

doi:10.3799/dqkx.2015.011

湖北大冶铜绿山尾矿的地球化学特征及其综合利用

马真真¹, 鲍征宇^{1,2*}, 谢淑云¹, 汤志勇², 邱海鸥²

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学材料与化学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 对尾矿进行深入细致的研究, 认真分析其物理化学组成将为矿山环境的治理以及尾矿的综合利用提供重要的科学依据。探讨了铜绿山矽卡岩型铜铁矿床尾矿砂的矿物组合特征和地球化学特征, 初步研究了稀硫酸溶液萃取尾矿砂中有价金属元素方法的可行性。研究表明: 尾矿砂先后经过化学冶选和长期堆存风化, 矿物组成发生显著改变, 以粘土矿物(高岭石和伊利石)为主; 尾矿中的铜矿物以氧化铜为主, 尾矿砂中金属元素的活性明显增强, 含量从顶部到第6层逐渐增加, 并在尾矿库的第6层强烈富集, 重金属铜具有回收利用的价值。

关键词: 尾矿库; 矿物; 重金属; 回收利用; 地球化学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2015)01-0163-06

收稿日期: 2014-05-25

Geochemistry and Comprehensive Utilization on Tailings of Tonglüshan Mine, Daye, Hubei Province

Ma Zhenzhen¹, Bao Zhengyu^{1,2*}, Xie Shuyun¹, Tang Zhiyong², Qiu Hai'ou²

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The study on the tailings and their physical and chemical compositions can provide important scientific basis for the control of the mine environment and the proper utilization of tailings. The mineral and geochemical characteristics of the tailings of the skarn copper-iron deposits in the Tonglüshan copper deposit are studied in the paper, Hubei Province, and the heavy metals are extracted and separated by the dilute sulfuric acid. The results show that mineral compositions of the tailings have changed significantly after chemical mineral processing and the long-term physical and chemical weathering. The main form of copper mineral is copper oxide in the tailings, with heavy metals increasingly enriched from the top down. The enrichment of heavy metal elements peaks in the sixth horizon of the tailing pond. It is found that the copper in the tailing pond has potential recycle value.

Key words: tailings; mineral; heavy metal; recycle; geochemistry.

0 引言

矿山资源是人类生存和发展的基础, 而矿山开采和矿石选冶引起的环境污染与生态破坏已经成为全球性的问题。我国是矿业大国, 矿业固体废料的存积量及年排放量巨大, 目前这些废料多自然堆积储

存在尾矿库中。尾矿源重金属复合污染的危害性要比由其他污染源(如冶金、化工企业)较单一的重金属污染更为复杂和严重, 尾矿成为了严重威胁中国环境安全的“不定时炸弹”(雷良奇等, 2013)。金属矿山废石和尾矿的长期堆存不仅占用大量的土地, 而且在地表径流、风、雨水淋滤等自然作用下, 其中的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.40872195); 中国地质调查局项目(No.12120113022600)。

作者简介: 马真真(1987-), 女, 博士, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: 1987mazhenzhen@163.com

* **通讯作者:** 鲍征宇, E-mail: zybao@cug.edu.cn

引用格式: 马真真, 鲍征宇, 谢淑云, 等, 2015. 湖北大冶铜绿山尾矿的地球化学特征及其综合利用. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1): 163-168.

重金属等组分不断扩散迁移而影响周边地区,导致该地区的土壤污染和植被破坏,对周边环境造成严重的不良影响(孙丽娜和金成洙,2002;周涛发等,2004;Ramos-Arroyo and Siebe,2007).国内外已经开展了大量关于尾矿和尾矿库的研究,但这些研究主要集中在尾矿填埋、尾矿坝稳定性以及在表生地球化学过程下尾矿对周边环境的影响(Sirkeci *et al.*, 2006; Antonijevic *et al.*, 2008; Fu *et al.*, 2012; Kabas *et al.*, 2012),但是关于尾矿库矿物特征、主量元素以及尾砂有价金属元素回收利用缺乏系统的地球化学研究.

