

硫同位素在地球化学异常成因研究中的应用

席明杰¹⁾, 马生明¹⁾, 朱立新²⁾, 弓秋丽¹⁾

1) 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) 中国地质科学院, 北京, 100037

内容提要:地球化学异常成因研究是评价其成矿前景、矿化类型的基础。本文借鉴稳定同位素示踪成矿物质来源的原理和方法, 将硫同位素引入到地球化学异常成因研究中, 通过对乌奴格吐山和垦山试验区 Cu 矿化体、Cu 异常地段硫同位素组成特征的研究, 发现在乌奴格吐山试验区 Cu 矿化及 Cu 异常地段硫的来源是一致的, 表明应用硫同位素组成特征判断地球化学异常成因是可行的; 对比发现, 垦山试验区 Cu 异常地段硫同位素值较乌奴格吐山试验区偏高, 推断该 Cu 异常是由后期热液作用形成的, 由此认为该异常的地质找矿及工作部署应该围绕热液矿床进行。

关键词: $\delta^{34}\text{S}$; 硫同位素; 地球化学异常; 乌奴格吐山铜铅矿床; 垦山试验区

地球化学异常成因研究是评价其成矿前景、矿化类型以及部署勘查、勘探工程的前提, 但是在以往地球化学勘查工作中却很少涉及。本文尝试应用硫同位素组成特征探讨地球化学异常成因, 取得了预期成果。

硫同位素在矿床学及矿床地球化学研究中应用广泛, 大多用来指示成矿环境, 识别成矿物质来源, 解释矿床成因, 而在地球化学异常评价过程中应用很少, 在地球化学异常成因研究中的应用更少。Sangameshwar (1972) 对加拿大 Saskatchewan、Manitoba 州 Flin Flon 和 Snow Lake 地区的硫化物矿床硫同位素进行了研究, 根据同位素组成不同圈定出了经济型 Cu-Zn 矿床和次经济型硫化物矿化带。Paul (2007) 在加拿大 Manitoba 州 Flin Flon-Snow Lake-Hargrave River 地区 Cu-Zn 块状硫化物矿床的研究结果表明, 根据硫同位素组成, 从统计学上可以对该地区的贫 Fe 硫化物带和 Cu-Zn 块状硫化物矿床加以区别。冯建行 (2008) 对多宝山铜矿硫同位素空间分布 (横向、纵向) 特征进行了研究, 发现多宝山铜矿的硫同位素组成虽然总体变化范围较小, 但空间分布仍具有一定规律——以矿体品位最高、最厚大部位为中心 ($\delta^{34}\text{S}$ 值最低), 向四周 $\delta^{34}\text{S}$ 值逐渐增高。此外, Ohmoto (1974)、Sheppard (1974)、Taylor (1974)、张理刚 (1985) 和陈振胜

(1995) 等研究者分别用水岩交换理论解释了氧同位素在交换过程中的地球化学行为和水/岩 (W/R) 与矿化中心的关系。就这些资料来看, 在矿产勘查阶段, 应用稳定同位素来区分不同矿化、蚀变类型, 探讨蚀变与矿化中心的关系等是可行的, 这为应用硫同位素研究地球化学异常成因提供了案例和经验。

借鉴上述研究者的思路和方法, 选择内蒙古自治区新巴尔虎右旗乌奴格吐山铜铅矿床和垦山异常区进行了硫同位素示踪异常组物质来源试验, 目的是通过对比乌奴格吐山和垦山试验区硫同位素组成特征, 明确应用硫同位素组成探讨地球化学异常成因的可行性, 并对垦山地区多元素组合异常的成因进行解释, 为该区下一步勘查工作部署提供依据。

1 试验区地质概况

乌奴格吐山和垦山试验区位于满洲里市南部 (图 1)、西伯利亚地台东南外缘, 其构造单元属于西伯利亚板块和中朝板块之间的亚洲造山带 (万天丰等, 2004)。地壳构造发展史上曾有元古界及下寒武系组成的古老褶皱基底。加里东早期造山作用之后发生裂解, 在晚古生代发育有泥盆纪至石炭-二叠纪地槽型沉积建造, 与邻区蒙古及俄罗斯资料对比, 应归属外贝加尔褶皱带范围, 与我国大兴安岭褶皱带以额尔古纳—呼伦深断裂带为界。这一断裂带南延

注: 本文为国家科技支撑计划项目子专题“内蒙古大兴安岭中北段化探异常评价方法研究”、中国地质科学院基本科研业务费项目 (编号 Ywf060724) 和物化探所基本科研业务费 (编号 AS2007J02) 资助的成果。

收稿日期: 2008-10-25; 改回日期: 2008-12-30; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 席明杰, 男, 1983 年生。硕士。地球化学专业。通讯作者: 马生明, 教授级高工。电话: 0316-2267728; Email: msnigge@163.com。

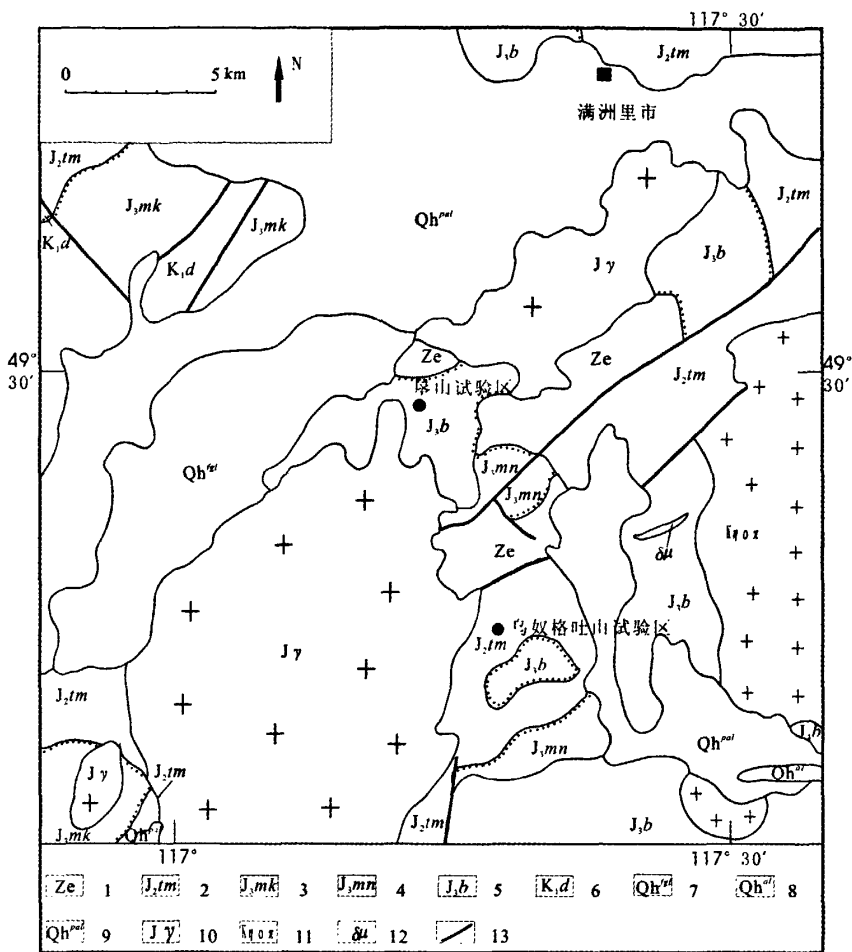


图1 满洲里市南部地质图(据内蒙古自治区地质调查局,2002[●])

Fig. 1 Geological map of the south Manzhouli (From Geological Survey Institute of Inner Mongolia, 2002)

1—额尔古纳河组(Ze);2—塔木兰沟组(J₂tm);3—满克头鄂博组(J₃mk);4—玛尼吐组(J₃mn);5—白音高老组(J₃b);6—大磨拐河组(K₁d);7—冰水堆积泥、砂砾粘土(Qp^{al});8—冲积粉砂、砂砾(Qh^{al});9—冲洪积砂砾、亚砂土、粉砂(Qh^{pl});10—侏罗纪花岗岩(J₁γ);11—白垩纪石英花岗岩(K₁γ_σ);12—闪长玢岩脉(δμ);13—断层

1—Eergunahe Group(Ze); 2—Tamulangou Group(J₂tm); 3—Manketouebo Group(J₃mk); 4—Manitu Group(J₃mn); 5—Baiyingaolao Group(J₃b); 6—Damoguaihe Group(K₁d); 7—Ice-water accumulation mud, gravel-clay(Qp^{al}); 8—Silty, gravel(Qh^{al}); 9—Alluvial-diluvial gravel, sandy loam, silty sand(Qh^{pl}); 10—Jurassic granite(J₁γ); 11—Cretaceous quartz-bearing granite(K₁γ_σ); 12—Dioritic porphyrite(δμ); 13—Fault

与中蒙古深断裂相接,北延并入鄂霍茨克深断裂,对区域成矿有重要控制作用的德尔布干断裂是其分支断裂。额尔古纳—呼伦深断裂在区域构造发展过程中对中生代以来的地层、构造、岩浆活动及几个大型矿床的形成起到很重要的控制作用。前人认为本区应属于环太平洋成矿域,是环太平洋成矿带在东亚鄂霍茨克海槽向东伸入大陆派生的成矿带。但通过近年来的研究表明,本区应属于中国北方造山带古亚洲洋成矿域大兴安岭成矿省新巴尔虎右旗-根河

成矿带。

区内地层发育,从元古界到新生界均有出露(图1、表1)。其中中生界分布最广,新生界次之,古生界和元古界仅有零星出露。出露地层依次为震旦系额尔古纳河组;侏罗系塔木兰沟组、满克头鄂博组、玛尼吐组、白音高老组;白垩系大磨拐河组和第四系的沉积物。本区岩浆活动频繁,其时代分别为海西晚期、燕山早期和燕山晚期,其中以燕山早期岩浆分布最为广泛。

表 1 满洲里市南部区域地层系统
Table 1 Regional stratum in Southern Manzhouli

| 界 | 系(群) | 统 | 组 | 地层代号 | 主要岩石组成 |
|-----|------|-----|--------|------------------|-------------------------|
| 新生界 | 第四系 | 全新统 | | Qh ^{pl} | 冲洪积砂砾、亚砂土、粉砂 |
| | | | | Qh ^l | 冲积粉砂、砂砾 |
| | | 更新统 | | Qp ^{gl} | 冰水堆积泥、砂砾粘土 |
| 中生界 | 白垩系 | 下统 | 大磨拐河组 | K _{1d} | 砂岩、砾岩、粉砂岩、泥岩 |
| | | | 白音高老组 | J _{3b} | 中酸性晶屑熔结凝灰岩、含角砾玻屑凝灰岩、流纹岩 |
| | 侏罗系 | 上统 | 尼玛叶组 | J _{3mn} | 粗面岩、粗面安山岩、安山岩 |
| | | | 满克头鄂博组 | J _{3mk} | 酸性熔岩、凝灰岩 |
| | | 中统 | 塔木兰沟组 | J _{2tm} | 安山岩、安山玄武岩、玄武岩 |
| 古生界 | 石炭系 | 下统 | 莫尔根河组 | C _{1m} | 大理岩夹钙硅酸盐 |
| 元古宙 | 震旦系 | | | Ze | 大理岩、白云岩 |

