

# 雅安市耕地土壤重金属健康风险评价

杨 刚,伍 钧,孙百晔,周红艳

(四川农业大学资源环境学院,四川 雅安 625014)

**摘 要:**通过采样分析探究了雅安市耕地土壤重金属的分布,并利用国家土壤环境质量一级标准和健康风险评价模型对雅安市耕地土壤中 Pb、Zn、Cu、Cd 的含量进行健康风险评价。结果表明,雅安耕地土壤 Pb、Zn、Cu、Cd 的含量范围分别为:38.25 ~ 127  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Pb, 32.91 ~ 156.4  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Zn, 7.479 ~ 82.73  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cu, 1.667 ~ 7.949  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd,其中 Cd 超标最为严重,Pb 和 Zn 次之,Cu 最小。土壤中重金属 Pb、Zn、Cu、Cd 的含量所引起的成人与儿童平均个人风险均表现为  $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn}$ ,其中宝兴县五龙乡东风村人体总的健康危害风险最大,在实际生产生活中应加强相应预防和控制。

**关键词:**耕地土壤;重金属;分布特征;健康风险评价

中图分类号:X820.4 文献标识码:A 文章编号:1672-2043(2010)增刊-0074-06

## Health Risk Assessment of Heavy Metals in Arable Soils of Ya'an

YANG Gang, WU Jun, SUN Bai - ye, Zhou Hong - yan

(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

**Abstract:** This thesis explored the distribution of heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cd) in cultivated land of Ya'an. Contents of heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cd) in cultivated land in Ya'an, were investigated to evaluate environmental quality based on the national soil environmental quality standards and health risk assessment model for safety of soils human. The results showed that Pb, Zn, Cu, Cd contents of cultivated soils in the range of: Pb 38.25 ~ 127  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , Zn 32.91 ~ 156.4  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , Cu 7.479 ~ 82.73  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , Cd 1.667 ~ 7.949  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which exceeded the most serious Cd, followed by Pb, Zn, and the minimum is Cu. The average order of individual risk index for children and adult health was  $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn}$ . For human general hazard indexes, the Dongfeng village of wulong town in Baoxing was the highest. It may produce a threat to human health. Besides, Contents of heavy metals Cd in cultivated land soil in Ya'an was the beyond standard equally; Pb, Zn, Cu of parts of cultivated land in Ya'an existed potential risk. And we should strengthen prevention and control of the corresponding in the actually production and living life.

**Keywords:** the cultivated land; heavy metals; distribution; health risk assessment

重金属作为一种持久性的有毒污染物,通过不同的途径进入土壤后因不能被生物降解而长期存在于土壤中。土壤中的重金属主要是通过人体直接接触、地面扬尘等途径被人体直接吸入、饮水摄入对人类产生危害<sup>[1]</sup>。目前,土壤重金属污染所带来的环境问题日益受到人们的重视,已经成为国际环境土壤学研究的热点<sup>[2]</sup>。因此,研究土壤尤其是耕地土壤重金属分

布特征,对土壤进行健康风险评价具有重要意义。

健康风险评价是 20 世纪 80 年代以后发展起来的,是指识别环境中可能的风险源,评价其与人体发生接触的暴露途径以及定量评价暴露结果对人体健康产生的危害程度<sup>[3]</sup>。同时,它把环境污染与人体健康联系起来,定量地描述环境污染对人群健康的危害,估算有害因子对人体危害发生的概率<sup>[4-5]</sup>。通过环境健康风险评价,可以直接得出环境质量的综合结论(以对人体健康危害的年风险来表示),确定污染物的主次及治理的优先权,从而为环境风险管理提供科学依据和主要决策对象<sup>[6]</sup>。

收稿日期:2009-09-03

基金项目:四川省教育厅重点项目(2006017);四川省科技厅重点项目(2007NGY006)

作者简介:杨 刚(1980—),男,四川崇州人,讲师,主要从事土壤污染与生物修复方面研究。E-mail:yg8813@yahoo.com.cn

本文通过引用国外较完善的风险评价理论,利用健康风险评价模型,对雅安市主要耕地土壤中重金属(Pb、Zn、Cu、Cd)的分布及健康风险评价进行探讨,评价了土壤-人体的健康风险,确定污染物的主次及治理的优先权,从而为环境风险管理提供科学依据和主要决策对象,而且可以为当地居民的健康提供足够的保障,其风险评估的结果也更有指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品的采集

