

中蒙边界地区铜区域地球化学分布及远景区预测

聂兰仕^{1, 2)}, 刘汉粮^{1, 2)*}, 李江鹏³⁾, 范 羽³⁾, 迟清华^{1, 2)},
刘东盛^{1, 2)}, 周怡宁^{1, 2)}, 王学求^{1, 2)}

1) 自然资源部地球化学探测重点实验室, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000;

2) 联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北廊坊 065000;

3) 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院, 山东济南 250014

摘要: 中蒙边界地区成矿地质条件优越, 是世界上重要的金属成矿省和全球三大斑岩型铜(金、钼)成矿带之一, 资源潜力巨大。中蒙合作边界地区 1:100 万地球化学填图采集了海量的地球化学数据, 为该地区研究元素分散富集、成矿趋势、资源评价和环境变化提供基础数据。本文依托中蒙边界 1:100 万地球化学填图数据, 探讨铜在不同构造单元内的地球化学参数及区域地球化学异常特征。全区铜元素中位值和平均值分别是 20.1×10^{-6} 和 21.6×10^{-6} ; 东西准噶尔弧盆系、阿尔泰构造带、阿尔泰南缘弧盆系、戈壁阿尔泰弧盆系、准噶尔地块、北山—戈壁天山弧盆系 6 个构造单元铜含量中位值和平均值均高于全区铜含量, 是铜元素的富集构造造成矿带优势区; 根据 85% 累积频率, 圈定出 91 个铜地球化学异常区, 其中 34 个铜地球化学异常达到地球化学省规模, Oyu Tolgoi、Tsagaan Suvarga 等大型铜矿均产在地球化学异常内, 根据铜地球化学异常分布模式为该区寻找铜等多金属矿床提供了重要选区。本项研究填补了中蒙边界地区铜元素地球化学分布的空白, 同时为两国边境地区铜等多金属矿床对比提供基础数据。

关键词: 铜; 区域地球化学分布; 远景区预测; 地球化学填图; 中蒙边界地区

中图分类号: P596; P632 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.070901

Regional Geochemistry and Distribution of Anomalies Related to Potential Copper Metallologic Areas in China–Mongolia Border Region

NIE Lan-shi^{1, 2)}, LIU Han-liang^{1, 2)*}, LI Jiang-peng³⁾, FAN Yu³⁾, CHI Qing-hua^{1, 2)},
LIU Dong-sheng^{1, 2)}, ZHOU Yi-ning^{1, 2)}, WANG Xue-qiu^{1, 2)}

1) Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Natural Resources, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000;

2) UNESCO International Centre on Global-scale Geochemistry, Langfang, Hebei 065000;

3) Geological Exploration Institute of Shandong Zhengyuan, China Metallurgical Geology Bureau, Jinan, Shandong 250014

Abstract: China-Mongolia border region has excellent ore-forming geological conditions and is one of the world's important metal mineralization provinces and one of the world's three major porphyry copper (gold and molybdenum) metallogenic belts. China-Mongolian cooperative 1:1 000 000 geochemical mapping project collected a lot of geochemical data, providing basic data for the study of element dispersion and enrichment, mineralization trends, resource evaluation and environmental changes in this region. This paper discussed the geochemical parameters of copper in different tectonic belts and the regional geochemical anomalies based on 1:1 000 000 geochemical data across the boundary between China and Mongolia. The median and average values of copper are 20.1×10^{-6} and 21.6×10^{-6} . The median and average values of the eastern and western Junggar arc basin systems, the Altay tectonic belt, the arc basin system on the Altay southern margin, the Gobi Altay arc basin

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190451; DD20160116; DD20190450)资助。

收稿日期: 2020-06-09; 改回日期: 2020-06-22; 网络首发日期: 2020-07-13。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 聂兰仕, 男, 1979 年生。博士, 高级工程师。长期从事勘查地球化学研究。通讯地址: 065000, 河北省廊坊市金光道 84 号。

E-mail: nielanshi@163.com。

*通讯作者: 刘汉粮, 男, 1985 年生。硕士, 高级工程师。长期从事勘查地球化学研究。E-mail: liuhanliang912@163.com。

system, the Junggar block, and the Beishan–Gobi Tianshan arc basin system are higher than the values of other tectonic belts, showing that copper is enriched in those area. A total of 91 copper geochemical anomalies were delineated respectively based on the 85% cumulative percentage and 34 geochemical provinces that were selected. The work fills the gap in the copper geochemical distribution and provides important data for the comparison of ore deposits in this area.

Key words: copper; regional geochemistry; metallogenic prospective area; geochemical mapping; China–Mongolia border region

中蒙边界地区成矿地质条件优越,是世界上重要的金属成矿省和全球三大斑岩型铜(金、钼)成矿带之一,分布有 Oyu Tolgoi 超大型斑岩型铜金矿、Tsagaan Suvarga 大型斑岩型铜钼矿等,资源潜力巨大,是国际、国内地学研究和勘查的热点地区(聂凤军等, 2004, 2010; 侯万荣等, 2010; 方俊钦等, 2013; 李俊建等, 2015; Wainwright et al., 2017)。围绕国家“一带一路”战略及“两种资源、两个市场”和产业转移战略对矿产信息的重大急迫需求,利用中国领先的地球化学填图技术,采集中蒙边界地区地球化学数据,为资源评价和环境变化提供科学数据,为“一带一路”资源布局提供决策依据。根据中蒙双方签署的“中蒙合作地球化学填图协议”,在中蒙边界地区共完成了约 1 300 000 km² 的国家尺度(1:100 万)地球化学填图工作,该工作由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所和蒙古地质调查中心联合完成。笔者以中蒙边界地区 1:100 万地球化学填图数据为依托,统计了汇水域沉积物铜元素地球化学参数,并绘制了中蒙边界地区铜地球化学图,为进一步深入开发利用填图数据和资料提供可供对比的基础数据和图件。

1 区域地质概况

本文所指的中蒙边界地区包括中国的新疆、甘肃和内蒙古与蒙古国接壤的边界地区,大地构造位置地处华北克拉通与西伯利亚地台之间的古生代褶皱带内(图 1)。区内古生代地层出露广泛,深大断裂纵横交错,岩浆岩十分发育,金属矿床(点)星罗棋布,是中亚成矿带的重要组成部分(Badarch and Tomurtogoo, 2001; 聂凤军等, 2004; Tomurtogoo, 2006)。聂凤军等(2004)指出中蒙边境及邻区将有可能成为本世纪初全球铜矿找矿勘查的“热点”地区之一。该区代表性的铜和铜多金属矿床有延东—土屋、公婆泉、白山堂、欧玉陶勒盖(Oyu Tolgoi)、查干苏布尔加(Tsagaan Suvarga)、霍各乞、炭窑口、东升庙、白乃庙、奥尤特、小坝梁和乌努格吐,其中蒙古国欧玉陶勒盖矿床以规模大、品位高和杂质少而著称于世(Perello et al., 2001)。李俊建等(2015)以板块构造理论为指导,对中蒙边界地区构造格架进行了统一厘定

和划分,认为该区 I 级构造单元主体隶属于中亚构造带的阿尔泰—兴蒙造山系,部分属塔里木—华北陆块区。阿尔泰—兴蒙造山系可划分为 10 个 II 级、27 个 III 级和 69 个 IV 级构造单元,塔里木—华北陆块部分划分出 2 个 II 级、2 个 III 级和 4 个 IV 级构造单元;在成矿区带方面划分成古亚洲成矿域和滨太平洋成矿域(叠加在古亚洲成矿域之上),共划分出 5 个 II 级成矿省、16 个 III 级成矿带和 34 个 IV 级成矿亚带(李俊建等, 2016)。

2 工作方法

中蒙边界地区 1:100 万地球化学填图以 1:25 万或 1:20 万地形图作为野外工作用图,以 1:2.5 万图幅(经度差 7.5'×纬度差 5.0', 面积大约 100 km²)作为一个采样单元网格,每个网格采集 1 件样品或组合样品。汇水域沉积物是低密度地球化学填图的最理想采样介质(Wang et al., 2007)。采样点分布兼顾样品均匀性与最有效控制汇水域,样品在 50 m 范围内多点组合采样(3~5 个点),所有采样点位筛选 100 目的细粒级样品,由于样品粒度细、介质均匀,代表性强,同时细粒级样品具有独特的吸附特性,可以将含矿信息捕获与富集(王学求等, 2001, 2007, 2020; 聂兰仕等, 2015; 刘汉粮等, 2018a, b, 2019, 2020)。为满足矿产勘查、基础地质和生态环境的需要,分析了包括区域化探 39 种元素在内的 69 种元素,所有样品在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究中心实验室加工、分析,采用地壳全元素配套分析方案及分析质量监控系统(张勤等, 2012),以保障样品分析数据的准确性和一致性。铜检出限 1×10^{-6} ,报出率 100%,标准样合格率 100%,重复样合格率 100%(聂兰仕等, 2015)。

