

李随民, 陈凤河, 魏明辉, 等. 张家口梁家沟—火石沟铅锌银多金属矿区找矿潜力分析[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 631–640.
Li Suimin, Chen Fenghe, Wei Minghui, et al. An analysis of the prospecting potential of Pb–Zn–Ag polymetallic deposits in the Liangjiagou–Huoshigou ore district of Zhangjiakou area[J]. *Geology in China*, 2015, 42(2): 631–640(in Chinese with English abstract).

张家口梁家沟—火石沟铅锌银多金属矿区 找矿潜力分析

李随民¹ 陈凤河² 魏明辉² 李胜利⁴ 郝俊杰⁴
陈树清² 李森文² 李玉红²

(1. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省地矿局探矿技术研究院, 河北 燕郊 065201; 3. 河北省地矿局第三地质大队, 河北 张家口 075000; 4. 河北省地矿局第十一地质队, 河北 邢台 054000)

摘要: 张家口南部燕山台褶带内中—新元古代碳酸盐岩地层分布广泛, 岩性以白云岩为主。该时代地层中分布有梁家沟、银洞沟、常庄子等铅锌银多金属矿床(点)分布。文章以赤城县梁家沟—火石沟铅锌银多金属矿区为例, 采用统计法和局部奇异性两种方法圈定了成矿元素 1:20 万水系沉积物异常, 结果显示化探元素异常区内包含 3 条断裂, 根据矿床为后生成因推测异常区成矿潜力较大。在此基础上, 结合控矿因素对找矿靶区范围进行了 1:5 万水系沉积物加密采样, 共圈出 3 处异常。通过对比分析, 已知矿体与较弱的 3 号异常相吻合, 而异常面积较大、强度较高的 1、2 号化探异常目前无工业矿体发现, 应为今后找矿的重点区域。野外对 1、2 号异常区进行了基岩原生晕地球化学剖面测量, 显示在异常中心区域白云岩中成矿元素铅锌银含量高, 进一步佐证了上述异常区域的找矿潜力。

关键词: 铅锌银多金属矿床; 化探异常; 找矿潜力; 梁家沟—火石沟

中图分类号: P68.4; P612 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2015)02–0631–10

An analysis of the prospecting potential of Pb–Zn–Ag polymetallic deposits in the Liangjiagou–Huoshigou ore district of Zhangjiakou area

LI Sui–min¹, CHEN Feng–he², WEI Ming–hui², LI Sheng–li⁴,
HAO Jun–jie⁴, CHEN Shu–qing², LI Sen–wen², LI Yu–hong²

(1. *Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China*; 2. *Prospecting Technology Institute of Hebei Geological Exploration Bureau, Langfang 065201, Hebei, China*; 3. *No. 3 Geological Party, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Zhangjiakou 075000, Hebei, China*; 4. *No. 11 Party, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Xingtai 054000, Hebei, China*)

Abstract: Carbonate rocks of Meso–Proterozoic and Neo–Proterozoic period are widely distributed along Yanshan fold belt in

收稿日期: 2014–02–14; 改回日期: 2014–10–11

基金项目: 河北省国土资源厅项目(2012055548, 2013045650)联合资助。

作者简介: 李随民, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事矿床学方面的教学和研究工作; E-mail: smli71@163.com。

southern Zhangjiakou and are composed mainly of dolomite. Some polymetallic mineral deposits (ore spots), such as Laingjiagou, Yingdonggou and Changzhuangzi, are distributed in strata. With the Liangjiagou deposit as a study object, the authors used statistical method and local singularity means to analyze the data of stream sediments (1:200000) so as to delineate geochemical anomalies. The results show that the areas of geochemical anomalies include three major faults, where there is great potential in search for polymetallic orebodies according to the epigenetic genesis of the ore deposits. The authors adopted denser sampling in important potential areas and delineated three geochemical anomalies. A comprehensive analysis shows that No. 3 anomaly is relatively weak and is consistent with the orebody. No. 1 and No. 2 anomalies not only have high intensity but also possess fairly large areas. The primary halos of bedrock profile survey show that the content of Pb, Zn and Ag in dolomite is significantly higher than in the center of the anomaly area, and this provides further evidence for the prospecting potential of the anomaly area.