大冶铜绿山铜铁矿是我国重要的大型矿山之一,具有悠久的采矿历史.目前我国共生有价元素综合回收水平仍很低,大量有价成分存留于尾矿中,人们高度重视能否将老尾矿作为接替资源或将尾矿作为二次资源进行开发(叶国华等,2010).综上所述,本文将以地球化学的观点研究铜绿山矽卡岩型铜铁矿床尾砂的矿物组合特征以及常量元素和重金属元素的地球化学特征.在此基础上对尾砂中有价组分的提取和利用进行初探,从而为大冶铜绿山铜铁矿尾砂的回收利用提供一定科学依据,也为类似地区的矿山尾砂的回收利用提供参照和对比.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大冶位于湖北省东南部,铜绿山铜铁矿位于大冶西南约 5 km 的铜绿山镇内,该矿为大型矽卡岩型铜铁矿床,产于铜绿山花岗闪长斑岩与下三叠统大冶群碳酸盐岩接触带附近以矽卡岩型为主的大型铜铁矿床,它是与铜绿山铜铁矿床有关的铜绿山岩体,为燕山早期第三次岩浆侵入活动的产物(黄康俊等,2008).铜绿山 Fe-Cu 矿床是鄂东南地区最大的矽卡岩型铜铁矿床,矿床的形成与铜绿山石英闪长岩有关(邓晓东等,2012).

1.2 样品采集与分析

铜绿山矿的尾砂库位于选矿厂东北方向,本次采样选取了尾砂库中的一个垂直剖面(图 1).垂直剖面深约 2 m,根据颜色组成等差异从下往上采集了 8 个样品(TD1~TD8),在室内阴凉处晾干后,用玛瑙研钵碾碎,过 200 目塑料筛后用 XRD 测定其矿物组成,并用 ICP-MS 测定 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Ni 6 种金属元素含量,同时初步研究用硫酸堆浸-萃取方法萃取尾矿砂中的有价金属元素.

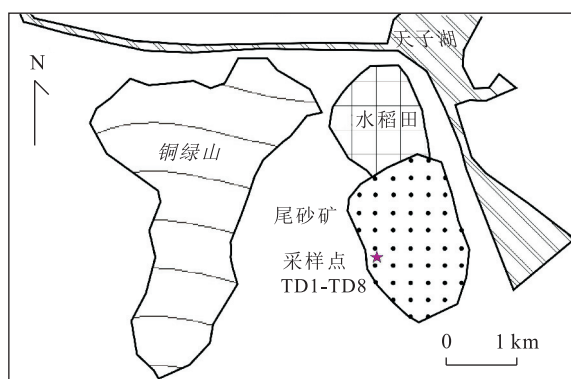


图 1 铜绿山尾砂库剖面位置

Fig.1 Vertical profile location of Tonglvshan tailings

2 结果与讨论

2.1 尾矿砂的矿物组成

堆积的尾矿所发生的各种次生变化以及酸性排水的产生都与其矿物学性质相关.在表生环境中,温度、湿度、pH 值和 Eh 值的变化都会导致矿物中的成分发生相应的氧化反应、中和作用、吸附作用和离子交换作用,并控制着矿山的酸性排水和重金属释过程(陈天虎等,2001).因此,尾矿的矿物学研究具有重要的意义.

铜绿山铜铁矿床是大型矽卡岩矿床,矿石矿物比较齐全,主要矿物是铁铜的氧化矿物和硫化矿物,主要矿石是铁矿石、铜矿石、铜铁矿石、钼矿石等.矿石中可见矿物主要有黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、黄铜矿、斑铜矿、蓝铜矿、辉钼矿、石榴子石、透辉石、金云母、孔雀石等,并含有少量的金、银等矿物(王亚平等,1998;徐晓萍,2003;王彦博等,2011).

在表生风化作用条件下,早期沉积或风化形成的粘土矿物母质易遭受后期环境变化的改造(洪汉烈等,2012).尾矿砂中的矿物组分主要来自于选冶后的矿石,后经长期堆放风化而成.由于后天风化致使尾砂的矿物组分与原矿石相比发生显著变化.通过 X 射线粉晶衍射分析,尾矿砂中矿物主要为粘土矿物(高岭石和伊利石),其中伊利石平均含量可达 42.4%,其次是方解石、铁白云石和石英(详细数据见表 1).伊利石属于吸附能力较强的黏土矿物,对 Pb 和 As 有着较强的吸附能力.

