

doi: 10.11720/wtyht.2023.1198

向文帅,白洋,姜军胜,等.地球化学块体法在埃塞俄比亚铜矿资源评价中的应用[J].物探与化探,2023,47(4):845-855.http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1198

Xiang W S, Bai Y, Jiang J S, et al. Application of the geochemical block method to the assessment of copper resources in Ethiopia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(4): 845-855. http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1198

地球化学块体法在埃塞俄比亚铜矿资源评价中的应用

向文帅¹,白洋²,姜军胜¹,雷义均¹,HUNDIE Melka³,
SISAY Degu³,张元培²,吴颖²,郑雄伟²

(1.中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),湖北武汉 430205;2.湖北省地质局地球物理勘探大队,湖北武汉 430056;3.埃塞俄比亚地质调查局,亚的斯亚贝巴 999047)

摘要:低密度地球化学填图具有采样水系级别高、工作覆盖面积广阔的特征,可有效追溯具有高金属含量的地球化学块体。本次研究以埃塞俄比亚 1:100 万低密度地球化学填图数据为基础,通过对原始水系沉积物中 Cu 测试数据处理后,应用迭代剔除的方法,计算得出 Cu 的异常下限值为 37×10^{-6} 。在此基础上,以 37×10^{-6} 、 42×10^{-6} 、 47×10^{-6} 、 52×10^{-6} 、 59×10^{-6} 、 66×10^{-6} 作为分级间隔,共圈定出地球化学块体 3 个、区域异常 2 个。通过参考相同成矿带中铜矿勘查研究程度较高的地球化学块体中已知铜矿床储量,计算出研究区的 Cu 块体成矿率为 0.055%。本次以 1 000 m 岩块厚度估算出研究区内 Cu 的资源量为 260 万 t。结合区域成矿地质条件分析,确定 2 号、3 号、4 号地球化学块体所在区域可作为开展进一步详细勘查工作的重点成矿远景区。

关键词:埃塞俄比亚;铜;地球化学块体;资源潜力;成矿远景区

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2023)04-0845-11

0 引言

地球化学块体是指地壳中某种或某些金属元素高含量的巨大异常块体($\geq 1\ 000\ \text{km}^2$),它们是地球演化至今不均匀性的直观显示,其可为矿床的形成提供巨量的物质供应^[1]。块体在平面上表现为具有连续浓度级次的区域异常直到地球化学省甚至地球化学域的地球化学模式,垂向上块体可能具有一定的深度。该定义由谢学锦院士提出至今,已有 20 余年的发展应用史,在指导勘查地球化学找矿及矿产资源潜力评价方面具有重要的意义^[2-7]。低密度地球化学填图具有采样水系级别高,采样工作覆盖区域面积广阔的特征,可以有效追索具有高金属含量的地球化学块体^[3],在此基础上,参考具有相似成矿地质背景且勘探程度较高的块体内已探明的矿产资源量,可有效估算各块体内成矿金属元素的成

矿率,进而对研究区块体内的资源潜力进行预测评价^[8-9]。最终,通过地球化学块体的划定和成矿地质条件分析,可较好地定位成矿远景区,在研究程度较低的区域实现找矿突破。

埃塞俄比亚水系沉积物地球化学测量工作程度非常低,仅在本次研究区外的西部 Gmbi-Nejo 地区和南部亚纳格莱地区开展过系统的 1:25 万区域水系沉积物地球化学测量^[10],其余均为在矿区范围内开展过的小面积、大比例尺土壤地球化学测量工作,整体地球化学勘查程度低且系统性较差;此外,除北部前寒武系基底区外,其他有利成矿区的铜矿勘查研究也亟待突破。本次利用地球化学块体法,对已完成采样测试工作的埃塞中北部地区进行系统的 Cu 资源量估算及成矿潜力分析,并在此基础上划定 Cu 成矿远景区,为后续赴埃塞俄比亚开展 Cu 矿开发的企业提供基础技术资料支撑,降低勘查风险。

收稿日期:2022-04-19;修回日期:2023-01-02

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20190443,DD20160109)

第一作者:向文帅(1986-),男,博士研究生,长期从事境外地质矿产调查与研究。Email:oldwenzi@163.com

通讯作者:白洋(1988-),男,硕士研究生,长期从事境外地球化学勘查工作。Email:493652968@qq.com

1 研究区概况

埃塞俄比亚位于形成于 1 000~450 Ma 的“泛非构造带”中的东非造山带,由阿拉伯—努比亚地盾和莫桑比克带构成,东非大裂谷沿 NE 向纵贯埃塞全境,以此为界埃塞俄比亚被分为东部低地、中西部高原和裂谷带。本次研究区整体位于埃塞俄比亚中北部,覆盖埃塞俄比亚西部及北部前寒武系变质基底,南部边界到达埃塞俄比亚南部前寒武系变质基底北缘。区内主要出露前寒武系基底变质岩、晚古生代—中生代海相和陆相沉积岩、新生代基性—酸性火山岩和火山沉积岩^[11],不涉及莫桑比克带^[12],具体如图 1 所示。埃塞俄比亚矿产资源丰富,已发现的金属矿产有金、铂、铜、铅、锌等,主要的优势矿种为金、铂、铜等。铜矿主要分布于埃塞俄比亚北部前寒武纪低级变质火山沉积岩系中,主要成矿类型为火山块状硫化物(VMS)及其次生铁帽型铜矿,研究区内已发现的典型铜矿床(点)包括 Shire、Adyabo、Harvest、North Ethiopia、Shehagne 等 VMS 型 Cu 矿床等^[13-14],整体来看,本次研究区具有较好的 Cu 找矿潜力。

1.1 地质体构成

埃塞俄比亚主要出露的岩石为前寒武系变质基底、晚古生代—中生代海相和陆相沉积岩、新生代基性—酸性火山岩和火山沉积岩,其中前寒武纪变质岩及其构造同期—后期侵入岩构成的杂岩主要出露于北部、西部和南部地区,约占整个国土面积的 23%;显生宙的沉积岩和火山岩覆盖了这个国家中部高原大部分地区、裂谷和东部的拗陷,其中晚古生代—中生代沉积岩约占 25%,新生代基性—酸性火山岩约占 34%,新生代火山沉积岩和火山碎屑岩,包括古近纪、新近纪和第四纪地层约占 18%。

埃塞俄比亚岩浆活动主要集中在前寒武纪和新生代,其中前寒武纪基底杂岩中岩浆岩侵入体分布范围极为广泛,主要类型为酸性侵入岩。此外,还存在少量闪长岩和超基性侵入岩。伴随东非大裂谷形成而产生的一系列火山活动主要分布在该国北部和中部。前人^[16]研究指出,中部埃塞俄比亚高原与裂谷接触地段主要产出玄武岩和少量流纹岩,形成时代为始新层—中新层中段(大约 54~15 Ma)。

1.2 构造

埃塞俄比亚前寒武纪基底以及覆于该基底单元之上的中生代海相地层和古近纪—新近纪玄武岩系

列,前者经历了强烈的褶皱和叶理化作用,后者产状近水平。这一整套岩石系列在晚始新世时期发生了抬升,并成为阿拉伯—埃塞俄比亚构造隆起的一部分,后期发生的裂谷事件贯穿了整个岩石系列单元,并在该地区形成了裂谷系统。

