

何林华, 高小红. 三江源区土壤重金属的累积特征及潜在生态风险评价——以青海省玉树县为例[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1071-1080.

HE Lin-hua, GAO Xiao-hong. Assessment of potential ecological risk for soil heavy metals in Sanjiang Source Region: A case study of Yushu County, Qinghai Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1071-1080.

## 三江源区土壤重金属的累积特征及潜在生态风险评价 ——以青海省玉树县为例

何林华, 高小红<sup>\*</sup>

(青海师范大学生命与地理科学学院, 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 青藏高原环境与资源教育部重点实验室, 西宁 810008)

**摘要:** 为了解三江源代表性区域玉树县土壤重金属污染状况, 评估土壤重金属潜在生态风险, 以玉树县采集的 121 个土壤样本中的重金属含量数据为基础, 采用地累积指数和潜在生态危害指数法对土壤重金属含量进行分析和潜在风险评价。结果表明: 玉树县表层土壤重金属含量均超过青海省 1990 年背景值, 其中 As、Cd 和 Hg 出现了较强的富集现象, 同时 As、Cd 超出国家土壤环境质量一级标准, 表明三江源区土壤重金属环境自 20 世纪 90 年代以来部分元素出现了过度富集; 来源分析表明, 玉树县土壤重金属 As、Pb、Zn 和 Cd 主要与成土因素有关, Hg、Cu 和 Cr 受人类活动影响较大, Mn 来源于气候的影响; 潜在生态风险评价表明: 土壤中 Cd 和 Hg 的危害最大, 尤其是 Hg 已出现了很强风险和极强风险, 这些风险主要分布在国道 214 沿线人口聚集的城镇和地段, 与人类活动有着密切的关系。在各子流域中, 江曲流域土壤重金属属于强风险, 其他区域均属于中等风险。总体而言, 玉树县土壤重金属环境已发生了改变, 今后应加强人口聚集区 Hg 源的控制, 以保护其生态环境。

**关键词:** 土壤重金属; 地累积指数; 潜在生态危害指数; 生态风险评价; 玉树县; 三江源区

**中图分类号:** X820.4   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-2043(2016)06-1071-10   doi:10.11654/jaes.2016.06.008

### Assessment of potential ecological risk for soil heavy metals in Sanjiang Source Region: A case study of Yushu County, Qinghai Province

HE Lin-hua, GAO Xiao-hong<sup>\*</sup>

(The Key Laboratory for Qinghai-Tibet Plateau Environment and Resources of Education Ministry, School of Life Sciences and Geography, Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environment Process, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

**Abstract:** The Sanjiang Source Region is the sources of Yangtze River, Yellow River and Lancang River, and Yushu County, Qinghai, is a typical area of this region. An investigation was conducted to evaluate potential ecological risks of heavy metals in soils in Yushu County. A total of 121 soil samples were collected. Geo-accumulation index and potential ecological risk index were used to evaluate the ecological risk of heavy metal pollution. Results indicated that content of heavy metals in soils was higher than the background values of soil heavy metals in Qinghai Province in 1990, with As, Cd and Hg showing significant enrichments and Cd and As exceeding the national standards of soil environmental quality. This indicated that the enrichments of some soil heavy metals in Sanjiang Source Region since the 1990's. Source analysis showed that soil As, Pb, Zn and Cd in Yushu county were derived from soil forming factors; while Hg, Cu, and Cr mainly came from

收稿日期: 2015-11-08

基金项目: 青海省自然科学基金项目(2011-Z-903); 国家自然科学基金项目(40861022); 青海省“人才小高地”建设项目(2015); 青海省重点实验室发展专项: 青海省自然地理与环境过程重点实验室(2014-Z-Y24, 2015-Z-Y01); 青海师范大学校创新基金项目

作者简介: 何林华(1988—), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 从事遥感与 GIS 应用研究。E-mail: helinhua93@163.com

<sup>\*</sup> 通信作者: 高小红 E-mail: xiaohonggao226@163.com

human activities. Manganese was influenced by climate factors. Soil Cd and Hg showed the greatest potential ecological risk, especially Hg. These risks were mainly distributed in the towns or areas along the national highway 214, which was closely related to human activities. Of all watersheds, Jiangqu River watershed had very high ecological risk of soil heavy metals, while the others were medium risk. Overall, heavy metals in Yushu county soils had changed greatly, and the protection of the ecological environment in Yushu County should be strengthened, with special attention paid to control over Hg sources in the densely populated areas.

**Keywords:** soil heavy metal; geo-accumulation index; potential ecological risk assessment; Yushu County; Sanjiang Source Region

土壤是人类最基本的生产要素和各种经济关系的物质载体<sup>[1]</sup>,随着城市化和工业化的快速发展,区域土壤重金属以其较强的毒害性、非生物降解性、稳定性、隐蔽性和滞后性,成为土壤环境污染和预防研究的热点<sup>[2]</sup>。重金属污染阻碍土壤有机质的降解和氮循环,降低土壤酶活性和微生物的代谢活性<sup>[3]</sup>,直接或间接地破坏土壤的生态结构,通过土壤-植物系统迁移累积,进而影响农产品安全乃至人体健康<sup>[4]</sup>。当前土壤重金属污染呈现出多源性、普遍性、潜伏性、不可逆性和难治理性<sup>[5-6]</sup>,为土壤重金属污染的预防和治理带来很大的难度。

近几十年来,国内外学者对土壤重金属的分布、来源与污染评价等的大量研究<sup>[7-10]</sup>表明,现阶段土壤污染主要源于人为活动,包括工农业生产、交通运输及生活垃圾排放等。目前国内土壤重金属相关研究主要集中在东部经济发展水平较高的地区,而对青藏高原的研究相对较少<sup>[11-13]</sup>。因此开展三江源区玉树县土壤重金属潜在生态风险评价研究,可以充实三江源区土壤重金属的研究内容和弥补该区域土壤重金属评价的空白。

三江源区是长江、黄河和澜沧江的发源地,素有“中华水塔”之称,是中国面积最大、海拔最高的天然湿地分布区之一<sup>[14]</sup>。长江、黄河和澜沧江总水量的25%、49%和15%都来自该地区<sup>[15]</sup>。贾慧聪等<sup>[16]</sup>、徐小玲<sup>[17]</sup>和韦晶等<sup>[18]</sup>的研究表明,三江源区随着人类活动影响的增强,生态脆弱度以中度脆弱和强度脆弱为主,中度脆弱区占总面积的45.55%,强度脆弱区占总面积的25.57%;同时48.21%的湿地属于不健康或亚健康状态。由此可见三江源区的环境正日益变化。三江源区土壤重金属环境是否也在发生变化呢?针对这一问题,本研究选择三江源区典型代表区域玉树县为案例区,根据野外采样、实测重金属含量数据,以青海省土壤背景值<sup>[19]</sup>为评价标准,国家土壤环境质量一级标准<sup>[20]</sup>(First class of Chinese Soil Environmental Quality Standard, FQS)为参考,对玉树县土壤重金属累积特征进行探讨并对其潜在生态风险进行评价,以期如玉