乌奴格吐山斑岩型铜铅矿床位于中蒙—额尔古纳元古宙至早寒武世变质体东南缘,德尔布干—中蒙深断裂带西北侧,其围岩为印支期黑云母二长花岗岩岩基(K-Ar 年龄 176.9~201.6Ma, Rb-Sr 年龄 212Ma)(秦克章等,1998),成矿主岩为二长花岗斑岩(岩株),成岩成矿时代为早燕山期(早侏罗世)(约 183Ma)(秦克章等,1999),铜、铅远景储量分别为特大型和大型(李宪臣等,2003)。

垦山试验区位于乌奴格吐山铜铅矿床之北偏西约 10km 处,位于德尔布干深大断裂西北侧的满洲里复背斜轴部,满洲里—朱温得山断裂从附近经过。区内地层出露比较单一,有下石炭统莫尔根河组 and 上侏罗统龙江组。莫尔根河组为一套经历了变质改造作用的地层体,岩性主要为砂卡岩化灰岩和砂岩等。龙江组在区内分布较广,根据其岩性可进一步分为上下两个岩性段,下段岩性以安山岩、安山质角砾凝灰熔岩为主,局部地段夹粗安质或英安质岩层,不整合于莫尔根河组之上;上段岩性以流纹质角砾凝灰熔岩为主,局部地段夹流纹岩或流纹质凝灰岩层。

2 样品采集及测试方法

本次工作中,系统采集了乌奴格吐山矿区 ZK655、ZK657、ZK691、ZK694 钻孔和垦山异常区 ZK0601、ZK0602 钻孔岩芯样品(图 2),并对其中的黄铁矿进行了硫同位素分析。黄铁矿硫同位素组成测定由国土资源部同位素地质重点实验室采用 Cu₂O 氧化法完成,其基本原理是在真空系统和高温条件下,硫化物与 Cu₂O 反应,硫全部转化为纯净的 SO₂ 气体,测定其 ³⁴S 与 ³²S 比值。采用 V-CDT 国际标准,分析精密密度为 ±0.2%。Cu 等元素测定在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所采用

“四酸”溶矿法完成,其基本原理是将样品经氢氟酸、硝酸、高氯酸分解,用王水溶解后,在等离子体质谱仪(ICP-MS)上测定,Cu 检出限为 0.6μg/g,测定范围 2~1000μg/g。

3 垦山试验区地球化学异常特征

3.1 土壤地球化学异常

垦山试验区土壤地球化学异常明显,根据异常元素组合规律及空间展布形态可以划分为三组,编号为 I、II、III(图 2、3)。I 号异常位于测区的西南端,异常元素组合为 Cu、Pb、Zn、Ag 等;II 号异常位于测区中部,受 F₁、F₄ 断裂控制,异常元素组合为 Cu、Pb、Zn、Ag 等;III 号异常受 F₇ 断裂控制,贯穿测区,呈串珠状近等距离分布,异常元素组合为 Au、As、Sb、Tl 等。I、II、III 号异常浓集中心位置 Cu、Pb、Zn、Ag、Au、As、Sb、Tl 等元素含量见表 2。

与 Cu 有关的异常为 I 号、II 号异常,钻孔 ZK0601、ZK0602 分别位于 I 号异常和 II 号异常中心部位,这里重点对这两个异常特征进行介绍。I 号异常位于测区 1~13 勘查线之间,集中在 5 线,元素组合为 Cu、Pb、Zn、Ag、Cd、Bi、W、S 等,浓集中心和浓度分带明显,异常呈规则的长方形状,Cu、Pb、Ag 综合异常面积大于 0.2 km²,而且在该试验区内 Cu 和 S 异常套合非常好(如图 4);II 号异常位于测区 17~45 勘查线之间,元素组合主要为 Cu、Pb、Zn、Ag、Cd、Bi、W 等,异常空间套合较好,呈长轴状跨越 F₁ 和 F₄ 断裂,与 F₁ 断裂西侧出露的潜流纹岩脉相衔接,推测 Cu 矿化主要受 F₁ 和 F₄ 断裂控制,潜流纹岩脉的侵入可能提供了重要热源。

3.2 土壤热释 Hg 异常

有试验资料表明,土壤热释 Hg 异常与断裂构造带关系密切,通过土壤 Hg 测量可以查明测区内

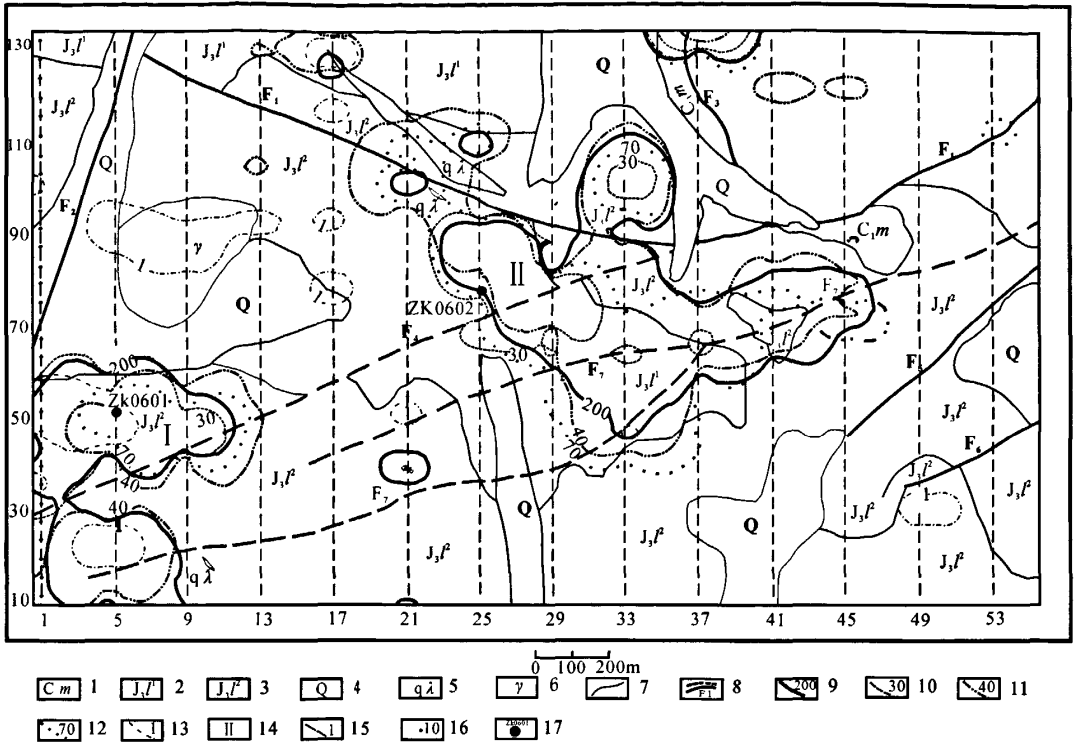


图 2 垦山试验区土壤测量 Cu 等综合异常图

Fig. 2 The map of Cu comprehensive anomalies of soil measurement in Kenshan area

1—下石炭统莫尔根河组;2—上侏罗统龙江组一段;3—上侏罗统龙江组二段;4—第四系;5—潜流纹岩脉;6—细粒花岗岩;7—地质界限;8—断层和推测断层;9—Ag(ng/g)异常;10—Cu(μg/g)异常;11—Pb(μg/g)异常;12—Zn(μg/g)异常;13—Mo(μg/g)异常;14—异常编号;15—勘探线;16—采样点编号;17—钻孔编号

1—Lower Carboniferous Moergenge Group; 2—Member of upper Jurassic Longjiang Group; 3—Member of upper Jurassic Longjiang Group; 4—Quaternary; 5—Rhyolite vein; 6—Granule granite; 7—Geologic boundary; 8—Fault and inferred fault; 9—Ag geochemical anomaly; 10—Cu geochemical anomaly; 11—Pb geochemical anomaly; 12—Zn geochemical anomaly; 13—Mo geochemical anomaly; 14—Number of geochemical anomaly; 15—Exploratory line; 16—Number of sample; 17—Number of drill

断裂构造分布情况,并且对岩体的产出规模有很好的指示作用,距岩体越近其 Hg 的挥发越快,在靠近岩体上方形成 Hg 异常。垦山试验区土壤 Hg 测量网度 200m×50m,热释 Hg 温度为 800℃,从土壤热释 Hg 异常图上可以看到(图 5),在 F₄ 断裂的东侧另有一组 Hg 异常带存在,推测其可能为一条隐伏断裂(F₇),在断裂交汇部位出现土壤地球化学异常,尤其是与 Cu 有关的 I、II 号异常均受断裂控制, I 号异常产出于断裂 F₄ 和 F₇ 的西南端, II 号异常产出于 F₁ 和 F₄ 的交汇部位。

上述土壤地球化学异常和土壤热释 Hg 异常与物探时间域中梯激发极化测量结果吻合,展示出该异常较好的成矿前景。物探偶极相位激电测深、可控源音频大地电磁测深结果显示,该异常可能与斑岩体有关。钻孔验证结果表明,该异常区钻孔岩心

中黄铁矿化比较普遍,局部区段还见有黄铜矿化等,岩性多为凝灰质熔岩、流纹质凝灰熔岩、英安质晶屑凝灰熔岩以及英安岩等酸性喷出岩,但是没有发现斑岩体,也没有发现具有工业价值的矿化体,使该区地质找矿工作陷入困境。开展异常成因研究的直接目的就是为异常成矿前景评价、找矿方向以及勘查勘探工程部署提供依据。

