

doi: 10.11720/wtyht.2022.1077

孟伟, 莫春虎, 刘应忠.黔西北地区土壤重金属地球化学背景及管理目标值[J].物探与化探,2022,46(1):250-257.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1077

Meng W, Mo C H, Liu Y Z. Geochemical background and management target values of heavy metals in soil in northwestern Guizhou Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 250-257. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1077

# 黔西北地区土壤重金属地球化学背景及管理目标值

孟伟, 莫春虎, 刘应忠  
(贵州省地质调查院, 贵州 贵阳 550081)

**摘 要:** 基于贵州省毕节地区 1:25 万土地质量地球化学调查的 1 308 件深层土壤样品重金属含量数据,研究了土壤重金属含量分布及其地球化学背景特征,与全国土壤比较,黔西北土壤重金属地球化学背景值显著高于全国土壤元素背景值,但是,与我国西南地区土壤元素背景值接近。黔西北地区土壤重金属含量与地质背景关系密切,不同地质单元区土壤重金属含量存在显著差异,石炭系地层发育的土壤呈 Pb、Zn 地球化学高背景,二叠系中统风化形成的土壤呈 Cd、Hg 地球化学高背景,黔西北地区不仅存在土法炼锌造成的土壤重金属污染,土壤重金属地球化学高背景也是影响土壤重金属富集的重要因素。统计表明,黔西北地区二叠系中统风化土壤 Cd 管理目标值高于我国农用地土壤 Cd 风险管制值( $2.0\times10^{-6}$ ),认为在确定黔西北地区土壤重金属管理目标时,应充分考虑不同地质单元区土壤重金属地球化学背景值差异及其生态环境效应的影响。

**关键词:** 地球化学背景;土壤;重金属;管理目标值;贵州

**中图分类号:** P632      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2022)01-0250-08

## 0 引言

土壤元素背景是指未受人类活动影响的自然环境中土壤的化学元素含量,土壤元素含量受成土母质、成土过程、土壤质地等多种地球化学作用而不同<sup>[1-2]</sup>,深层土壤因受到较少的人类活动影响,其化学元素组成更接近成土母质,更能反映区域土壤地球化学背景<sup>[3-5]</sup>。土壤元素背景是评价土壤污染程度、制定土壤环境质量标准的重要参考,部分发达国家将背景值作为土壤环境质量的目標值<sup>[6]</sup>,国内也有学者提出中国土壤环境质量的管控也应以土壤元素背景为基础,制定出合理的管理目标<sup>[7]</sup>。

贵州省西北地区地处上扬子西域成矿带,矿产资源丰富<sup>[8]</sup>,矿产开采与选冶历史悠久<sup>[9]</sup>,矿区土壤环境普遍存在土壤重金属污染严重的情况<sup>[10-11]</sup>。而评价矿区外的土壤环境时,由于所引用的区域重金属背景值不同,对于土壤重金属环境质量评价还有不同的认识<sup>[12-16]</sup>,与省级土壤背景值对比时,土

壤环境质量评价认为 Cd、Hg、Cu、Cr 和 Ni 的生态风险高<sup>[12-15]</sup>,部分地区还有 Hg 的高生态风险<sup>[12]</sup>,而与深层土壤重金属含量对比时,普遍存在本区 Cu、Ni 和 Cr 在表层土壤亏损,Cd、Pb 和 Zn 在表层土壤富集的现象<sup>[16]</sup>。因此,在黔西北地区开展土壤环境评价与治理,必须结合区域土壤重金属背景。已有研究表明,区域土壤重金属污染与其地质背景存在联系,在中国三峡地区地质背景是流域土壤 Cd 超标的主要原因<sup>[17]</sup>,中国南方岩溶区土壤 Cd 及其他重金属的超标与碳酸盐岩成壤过程中重金属次生富集密切相关<sup>[18-19]</sup>,同时一些特殊岩性(黑色岩系、玄武岩)风化形成的土壤也会造成区域土壤重金属超标<sup>[20-21]</sup>。

多目标区域地球化学调查系统采集了黔西北地区深层土壤样品,分析了其元素含量。黔西北土壤重金属环境引人关注,然而当前对本区深层土壤重金属地球化学特征的研究较少。本文对黔西北深层土壤样品重金属含量进行统计分析,作为区域土壤重金属背景的参考,将有助于深化对黔西北地区地

球化学特征认识,并可为区域土壤重金属污染评价、土壤重金属修复管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处贵州省西北部(图 1),属于贵州省毕节市,主要包括威宁县、赫章县、纳雍县、七星关区、大方县。本区主要出露三叠系、二叠系、石炭系、寒武系地层,三叠系以灰岩(夜郎组、嘉陵江组)、白云岩(关岭组、杨柳井组、改茶组)为主,碎屑岩(二桥组、飞仙关组、东川组)出露面积小,二叠系上统以碎屑岩(龙潭组、宣威组)为主,中统以灰岩(栖霞组、茅口组)为主,二叠系玄武岩出露面积也较广,主要分布在威宁县、赫章县及纳雍县,石炭系以灰岩(黄龙组、马平组、威宁组、上司组、汤耙沟组)、白云岩(摆佐组)为主,碎屑岩以祥摆组砂岩为主,寒武系以白云岩(娄山关组、石冷水组)、灰岩(清虚洞组)为主<sup>[22]</sup>。

1.2 样品采集与处理

样品采集与分析按照《多目标区域地球化学调查规范(1:25 万)》执行,在地形图上以偶数方里网为界,以 4 km×4 km 为单位格子(大格),在大格内按 2 km×2 km 划出 4 个小格,小格为深层土壤样品基本采样单元,大格内 4 件小格深层土壤样品按照等质量混合为 1 件组合样品分析。土壤样品在没有明显污染的空旷地带取样,一般为农田、菜地等地势低洼处,采样避免基岩风化层,采集的样品全部为土壤。土壤样品室内风干后,采用尼龙筛分样,截取