树县乃至整个三江源区土壤环境、生态保护和区域可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

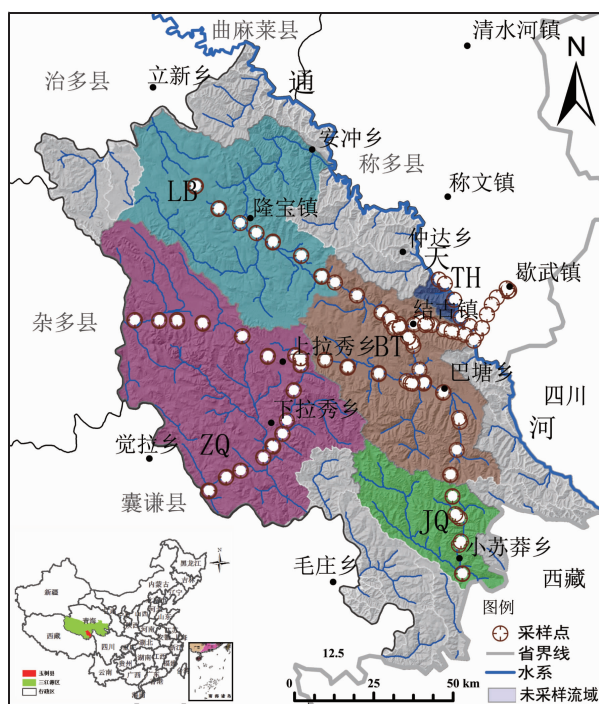
### 1.1 研究区概况

玉树县地处青藏高原东南部,青海省三江源地区的南部,土地总面积为 $1.57 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是一个以牧为主、农牧结合的半农半牧县,藏族占总人口的93%<sup>[21]</sup>。地理范围为 $95^\circ 41' \sim 97^\circ 44' \text{ E}$ , $32^\circ 2' \sim 33^\circ 46' \text{ N}$ ,平均海拔4491 m(统计于30 m分辨率DEM<sup>[22]</sup>)。与西南杂多县、南部囊谦县、西北治多县、北部曲麻莱、称多两县相邻,东与四川、西藏两省交界。境内纵跨长江、澜沧江两大水系,河流纵横,地形复杂,是典型的高山深谷区。气候属于高原亚寒带湿润气候,一年无明显的四季区分,只有冷热两季交替,且日温差大、年温差小,日照长、辐射强烈,绝大部分地区无绝对无霜期,年均温 $2.9^\circ \text{C}$ ,最高温7月平均温度 $12.5^\circ \text{C}$ ,平均年降水量不足500 mm<sup>[23]</sup>。王江山等<sup>[24]</sup>的研究表明该区域近40年来在全球变暖等因素的影响下气候呈现出气温升高、降水减少、蒸发增大的干旱趋势。

### 1.2 采样与分析方法设计

依据国家土壤环境监测技术规范<sup>[25]</sup>,土壤样品选在距离道路200 m以外的地方采集。采样于2012年8月7日至17日天气晴朗、大气状况稳定的时间段进行。采集表层0~30 cm的土样,每份样品采集2 kg左右,用土壤密实袋密封保存,并详细记录采样点及其周围的土地利用类型、土壤质地、植被覆盖度等信息,并利用GPS对采样点进行定位,记录其经纬度。采样点分布如图1所示。

利用玉树县30 m分辨率的DEM<sup>[22]</sup>进行流域提取,结合土壤采样分布格局,以所在流域的最大河流或自然保护区命名,分别为巴塘河流域(BT)、子曲河流域(ZQ)、隆宝滩自然保护区内益曲河流域(LB)、通天河小流域(TH)和江曲河流域(JQ)(图1),未采样区不命名。在后续研究中以流域为单位进行分析和研究。



LB:益曲流域;ZQ:子曲流域;BT:巴塘流域;JO:江曲流域;

TH:通天河边采样区域。下同

LB:Yiqu river watershed; ZQ: Ziqu river watershed; BT: Batang river watershed; JQ: Jiangqu river watershed; TH: sampling area of Tongtian river. The same below

图 1 研究区位置及采样点

Figure 1 Location of studied area and sampling sites

### 1.3 土壤样品重金属含量测定及数据预处理

土壤样品采回后在室内自然风干后研磨,剔除土壤中的根系,动植物残体等杂物,依次过 20 目、60 目和 100 目土壤筛。将三遍过筛处理后的土壤样品取适量送交青海省有色地质测试中心测定土壤中的重金属含量,共测得 121 个样品的 As、Hg、Cu、Pb、Zn、Cr、Mn 和 Cd 元素的含量,其中土壤 Hg 和 As 元素采用原子荧光光度计(AFS-8130)测定,Pb、Cr、Cd、Cu、Zn 元素含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,Mn 元素采用 X 射线荧光光谱仪(Primus-II)测定。

经各元素异常值检测、剔除异常值后,得到 106 个有效数据;经正态性检验,采用 box-cox 方法对非正态分布数据正态化处理,便于后续分析。本研究中的数据计算在 Excel 2010 软件中完成,数据预处理、分析及作图均在 SPSS 22 中完成,研究区域图在 Arc GIS 10.0 中完成。

### 1.4 评价方法

### 1.4.1 地累积指数

地累积指数为 Muller 于 20 世纪 60 年代提出,

因此也称 Muller 指数<sup>[26]</sup>,是一种定量评价重金属污染的分析方法。它不仅考虑自然地质过程造成的背景值影响,也考虑人类活动过程产生的重金属影响,直观反映外源重金属在沉积物中的富集程度。其计算方法见公式(1)<sup>[27]</sup>:

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_i / KB_i) \quad (1)$$

式中: $C_i$ 为评价金属元素的实测含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $B_i$ 为对应评价金属元素的背景值(本研究为青海省背景值), $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [22];  $K$ 为修正系数,一般取值 1.5。

结果共分成无污染( $I_{\text{geo}} \leq 0$ )、轻度污染( $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ )、偏中度污染( $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ )、中度污染( $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ )、偏重度污染( $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ )、重度污染( $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$ )和严重污染( $I_{\text{geo}} > 5$ ) 7个等级<sup>[28]</sup>。