供试土壤样品来自雅安市各区县耕地土壤,土壤样品按常规标准法取样,采用GPS定位,样点布局考虑了土壤类型和土地利用方式,布设了25个采样点,

每个采样点采集3个样品,取样层次为耕作层,采样深度为0~20 cm。土壤样品经过前处理、风干、磨细,分别过20目和100目尼龙筛,备用。土壤基本理化性质见表1。

### 1.2 测定项目及方法

土壤中Pb、Zn、Cu、Cd,采用HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub>消煮,定容后的上清液用原子吸收分光光度法测定。

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 健康风险评价模型

健康风险评价是以风险度作为指标,把环境污染与人体健康联系起来,定量描述重金属污染物对人体产生健康危害的风险<sup>[7]</sup>。利用Pb、Zn、Cu、Cd4种重金属的均值,应用健康风险评价模型进行定量评价。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Some physical and chemical characteristics of the study soil

| 采样地点       | 土壤类型 | pH值  | OM/<br>g·kg <sup>-1</sup> | CEC/<br>cmol·kg <sup>-1</sup> | 全N/<br>% | 碱解N/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 速效K/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 速效P/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 粘粒0.001mm/<br>% | 土壤质地 |
|------------|------|------|---------------------------|-------------------------------|----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|------|
| 宝兴县五龙乡东风村  | 黄壤   | 5.92 | 39.91                     | 10.85                         | 0.22     | 145.4                       | 57.65                       | 4.28                        | 6               | 中壤土  |
| 宝兴县五龙乡团结村  | 紫色土  | 7.78 | 51.89                     | 16.7                          | 0.36     | 248.7                       | 160.9                       | 2.36                        | 4               | 中壤土  |
| 汉源县市荣乡太平村  | 黄棕壤  | 5.38 | 17.66                     | 5.35                          | 0.06     | 74.79                       | 58.93                       | 0.14                        | 3               | 轻壤土  |
| 芦山县沫东镇火炬村  | 紫色土  | 7.91 | 20.38                     | 19.59                         | 0.15     | 83.96                       | 67.22                       | 5.06                        | 2               | 中壤土  |
| 芦山县思延乡草坪村  | 黄壤   | 5.4  | 32.94                     | 15.81                         | 0.12     | 152.3                       | 42.86                       | 7.41                        | 20              | 重壤土  |
| 名山县新店镇白马村  | 紫色土  | 7.92 | 17.39                     | 11.01                         | 0.1      | 63.84                       | 36.48                       | 1.85                        | 1               | 轻壤土  |
| 名山县新店镇新坝村  | 黄壤   | 5.13 | 19.26                     | 9.56                          | 0.09     | 92.04                       | 170.7                       | 3.05                        | 26              | 重壤土  |
| 石棉县回隆乡回隆村  | 红壤   | 6.08 | 27.45                     | 20.64                         | 0.13     | 81.69                       | 142.9                       | 5.86                        | 12              | 中壤土  |
| 石棉县回隆乡联合村  | 黄棕壤  | 5.93 | 40.74                     | 11.21                         | 0.16     | 217.5                       | 206.1                       | 1.86                        | 2               | 砂土   |
| 天全县小河乡秋丰村  | 紫色土  | 7.9  | 17.66                     | 9.73                          | 0.1      | 73.75                       | 117.6                       | 9.49                        | 2               | 轻壤土  |
| 荣经县附城镇南罗村  | 紫色土  | 7.93 | 19.78                     | 21.06                         | 0.14     | 65.15                       | 82.3                        | 5.96                        | 2               | 中壤土  |
| 荣经县青龙乡柏香村  | 黄壤   | 5.7  | 75.31                     | 19.77                         | 0.43     | 334.3                       | 283.9                       | 21.48                       | 26              | 砂土   |
| 雨城区凤鸣乡柳良村  | 紫色土  | 6.48 | 35.23                     | 11.63                         | 0.17     | 135                         | 447.4                       | 58.09                       | 10              | 轻壤土  |
| 雨城区观化乡上横村  | 紫色土  | 7.87 | 44.68                     | 12.48                         | 0.16     | 85.93                       | 45                          | 1.54                        | 4               | 轻壤土  |
| 雨城区合江镇徐坪村  | 黄壤   | 5.8  | 42.89                     | 16.57                         | 0.19     | 151.3                       | 159.3                       | 2.79                        | 20              | 重壤土  |
| 雨城区和龙乡简坝村  | 黄壤   | 4.84 | 45.96                     | 18.2                          | 0.22     | 206.4                       | 83.94                       | 8.94                        | 24              | 重壤土  |
| 雨城区和龙乡徐山村  | 潮土   | 7.45 | 32.16                     | 5.59                          | 0.08     | 77.89                       | 28.57                       | 4.42                        | 8               | 砂土   |
| 雨城区和龙乡范山村  | 紫色土  | 6.04 | 46.1                      | 10.27                         | 0.19     | 137.5                       | 83.27                       | 7.72                        | 14              | 重壤土  |
| 雨城区上里镇白马村  | 黄壤   | 5.19 | 37.46                     | 10.8                          | 0.25     | 192.1                       | 58.75                       | 8.6                         | 18              | 重壤土  |
| 雨城区上里镇治安村  | 黄壤   | 5.28 | 40.33                     | 13.84                         | 0.2      | 162.1                       | 78.89                       | 1.75                        | 14              | 轻壤土  |
| 雨城区望鱼镇回龙村  | 紫色土  | 6.32 | 24.48                     | 13.43                         | 0.13     | 109                         | 41.88                       | 2.55                        | 14              | 中壤土  |
| 雨城区望鱼镇兴隆村  | 紫色土  | 5.88 | 67.88                     | 9.7                           | 0.3      | 233.8                       | 26.19                       | 5.16                        | 7               | 轻壤土  |
| 雨城区严桥乡风皇村  | 水稻土  | 5.12 | 69.24                     | 19.34                         | 0.31     | 272.7                       | 114.8                       | 24.66                       | 26              | 重壤土  |
| 雨城区晏场镇马河冲村 | 紫色土  | 5.55 | 25.77                     | 13.21                         | 0.14     | 127.2                       | 67.66                       | 3.76                        | 16              | 中壤土  |
| 雨城区中里镇龙泉村  | 紫色土  | 7.9  | 36.96                     | 25.43                         | 0.24     | 156.7                       | 85.1                        | 0.68                        | 2               | 砂土   |