1.3 矿产概况

埃塞俄比亚的主要 Cu 矿均产于前寒武变质基底区,主要由北部(Tigray) Au-Cu 矿集区、(Assosa) Au-Cu 矿集区、西南部(Akobo) Au-Cu 矿集区和南部(Adola) Au-Cu 矿集区等组成,这些矿产多与低级变质火山沉积岩及区域构造演化作用有关。本次研究区主要覆盖北部及西部两个矿集区,典型矿床包括北部的 Shire 等一系列块状硫化物 Cu-Au 多金属矿床^[14,17];西部则主要以与绿岩带型(造山型)金矿伴生的铜矿点为主^[15],达到开采规模的铜矿床至今未有发现。

2 样品采集与分析

2016 年中国地质调查局武汉地质调查中心与埃塞俄比亚地质调查局开展合作,计划完成该国全域 1:100 万低密度地球化学填图,项目持续至 2019 年,完成了中北部近 60 万 km²的采样工作。埃塞俄比亚境内的采样点位分布如图 1 所示。样品分析测试工作由自然资源部武汉矿产资源监督检测中心承担,统一分析了 69 种元素,本次研究使用的 Cu 数据采用 ICP-MS 分析方法,分析检出限为 0.1 × 10⁻⁶。

3 Cu 地球化学块体的圈定与分布

3.1 数据预处理

如前文所述,埃塞俄比亚的 Cu-Au 等金属矿产均产于前寒武变质基底区。埃塞俄比亚中北部地区的该类地质体集中分布于北部的 Tigray 及西部的 Assosa 地区,中部大面积分布的以玄武岩为主的新生代火山岩区成矿潜力非常有限。研究表明玄武岩普遍具有高 Cu 含量的特征^[18-19],若采用原始数据直接进行块体圈定,新生代火山岩区水系沉积物中整体的 Cu 高含量背景会对前寒武变质基底区的 Cu 异常造成非常明显的掩盖,从而导致有利 Cu 地球化学块体的圈定出现错误。鉴于此,本次研究工作仅保留埃塞俄比亚境内前寒武变质基底区及周缘的 308 件水系沉积物样品数据参与 Cu 地球化学块体的圈定,其余地质体分布区的水系沉积物数据不参与分析。

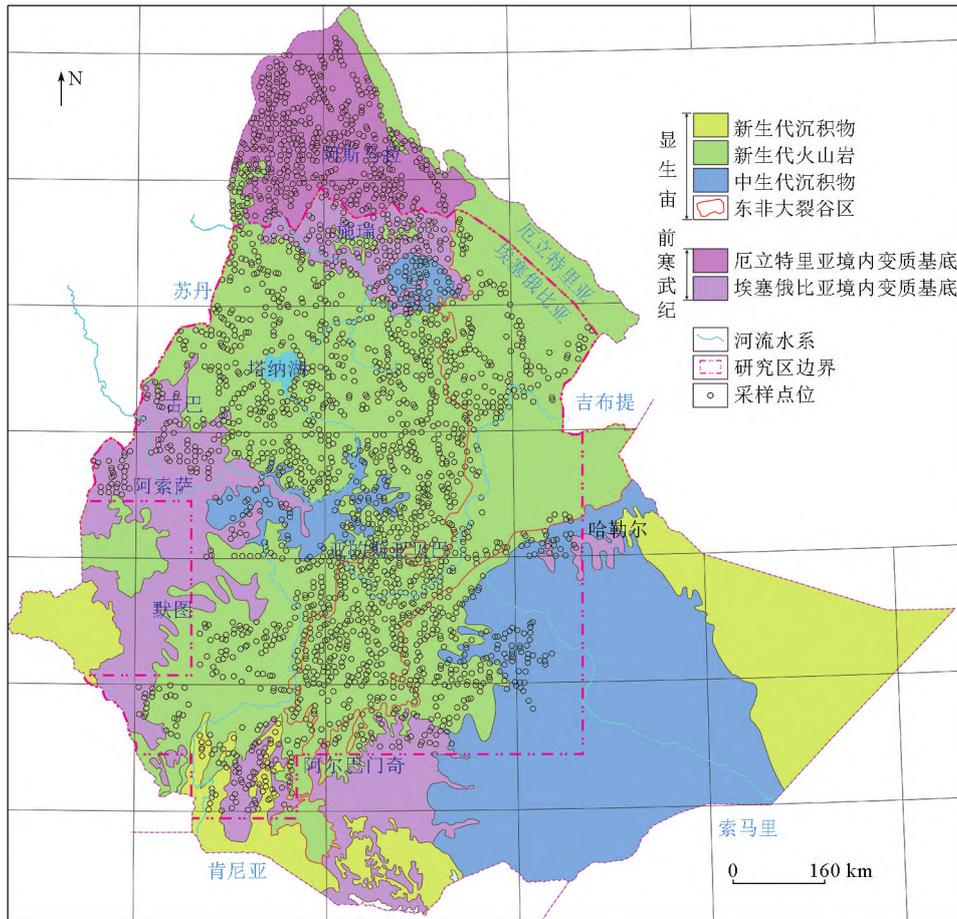


图 1 埃塞俄比亚—厄立特里亚地质及采样点位分布(据文献[15]修编)

Fig.1 Brief geology and sample point map of Ethiopia-Eritrea(revised according to reference [15])

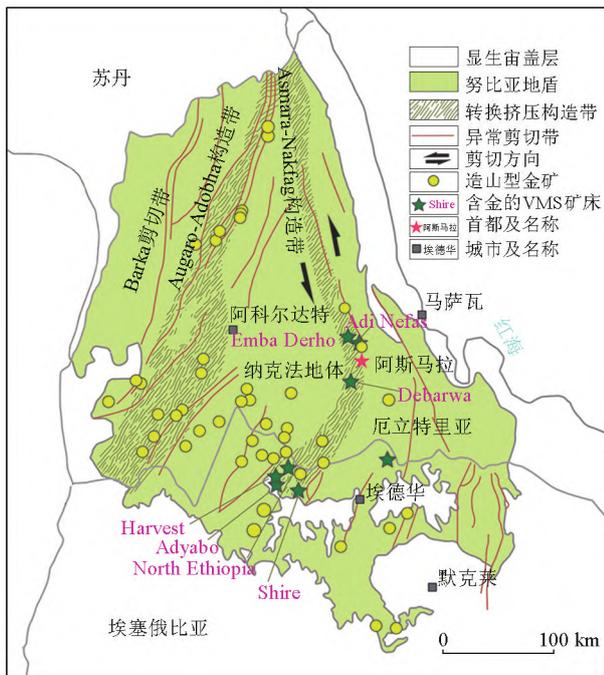


图 2 厄立特里亚—埃塞俄比亚北部区域地质矿产简图(据文献[20]修编)

Fig.2 Brief geology and mineral map of Eritrea-North Ethiopia(revised according to reference [20])

埃塞俄比亚境内分布的前寒武变质基底在大地构造单元上与厄立特里亚阿斯马拉及毕沙 Cu-Au 成矿带同属努比亚地盾,尤其是北部的 Tigray 地区直接为 Asmara-Nakfa 铜—金成矿带在埃塞俄比亚北部的延伸,如图 2 所示,厄立特里亚境内努比亚地盾(前寒武变质基底)分布区均已完成 1:100 万低密度地球化学填图工作,采样点位分布如图 1(厄立特里亚境内前寒武变质基底)所示,综合两国的低密度水系沉积物数据进行分析,可以更加合理地确定 Cu 地球化学块体的异常下限。此外厄立特里亚境内的 Cu 矿勘查程度相对较高,这对于研究区地球化学块体成矿率的确定也非常有利。因此,本次研究工作引入了厄立特里亚前寒武变质基底区的 531 件水系沉积物样品的 Cu 含量数据。