#### 1.4.2 潜在生态危害指数

1980 年瑞典科学家 Håkanson 提出了潜在生态危害指数(Potential ecological risk index, RI)<sup>[29]</sup>, 该方法引入毒性响应系数, 将重金属的环境生态效应与毒理学联系起来, 使评价更侧重于毒理方面, 对重金属潜在的生态危害进行评价, 不仅可以为环境的改善提供依据, 还能够为人们的健康生活提供科学参照<sup>[30]</sup>。其计算见公式(2):

$$RI = \sum E_r^i = \sum (T_r^i \cdot C_r^i) = \sum (T_r^i \cdot \frac{C_m^i}{C_i^i}) \quad (2)$$

式中: $RI$ 为采样点多种重金属综合潜在生态危害指数; $E^i$ 为某单个重金属的潜在生态危害系数; $T^i$ 为对应重金属的毒性响应系数( $As=10$ 、 $Zn=Mn=1$ 、 $Cu=Pb=5$ 、 $Cr=2$ 、 $Cd=30$ 、 $Hg=40$ )<sup>[31]</sup>; $C_i^i$ 为该元素的污染系数; $C_m^i$ 为该元素的实测含量,  $mg \cdot kg^{-1}$ ;  $C_n^i$ 为该元素的评价标准(青海省背景值),  $mg \cdot kg^{-1}$ 。

1980 年 Håkanson 研究湖积物中重金属时提出了  $E$  和  $RI$  的分级标准<sup>[29]</sup>(表 1)。本文研究的重金属元素与 Håkanson 研究的不完全相同, 为了更合理地评价, 本研究中采用李一蒙等<sup>[32]</sup>对分级标准调整的方法对本研究使用的分级标准进行调整, 调整结果如表 1 所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉树县不同小流域重金属含量分析

表 2 统计分析表明,玉树县土壤中的 8 种重金属元素的平均含量均高于 1990 年青海省土壤背景值<sup>[9]</sup>,其中 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Mn 元素含量基本与背景值持平,且未超过国家土壤环境质量一级标准,说明近 20 多年来上述元素在研究区内基本没有富集;而 As、Cd

和 Hg 元素分别是背景值的 1.587、1.830、2.408 倍,同时 As、Cd 超出了国家土壤环境质量一级标准,分别为一级标准的 1.396、1.215 倍,表明这 3 种元素在研究区均有较强的富集现象。在环境地球化学中,土壤元素的累积通常伴随变异性的增强,作为反映环境变量总体波动特征的参数,变异系数在一定程度上可用于表征各元素的累积状况<sup>[33]</sup>,其值小于 15%时为小变异,介于 15%~36%之间时为中等变异,大于 36%时为高度变异<sup>[34]</sup>。由表 2 可知,8 种重金属的变异系数介于 18.0%~51.8%之间,Hg 属于高度变异,其他各元素为中等变异。同时 As、Cd 和 Hg 超背景率分别为 94%、100%和 97%,因此需要对这三种重金属元素加以防范。

区域土壤环境总体分析虽能反映区域现存的基本情况,但不能突出问题所在。通过细分区域能让问题区域凸显出来,对玉树县各流域分析如图 2 所示。各流域内土壤重金属存在很大的差异,As、Pb、Zn、Cr 和 Cd 含量的平均值均在江曲流域含量最高,并且都超过国家一级标准值,表明江曲流域是玉树县土壤重金属含量较高,富集较强的一个流域。

2.2 玉树县土壤重金属空间分布特征

为研究玉树县土壤重金属分布特征,以流域为固定因子、各重金属含量为因变量进行方差分析,并选

择最小显著差法(Least significant difference, LSD)对各流域重金属含量进行多重比较,结果如图 2 和表 3 所示。As、Cu、Pb 和 Zn 含量在各流域内的含量存在极显著差异( $P<0.001$ ),Cr 和 Cd 含量有显著差异( $P<0.05$ ),而 Hg 和 Mn 在各流域内的含量差异不大。Pb、Zn 和 Cd 在江曲流域含量较高,与巴塘流域、子曲流域、益曲流域和通天河小流域的含量均有显著差异( $P<0.001$ ),其他各流域之间差异不显著;As 在江曲流域含量最高,且与子曲流域无显著差异,但与其他流域有显著差异;Cu 在巴塘流域和通天河小流域含量基本相同,并同其他流域存在显著差异( $P<0.001$ )。

2.3 土壤重金属相关性与来源分析

目前的研究表明,多元统计是有效地判断相同来源的重金属的重要方法,在土壤重金属的研究中得到了广泛的应用<sup>[35]</sup>。相同来源的重金属在含量上具有一定的相关性<sup>[36]</sup>,因此可利用相关分析来识别相同来源的重金属。经过显著性检验后的相关系数根据大小划分为弱相关( $|r|<0.3$ )、中等相关( $0.3\leq|r|<0.5$ )和强相关( $|r|\geq 0.5$ )。对玉树县土壤重金属含量进行相关性分析,结果表明(表 4),Zn 与 Pb、Mn、Cr、Cd 通过极显著性检验( $P<0.001$ ),相关系数分别为 0.710、0.600、0.613、0.682,为强相关性;Pb 与 As、Cd 相关系数分别