不同类型污染物通过土壤-人体后所引起的健康风险评价模型包括致癌物所产生健康危害的模型和非致癌物所产生健康危害的风险模型<sup>[8]</sup>。

$$CDI = \frac{c \times IR \times CF \times FI \times EF \times ED}{BW \times AT \times 365}$$

式中:CDI表示日慢性摄取量,mg·(kg·d)<sup>-1</sup>;c表示(水,土壤,大气等)污染物浓度,mg·L<sup>-1</sup>,mg·kg<sup>-1</sup>,mg·m<sup>-3</sup>;IR表示摄取速率,mg·d<sup>-1</sup>;CF表示转换因子,10<sup>-6</sup>kg·mg<sup>-1</sup>;FI表示摄取分数(0.0~1.0),%;EF表示暴露频率,d·a<sup>-1</sup>;ED表示暴露时间,a;BW表示受体重,kg;AT表示平均接触时间,a。

1.3.2 非致癌风险

污染土壤可能造成的潜在非致癌风险是通过各种可能暴露途径和其相对应的参考剂量确定的。

$$HQ = CDI/RfD$$

式中:HQ指风险指数;CDI指慢性日摄入量mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>;RfD指参考剂量,mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>。

HQ值可以用来评价敏感人群受到非致癌风险的可能性。当HQ值低于1时,表示可能对敏感人群产生潜在的非致癌风险。同时评价几种污染物产生的非致癌风险时,则把每种污染物产生的非致癌风险相加,得到总体的非致癌风险指数HI<sup>[9]</sup>。

$$HI = HQ_1 + HQ_2 + \cdots + HQ_n$$

当HI小于1时,认为没有慢性的非致癌风险产生;当HI大于1时,则应对污染土壤进行修复,降低土壤中污染物质含量,直到HI小于1为止。

1.3.3 致癌风险

致癌风险指长期暴露于某种致癌物质的情况下,人体患癌症的可能性。

$$Cancer\ Risk = CDI \times SF$$

式中:CDI是慢性日摄入量,mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>;SF(slope factor)表示斜率因子,kg·d·mg<sup>-1</sup>。