Key words: lead, zinc and silver polymetallic deposit; geochemical anomaly; prospecting potential; Liangjiagou–Huoshigou ore district

About the first author: LI Sui-min, male, born in 1971, doctor and professor, mainly engages in the study of deposit geology and deposit geochemistry; E-mail: smli71@163.com.

张家口地区是河北省重要的铅锌银多金属矿床富集区。该区以东西向尚义—赤城深大断裂带为界,包括2个Ⅱ级构造单元,断裂以北为内蒙地轴,南部为燕山台褶带。目前已发现的蔡家营、青羊沟等大、中型铅锌矿均位于张家口北部的内蒙地轴中。矿床成因和空间分布均与古元古代红旗营子群变质岩和燕山期次火山岩关系密切^[1-7]。南部燕山台褶带内中—新元古代碳酸盐岩地层分布广泛,岩性以白云岩为主,目前已在碳酸盐岩地层中发现有赤城县梁家沟、怀来县石盘口银洞沟、常庄子等铅锌银多金属矿床(点),但规模较小。上述多金属矿床的赋矿围岩为白云岩,由于成矿温度较低,围岩蚀变较弱,多为硅化、白云岩化和高岭土化。由于围岩蚀变影响范围小,致使所形成的化探异常范围较小,且分带不明显。尤其是当矿体处于隐伏—半隐伏状态时,如何有效识别和提取化探异常,并对可能成矿的区域加密采样获取更详尽的找矿信息是寻找该类型矿床的关键。本文以赤城县梁家沟—火石沟铅锌银多金属矿区为例,阐述了利用1:20万和1:5万水系沉积物数据圈定成矿有利区域的思路和方法,所圈区域经野外踏勘和基岩原生晕测量,找矿潜力较大。

1 区域地质背景

1.1 地层

梁家沟—火石沟铅锌银多金属矿区位于赤城县样田乡,大地构造位置属于燕山台褶带。矿区及外围出露的地层有太古宇桑干群、红旗营子群变质

岩系;元古界蓟县系、青白口系沉积岩和中生界侏罗系中统河、湖相沉积岩及新生界第四系松散堆积物等(图1)。

太古宙地层桑干群及红旗营子群变质岩系主要分布于矿区以北,与赤城县北部地区大片变质岩系相连接,主要岩性为黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩及含石榴斜长角闪变粒岩等。区域产状为NW走向,倾向NE,倾角25°~70°。

元古宙地层主要由蓟县系和青白口系组成。其中,蓟县系地层组成如下:

(1)雾迷山组(J_{xw}):厚层,顶部为中薄层燧石条带白云岩,与大区域雾迷山组地层对比,含矿层位相当于雾迷山组上部。该组地层主要分布于矿区以西,矿区内由于断层的关系致使雾迷山组地层两次重复出露,区域地层产状为NNW—NW走向,倾向NE,倾角20°~40°。该组地层是直接的赋矿层位。

(2)洪水庄组(J_{xh}):分布于矿区及矿区以西,主要岩性为黑包页岩夹薄层砂质白云岩。产状稳定,走向为NW20°~0°,倾向NE,倾角30°~45°。厚度40余米。由于断层的缘故,该组地层在矿区及矿区以西重复出现2次。

(3)铁岭组(J_{xt}):分布于矿区以西及矿区以北,由于断层的缘故也是2次重复出现。下部为中厚层含燧石结核的白云岩;上部为薄层白云岩。产状稳定,走向NNW,倾向NE,倾角30°~40°。厚度约400 m。