表 1 本研究的 E 和 RI 分级标准与 Håkanson 分级标准的比较

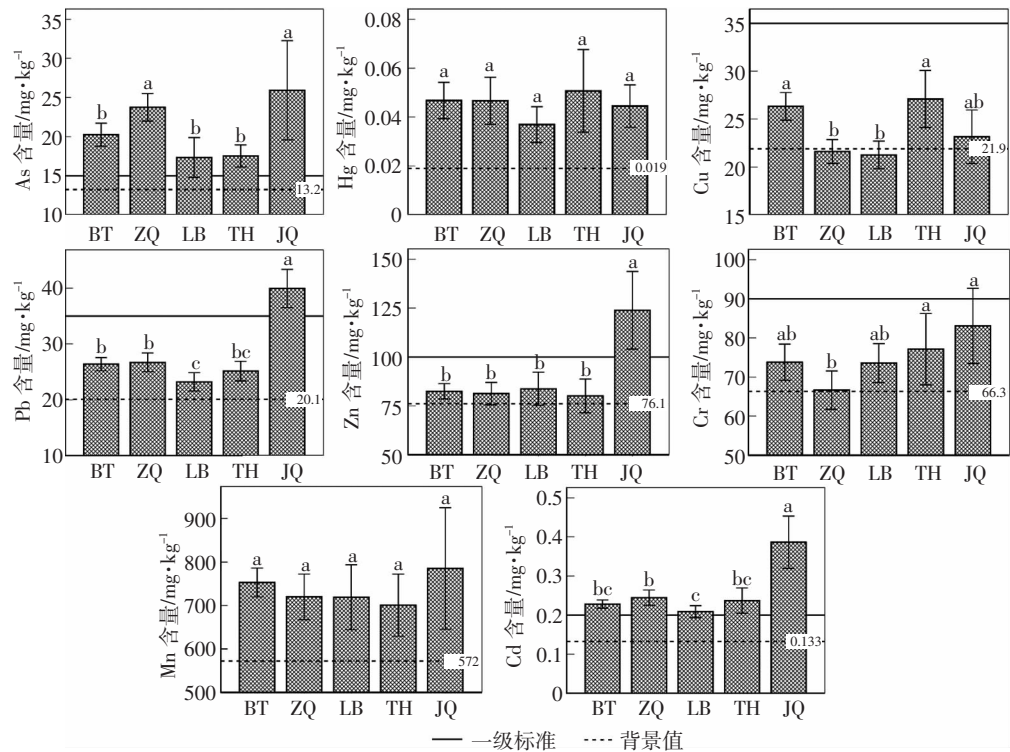
Table 1 Comparison of E and RI standards of Håkanson and this paper for different ecological risk levels of heavy metals

| E          |                |                                               | RI         |                |                              |
|------------|----------------|-----------------------------------------------|------------|----------------|------------------------------|
| Håkanson   | 本研究 This paper | 单污染物环境风险程度<br>Risk degree of single pollutant | Håkanson   | 本研究 This paper | 生态风险级别 Ecological risk level |
| <40        | <40            | 轻微风险 Low risk                                 | <150       | <110           | 轻微风险 low risk                |
| 40~80      | 40~80          | 中等风险 Medium risk                              | 150~300    | 110~220        | 中等风险 Medium risk             |
| 80~160     | 80~160         | 较强风险 High risk                                | 300~600    | 220~440        | 强风险 High risk                |
| 160~320    | 160~320        | 很强风险 Very high risk                           | $\geq 600$ | $\geq 440$     | 极强风险 Very high risk          |
| $\geq 320$ | $\geq 320$     | 极强风险 Extremely high risk                      |            |                |                              |

表 2 玉树县土壤重金属含量统计特征

Table 2 Statistics of heavy metal concentrations at depth 0~20 cm soil in Yushu County

| 重金属<br>Heavy metal | 平均值 Mean/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 标准偏差<br>SD/mg·kg <sup>-1</sup> | 变异系数<br>CV/% | 背景值<br>Background value/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 一级标准 FQS/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 平均/背景值<br>Mean/Background value | 超背景率<br>Percentage of samples exceeding<br>background value/% |
|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| As                 | 20.946                           | 5.592                          | 26.7         | 13.200                                          | 15.000                           | 1.587                           | 94                                                            |
| Hg                 | 0.046                            | 0.024                          | 51.8         | 0.019                                           | 0.150                            | 2.408                           | 97                                                            |
| Cu                 | 24.179                           | 4.755                          | 19.7         | 21.900                                          | 35.000                           | 1.104                           | 71                                                            |
| Pb                 | 26.927                           | 5.509                          | 20.5         | 20.100                                          | 35.000                           | 1.340                           | 93                                                            |
| Zn                 | 85.103                           | 19.103                         | 22.4         | 76.100                                          | 100.000                          | 1.118                           | 66                                                            |
| Cr                 | 72.838                           | 14.449                         | 19.8         | 66.300                                          | 90.000                           | 1.099                           | 70                                                            |
| Mn                 | 735.063                          | 132.216                        | 18.0         | 572.000                                         | —                                | 1.285                           | 93                                                            |
| Cd                 | 0.243                            | 0.060                          | 26.4         | 0.133                                           | 0.200                            | 1.830                           | 100                                                           |



各图中无一级标准线,表明该元素均未超出国家土壤环境质量一级标准(Mn 暂无国家土壤环境质量一级标准);  
图中不同字母代表流域间重金属含量差异的显著性  
If there was no standard reference line in the figure, indicating that the elements have not exceeded the FQS(Mn no FQS);  
The difference of heavy metal contents in different letters in the map

图 2 流域间的重金属含量差异(平均值±标准误差)

Figure 2 Difference of heavy metal content in different watersheds(mean±SE)

表 3 流域对重金属影响的方差分析

| 重金属<br>Heavy metals | 流域 Watershed |       |
|---------------------|--------------|-------|
|                     | F-test       | P     |
| As                  | 7.976**      | 0.000 |
| Hg                  | 0.654        | 0.625 |
| Cu                  | 9.048**      | 0.000 |
| Pb                  | 25.433**     | 0.000 |
| Zn                  | 13.150**     | 0.000 |
| Cr                  | 2.911*       | 0.025 |
| Mn                  | 0.838        | 0.504 |
| Cd                  | 19.766*      | 0.000 |

注:\* 为  $P<0.05$ ; \*\* 为  $P<0.01$ 。下同。  
Note: \*indicates  $P<0.05$ ; \*\*indicates  $P<0.01$ . The same below.

为 0.507、0.493, 达到极显著水平 ( $P<0.001$ ), 为强相关性; Cu 与 Cr 为强相关, 相关系数 0.537, 通过极显著性检验。As、Mn 与 Cd、Pb、Cr 与 Mn, 达到了中等相关, 而 As 与 Cu、As 与 Cr、Cu 与 Cd 之间的相关性不显著。

对正态化后的数据做 KMO 和 Bartlett 球形度检

验表明, 变换后的数据适合做因子分析, 因重金属含量数据单位统一(均为  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 数据取值范围同在一个级别之内, 所以因子分析时采取主成分-协方差矩阵提取方法进行分析。分析结果(图 3)表明, 8 种重金属因子分析提取出了 3 个因子, 累积贡献率高达 99.70%, 分别可解释方差的 73.67%、25.09% 和 0.93%。PC3 虽然解释的方差贡献率较少, 但 Mn 在其上有较