当一个污染地块有多个致癌物质时,致癌风险为各种污染物的各种可能暴露途径所产生的致癌风险之和。美国环保局认为,致癌风险在1×10<sup>-6</sup>~1×10<sup>-4</sup>之间时是可以接受的<sup>[10]</sup>。

1.3.4 健康风险评价模型参数的选择

在健康风险评价中,评价被重金属污染的土壤周围居民的健康风险时,通常要考虑人体通过呼吸、接触摄取土壤中污染物途径,并综合前人的研究成果和已有的研究材料<sup>[11-12]</sup>,及雅安市居民的实际情况,确定适合当地的暴露评价参数,见表2。

表2 健康风险评价模型暴露参数

Table 2 Exposure parameters of the health risk assessment models

| 暴露评价参数 | 成人参考值 | 儿童参考值 | 参考值              |
|--------|-------|-------|------------------|
| BW     | 70    | 16    |                  |
| IR     | 100   | 200   |                  |
| ED     | 30    | 10    |                  |
| EF     |       |       | 300              |
| FI     |       |       | 0.0~1.0          |
| CF     |       |       | 10 <sup>-6</sup> |
| AT     |       |       | 70               |

根据国际癌症研究机构(IARC)和世界卫生组织(WHO)通过全面评价化学物质致癌性可靠程度而编制的分类系统,Cd为化学致癌物,其致癌强度斜率因子,见表3。对于非致癌物质所致的健康风险,参考剂量(RfD)是一个重要参数。根据美国国家环保局(USEPA)推荐与评价,有关的参考剂量值和斜率因子见表3。

表3 模型参数RfD和SF值

Table 3 Model parameters of RfD and SF value

| 重金属 | RfD/mg·kg·d <sup>-1</sup> | SF/kg·d·mg <sup>-1</sup> |
|-----|---------------------------|--------------------------|
| Cd  | 0.001(食物)/0.0005(水)       | 6.1(水)                   |
| Pb  | 0.0035                    |                          |
| Zn  | 0.3                       |                          |
| Cu  | 0.04                      |                          |

2 结果与讨论

2.1 雅安市耕地土壤重金属含量及分布特征

雅安市耕地土壤重金属Pb、Zn、Cu、Cd的含量分布统计见表4。表4的数据显示,雅安耕地土壤重金属Pb、Zn、Cu、Cd的含量范围分别为38.25~127mg·kg<sup>-1</sup>、32.91~156.4mg·kg<sup>-1</sup>、7.479~82.73mg·kg<sup>-1</sup>、1.667~7.949mg·kg<sup>-1</sup>,平均含量分别为57.35、93.91、82.78、3.74mg·kg<sup>-1</sup>。其土壤中Pb、Zn、Cu、Cd含量分别有80%、32%、16%、100%超过全国土壤背景值,但Pb、Zn、Cu的含量均低于土壤环境质量一级标准(GB15618—1995),而Cd的含量均高于全国土壤背景值,这表明在所有采样点Cd超标最为严重,Pb和Zn次之,Cu最小。

由表4还知,4种重金属的变异系数由大到小的顺序是Cu>Pb>Cd>Zn,土壤中Cu变异系数相对最大,为65.80%,表明土壤中Cu含量在雅安耕地土壤

中空间分布不均匀,局部存在点源污染,这可能是由于含铜农药的不规范施用导致或其他外源物质进入所致,而土壤中重金属 Pb、Zn、Cd 的变异系数均小于 0.5,说明 Pb、Zn、Cd 三种重金属含量在雅安耕地土壤中空间分布较为均匀。

表 4 土壤重金属含量统计分析  
Table 4 Statistic data of heavy metals in soils

| 项目 | 样品数 | 最小值/mg · kg <sup>-1</sup> | 最大值/mg · kg <sup>-1</sup> | 平均值/mg · kg <sup>-1</sup> | 标准差/mg · kg <sup>-1</sup> | 变异系数   | 背景值/mg · kg <sup>-1</sup> |
|----|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------|---------------------------|
| Pb | 75  | 38.25                     | 127                       | 57.35                     | 23.03                     | 40.16% | 250.00                    |
| Zn | 75  | 32.91                     | 156.4                     | 93.91                     | 27.44                     | 29.22% | 200.00                    |
| Cu | 75  | 7.479                     | 82.73                     | 28.83                     | 18.97                     | 65.80% | 150.00                    |
| Cd | 75  | 1.667                     | 7.949                     | 3.74                      | 1.37                      | 36.63% | 0.3                       |