20 目(0.8 mm)以下粒径的样品组合分析。共采集土壤样品 5 052 件,组合分析样品 1 308 件。

1.3 样品分析

土壤样品的分析测定由自然资源部成都矿产资源监督检测中心完成。采用电感耦合等离子体质谱法(酸溶 ICP-MS)测定 Cd、Cr、Cu、Ni,主测仪器为赛默飞公司等离子体质谱仪(iCAP Q),Cd、Cr、Cu、Ni 检出限分别为  $0.03\times10^{-6}$ 、 $5\times10^{-6}$ 、 $1\times10^{-6}$ 、 $2\times10^{-6}$ ;用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定 Pb、Zn,主测仪器为 X 射线荧光光谱仪(日本理光株式会社 ZSX Primus IV),Pb、Zn 检出限分别为  $2\times10^{-6}$ 、 $4\times10^{-6}$ ;原子荧光光谱法(AFS)测定 As、Hg,主测仪器为原子荧光光度计(北京吉天仪器公司 AFS-8220),As、Hg 检出限分别为  $1\times10^{-6}$ 、 $0.000\ 5\times10^{-6}$ ,所采用的分析方法检出限全部符合相关规范要求。以国家一级土壤标准物质(GBW 系列)进行准确度、精密度监控,随机抽查异常点监控分析质量,按照《多目标区域地球化学调查规范(1:25 万)》样品准确度、精密度计算方案,土壤样品准确度、精密度均为 100%,重复样品总体分析合格率 99%以上,确保了数据分析和全国范围的可比性。

1.4 土壤地球化学背景及管理目标值计算

计算区域元素地球化学背景值时,要对地球化学数据分布形式(正态或对数正态)进行检验,当数据既不服从正态也不服从对数正态分布时,剔除算术平均值加(减)3 倍标准离差的离群值后,再次进行分布形式的检验,以使数据服从正态或对数正态分布。当剔除后的数据仍不能满足正态或对数正态分布时,采用中位值与绝对中位值差的稳健统计方

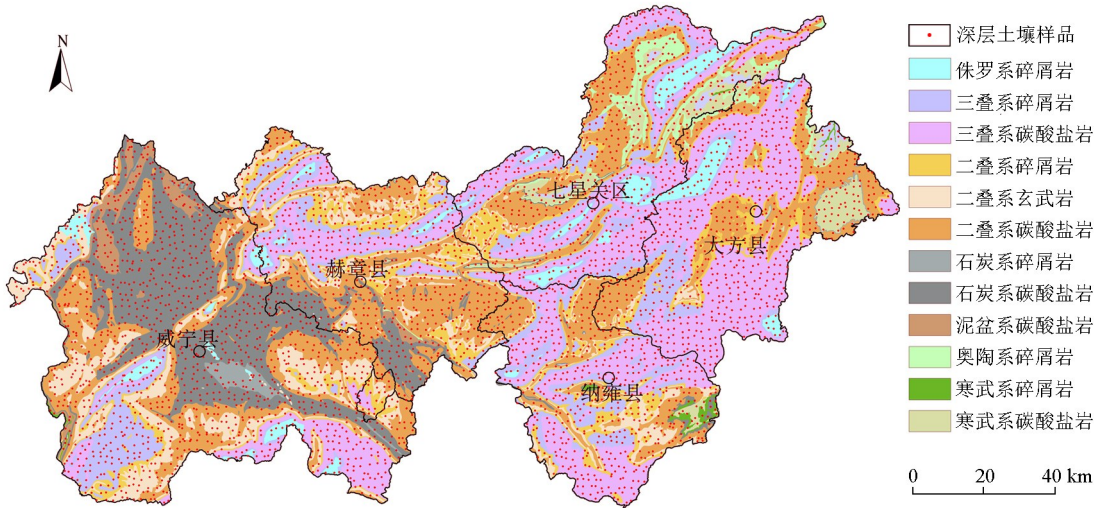


图 1 采样点位  
Fig.1 Distribution of the deep soil samples

法来描述地球化学背景值的变化范围,以消除一些与均值相差较远的离群数据在求均值和方差时,尤其是求方差时对结果产生较大的影响<sup>[3]</sup>。

土壤管理目标值 (management target value, MTV)是指土壤中微量金属元素的现时含量水平超出其背景变化浓度区间,表明土壤中微量重金属元素的自然背景被改变,它在理论上等于地表土壤微量金属元素背景值变化区间的上限值,高于该值意味着自然背景含量已被改变。土壤管理目标值可作为各种土壤污染修复技术的最终考核目标<sup>[7]</sup>。

2 结果与讨论

2.1 深层土壤重金属元素含量特征

黔西北地区深层土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量特征如表 1 所示,其平均含量分别为 $13.3\times10^{-6}$ 、 $0.244\times10^{-6}$ 、 $137.6\times10^{-6}$ 、 $65.1\times10^{-6}$ 、 $0.128\times10^{-6}$ 、 $61.3\times10^{-6}$ 、 $27.4\times10^{-6}$ 、 $116\times10^{-6}$ ,与贵州省耕地表层土壤元素均值比较,黔西北地区深层土壤 As、Hg、Zn 均值与其差异不大,Cd、Pb 平均值低于贵州省耕地表层土壤元素均值,Cr、Cu、Ni 平均含量显著高于贵州省耕地表层土壤均值<sup>[23]</sup>,黔西北地区是 Cr、Cu、Ni 地球化学高背景区,但是本区 As、Cd、Pb 的极大值较高,且极大值主要分布在铅锌矿区,表明铅锌矿区也是 As、Cd、Pb 地球化学高背景区。

黔西北地区深层土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 分布特征如图 2 所示,高 As 土壤( $>30\times10^{-6}$ )主要分布在赫章县中南部地区,在威宁县及七星关区也有散点状分布。高 Cd 土壤( $>1.5\times10^{-6}$ )主要分布在威宁县与赫章县交界的中部地区。高 Cr、Cu 和 Ni 土壤主要分布在威宁县西南部、纳雍县中部及

大方县中部地区,Pb 与 Zn 的分布类似,高 Pb( $>70\times10^{-6}$ )与高 Zn( $>200\times10^{-6}$ )土壤集中分布在赫章县与威宁县。