青白口系主要出露下马岭组(Q_nx)地层,该组分布于矿区南西,由于断层的缘故两次重复出现。主要为灰绿色、杂色页岩,下部含铁质结核,底部有一层厚

约1~2 m的褐铁矿层。产状为走向NNW,倾向NE,倾角30°~40°,局部产状零乱,小型褶皱、断裂发育。

本区中生界主要为侏罗系中统后城组(J₂h),分布于矿区以东及以西。东部岩性自下而上为底砾岩,由凝灰质胶结燧石白云岩砾石而成;砂质页岩,含羊齿类及瓣类化石;砂砾岩等。地层走向NNE、倾向SE,倾角较小。后城组与下伏地层为角度不整合接触。

新生界主要为第四系风成黄土及冲、洪积,残坡积物组成。

1.2 构造

梁家沟—火石沟矿区构造较发育,表现为先后断的构造形态。主要由梁家沟村东复式倒转向斜、银硐山倒转背斜、小北沟复式倒转向斜、大尖山梁倒转背斜和F1、F2和F3三条逆断层组成了矿区的“四褶三断”基本构造格架(图1)。其中3条断裂与成矿关系较为密切。其基本特征如下:

F1: 位于大尖山以北350 m,走向310°~325°,倾向40°~55°,地表倾角35°~45°,向深部变缓,断层面呈舒缓波状起伏,断层上盘(北东盘)为古元古界红旗营子群变质岩,下盘为雾迷山组地层。南西盘下降,北东盘上升,为逆断层。破碎带宽约3 m,断层角砾呈棱角状—次圆状。角砾成分为片麻岩和燧石条带白云岩,靠近断层带岩石具糜棱岩化,断距400 m左右,出露长度1 500 m。由TC₄、TC₂₁、TC₂₃、ZK₀₋₁孔等工程控制。

F2: 位于矿区中部,走向310°~340°,倾向40°~70°,倾角40°~50°,破碎带宽2~3 m,断层角砾呈次棱角状、次圆状。挤压片理明显。北东盘上升,南西盘下降,为逆断层。雾迷山组地层推覆到下马岭组地层之上。受断层影响,两盘褶皱及次级小断层发育。破碎带多被第四系残坡积物覆盖。该断层对II矿带矿体有破坏作用,但在断层以西小北沟倒转向斜核部保存有较完整的成矿有利地段。

F3: 位于银硐山西侧,沿320°~340°方向延伸,倾向50°~70°,倾角35°~65°,将雾迷山组地层推覆到下马岭组地层之上,为一逆断层。断层破碎带多被残坡积物覆盖,仅局部有零星出露,由于地形切割造成断层走向平面形态呈曲线形。该断层在三义村东交于F1断层,形成“爪”字型构造。