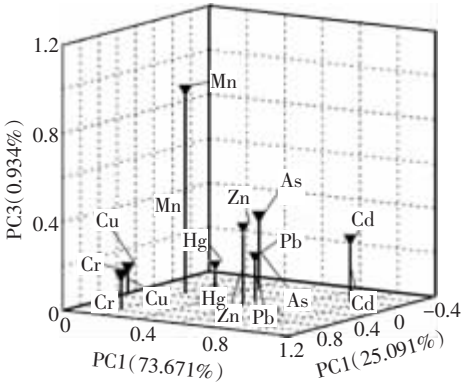


图 3 玉树县土壤重金属因子载荷

Figure 3 Factor loadings of soil heavy metals in Yushu County

高的载荷,因此将因子 3 也进行提取(图 3)。结合相关分析与主成分分析可知,As、Pb、Zn 和 Cd 同源,Hg、Cu 和 Cr 同源,Mn 具有独自的来源。由图 3 可知,在 PC1 上 As、Pb、Zn 和 Cd 有较高的载荷,林燕萍等<sup>[35]</sup>的研究表明该类元素来源主要与成土因素有关,因此 PC1 为成土因子;在第二主成分上 Hg、Cu 和 Cr 载荷较高,且具有较高的相关性,赵庆龄等<sup>[37]</sup>综述前人的成果表明该类元素来源与人类活动有关,因此 PC2 为人为因子;在 PC3 上 Mn 具有较高的载荷,段永蕙等<sup>[38]</sup>的研究表明 Mn 的含量与气候条件有着密切的联系,因此 PC3 为气候因子。

2.4 土壤重金属污染及潜在生态风险评价

地累积指数评价(表 5)显示,As、Cu、Pb、Zn、Cr 和

Mn 在玉树县内为无污染或轻度污染,没有偏重度级别及以上程度的污染;Cd 有 3.77%处于中度污染;Hg 有 83.01%为轻度污染或无污染,13.2%为偏中度污染,3.77%为中度污染,这些污染主要出现在巴塘流域与子曲流域。表 6 显示在玉树县及各流域内 Hg 和 Cd 的单污染物危害风险最大,Hg 除在隆宝滩自然保护区为中等风险,在其他流域均达到较强危害;Cd 除在江曲流域为较强风险外,其他流域内均为中等风险。由图 4 可知,Cd 的生态危害主要分布在江曲流域的小苏莽乡附近;依据实测数据统计,研究区内 91.5%的样点为 Hg 元素中等危害或较强危害,仅 2.8%为轻微危害,另 5.7%为很强危害与极强危害,同时由图 4 可以看出很强危害和极强危害样点均分布在国道 214

表 4 玉树县表层土壤重金属的相关关系矩阵

Table 4 Correlation matrix of heavy metals in 0~20 cm soil in Yushu county

| <i>r</i> | As      | Hg      | Cu      | Pb      | Zn      | Cr      | Mn      | Cd    |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| As       | 1.000   |         |         |         |         |         |         |       |
| Hg       | 0.124   | 1.000   |         |         |         |         |         |       |
| Cu       | -0.087  | 0.260** | 1.000   |         |         |         |         |       |
| Pb       | 0.507** | 0.224*  | 0.260** | 1.000   |         |         |         |       |
| Zn       | 0.350** | 0.334** | 0.250** | 0.710** | 1.000   |         |         |       |
| Cr       | 0.111   | 0.200*  | 0.537** | 0.443** | 0.613** | 1.000   |         |       |
| Mn       | 0.399** | 0.213*  | 0.290** | 0.413** | 0.600** | 0.491** | 1.000   |       |
| Cd       | 0.493** | 0.315** | 0.095   | 0.621** | 0.682** | 0.265** | 0.486** | 1.000 |

表 5 玉树县土壤重金属地累积指数评价

Table 5  $I_{geo}$  of soil heavy metals in Yushu county

| 污染程度 Pollution level     | 样点占比/% |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                          | As     | Hg    | Cu    | Pb    | Zn    | Cr    | Mn    | Cd    |
| 无污染 Pollution-free       | 45.28  | 15.09 | 93.40 | 79.25 | 94.34 | 95.28 | 82.08 | 23.58 |
| 轻度污染 Slight pollution    | 53.77  | 67.92 | 6.60  | 20.75 | 5.66  | 4.72  | 17.92 | 72.64 |
| 偏中度污染 Moderate pollution | 0.94   | 13.21 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 3.77  |
| 中度污染 Medium pollution    | 0.00   | 3.77  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |

表 6 玉树县土壤重金属潜在生态风险( $E_i^r$ )和风险指数( $RI$ )评价(平均值±标准误差)

Table 6 Potential ecological risk coefficients( $E_i^r$ ) and risk indices( $RI$ ) of soil heavy metals in Yushu county(mean ±SE)

| 流域 Watershed     | 潜在生态危害系数 $E_i^r$ |           |         |         |         |         |         |           | 风险指数 $RI$  | 风险程度 Risk level |
|------------------|------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|------------|-----------------|
|                  | As               | Hg        | Cu      | Pb      | Zn      | Cr      | Mn      | Cd        |            |                 |
| BT               | 15.3±3.6         | 98.5±50.2 | 6.0±1.1 | 6.6±0.9 | 1.1±0.2 | 2.2±0.4 | 1.3±0.2 | 51.5±7.6  | 182.5±49.6 | 中 Medium        |
| ZQ               | 18.0±3.6         | 98.2±55.5 | 4.9±0.8 | 6.6±1.1 | 1.1±0.2 | 2.0±0.4 | 1.3±0.3 | 55.2±12.2 | 187.3±61.5 | 中 Medium        |
| LB               | 13.1±3.6         | 77.7±28.8 | 4.9±0.6 | 5.8±0.8 | 1.1±0.2 | 2.2±0.3 | 1.3±0.2 | 47.1±6.5  | 153.2±34.4 | 中 Medium        |
| TH               | 13.3±1.9         | 106.7±64  | 6.2±1.2 | 6.3±0.8 | 1.1±0.2 | 2.3±0.5 | 1.2±0.2 | 53.5±13.2 | 190.6±71.1 | 中 Medium        |
| JQ               | 19.6±6.8         | 93.7±25.8 | 5.3±0.9 | 9.9±1.2 | 1.6±0.4 | 2.5±0.4 | 1.4±0.3 | 87.2±21.3 | 221.2±35.5 | 强 High          |
| 玉树县 Yushu County | 15.9±4.2         | 96.3±49.9 | 5.5±1.1 | 6.7±1.4 | 1.1±0.3 | 2.2±0.4 | 1.3±0.2 | 54.9±14.5 | 183.9±55.1 | 中 Medium        |

注:BT:巴塘流域;ZQ:子曲流域;LB:益曲流域;TH:通天河边采样区域;JQ:江曲流域。

Note:BT: Batang river watershed; ZQ: Ziqu river watershed; LB: Yiqu river watershed; TH: sampling area of Tongtian river; JQ: Jiangqu river watershed.