2.2 不同地质单元土壤地球化学含量均值及管理目标值

研究区土壤元素分布与地质背景关系密切,因此,根据地层岩性特征,划分不同的地质单元对其进行统计分析。对深层土壤组合样品的 4 个取样点属于相同地质单元的样品进行整理,统计分析元素含量特征(表 2),由于本区二叠系分布面积较广,二叠系中统与上统岩性差异较大,在合并统计二叠系的同时,单独统计了二叠系中统地层区土壤元素含量特征。

与《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)比较,不同地质单元风化的土壤 As 含量均值小于土壤风险筛选值( $20\times10^{-6}$ ),但是其管理目标值多大于土壤风险筛选值,土壤 Hg 均值及管理目标值小于土壤 Hg 风险筛选值( $0.5\times10^{-6}$ ),土壤 As 与 Hg 高值区的分布与区域构造关系密切,高值点主要集中分布在铅锌矿区。二叠系、石炭系风化土壤 Cd 含量均值高于农用地土壤 Cd 筛选值( $0.3\times10^{-6}$ ),其中二叠系中统风化土壤 Cd 管理目标值高于农用地土壤 Cd 风险管制值( $2.0\times10^{-6}$ ),在黔西北,不仅是铅锌矿区,部分二叠系灰岩分布区也是土壤 Cd 地球化学高背景区。二叠系风化土壤 Cr、Cu 与 Ni 含量均值均大于土壤风险筛选值(Cr  $150\times10^{-6}$ 、Cu  $50\times10^{-6}$ 、Ni  $60\times10^{-6}$ ),三叠系及石炭系风化土壤 Cr、Cu 与 Ni 管理目标值也高于土壤风险筛选值,高温热液及玄武岩的喷出会显著影响 Cr、Cu、Ni 的地球化学背景,其高值带也多是二叠系

表 1 黔西北深层土壤重金属含量特征与管理目标值

Table 1 The content of heavy metals in deep soil of northwest Guizhou and its management target value

| 元素 | 剔除前            |       |                |                | 剔除后            |       | 变化范围/ $10^{-6}$ | 数据类型 | 管理目标值/ $10^{-6}$ |
|----|----------------|-------|----------------|----------------|----------------|-------|-----------------|------|------------------|
|    | 平均值/ $10^{-6}$ | 离差    | 最小值/ $10^{-6}$ | 最大值/ $10^{-6}$ | 平均值/ $10^{-6}$ | 离差    |                 |      |                  |
| As | 13.8           | 5.9   | 1.4            | 327.8          | 13.3           | 5.5   | 2.0~25.6        | 其他   | 25.6             |
| Cd | 0.270          | 0.121 | 0.019          | 10.90          | 0.244          | 0.095 | 0.028~0.512     | 其他   | 0.512            |
| Cr | 141.4          | 1.48  | 23.83          | 489.3          | 137.6          | 1.43  | 67.0~282.6      | 对数   | 282.6            |
| Cu | 70.2           | 31.0  | 1.94           | 386.4          | 65.1           | 29.3  | 6.5~123.7       | 其他   | 123.7            |
| Hg | 0.132          | 0.054 | 0.012          | 2.642          | 0.128          | 0.05  | 0.024~0.24      | 其他   | 0.24             |
| Ni | 61.5           | 14.9  | 7.71           | 157.65         | 61.3           | 14.6  | 46.7~75.9       | 其他   | 75.9             |
| Pb | 28.6           | 6.9   | 8.37           | 844.1          | 27.4           | 5.8   | 14.8~42.4       | 其他   | 42.4             |
| Zn | 118.4          | 24.2  | 18.11          | 902.9          | 116.0          | 22.0  | 70~166.9        | 其他   | 166.9            |

注:当数据服从正态分布时,平均值为算术平均值;当数据分布服从对数正态分布时,平均值为几何平均值;当数据服从其他分布类型时,平均值为中位值。当数据服从正态分布时,离差为标准离差;当数据分布服从对数正态分布时,离差为几何标准离差;当数据服从其他分布类型时,离差为绝对中位差(MAD)。当数据服从正态分布时,变化范围为算术平均值 $\pm 2$ 倍标准离差;当数据分布服从对数正态分布时,变化范围为平均值/( $2\times$ 离差)-平均值 $\times 2\times$ 离差;当数据服从其他分布类型时,变化范围为中位值 $\pm 2$ 绝对中位差。样本数为 1 308 件。