4 硫同位素组成特征

乌奴格吐山和垦山试验区钻孔岩心中黄铁矿硫同位素分析结果列于表 3 中,收集到的前人关于乌奴格吐山试验区硫同位素研究数据列于表 4 中。

4.1 乌奴格吐山试验区硫同位素组成

从表 3 中可以看到,乌奴格吐山试验区 18 件黄铁矿样品中,硫同位素组成变化范围较窄(-1.3‰

表 2 墨山试验区土壤测量地球化学异常元素含量
Table 2 Contents of geochemical anomalies elements in Kenshan area

| 异常编号 | 测线号 | 测点号 | 岩性 | 元素含量 | | | | | | | | | |
|------|-----|--------|--------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|----|
| | | | | Au | Ag | As | Cu | Mo | Pb | Sb | Tl | Zn | |
| I | 1 | 10 | 流纹质凝灰岩 | 1.1 | 141 | 25 | 17.6 | 0.59 | 50 | 1.05 | 0.98 | 37 | |
| | | 14 | | 1.2 | 147 | 16 | 19.7 | 0.64 | 45 | 0.78 | 0.87 | 41 | |
| | | 18 | | 0.7 | 100 | 14 | 17.4 | 0.52 | 28 | 0.78 | 0.80 | 39 | |
| | | 22 | | 0.8 | 101 | 13 | 17.7 | 0.53 | 23 | 0.82 | 0.79 | 47 | |
| | | 26 | | 1.9 | 96 | 14 | 23.6 | 0.53 | 23 | 1.01 | 0.72 | 46 | |
| | | 30 | | 2.1 | 151 | 19 | 40.2 | 0.62 | 25 | 1.28 | 0.86 | 52 | |
| | | 34 | | 2.9 | 204 | 24 | 40.1 | 1.19 | 30 | 1.15 | 0.99 | 58 | |
| | | 38 | | 2.9 | 317 | 34 | 35.2 | 0.99 | 29 | 1.57 | 1.03 | 52 | |
| | | 42 | | 2.1 | 93 | 13 | 21.2 | 0.62 | 22 | 0.82 | 0.82 | 51 | |
| | | 46 | | 2.0 | 182 | 20 | 54.6 | 0.96 | 21 | 1.17 | 0.86 | 42 | |
| | | 50 | | 3.2 | 413 | 21 | 156.8 | 2.52 | 22 | 1.57 | 0.77 | 35 | |
| | | 54 | | 1.5 | 171 | 16 | 56.6 | 2.24 | 21 | 1.28 | 0.85 | 49 | |
| | | 58 | | 第四系 | 0.9 | 53 | 10 | 12 | 0.51 | 23 | 0.63 | 0.85 | 32 |
| | | 62 | | | 0.8 | 75 | 10 | 15.1 | 0.56 | 21 | 0.75 | 0.82 | 46 |
| | 5 | 流纹质凝灰岩 | 10 | 1.8 | 179 | 16 | 20.5 | 0.55 | 31 | 1.03 | 0.78 | 60 | |
| | | | 14 | 3.8 | 345 | 24 | 13.6 | 0.62 | 40 | 1.76 | 0.81 | 45 | |
| | | | 18 | 6.9 | 698 | 70 | 15.7 | 0.92 | 142 | 6.87 | 2.06 | 40 | |
| | | | 22 | 8.5 | 1103 | 45 | 25.3 | 2.37 | 169 | 5.16 | 1.40 | 56 | |
| | | | 26 | 2.2 | 226 | 30 | 30.7 | 0.88 | 50 | 1.11 | 0.90 | 42 | |
| | | | 30 | 0.9 | 78 | 11 | 11.1 | 0.49 | 24 | 0.69 | 0.75 | 37 | |
| | | | 34 | 2.4 | 67 | 14 | 19.3 | 0.59 | 21 | 1.13 | 0.64 | 54 | |
| | | | 38 | 2.5 | 95 | 14 | 23.1 | 0.56 | 21 | 1.01 | 0.69 | 53 | |
| | | | 42 | 1.4 | 129 | 19 | 19.5 | 0.63 | 27 | 1.03 | 0.77 | 51 | |
| | | | 46 | 5.5 | 2469 | 160 | 224.2 | 1.77 | 165 | 2.75 | 3.10 | 73 | |
| | | | 50 | 2.7 | 935 | 35 | 257.5 | 0.88 | 41 | 1.05 | 1.05 | 133 | |
| | | | 54 | 3.2 | 1350 | 75 | 204.3 | 1.21 | 39 | 1.78 | 1.59 | 73 | |
| | | | 58 | 第四系 | 1.5 | 85 | 12 | 17.4 | 0.46 | 26 | 0.67 | 0.70 | 40 |
| | | | 62 | | 0.5 | 66 | 10 | 12.7 | 0.53 | 25 | 0.61 | 0.49 | 35 |
| | 9 | 流纹质凝灰岩 | 10 | 0.7 | 209 | 15 | 12.8 | 0.53 | 32 | 0.86 | 0.60 | 43 | |
| | | | 14 | 0.7 | 160 | 17 | 13.3 | 0.63 | 28 | 0.88 | 0.70 | 46 | |
| | | | 18 | 4.1 | 199 | 41 | 13.4 | 0.65 | 30 | 1.41 | 0.96 | 42 | |
| | | | 22 | 0.6 | 172 | 20 | 9.3 | 0.64 | 36 | 1.17 | 0.71 | 38 | |
| | | | 26 | 1.4 | 113 | 17 | 12.5 | 0.58 | 34 | 1.34 | 0.76 | 44 | |
| | | | 30 | 1.1 | 74 | 12 | 15.1 | 0.42 | 22 | 0.75 | 0.66 | 44 | |
| | | | 34 | 0.8 | 81 | 12 | 15.1 | 0.45 | 32 | 0.82 | 0.73 | 42 | |
| | | | 38 | 2.4 | 94 | 13 | 18.1 | 0.64 | 27 | 1.09 | 0.66 | 62 | |
| | | | 42 | 1.7 | 87 | 14 | 13.7 | 0.55 | 31 | 0.86 | 0.73 | 51 | |
| | | | 46 | 0.9 | 1228 | 72 | 169.1 | 1.15 | 653 | 2.60 | 1.05 | 485 | |
| | | | 50 | 1.2 | 354 | 34 | 18.5 | 0.66 | 62 | 1.05 | 0.50 | 50 | |
| | | | 54 | 0.7 | 229 | 35 | 21.5 | 0.62 | 51 | 0.90 | 0.82 | 38 | |
| | | | 58 | 第四系 | 0.8 | 104 | 13 | 15.7 | 0.46 | 29 | 0.73 | 0.71 | 53 |
| | | | 62 | | 0.3 | 73 | 10 | 11.2 | 0.49 | 26 | 0.65 | 0.59 | 27 |
| | | 流纹质凝灰岩 | 10 | 1.2 | 65 | 14 | 9.3 | 0.43 | 23 | 0.78 | 0.73 | 35 | |
| | | | 14 | 2.1 | 81 | 21 | 18.1 | 0.66 | 26 | 1.09 | 0.83 | 52 | |
| | | | 18 | 2.0 | 81 | 17 | 16.2 | 0.64 | 25 | 0.92 | 0.78 | 51 | |
| | | | 22 | 5.6 | 185 | 104 | 10.7 | 0.82 | 28 | 3.30 | 1.06 | 60 | |
| | | | 26 | 1.0 | 79 | 23 | 11.8 | 0.65 | 28 | 1.15 | 0.69 | 41 | |
| | | | 30 | 0.6 | 78 | 43 | 9.3 | 0.70 | 30 | 2.01 | 0.84 | 41 | |
| 34 | | | 2.0 | 76 | 14 | 12.2 | 0.53 | 28 | 0.96 | 0.72 | 44 | | |
| 38 | | | 1.3 | 69 | 13 | 9.9 | 0.48 | 28 | 0.71 | 0.72 | 34 | | |
| 42 | | | 1.5 | 69 | 16 | 12.9 | 0.54 | 29 | 0.82 | 0.56 | 46 | | |
| 46 | | | 0.6 | 127 | 36 | 11.1 | 0.51 | 42 | 1.13 | 0.72 | 50 | | |