基于上述论述,笔者综合了厄立特里亚和埃塞俄比亚前寒武变质基底区的 839 件水系沉积物 Cu 含量数据,并在此基础上确定 Cu 地球化学块体的异常下限和地球化学块体成矿率。

3.2 Cu 地球化学块体异常下限的确定

元素异常下限的确定对地球化学块体的圈定非

常重要,通常利用研究区内数据集迭代剔除2~3倍标准差以外的特异值,求得剩余数据集的平均值和标准差,然后利用平均值加 n 倍标准差作为该元素的异常下限,本次Cu含量数据的离散程度较低,因此 n 的取值为1。对收集到的前寒武变质基底区

839件1:100万水系沉积物的测试数据,迭代剔除大于3倍标准差的特异值32个,剩余数据计算出的平均值为 22.9×10^{-6} ,标准差为 14.1×10^{-6} ,对应的异常下限为 37×10^{-6} ,Cu的地球化学特征参数如表1所示。

表1 处理后Cu地球化学特征参数及地球化学块体含量级次

Table 1 Processed geochemical statistic characteristics of copper and content level of the geochemical blocks

| 元素 | 数据量 | 最小值/ 10^{-6} | 最大值/ 10^{-6} | 四分位值/ 10^{-6} | | | 平均值/ 10^{-6} | 标准差/ 10^{-6} |
|----|----------------|----------------|-----------------|-----------------|------|------|----------------|----------------|
| | | | | 25% | 50% | 75% | | |
| Cu | 839 | 1.9 | 137.4 | 12.7 | 20.5 | 31.4 | 25.1 | 17.7 |
| 元素 | 剔除3倍离差后 | | 浓度分带/ 10^{-6} | | | | | |
| | 平均值/ 10^{-6} | 标准差/ 10^{-6} | 1级 | 2级 | 3级 | 4级 | 5级 | 6级 |
| Cu | 22.9 | 14.1 | 37 | 42 | 47 | 52 | 59 | 66 |

为了更好地示踪区内Cu地球化学块体的内部结构特征,通常会对地球化学块体进行6级次浓度分带,浓度间隔通常以 $0.11\lg X$ (X 为含量值)为准^[7,21],鉴于研究区水系沉积物中Cu含量相对集中的特征,本次研究选取 $0.05\lg X$ (X 为含量值)作为各级次浓度间隔,最终求得的6级次含量浓度值依次为: 37×10^{-6} 、 42×10^{-6} 、 47×10^{-6} 、 52×10^{-6} 、 59×10^{-6} 、 66×10^{-6} 。

3.3 地球化学块体圈定与分布

根据所确定的地球化学块体Cu异常下限及分

级参数,利用Geochem Studio软件,采用 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的网格间距,选择距离幂函数反比加权法圈定地球化学块体,并根据谢学锦院士提出的地球化学块体模式谱系^[2],将面积大于 $1\ 000\text{ km}^2$ 的Cu地球化学区定义为地球化学块体,面积在 $100 \sim 1\ 000\text{ km}^2$ 之间的定义为地球化学区域异常。

本次共圈出4个地球化学块体和2个区域地球化学异常,其中地球化学块体用1、2、3、4编号,区域异常用I、II编号^[7,21],地球化学块体及区域异常分布见图3。

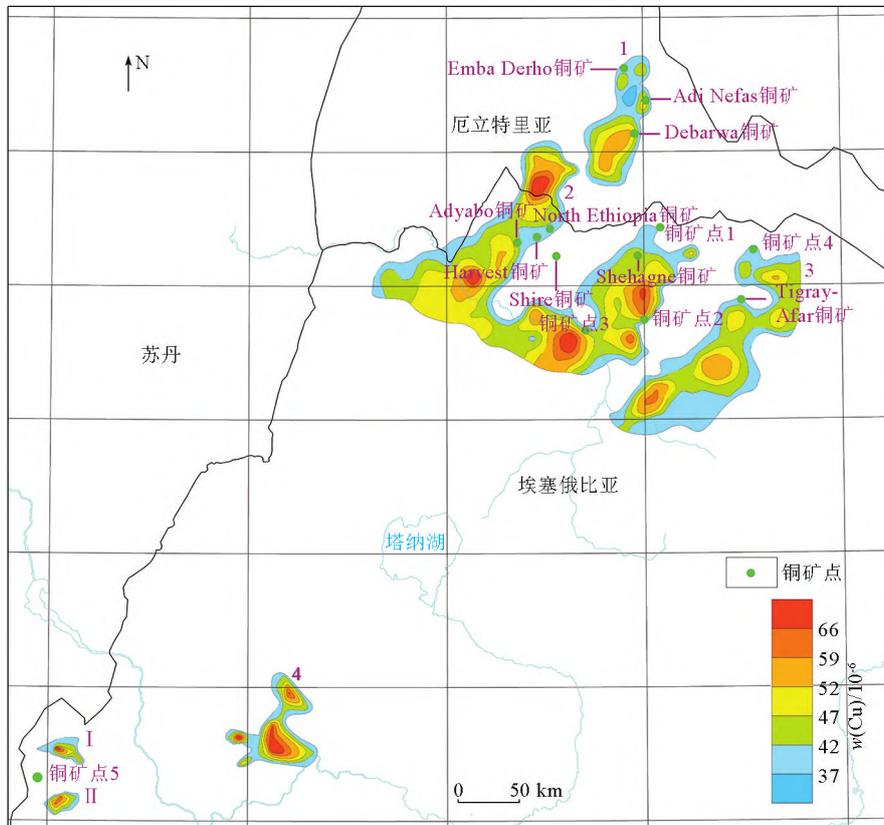


图3 研究区铜地球化学块体及区域异常分布

Fig.3 Distribution of copper geochemical blocks and regional anomalies in study area

根据不同的区域地质构造背景,本次圈定的地球化学块体抑或区域异常分布范围可大致划分为两处,其中埃塞北部地区 2、3 号及厄特境内的 1 号 Cu 地球化学块体均位于 Nakfa 地块^[22],该地块主要由碱性火山岩、火山碎屑沉积岩组成,这套岩石覆盖在不同程度变形、可能为基底构造的侵入体之上,成矿方面的研究表明 3 处块体隶属于阿斯马拉 Cu-Au 成矿带,具有比较优越的区域 Cu-Au 地质成矿条件^[13];4 号地球化学块体及 I 号、II 号区域地球化学异常位于西埃塞俄比亚地盾^[20],现有研究表明西埃塞俄比亚地盾为阿拉伯—努比亚(Arabian-Nubian)地盾的南端部分^[23],主要由低变质程度的变质火山—沉积岩组成,局部夹少量片麻岩,被同一后造山期的酸性和基性火成岩侵入^[24-26],针对区内的铜矿床的勘查研究工作近乎空白。