3 结果与讨论

中蒙边界地区共完成了约 1 300 000 km² 的国家尺度(1:100 万)地球化学填图工作,由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所和蒙古地质调查中心联合完成,工作范围是东西方向(经度)86°—120°,南北方向沿边境线向两国境内各延伸约 100 km,共采集样品 10 505 件。

3.1 中蒙边界地区铜地球化学参数统计

测区数据根据构造单元统计了铜元素地球化学参数,结果列于表1。构造单元划分为阿尔泰构造带、阿尔泰南缘弧盆系、东西准噶尔弧盆系、准噶尔地块、戈壁阿尔泰弧盆系、北山—戈壁天山弧盆系、巴音毛道—雅干—Baruun Tsohio构造带、

Ereen Davaa—额尔古纳微陆块、Baruun Urt—Hutag Uul—东乌旗—阿尔山弧盆带、Sulinheer—满都拉—霍林郭勒弧盆系、塔里木陆块、华北陆块12个二级构造单元(李俊建等,2015)。

中蒙边界地区汇水域沉积物铜含量直方图(图2)显示铜的分析数据大致具有对数正态分布特征,

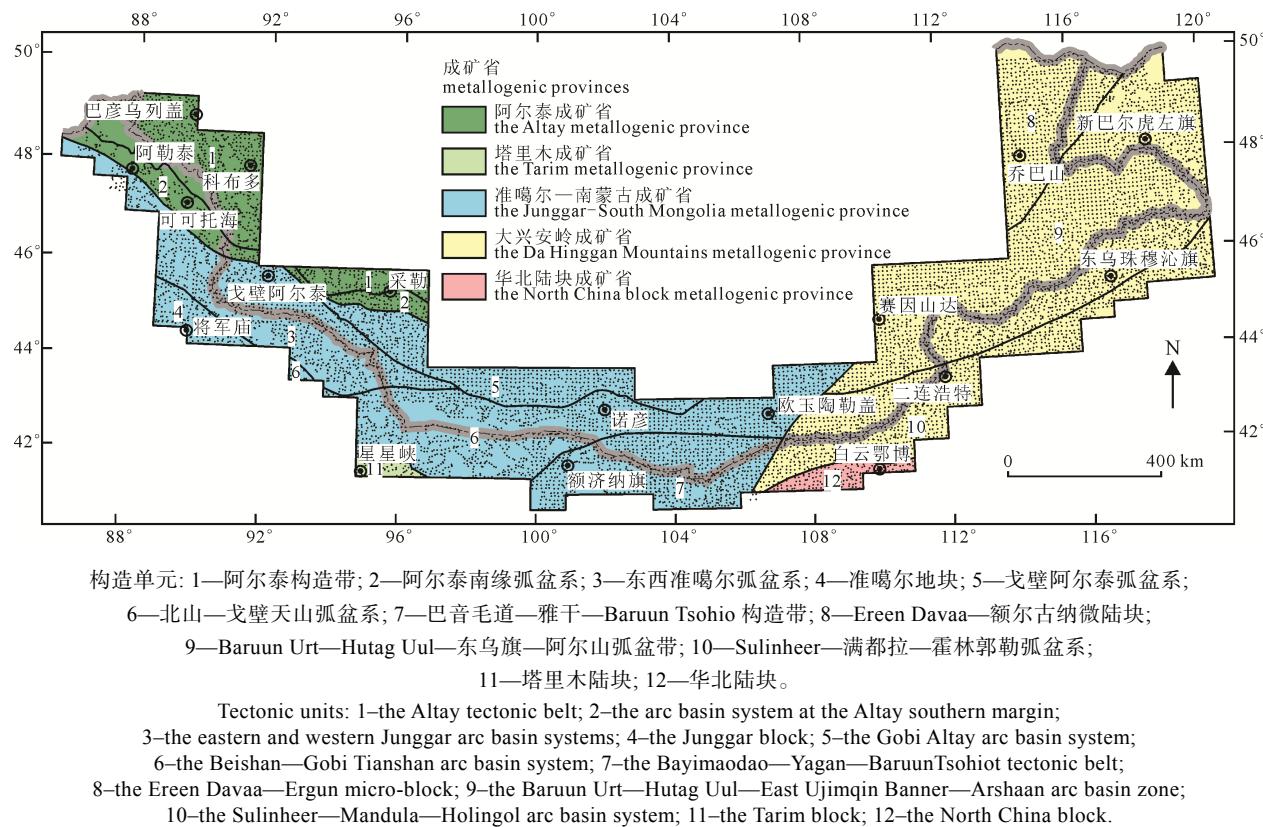


Fig. 1 Map of the working area showing the sampling sites and tectonic units (modified after LI et al., 2015, 2016 and LIU et al., 2020)

表1 中蒙边界地区汇水域沉积物铜元素地球化学参数

Table 1 Copper geochemical parameters of catchment sediments collected from different tectonic belts in China-Mongolia border region

| 构造单元 | 最小值 | 2.5% 分位数 | 25% 分位数 | 50% 分位数 | 75% 分位数 | 85% 分位数 | 97.5% 分位数 | 最大值 | 平均值 | 标准差 |
|------|------|----------|---------|---------|---------|---------|-----------|--------|-------|-------|
| 全区 | 0.95 | 8.20 | 15.11 | 20.10 | 25.90 | 29.72 | 43.79 | 675.75 | 21.61 | 12.72 |
| 1 | 0.95 | 11.95 | 22.08 | 28.29 | 35.70 | 40.44 | 56.80 | 180.52 | 30.03 | 13.42 |
| 2 | 7.82 | 13.75 | 21.48 | 26.54 | 33.30 | 37.10 | 50.05 | 108.00 | 28.37 | 10.80 |
| 3 | 1.62 | 14.30 | 24.06 | 28.75 | 34.10 | 38.89 | 54.51 | 103.80 | 30.05 | 10.10 |
| 4 | 3.88 | 12.68 | 20.70 | 25.12 | 31.39 | 35.64 | 46.37 | 63.95 | 26.63 | 8.69 |
| 5 | 8.90 | 11.83 | 20.00 | 25.50 | 31.70 | 34.90 | 47.17 | 80.90 | 26.49 | 9.34 |
| 6 | 6.57 | 13.49 | 19.70 | 22.70 | 27.00 | 29.80 | 42.78 | 675.75 | 25.07 | 23.20 |
| 7 | 4.05 | 10.88 | 16.76 | 19.10 | 22.82 | 25.24 | 36.06 | 50.54 | 20.20 | 6.03 |
| 8 | 3.15 | 6.48 | 10.88 | 14.40 | 19.34 | 22.35 | 31.21 | 103.08 | 15.89 | 7.38 |
| 9 | 3.76 | 6.87 | 12.26 | 15.82 | 20.22 | 22.50 | 29.49 | 804.08 | 16.80 | 16.21 |
| 10 | 5.21 | 8.82 | 13.80 | 17.57 | 21.17 | 23.51 | 31.10 | 54.37 | 17.99 | 5.83 |
| 11 | 7.86 | 8.86 | 15.84 | 20.24 | 23.82 | 26.59 | 46.21 | 56.55 | 21.05 | 8.62 |
| 12 | 8.52 | 11.29 | 14.88 | 17.68 | 20.42 | 22.13 | 28.25 | 74.62 | 18.56 | 6.64 |

注: 含量单位为 10^{-6} 。1-12 代表不同构造单元,名称同图1。1-阿尔泰构造带(样品数 760 件); 2-阿尔泰南缘弧盆系(样品数 311 件); 3-东西准噶尔弧盆系(样品数 1038 件); 4-准噶尔地块(样品数 171 件); 5-戈壁阿尔泰弧盆系(样品数 614 件); 6-北山—戈壁天山弧盆系(样品数 1421 件); 7-巴音毛道—雅干—Baruun Tsohio 构造带(样品数 892 件); 8-Ereen Davaa—额尔古纳微陆块(样品数 750 件); 9-Baruun Urt—Hutag Uul—东乌旗—阿尔山弧盆带(样品数 2979 件); 10-Sulinheer—满都拉—霍林郭勒弧盆系(样品数 1333 件); 11-塔里木陆块(样品数 66 件); 12-华北陆块(样品数 170 件)。

铜含量在 25%~75% 分位数区间内较为集中。中蒙边界地区汇水域沉积物铜元素地球化学参数(表 1)和箱状图(图 3)可以得出: 中蒙边界地区铜元素总体含量变化范围(2.5%~97.5%)是 8.20×10^{-6} ~ 43.8×10^{-6} , 中位值和平均值分别是 20.1×10^{-6} 和 21.6×10^{-6} 。对于划分的构造单元而言, 阿尔泰构造带铜元素总体含量变化范围(2.5%~97.5%)是 11.9×10^{-6} ~ 56.8×10^{-6} , 中位值和平均值分别是 28.3×10^{-6} 和 30.0×10^{-6} ; 相应地, 阿尔泰南缘弧盆系 13.8×10^{-6} ~ 50.0×10^{-6} , 26.5×10^{-6} , 28.4×10^{-6} ; 东西准噶尔弧盆系 14.3×10^{-6} ~ 54.5×10^{-6} , 28.7×10^{-6} , 30.1×10^{-6} ; 准噶