续表 2

| 异常编号 | 测线号 | 测点号 | 岩性 | 元素含量 | | | | | | | | |
|------|-----|-----|--------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-----|
| | | | | Au | Ag | As | Cu | Mo | Pb | Sb | Tl | Zn |
| I | 13 | 50 | 流纹质凝灰岩 | 1.3 | 102 | 62 | 10.3 | 0.54 | 46 | 1.59 | 0.73 | 67 |
| | | 54 | | 1.7 | 76 | 20 | 14.5 | 0.61 | 25 | 0.99 | 0.74 | 52 |
| | | 58 | | 1.3 | 97 | 14 | 14.7 | 0.49 | 35 | 0.94 | 0.73 | 52 |
| | | 62 | | 1.1 | 94 | 18 | 14.2 | 0.57 | 34 | 0.86 | 0.69 | 52 |
| II | 21 | 62 | 安山质凝灰岩 | 1.5 | 60 | 17 | 14.5 | 1.01 | 23 | 0.80 | 0.52 | 45 |
| | | 66 | | 2.4 | 71 | 16 | 17.7 | 0.89 | 20 | 1.05 | 0.60 | 48 |
| | | 70 | | 1.7 | 87 | 18 | 13.1 | 0.70 | 24 | 0.92 | 0.63 | 44 |
| | | 74 | | 0.7 | 70 | 12 | 11.7 | 0.62 | 24 | 0.80 | 0.73 | 43 |
| | | 78 | | 0.8 | 71 | 13 | 12 | 0.51 | 25 | 0.78 | 0.57 | 43 |
| | | 82 | | 1.4 | 66 | 12 | 12.8 | 0.44 | 22 | 0.94 | 0.61 | 47 |
| | | 86 | | 2.7 | 88 | 15 | 13.1 | 0.41 | 25 | 1.07 | 0.54 | 39 |
| | | 90 | | 2.4 | 62 | 15 | 15.3 | 0.47 | 24 | 1.01 | 0.67 | 58 |
| | 94 | 1.5 | 102 | 18 | 12.6 | 0.50 | 33 | 0.92 | 0.61 | 54 | | |
| | 25 | 62 | 安山质凝灰岩 | 1.3 | 71 | 14 | 15.1 | 0.53 | 24 | 0.94 | 0.72 | 46 |
| | | 66 | | 1.6 | 141 | 19 | 52.4 | 0.64 | 36 | 1.28 | 0.67 | 76 |
| | | 70 | | 1.1 | 100 | 16 | 24.2 | 0.58 | 28 | 0.92 | 0.77 | 60 |
| | | 74 | | 1.7 | 107 | 18 | 26.4 | 0.76 | 33 | 0.86 | 0.74 | 70 |
| | | 78 | | 2.4 | 306 | 31 | 52.8 | 0.84 | 36 | 1.07 | 0.64 | 94 |
| | | 82 | | 2.9 | 408 | 31 | 58.8 | 0.72 | 43 | 1.01 | 0.87 | 95 |
| | | 86 | | 3.5 | 495 | 54 | 126.9 | 0.95 | 105 | 1.07 | 1.34 | 214 |
| | | 90 | | 1.5 | 157 | 22 | 32.9 | 0.70 | 43 | 0.84 | 0.84 | 70 |
| | 94 | 0.7 | 81 | 14 | 13.9 | 0.70 | 28 | 0.67 | 0.79 | 41 | | |
| | 29 | 62 | 安山质凝灰岩 | 3.6 | 279 | 33 | 33.1 | 0.59 | 38 | 1.64 | 0.90 | 95 |
| | | 66 | | 2.4 | 176 | 24 | 24.7 | 0.57 | 33 | 1.22 | 0.81 | 86 |
| | | 70 | | 2.0 | 282 | 37 | 33.4 | 0.64 | 43 | 1.47 | 0.94 | 126 |
| | | 74 | | 3.4 | 1690 | 130 | 124.9 | 0.75 | 178 | 2.10 | 1.47 | 314 |
| | | 78 | 0.8 | 212 | 21 | 24.8 | 0.50 | 40 | 0.80 | 0.82 | 72 | |
| | | 82 | 流纹质凝灰岩 | 0.4 | 123 | 17 | 13.1 | 0.55 | 27 | 0.69 | 0.68 | 46 |
| | | 86 | | 1.3 | 217 | 42 | 32 | 0.51 | 34 | 1.55 | 0.85 | 71 |
| | | 90 | | 0.8 | 107 | 17 | 13.6 | 0.42 | 27 | 0.80 | 0.71 | 35 |
| | | 94 | | 0.4 | 136 | 21 | 15.2 | 0.50 | 33 | 0.78 | 0.79 | 41 |
| | | 98 | 0.4 | 106 | 14 | 11.7 | 0.42 | 28 | 0.63 | 0.67 | 35 | |
| | | 102 | 第四系 | 0.5 | 59 | 8 | 7.9 | 0.35 | 21 | 0.52 | 0.73 | 23 |
| | | 106 | | 0.6 | 59 | 10 | 10 | 0.42 | 25 | 0.61 | 0.67 | 28 |
| | 110 | 0.5 | | 59 | 9 | 8.9 | 0.40 | 23 | 0.54 | 0.75 | 27 | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | 33 | 62 | 安山质凝灰岩 | 1.6 | 1382 | 89 | 42.7 | 0.89 | 347 | 2.50 | 1.28 | 160 |
| | | 66 | | 0.7 | 169 | 45 | 17.4 | 0.58 | 53 | 1.34 | 0.83 | 66 |
| | | 70 | | 0.8 | 337 | 42 | 20 | 0.54 | 77 | 1.26 | 1.04 | 77 |
| | | 74 | 流纹质凝灰岩 | 0.6 | 161 | 19 | 13.2 | 0.44 | 36 | 0.86 | 0.80 | 51 |
| 78 | | 0.8 | | 329 | 25 | 14.6 | 0.46 | 48 | 0.75 | 0.78 | 56 | |
| 82 | | 1.0 | | 309 | 17 | 13.5 | 0.47 | 60 | 0.75 | 0.75 | 59 | |
| 86 | | 0.7 | | 200 | 26 | 11.9 | 0.47 | 37 | 0.99 | 0.76 | 42 | |
| 90 | | 1.7 | | 92 | 15 | 20.9 | 0.59 | 27 | 1.15 | 0.75 | 66 | |
| 94 | | 1.6 | | 617 | 27 | 18.7 | 0.69 | 89 | 1.32 | 0.75 | 71 | |
| 98 | | 1.0 | | 442 | 66 | 69.3 | 0.62 | 42 | 1.32 | 0.94 | 141 | |
| 102 | | 2.3 | | 300 | 43 | 21.3 | 0.43 | 82 | 1.47 | 0.67 | 98 | |
| 106 | | 2.5 | | 256 | 24 | 13.4 | 0.51 | 45 | 1.07 | 0.80 | 64 | |
| 110 | | 1.2 | 182 | 12 | 10 | 0.47 | 47 | 0.73 | 0.72 | 41 | | |
| 37 | | 62 | 安山质凝灰岩 | 12.2 | 649 | 173 | 31.2 | 0.69 | 54 | 3.97 | 0.67 | 341 |
| | | 66 | | 6.5 | 672 | 295 | 36.3 | 0.57 | 131 | 12.83 | 4.09 | 155 |
| | | 70 | 流纹质凝灰岩 | 1.1 | 316 | 33 | 18.4 | 0.71 | 55 | 1.32 | 0.90 | 67 |
| | | 74 | | 1.5 | 167 | 36 | 12.7 | 0.61 | 29 | 1.13 | 0.76 | 82 |
| 78 | | | 1.1 | 100 | 21 | 13.5 | 0.57 | 25 | 0.96 | 0.77 | 57 | |

续表 2

| 异常编号 | 测线号 | 测点号 | 岩性 | 元素含量 | | | | | | | | | | |
|-------|-----|-----|--------|------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|----|
| | | | | Au | Ag | As | Cu | Mo | Pb | Sb | Tl | Zn | | |
| II | 37 | 82 | 流纹质凝灰岩 | 1.1 | 99 | 23 | 18.8 | 0.70 | 25 | 1.03 | 0.86 | 57 | | |
| | | 86 | | 1.6 | 116 | 18 | 16.3 | 0.69 | 24 | 1.09 | 0.79 | 53 | | |
| | | 90 | 第四系 | 1.9 | 98 | 16 | 18.5 | 0.64 | 25 | 1.05 | 0.78 | 66 | | |
| | | 94 | | 1.4 | 82 | 12 | 15.4 | 0.58 | 21 | 0.86 | 0.73 | 53 | | |
| | | 98 | | 1.1 | 64 | 10 | 13.9 | 0.59 | 24 | 0.75 | 0.73 | 49 | | |
| | | 102 | | 0.9 | 88 | 11 | 11.6 | 0.59 | 24 | 0.80 | 0.76 | 42 | | |
| | | 106 | | 1.4 | 91 | 12 | 16.1 | 0.55 | 22 | 1.05 | 0.69 | 54 | | |
| | | 110 | | 0.5 | 61 | 10 | 6.5 | 0.48 | 21 | 0.54 | 0.47 | 22 | | |
| III-1 | 1 | 10 | 流纹质凝灰岩 | 1.1 | 141 | 25 | 17.6 | 0.59 | 50 | 1.05 | 0.98 | 37 | | |
| | | 14 | | 1.2 | 147 | 16 | 19.7 | 0.64 | 45 | 0.78 | 0.87 | 41 | | |
| | | 18 | | 0.7 | 100 | 14 | 17.4 | 0.52 | 28 | 0.78 | 0.80 | 39 | | |
| | | 22 | | 0.8 | 101 | 13 | 17.7 | 0.53 | 23 | 0.82 | 0.79 | 47 | | |
| | | 26 | | 1.9 | 96 | 14 | 23.6 | 0.53 | 23 | 1.01 | 0.72 | 46 | | |
| | | 30 | | 2.1 | 151 | 19 | 40.2 | 0.62 | 25 | 1.28 | 0.86 | 52 | | |
| | | 34 | | 2.9 | 204 | 24 | 40.1 | 1.19 | 30 | 1.15 | 0.99 | 58 | | |
| | | 38 | | 2.9 | 317 | 34 | 35.2 | 0.99 | 29 | 1.57 | 1.03 | 52 | | |
| | | 42 | | 2.1 | 93 | 13 | 21.2 | 0.62 | 22 | 0.82 | 0.82 | 51 | | |
| | | 46 | | 2.0 | 182 | 20 | 54.6 | 0.96 | 21 | 1.17 | 0.86 | 42 | | |
| | | 50 | | 3.2 | 413 | 21 | 156.8 | 2.52 | 22 | 1.57 | 0.77 | 35 | | |
| | | 54 | | 1.5 | 171 | 16 | 56.6 | 2.24 | 21 | 1.28 | 0.85 | 49 | | |
| | | 10 | | 5 | 流纹质凝灰岩 | 1.8 | 179 | 16 | 20.5 | 0.55 | 31 | 1.03 | 0.78 | 60 |
| | | 14 | | | | 3.8 | 345 | 24 | 13.6 | 0.62 | 40 | 1.76 | 0.81 | 45 |
| | 18 | 6.9 | 698 | | | 70 | 15.7 | 0.92 | 142 | 6.87 | 2.06 | 40 | | |
| | 22 | 8.5 | 1103 | | | 45 | 25.3 | 2.37 | 169 | 5.16 | 1.40 | 56 | | |
| | 26 | 2.2 | 226 | | | 30 | 30.7 | 0.88 | 50 | 1.11 | 0.90 | 42 | | |
| | 30 | 0.9 | 78 | | | 11 | 11.1 | 0.49 | 24 | 0.69 | 0.75 | 37 | | |
| | 34 | 2.4 | 67 | | | 14 | 19.3 | 0.59 | 21 | 1.13 | 0.64 | 54 | | |
| | 38 | 2.5 | 95 | | | 14 | 23.1 | 0.56 | 21 | 1.01 | 0.69 | 53 | | |
| | 42 | 1.4 | 129 | | | 19 | 19.5 | 0.63 | 27 | 1.03 | 0.77 | 51 | | |
| | 46 | 5.5 | 2469 | | | 160 | 224.2 | 1.77 | 165 | 2.75 | 3.10 | 73 | | |
| | 50 | 2.7 | 935 | | | 35 | 257.5 | 0.88 | 41 | 1.05 | 1.05 | 133 | | |
| | 54 | 3.2 | 1350 | | | 75 | 204.3 | 1.21 | 39 | 1.78 | 1.59 | 73 | | |
| | 10 | 9 | 流纹质凝灰岩 | | | 0.7 | 209 | 15 | 12.8 | 0.53 | 32 | 0.86 | 0.60 | 43 |
| | 14 | | | | | 0.7 | 160 | 17 | 13.3 | 0.63 | 28 | 0.88 | 0.70 | 46 |
| | 18 | | | 4.1 | 199 | 41 | 13.4 | 0.65 | 30 | 1.41 | 0.96 | 42 | | |
| | 22 | | | 0.6 | 172 | 20 | 9.3 | 0.64 | 36 | 1.17 | 0.71 | 38 | | |
| | 26 | | | 1.4 | 113 | 17 | 12.5 | 0.58 | 34 | 1.34 | 0.76 | 44 | | |
| | 30 | | | 1.1 | 74 | 12 | 15.1 | 0.42 | 22 | 0.75 | 0.66 | 44 | | |
| | 34 | | | 0.8 | 81 | 12 | 15.1 | 0.45 | 32 | 0.82 | 0.73 | 42 | | |
| | 38 | | | 2.4 | 94 | 13 | 18.1 | 0.64 | 27 | 1.09 | 0.66 | 62 | | |
| 42 | 1.7 | | | 87 | 14 | 13.7 | 0.55 | 31 | 0.86 | 0.73 | 51 | | | |
| 46 | 0.9 | | | 1228 | 72 | 169.1 | 1.15 | 653 | 2.60 | 1.05 | 485 | | | |
| 50 | 1.2 | | | 354 | 34 | 18.5 | 0.66 | 62 | 1.05 | 0.50 | 50 | | | |
| 54 | 0.7 | | | 229 | 35 | 21.5 | 0.62 | 51 | 0.90 | 0.82 | 38 | | | |
| | 17 | | | 30 | 流纹质凝灰岩 | 0.9 | 92 | 24 | 13.1 | 0.56 | 25 | 0.96 | 0.70 | 40 |
| | | | | 34 | | 0.9 | 96 | 23 | 12.7 | 0.51 | 26 | 0.90 | 0.55 | 43 |
| | | 38 | 0.6 | 78 | | 20 | 11.6 | 0.49 | 24 | 0.88 | 0.32 | 41 | | |
| | | 42 | 2.2 | 94 | | 34 | 12.2 | 0.49 | 25 | 1.49 | 0.76 | 43 | | |
| | | 46 | 1.8 | 95 | | 26 | 13.2 | 0.53 | 24 | 1.05 | 0.51 | 51 | | |
| | | 50 | 0.9 | 83 | | 36 | 9.2 | 0.52 | 25 | 1.07 | 0.68 | 38 | | |
| | | 54 | 3.4 | 162 | | 144 | 15.4 | 0.82 | 37 | 3.38 | 0.85 | 63 | | |
| | 21 | 30 | 流纹质凝灰岩 | 0.8 | 69 | 19 | 15.5 | 0.90 | 22 | 0.94 | 0.71 | 48 | | |
| | 34 | 1.6 | | 118 | 89 | 11.2 | 0.77 | 29 | 1.76 | 0.79 | 41 | | | |