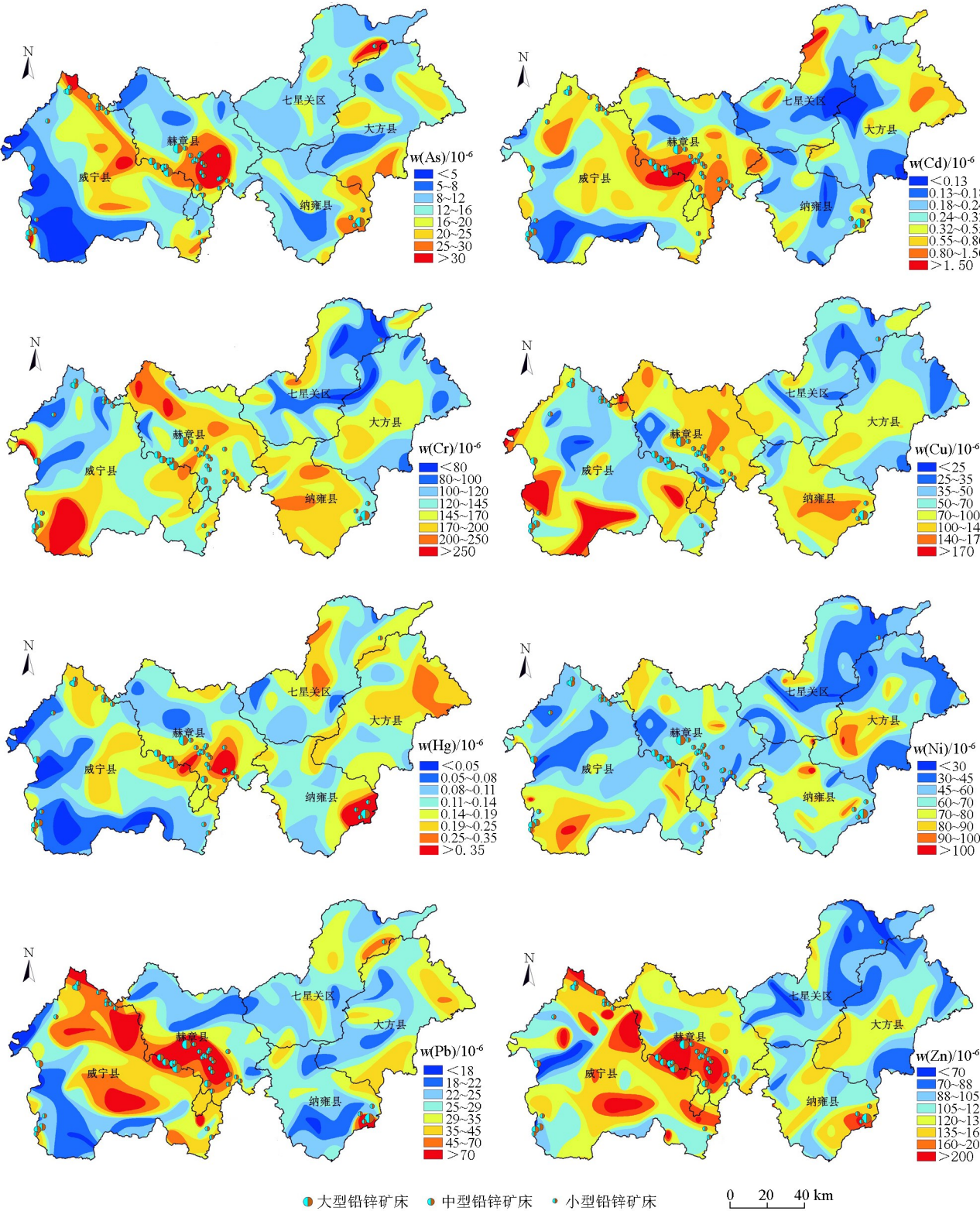


图 2 黔西北地区深层土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn in deep soil of northwest Guizhou

玄武岩出露区。黔西北仅有石炭系风化的土壤 Pb、Zn 管理目标值高于土壤筛选值 (Pb  $70 \times 10^{-6}$ 、Zn  $200 \times 10^{-6}$ ), 土壤 Pb、Zn 高背景区不仅包括铅锌矿区, 在威宁县部分石炭系地层出露区未见铅锌矿, 但是

也是土壤 Pb、Zn 高背景区。由表 2 可以看出, 不同地层单元区土壤元素地球化学背景值存在较大的差异, 因此, 按成土地质背景分区来研究确定黔西北地区不同地域的土壤地球化学背景十分必要。

表 2 黔西北不同地质单元风化土壤重金属含量特征及管理目标值

Table 2 Heavy metal content and management target value of weathered soil in various geological units in northwest Guizhou