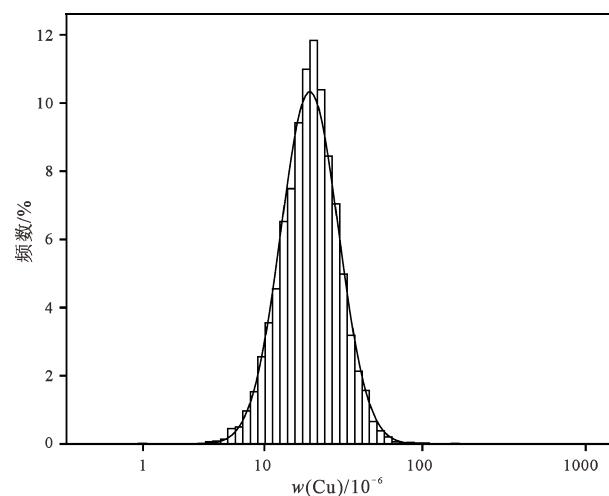


图 2 中蒙边界地区汇水域沉积物铜直方图

Fig. 2 Copper histogram of catchment sediments collected from different tectonic belts in China-Mongolia border region

尔地块 12.7×10^{-6} ~ 46.4×10^{-6} , 25.1×10^{-6} , 26.6×10^{-6} ; 戈壁阿尔泰弧盆系 11.8×10^{-6} ~ 47.2×10^{-6} , 25.5×10^{-6} , 26.5×10^{-6} ; 北山—戈壁天山弧盆系 13.5×10^{-6} ~ 42.8×10^{-6} , 22.7×10^{-6} , 25.1×10^{-6} ; 巴音毛道—雅干—Baruun Tsohio 构造带 10.9×10^{-6} ~ 36.1×10^{-6} , 19.1×10^{-6} , 20.2×10^{-6} ; Ereen Davaa—额尔古纳微陆块 6.48×10^{-6} ~ 31.2×10^{-6} , 14.4×10^{-6} , 15.9×10^{-6} ; Baruun Urt—Hutag Uul—东乌旗—阿尔山弧盆带 6.87×10^{-6} ~ 29.5×10^{-6} , 15.8×10^{-6} , 16.8×10^{-6} ; Sulinheer—满都拉—霍林郭勒弧盆系 8.82×10^{-6} ~ 31.1×10^{-6} , 17.6×10^{-6} , 18.0×10^{-6} ; 塔里木陆块 8.86×10^{-6} ~ 46.2×10^{-6} , 20.2×10^{-6} , 21.0×10^{-6} ; 华北陆块 11.3×10^{-6} ~ 28.2×10^{-6} , 17.7×10^{-6} , 18.6×10^{-6} 。铜元素对于划分的构造单元而言以中位值排序: 东西准噶尔弧盆系>阿尔泰构造带>阿尔泰南缘弧盆系>戈壁阿尔泰弧盆系>准噶尔地块>北山—戈壁天山弧盆系>塔里木陆块>全区>巴音毛道—雅干—Baruun Tsohio 构造带>华北陆块>Sulinheer—满都拉—霍林郭勒弧盆系>Baruun Urt—Hutag Uul—东乌旗—阿尔山弧盆带>Ereen Davaa—额尔古纳微陆块; 以平均值排序: 东西准噶尔弧盆系>阿尔泰构造带>阿尔泰南缘弧盆系>准噶尔地块>戈壁阿尔泰弧盆系>北山—戈壁天山弧盆系>全区>塔里木陆块>巴音毛道—雅干—Baruun Tsohio 构造带>华北陆块>Sulinheer—满都拉—霍林郭勒弧盆系>Baruun Urt—Hutag Uul—东乌旗—阿尔山弧盆带>

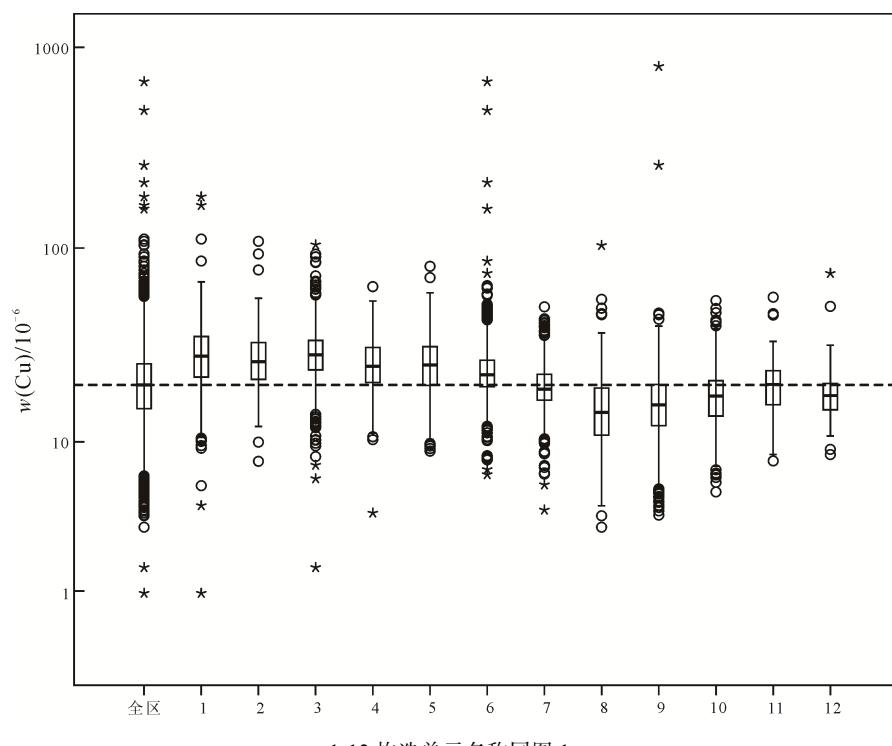


图 3 中蒙边界地区不同构造单元内铜含量箱图

Fig. 3 Copper boxplots of catchment sediments collected from different tectonic belts in China-Mongolia border region

Ereen Davaa—额尔古纳微陆块。无论是中位值还是平均值东西准噶尔弧盆系、阿尔泰构造带、阿尔泰南缘弧盆系、戈壁阿尔泰弧盆系、准噶尔地块、北山—戈壁天山弧盆系 6 个构造单元铜含量均高于全区铜含量; 巴音毛道—雅干—Baruun Tsohio 构造带、华北陆块、Sulinheer—满都拉—霍林郭勒弧盆系、Baruun Urt—Hutag Uul—东乌旗—阿尔山弧盆带、Ereen Davaa—额尔古纳微陆块 5 个构造单元铜含量均低于全区铜含量。结果显示铜元素在各个构造单元分布不均一, 而正是这种局部的不均一性才能通过加密采样刻画出地球化学模式的细节变化, 为逐步追踪矿化体奠定基础。东西准噶尔弧盆系铜含量最高, 中位值和平均值分别是全区中位值和平均值的 1.43 倍和 1.39 倍, 说明该构造单元是铜元素的富集区。

3.2 中蒙边界地区铜区域地球化学分布及远景区优选

利用中国地质调查局发展研究中心研发的 GeoExpl 软件绘制元素地球化学图, 并统计各异常区内相关参数。根据累积频率(0%、0.5%、1.2%、2%、3%、4.5%、8%、15%、25%、40%、60%、75%、85%、92%、95.5%、97%、98%、98.8%、99.5%、100%)制作地球化学图(图 4), 图中显示铜高值区主要集中在中蒙边界西部, 整体呈西高东低的趋势。西部为山区, 基性岩等分布较广导致整体背景高于东部草原、干旱半干旱覆盖区。为了更好地圈定各个构造单元内的地球化学异常, 根据整体中位值和各个构造单元中位值对数据进行子区中位值衬值计算, 以剔除各个构造单元背景衬值, 降低高、低背景对异常筛选的影响, 制作中蒙边界地区铜地球化学图(图 5)。将铜含量 25.8×10^{-6} (累积频率 85%)作为中蒙边界地区铜异常下限, 同时满足异常范围内有连续异常点或者具有地球化学异常套合结构特征。地球化学异常或地球化学块体多层套合结构是指一系列由高到低多层次套合异常组成的区域地球化学分布模式, 也就是说局部异常被区域异常所包裹, 而区域异常又依次被更大规模的地球化学省、地球化学巨省等所包裹(谢学锦等, 2002)。按照这个原则分别圈定出 91 个铜地球化学异常(编号 Cu01-Cu91), 其中有 34 个异常(Cu20、Cu28、Cu11、Cu74、Cu53、Cu71、Cu87、Cu06、Cu83、Cu79、Cu63、Cu76、Cu85、Cu12、Cu67、Cu05、Cu59、Cu19、Cu01、Cu84、Cu36、Cu30、Cu16、Cu38、Cu54、Cu68、Cu88、Cu69、Cu72、Cu31、Cu90、Cu65、Cu35、Cu78)面积大于 1000 km^2 , 达地球化学省规模(谢学锦等, 2002; 王学求等, 2013), 各个