2.2 土壤重金属含量的相关性分析

利用 SPSS 统计软件对雅安市耕地土壤理化性质和重金属含量作 Pearson 相关分析,计算出 Pb、Zn、Cd、Cu 之间,及其与所测的土壤理化性质间的相关系数,见表 5。

表 5 土壤重金属元素间的相关性分析  
Table 5 Correlations among heavy metals in soils

| 项目 | Pb      | Zn      | Cu       | Cd    |
|----|---------|---------|----------|-------|
| Pb | 1.000   |         |          |       |
| Zn | 0.445 * | 1.000   |          |       |
| Cu | 0.006   | 0.419 * | 1.000    |       |
| Cd | 0.432 * | 0.123   | 0.507 ** | 1.000 |

注:\*\*表示在 0.01 水平上显著;\*表示在 0.05 水平上显著。

据研究耕地土壤中重金属之间的相关性可以推测重金属的来源是否相同,若它们之间存在相关性,则它们的来源可能相同,否则来源可能不同<sup>[13]</sup>。土壤重金属含量相关性分析结果表明,雅安耕地土壤中 Cu 和 Cd 呈极显著的正相关关系,Pb 和 Cd,Zn 和 Pb、Cu 呈显著正相关关系,这说明雅安市耕地土壤重金属 Pb、Zn、Cu、Cd 四者间为复合污染,或污染具有同源性。

2.3 土壤重金属健康风险评价

应用健康风险评价模型和模型参数,计算出雅安市耕地土壤重金属 Pb、Zn、Cu、Cd 可能引起的成人与儿童平均个人风险,其中 Cd 的风险仅以摄取食物的量产生的风险,未考虑通过水-人体途径的致癌风险(饮用水为清洁)。计算结果见表 6。

评价结果表明,非致癌污染物(Pb、Zn 和 Cu)所引起的健康危害的个人年风险以 Pb 最大,其次为 Cu 和 Zn。Pb 的最大个人年风险可达  $0.92 \times 10^{-2} \text{a}^{-1}$ ,位于宝兴县五龙乡东风村,但其在土壤中的含量仍低于国家二级标准限值。3 种非致癌污染物对人体健康

危害的个人年风险水平均集中在  $10^{-5} \sim 10^{-2}$ ,也就是说,每千人中因土壤重金属的非致癌污染物而受到健康危害(或死亡)的不到 1 人,因此表明在雅安耕地土壤中,非致癌物质(Pb、Zn 和 Cu)所引起的健康风险比较小,但也会对暴露人群构成潜在的健康危害,且潜在人体健康危害风险的大小为  $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn}$ 。而致癌物质 Cd 对人体健康危害的个人年风险水平均集中在  $10^{-6} \text{a}^{-1}$ ,即致癌物质 Cd 所引起的健康风险明显,会对暴露人群构成明显的危害,其中,污染最严重在雨城区望鱼乡兴隆村。本文所研究的重金属中,Cd 和 Pb 是雅安市耕地土壤产生风险的主要污染物,应作为风险决策管理的重点对象。

雅安市耕地土壤中重金属 Pb、Zn、Cu、Cd 直接对人体所引起的成人和儿童平均个人风险均表现为  $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn}$ ,成人和儿童的非致癌风险均小于 1,但成人与儿童的非致癌潜在风险在宝兴县五龙乡东风村最大,在雨城区上里镇治安村最小。儿童的致癌风险均大于  $10^{-6}$ ,以宝兴县五龙乡东风村最大,在石棉县回隆乡回隆村最小,对于人体总的健康危害风险,以宝兴县五龙乡东风村最大,会对人体健康产生威胁,且儿童比成人更易受到土壤重金属的影响。