2.2 尾矿中常量元素特征

根据张锦瑞等(2002)所划分 9 类岩石化学类型,可以把铜绿山尾矿归于高钙硅酸盐型尾矿.由表 2 可知尾矿中 Si 和 Al 的含量较高,这是由尾砂

表 1 尾砂库垂直剖面尾砂矿物含量 (%)

Table 1 Vertical profile of mineral contents in tailings

| 样品编号 | 高岭石 | 伊利石 | 方解石 | 铁白云石 | 石英 | 钠长石 | 阳起石 | 蒙脱石 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| TD-1(0 cm) | 5.25 | 53.09 | 15.68 | 5.72 | 12.58 | 5.21 | 2.47 | — |
| TD-2(30 cm) | 3.32 | 59.81 | 16.81 | 2.60 | 12.19 | 2.58 | 2.70 | — |
| TD-3(40 cm) | 9.65 | 61.03 | 15.02 | 0.98 | 9.42 | 1.67 | — | 2.24 |
| TD-4(60 cm) | 4.38 | 44.57 | 14.75 | 12.88 | 8.68 | 2.33 | 2.05 | 10.37 |
| TD-5(80 cm) | 14.01 | 20.36 | 31.79 | 8.92 | 18.81 | 6.11 | — | — |
| TD-6(120 cm) | 8.14 | 27.55 | 30.84 | 14.66 | 9.38 | 6.37 | 3.05 | — |
| TD-7(140 cm) | 4.92 | 47.48 | 25.51 | 10.27 | 6.99 | 2.30 | 0.70 | 1.84 |
| TD-8(160 cm) | 4.00 | 36.54 | 14.04 | 29.22 | 8.12 | 6.12 | 1.96 | — |

注:—表示未检出。

表 2 尾砂库垂直剖面尾砂主量元素含量 (%)

Table 2 Vertical profile of major element contents in tailings

| 样品编号 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | MnO |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------------------|------------------|------------------|------|
| TD-1(0 cm) | 29.50 | 5.04 | 14.35 | 18.70 | 6.91 | 0.43 | 0.98 | 0.16 | 0.29 |
| TD-2(30 cm) | 31.90 | 5.23 | 12.70 | 19.30 | 7.35 | 0.34 | 1.00 | 0.18 | 0.29 |
| TD-3(40 cm) | 33.80 | 7.04 | 13.90 | 19.45 | 6.64 | 1.00 | 1.00 | 0.19 | 0.31 |
| TD-4(60 cm) | 27.40 | 3.32 | 19.95 | 20.10 | 5.25 | 0.26 | 0.49 | 0.14 | 0.34 |
| TD-5(80 cm) | 26.00 | 5.58 | 15.85 | 20.20 | 6.05 | 0.28 | 0.80 | 0.20 | 0.33 |
| TD-6(120 cm) | 28.10 | 4.60 | 22.50 | 18.75 | 4.76 | 0.32 | 0.61 | 0.19 | 0.34 |
| TD-7(140 cm) | 29.60 | 5.36 | 20.50 | 19.10 | 3.75 | 0.31 | 0.64 | 0.22 | 0.31 |
| TD-8(160 cm) | 24.20 | 3.62 | 19.15 | 20.50 | 5.97 | 0.31 | 0.63 | 0.14 | 0.35 |

中的粘土矿物组成决定的,即富铝的硅酸盐矿物;其次 Ca、Fe 和 Mg 的含量也较高,Ca 平均含量为 14.02%,Fe 平均含量为 11.36%,Mg 平均含量为 3.62%,这可能与铜绿山矿床的围岩是碳酸盐岩有关系。

2.3 尾砂库元素的垂向分布特征

研究尾砂库垂向剖面中重金属元素含量的分布特征能有效地揭示重金属环境污染历史和变化趋势,尾矿砂中的重金属含量的高低直接关系到尾矿砂的回收利用和其对周边环境介质的环境效应。