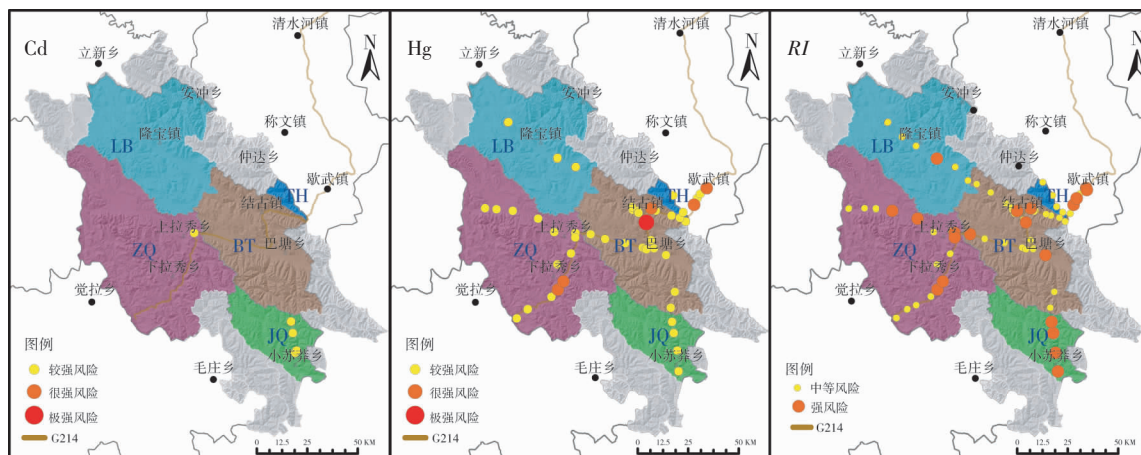


图4 Cd、Hg元素和RI的空间分布

Figure 4 Spatial distributions of Cd, Hg, and RI

沿线上人口聚集的歇武镇、结古镇和下拉秀乡等地段,与地累积指数评价结果相一致。由此可见人类活动对Hg的分布有很大的影响。综合潜在生态危害指数评价表明,除江曲流域属于强风险区以外,其他流域均处于中等风险。

### 3 讨论

三江源区不仅维系着中国和周边国家的生态环境安全,是区域可持续发展的生态屏障,也是自然生态系统最敏感、生态环境十分脆弱的地区<sup>[8]</sup>。三江源地区生态环境以中度脆弱区为主,所占面积比例为45.76%,另有25.57%为重度与极重脆弱区域,这些区域集中分布在地形复杂的裸地、低植被覆盖地带及人口、经济活动压力较大的东北部地区<sup>[22]</sup>。玉树县虽地处三江源区南部,但地形复杂,山地众多,随着玉树灾后重建的进行,其人口迅速增加,经济、交通发展迅速,因此玉树县也是三江源生态重度脆弱的区域,可作为三江源的代表区域。

玉树县土壤重金属分析表明该区域重金属含量均超过背景值,属于中等潜在风险,其中单元素Hg的潜在危害最为严重,且均分布在国道214沿线上人口聚居的城镇。冯玲等<sup>[39]</sup>对三江源区玉树县和玛多县土壤Hg含量分布特征的研究表明,玉树县土壤Hg含量与玉树县二三产业发达、城镇化水平高有关。王立辉等<sup>[40]</sup>研究表明,随着城市化进程的加剧,城市产生了大量的含Hg固体废弃物,包括温度计、血压计、电池、荧光灯泡以及一些废弃电子产品,这些废弃物中的Hg侵入土壤,从而导致城镇周围土壤遭受Hg的污染。因此,人口聚集区Hg的含量较高,风险较大,

今后应加强Hg源的控制和生活垃圾的分类处理。

研究表明,江曲流域的土壤重金属Pb、Zn和Cd均极显著地高于其他流域,且超出国家土壤环境质量一级标准,富集度较高。很多研究<sup>[10,34,41]</sup>表明,土壤重金属来源于工农业生产、汽车尾气排放和成土等因素,然而该区域内人口稀少,交通不便,没有现代化的农业和工业分布,这些来源均难以解释江曲流域重金属异常的原因。分析认为:首先,该区域没有现代化工农业和过度的人为干扰,基本能排除自然因素以外的其他来源;另外,来源分析已经表明Pb、Zn和Cd含量高主要与成土因素有关。相关资料和已有研究<sup>[42-43]</sup>表明,该区域位于三江北段成矿带和玉树地区中咱-中甸陆块,在该区域内Pb、Zn和Cd为异常元素,富集较高;同时盛产Fe、Pb、Zn、Cu等多金属的赵卡隆矿床就位于江曲流域<sup>[44]</sup>。由此可见江曲流域重金属异常可能是由于其所处位置为成矿地段,从而表现出重金属整体偏高的现象。因此在该区域内未来应当加强环境保护。

### 4 结论

(1)玉树县As元素和Cd元素的平均含量高于国家土壤环境质量一级标准,两者具有轻微的富集现象;其他元素(Cu、Pb、Zn、Mn、Cr、Hg)的平均含量均低于国家一级标准。8种元素平均含量均超过青海省1990年背景值。

(2)玉树县5个小流域中,江曲流域重金属As、Pb、Zn、Cr和Cd的含量平均值均高于其他流域,这与该地区位于多金属成矿带上有关;隆宝滩自然保护区的土壤重金属含量较低,土壤环境质量好于其