续表 2

| 异常编号 | 测线号 | 测点号 | 岩性 | 元素含量 | | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|----|
| | | | | Au | Ag | As | Cu | Mo | Pb | Sb | Tl | Zn | | |
| Ⅲ-2 | 21 | 38 | 流纹质凝灰岩 | 8.4 | 386 | 400 | 9 | 1.14 | 45 | 6.57 | 1.15 | 69 | | |
| | | 42 | | 4.1 | 170 | 114 | 10.5 | 0.55 | 23 | 2.81 | 0.88 | 46 | | |
| | | 46 | | 1.0 | 112 | 32 | 12.2 | 0.79 | 27 | 1.53 | 0.73 | 45 | | |
| | | 50 | | 2.3 | 132 | 152 | 11 | 1.35 | 31 | 4.43 | 0.80 | 48 | | |
| | | 54 | | 0.6 | 81 | 36 | 11.2 | 0.66 | 26 | 1.05 | 0.77 | 38 | | |
| | 25 | 30 | 流纹质凝灰岩 | 1.3 | 73 | 17 | 18.4 | 0.57 | 26 | 1.09 | 0.74 | 56 | | |
| | | 34 | | 0.6 | 59 | 19 | 10.6 | 0.53 | 24 | 0.88 | 0.67 | 30 | | |
| | | 38 | | 1.7 | 75 | 17 | 11.6 | 0.52 | 24 | 0.94 | 0.50 | 47 | | |
| | | 42 | | 0.7 | 61 | 17 | 12.1 | 0.51 | 24 | 0.84 | 0.64 | 37 | | |
| | | 46 | | 3.1 | 85 | 41 | 14.3 | 0.66 | 25 | 1.47 | 0.79 | 52 | | |
| | | 50 | | 2.7 | 75 | 32 | 12.8 | 0.56 | 25 | 1.22 | 0.48 | 47 | | |
| | | 54 | | 2.5 | 85 | 30 | 16.8 | 0.67 | 24 | 1.20 | 0.80 | 52 | | |
| | | 29 | | 46 | 流纹质凝灰岩 | 1.1 | 87 | 16 | 15.4 | 0.61 | 26 | 0.82 | 0.72 | 50 |
| | | | | 50 | 安山质凝灰岩 | 1.9 | 97 | 14 | 22.5 | 0.59 | 22 | 1.17 | 0.67 | 75 |
| 54 | 2.1 | | 140 | 17 | | 25.6 | 0.42 | 23 | 1.09 | 0.66 | 75 | | | |
| 58 | 1.3 | | 137 | 17 | | 16.5 | 0.42 | 27 | 0.92 | 0.61 | 54 | | | |
| 62 | 3.6 | | 279 | 33 | | 33.1 | 0.59 | 38 | 1.64 | 0.90 | 95 | | | |
| 66 | 2.4 | | 176 | 24 | | 24.7 | 0.57 | 33 | 1.22 | 0.81 | 86 | | | |
| 70 | 2.0 | | 282 | 37 | | 33.4 | 0.64 | 43 | 1.47 | 0.94 | 126 | | | |
| 74 | 3.4 | | 1690 | 130 | | 124.9 | 0.75 | 178 | 2.10 | 1.47 | 314 | | | |
| 78 | 流纹质凝灰岩 | | 0.8 | 212 | 21 | 24.8 | 0.50 | 40 | 0.80 | 0.82 | 72 | | | |
| 82 | | | 0.4 | 123 | 17 | 13.1 | 0.55 | 27 | 0.69 | 0.68 | 46 | | | |
| 86 | | | 1.3 | 217 | 42 | 32 | 0.51 | 34 | 1.55 | 0.85 | 71 | | | |
| 90 | | | 0.8 | 107 | 17 | 13.6 | 0.42 | 27 | 0.80 | 0.71 | 35 | | | |
| 33 | 46 | | 安山质凝灰岩 | 5.0 | 253 | 69 | 24.2 | 1.27 | 95 | 0.40 | 1.02 | 307 | | |
| | 50 | | | 0.9 | 209 | 42 | 15.9 | 0.45 | 111 | 1.49 | 0.98 | 88 | | |
| | 54 | | | 1.5 | 209 | 39 | 14.6 | 0.50 | 70 | 1.41 | 0.91 | 103 | | |
| | 58 | | | 0.8 | 212 | 31 | 14.1 | 0.48 | 59 | 1.13 | 0.87 | 93 | | |
| | 62 | | | 1.6 | 1382 | 89 | 42.7 | 0.89 | 347 | 2.50 | 1.28 | 160 | | |
| | 66 | | | 0.7 | 169 | 45 | 17.4 | 0.58 | 53 | 1.34 | 0.83 | 66 | | |
| | 70 | 流纹质凝灰岩 | 0.8 | 337 | 42 | 20 | 0.54 | 77 | 1.26 | 1.04 | 77 | | | |
| | 74 | | 0.6 | 161 | 19 | 13.2 | 0.44 | 36 | 0.86 | 0.80 | 51 | | | |
| | 78 | | 0.8 | 329 | 25 | 14.6 | 0.46 | 48 | 0.75 | 0.78 | 56 | | | |
| | 82 | | 1.0 | 309 | 17 | 13.5 | 0.47 | 60 | 0.75 | 0.75 | 59 | | | |
| | 86 | | 0.7 | 200 | 26 | 11.9 | 0.47 | 37 | 0.99 | 0.76 | 42 | | | |
| | 90 | | 1.7 | 92 | 15 | 20.9 | 0.59 | 27 | 1.15 | 0.75 | 66 | | | |
| Ⅲ-3 | 37 | 46 | 流纹质凝灰岩 | 2.2 | 83 | 23 | 17.8 | 0.66 | 26 | 1.28 | 0.76 | 62 | | |
| | | 50 | 安山质凝灰岩 | 1.7 | 107 | 23 | 18 | 0.64 | 31 | 1.24 | 0.82 | 68 | | |
| | | 54 | | 1.7 | 106 | 19 | 15.3 | 0.58 | 27 | 0.94 | 0.76 | 52 | | |
| | | 58 | | 1.9 | 187 | 58 | 10.5 | 0.55 | 31 | 1.34 | 0.85 | 46 | | |
| | | 62 | | 12.2 | 649 | 173 | 31.2 | 0.69 | 54 | 3.97 | 0.67 | 341 | | |
| | | 66 | | 6.5 | 672 | 295 | 36.3 | 0.57 | 131 | 12.83 | 4.09 | 155 | | |
| | | 70 | 流纹质凝灰岩 | 1.1 | 316 | 33 | 18.4 | 0.71 | 55 | 1.32 | 0.90 | 67 | | |
| | | 74 | | 1.5 | 167 | 36 | 12.7 | 0.61 | 29 | 1.13 | 0.76 | 82 | | |
| | | 78 | | 1.1 | 100 | 21 | 13.5 | 0.57 | 25 | 0.96 | 0.77 | 57 | | |
| | | 82 | | 1.1 | 99 | 23 | 18.8 | 0.70 | 25 | 1.03 | 0.86 | 57 | | |
| | | 86 | | 1.6 | 116 | 18 | 16.3 | 0.69 | 24 | 1.09 | 0.79 | 53 | | |
| | | 90 | | 1.9 | 98 | 16 | 18.5 | 0.64 | 25 | 1.05 | 0.78 | 66 | | |
| | 41 | 46 | 流纹质凝灰岩 | 3.1 | 86 | 17 | 16.7 | 0.63 | 25 | 1.13 | 0.68 | 59 | | |
| | | 50 | | 1.1 | 86 | 23 | 10.9 | 0.56 | 30 | 1.15 | 0.75 | 40 | | |
| | | 54 | | 1.3 | 76 | 15 | 12.3 | 0.57 | 27 | 0.84 | 0.74 | 43 | | |
| | | 58 | | 1.9 | 99 | 21 | 15.5 | 0.62 | 30 | 1.15 | 0.76 | 48 | | |
| | | 62 | | 安山质凝灰岩 | 1.0 | 72 | 21 | 10.5 | 0.49 | 31 | 0.96 | 0.79 | 37 | |