参数见表 2。

Cu20: 分布在中蒙边界工作区东部, 属于大兴安岭成矿省(李俊建等, 2016)。研究区内大兴安岭成矿省可划分为克鲁伦—额尔古纳铜、钨、钼、铅、锌、银、金、萤石、铀(煤)成矿带, 努库特达班(Nukhetdavaa)—二连—东乌旗—阿尔山铜、钼、铅、锌、钨、锡、铬、铁成矿带和 Sulinheer—白乃庙—锡林浩特铁、铜、钼、铅、锌、铬、(金、锰)锗、煤、天然碱、芒硝成矿带(李俊建等, 2016; 刘汉粮等, 2020)。Cu20 异常面积达 19620 km^2 , 异常点 232 个, 异常内平均值 31.6×10^{-6} , 异常强度 1.57, 异常衬度 1.22, 达到地球化学巨省规模(谢学锦等, 2002)。王守光等(2004)也指出南戈壁—东乌旗一带是一条值得重视的铜多金属跨国境成矿带。

Cu28: 分布在中蒙边界工作区东部, 属于大兴安岭成矿省(李俊建等, 2016), 与 Cu20 构造位置一致, 且有已知矿分布。异常面积达 13004 km^2 , 异常点 168 个, 异常内平均值 30.7×10^{-6} , 异常强度 1.53, 异常衬度 1.19, 达到地球化学巨省规模(谢学锦等, 2002)。

Cu36: 分布在中蒙边界工作区中部, 蒙古境内赛音山达西南部, Cu36 异常面积达 1700 km^2 , 异常点 28 个, 异常内平均值 69.7×10^{-6} , 异常强度 3.47, 异常衬度 2.70, 异常强度高, 异常衬度大, 达到地球化学省规模(谢学锦等, 2002), 该地球化学巨省内产出查干苏布尔加(Tsagaan Suvarga)大型斑岩型铜钼矿。查干苏布尔加铜(钼)矿床位于蒙古国东戈壁省, 欧玉陶勒盖铜(金)矿区北东方向 150 km , 赛因山达西南方向约 150 km 。矿床中心地理位置坐标: 北纬 $43^{\circ}52'$, 东经 $108^{\circ}20'$, 大地构造位置处于南蒙古构造岩浆带内, 西伯利亚板块南缘近东西向和北东向深大断裂所夹持的古生代岛弧带内。矿区内出露的地层主要为石炭系砂岩、粉砂岩、凝灰岩、凝灰砂岩、生物灰岩、英安玢岩、安山玢岩和粗面安山岩等。区内构造主要由北东向和北西向断裂构造及裂隙发育带所控制, 主要控矿构造是出露在查干苏布尔加岩体内、外的北东向构造带, 呈雁列状分布, 查干苏布尔加矿床就产在构造带的北部带中(侯万荣等, 2010)。

Cu39: 分布在中蒙边界工作区中部, 蒙古境内欧玉陶勒盖, 异常面积达 673 km^2 , 异常点 15 个, 异常内平均值 26.7×10^{-6} , 异常强度 1.33, 异常衬度 1.03, 该地球化学异常内产出欧玉陶勒盖(Oyu Tolgoi)斑岩型铜金矿。欧玉陶勒盖斑岩型铜(金)矿田位于蒙古国南戈壁省, 北距蒙古国首都乌兰巴托市 550 km , 南距中蒙边境 80 km 。矿区中心的地理坐标为北纬 $43^{\circ}01'$, 东经 $106^{\circ}51'$ 。大地构造位置上,

欧玉陶勒盖铜金矿床位于西伯利亚板块与华北陆块之间古生代造山带东蒙古地幔异常区(构造隆起带)南缘, 属南蒙古后贝加尔褶皱系肯特杭爱弧形断块。欧玉陶勒盖地区以泥盆纪和石炭纪岛弧火山岩和沉积岩为主, 其中, 泥盆系岩石被认为是超大型欧玉陶勒盖斑岩型铜(金)矿田的围岩。欧玉陶勒盖铜金矿田位于泥盆系基性-中性火山岩、火山碎屑岩和沉积岩的极少露头范围内, 晚泥盆世侵入岩被石炭纪火山岩和沉积岩所环绕(张义等, 2003; 方俊钦等, 2013)。地理景观为干旱荒漠区, 风成沙干扰以及 Oyu Tolgoi 等铜矿床均为隐伏矿, 导致该区仅显现低缓异常, 且异常规模不大。

Cu74、Cu53、Cu71、Cu79、Cu63、Cu76、Cu67、Cu59、Cu38、Cu54、Cu68、Cu69、Cu72、Cu65、Cu78: 分布在中蒙边界工作区中西部, 属于准噶尔—南蒙古成矿省(李俊建等, 2016)。准噶尔—南蒙古成矿省可进一步划分为北准噶尔—Baruunhuurai

铜、镍、钼、金成矿带, Edrengiin 铜、锌、锰、铁成矿带, Edren—Zoolon 金成矿带, 卡拉麦里(东准噶尔)铬、铜、金、锡、硫铁矿、石墨、石棉、水晶成矿带, 准噶尔盆地石油、天然气、铀、煤、盐类、膨润土成矿带, 准噶尔南缘—觉罗塔格—黑鹰山—七一山—Tomortein Nuruu—Tsagaan Suvarga 铜、钼、金、钨、铁、铬、锰、稀有、硼、沸石、石墨、透闪石玉、滑石成矿带, 雅干—Harmorit—Hanbogd—Lugiingol 锡、钨、铌、钽、锆、稀土、铁、铜、金、镍成矿带和乌力吉—欧布拉格铜、铁、金、镍、钴、铀、油页岩成矿带(芮宗瑶等, 2002; Kirwin et al., 2005; 李俊建等, 2016), 铜是该区主要矿产, 共圈定 15 个地球化学省。高地球化学背景为大型矿床的形成提供了充足的巨量元素供给, 为地球化学块体理论、巨量物质聚集、套合的元素地球化学模式谱系与大型巨型矿床形成关系的研究提供了基本的地球化学证据(谢学锦等, 2002)。

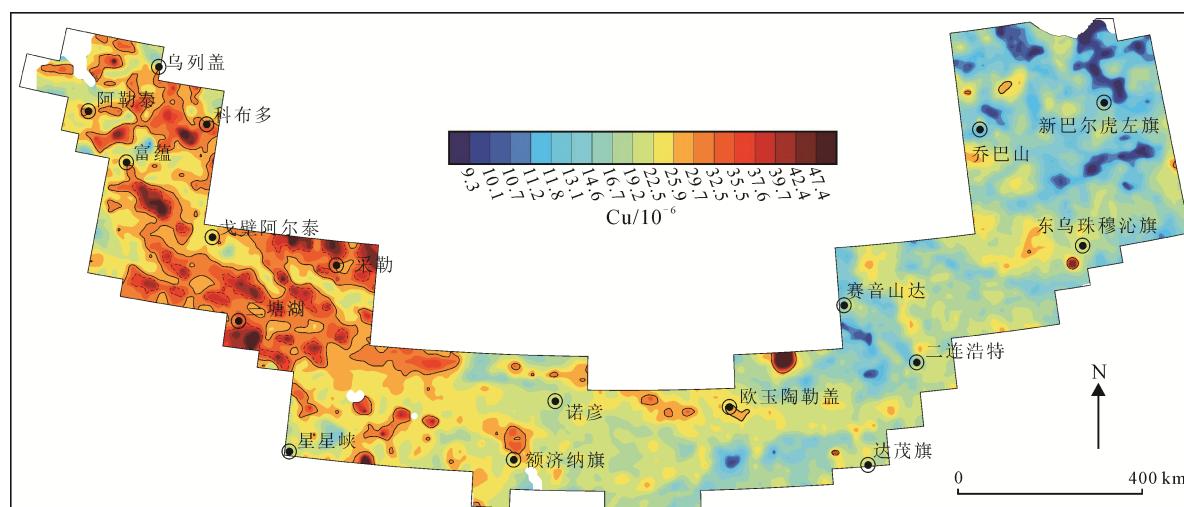


图 4 中蒙边界地区铜地球化学图

Fig. 4 Copper regional geochemical map of catchment sediments collected in China–Mongolia border region