1.3 岩浆岩

侵入岩主要为矿区以北的红砂梁斑状花岗岩

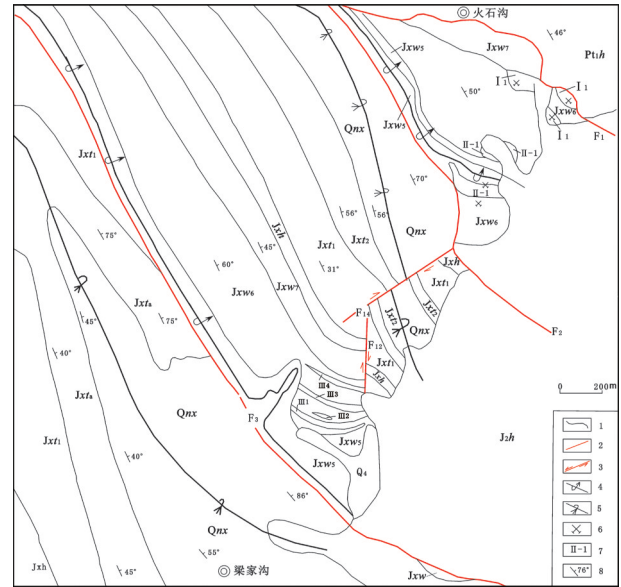


图1 梁家沟矿区地质简图

Q₄—残坡积; J₂h—后城组; Qnx—下马岭组; Jxt₂—铁岭组二段; Jxt₁—铁岭组一段; Jxh—洪水庄; Jxw₇—雾迷山组七段; Jxw₆—雾迷山组六段; Jxw₅—雾迷山组五段; Pt₁h—红旗营子群; 1—地质界线; 2—逆断层; 3—平推断层; 4—倒转背斜轴; 5—倒转向斜轴; 6—老硐及编号; 7—矿带及编号; 8—岩层产状

Fig. 1 Geological sketch map of the Liangjiagou ore district
Q₄—Quaternary residual and slope wash material; J₂h—Jurassic Houcheng Formation; Qnx—Qingbaikou Period Xiamaling Formation; Jxt₂—2nd member of Tieling Formation; Jxt₁—1st member of Tieling Formation; Jxh—Hongshuizhuang Formation of Jixian system; Jxw₇—7th member of Wumishan Formation of Jixian system; Jxw₆—6th member of Wumishan Formation of Jixian system; Jxw₅—5th member of Wumishan Formation of Jixian system; Pt₁h—Palaeoproterozoic Hongqiyinzi Group; 1—Geological boundary; 2—Reverse fault; 3—Translational fault; 4—Axis of overturned anticline; 5—Axis of overturned syncline; 6—Old workings and its serial number; 7—Ore belt and its serial number; 8—Attitude of rocks

株。岩体沿尚义—赤城深大断裂侵入形成,长轴为近东西向,出露长9 km,宽3 km,面积约20 km²。岩体侵位于侏罗系中统后城组地层中。

岩体主要岩石类型为斑状二长花岗岩,斑状角闪钾长花岗岩,似斑状结构,基质花岗结构。斑晶为条纹长石,基质由条纹长石、更长石、石英、普通角闪石、黑云母等组成。岩体南部边缘岩石类型渐变为斑状正长石。据张家口地质三队资料^[5],红砂梁斑状花岗岩属钙碱性岩石。岩石中与成矿有关的Pb、Zn、Ag元素含量较高,Ag平均含量0.13×10⁻⁶,Pb平均含量32.91×10⁻⁶,Zn平均含量100.95×10⁻⁶。岩体距梁家沟

铅锌银多金属矿带的距离较近,大致在200~2000 m,且成矿元素含量较高,可能对梁家沟一带的铅锌银多金属矿床的形成起到一定的作用。根据其及周边地层的穿插关系推测形成时代为燕山早期第二阶段^[5]。

1.4 矿床地质特征

矿体主要赋存在雾迷山组六段中下部,一般呈层状、似层状产出,局部为透镜状、囊状,具分枝复合、膨大缩小等特征。围岩以角砾状硅质岩、燧石条带白云岩为主,次为硅质白云岩。由于地层倒转和断层的影响,按其空间分布位置,自北向南分为I、II、III矿带(图1)。

I矿带位于火石沟村东南的银洞沟—大南洼一带,处于大尖山倒转背斜的正常翼。北侧为F1逆断层,西侧和东侧分别受次一级的小断层控制。由于品位变化和小断层的影响,I矿带分为3个矿体。矿体产状不稳定,局部变化较大。总体走向NW,倾向北东20°~50°,倾角22°~6°。

II矿带位于火石沟村南红铜矿一带,地处大尖山倒转背斜的核部,西侧为F2逆断层。矿体为似层状,产状走向NW,倾向NE,倾角15°~35°。围岩为角砾状硅质岩和燧石条带白云岩。矿体围岩之间呈渐变关系,无明显界线。

III矿带位于梁家沟村北东银矿山一带,处于小北沟倒转向斜的正常翼。该矿带由4个平行矿体组成,均赋存于雾迷山组六段下层上部角砾状燧石白云岩及燧石条带白云岩中,矿床呈层状、似层状,产状与围岩一致,局部斜交,矿体产状为NW40°~60°,倾向NE,倾角28°~50°。