3 结论

(1)雅安耕地土壤 Pb、Zn、Cu、Cd 的含量范围分别为  $38.25 \sim 127 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $32.91 \sim 156.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $7.479 \sim 82.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.667 \sim 7.949 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其中 Cd 超标最为严重,Pb 和 Zn 次之,Cu 最小。土壤中四种重金属之间均呈正相关关系,其中 Cu 和 Cd 达极显著水平,Pb 和 Cd,Zn 和 Pb、Cu 达显著水平,这说明雅安市耕地土壤重金属 Pb、Zn、Cu、Cd 四者间为复合污染,或污染具有同源性。

(2)雅安市耕地土壤重金属 Pb、Zn、Cu、Cd 的含

表 6 土壤中 Pb、Zn、Cu、Cd 健康危害的平均个人年风险 (a<sup>-1</sup>)  
Table 6 Health hazard of individual person of Pb,Zn,Cu and Cd in the soils(a<sup>-1</sup>)

| 采样<br>地点   | 成 人               |                   |                   |                   |                   |                   | 儿 童               |                   |                   |                   |                   |                   |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|            | Pb                | Zn                | Cu                | Cd                | HI                | CR                | Pb                | Zn                | Cu                | Cd                | HI                | CR                |
|            | ×10 <sup>-2</sup> | ×10 <sup>-4</sup> | ×10 <sup>-3</sup> | ×10 <sup>-6</sup> | ×10 <sup>-2</sup> | ×10 <sup>-5</sup> | ×10 <sup>-2</sup> | ×10 <sup>-4</sup> | ×10 <sup>-3</sup> | ×10 <sup>-6</sup> | ×10 <sup>-2</sup> | ×10 <sup>-5</sup> |
| 宝兴县五龙乡东风村  | 0.92              | 0.82              | 1.12              | 1                 | 0.93              | 1.22              | 2.66              | 2.39              | 0.33              | 2.92              | 2.72              | 3.56              |
| 宝兴县五龙乡团结村  | 0.53              | 1.23              | 1.67              | 0.34              | 0.56              | 0.41              | 1.55              | 3.59              | 0.49              | 0.98              | 1.63              | 1.2               |
| 汉源县市荣乡太平村  | 0.28              | 0.59              | 0.99              | 0.44              | 0.3               | 0.53              | 0.82              | 1.73              | 0.29              | 1.28              | 0.87              | 1.56              |
| 芦山县沫东镇火炬村  | 0.32              | 0.92              | 1.44              | 0.46              | 0.35              | 0.56              | 0.94              | 2.69              | 0.42              | 1.34              | 1.01              | 1.63              |
| 芦山县思延乡草坪村  | 0.29              | 1.12              | 5.2               | 0.6               | 0.35              | 0.73              | 0.85              | 3.28              | 1.52              | 1.74              | 1.03              | 2.13              |
| 名山县新店镇白马村  | 0.82              | 1.31              | 1.37              | 0.36              | 0.84              | 0.44              | 2.39              | 3.83              | 0.4               | 1.04              | 2.46              | 1.27              |
| 名山县新店镇新坝村  | 0.37              | 0.58              | 0.89              | 0.39              | 0.38              | 0.48              | 1.07              | 1.68              | 0.26              | 1.14              | 1.12              | 1.39              |
| 石棉县回隆乡回隆村  | 0.36              | 0.86              | 0.69              | 0.21              | 0.38              | 0.26              | 1.05              | 2.5               | 0.2               | 0.61              | 1.1               | 0.75              |
| 石棉县回隆乡联合村  | 0.44              | 0.28              | 0.47              | 0.37              | 0.45              | 0.45              | 1.28              | 0.81              | 0.14              | 1.07              | 1.3               | 1.3               |
| 天全县小河乡秋丰村  | 0.33              | 0.63              | 1.3               | 0.43              | 0.35              | 0.52              | 0.95              | 1.85              | 0.38              | 1.25              | 1.01              | 1.53              |
| 荣经县附城镇南罗村  | 0.3               | 0.88              | 1.56              | 0.4               | 0.33              | 0.49              | 0.88              | 2.56              | 0.45              | 1.18              | 0.95              | 1.44              |
| 荣经县青龙乡柏香村  | 0.44              | 0.78              | 3.98              | 0.56              | 0.49              | 0.68              | 1.28              | 2.28              | 1.16              | 1.64              | 1.42              | 2                 |
| 雨城区凤鸣乡柳良村  | 0.34              | 0.56              | 1.41              | 0.39              | 0.36              | 0.48              | 0.99              | 1.65              | 0.41              | 1.14              | 1.04              | 1.39              |
| 雨城区观化乡上横村  | 0.38              | 0.68              | 1.52              | 0.39              | 0.41              | 0.47              | 1.12              | 2                 | 0.44              | 1.13              | 1.18              | 1.38              |
| 雨城区合江镇徐坪村  | 0.52              | 1.03              | 4.8               | 0.87              | 0.58              | 1.06              | 1.53              | 3                 | 1.4               | 2.53              | 1.7               | 3.09              |
| 雨城区和龙乡简坝村  | 0.33              | 0.69              | 3.18              | 0.67              | 0.37              | 0.81              | 0.95              | 2.03              | 0.93              | 1.94              | 1.07              | 2.37              |
| 雨城区和龙乡徐山村  | 0.64              | 1.05              | 2.06              | 0.39              | 0.67              | 0.47              | 1.87              | 3.06              | 0.6               | 1.12              | 1.96              | 1.37              |
| 雨城区和龙乡范山村  | 0.35              | 0.66              | 1.66              | 0.38              | 0.37              | 0.47              | 1.03              | 1.92              | 0.49              | 1.11              | 1.09              | 1.36              |
| 雨城区上里镇白马村  | 0.29              | 0.6               | 1.06              | 0.51              | 0.31              | 0.62              | 0.85              | 1.74              | 0.31              | 1.49              | 0.9               | 1.82              |
| 雨城区上里镇治安村  | 0.27              | 0.81              | 0.56              | 0.37              | 0.29              | 0.45              | 0.8               | 2.35              | 0.16              | 1.08              | 0.84              | 1.32              |
| 雨城区望鱼镇回龙村  | 0.34              | 0.69              | 1.65              | 0.34              | 0.37              | 0.41              | 1                 | 2.01              | 0.48              | 0.99              | 1.06              | 1.21              |
| 雨城区望鱼镇兴隆村  | 0.52              | 0.73              | 1.79              | 0.67              | 0.54              | 0.81              | 1.5               | 2.13              | 0.52              | 1.94              | 1.58              | 2.37              |
| 雨城区严桥乡凤皇村  | 0.29              | 0.56              | 1.29              | 0.35              | 0.31              | 0.43              | 0.85              | 1.63              | 0.38              | 1.02              | 0.9               | 1.24              |
| 雨城区晏场镇马河冲村 | 0.32              | 0.7               | 1.64              | 0.39              | 0.34              | 0.48              | 0.93              | 2.05              | 0.48              | 1.14              | 0.99              | 1.39              |
| 雨城区中里镇龙泉村  | 0.32              | 0.92              | 2.06              | 0.5               | 0.35              | 0.61              | 0.93              | 2.69              | 0.6               | 1.45              | 1.02              | 1.77              |