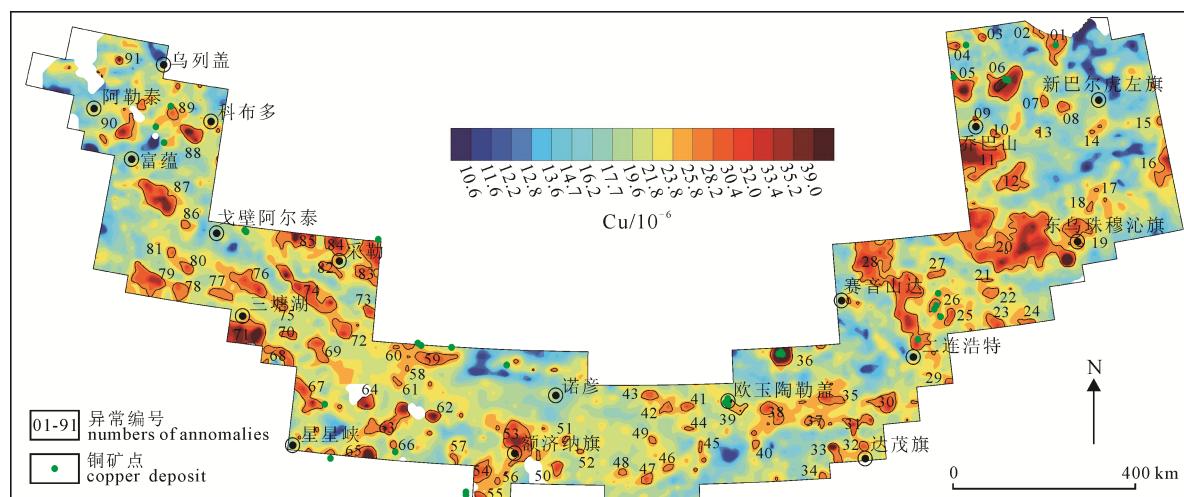


图 5 中蒙边界地区铜地球化学图(按构造单元中位值剔除衬值后)

Fig. 5 Copper regional geochemical map of catchment sediments collected in China–Mongolia border region
(after removing the contrast value according to the median value of the tectonic unit)

表 2 中蒙边界地区铜地球化学异常统计参数

Table 2 The statistics parameters of copper geochemical anomalies in China-Mongolia border region

| 编号 | 面积 /km ² | 样点数/个 | 极大值 /10 ⁻⁶ | 极小值 /10 ⁻⁶ | 平均值 /10 ⁻⁶ | 中位值 /10 ⁻⁶ | 总体背景 值/10 ⁻⁶ | 异常下限 /10 ⁻⁶ | 离差 | 异常 强度 | 异常 衬度 | 变异 系数 |
|------|---------------------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------|-------|-------|-------|
| Cu01 | 1 830 | 31 | 43.3 | 17.1 | 30.2 | 30.2 | 20.1 | 25.8 | 7.54 | 1.50 | 1.17 | 0.25 |
| Cu02 | 256 | 2 | 34.4 | 27.8 | 31.1 | 31.1 | 20.1 | 25.8 | 4.67 | 1.55 | 1.21 | 0.15 |
| Cu03 | 220 | 3 | 45.7 | 30.9 | 40.4 | 44.4 | 20.1 | 25.8 | 8.19 | 2.01 | 1.57 | 0.20 |
| Cu04 | 330 | 3 | 64.4 | 26.7 | 39.8 | 28.3 | 20.1 | 25.8 | 21.29 | 1.98 | 1.54 | 0.53 |
| Cu05 | 1 982 | 31 | 143.9 | 19.2 | 34.7 | 28.7 | 20.1 | 25.8 | 22.54 | 1.72 | 1.34 | 0.65 |
| Cu06 | 3 682 | 46 | 65.2 | 19.6 | 34.9 | 33.9 | 20.1 | 25.8 | 8.85 | 1.74 | 1.35 | 0.25 |
| Cu07 | 336 | 3 | 43.8 | 26.4 | 34.4 | 33.0 | 20.1 | 25.8 | 8.75 | 1.71 | 1.33 | 0.25 |
| Cu08 | 476 | 9 | 38.5 | 24.8 | 30.3 | 28.5 | 20.1 | 25.8 | 4.94 | 1.51 | 1.17 | 0.16 |
| Cu09 | 75 | 2 | 69.4 | 23.1 | 46.3 | 46.3 | 20.1 | 25.8 | 32.77 | 2.30 | 1.79 | 0.71 |
| Cu10 | 252 | 5 | 45.5 | 26.4 | 34.2 | 32.0 | 20.1 | 25.8 | 7.20 | 1.70 | 1.33 | 0.21 |
| Cu11 | 5 585 | 66 | 52.0 | 24.1 | 33.0 | 32.4 | 20.1 | 25.8 | 5.88 | 1.64 | 1.28 | 0.18 |
| Cu12 | 2 373 | 26 | 39.1 | 21.7 | 31.1 | 31.6 | 20.1 | 25.8 | 4.00 | 1.55 | 1.20 | 0.13 |
| Cu13 | 48 | 2 | 36.5 | 31.2 | 33.9 | 33.9 | 20.1 | 25.8 | 3.73 | 1.69 | 1.31 | 0.11 |
| Cu14 | 64 | 2 | 30.7 | 28.9 | 29.8 | 29.8 | 20.1 | 25.8 | 1.27 | 1.48 | 1.16 | 0.04 |
| Cu15 | 150 | 2 | 35.0 | 29.3 | 32.2 | 32.2 | 20.1 | 25.8 | 4.04 | 1.60 | 1.25 | 0.13 |
| Cu16 | 1 586 | 16 | 38.9 | 18.4 | 28.7 | 28.5 | 20.1 | 25.8 | 4.99 | 1.43 | 1.11 | 0.17 |
| Cu17 | 57 | 3 | 31.5 | 24.7 | 28.0 | 27.9 | 20.1 | 25.8 | 3.44 | 1.39 | 1.09 | 0.12 |
| Cu18 | 200 | 4 | 33.8 | 27.4 | 30.8 | 30.9 | 20.1 | 25.8 | 3.50 | 1.53 | 1.19 | 0.11 |
| Cu19 | 1 843 | 24 | 41.7 | 20.0 | 29.5 | 30.0 | 20.1 | 25.8 | 5.02 | 1.47 | 1.14 | 0.17 |
| Cu20 | 19 620 | 232 | 329.8 | 13.3 | 31.6 | 30.5 | 20.1 | 25.8 | 20.68 | 1.57 | 1.22 | 0.66 |
| Cu21 | 130 | 1 | 34.0 | 34.0 | 34.0 | 34.0 | 20.1 | 25.8 | | 1.69 | 1.32 | |
| Cu22 | 634 | 9 | 38.6 | 21.0 | 30.6 | 31.1 | 20.1 | 25.8 | 5.36 | 1.52 | 1.19 | 0.17 |
| Cu23 | 851 | 10 | 40.0 | 26.9 | 30.9 | 29.3 | 20.1 | 25.8 | 4.32 | 1.54 | 1.20 | 0.14 |
| Cu24 | 346 | 4 | 32.8 | 21.9 | 29.4 | 31.5 | 20.1 | 25.8 | 5.13 | 1.46 | 1.14 | 0.17 |
| Cu25 | 540 | 7 | 50.4 | 15.2 | 35.8 | 35.4 | 20.1 | 25.8 | 13.31 | 1.78 | 1.39 | 0.37 |
| Cu26 | 448 | 6 | 40.9 | 19.5 | 29.5 | 29.7 | 20.1 | 25.8 | 7.23 | 1.47 | 1.14 | 0.25 |
| Cu27 | 479 | 7 | 36.0 | 30.9 | 33.5 | 33.6 | 20.1 | 25.8 | 1.88 | 1.66 | 1.30 | 0.06 |
| Cu28 | 13 004 | 168 | 53.9 | 16.8 | 30.7 | 29.3 | 20.1 | 25.8 | 7.30 | 1.53 | 1.19 | 0.24 |
| Cu29 | 181 | 3 | 34.3 | 19.8 | 28.5 | 31.4 | 20.1 | 25.8 | 7.69 | 1.42 | 1.11 | 0.27 |
| Cu30 | 1 652 | 21 | 44.6 | 20.3 | 30.4 | 29.9 | 20.1 | 25.8 | 5.74 | 1.51 | 1.18 | 0.19 |
| Cu31 | 1 233 | 16 | 56.6 | 17.0 | 34.8 | 33.7 | 20.1 | 25.8 | 10.84 | 1.73 | 1.35 | 0.31 |
| Cu32 | 349 | 4 | 57.7 | 24.3 | 35.0 | 29.0 | 20.1 | 25.8 | 15.42 | 1.74 | 1.36 | 0.44 |
| Cu33 | 790 | 6 | 84.7 | 20.7 | 42.5 | 31.7 | 20.1 | 25.8 | 25.37 | 2.11 | 1.65 | 0.60 |
| Cu34 | 183 | 3 | 29.9 | 26.3 | 28.6 | 29.7 | 20.1 | 25.8 | 2.03 | 1.42 | 1.11 | 0.07 |
| Cu35 | 1 084 | 12 | 46.3 | 22.2 | 30.7 | 29.2 | 20.1 | 25.8 | 7.49 | 1.53 | 1.19 | 0.24 |
| Cu36 | 1 700 | 28 | 598.4 | 17.8 | 69.7 | 28.2 | 20.1 | 25.8 | 131.55 | 3.47 | 2.70 | 1.89 |
| Cu37 | 521 | 10 | 35.2 | 22.6 | 28.7 | 28.4 | 20.1 | 25.8 | 3.80 | 1.43 | 1.11 | 0.13 |
| Cu38 | 1 456 | 21 | 42.4 | 19.1 | 28.7 | 28.0 | 20.1 | 25.8 | 5.88 | 1.43 | 1.11 | 0.20 |
| Cu39 | 673 | 15 | 31.9 | 17.9 | 26.7 | 26.0 | 20.1 | 25.8 | 3.91 | 1.33 | 1.03 | 0.15 |
| Cu40 | 226 | 3 | 46.3 | 26.1 | 36.7 | 37.8 | 20.1 | 25.8 | 10.11 | 1.83 | 1.42 | 0.28 |
| Cu41 | 411 | 5 | 35.9 | 30.5 | 32.9 | 32.4 | 20.1 | 25.8 | 2.33 | 1.64 | 1.28 | 0.07 |
| Cu42 | 452 | 3 | 39.8 | 23.3 | 29.3 | 24.8 | 20.1 | 25.8 | 9.11 | 1.46 | 1.13 | 0.31 |
| Cu43 | 598 | 6 | 40.3 | 24.5 | 30.6 | 29.5 | 20.1 | 25.8 | 5.44 | 1.52 | 1.19 | 0.18 |
| Cu44 | 122 | 2 | 35.6 | 30.4 | 33.0 | 33.0 | 20.1 | 25.8 | 3.65 | 1.64 | 1.28 | 0.11 |
| Cu45 | 160 | 4 | 31.1 | 25.6 | 29.2 | 30.0 | 20.1 | 25.8 | 2.56 | 1.45 | 1.13 | 0.09 |
| Cu46 | 249 | 7 | 37.6 | 25.0 | 30.2 | 27.9 | 20.1 | 25.8 | 5.28 | 1.50 | 1.17 | 0.18 |
| Cu47 | 467 | 5 | 38.1 | 24.4 | 32.3 | 31.4 | 20.1 | 25.8 | 5.55 | 1.61 | 1.25 | 0.17 |
| Cu48 | 206 | 5 | 39.3 | 19.9 | 29.4 | 30.7 | 20.1 | 25.8 | 7.20 | 1.46 | 1.14 | 0.24 |
| Cu49 | 205 | 3 | 35.1 | 25.7 | 30.7 | 31.1 | 20.1 | 25.8 | 4.75 | 1.53 | 1.19 | 0.16 |
| Cu50 | 574 | 7 | 46.1 | 16.2 | 35.0 | 38.1 | 20.1 | 25.8 | 9.67 | 1.74 | 1.36 | 0.28 |
| Cu51 | 118 | 2 | 40.3 | 27.9 | 34.1 | 34.1 | 20.1 | 25.8 | 8.82 | 1.70 | 1.32 | 0.26 |
| Cu52 | 111 | 3 | 44.0 | 19.7 | 31.7 | 31.4 | 20.1 | 25.8 | 12.14 | 1.58 | 1.23 | 0.38 |
| Cu53 | 4 017 | 39 | 53.2 | 11.7 | 31.2 | 32.5 | 20.1 | 25.8 | 10.42 | 1.55 | 1.21 | 0.33 |