3个矿带中矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等,脉石矿物以石英、方解石为主。矿石以浸染状为主,大部分矿石氧化,矿石中常见铜蓝、孔雀石、褐铁矿等氧化矿物。矿区深部见原生矿石,主要呈块状,由于矿区勘探深度较浅,原生矿石数量较少。近矿围岩蚀变主要为硅化,其次为碳酸盐化、高岭土化等。总的来看,围岩蚀变较弱。

2 矿区水系沉积物异常圈定

水系沉积物地球化学测量作为找矿的重要方法和技术手段,其核心问题是成矿元素异常圈定和评价^[8-19]。传统的统计方法对数据特异值进行处理,

在剩余数据服从正态分布或对数正态分布的基础上,利用均值和标准差来确定异常下限值。该方法可以圈出范围较大、异常强度较高的异常。由于忽略了不同岩性、构造单元对元素含量的影响,该方法对于一些弱小异常的圈定和识别效果较差。随着地质找矿工作的深入,化探异常中一些所谓“高、大、全”的异常越来越少,面临更多的是弱小异常的识别和提取,尤其是蚀变晕不发育的低温热液矿床,如何有效识别和提取弱异常成为寻找此类型矿床的关键技术。近年来,如成秋明等^[20-25]将多重分形理论引入到化探数据处理,尤其是基于多重分形理论的奇异性技术在数据处理中的应用,有效地提高了复杂背景场中的成矿弱异常信息的识别和提取^[26-31]。针对梁家沟—火石沟多金属矿区围岩蚀变不发育的情况,本次采用统计法和局部奇异性两种方法圈定了1:20万化探异常,结合矿床形成时代为130 Ma,成因上与构造关系密切,为典型后生矿床的成因认识^[32],在1:20万化探异常的基础上,以3条断裂为中心圈定了1:5万水系沉积物加密采样区域。其中1:20万水系沉积物测试数据由中国地质调查局提供。采样密度为1~2个/km²,然后按4 km²网格组合一个样品,每个组合样测试39种元素。

2.1 矿区1:20万水系沉积物异常

2.1.1 统计法异常圈定

对矿区1:20万水系沉积物数据中Pb、Zn、Ag等成矿元素的特异值(按均值+3倍标准差标准)进行了反复剔除,当剩余数据服从正态分布或对数正态分布时,按均值+2倍标准差计算了异常下限值。其中Pb下限值为 32×10^{-6} ,Zn下限值为 95×10^{-6} ,Ag下限值为 130×10^{-9} 。并按上述下限值的1、2、4倍圈定了异常的外带、中带和内带。从所圈异常可以看出(图2~4),已知矿体均分布在异常区中,尤其是Ag元素异常不仅强度高,且分带性明显,Pb元素异常次之,Zn元素异常仅有外带。

2.1.2 局部奇异性圈定

成秋明(2007)等^[21-23]认为,从非线性理论角度看,成矿过程可以看作是一种奇异性地质过程,奇异性过程可以导致在很小的时间或者空间范围内能量的巨量释放或者物质的超常堆积和富集,奇异性过程中所产生的结果如矿床、成矿异常等具有分形和多重分形分布规律。可以采用幂率函数来度