由表 3 可以得知以上 6 种重金属在尾砂中含量由高到低排序为 Cu>Zn>Cr>Pb>Ni>Cd;其中 Cu 元素的含量最高,平均含量 1 851.75 mg/kg,最大值达 4 390 mg/kg;其次是 Zn 元素,所有样品中含量均大于 250 mg/kg;Cd 元素的含量最少,均值为 0.66 mg/kg;除了表层的两个样品含量超过 1.00 mg/kg,其他均小于 1.00 mg/kg。

变异系数能反映出总体样品中含量的平均变化程度,变异系数越大表明该元素的空间分布越不均匀。由表 3 中统计结果可以看出,尾砂库剖面中不同重金属元素的变异系数差异较大,由大到小依次为 Cu>Cd>Pb>Cr>Zn>Ni;其中 Cu、Cd 元素的变异系数最大,都在 0.5 以上,其次为 Pb 元素,为 0.4;

表 3 尾砂垂直剖面中金属元素的含量(mg/kg)

Table 3 Vertical profile of mental contents in tailings

| 样品编号(深度) | Cu | Pb | Zn | Cd | Cr | Ni |
|--------------|----------|-------|--------|------|-------|------|
| TD-1(0 cm) | 884 | 8.6 | 299 | 1.13 | 15 | 8.3 |
| TD-2(30 cm) | 1 020 | 10.7 | 317 | 1.23 | 22 | 9.7 |
| TD-3(40 cm) | 1 505 | 12.9 | 350 | 0.43 | 21 | 10.1 |
| TD-4(60 cm) | 1 885 | 9.3 | 324 | 0.44 | 11 | 9.2 |
| TD-5(80 cm) | 1 560 | 15.0 | 385 | 0.47 | 22 | 11.0 |
| TD-6(120 cm) | 4 390 | 21.1 | 381 | 0.61 | 18 | 10.7 |
| TD-7(140 cm) | 2 790 | 23.4 | 358 | 0.63 | 27 | 9.3 |
| TD-8(160 cm) | 780 | 10.1 | 256 | 0.33 | 29 | 10.0 |
| 平均值 | 1 851.75 | 13.89 | 333.75 | 0.66 | 20.63 | 9.85 |
| 变异系数 | 0.66 | 0.40 | 0.13 | 0.51 | 0.29 | 0.10 |

变异系数最小的元素为 Ni 元素,只有 0.1。

在距尾砂库表面 120 cm 的第 6 层,铜和锌含量最大值出现在此层。此层厚度最大,约 50 cm,灰色和黑色的尾砂相间。此层铜的含量达到了铜回收利用的品位(0.5%)。笔者根据层位开展了一些有价金属元素的回收实验,为尾砂的回收利用实验提供科学依据。

由于不同元素的地球化学特征不同,垂直剖面中的元素含量是随着深度的不同而发生变化的。从顶部到-120 cm 处,Cu、Pb、Cd 和 Zn 元素的含量是逐渐增加的。除了 Cd 之外,其他几种重金属元素

在最上层的含量是很低的,由于尾矿砂是经过研磨工艺产生的,因而其颗粒较细小,为细砂—粉砂级,被暴露于地表后,受到外界因素的影响,重金属元素容易活化、释放并迁移。Pb 属于地表活动性较弱的元素,在地表被酸溶解随流水做短距离迁移后以硫酸盐的形式沉淀富集,主要富集在地表和低洼处(徐晓春等,2003)。Cd 元素含量总体上比其他元素低的多,并且在地表处富集,整体向下逐渐亏损。Cd 属于地表易迁移元素,易随雨水等迁移至周围水系及其沉积物和土壤中。Ni 元素可以被氢氧化铁、氧化铁等次生矿物、粘土矿物和无机胶体等吸附,以吸附沉淀的方式向下迁移(朱继保等,2005;Sidenko *et al.*, 2007),导致其在剖面下层富集。

2.4 尾砂中有价金属元素的回收利用

在铜绿山砂卡岩型矿床中,铜、铅、锌等重金属元素主要以硫化物和氧化物的形式存在,后经化学冶选以及长期堆存风化,重金属元素的矿物晶格遭受破坏,最后在尾矿砂中主要残存在粘土矿物中。在本次研究中采用硫酸堆浸—萃取探索尾砂中重金属元素的回收情况,为尾矿砂的综合利用和矿山环境治理提供科学依据。在工业冶选中为了节约成本和提高浸出率可采用循环浸出的方法。

