on safety of the agricultural utilization pattern in manganese minelands, Guangxi[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2007.
- [18] 王祖伟, 徐利森, 张文具. 土壤微量元素与人类活动强度的对应关系[J]. 土壤通报, 2002, 33(4):304-305.  
WANG Zu-wei, XU Li-miao, ZHANG Wen-ju. Corresponding relationship between trace elements in soil and human activity intensity [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(4):304-305.
- [19] 钟闹楨. 锰矿区尾矿坝及锰镉复合污染对植物的生态毒理学研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2008.  
ZHONG Wei-zhen. Ecotoxicological effect of manganese mine tailings and Mn-Cd combined pollution on plants[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2008.
- [20] 黄晓燕, 马祖陆. 湘潭锰矿区蔬菜重金属污染特征及健康风险评估[J]. 广西科学院学报, 2017, 33(2):120-126.  
HUANG Xiao-yan, MA Zu-lu. Heavy metal pollution features in vegetable and health risk assessment in Xiangtan manganese mine, Hunan[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2017, 33(2):120-126.
- [21] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Risk-based concentration table[R]. Washington D C: USEPA, 2000.