3.4 地球化学块体编码及谱系树图

使用地球化学块体的理论追索矿床形成、资源量估算的过程中会将块体分成 6 级,故本次编号系统只需要 6 位数,参考前人所建立的编码系统^[8],对

圈定的单个地球化学块体内部的每一级次的子块体进行编码,此处以 2 号地球化学块体为例来进行说明。其中第 6 级的编号 21111-1 表示的是 2 号块体第 6 级次的第 1 个子块体,它位于第 5 级次的第 1 个子块体 2111-1 内,2111-1 则位于第 4 级次的第 1 个子块体 211-1 内,211-1 则位于第 3 个级次第 1 个子块体 21-1 内,21-1 子块体则位于第 2 个级次 1 号子块体 2-1 内,2-1 子块体位于第 2 号块体之内。为更清晰表达各级次地球化学块体之间的继承性及各子块体的金属供应量等详细信息,谢学锦院士提出了一套完整的“谱系树图”编码系统,谱系树图中的每一个级次的地球化学块体(子块体)都用矩形图例表示,该图例有 4 行内容:第 1 行表示地球化学块体(子块体)的编号,第 2 行为圈定的本块体的面积,第 3 行为块体面积内的金属供应量,第 4 行表示单位面积内总金属供应量。2 号地球化学块体内部结构、编号及相关谱系树图示例如图 4 所示。该步工作对后续利用块体进行成矿物质来源示踪及块体成矿率计算至关重要。

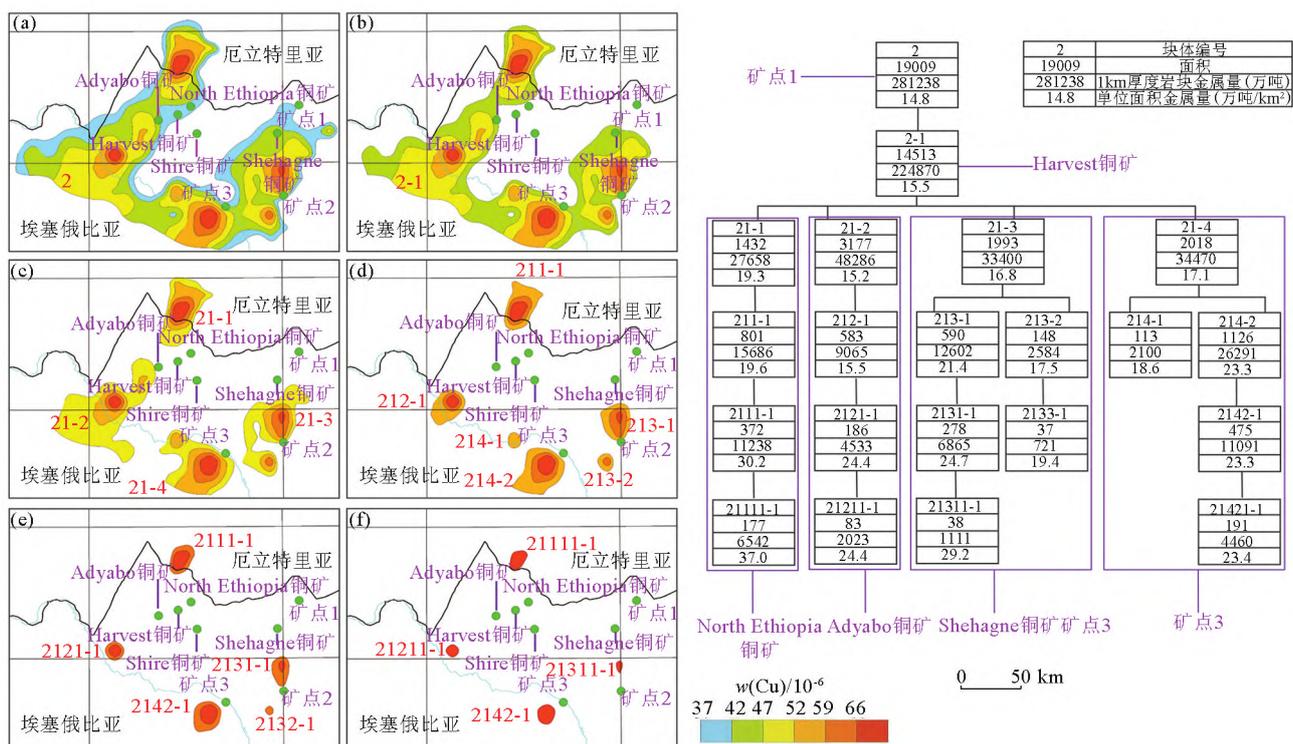


图 4 2 号铜地球化学块体内部结构及谱系树图(a~f 依次为第 1 级次至第 6 级次的地球化学块体,分别含 1、1、4、4、4、4 个子块体)

Fig.4 Internal structure of No.2 copper geochemical block

(a~f is first to sixth level content, including 1,1,4,4,4,4 child geochemical blocks respectively)

4 地球化学块体指示性评价

地球化学块体作为矿床形成的主要物质供应源,其空间形态对区域矿床地质及分布特征必然具

有较好的指示意义,这也是利用地球化学块体法进行矿产资源潜力评价的基础。现根据区域成矿地质条件及已知矿床(点)分布状况等方面的资料相对详细的 1 号及 2 号地球化学块体,对本次圈定的地

球化学块体的指示性进行评价。

1号地球化学块体的展布形态呈N—NE向,与区域主要控矿构造基本一致,内部结构相对单一,仅可见4级次浓度分带,块体内N—NE走向的绿片岩相变质岩等赋矿岩系出露较多,区域内已知的主要矿床包括Emba Derho VMS型铜矿、Debarwa VMS型铜矿及Adi Nefas VMS型铜矿,3处矿床均落在1号地球化学块体内部,沿区域转换挤压构造带及异常剪切带分布。利用地球化学块体内部结构图结合地球化学块体谱系树图可有效追踪到特定子块体与Cu矿体之间的关系,具体如图5所示,按照块体的浓集趋势,可有效追踪到反映Emba Derho铜矿的1-1及1-2子块体、反映Adi Nefas铜矿的1-3子块体、

反映Debarwa铜矿的1-4子块体,上述3处铜矿床的勘查程度较高,Cu储量数据相对明确,这对后续的Cu矿资源量估算过程中计算块体成矿率具有很好的指导意义。

2号地球化学块体整体呈NE向展布,可见较好的6级次浓度分带,具有多个明显的浓集中心,NE向的区域主断裂构造较好地穿越了该块体的多个浓集中心,说明区域断裂构造对块体形成的控制作用。块体所在的区域石英斑岩等变质次火山岩广泛出露,区域成矿研究表明,埃塞北部铜矿化与次火山岩石英斑岩、区域主断裂及其次级断裂构造关系密切^[27],现已查明的矿床(点)均沿这些断裂构造分布,如图6所示。利用地球化学块体内部浓集趋势,