续表 2

| 编号 | 面积 /km ² | 样点 数/个 | 极大值 /10 ⁻⁶ | 极小值 /10 ⁻⁶ | 平均值 /10 ⁻⁶ | 中位值 /10 ⁻⁶ | 总体背景 值/10 ⁻⁶ | 异常 下限/10 ⁻⁶ | 离差 | 异常 强度 | 异常 衬度 | 变异 系数 |
|------|------------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|-------|----------|----------|----------|
| Cu54 | 1 410 | 11 | 41.7 | 23.7 | 29.3 | 27.9 | 20.1 | 25.8 | 4.88 | 1.46 | 1.14 | 0.17 |
| Cu55 | 389 | 2 | 35.6 | 30.8 | 33.2 | 33.2 | 20.1 | 25.8 | 3.40 | 1.65 | 1.29 | 0.10 |
| Cu56 | 145 | 2 | 39.9 | 25.7 | 32.8 | 32.8 | 20.1 | 25.8 | 10.09 | 1.63 | 1.27 | 0.31 |
| Cu57 | 224 | 3 | 44.8 | 22.8 | 34.8 | 36.7 | 20.1 | 25.8 | 11.16 | 1.73 | 1.35 | 0.32 |
| Cu58 | 74 | 2 | 38.9 | 22.8 | 30.9 | 30.9 | 20.1 | 25.8 | 11.33 | 1.54 | 1.20 | 0.37 |
| Cu59 | 1 850 | 23 | 37.2 | 24.5 | 29.8 | 30.0 | 20.1 | 25.8 | 3.08 | 1.48 | 1.15 | 0.10 |
| Cu60 | 243 | 2 | 32.8 | 28.7 | 30.7 | 30.7 | 20.1 | 25.8 | 2.90 | 1.53 | 1.19 | 0.09 |
| Cu61 | 193 | 4 | 33.6 | 21.3 | 30.0 | 32.5 | 20.1 | 25.8 | 5.90 | 1.49 | 1.16 | 0.20 |
| Cu62 | 689 | 2 | 55.7 | 41.1 | 48.4 | 48.4 | 20.1 | 25.8 | 10.29 | 2.41 | 1.87 | 0.21 |
| Cu63 | 2 677 | 21 | 76.0 | 18.4 | 32.2 | 28.7 | 20.1 | 25.8 | 12.90 | 1.60 | 1.25 | 0.40 |
| Cu64 | 887 | 3 | 57.3 | 28.6 | 38.9 | 30.8 | 20.1 | 25.8 | 15.97 | 1.93 | 1.51 | 0.41 |
| Cu65 | 1 209 | 12 | 138.9 | 19.0 | 37.3 | 29.1 | 20.1 | 25.8 | 32.36 | 1.86 | 1.45 | 0.87 |
| Cu66 | 182 | 4 | 40.3 | 14.1 | 28.5 | 29.9 | 20.1 | 25.8 | 12.71 | 1.42 | 1.11 | 0.45 |
| Cu67 | 1 983 | 20 | 56.0 | 16.1 | 31.3 | 29.6 | 20.1 | 25.8 | 10.89 | 1.56 | 1.21 | 0.35 |
| Cu68 | 1 387 | 11 | 44.5 | 22.9 | 31.3 | 31.0 | 20.1 | 25.8 | 6.47 | 1.56 | 1.21 | 0.21 |
| Cu69 | 1 331 | 9 | 41.0 | 23.7 | 30.6 | 28.2 | 20.1 | 25.8 | 6.35 | 1.52 | 1.18 | 0.21 |
| Cu70 | 523 | 6 | 72.7 | 18.0 | 36.6 | 31.7 | 20.1 | 25.8 | 20.43 | 1.82 | 1.42 | 0.56 |
| Cu71 | 3 808 | 35 | 65.3 | 19.0 | 33.6 | 31.2 | 20.1 | 25.8 | 11.13 | 1.67 | 1.30 | 0.33 |
| Cu72 | 1 272 | 11 | 59.7 | 22.8 | 32.7 | 31.4 | 20.1 | 25.8 | 9.83 | 1.63 | 1.27 | 0.30 |
| Cu73 | 517 | 6 | 42.2 | 22.1 | 33.4 | 34.9 | 20.1 | 25.8 | 7.86 | 1.66 | 1.30 | 0.24 |
| Cu74 | 4 172 | 47 | 63.8 | 20.1 | 32.8 | 32.2 | 20.1 | 25.8 | 8.52 | 1.63 | 1.27 | 0.26 |
| Cu75 | 417 | 5 | 36.5 | 22.3 | 29.4 | 32.3 | 20.1 | 25.8 | 6.39 | 1.46 | 1.14 | 0.22 |
| Cu76 | 2 475 | 24 | 50.7 | 24.0 | 30.8 | 30.2 | 20.1 | 25.8 | 5.81 | 1.53 | 1.19 | 0.19 |
| Cu77 | 879 | 11 | 34.0 | 24.8 | 28.8 | 28.1 | 20.1 | 25.8 | 2.32 | 1.43 | 1.12 | 0.08 |
| Cu78 | 1 014 | 12 | 41.7 | 23.5 | 29.3 | 28.2 | 20.1 | 25.8 | 4.80 | 1.46 | 1.14 | 0.16 |
| Cu79 | 2 894 | 31 | 51.2 | 15.2 | 30.2 | 29.1 | 20.1 | 25.8 | 7.09 | 1.50 | 1.17 | 0.23 |
| Cu80 | 557 | 2 | 39.3 | 34.8 | 37.1 | 37.1 | 20.1 | 25.8 | 3.14 | 1.84 | 1.44 | 0.08 |
| Cu81 | 333 | 3 | 41.3 | 23.1 | 35.0 | 40.6 | 20.1 | 25.8 | 10.33 | 1.74 | 1.36 | 0.30 |
| Cu82 | 809 | 11 | 70.8 | 21.8 | 33.1 | 31.0 | 20.1 | 25.8 | 13.79 | 1.65 | 1.28 | 0.42 |
| Cu83 | 3 404 | 36 | 47.9 | 18.3 | 29.8 | 29.8 | 20.1 | 25.8 | 6.48 | 1.48 | 1.16 | 0.22 |
| Cu84 | 1 719 | 18 | 43.7 | 24.1 | 32.0 | 30.4 | 20.1 | 25.8 | 5.83 | 1.59 | 1.24 | 0.18 |
| Cu85 | 2 377 | 25 | 78.8 | 13.6 | 31.7 | 29.2 | 20.1 | 25.8 | 12.47 | 1.58 | 1.23 | 0.39 |
| Cu86 | 294 | 6 | 32.2 | 25.3 | 30.5 | 31.5 | 20.1 | 25.8 | 2.67 | 1.52 | 1.18 | 0.09 |
| Cu87 | 3 728 | 38 | 59.2 | 18.7 | 33.1 | 32.0 | 20.1 | 25.8 | 8.70 | 1.65 | 1.28 | 0.26 |
| Cu88 | 1 356 | 19 | 128.2 | 15.4 | 35.5 | 27.5 | 20.1 | 25.8 | 25.14 | 1.77 | 1.38 | 0.71 |
| Cu89 | 544 | 6 | 44.6 | 21.4 | 30.0 | 28.0 | 20.1 | 25.8 | 8.23 | 1.49 | 1.16 | 0.27 |
| Cu90 | 1 216 | 8 | 81.9 | 21.2 | 34.3 | 28.5 | 20.1 | 25.8 | 19.74 | 1.71 | 1.33 | 0.58 |
| Cu91 | 209 | 3 | 116.1 | 17.2 | 52.2 | 23.3 | 20.1 | 25.8 | 55.42 | 2.60 | 2.02 | 1.06 |