他流域。

(3) 玉树县土壤重金属 As、Pb、Zn 和 Cd 主要与成土因素有关, Hg、Cu 和 Cr 受人类活动影响较大, Mn 来源于气候的影响。

(4) 单个重金属元素中 Cd 和 Hg 的危害最大, 尤其是 Hg 已出现很强风险和极强风险, 这些风险均分布在国道 214 沿线人口聚集的城镇和地段。

(5) 重金属危害和综合潜在风险评价结果显示, 玉树县除江曲流域属于强风险外, 其他流域均属于中等风险。

#### 参考文献:

- [1] 王 军, 陈振楼, 王 初, 等. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 647-653.  
WANG Jun, CHEN Zhen-lou, WANG Chu, et al. Heavy metal content and ecological risk warning assessment of vegetable soils in Chongming Island, Shanghai City[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(3): 647-653.
- [2] 李淑敏, 李 红, 孙丹峰, 等. 北京耕作土壤 4 种重金属空间分布的网络特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 208-215.  
LI Shu-min, LI Hong, SUN Dan-feng, et al. Network analysis of agricultural soil heavy metals' spatial distribution in Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(23): 208-215.
- [3] Kandeler F, Kampichler C, Horak O. Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 23(3): 299-306.
- [4] 陈英旭, 陈新才, 于明革. 土壤重金属的植物污染化学研究进展[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(12): 42-47.  
CHEN Ying-xu, CHEN Xin-cai, YU Ming-ge. Research progress of heavy metals pollution chemistry in soil-plant system[J]. *Environment Pollution & Control*, 2009, 31(12): 42-47.
- [5] 林娜娜, 许秋瑾, 胡小贞, 等. 江西崇义县小江流域重金属污染现状及评价[J]. 环境科学研究, 2014, 27(9): 1051-1060.  
LIN Na-na, XU Qiu-jin, HU Xiao-zhen, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment in Xiaojiang River basin in Chongyi County, Jiangxi Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(9): 1051-1060.
- [6] 贾 琳, 杨 飞, 张胜田, 等. 土壤环境功能区划研究进展浅析[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(1): 107-114.  
JIA Lin, YANG Fei, ZHANG Sheng-tian. Analysis on soil environmental function zoning study progress[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2015, 36(1): 107-114.
- [7] Sun Y B, Zhou Q X, Xie X K, et al. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1-3): 455-462.
- [8] 张爱星, 聂义宁, 季宏兵, 等. 北京市水源涵养区上游万庄金矿田土壤重金属空间分布、形态特征及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2321-2328.  
ZHANG Ai-xing, NI Yi-ning, JI Hong-bing, et al. Spatial distribution, fractionation and pollution assessment of heavy metals in Wanzhuang gold mining field in upstream part of water conservation area of Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12): 2321-2328.
- [9] Salah E, Turki A, Noori S. Heavy metals concentration in urban soils of Fallujah City, Iraq[J]. *Journal of Environment and Earth Science*, 2013, 3(11): 100-113.
- [10] 徐明露, 方凤满, 林跃胜. 湿地土壤重金属污染特征、来源及风险评价研究进展[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 762-768.  
XU Ming-lu, FANG Feng-man, LIN Yue-sheng. Advances in source, pollution characteristics and ecological assessment of heavy metals in wetland soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3): 762-768.
- [11] 汤 洁, 陈初雨, 李海毅, 等. 大庆市建成区土壤重金属潜在生态危害和健康风险评价[J]. 地理科学, 2011, 31(1): 117-122.  
TANG Jie, CHEN Chu-yu, LI Hai-yi, et al. Assessment on potential ecological hazard and human health risk of heavy metals in urban soils of Daqing City[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(1): 117-122.
- [12] 杨忠平, 卢文喜, 刘新荣, 等. 长春市城区表层土壤重金属污染来源解析[J]. 城市环境与城市生态, 2009, 22(5): 29-33.  
YANG Zhong-ping, LU Wen-xi, LIU Xin-rong, et al. Sources identification of heavy metals in urban soil of Changchun based on principal component analysis[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2009, 22(5): 29-33.
- [13] 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2152-2159.  
CHEN Tao, CHANG Qing-rui, LIU Jing, et al. Pollution and potential environment risk assessment of soil heavy metals in sewage irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2152-2159.
- [14] 刘敏超, 李迪强, 温琰茂, 等. 三江源地区生态系统生态功能分析及其价值评估[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9): 1280-1286.  
LIU Min-chao, LI Di-qiang, WEN Yan-mao, et al. The spatial analysis of soil retention function in Sanjiangyuan region and its value evaluation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9): 1280-1286.
- [15] 温兆飞, 张树清, 陈 春, 等. 三江源区湖泊和沼泽遥感影像分类研究[J]. 湿地科学, 2010, 8(2): 132-138.  
WEN Zhao-fei, ZHANG Shu-qing, CHEN Chun, et al. Classification of remote sensing image for lake and marsh in the area of three river sources based on decision tree using MODIS data[J]. *Wetland Science*, 2010, 8(2): 132-138.
- [16] 贾慧聪, 曹春香, 马广仁, 等. 青海省三江源地区湿地生态系统健康评价[J]. 湿地科学, 2011, 9(3): 209-217.  
JIA Hui-cong, CAO Chun-xiang, MA Guang-ren, et al. Assessment of wetland ecosystem health in the source region of Yangtze, Yellow and Yalu Tsangpo Rivers of Qinghai Province[J]. *Wetland Science*, 2011, 9(3): 209-217.
- [17] 徐小玲. 三江源地区生态脆弱变化及经济与生态互动发展模式研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2007.  
XU Xiao-ling. Research on ecological vulnerability change and interaction development model of economy and ecology in Sanjiangyuan Region[D]. Xi'an: Shaanxi University Normal, 2007.