| 元素 | 成土母岩地<br>层单元 | 剔除前                  |       |                      |                      | 剔除后                  |       | 变化范围/10 <sup>-6</sup> | 数据类型 | 管理目标值/<br>10 <sup>-6</sup> |
|----|--------------|----------------------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|-----------------------|------|----------------------------|
|    |              | 平均值/10 <sup>-6</sup> | 离差    | 最小值/10 <sup>-6</sup> | 最大值/10 <sup>-6</sup> | 平均值/10 <sup>-6</sup> | 离差    |                       |      |                            |
| As | 三叠系          | 17.1                 | 7.9   | 2.08                 | 43.3                 | 16.9                 | 7.6   | 1.2~33.0              | 正态   | 33                         |
|    | 二叠系          | 11.2                 | 2.0   | 1.42                 | 167.1                | 10.1                 | 1.8   | 2.72~45.8             | 对数   | 45.8                       |
|    | 石炭系          | 20.5                 | 1.55  | 5.37                 | 102.3                | 19.6                 | 1.4   | 8.5~49.5              | 对数   | 49.5                       |
|    | 寒武系          | 20.3                 | 1.52  | 9.73                 | 68.8                 | 19.5                 | 1.4   | 8.8~46.8              | 对数   | 46.8                       |
|    | 二叠系中统        | 15.1                 | 3.6   | 4.33                 | 68.2                 | 14.9                 | 3.3   | 8.0~22.3              | 其他   | 22.3                       |
| Cd | 三叠系          | 0.206                | 0.16  | 0.052                | 2.348                | 0.191                | 0.062 | 0.067~0.315           | 正态   | 0.315                      |
|    | 二叠系          | 0.430                | 0.249 | 0.019                | 5.872                | 0.390                | 0.209 | 0.02~0.927            | 其他   | 0.927                      |
|    | 石炭系          | 0.399                | 0.186 | 0.114                | 2.69                 | 0.388                | 1.81  | 0.027~0.771           | 对数   | 0.771                      |
|    | 寒武系          | 0.197                | 0.045 | 0.091                | 0.548                | 0.195                | 0.045 | 0.107~0.287           | 其他   | 0.287                      |
|    | 二叠系中统        | 0.924                | 0.585 | 0.117                | 5.872                | 0.834                | 0.507 | 0.02~2.093            | 其他   | 2.093                      |
| Cr | 三叠系          | 130.0                | 26.6  | 42.72                | 489.3                | 126.4                | 23.0  | 76.7~183.1            | 其他   | 183.1                      |
|    | 二叠系          | 158.3                | 1.36  | 74.95                | 396.6                | 156.0                | 1.34  | 85.6~293.0            | 对数   | 293.0                      |
|    | 石炭系          | 120.1                | 25.6  | 63.20                | 186.3                | 120.1                | 25.6  | 69.0~171.2            | 正态   | 171.2                      |
|    | 寒武系          | 73.9                 | 1.18  | 54.67                | 130.9                | 72.5                 | 1.14  | 53.1~103.0            | 对数   | 103.0                      |
|    | 二叠系中统        | 290.7                | 1.361 | 84.69                | 301.4                | 156.8                | 1.361 | 84.6~290.7            | 对数   | 290.7                      |
| Cu | 三叠系          | 56.2                 | 1.5   | 10.4                 | 145.8                | 55.6                 | 1.5   | 26.2~118.0            | 对数   | 118.0                      |
|    | 二叠系          | 129.1                | 66.1  | 15.0                 | 315.4                | 129.1                | 66.1  | 0~261.3               | 正态   | 261.3                      |
|    | 石炭系          | 41.7                 | 17.7  | 14.6                 | 163.6                | 40.2                 | 12.7  | 14.8~65.6             | 正态   | 65.6                       |
|    | 寒武系          | 31.9                 | 1.5   | 19.7                 | 166.9                | 30.2                 | 1.2   | 19.5~46.8             | 对数   | 46.8                       |
|    | 二叠系中统        | 87.0                 | 49.7  | 15.0                 | 263.3                | 85.3                 | 46.8  | 0~178.9               | 正态   | 178.9                      |
| Hg | 三叠系          | 0.117                | 0.048 | 0.025                | 0.376                | 0.114                | 0.042 | 0.022~0.212           | 正态   | 0.212                      |
|    | 二叠系          | 0.182                | 0.087 | 0.028                | 2.238                | 0.172                | 0.078 | 0.007~0.357           | 其他   | 0.357                      |
|    | 石炭系          | 0.155                | 0.054 | 0.025                | 0.391                | 0.155                | 0.054 | 0.047~0.263           | 其他   | 0.263                      |
|    | 寒武系          | 0.141                | 0.023 | 0.071                | 2.643                | 0.138                | 0.037 | 0.094~0.187           | 正态   | 0.187                      |
|    | 二叠系中统        | 0.267                | 0.062 | 0.036                | 1.091                | 0.262                | 0.06  | 0.143~0.391           | 其他   | 0.391                      |
| Ni | 三叠系          | 56.8                 | 1.4   | 14.2                 | 115.4                | 56.8                 | 1.4   | 28.2~114.6            | 对数   | 114.6                      |
|    | 二叠系          | 70.0                 | 22.0  | 8.77                 | 142.6                | 69.3                 | 21.0  | 27.3~109.3            | 正态   | 109.3                      |
|    | 石炭系          | 52.8                 | 17.4  | 14.0                 | 109.0                | 51.5                 | 15.6  | 20.3~82.7             | 正态   | 82.7                       |
|    | 寒武系          | 37.5                 | 1.3   | 27.3                 | 75.1                 | 35.9                 | 1.2   | 24.9~51.7             | 对数   | 51.7                       |
|    | 二叠系中统        | 67.5                 | 24.6  | 8.77                 | 142.6                | 66.0                 | 22.6  | 20.8~111.2            | 正态   | 111.2                      |
| Pb | 三叠系          | 29.5                 | 7.5   | 12.15                | 54.6                 | 29.4                 | 7.3   | 14.5~44.6             | 正态   | 44.6                       |
|    | 二叠系          | 27.2                 | 1.43  | 9.68                 | 221.4                | 26                   | 1.32  | 16.8~35.9             | 对数   | 35.9                       |
|    | 石炭系          | 50.6                 | 16.9  | 22.60                | 643.1                | 47.6                 | 13.3  | 16.8~84.4             | 其他   | 84.4                       |
|    | 寒武系          | 39.1                 | 8.3   | 23.85                | 547.6                | 38.8                 | 8.3   | 22.4~55.7             | 其他   | 55.7                       |
|    | 二叠系中统        | 31.9                 | 11.7  | 15.07                | 95.6                 | 32                   | 9.65  | 8.5~55.3              | 正态   | 55.3                       |
| Zn | 三叠系          | 101.9                | 12.7  | 31.79                | 211.8                | 101.9                | 12.7  | 76.4~127.4            | 其他   | 127.4                      |
|    | 二叠系          | 134                  | 21.2  | 32.05                | 403.4                | 133                  | 21.2  | 91.5~176.5            | 其他   | 176.5                      |
|    | 石炭系          | 154.2                | 1.76  | 42.00                | 902.9                | 144.0                | 1.63  | 50.0~475.3            | 对数   | 475.3                      |
|    | 寒武系          | 99.1                 | 87.4  | 47.05                | 466                  | 74.9                 | 15.4  | 44.1~105.7            | 正态   | 105.7                      |
|    | 二叠系中统        | 136.8                | 42.9  | 32.05                | 275.6                | 135.4                | 40.9  | 51.0~222.5            | 正态   | 222.5                      |

注:数据计算方式同表 1;样本数:三叠系样本 226 件,二叠系样本 290 件,石炭系样本 123 件,寒武系样本 31 件,二叠系中统样本 106 件。

2.3 与中国及周边主要城市的比较

研究区深层土壤重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn)平均含量显著高于中国城市深层土壤元素均值<sup>[3]</sup>、中国深层土壤元素中位数值<sup>[24]</sup>及山东省、江苏省深层土壤元素均值<sup>[25-26]</sup>(表 3)。与周边的主要城市相比较,As、Cd、Hg、Pb 均低于贵阳市深层土壤平均含量<sup>[27]</sup>,As 与成都市区深层土壤均值接近<sup>[3]</sup>,Cd、Cu、Hg、Pb 平均含量低于昆明市深层土壤均值<sup>[3]</sup>。由于中国西南地区属于重金属高背

景区<sup>[28]</sup>,因此黔西北地区深层土壤重金属含量虽高于全国平均含量,但是并不明显高于中国西南其他地区土壤重金属背景值。

2.4 不同成土母岩分类单位的比较

由于不同地质单元中深层土壤重金属含量存在极显著的差异,因此对不同地质单元土壤进行比较分析。各元素管理目标值(MTV<sub>*i*</sub>)与全区管理目标值(MTV<sub>全区</sub>)的变化率(ΔMTV<sub>*i*</sub>)示于图 3 中,其中 ΔMTV<sub>*i*</sub>=[(MTV<sub>*i*</sub>-MTV<sub>全区</sub>)/MTV<sub>全区</sub>]×100%,MTV<sub>*i*</sub>