续表 2

| 异常编号 | 测线号 | 测点号 | 岩性 | 元素含量 | | | | | | | | |
|-------|-----|-----|--------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-----|
| | | | | Au | Ag | As | Cu | Mo | Pb | Sb | Tl | Zn |
| III-3 | 41 | 66 | 安山质凝灰岩 | 1.8 | 1240 | 41 | 21.1 | 0.67 | 66 | 2.98 | 0.86 | 61 |
| | | 70 | | 0.8 | 140 | 42 | 11 | 0.67 | 32 | 1.26 | 0.83 | 38 |
| | | 74 | 流纹质凝灰岩 | 1.0 | 191 | 61 | 10.1 | 0.65 | 42 | 1.58 | 0.81 | 110 |
| | | 78 | | 0.8 | 283 | 142 | 9.5 | 0.70 | 104 | 3.21 | 1.33 | 31 |
| | | 82 | | 1.6 | 123 | 78 | 14.2 | 0.58 | 33 | 1.60 | 0.79 | 52 |
| | | 86 | | 1.8 | 107 | 32 | 10.9 | 0.66 | 28 | 1.11 | 0.80 | 43 |
| | 90 | 1.2 | | 85 | 20 | 14.8 | 0.66 | 29 | 1.03 | 0.67 | 45 | |
| | 45 | 46 | 流纹质凝灰岩 | 1.4 | 59 | 8 | 9.2 | 0.67 | 23 | 0.70 | 0.75 | 29 |
| | | 50 | | 1.0 | 71 | 11 | 9.3 | 0.54 | 24 | 0.72 | 0.70 | 30 |
| | | 54 | | 0.8 | 69 | 18 | 11.6 | 0.62 | 24 | 0.82 | 0.78 | 37 |
| | | 58 | | 2.1 | 111 | 16 | 19.8 | 0.73 | 24 | 1.22 | 0.62 | 62 |
| | | 62 | | 2.1 | 78 | 21 | 17.9 | 0.66 | 26 | 1.31 | 0.73 | 60 |
| | | 66 | | 2.3 | 118 | 18 | 19.8 | 0.67 | 23 | 1.37 | 0.70 | 64 |
| | | 70 | | 16.3 | 291 | 19 | 15 | 1.02 | 45 | 15.01 | 9.63 | 141 |
| | | 74 | | 3.6 | 238 | 135 | 11.6 | 0.69 | 33 | 3.00 | 0.99 | 48 |
| | | 78 | | 3.0 | 237 | 347 | 15 | 0.95 | 43 | 8.63 | 1.41 | 60 |
| | | 82 | | 2.3 | 126 | 25 | 18 | 0.60 | 33 | 1.69 | 0.83 | 61 |
| | 86 | 90 | 大理岩 | 3.7 | 234 | 33 | 19.2 | 0.75 | 32 | 2.03 | 0.81 | 63 |
| | | | | 1.9 | 98 | 44 | 21.2 | 0.62 | 21 | 1.56 | 0.83 | 56 |
| | 49 | 46 | 流纹质凝灰岩 | 1.4 | 69 | 18 | 9.4 | 0.52 | 25 | 1.29 | 0.74 | 49 |
| | | 50 | | 1.8 | 76 | 14 | 20.3 | 0.75 | 28 | 1.13 | 0.76 | 66 |
| | | 54 | | 1.0 | 68 | 13 | 9.6 | 0.53 | 24 | 0.66 | 0.70 | 30 |
| | | 58 | | 1.0 | 93 | 17 | 11.9 | 0.60 | 25 | 0.77 | 0.79 | 37 |
| | | 62 | | 2.7 | 72 | 16 | 16.7 | 0.63 | 26 | 1.05 | 0.68 | 58 |
| | | 66 | | 2.9 | 88 | 19 | 19 | 0.65 | 24 | 1.33 | 0.70 | 56 |
| | | 70 | | 5.4 | 183 | 75 | 14.2 | 0.59 | 25 | 2.20 | 0.80 | 50 |
| | | 74 | | 0.7 | 83 | 22 | 12.1 | 0.57 | 24 | 0.86 | 0.78 | 36 |
| | | 78 | | 1.4 | 81 | 40 | 13.5 | 0.57 | 26 | 1.07 | 0.76 | 47 |
| | | 82 | | 1.7 | 84 | 153 | 10 | 0.60 | 33 | 3.72 | 0.86 | 56 |
| | | 86 | | 0.6 | 73 | 63 | 7.1 | 0.58 | 25 | 1.26 | 0.75 | 29 |
| 90 | | 0.7 | | 62 | 33 | 8.9 | 0.60 | 24 | 0.86 | 0.74 | 24 | |

注:表中各元素单位除 Au、Ag 为 ng/g 外,其余均为 μg/g。

~+3.2‰),多集中在+2.4‰~+3.2‰之间,平均值为 2.33‰,多为偏离陨硫硫不大的正值,直方图呈塔型分布(图 6),峰值出现在+3.0‰左右。

对比乌奴格吐山试验区以往硫同位素研究资料可以看出(表 4),该试验区黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿等金属硫化物中硫同位素组成多为偏离陨硫硫不大的正值,δ³⁴S 为-0.2‰~+3.2‰,平均值为+2.568‰,极差小,频率统计直方图塔型分布明显(图 6),这种塔型分布是斑岩型矿床硫同位素组成典型的分布形式(芮宗瑶,2004)。这些试验结果与本次试验结果吻合很好。

4.2 墨山试验区硫同位素组成

墨山试验区 4 件黄铁矿样品中,硫同位素组成变化范围较窄(+3.2‰~+4.3‰),多集中在+4‰左右,平均值为 3.85‰,极差小,离散度小,接近陨

硫硫,频率统计直方图呈塔型分布(图 7)。

5 结果讨论

5.1 硫同位素组成的一致性

乌奴格吐山铜铅矿床是典型的斑岩型矿床,其成矿与区内的二长花岗岩和白云母花岗岩有关,成矿母岩为二长花岗斑岩,围岩为白云母花岗岩,矿体主要赋存于石英绢云母化带和钾长石化带中。乌奴格吐山试验区 18 件黄铁矿样品中硫同位素组成变化范围较窄(-1.3‰~3.2‰)。结合前人资料可以看出,该试验区硫同位素组成最小值为-1.3‰,最大值为+3.5‰,多集中在 2.4‰~3.2‰之间,平均值为 2.449‰。钻孔样品中的硫化物主要为黄铁矿和黄铜矿,未见其他硫酸盐矿物。以往研究结果表明,硫化物黄铁矿和黄铜矿的 δ³⁴S 值能代表成矿流

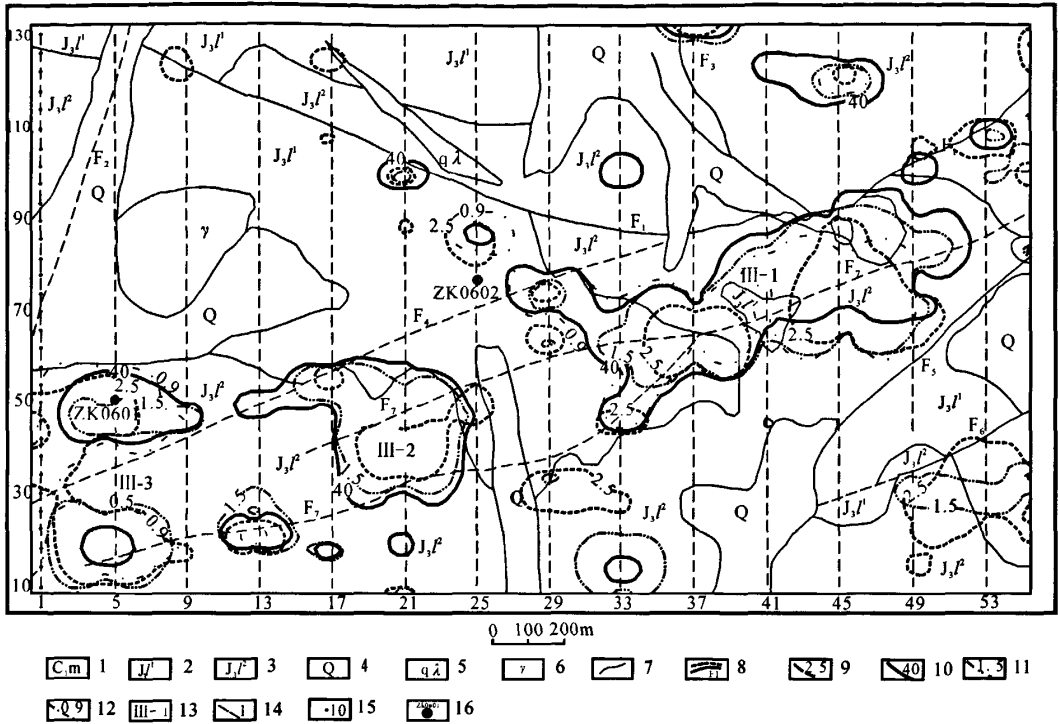


图3 垦山试验区土壤测量 Au 等综合异常图

Fig. 3 The map of Au comprehensive anomalies of soil measurement in Kenshan area

1—下石炭统莫尔根组; 2—上侏罗统龙江组一段; 3—上侏罗统龙江组二段; 4—第四系; 5—潜流纹岩脉; 6—细粒花岗岩; 7—地质界限; 8—断层和推测断层; 9—Au(ng/g)异常; 10—As(μg/g)异常; 11—Sb(μg/g)异常; 12—Tl(μg/g)异常; 13—异常编号; 14—勘探线; 15—采样点编号; 16—钻孔编号

1—Lower Carboniferous Moergenhe Group; 2—Member 1 of upper Jurassic Longjiang Group; 3—Member 2 of upper Jurassic Longjiang Group; 4—Quaternary; 5—Rhyolite vein; 6—Granule granite; 7—Geologic boundary; 8—Fault and inferred fault; 9—Au geochemical anomaly; 10—As geochemical anomaly; 11—Sb geochemical anomaly; 12—Tl geochemical anomaly; 13—Number of geochemical anomaly; 14—Exploratory line; 15—Number of sample; 16—Number of drill

体的全部硫同位素组成, 而且由于硫化物中 $\delta^{34}S_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}S_{\text{黄铜矿}}$ (陈骏等, 2005; 陈岳龙等, 2005; Seal R R, 2006), 因此就可认为黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 值与成矿流体中的总硫值相近, 即 $\delta^{34}S_{\text{黄铁矿}} \approx \Sigma \delta^{34}S$, 黄铁矿中的硫同位素组成能够示踪成矿流体中硫的来源。ZK694 孔中的二长花岗岩与其他各钻孔中的黑云母花岗岩、次流纹质晶屑熔岩以及次英安质晶屑熔岩的硫同位素组成一致(表 3), 说明其硫的来源基本相同。18 件硫同位素测试样品对应 Cu 的含量变化较宽, 从 136~8087 μg/g, 以 ZK657 孔 Cu 富集程度最大, ZK691 孔 Cu 富集程度最小, 但是不管 Cu 样品是采自矿化体还是围岩地段, 富集程度如何, 其硫同位素值基本一致(表 3), 说明乌奴格吐山试验区与 Cu 矿化和 Cu 异常有关