注: 异常强度=异常内平均值/背景值, 异常衬度=异常内平均值/异常下限, 变异系数=异常内离差/异常内平均值。

Cu87、Cu83、Cu85、Cu84、Cu88、Cu90: 分布在中蒙边界工作区西部, 蒙古科布多—中国阿勒泰, 属于阿尔泰成矿省(李俊建等, 2016), 铜的重要成矿带。阿尔泰成矿省可进一步划分为北阿尔泰稀有、铜、铅、锌、钼、钨、银、铁、锑、汞、白云母、宝石成矿带和南阿尔泰铜、铅、锌、铁、金、稀有、白云母、宝石成矿带(李俊建等, 2006; 王鸿祯等, 2006), 该区同样是铜的重要成矿省和矿产地, 共圈定6个地球化学省。

Cu11、Cu06、Cu12、Cu05、Cu19、Cu01、Cu30、Cu16、Cu31、Cu35: 分布在中蒙边界工作区中东部,

属于大兴安岭成矿省(李俊建等, 2016)。圈定的10个地球化学省分布在克鲁伦—额尔古纳铜成矿带、努库特达班(Nukhetdavaa)—二连—东乌旗—阿尔山铜成矿带和Sulinheer—白乃庙—锡林浩特铜成矿带(李俊建等, 2016; 刘汉粮等, 2020)。

4 结论

在中蒙边界地区开展1:100万地球化学填图工作, 覆盖了约1 300 000 km², 获得了高质量铜地球化学数据和图件。本文初步探讨了铜元素区域地球化学分布特征, 结果表明: (1)中蒙边界地区汇水域

沉积物铜含量具有对数正态分布特征, 铜含量在25%~75%分位数区间内较为集中; (2)全区铜元素中位值和平均值分别是 20.1×10^{-6} 和 21.6×10^{-6} ; (3)对于划分的构造单元而言, 无论是中位值还是平均值东西准噶尔弧盆系、阿尔泰构造带、阿尔泰南缘弧盆系、戈壁阿尔泰弧盆系、准噶尔地块、北山—戈壁天山弧盆系6个构造单元铜含量均高于全区铜含量; 东西准噶尔弧盆系铜含量最高, 中位值和平均值分别是全区中位值和平均值的1.43倍和1.39倍, 是铜元素的富集区; (4)根据85%累积频率, 圈定出91个铜地球化学异常区, 其中34个铜地球化学异常达到地球化学省规模, Oyu Tolgoi、Tsagaan Suvarga等大型铜矿均产在地球化学异常内, 根据铜地球化学异常为该区寻找铜等多金属矿床提供了重要选区。利用低密度地球化学填图方法寻找潜在的大型、超大型矿床是一条高效率、低成本的可行途径。

致谢: 感谢所有参与样品采集和样品分析测试的工作者! 感谢审稿人和责任编辑提出的宝贵修改意见!

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20190451, DD20160116 and DD20190450).

参考文献:

- 方俊钦, 聂凤军, 徐备, 陈鹏, 童勤龙. 2013. 蒙古国欧玉陶勒盖斑岩型铜(金)矿田的找矿新进展[J]. 地质科技情报, 32(5): 188-194.
- 侯万荣, 聂凤军, 江思宏, 白大明, 刘妍, 云飞, 刘翼飞. 2010. 蒙古国查干苏布尔加大型铜-钼矿床地质特征及成因[J]. 地球学报, 31(3): 307-320.
- 李俊建, 唐文龙, 付超, 陈正, OROLMAA D, OYUNTUYA N, DELGERSAIKHAN A, ENKHBAT T, 党智财, 赵泽霖, 张锋, 任军平, 赵丽君. 2016. 中蒙边界地区成矿区带划分[J]. 地质通报, 35(4): 461-487.
- 李俊建, 张锋, 任军平, 唐文龙, 付超, 陈正, 李承东, 赵丽君, 冯晓曦, 党智财, 赵泽霖, 刘晓雪, TOMURTOGOO O, DELGERSAIKHAN A, ENKHBAT T, ALTANKHUNDAGA B, DORJSUREN B, BATBAYAR J. 2015. 中蒙边界地区构造单元划分[J]. 地质通报, 34(4): 636-662.
- 刘汉粮, 聂兰仕, SHOJIN Davaa, 王学求, 迟清华. 2020. 中蒙边界地区汇水域沉积物69元素背景值[J/OL]. 地学前缘, 1-20. <https://doi.org/10.13745/>.
- 刘汉粮, 聂兰仕, 王学求, 张义波, 刘东盛, 王玮, 迟清华. 2018a. 中蒙跨境阿尔泰构造带稀有元素锂区域地球化学分布[J]. 现代地质, 32(3): 493-499.
- 刘汉粮, 聂兰仕, 王学求, 张义波, 王玮, 刘东盛. 2019. 中蒙跨境阿尔泰地区铍区域地球化学特征[J]. 地质与勘探, 55(1): 95-102.
- 刘汉粮, 王学求, 聂兰仕, 王玮, 迟清华, 刘东盛. 2018b. 阿尔泰成矿带中蒙边界地区稀有元素铌和钽区域地球化学特征[J]. 现代地质, 32(5): 1063-1073.
- 聂凤军, 江思宏, 白大明, 侯万荣, 刘翼飞. 2010. 蒙古国南部及邻区金属矿床类型及其时空分布特征[J]. 地球学报, 31(3): 267-288.
- 聂凤军, 江思宏, 张义, 刘妍, 胡朋. 2004. 中蒙边境及邻区斑岩型铜矿床地质特征及成因[J]. 矿床地质, 23(2): 176-189.
- 聂兰仕, 刘汉粮, 王学求. 2015. 中蒙合作边界地区地球化学填图与勘查远景区优选成果报告[R]. 廊坊: 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所.
- 芮宗瑶, 刘玉琳, 王龙生, 王义天. 2002. 新疆东天山斑岩型铜矿带及其大地构造格局[J]. 地质学报, 76(1): 83-94.
- 王鸿祯, 何国琦, 张世红. 2006. 中国与蒙古之地质[J]. 地学前缘, 13(6): 1-13.
- 王守光, 黄占起, 苏新旭, 沈存利, 胡凤翔. 2004. 一条值得重视的跨国境成矿带—南戈壁-东乌旗铜多金属成矿带[J]. 地学前缘, 11(1): 249-255.
- 王学求, 迟清华, 孙宏伟. 2001. 荒漠戈壁区超低密度地球化学调查与评价—以东天山为例[J]. 新疆地质, 19(3): 200-206.
- 王学求, 刘汉粮, 王玮, 周建, 张必敏, 徐善法. 2020. 中国锂矿地球化学背景与空间分布: 远景区预测[J]. 地球学报, 41(6): 797-806.
- 王学求, 申武军, 张必敏, 聂兰仕, 迟清华, 徐善法. 2007. 地球化学块体与大型矿集区的关系—以东天山为例[J]. 地学前缘, 14(5): 116-123.
- 王学求, 徐善法, 迟清华, 刘雪敏. 2013. 中国金的地球化学省及其成因的微观解释[J]. 地质学报, 87(1): 1-8.
- 谢学锦, 刘大文, 向运川, 严光生. 2002. 地球化学块体—概念和方法学的发展[J]. 中国地质, 29(3): 225-233.
- 张勤, 白金峰, 王烨. 2012. 地壳全元素配套分析方案及分析质量监控系统[J]. 地学前缘, 19(3): 33-42.
- 张义, 聂凤军, 江思宏, 胡朋. 2003. 中蒙边境欧玉陶勒盖大型铜-金矿床的发现及对找矿勘查工作的启示[J]. 地质通报, 22(9): 708-712.