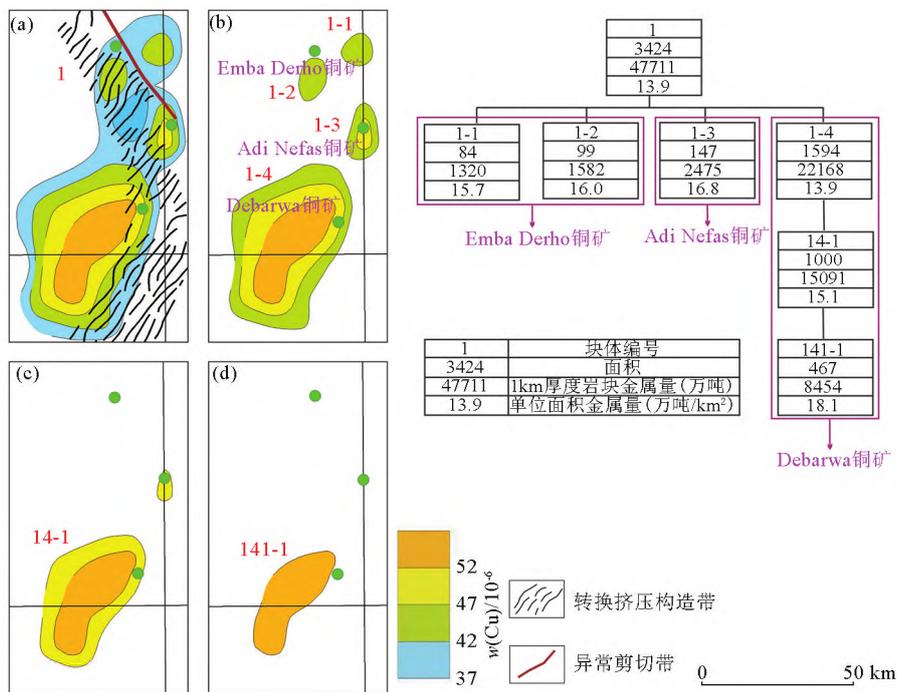


图5 1号地球化学块体内部结构及谱系树图(a~d依次为第1级次至第4级次的地球化学块体,分别含1,4,1,1个子块体)

Fig.5 Internal structure and Family tree diagram of No.1 copper geochemical block

(a~d is first to fourth level content, including 1,4,1,1 child geochemical blocks respectively)

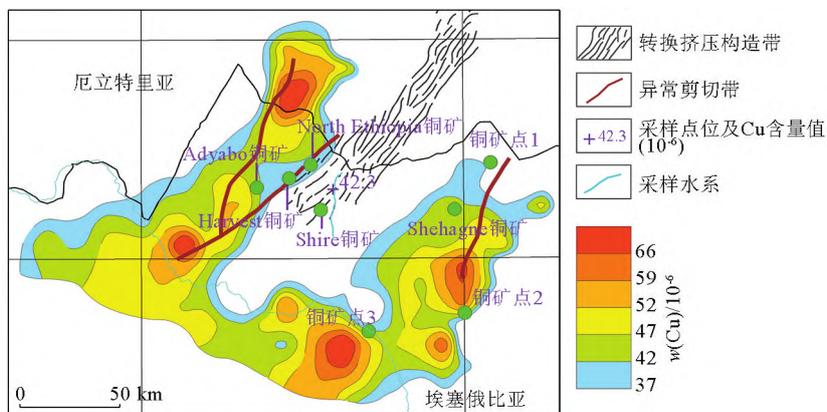


图6 2号地球化学块体及所在区地质矿产分布

Fig.6 No.2 geochemical block and brief regional geology and mineral map

可有效追踪到反映 Adyabo VMS 型铜矿的 21-2 子块体、反映 North Ethiopia VMS 型铜矿的 21-1 子块体、反映 Shehagne VMS 型铜矿及 Cu 矿点 2 的 21-3 子块体、反映 Cu 矿点 3 的 21-4 子块体, Harvest VMS 型铜矿及铜矿点 1 则分别分布于 2-1 子块体及 2 号块体的边缘,具体如图 4 所示,2 号地球化学块体所在区域的 Cu 矿勘查研究程度较低,所有已知矿体的 Cu 储量均无明确的数据。

综合上述分析,笔者认为本次圈定的各地球化学块体均能较好地反映研究区有利成矿地质体及区域控矿构造,可有效覆盖研究区已知的绝大部分矿体(点),具有较好的找矿指示意义。以此为基础,可以利用圈定的地球化学块体(区域异常)及相关谱系树图来进行埃塞俄比亚境内重点 Cu 成矿远景区的圈定并预测 Cu 资源量。

5 Cu 地球化学块体资源潜力评价

根据谢学锦院士关于地球化学块体与矿体(点)产出位置的关系的定义,本次研究工作圈定地球化学块体主要为边缘型,这主要是由于本次低密度地球化学填图工作采样密度较低(<1 点/250 km^2),导致圈定的地球化学块体浓集中心对 Cu 矿床(点)不能做到足够精确的覆盖。鉴于此,本次利用 Cu 地球化学块体进行资源量估算时,需要利用单个块体(1 号块体)的整体金属供应量来计算其成矿率^[9]。成矿远景区的确定同样应在圈定的地球化学块体基础上结合相邻区域内的单点弱异常及有利地质成矿环境进行适当扩大,这在后续会有具体阐述。

5.1 Cu 地球化学块体的成矿率确定及资源量估算

成矿率是指在漫长成矿地质演化过程中由于物理化学条件的改变,使地球化学块体内金属供应量的一部分运移、富集,形成当前有用矿产资源的量占地球化学块体中总金属量的几率^[28]。因此,成矿率的确定一般选择区内研究程度最高的块体或区域异常,假定该区内的某矿种全部(或大部分)矿床都已探明,那么该矿种的探明储量 R 与区块金属供应量 T 的比值即为该金属的成矿率 MC ,即 $MC=R/T$ 。

首先统计出各个 Cu 地球化学块体和区域异常的参数(见表 2 和表 3),并通过这些参数来计算其金属供应量 $T(T=S \times \rho \times C_{bl} \times L)$ ^[8],式中 S 表征相应地球化学块体的面积; ρ 表示区内主要岩石的密度; C_{bl} 为块体内元素的平均含量; L 为区内的矿床勘探深度。本次采用 1 000 m 厚度来计算地球化学块体

表 2 铜地球化学块体的数据统计特征

Table 2 Statistic characteristic of copper geochemical blocks

| 编号 | 面积/ km^2 | Cu 最大 值/ 10^{-6} | Cu 最小 值/ 10^{-6} | Cu 平均 值/ 10^{-6} | Cu 供应 量/万 t |
|----|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| 1 | 3424 | 89.4 | 18.3 | 51.8($n=20$) | 47711 |
| 2 | 19009 | 137.4 | 23.6 | 55($n=53$) | 281238 |
| 3 | 9529 | 88.4 | 18.4 | 47.3($n=19$) | 121244 |
| 4 | 2592 | 78.2 | 40.8 | 63.5($n=7$) | 44275 |

注: n 代表地球化学块体或者区域地球化学异常内的样点个数;表 3 同。

表 3 铜区域异常的数据统计特征

Table 3 Statistic characteristic of copper regional geochemical anomalies

| 编号 | Cu 面积/ km^2 | Cu 最大 值/ 10^{-6} | Cu 最小 值/ 10^{-6} | 平均值/ 10^{-6} | Cu 供应 量/万 t |
|----|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|----------------|
| I | 458 | 76.7 | 48.7 | 62.7($n=2$) | 7725 |
| II | 359 | 66.9 | 43.1 | 53.9($n=4$) | 5205 |

表 4 Cu 地球化学块体及区域异常内铜资源潜力估算

Table 4 Estimated potential copper resources of copper geochemical blocks and regional anomalies

| 编号 | 面积/ km^2 | 矿床 | Cu 供应 量/万 t | 探明 Cu 资源 量/万 t | 预测 Cu 资源 量/万 t |
|----|----------------------|---|----------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 3424 | Emba Derho 铜矿、 Debarwa 铜矿、Adi Nefas 铜矿 | 47711 | 52 | 52 |
| 2 | 19009 | Adyabo 铜矿、 Harves 铜矿、Shire 铜矿、North Ethio- pia 铜矿、Shehagne 铜矿 | 281238 | | 155 |
| 3 | 9529 | Tigray-Afar 铜矿 | 121244 | | 67 |
| 4 | 2592 | | 44275 | | 24 |
| I | 458 | | 7725 | | 8 |
| II | 359 | | 5205 | | 6 |
| 总计 | 35371 | | 507398 | | 312 |