王亚平(1998)的研究成果表明铜绿山铜铁尾矿以铜铁矿物为主,含极少量闪锌矿,基本不含方铅矿;铁矿物中以赤铁矿、褐铁矿和磁铁矿为主,而铜矿物中以氧化铜为主。尾矿中的铜含量很高,所以回收利用尾矿中的铜对于尾矿治理,降低周边环境污染防治具有重要意义。

考虑到尾砂中重金属多以氧化物和硫化物形式存在,采用酸法浸出,故利用 10% 的硫酸对尾砂样品进行提取。首先称取一定量的尾矿样品,加入还原剂,放置在马弗炉中进行焙烧;然后往焙烧产物中加入 10% 硫酸溶液进行提取,之后震荡离心进行测定(结果见表 4)。研究结果表明:利用稀硫酸提取尾矿砂尾矿砂中的重金属铜效果比较理想,铜的提取率较高,此提取液可以进行溶剂萃取—电积实验回收尾砂中的重金属元素铜。假如此提取过程进行熟化,提取率仍有提高的空间。

由表 4 可知,稀硫酸浸出的方法可以很好地提取尾矿砂中的有价重金属,尤其是铜。应用湿法冶金工艺(稀硫酸浸出—萃取剂提取富集—电沉积铜)回收利用铜绿山尾矿砂库中的有价重金属元素具有可观的工业前景,稀硫酸浸出—萃取剂提取富集的方法不仅能够分离回收尾矿砂中的游离态和吸附态有价

表 4 硫酸对金属元素的提取效果

Table 4 The effect of sulfuric acid to extract metal elements

| 样品 | Cu(mg/kg) | | Pb(mg/kg) | | Zn(mg/kg) | |
|---------|-----------|-------|-----------|------|-----------|--------|
| | 分离前 | 分离后 | 分离前 | 分离后 | 分离前 | 分离后 |
| T10-D-2 | 1 020 | 523 | 10.7 | 5.2 | 317 | 112.38 |
| T10-D-4 | 1 885 | 672 | 9.3 | 5.4 | 324 | 99.25 |
| T10-D-6 | 4 390 | 1 861 | 21.1 | 18.1 | 381 | 295.70 |
| T10-D-8 | 780 | 440 | 10.1 | 5.8 | 256 | 119.50 |
| 平均提取率 | 53.57% | | 37.53% | | 52.40% | |

重金属,还能分离回收晶格形态铜,这是由于稀硫酸能够破坏经化学浮选和长期堆存风化后的尾矿砂的晶格形态。

3 结论

铜绿山尾矿先后经过化学冶选和长期堆存风化,矿物组成发生显著改变,以粘土矿物(高岭石和伊利石)为主;尾砂中硅铝含量较高,属于高钙硅酸盐型尾矿;尾砂中重金属元素的活性明显增强,变异系数差异较大,在尾矿库中分布不均匀;从顶部第 1 层到第 6 层(-120 cm),Cu、Pb、Cd 和 Zn 元素的含量逐渐增加,在第 6 层强烈富集;尾矿以铜铁矿物为主,含极少量闪锌矿,基本不含方铅矿;铜矿物中以氧化铜为主,尾矿中铜含量很高,稀硫酸浸出—萃取剂提取富集的方法能够较有效分离回收尾矿砂中的重金属元素铜。

References

- Antonijevic, M. M., Dimitrijevic, M. D., Stevanovic, Z. O., et al., 2008. Investigation of the Possibility of Copper Recovery from the Flotation Tailings by Acid Leaching. *Journal of Hazardous Materilas*, 158(1): 23–34. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.01.063
- Chen, T. H., Feng, J. H., Xu, X. C., 2001. The Research Progress on the Acid Drainage and Heavy Metal Leaching of Foreign Mine Tailings. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2(2): 41–46 (in Chinese with English abstract).
- Deng, X. D., Li, J. W., Zhang, W., et al., 2012. Genesis of Granitic Pegmatites and Enclosed Graphic Texture in the Tonglüshan Fe-Cu (Au) Skarn Deposit: Constraints from K-Feldspar ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating, Trace-Element Geochemistry, and Fluid Inclusion Systematics. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(1): 77–92 (in Chinese with English abstract).
- Hong, H. L., Du, D. W., Li, R. B., et al., 2012. Mixed-Layer