References:

- BADARCH G, TOMURTOGOO O. 2001. Tectonostratigraphic terranes of Mongolia[J]. Gondwana Research, 2(4): 143-144.
- FANG Jun-qin, NIE Feng-jun, XU Bei, CHEN Peng, TONG Qin-long. 2013. Prospecting progress of the Oyu Tolgoi porphyry copper-gold orefield in Mongolia[J]. Geological Science and Technology Information, 32(5): 188-194(in Chinese with English abstract).
- HOU Wan-rong, NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, BAI Da-ming, LIU Yan, YUN Fei, LIU Yi-fei. 2010. The geology and ore-forming mechanism of the Tsagaan Suvarga large-size Cu-Mo porphyry deposit in Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(3): 307-320(in Chinese with English abstract).
- KIRWIN D J, FORSTER C N, KAVALIERIS I, CRANE D, ORSSICH C, PANTHER C, GARAMJAV D, MUNKHBAT T O, NIISLELKHUU G. 2005. The Oyu Tolgoi copper-gold porphyry deposits, South Gobi, Mongolia[C]//SELMANN R, GEREL O, KIRWIN D J. Geodynamics and metallogeny of Mongolia with a special emphasis on copper and gold deposits. London: IAGOD, 5-12.
- LI Jun-jian, ZHANG Feng, REN Jun-ping, TANG Wen-long, FU

- Chao, CHEN Zheng, LI Cheng-dong, ZHAO Li-jun, FENG Xiao-xi, DANG Zhi-cai, ZHAO Ze-lin, LIU Xiao-xue, TOMURTOGOO O, DELGERSAIKHAN A, ENKHBAT T, ALTANKHUNDAGA B, DORJSUREN B, BATBAYAR J. 2015. Tectonic units in China-Mongolia border area and their fundamental characteristics[J]. Geological Bulletin of China, 34(4): 636-662(in Chinese with English abstract).
- LI Jun-jian, TANG Wen-long, FU Chao, CHEN Zheng, OROLMAA D, OYUNTUYA N, DELGERSAIKHAN A, ENKHBAT T, DANG Zhi-cai, ZHAO Ze-lin, ZHANG Feng, REN Jun-ping, ZHAO Lijun. 2016. The division of metallogenic belts in Sino-Mongolian border area[J]. Geological Bulletin of China, 35(4): 461-487(in Chinese with English abstract).
- LIU Han-liang, NIE Lan-shi, WANG Xue-qiu, ZHANG Yi-bo, LIU Dong-sheng, WANG Wei, CHI Qing-hua. 2018. Regional geochemistry of lithium in the Altay area across the boundary of China and Mongolia[J]. Geoscience, 32(3): 493-499(in Chinese with English abstract).
- LIU Han-liang, WANG Xue-qiu, NIE Lan-shi, WANG Wei, CHI Qing-hua, LIU Dong-sheng. 2018. Regional geochemistry of niobium and tantalum across the boundary of China and Mongolia in the Altay metallogenic belt[J]. Geoscience, 32(5): 1063-1073(in Chinese with English abstract).
- LIU Han-liang, NIE Lan-shi, WANG Xue-qiu, ZHANG Yi-bo, WANG Wei, LIU Dong-sheng. 2019. Regional geochemistry of beryllium in the Altay area across the border between China and Mongolia[J]. Geology and Exploration, 55(1): 95-102(in Chinese with English abstract).
- LIU Han-liang, NIE Lan-shi, SHOJIN Davaa, WANG Xue-qiu, CHI Qing-hua. 2020. Background values of 69 elements in catchment sediments of the China-Mongolia boundary region[J/OL]. Earth Science Frontiers, 1-20. <https://doi.org/10.13745/in Chinese with English abstract>.
- NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, ZHANG Yi, LIU Yan, HU Peng. 2004. Geological features and origin of porphyry copper deposits in China-Mongolia border region and its neighboring areas[J]. Mineral Deposits, 23(2): 176-189(in Chinese with English abstract).
- NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, BAI Da-ming, HOU Wan-rong, LIU Yi-fei. 2010. Types and temporal-spatial distribution of metallic deposits in Southern Mongolia and its neighboring areas[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(3): 267-288(in Chinese with English abstract).
- PERELLO J. 2001. Oyu Tolgoi, Mongolia: Siluro-Devonian porphyry Cu-Au (Mo) and high_sulfidation Cu mineralization with a Cretaceous chalcocite blanket[J]. Economic Geology, 96: 1407-1428.
- RUI Zong-yao, LIU Yu-lin, WANG Long-sheng, WANG Yi-tian. 2002. The Eastern Tianshan porphyry copper belt in Xinjiang and its tectonic framework[J]. Acta Geologica Sinica, 76(1): 83-94.
- TOMURTOGOO O. 2006. Tectonic framework of Mongolia[C]//TOMURHUU D, NATAL'IN B, YA A. Structural and tectonic correlation across the central Asian orogenic collage: Implications for continental growth and intracontinental deformation. Ulaanbaatar: Mongolian University of Science and Tectonology Press: 18-20.
- WAINWRIGHT A J, TOSDAL R M, LEWIS P D, FRIEDMAN R M. 2017. Exhumation and Preservation of Porphyry Cu-Au deposits at Oyu Tolgoi, South Gobi Region, Mongolia[J]. Economic Geology, 112(3): 591-601.
- WANG Hong-zhen, HE Guo-qi, ZHANG Shi-hong. 2006. The geology of China and Mongolia[J]. Earth Science Frontiers, 13(6): 1-13(in Chinese with English abstract).
- WANG Shou-guang, HUANG Zhan-qi, SU Xin-xu, SHEN Cun-li, HU Feng-xiang. 2004. A notable metallogenic belt striding across the border between China and Mongolia—south Gobi-Dongwuqi copper-polymetallic metallogenic belt[J]. Earth Science Frontiers, 11(1): 249-255(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, CHI Qing-hua, SUN Hong-wei. 2001. Wide-spaced geochemical survey in arid desdet terrain, a case history from the eastern Tianshan regions, northwestern China[J]. Xinjiang Geology, 19(3): 200-206(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, LIU Han-liang, WANG Wei, ZHOU Jian, ZHANG Bi-min, XU Shan-fa. 2020. Geochemical Abundance and Spatial Distribution of Lithium in China: Implications for Potential Prospects[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 797-806(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, SHEN Wu-Jun, ZHANG Bi-Min, NIE Lan-Shi, CHI Qing-hua, XU Shan-Fa. 2007. Relationship of geochemical blocks and ore districts: examples from Eastern Tianshan metallogenic belt, Xinjiang, China[J]. Earth Science Frontiers, 14(5): 116-123(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, CHI Qing-hua, LIU Hui-yan, NIE Lan-shi, ZHANG Bi-min. 2007. Wide-spaced sampling for delineation of geochemical provinces in desert terrains, northwestern China[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 7(2): 153-161.
- WANG Xue-qiu, XU Shan-fa, CHI Qing-hua, LIU Xue-min. 2013. Gold geochemical provinces in China: a micro and nano scale formation mechanism[J]. Acta Geologica Sinica, 87(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- XIE Xue-jin, LIU Da-wen, XIANG Yun-chuan, YAN Guang-sheng. 2002. Geochemical blocks-development of concept and methodology[J]. Geology in China, 29(3): 225-233(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qin, BAI Jin-feng, WANG Ye. 2012. Analytical scheme and quality monitoring system for China Geochemical Baselines[J]. Earth Science Frontiers, 19(3): 33-42(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yi, NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, HU Peng. 2003. Discovery of the Oyu Tolgoi cooper-gold deposit in the Sino-Mongolia border region and its significance for mineral exploration[J]. Geological Bulletin of China, 22(9): 708-712 (in Chinese with English abstract).