的硫的来源是相同的, 即针对某一相同地质作用过程中形成的矿床或异常而言, 无论矿化元素(Cu)含量高至形成矿床, 还是低至只形成异常, 与其共生的硫的同位素组成基本上是一致的, 这就为利用硫同位素组成特征解释地球化学异常成因提供了依据。

已有物探资料显示垦山试验区的地球化学异常可能与斑岩有关, 但钻探验证结果并无斑岩体存在。该区 4 件样品中硫同位素组成变化范围较窄(3.2‰~4.3‰), 集中在 4‰左右, 平均值为 3.85‰; 4 件样品中对应 Cu 含量变化较窄(155~440 μg/g), 挤压破碎带样品(ZK0602-32)中 Cu 含量最低(155 μg/g), 但挤压破碎带样品中硫同位素值与其它 3 个样品一致, 表明该试验区内两个钻孔中与 Cu 异常有关的硫来源基本相同。

5.2 硫同位素组成的差异性

对比表 3、表 4 中的数据发现乌奴格吐山试验区硫同位素组成出现明显的负值(-0.2‰~-1.3‰)(表 3、表 4),这一负值特征与典型斑岩型

铜矿的硫同位素组成一致(芮宗瑶,2002);垦山试验区 4 件钻孔样品的硫同位素组成均为偏离零值不大的正值,未出现明显的负值,比较乌奴格吐山试验区和垦山试验区的硫同位素组成发现其直方图及折线

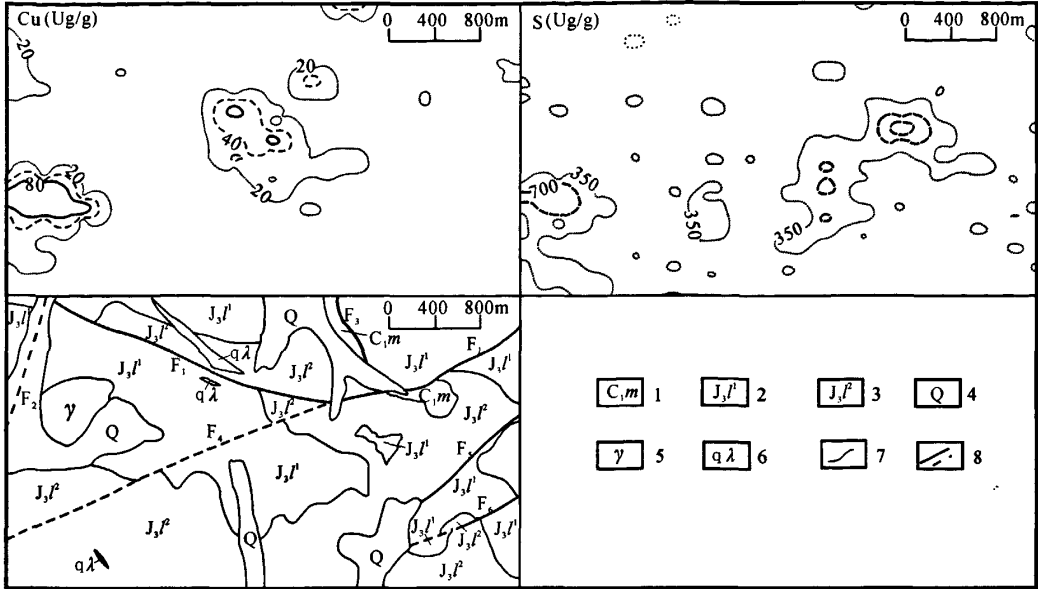


图 4 垦山试验区土壤 Cu-S 地球化学异常剖析图

Fig. 4 Geochemical anomaly map of Cu and S elements in soil from Kenshan area

1—下石炭统莫尔根河组;2—上侏罗统龙江组一段;3—上侏罗统龙江组二段;4—第四系;5—潜流纹岩脉;6—细粒花岗岩;7—地质界限;8—断层和推测断层

1—Lower Carboniferous Moergenhe Group;2—Member 1 of upper Jurassic Longjiang Group;3—Member 2 of upper Jurassic Longjiang Group;4—Quaternary;5—Rhyolite vein; 6—Granule granite;7—Geologic boundary;8—Fault and inferred falt

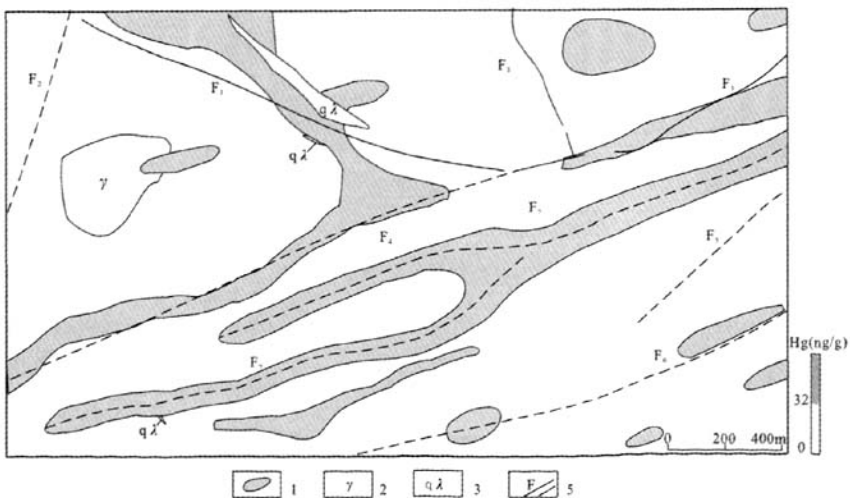


图 5 垦山试验区土壤热释 Hg 异常图

Fig. 5 The anomaly map of Thermal-Release Hg in soil from Kenshan area

1—热释放 Hg 异常;2—细粒花岗岩;3—潜流纹岩脉;4—断层和推测断层

1—Thermal-Release Hg anomaly; 2—Granule granite; 3—Rhyolite vein; 4—Fault and inferred falt

表3 乌奴格吐山、墨山试验区硫同位素组成

Table 3 Sulfur isotope composition of Wunugetushan and Kenshan areas

| 试验区 | 样品号 | 测试矿物 | $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ | Cu ($\mu\text{g/g}$) | 岩性 | 来源 |
|----------|-----------|------|---------------------------------|------------------------|-------------|----|
| 乌奴格吐山 | ZK655-27 | 黄铁矿 | -1.3 | 242 | 黑云母花岗岩 | 本文 |
| | ZK657-6 | 黄铁矿 | 3.1 | 5267 | 黑云母花岗岩(矿化体) | 本文 |
| | ZK657-9 | 黄铁矿 | 3 | 6684 | 黑云母花岗岩(矿化体) | 本文 |
| | ZK657-14 | 黄铁矿 | 3.2 | 8087 | 黑云母花岗岩(矿化体) | 本文 |
| | ZK657-19 | 黄铁矿 | 2.5 | 6626 | 黑云母花岗岩(矿化体) | 本文 |
| | ZK657-26 | 黄铁矿 | 2.1 | 4233 | 黑云母花岗岩(矿化体) | 本文 |
| | ZK657-32 | 黄铁矿 | 2.5 | 595 | 黑云母花岗岩 | 本文 |
| | ZK657-39 | 黄铁矿 | 2.5 | 570 | 次流纹质晶屑熔岩 | 本文 |
| | ZK691-5 | 黄铁矿 | 2.4 | 136 | 黑云母花岗岩 | 本文 |
| | ZK691-12 | 黄铁矿 | 1.9 | 533 | 黑云母花岗岩 | 本文 |
| | ZK691-22 | 黄铁矿 | 2.6 | 2120 | 黑云母花岗岩(矿化体) | 本文 |
| | ZK691-26 | 黄铁矿 | 2.6 | 1895 | 次英安晶屑熔岩(矿化) | 本文 |
| | ZK691-37 | 黄铁矿 | 2.8 | 305 | 黑云母花岗岩 | 本文 |
| | ZK694-5 | 黄铁矿 | 2.8 | 1651 | 黑云母花岗岩(矿化) | 本文 |
| | ZK694-13 | 黄铁矿 | 2.2 | 4120 | 黑云母花岗岩 | 本文 |
| | ZK694-21 | 黄铁矿 | 2.6 | 6652 | 二长花岗岩(矿化体) | 本文 |
| | ZK694-36 | 黄铁矿 | 2.8 | 2284 | 黑云母花岗岩(矿化体) | 本文 |
| ZK694-41 | 黄铁矿 | 1.8 | 403 | 黑云母花岗岩 | 本文 | |
| 墨山 | ZK0601-21 | 黄铁矿 | 3.9 | 440 | 英安质晶屑凝灰岩 | 本文 |
| | ZK0602-19 | 黄铁矿 | 4.3 | 203 | 英安质晶屑凝灰岩 | 本文 |
| | ZK0602-32 | 黄铁矿 | 3.2 | 155 | 挤压破碎带 | 本文 |
| | ZK0602-51 | 黄铁矿 | 4.0 | 192 | 英安质晶屑含砾凝灰熔岩 | 本文 |

注:国土资源部同位素地质重点实验室测试。

表4 乌奴格吐山试验区硫同位素组成

Table 4 Sulfur isotope composition of Wunugetushan area

| 矿物 | 个数 | $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ 变化区间 | 级差 | 平均值 | 来源 |
|-----|----|--------------------------------------|-----|------|----|
| 黄铁矿 | 35 | 1.4 ~ 3.5 | 2.1 | 2.59 | 文献 |
| 闪锌矿 | 2 | 2.4 ~ 2.5 | 0.1 | 2.45 | 文献 |
| 黄铜矿 | 12 | -0.2 ~ 2.4 | 2.6 | 1.8 | 文献 |
| 方铅矿 | 4 | 1.1 ~ 3.2 | 2.1 | 1.8 | 文献 |

注:文献数据引自张海心(2006)。

图呈现两个不同的峰值(图6、7、8),表明这两个试验区硫的来源不同,与乌奴格吐山试验区相比,墨山试验区的 $\delta^{34}\text{S}$ 值较大。出现 $\delta^{34}\text{S}$ 值增大的原因,认为是该试验区的硫受到后期热液作用的影响。除硫同位素组成特征外,如下矿物学和地球化学证据也表明该区经历了后期热液活动的影响:(1)在试验区东北角(F_3 附近)的下石炭统莫尔根河组(C_1m)地层中发现明显的大理岩化,在大理岩中含有较多的矽卡岩化矿物,同时伴有微弱的孔雀石化出现,在该处采集的重砂样品中发现有极少量的金云母、透闪石、石榴子石存在;(2)ZK0601、ZK0602 钻孔中岩石蚀变强烈,黄铁矿化比较普遍,局部地段可见黄铜矿化及极少的闪锌矿、方铅矿矿化,但矿化比较弱,显微镜下鉴定显示黄铁矿化呈它型致密浸染状和星散状