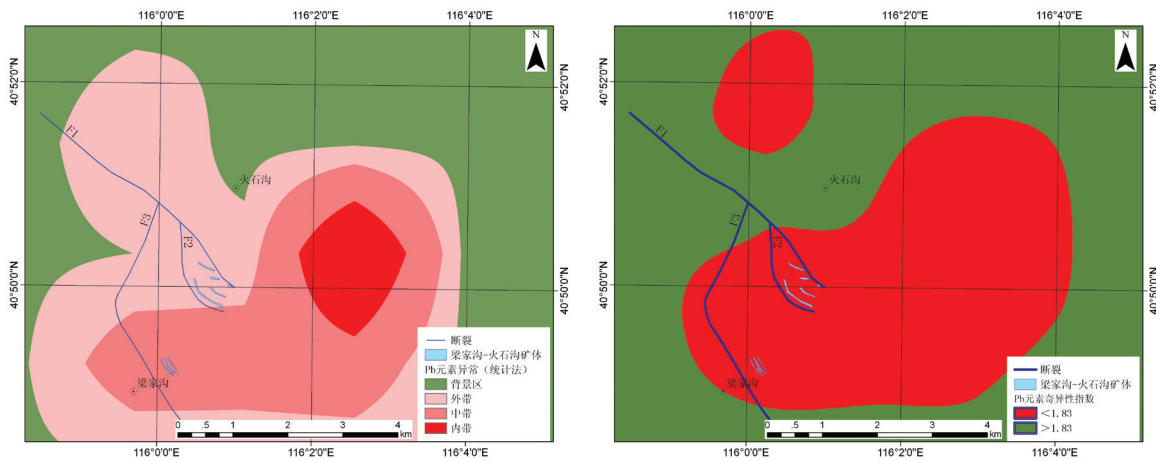


图2 梁家沟矿区 Pb元素异常圈定结果对比图(统计法和局部奇异性法)

Fig.2 Contrast map of different methods for delineating Pb anomalies

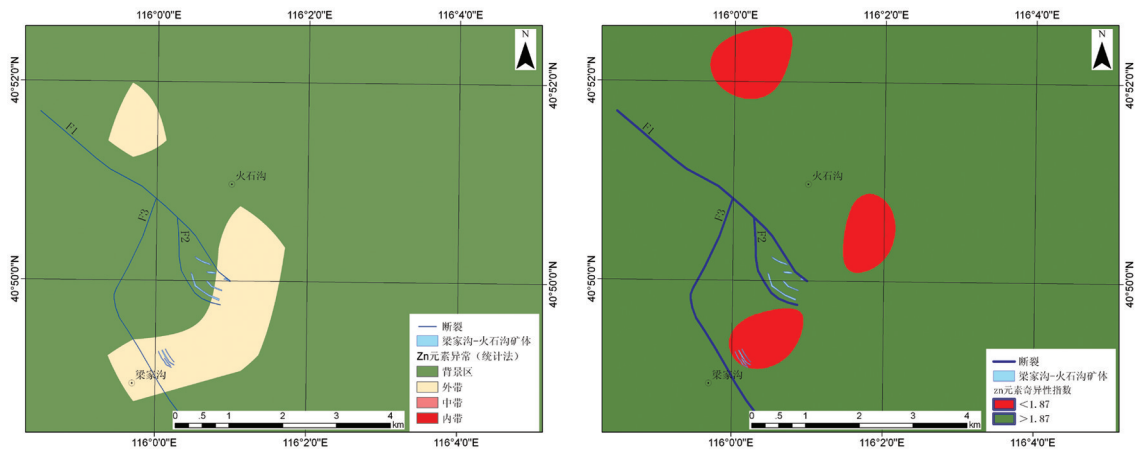


图3 梁家沟矿区 Zn元素异常圈定结果对比图(统计法和局部奇异性法)