注:预测深度按照 1 km 计算,同时 Cu 的成矿率为 0.055%。

的金属供应量,研究区内主体以低程度的变质火山沉积岩为主,因此岩石密度采用 $2.69 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

本次圈定的 1 号地球化学块体位于厄立特里亚境内的阿斯马拉 Cu-Au 成矿带,块体内部已知有 EmbaDerho、Debarwa、AdiNefas 等大中型 VMS 型 Cu-Au 矿床,查明 Cu 储量 52 万 t^[29-31],据此计算出的 Cu 成矿率 $MC = 52/47711 = 0.11\%$ 。由表 2 可见埃塞俄比亚境内的采样密度较厄立特里亚低,埃塞俄比亚境内地球化学块体内部样点密度约为 1 号地球化学块体内部点密度的 1/2,这可能导致在 Cu 金属供应量计算过程中所采用的面积较 1 号块体大幅度增加,因此埃塞境内的地球化学块体或区域异常的成矿率应在 1 号地球化学块体的基础上降低。本次直接参考两者的点位密度比进行调整,将埃塞俄比

亚境内的 Cu 地球化学块体成矿率确定为 0.055%，并在此基础上进行 Cu 资源量预测，结果如表 4 所示。

5.2 Cu 地球化学块体成矿潜力分析及成矿远景区圈定

本次在埃塞俄比亚境内共圈定 2 号、3 号、4 号 3 处地球化学块体及 I、II 两处区域地球化学异常，鉴于两处区域地球化学异常规模过小，本次重点针对三处地球化学块体开展具体评价。

5.2.1 埃塞俄比亚北部 2 号地球化学块体

2 号地球化学块体位于埃塞俄比亚北部与厄立特里亚交界处的前寒武变质基底区，块体整体呈 NE 向的带状展布，与区内广泛发育的脆—韧性剪切带构造方向一致，面积达 19 009 km²，具有较好的 6 级次浓度划分，内部结构复杂，可见多个明显浓集中心，块体内部及周缘 Cu 矿床(点)分布较多，如图 6 所示。

地质研究表明 2 号块体所在埃塞俄比亚北部地区在大地构造环境上属阿拉伯—努比亚地盾中晚元古宙岛弧增生带，该地球化学块体自西向东跨越 Shiraro 地块、Adi Hageray 地块、Adi Nebrid 地块、Chila 地块、Adwa 地块、Mai Kenetal 地块^[32]；区内出露岩性组成复杂，主要包括基性、中基性、酸性变质火山岩及变质沉积岩等，常见变质石英斑岩等次火山岩；区内构造以断裂、剪切带构造为主，是多期次构造变形的综合产物，NE 向断层是区内最为发育的断层，既有区域性断层，又有局部性断层，块体内部大量发育泛非造山运动期间形成的脆—韧性剪切带构造，该类剪切带构造在整个 Nakfa 地块内部普遍分布^[7,17]，如图 2 所示。

成矿研究表明埃塞俄比亚北部地区是世界著名的红海西侧厄立特里亚中部 Asmara 铜多金属成矿带的 SW 延伸地段，具有较好的 VMS 型铜—金多金属矿找矿前景^[13,30]。矿床成因方面的研究表明该地区 VMS 型 Cu 矿床的形成主要受控于陆缘岛弧海相火山活动有关的次火山热液充填交代作用，区内的主要控矿要素包括次火山岩石英斑岩、NE 向的区域断裂或其次级断裂构造，块状硫化物矿体呈层状、似层状、透镜状和脉状产出，走向呈 NE—SW 向，与变火山岩岩层、区域优势劈理一致^[13]，区内迄今已发现了 Adyabo、Harves、Shire、North Ethiopia、Shehagne 等 VMS 型铜矿床，此外还有多处 Cu 矿点出露，90%以上的矿床(点)均位于 2 号地球化学块体内部。通过地球化学块体法计算可知，2 号地球化学块体的 Cu 的总金属供应量可达 281 238 万 t，按

照成矿率 0.055%来估算，该块体内总的 Cu 的潜在资源量可达 155 万 t，综合该地球化学块体有利的铜成矿地质条件，该地球化学块体所在区域具有非常好的找矿前景。

本次圈定的 2 号地球化学块体与区内 NE 向异常剪切带有较好的重叠，沿该剪切带分布的 Cu 矿床(点)也均位于块体内部，但是 2 号块体对相邻的转换挤压构造带的覆盖相对较差，该构造带内存在 Cu 含量为 42.3×10⁻⁶的单个弱异常值，Shire 铜矿床便位于该样点控制水系的上游地带，具体如图 6 所示，说明转换挤压构造带所在区域可能存在相对隐伏的地球化学块体，因此成矿远景区划定时应覆盖到该该挤压构造带所在区域。综合上述分析，本次将 1:25 万 Axum 图幅(东经 37.5°~39°，北纬 14°~15°)埃塞境内区域及 1:25 万 Adi Arkay 图幅(东经 37.5°~39°，北纬 13°~14°)东北部区域圈定为 Cu 重点成矿远景区，可开展系统性的详细勘查工作。

5.2.2 埃塞俄比亚北部 3 号地球化学块体

3 号地球化学块体同样位于埃塞俄比亚北部与厄立特里亚交界处的前寒武变质基底区，其大地构造背景与 2 号地球化学块体具有一定的相似性，块体整体呈 NE 向的带状展布，与区域内剪切带构造方向基本一致，可见不明显的 5 级次浓度分带，存在区域异常剪切带穿过块体北部浓集中心的现象，已知的 2 处 Cu 矿床(点)均沿该剪切带分布，如图 7 所示，说明该块体所在区域的 Cu 控矿要素与 2 号地球化学块体存在一定的相似性，具有一定的 Cu 找矿前景。除此之外在 3 号块体的南部同样存在明显的浓集中心，其间无矿床(点)出露。3 号地球化学块体面积达到 9 529 km²，按照成矿率 0.055%来估算，该块体内总的 Cu 资源量可达 67 万 t，相较于 2 号地球化学块体，该块体的异常强度相对较弱，但是块体所在区域同样存在一定的矿化指示信息，因此

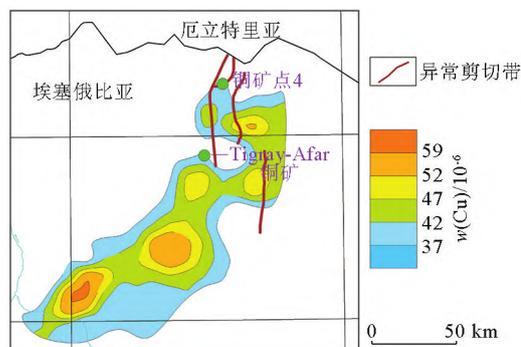


图 7 3 号地球化学块体及所在区地质矿产分布
Fig.7 No.3 geochemical block and brief regional geology and mineral map