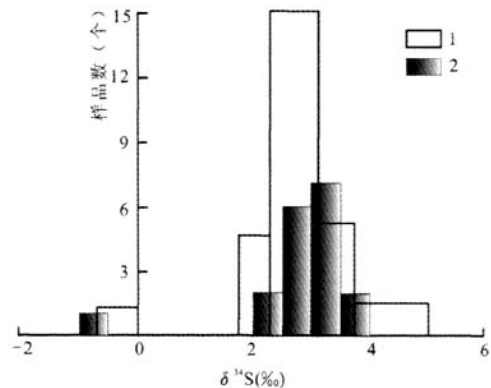


图6 乌奴格吐山试验区硫同位素组成

Fig. 6 The $\delta^{34}\text{S}$ values obtained from Wunugetushan area

1—引用数据(引自张海心,2006);2—本文实验数据

1—Bibliographic data(From Zhang Haixin,2006);

2—Experimental data

普遍存在,说明黄铁矿是后期热液作用的产物,证明该区存在热液活动的影响;(3)土壤热释 Hg 异常显示该区内与 Cu 有关的 I、II 号异常均产在断裂带附近, I 号异常产出于断裂 F_4 和 F_7 的西南端, II 号异常产出于 F_1 和 F_4 的交汇部位,明显受断裂构造的影响。根据上述硫同位素组成、矿物学及地球化学

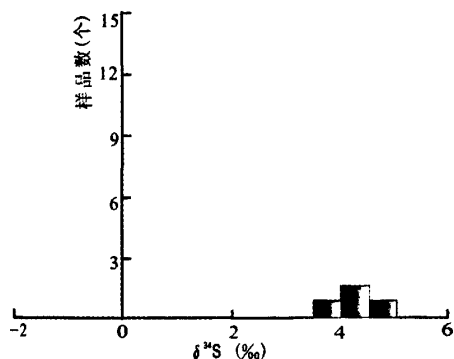


图 7 垦山试验区硫同位素组成

Fig. 7 The $\delta^{34}\text{S}$ values obtained from Kenshan area

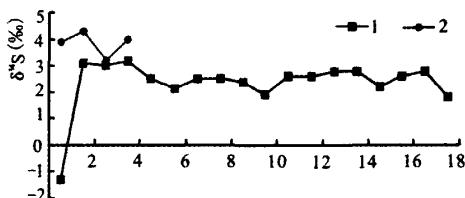


图 8 乌奴格吐山-垦山试验区硫同位素组成对比图

Fig. 8 Contrast of Sulfur isotope composition in Wunugetushan and Kenshan areas

I—乌奴格吐山试验区; II—垦山试验区
I—Wunugetushan area; II—Kenshan area

特征推断, 该试验区的 Cu 异常是由后期热液作用引起的。

5.3 对垦山异常区找矿工作的思考

从区域上讲, 垦山异常区成矿地质条件有利, 化探物探测量结果也展示该区具有较好的找矿前景, 尤其是 I、III 号异常。垦山异常区土壤地球化学测量结果显示, I、II 号异常(图 2)元素平面位置吻合较好, 其中 I 号异常 Cu、Pb、Ag 综合异常面积大于 0.2km², 岩石测量结果显示 Cu 元素含量达到原生晕亚内带以上水平, 并且 Cu 异常形态与 S 异常非常吻合, 显示该异常与 Cu 的硫化物矿物有关, 表明该异常具有较好的成矿前景。该异常区与 Cu 矿化有关的 I、II 号异常元素组合为 Cu、Pb、Zn、Ag 等, 这与热液型矿床的指示元素组合特征相似(刘英俊, 1987), 而与斑岩型矿化的指示元素组合 Cu、Mo、Au、W、Sn 存在差异(邹长毅, 2002), 最大的差异是明显缺少 Mo 异常, 而 Mo 异常是斑岩型铜钼矿化中最直接的指示元素, 由此判断该异常区不具备形成斑岩型矿床的条件, 以往该区的地质找矿工作都以寻找斑岩型矿床为主, 但找矿效果并不理想。此

外, III 号异常(图 3 中由 III-1、III-2、III-3 号异常组成)呈带状沿 F₇ 断裂分布, 主要元素组合为 Au、As、Sb、Hg、Tl、W、S 等, 这是一种典型的金矿化指标, 尤其是 Tl 元素, 在浅成热液硫化金矿床中均有高度富集, 易形成金矿体的前缘晕(李惠, 1982), 因此认为 III 号异常可能是热液型金矿(化)的显示。

综上所述, 根据本文研究结果认为该区的找矿方向应该以寻找热液型矿床为主, 试验区内硫同位素研究结果为此提供了充分证据。为此, 在该异常区开展地质找矿时, 勘查、勘探工作部署应该围绕寻找热液型矿床而不是斑岩型矿床展开。

6 结论

(1) 乌奴格吐山试验区硫同位素组成研究发现, 对在相同地质作用过程中形成的矿床和异常而言, 其硫同位素组成基本是一致的, 具体就乌奴格吐山斑岩型铜钼矿床来说, 无论 Cu 含量高至形成矿床, 还是低至只形成异常, 其硫同位素组成基本一致, 表明形成矿床的成矿物质和形成异常的组物质来源基本是一致的, 这为利用硫同位素组成特征判断地球化学异常成因提供了依据, 同时也证实利用硫同位素组成特征探讨地球化学异常成因是可行的。

(2) 乌奴格吐山和垦山试验区硫同位素组成存在明显差异。垦山试验区硫同位素组成、矿物学和地球化学特征研究表明该试验区存在着后期热液作用的影响, 由此认为该试验区内 Cu 等多元素异常是由后期热液作用引起的。

(3) 物化探资料显示垦山试验区 I、III 号异常具有良好的成矿前景, 通过试验区内硫同位素组成特征及地球化学异常特征的研究, 认为该区不具备形成斑岩型矿床的条件, 该区以后的地质找矿工作应该围绕寻找热液型矿床展开, 工作部署等应该充分考虑热液型矿床的成矿特点和矿体分布特征。

注 释

● 内蒙古自治区地质调查局, 2002. 满洲里市幅地质图(1:200000).

参 考 文 献

陈骏, 王鹤年. 2005. 地球化学. 北京, 科学出版社. 129~135.
陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 2005. 同位素地质年代学与地球化学. 北京, 地质出版社. 210~212, 262~276.
陈振胜. 1995. 论特高¹⁸O 热液蚀变岩石与矿床. 地质与勘探. 31(3), 38~42.
冯德行. 2008. 多宝山铜矿硫同位素空间分布特征. 地质与勘探. 44

- (1), 46~49.
- 李宪臣, 孟昭君. 2003. 内蒙古乌奴格土山-哈拉胜成矿富集区铜多金属资源潜力评价. *矿产与地质* 17 (97): 294~297.
- 李惠. 1982. 金矿床地球化学勘查理论和方法译文集. 66~70.
- 刘英俊, 邱德同. 1987. 勘查地球化学. 北京, 科学出版社. 80~81.
- 秦克章, 田中亮吏, 等. 1998. 内蒙古满洲里地区印支期花岗岩存在的 Rb-Sr 等时线年代学研究. *岩石矿物学杂志*. 17 (3): 135~140.
- 秦克章, 李惠民, 等. 1999. 内蒙古乌奴格土山斑岩铜铅矿床的成岩成矿时代. *地质论评*, 45 (2): 180~185.
- 芮宗瑶. 2002. 国内外斑岩型铜矿研究进展. 北京, 中国地质调查局. 19~20.
- 万天丰. 2004. 中国大地构造学纲要. 北京, 地质出版社. 251~253.
- 张理刚. 1985. 广东莲花山斑岩型钨矿稳定同位素地球化学. *矿床地质*. 4 (1): 53~63.
- 张海心. 2006. 内蒙古乌奴格土山铜铅矿床地质特征及成矿模式. 硕士论文. 吉林大学. 1~24.
- 邹长毅. 2002. 乌奴格土山斑岩型铜铅矿床土壤测量方法技术试验研究. *地质找矿论丛*. 17 (3): 198~202.
- Ohmoto. 1974. Hydrogen and oxygen isotope compositions of fluid inclusions in the kurko deposit. *Japan Econ Geol* 69: 947~953.
- Paul Polito K K, David Lawie, Steven Cook, Chris Oates. 2007. Application of sulphur isotopes to discriminate Cu-Zn VHMS mineralization from barren Fe sulphide mineralization in the greenschist to granulite facies Flin Flon-Snow Lake-Hargrave River region, Manitoba, Canada. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 7: 9.
- Sangameswar S R R. 1972. Trace element and sulphur isotope geochemistry of sulphide deposits from Flin Flon and Snow Lake areas of Saskatchewan and Manitoba. PhD thesis. University of Saskatchewan.
- Seal R R. 2006. Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfide Minerals. *Review in Mineralogy & Geochemistry*, 61~44.
- Sheppard. 1974. Hydrogen and oxygen isotope evidence for the origins of water in the Boulder Batholith and the Butte ore deposits. *Montana Econ Geol* 69: 926~946.
- Taylor. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problem of hydrothermal alteration and ore deposit. *Econ Geol* 69: 843~883.

The Application of Sulfur Isotope in the Cause of Geochemical Abnormality

XI Mingjie¹⁾, MA Shengming¹⁾, ZHU Lixin²⁾, GONG Qiuli¹⁾

1) Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang, Hebei, 065000;

2) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract

Geochemical abnormality is the basic means for evaluating mineralization prospect and type. Based on the method and principle of the tracing the source of mineralization material, this study applies sulfur isotope into geochemical abnormality. The research on sulfur isotopic compositions of Cu—mineralized bodies in the Wunugetushan and Kenshan trial areas suggest the same origin of sulfur for both areas, indicating that sulfur isotope can be employed to judge the origin of geochemical abnormality. Comparison study shows that the sulfur isotope compositions in the Kengshan are higher than those in the Wunugetushan, and this implies the Cu abnormality maybe result from hydrothermal effect at the late stage. Our study suggests that geological exploration and arrangement in this area should focus on hydrothermal deposits.

Key words: $\delta^{34}\text{S}$; Sulfur isotope; Geochemical abnormality; Wunugetushan Cu-Mo deposit; Kenshan area