表 3 黔西北深层土壤重金属元素均值与中国不同评价单元深层土壤元素均值比较

Table 3 Comparison of mean values of heavy metal elements in deep soil of Northwest Guizhou and different evaluation units in China

| 不同评价单元                    | As         | Cd         | Cr         | Cu        | Hg         | Ni        | Pb        | Zn         |
|---------------------------|------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|
| 中国深层土壤中位数 <sup>[24]</sup> | 9(0.7)     | 0.11(0.5)  | 50(0.4)    | 19(0.3)   | 0.018(0.1) | 22(0.4)   | 21(0.8)   | 60(0.5)    |
| 中国城市深层土壤均值 <sup>[3]</sup> | 10(0.8)    | 0.11(0.5)  | 73(0.5)    | 24(0.4)   | 0.042(0.3) | 29(0.5)   | 23(0.8)   | 68(0.6)    |
| 山东省深层土壤均值 <sup>[25]</sup> | 8.7(0.7)   | 0.092(0.4) | 62.6(0.5)  | 21.3(0.3) | 0.016(0.1) | 27.9(0.5) | 21.4(0.8) | 58.6(0.5)  |
| 江苏省深层土壤均值 <sup>[26]</sup> | 9.4(0.7)   | 0.085(0.3) | 75.6(0.5)  | 23.4(0.4) | 0.025(0.2) | 32.8(0.5) | 22(0.8)   | 64.8(0.6)  |
| 贵阳市深层土壤均值 <sup>[27]</sup> | 23.99(1.8) | 0.296(1.2) | 100.9(0.7) | 46.9(0.7) | 0.222(1.7) | 42(0.7)   | 38.9(1.4) | 106.1(0.9) |
| 成都市区深层土壤均值 <sup>[3]</sup> | 13(1.0)    | 0.13(0.5)  | 81(0.6)    | 30(0.5)   | 0.047(0.4) | 37(0.6)   | 23(0.8)   | 76(0.7)    |
| 重庆市区深层土壤均值 <sup>[3]</sup> | 5(0.4)     | 0.11(0.5)  | 80(0.6)    | 26(0.4)   | 0.06(0.5)  | 32(0.5)   | 26(0.9)   | 80(0.7)    |
| 昆明市深层土壤均值 <sup>[3]</sup>  | 9(0.7)     | 0.27(1.1)  | 97(0.7)    | 69(1.1)   | 0.132(1.0) | 44(0.7)   | 41(1.5)   | 90(0.8)    |

注:括号外为元素均值,单位 10<sup>-6</sup>;括号内为不同评价单元元素均值/黔西北深层土壤均值。

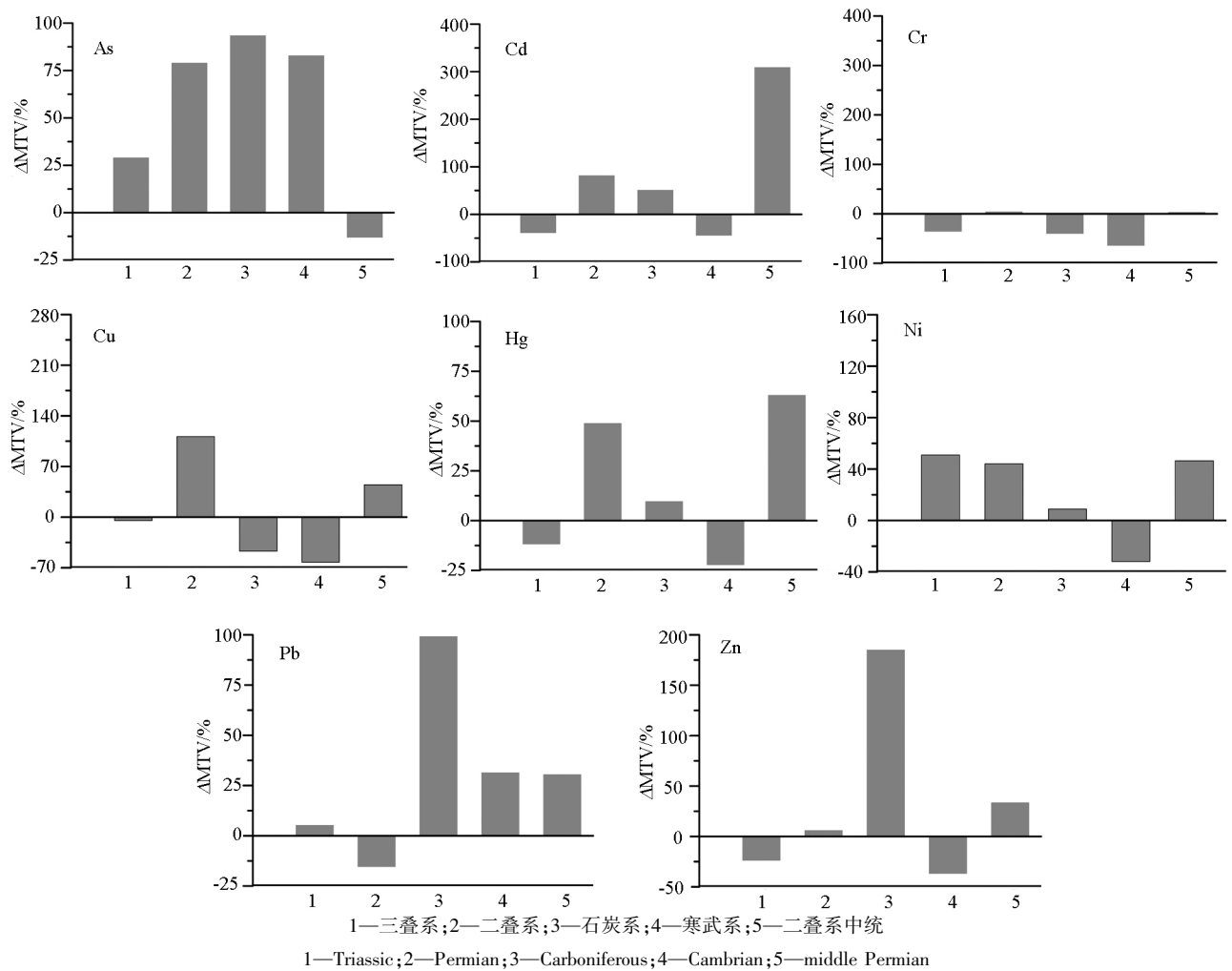


图 3 不同地层发育深层的土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 管理目标值相对变化率

Fig.3 Relative change rate of As, Cd, Cr, Cu,Hg, Ni,Pb and Zn management target of deep soil weathered in different strata