- [18] 韦 晶, 郭亚敏, 孙林, 等. 三江源地区生态环境脆弱性评价[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1968–1975.
- WEI Jing, GUO Ya-min, SUN Lin, et al. Evaluation of ecological environment vulnerability for Sanjiangyuan area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(7): 1968–1975.
- [19] 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 Environmental Monitoring Station. Chinese soil element background value[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [20] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- State Bureau of Environmental Protection, State Bureau of Technical Supervision. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils[S]. Beijing: China Standards Press, 1995.
- [21] 青海省统计局, 国家统计局青海调查总队. 青海省统计年鉴 2013 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- Qinghai Provincial Bureau of statistics, Qinghai Investigation Corps of the National Bureau of statistics. Qinghai statistical yearbook 2013[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [22] 中国科学院计算机网络信息中心. 地理空间数据云[EB/OL]. <http://www.gscloud.cn>.
- Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences. Geospatial Data Cloud[EB/OL]. <http://www.gscloud.cn>.
- [23] 张忠孝. 青海地理[M]. 西宁: 青海省人民出版社, 2004.
- ZHANG Zhong-xiao. Qinghai geography[M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 2004.
- [24] 王江山, 李海红, 徐正旭. 三江源生态环境监测研究[J]. 气象, 2003, 29(11): 49–54.
- WANG Jiang-shan, LI Hai-hong, XU Zheng-xu. On ecological environment monitoring of Sanjiangyuan area[J]. *Meteorological Monthly*, 2003, 29(11): 49–54.
- [25] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004.
- State Environmental Protection Administration. HJ/T 166—2004 The technical specification for soil environmental monitoring[S]. Beijing: China Environmental Press, 2004.
- [26] Muller G. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2(3): 108–118.
- [27] 于云江, 胡林凯, 杨 彦, 等. 典型流域农田土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2010, 23(12): 1523–1527.
- YU Yun-jiang, HU Lin-kai, YANG Yan, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils of a typical basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(12): 1523–1527.
- [28] 秦 雷, 解东昊, 朱卫红, 等. 图们江流域河岸带土壤重金属污染特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 120–125.
- QIN Lei, XIE Dong-hao, ZHU Wei-hong, et al. The characteristics of riparian heavy metal pollution in Tumen River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(8): 120–125.
- [29] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [30] 郭 平, 谢忠雷, 李 军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. 地理科学, 2005, 25(1): 108–112.
- GUO Ping, XIE Zhong-lei, LI Jun, et al. Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of Changchun City[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1): 108–112.
- [31] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2009, 31(2): 112–115.
- XU Zheng-qí, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 31(2): 112–115.
- [32] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1037–1044.
- LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3): 1037–1044.
- [33] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, et al. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo(sicily), Italy[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 300(1–3): 229–243.
- [34] 马 群, 赵庚星. 集约农区不同土地利用方式对土壤养分状况的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1834–1843.
- MA Qun, ZHAO Geng-xing. Effects of different land use types on soil nutrients in intensive agricultural region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(11): 1834–1843.
- [35] 林燕萍, 赵 阳, 胡恭任. 多元统计在土壤重金属污染源解析中的应用[J]. 地球与环境, 2011, 39(4): 536–542.
- LIN Yan-ping, ZHAO Yang, HU Gong-ren, et al. The application of multivariate statistical analysis in the pollution source recognition and analysis of heavy metals in soils[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(4): 536–542.
- [36] Zhu J J, Cui B S, Yang Z F, et al. Spatial distribution and variability of heavy metals contents in the top soil along roadside in the Longitudinal Range–Gorge Region in Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 146–153.
- [37] 赵庆龄, 张乃弟, 路文如. 土壤重金属污染研究回顾与展望 II: 基于三大学科的研究热点与前沿分析 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 102–137.
- ZHAO Qing-ling, ZHANG Nai-di, LU Wen-ru. Research review and prospect on soil heavy metals pollution II: Research focus and analysis based on three major disciplines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(7): 102–137.
- [38] 段永蕙, 张乃明. 山西土壤锰含量及影响因素研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(4): 337–339.
- DUAN Yong-hui, ZHANG Nai-ming. Distribution and affecting factors of manganese in soils of Shanxi[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(4): 337–339.
- [39] 冯 玲, 张 威, 修光利, 等. 三江源区玉树县和玛多县土壤汞含量分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(2): 262–267.
- FENG Ling, ZHANG Wei, XIU Guang-li, et al. Distribution of mercury in soil of Yushu and Maduo in the three rivers source region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(2): 262–267.
- [40] 王立辉, 邹正禹, 张翔宇, 等. 土壤中汞的来源及土壤汞污染修复技

术概述[J]. 现代化工, 2015, 35(5):43-47.

WANG Li-hui, ZOU Zheng-yu, ZHANG Xiang-yu, et al. Review of sources of mercury in soil and remediation techniques for mercury contaminated soil[J]. *Modern Chemical Industry*, 2015, 35(5):43-47.

[41] 李 倩, 秦 飞, 季宏兵, 等. 北京市密云水库上游金矿区土壤重金属含量、来源及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2384-2394.

LI Qian, QIN Fei, JI Hong-bing, et al. Contents, sources and contamination assessment of soil heavy metals in gold mine area of upstream part of Miyun Reservoir, Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12): 2384-2394.

[42] 徐善法, 袁志亮, 陈建平. 三江北段地球化学特征研究[J]. 物探与化探, 2007, 31(2):99-105.

XU Shang-fa, YUAN Zhi-liang, CHEN Jian-ping. Geochemical char-

acteristics of the northern part of Sanjiang (Jinshajiang-Lancangjiang-Nujiang) region[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2007, 31(2):99-105.

[43] 唐 博, 康亚龙, 潘杨辉, 等. 青海玉树地区中咱-中甸陆块找矿前景[J]. 金属矿山, 2015, 44(7):96-100.

TANG Bo, KANG Ya-long, PAN Yang-hui, et al. Analysis of prospecting potential in Zhongza-Zhongdian block, Yushu Region, Qinghai Province[J]. *Metal Mine*, 2015, 44(7):96-100.

[44] 李 欢, 奚小双, 吴城明, 等. 青海玉树赵卡隆铁铜多金属矿床地质特征及成因探讨[J]. 地质与勘探, 2011, 47(3):380-387.

LI Huan, XI Xiao-shuang, WU Cheng-ming, et al. Geology and metallogenesis of the Zhaokalong iron-copper-polymetallic ore deposit in Yushu, Qinghai Province[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(3):380-387.



## 新书推介

### 有机废水处理的 basic 设计与计算

王光裕 编

本书分为上、下两篇, 上篇主要介绍有机污染废水处理设计的基本计算方法, 内容包括传统活性污泥法、A-B 两段活性污泥法、缺氧(水解)拟好氧工艺、厌氧拟好氧工艺、厌氧拟缺氧拟好氧工艺、SBR 活性污泥法、氧化沟工艺、接触氧化法、生物流化床、有机污染物废水的特殊生物处理工艺、厌氧生物处理工艺; 下篇主要针对高浓度有机污染物废水的特点, 进一步制订生物处理方案并进行初步基本计算, 内容包括高浓度有机废水常用的预处理方法、高浓度难降解有机废水生物预处理方法、高盐度高浓度污染物废水的处理、高含硫酸盐与氮的有机工业废水处理、含磷有机工业废水的处理、中间体生产废水的处理。

※书号: 9787122254801

※定 价: 98.0 元

※开本: 16

※出版日期: 2016 年 2 月



### 绿色环保从我做起丛书——垃圾分类

高英杰 唐在林 主编

《垃圾分类》是《绿色环保从我做起丛书》的分册之一。本书通过生动有趣的漫画和深入浅出的文字, 向读者介绍了垃圾分类对于绿色环保的重要意义、实用的生活垃圾分类法、科学利用可以变废为宝、要养成对随地废弃垃圾说“No”的好习惯、国外垃圾分类的经验分享等精彩内容。

※书号: 9787122247827

※定 价: 29.8 元

※开本: B5

※出版日期: 2016 年 2 月



如需更多图书信息, 请登录 [www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)

服务电话: 010-64518888, 64518800(销售中心)

网上购书可登录化学工业出版社天猫旗舰店: <http://hxgycbs.tmall.com>

邮购地址: (100011) 北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

如要出版新著, 请与编辑联系, 联系电话: 010-64519525。