其找矿指示意义也不容忽视。

针对该区域的地质成矿研究近乎空白,虽然该块体异常强度较 2 号块体弱,但是本次仍将该地球化学块体所在的 1:25 万 Adigrat 图幅(东经 39°~40.5°,北纬 14°~15°)埃塞境内区域的东部及 1:25 万 Mekele 图幅(东经 39°~40.5°,北纬 13°~14°)中西部区域圈定为 Cu 重点成矿远景区,可开展系统性的详细勘查工作。

5.2.3 埃塞俄比亚西部 4 号地球化学块体

4 号地球化学块体位于研究区西埃塞俄比亚地盾区,块体形态不规则,面积达到 2 592 km²,该地球化学块体内部结构简单,但是具有非常好的 6 级次浓度划分,如图 3 所示。

研究表明,西埃塞俄比亚地盾为阿拉伯—努比亚(Arabian-Nubian)地盾的南端部分,由绿岩地块在新元古代(700~620 Ma)拼合而成^[23],区内发育的走滑断裂和酸性岩浆岩多与泛非期的造山活动有关^[33]。主要岩性组成为低变质程度的变质火山—沉积岩,局部夹少量片麻岩,后被同一后造山期的酸性和基性火成岩侵入^[24-26]。

区域成矿研究表明,绿岩带型(造山型)金矿是西埃塞俄比亚地盾的主要成矿类型,目前已知铜矿点也多与该类型金矿伴生,未发现有开采价值的矿床,已发现 Cu 矿点的空间位置与 I、II 号区域地球化学异常分布范围基本一致,如图 2 所示。4 号地球化学块体就位于两处区域异常的东部相邻区,鉴于较好的浓度级次划分和较大的异常规模,其找矿指示意义不容小觑。

通过计算可知,4 号地球化学块体的 Cu 总金属供应量可达 44 275 万 t,按照成矿率 0.055% 来估算,总的 Cu 资源量可达 24 万 t,针对该块体所在区域的铜矿的地质勘查研究至今仍比较薄弱,因此可将该块体所在 1:25 万 Bure 图幅(东经 36°~37.5°,北纬 10°~11°)的西北部区域划定为 Cu 重点成矿远景区,可开展系统性的详细勘查工作。

6 结论

1)通过对原始数据处理及引入厄立特里亚境内具有相似地质背景的样点 Cu 含量数据,确定了埃塞俄比亚境内 Cu 块体的异常下限为 37×10^{-6} ,并以 42×10^{-6} 、 47×10^{-6} 、 52×10^{-6} 、 59×10^{-6} 、 66×10^{-6} 作为分级间隔,圈定出 Cu 地球化学块体 3 个,区域地球化学异常 2 处。

2)通过对各块体地球化学特征的分析,表明地

球化学块体在勘查程度较低地区的矿产资源找矿指示和潜力评价方面具有非常好的有效性,同时也为从块体资源供应角度来阐述区域成矿潜力提供了有利依据。

3)通过参考位于同一成矿带内的铜矿勘查程度较高的 1 号地球化学块体的成矿率,并根据研究区的实际情况进行校准,得出研究区各块体的成矿率为 0.055%,最终估算出埃塞俄比亚境内 Cu 的资源量约为 260 万 t。

4)通过对各块体的区域成矿地质条件分析,划定 1:25 万 Axum 图幅(东经 37.5°~39°,北纬 14°~15°)埃塞俄比亚境内区域及 1:25 万 Adi Arkay 图幅(东经 37.5°~39°,北纬 13°~14°)东北部区域、1:25 万 Adigrat 图幅(东经 39°~40.5°,北纬 14°~15°)埃塞俄比亚境内区域的东部及 1:25 万 Mekele 图幅(东经 39°~40.5°,北纬 13°~14°)中西部区域、1:25 万 Bure 图幅(东经 36°~37.5°,北纬 10°~11°)的西北部区域为 Cu 重点成矿远景区。

参考文献(References):

- [1] 刘大文.地球化学块体的概念及其研究意义[J].地球化学,2002,31(6):539-548.
Liu D W.Development and significance of geochemical blocks[J].Geochimica,2002,31(6):539-548.
- [2] 刘大文,谢学锦.基于地球化学块体概念的中国锡资源潜力评价[J].中国地质,2005,32(1):25-32.
Liu D W,Xie X J.Evaluation of China's tin resources potential based on the geochemical block concept[J].Geology in China,2005,32(1):25-32.
- [3] 王学求,申伍军,张必敏,等.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,2007,14(5):116-123.
Wang X Q,Shen W J,Zhang B M,et al.Relationship of geochemical blocks and ore districts: Examples from Eastern Tianshan metallogenic belt,Xinjiang,China[J].Earth Science Frontiers,2007,14(5):116-123.
- [4] 周洲强,李伟,钱建明.浙江省地球化学块体特征及找矿意义[J].资源调查与环境,2015,36(1):36-41.
Zhou Z Q,Li W,Qian J M.Characteristics of geochemical blocks and ore prospecting implications in Zhejiang Province[J].Resources Survey and Environment,2015,36(1):36-41.
- [5] 张红涛.用地球化学块体法评价辽宁省铅矿资源潜力[J].现代矿业,2016,572(12):96-107.
Zhang H T.Molybdenum resources potential of Liaoning Province based on geochemical block method[J].Modern Mining,2016,572(12):96-107.
- [6] 范堡程,张晶,孟广路.帕米尔构造结锂矿资源潜力评价——基于 1:100 万地球化学调查[J].西北地质,2022,55(1):156-166.
Fan B C,Zhang J,Meng G L.An assessment of lithium resource potentiality in Pamir syntax—Based on 1:1 million scale of geochem-