- Clay Minerals in the Xuancheng Red Clay Sediments, Xuancheng, Anhui Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(3): 424—432 (in Chinese with English abstract).
- Lei, L. Q., Luo, Y. H., Song, C. A., et al., 2013. Assessment and Prediction of the Combined Pollution Risk of Heavy Metals in the Sulfide Tailings of a Mining Area, Northern Guangxi, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(5): 1107—1115 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J. G., Chen, K. D., Wang, H., et al., 2012. Recovering Molybdenite from Ultrafine Waste Tailings by Oil Agglomerate Flotation. *Minerals Engineering*, 39: 133—139. doi:10.1016/j.mineng.2012.07.006
- Kabas, S., Faz, A., Acosta, J. A., et al., 2012. Effect of Marble Waste and Pig Slurry on the Growth of Native Vegetation and Heavy Metal Mobility in a Mine Tailing Pond. *Journal of Geochemical Exploration*, 123: 69—76. doi: 10.1016/j.gexplo.2012.07.008
- Huang, K. J., Xie, S. Y., Bao, Z. Y., et al., 2008. Environmental Geochemistry of Heavy Metal and Trace Elements in Tailings of Tonglūshan Copper and Iron Mine, Daye, Hubei Province. *Geochimica*, 37(3): 213—222 (in Chinese with English abstract).
- Ramos-Arroyo, Y. R., Siebe, C., 2007. Weathering of Sulphide Minerals and Trace Elements Speciation in Tailings of Various Ages in the Guanajuato Mining District. *Catena*, 71(3): 497—506. doi: 10.1016/j.catena.2007.03.014
- Sidenko, N. V., Khozhina, E. I., Sherriff, B. L., 2007. The Cycling of Ni, Zn, Cu in the System “Mine Tailings-Ground Water-Plants”: A Case Study. *Applied Geochemistry*, 22(1): 30—52. doi: 10.1016/j.catena.2007.03.014
- Sirkeci, A. A., Gul, A., Bulut, G., et al., 2006. Recovery of Co, Ni, and Cu from the Tailings of Divrigi Iron Ore Concentrator. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 27(2): 131—141. doi: 10.1080/08827500600563343
- Sun, L. N., Jin, C. Z., 2002. Environmental Geochemistry of Water in Wolongquan River Valley. *Geochimica*, 31(1): 97—103 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. B., Gu, X. X., Zhang, Z. B., et al., 2011. Isotopic Geochemistry of the Tonglūshan Cu-Fe Type Deposit in Hubei Province. *Geoscience*, 25(4): 730—740 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. P., 1998. The Geochemistry of Environmental Effects of Trailings in Tonglūshan Cu-Fe Mine, Daye (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese).
- Wang, Y. P., Bao, Z. Y., Wang, S. M., et al., 1998. Progress on Study of Environmental Effects of Mine Solid Wastes and Environmental Effects of Tailings of Tonglūshan Mine, Daye. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 17(2): 97—101 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. C., Wang, J., Li, Y., et al., 2003. The Distribution and Migration of Heavy Metal Elements of Linchong Tailings Reservoir in Tongling, Anhui Province, and Their Environment Effects. *Acta Petrologica et Mineralogical*, 22(4): 433—436 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. P., 2003. Research and Production Practices on Comprehensive Recovery from Tailings in Tonglūshan Mine. *Nonferrous Metals (Mineral Processing)*, (3): 12—15 (in Chinese with English abstract).
- Ye, G. H., Tong, X., Lu, L., 2010. Progress and Propositions on Recovery of Valuable Metals from Tin Tailings. *Metal Mine*, (6): 9—13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. R., Wang, W. Z., Li, F. P., et al., 2002. Study on Comprehensive Utilization and Resource Utilization of Mine Tailings. Metallurgical Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zhou, T. F., Zhang, X., Yuan, F., et al., 2004. Negative Effects of Exploiting Mineral Resources in Mining Cities in Anhui Province and the Prevention Tactics. *Journal of Hefei University of Technology*, 27(3): 225—228 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J. B., Chen, F. R., Lu, L., et al., 2005. Heavy Metal Geochemistry Behavior during the Oxidation of the Fankou Pb-Zn Mine Tailings in Guangdong Province and the Implications for Environmental Remediation of the Mines. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(3): 414—422 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈天虎,冯军会,徐晓春,2001.国外尾矿酸性排水和重金属淋滤作用研究进展.环境污染治理技术与设备,2(2): 41—46.
- 邓晓东,李建威,张伟,等,2012.铜绿山 Fe-Cu(Au)矽卡岩矿床花岗岩晶岩及其文象结构的成因:来自钾长石⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄、微量元素和石英中流体包裹体的证据.地球科学——中国地质大学学报,37(1):77—92.
- 洪汉烈,杜登文,李荣彪,等,2012.安徽宣城红土剖面中粘土矿物过渡相及其意义.地球科学——中国地质大学学报,37(3):424—432.
- 黄康俊,谢淑云,鲍征宇,等,2008.大冶铜绿山铜铁矿床尾矿砂中重金属与微量元素环境地球化学特征研究.地球