量所引起的成人和儿童平均个人风险均表现为 Cd > Pb > Cu > Zn,对于人体总的健康危害风险,宝兴县五龙乡东风村最大,会对人体健康产生威胁,而且儿童比成人更易受到土壤重金属的影响。

(3)暴露途径的选择原则是根据每种模型自身的特点,最大且合理地对健康风险进行量化评估<sup>[14]</sup>。但本次研究沿用土壤中重金属污染物对人体健康暴露风险评价模型,暴露途径仅考虑了食物的摄入,没有考虑其他暴露途径,如通过皮肤接触、以蒸汽形式吸入、饮水摄入等途径,实际上低估了重金属暴露的风险;另外,通过摄食暴露风险还与食物在家庭中的停留时间、消费者的生活方式、消费习惯及职业类型

等密切相关,这就需要用更加复杂的暴露评价方法来得到消费人群接触污染物的平均暴露剂量、污染物暴露剂量在一日中的分配、个人受到污染物最高暴露的机会。因此,本文对于雅安市耕地土壤重金属暴露风险的研究是初步的,还有待进一步丰富和完善。

参考文献:

[1] 邵学新,吴明,蒋科毅. 西溪湿地土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 湿地科学,2005,5(3):253-259.  
SHAO Xue-xin, WU Ming, JIANG Ke-yi. Distribution and ecological risk assessment of heavy metal elements in soils of Xixi Wetland [J]. Wetland Science, 2007,5(3):253-259.  
[2] 孟昭虹,高玉娟. 黑龙江生态省土壤重金属分布特征及其生态风险