- ical survey[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(1): 156–166.
- [7] 向文帅, 姜军胜, 赵凯. 应用地球化学块体法评价厄立特里亚金矿资源潜力[J]. *中国矿业*, 2019, 28(12): 176–182.
- Xiang W S, Jiang J S, Zhao K. The application of geochemical blocks methods to gold resource assessment in Eritrea[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(12): 176–182.
- [8] 谢学锦, 刘大文, 向运川, 等. 地球化学块体——概念和方法学的发展[J]. *中国地质*, 2002, 29(3): 225–233.
- Xie X J, Liu D W, Xiang Y C, et al. Geochemical blocks: Development of concept and methodology[J]. *Geology in China*, 2002, 29(3): 225–233.
- [9] 刘大文. 地球化学块体理论与方法技术应用于矿产资源评价的研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2002.
- Liu D W. National mineral resources assessment, using geochemical block concept[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2002.
- [10] 梁学玉. 埃塞俄比亚纳格莱 II 地球化学异常特征与评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- Liang X Y. Characteristics and evaluation of geochemical anomaly in Negele II, Ethiopia[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [11] 高长亮, 党万民, 田绍喜, 等. 埃塞俄比亚地质特征与矿产概况[J]. *山东国土资源*, 2010, 26(11): 19–27.
- Gao C L, Dang W M, Tian S X, et al. Geological characteristics and general condition of mineral resources in Ethiopia[J]. *Shandong Land and Resources*, 2010, 26(11): 19–27.
- [12] Hamimi Z, Fowler A R, Liégeois J P, et al. The geology of the Arabian-Nubian shield[M]. Cham: Springer, 2021.
- [13] 韩世礼. 埃塞俄比亚施瑞地区 VMS 型矿床成矿机制及成矿规律研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- Han S L. Study on metallogenic mechanism and regularities of VMS deposit from Shire region in Ethiopia[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [14] 白丽伟. 埃塞俄比亚 Harvest 金铜多金属矿三维地质建模研究及采矿设计应用[J]. *矿产勘查*, 2021, 92(8): 1852–1860.
- Bai L W. Geological modeling and mining design application by three-dimensional software in Harvest gold and copper polymetallic deposit in Ethiopia[J]. *Mineral Exploration*, 2021, 92(8): 1852–1860.
- [15] 徐明钻, 冯自成, 梁胜跃, 等. 埃塞俄比亚矿产资源分布及找矿方向初探[J]. *矿产勘查*, 2019, 70(10): 2674–2690.
- Xu M Z, Feng Z C, Liang S Y, et al. Overview of the minerals distributions and tentative discussion on the metallogenic prospecting direction in Ethiopia[J]. *Mineral Exploration*, 2019, 70(10): 2674–2690.
- [16] Woldegabriel G, Aronson J, Walter R C. Geology, geochemistry and rift basin development in the central sector of the Main Ethiopian Rift[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1990, 102: 439–458.
- [17] 陈随, 韩世礼. 埃塞俄比亚施瑞地区 VMS 型铜金矿床黄铁矿成因及矿物学特征研究[J]. *矿产勘查*, 2020, 79(7): 1422–1427.
- Chen S, Han S L. Genesis and mineralogy of pyrite in the VMS copper-gold deposit in Shirui area, Ethiopia[J]. *Mineral Exploration*, 2020, 79(7): 1422–1427.
- [18] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- Chi Q H, Yan M C. Element abundance data manual for Applied Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [19] 金希, 杨功, 肖高强, 等. 地球化学块体法在滇中层控型铜矿资源评价中的应用[J]. *地质科技情报*, 2012, 31(4): 33–39.
- Jin X, Yang G, Xiao G Q, et al. Application of Geochemical blocks methods to strata-bound copper resources assessment in the central Yunnan province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31(4): 33–39.
- [20] Johnson P R, Zoheir B A, Ghebream W, et al. Gold-bearing volcanogenic massive sulfides and orogenic gold deposits in the Nubian shield[J]. *South African Journal of Geology*, 2017, 120(1): 63–76.
- [21] 刘大文, 谢学锦, 严光生, 等. 地球化学块体的方法技术在山东金资源潜力预测中的应用[J]. *地球学报*, 2002, 23(2): 169–174.
- Liu D W, Xie X J, Yan G S, et al. The application of geochemical blocks methods to gold resources assessment in Shandong Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(2): 169–174.
- [22] De Souza Filho C R, Drury S A. A Neoproterozoic supra-subduction terrane in northern Eritrea, NE Africa[J]. *Journal of the Geological Society*, 1998, 155(3): 551–566.
- [23] Fritz H, Abdelsalam M, Ali K, et al. Orogen styles in the East African Orogen: A review of the Neoproterozoic to Cambrian tectonic evolution[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2013, 86: 65–106.
- [24] Kebede T, Koeberl C, Koller F. Geology, geochemistry and petrogenesis of intrusive rocks of the Wallagga area, Western Ethiopia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1999, 29(4): 715–734.
- [25] Johnson T E, Ayalew T, Mogessie A, et al. Constraints on the tectonometamorphic evolution of the Western Ethiopian Shield[J]. *Precambrian Research*, 2004, 133: 305–327.
- [26] Johnson P R, Andresen A, Collins A S, et al. Late Cryogenian-Ediacaran history of the Arabian-Nubian shield: A review of depositional, plutonic, structural, and tectonic events in the closing stages of the northern East African Orogen[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2011, 61: 167–232.
- [27] 向文帅, 赵凯, 曾国平, 等. 东北非 VMS 矿床地质特征与研究进展[J]. *地质通报*, 2022, 41(1): 129–140.
- Xiang W S, Zhao K, Zeng G P, et al. Geology of VMS deposits in Northeast Africa and their research progress[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 129–140.
- [28] Xie X J, Liu D W. Geochemical blocks for predicting large ore deposit—concept and methodology[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2004, 84(2): 77–91.
- [29] 蒋文程, 张有军, 谭宁, 等. 厄立特里亚阿斯马拉 (Asmara) 铜金多金属成矿带研究进展[J]. *矿产勘查*, 2017, 8(4): 700–707.
- Jiang W C, Zhang Y J, Tan N, et al. Progress of geological study in Asmara copper-gold polymetallic metallogenic belt, Eritrea[J]. *Mineral Exploration*, 2017, 8(4): 700–707.
- [30] 秦秀峰, 朱思才, 甘凤伟, 等. 厄立特里亚碧沙 VMS 铜锌金矿床勘查与发现[J]. *矿产勘查*, 2012, 14(2): 266–269.

- Qin X F, Zhu S C, Gan F W, et al. Exploration and findings of Bisha VMS deposit, Eritrea[J]. *Mineral Exploration*, 2012, 14(2): 266-269.
- [31] 邱正杰, 范宏瑞, 丛培章, 等. 造山型金矿床成矿过程研究进展[J]. *矿床地质*, 2015, 34(1): 21-38.
- Qiu Z J, Fan H R, Cong P Z, et al. Recent progress in the study of ore-forming processes of orogenic gold deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(1): 21-38.
- [32] 马远. 埃塞俄比亚北部阿迪布拉达 VMS 型铜多金属矿床地质地球化学特征[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- Ma Y. Geological and geochemical characteristics of Adi Bladia copper polymetallic deposits in North Ethiopia[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [33] Stern R J. ARC assembly and continental collision in the Neoproterozoic east African orogen: Implications for the Consolidation of Gondwanaland[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1994, 22(1): 319-351.

Application of the geochemical block method to the assessment of copper resources in Ethiopia

XIANG Wen-Shuai¹, BAI Yang², JIANG Jun-Sheng¹, LEI Yi-Jun¹, HUNDIE Melka³,
SISAY Degu³, ZHANG Yuan-Pei², WU Ying², ZHENG Xiong-Wei²

(1. Wuhan Center, China Geological Survey, Central South China Innovation Center for Geosciences, Wuhan 430205, China; 2. Geophysical Exploration Brigade, Hubei Geological Bureau, Wuhan 430056, China; 3. Ethiopian Geological Survey, Addis Ababa 999047, Ethiopia)

Abstract: Low-density geochemical mapping is characterized by high order streams to be sampled and a large coverage area and can be used to effectively trace geochemical blocks with high metal contents. Based on the 1:1,000,000 low-density geochemical mapping data of Ethiopia and the processing of the testing data of Cu in the original stream sediments, this study calculated the anomaly threshold of Cu at 37×10^{-6} through iterative deletion. Then, this study delineated three geochemical blocks and two regional anomalies with 37×10^{-6} , 42×10^{-6} , 47×10^{-6} , 52×10^{-6} , 59×10^{-6} , and 66×10^{-6} as grading intervals. It calculated the mineralization coefficient of Cu ore bodies in the study area at 0.055% by referencing the known reserves of Cu deposits in geochemical blocks with a high level of copper exploration in the same metallogenic belt. Moreover, this study estimated the Cu resources in the study area at 2,600,000 t based on a rock mass thickness of 1,000 m. By combining the analysis of metallogenic geological conditions, this study determined that the zones where geochemical blocks nos. 2, 3, and 4 are located can be considered key metallogenic prospect areas for further detailed exploration.

Key words: Ethiopia; copper; geochemical block; resource potential; metallogenic prospect area

(本文编辑:蒋实)