指不同地质单元土壤给定元素  $i$  的 MTV 值, MTV<sub>全区</sub> 指给定元素  $i$  的黔西北地区 MTV 值。

由图 3 可以看出,本区 Cu、Cd、Hg、Pb、Zn 存在显著的差异,石炭系 Pb、Zn 地球化学背景高,其管理目标值最高,石炭系地层是黔西北地区铅锌矿的主要赋矿层位,其具有高的地球化学背景。黔西北

地区铜矿成因与二叠系玄武岩密切相关<sup>[29]</sup>,这可能是本区二叠系 Cu 高地球化学背景的主要原因。本区二叠系中统 Cd、Hg 地球化学背景值最高,二叠系中统主要为栖霞组、茅口组灰岩,其高的 Cd、Hg 地球化学背景可能与其沉积环境及峨眉山玄武岩的影响有关。



2.5 区域土壤修复指导意义

调查发现黔西北地区耕作层土壤重金属超标较为严重<sup>[10-13]</sup>,然而对深层土壤(区域地球化学背景)的研究表明,有些地区处于重金属元素地球化学高背景区,其成因与人类活动无关,有色金属矿(主要为铅锌矿)剥蚀后重金属随水流扩散可以造成区域性的土壤重金属高异常。同时,对于重金属高背景区人为污染土壤的修复,其重金属元素修复目标值应充分考虑元素地球化学背景及其生态环境危害性进行制定。

3 结论

- 1) 黔西北地区地处中国西南重金属高背景区,土壤重金属背景值显著高于全国土壤均值,但是,相对西南地区,黔西北地区深层土壤重金属富集并不显著。
- 2) 黔西北地区深层土壤元素分布与地质背景关系密切,有必要按照成土母岩的地层单元进行分区研究。
- 3) 黔西北地区土壤 Pb、Zn 地球化学高背景主要分布在石炭系地层,二叠系中统栖霞组、茅口组地层区土壤为 Cd、Hg 地球化学高背景。
- 4) 在制定黔西北土壤重金属高背景区土壤重金属管理目标值时,在参考国家相关标准外,还应考虑土壤重金属地球化学高背景、土壤重金属生物有效性及区域生态环境。

参考文献 (References) :

[1] 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 soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.

[2] 陈同斌.区域土壤环境质量[M].北京:科学出版社,2015.  
Chen T B. Regional soil environmental quality [M]. Beijing: Science Press, 2015.

[3] 成杭新,李括,李敏,等.中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J].地学前缘,2014,21(3):265-306.  
Cheng H X, Li K, Li M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 265-306.

[4] 李括,彭敏,杨峥,等.中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险[J].环境科学,2020,41(4):1825-1837.  
Li K, Peng M, Yang Z, et al. Trace metals pollution and health risks for planning area soils of 193 Chinese Cities [J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1825-1837.

[5] 应蓉蓉,张晓雨,孔令雅,等.农用地土壤环境质量评价与类别划分研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(1):18-25.

Ying R R, Zhang X Y, Kong L Y, et al. Technical analysis of soil environmental quality evaluation and category classification of agricultural land [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(1): 18-25.

[6] 骆永明,夏家淇,章海波,等.中国土壤环境质量基准与标准制定的理论和方法[M].北京:科学出版社,2015.  
Luo Y M, Xia J Q, Zhang H B, et al. The theory and method of soil environmental quality standards in China [M]. Beijing: Science Press, 2015.

[7] 成杭新,李括,李敏,等.中国城市土壤微量金属元素的管理目标值和整治行动值[J].地学前缘,2015,22(5):215-225.  
Cheng H X, Li K, Li M, et al. Management target value (MTV) and rectification action value (RAV) of trace metals in urban soil in China [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(5): 215-225.

[8] 肖克炎,邢树文,丁建华,等.全国重要固体矿产重点成矿区带划分与资源潜力特征[J].地质学报,2016,90(7):1269-1280.  
Xiao K Y, Xing S W, Ding J S, et al. Division of major mineralization belts of China's key solid mineral resources and their mineral resource potential [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(7): 1269-1280.

[9] 许笠.贵州省赫章县妈姑地区传统炼锌工艺考察[J].自然科学史研究,1986,5(4):361-369.  
Xu L. Investigation on traditional zinc smelting process in Magu area, Hezhang County, Guizhou Province [J]. Studies in the History of Natural Sciences, 1986, 5(4): 361-369.

[10] Bi X, Feng X B, Yang Y G, et al. Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China [J]. Environment International, 2006, 32(7): 883-890.

[11] 冯艳红,郑丽萍,应蓉蓉,等.黔西北炼锌矿区土壤重金属形态分析及风险评价[J].生态与农村环境学报,2017,33(2):142-149.  
Feng Y H, Zheng L P, Ying R R, et al. Forms of heavy metals in soils of zinc mining area in northwestern Guizhou Province and their environmental risks [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(2): 142-149.

[12] 丁玉娟,林昌虎,何腾兵,等.贵州草海耕地土壤重金属污染特征及安全评价[J].贵州科学,2013,31(2):47-51.  
Ding Y J, Lin C H, He T B, et al. Characteristics and safety evaluation of farmland soil polluted by heavy metals in Caohai of Guizhou [J]. Guizhou Science, 2013, 31(2): 47-51.