化学,37(3):213—222.

雷良奇,罗远红,宋慈安,等,2013.桂北某矿区硫化物尾矿中金属符合污染评价预测.地球科学——中国地质大学学报,38(5):1107—1115.

孙丽娜,金成洙,2002.卧龙泉河流域水环境地球化学.地球化学,31(1):97—103.

王彦博,顾雪祥,张宗保,等,2011.湖北铜绿山矽卡岩型铜铁矿床同位素地球化学研究.现代地质,25(4):730—740.

王亚平,1998.大冶铜绿山铜铁矿尾矿环境效应的地球化学研究(博士毕业论文).武汉:中国地质大学.

王亚平,鲍征宇,王苏明,1998.矿山固体废物的环境效应研究进展及大冶铜绿山尾矿的环境效应.矿物岩石地球化学通报,17(2):97—101.

徐晓春,王军,李援,等,2003.安徽铜陵林冲尾矿库重金属元

素分布与迁移及其环境影响.岩石矿物学杂志,22(4):433—436.

徐晓萍,2003.铜绿山矿尾矿综合利用的研究与生产实践.有色金属(选矿部分),(3):12—15.

叶国华,童雄,路璐,2010.从锡尾矿中回收有价金属的进展及相关建议.金属矿山,(6):9—13.

张锦瑞,王伟之,李富平,等,2002.金属矿山尾矿综合利用与资源化.北京:冶金工业出版社.

周涛发,张鑫,袁峰,等,2004.矿山城市矿产资源利用的环境负效应及其防治.合肥工业大学学报(自然科学版),27(3):225—228.

朱继保,陈繁荣,卢龙,等,2005.广东凡口 Pb-Zn 尾矿中重金属的表生地球化学行为及其对矿山环境修复的启示.环境科学学报,25(3):414—422.

征稿通知

马杏垣院士是国内外著名的构造地质学家、地震地质学家和地质教育学家之一,曾长期担任中国地质学会构造地质专业委员会主任、北京地质学院副院长、国家地震局副局长兼地质研究所所长.他在科学研究和教学工作中,坚持实践第一,勇于开拓创新.他在科学研究和治学领域,学风严谨、为人师表,培育了几代地质学者,为我国地质研究和教育事业发展倾注了大量心血.2019年5月将是马杏垣院士百年华诞的日子,为了表达对马杏垣怀念和敬仰,本刊准备出一期专刊,表达好友、同事、学生对马院士的怀念之情.

稿件请按本刊征稿简则要求提交,并备注“马杏垣院士百年华诞专辑”.

投稿网址:<http://mc03.manuscriptcentral.com/es>

征稿简则:<http://www.earth-science.net/WebPage/noticeItem.aspx?id=598>

联系电话:027—67885075,67885076

联系人:姚戈

E-mail : xbb@cug.edu.cn; cjournal@cug.edu.cn

《地球科学》编辑部