- 评价[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(3): 13819-13821.
- MENG Zhao-hong, GAO Yu-juan. Distribution characteristics of heavy metals in soil of heilongjiang ecological province and its ecological risk assessment[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(31): 13819-13821.
- [3] 黄勇, 杨忠芳, 张连志, 等. 基于重金属的区域健康风险评价——以成都经济区为例[J]. 现代地质, 2008, 22(6): 990-997.
- HUANG Yong, YANG Zhong-fang, ZHANG Lian-zhi, et al. Regional health risk assessment on heavy metals in Chengdu economic region[J]. *Geoscience—Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 2008, 22(6): 990-997.
- [4] 苏伟, 刘景双, 李方. 第二松花江干流重金属污染物健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1611-1615.
- SU Wei, LIU Jing-shuang, LI Fang. Assessment on health risk of heavy metals in the second Songhua River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6): 1611-1615.
- [5] 许川, 陈济安, 舒为群. 川藏沿线兵站饮用水源水中重金属污染物健康风险评价[J]. 解放军预防医学杂志, 2008, 26(5): 321-324.
- XU Chuan, CHEN Ji-an, SHU Wei-qun. Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking water from affiliated army service stations along Sichuan-Tibet highway[J]. *Journal of Preventive Medicine of Chinese People's Liberation Army*, 2008, 26(5): 321-324.
- [6] 李珊珊, 田考聪. 饮用水源中重金属的健康风险评价[J]. 重庆医科大学学报, 2008, 33(4): 450-456.
- LI Shan-shan, TIAN Kao-cong. Health risk assessment of chemical pollutants in drinking water[J]. *Journal of Chongqing Medical University*, 2008, 33(4): 450-456.
- [7] 王铁军, 查学芳, 熊威娜, 等. 贵州遵义高坪水源地质岩溶地下水重金属污染健康风险初步评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 46-50.
- WANG Tie-jun, ZHA Xue-fang, XIONG Wei-na, et al. Primary study of health risk assessment of heavy metals in karst groundwater in Gaoping Area in Zunyi City, Guizhou Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(1): 46-50.
- [8] 高继军, 张力平, 黄圣彪, 等. 北京市饮用水源重金属污染物健康风险的初步评价[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 47-50.
- GAO Ji-jun, ZHANG Li-ping, HUANG Sheng-biao, et al. Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Beijing[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2004, 25(2): 47-50.
- [9] US EPA. Risk assessment guidance for superfund, Vol. I. Human Health Evaluation Manual Part A(Interim Final), EPA/540/1-89/002. Washington, Environmental Protection Agency. 1991.
- [10] 黎莉莉, 张勇, 高群杰, 等. 三峡水库 135 m 蓄水前后水体重金属环境健康风险评价[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(11): 865-878.
- LI Li-li, ZHANG Yong, GAO Qun-jie, et al. Health risk assessment of heavy metals in water body of the Three Gorges Reservoir before and after the water level reached 135 meters[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2006, 28(11): 865-878.
- [11] Chon H T, Lee J S. Heavy metal contamination and human risk assessment around some abandoned AU-AG and base metal mine sites in Korea D. Seoul: School of Civil, Urban and Geosystem Engineering Seoul National University, 2004: 151-174.
- [12] Weislo E, Iocen D, Kucharsity R, et al. Human health risk assessment case study; an abandoned metal smelter site in Poland[J]. *Chemosphere*, 2002, 47: 507-515.
- [13] 辛蕊, 张思冲, 周晓聪, 等. 大庆城区土壤重金属污染及相关性分析[J]. 中国农学通报, 2008, 24(9): 416-420.
- Xin Rui, Zhang Si-chong, Zhou Xiao-cong, et al. Analysis on pollution and correlation of heavy metals in soil in Daqing City[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(9): 416-420.
- [14] 施烈焰, 曹云者, 张景来, 等. RBCA 和 CLEA 模型在某重金属污染场地环境风险评价中的应用比较[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 241-247.
- SHI Lie-yan, CAO Yun-zhe, ZHANG Jing-lai, et al. Comparison of application of RBCA and CLEA model for health risk assessment of a heavy metal contaminated site[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(2): 241-247.