[13] 赵斌,朱四喜,杨秀琴,等.贵州草海菜地表层土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].生态环境学报,2018,27(4):776-784.  
Zhao B, Zhu S X, Yang X Q, et al. Characteristics of heavy metals pollution and ecological risk assessment of the surface soils in the vegetable fields around Caohai in Guizhou [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(4): 776-784.

[14] 张富贵,彭敏,王惠艳,等.基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J].环境科学,2020,41(9):321-333.  
Zhang F G, Peng M, Wang H Y, et al. Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, Southwestern, China [J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 321-333.

[15] 唐瑞玲,王惠艳,吕许朋,等.西南重金属高背景区农田系统土壤重金属生态风险评价[J].现代地质,2020,34(5):917-927.  
Tang R L, Wang H Y, Lyu X P, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in farmland system from an area with high back-

ground of heavy metals, Southwestern China [J]. *Geoscience*, 2020, 34(5): 917–927.

[16] 成杭新,刘飞,周亚龙,等.表生地球化学动力学与中国西南土壤中化学元素分布模式的驱动机制[J].*地学前缘*,2019,26(6):159–191.

Cheng H X, Liu F, Zhou Y L, et al. Epigenetic geochemical dynamics and riving mechanisms of distribution pattens of chemical elements in soil, Southwest China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(6): 159–191.

[17] Liu Y Z, Xiao T F, Ning Z P, et al. High cadmium concentration in soil in the Three Gorges region: Geogenic source and potential bioavailability [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 37: 149–156.

[18] Wen Y B, Li W, Yang Z F, et al. Enrichment and source identification of Cd and other heavy metals in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China [J]. *Chemosphere*, 2020, 245:125620.

[19] Xia X Q, Ji J F, Yang Z F, et al. Cadmium risk in the soil-plant system caused by weathering of carbonate bedrock [J]. *Chemosphere*, 2020, 254:126799.

[20] Liu Y Z, Xiao T F, Perkins R B, et al. Geogenic cadmium pollution and potential health risks, with emphasis on black shale [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 176: 42–49.

[21] Wang H X, Li X M, Chen Y, et al. Geochemical behavior and potential health risk of heavy metals in basalt-derived agricultural soil and crops: A case study from Xuyi County, eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729:139058.

[22] 贵州省地质调查院.中国区域地质志(贵州志)[M].北京:地质出版社,2017.

Guizhou Academy of Geologic Survey. Regional geology of China (Guizhou) [M]. Berijing: Geological Publishing House, 2017.

[23] 蔡大为,李龙波,蒋国才,等.贵州耕地主要元素地球化学背景值统计与分析[J].*贵州地质*,2020,37(3):233–239.

Cai D W, Li L B, Jiang G C, et al. Statistics and analysis of geochemical backgrounds of main elements of cultivated land in Guizhou Province [J]. *Guizhou Geology*, 2020, 37(3): 233–239.

[24] 王学求,周建,徐善法,等.全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征[J].*中国地质*,2016,43(5):1469–1480.

Wang X Q, Zhou J, Xu S F, et al. China soil geochemical base-lines networks: Data characteristics [J]. *Geology in China*, 2016, 43(5): 1469–1480.

[25] 庞绪贵,代杰瑞,喻超,等.山东省 17 市土壤地球化学基准值[J].*山东国土资源*,2019,35(1):39–48.

Pang X G, Dai J R, Yu C, et al. Soil geochemical reference value of 17 cities in Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2019, 35(1): 39–48.

[26] 廖启林,刘聪,许艳,等.江苏省土壤元素地球化学基准值[J].*中国地质*,2011,38(5):1363–1378.

Liao Q L, Liu C, Xu Y, et al. Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province [J]. *Geology in China*, 2011, 38(5): 1363–1378.

[27] 何邵麟,陈武,刘应忠,等.贵阳市土壤地球化学背景与生态环境分析[J].*地球与环境*,2015,43(6):57–67.

He S L, Chen W, Liu Y Z, et al. Geochemical background and ecologic environment of soil in Guiyang City Guizhou Province, China [J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(6): 57–67.

[28] 中国地质调查局发展中心.中国地球化学系列图[M].北京:地质出版社,2018.

Development Research Center of China Geological Survey. Geochemical atlas of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.

[29] 李松涛,刘建中,何明友,等.黔西北威宁地区香炉山铜矿床地质地球化学特征及成因[J].*地质与勘探*,2016,52(5):826–837.

Li S T, Liu J Z, He M Y, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Xianglushan copper deposit in the Weining area, northwest Guizhou [J]. *Geology and Exploration*, 2016, 52(5): 826–837.

Geochemical background and management target values of heavy metals in soil in northwestern Guizhou Province

MENG Wei, MO Chun-Hu, LIU Ying-Zhong  
(Guizhou Academy of Geological Survey, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** Based on the heavy metal content data of 1 308 deep soil samples taken from the 1 : 250 000 geochemical survey of land qualityin the Bijie area, Guizhou Province, the content distribution and geochemical background characteristics of heavy metals in soil in the area were studied. The geochemical background values of heavy metals in soil in northwestern Guizhou Provinceare significantly higher than those in soil nationwide but are close to those in soil in southwestern China. The heavy metal content in soil in northwestern Guizhou is closely related to the geological background and is significantly different between different geological units. The soil developing in Carboniferous strata has high geochemical background values of Pb and Zn, while the Middle Permian soil formed due to weathering hashigh geochemical background values of Cd and Hg. All these mean that besides heavy metal pollution in soil caused by zinc melting using indigenous methods,another important factor causing the heavy metal enrichment is the high geochemical background values of heavy metals in soil.The statistics show that the management target value of Cd in the Middle Permian weathered soil in northwestern Guizhou is higher than thecontrol value ( $2.0\times10^{-6}$ ) of Cd stipulated in the Risk Management Standard for Agricultural Land for Soil Pollution in China. It is considered that the differences in geochemical background values of heavy metals in soil between different geological units and their impacts on the ecological environment should be fully considered when determining the management target values of heavy metals in soil in northwestern Guizhou Province.

**Key words:** geochemical background; soil; heavy metals;management target value; Guizhou

( 本文编辑:蒋实)