Fig.3 Contrast map of different methods for delineating Zn anomalies

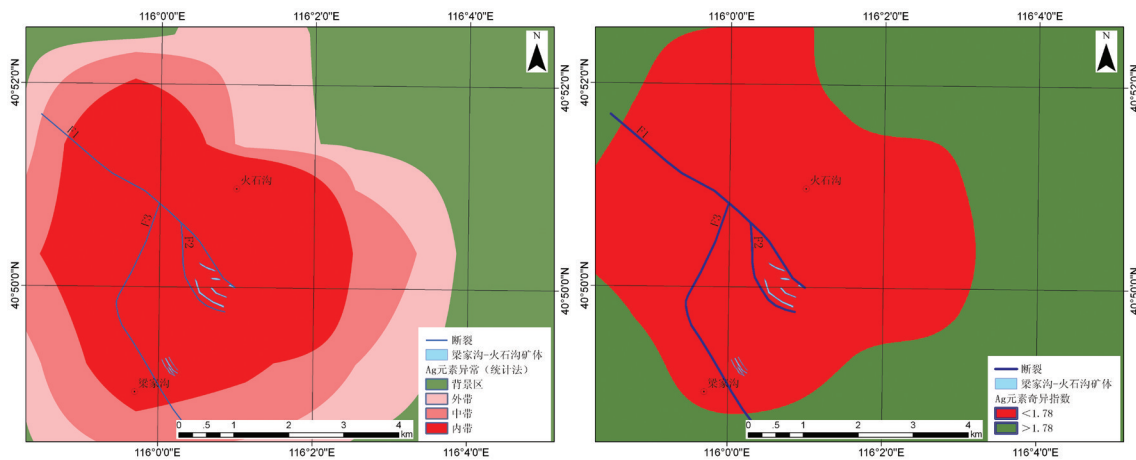


图4 梁家沟矿区 Ag元素异常圈定结果对比图(统计法和局部奇异性法)

Fig.4 Contrast map of different methods for delineating Ag anomalies

量。基于多重分形理论所定义的奇异性指数($\Delta\alpha$)可以用来度量异常的局部标度性(scaling)和奇异性(singularity)。由此而发展的局部奇异性分析方法可用于多尺度地球化学、地球物理和其他类型局部异常的圈定和奇异性程度的度量。

化探数据奇异性指数的空间分布可以通过分形维数谱函数来表达。如果元素的浓度值可以被看作具有恒定均值的平稳随机变量,那么 $\alpha\approx 2$ 代表着一种非奇异性,无奇异的地区对应于背景场,背景地段一般在地球化学图中占绝大部分范围^[21]。 $\alpha < 2$ 的位置可能表明元素的异常富集, $\alpha > 2$ 的位置可能表示元素的异常贫化。当 $\alpha < 2$ 时,矿化强度的增强,将造成成矿元素的显著富集,从而有可能达到工业品位^[21-23]。在实际应用中可以在网格化的数据上,基于移动窗口的方式计算出奇异性指数。

在GeoDAS软件中对研究区Pb、Zn、Ag元素计算了奇异性指数分布。结果表明(图2~4),Pb、Ag元素异常区与已知矿体对应程度较高,Ⅲ矿带位于Zn元素异常区,而Ⅰ、Ⅱ矿带位于Zn元素异常区边部。

两种异常圈定方法对比可知,统计法所圈Ag元素异常分布范围较大,且具有明显的浓度分带现象,Pb元素异常分带性次之,Zn元素异常不仅面积较小,且浓度值较低,分带现象不明显。2种方法所圈异常范围基本一致,但局部奇异性方法在火石沟北西方向3 km左右处对Pb、Zn、Ag 3种元素均圈出异常区,但范围较小。此外,统计法所圈Zn元素异常浓度值较低,仅出现外带,而局部奇异性方法所圈的Zn异常范围明显缩小,且在火石沟北西圈出新的小范围异常区域。总体来看,两种方法所圈异常均包含了火石沟—梁家沟矿区3条断裂所组成的区域。结合矿床为后生热液成因认识,认为断裂及其旁侧的次级小断裂不仅是成矿热液运移的通道,也为成矿物质沉积提供了场所,即矿体赋存的有利区域。矿区已发现的3条矿带均赋存在断裂及其所限制的区域,也进一步说明了断裂构造在研究区多金属成矿作用中的作用。据此以圈定的1:20万化探异常为基础,选取了以3条断裂为中心区域,对其周围20 km²范围内开展了1:5万水系沉积物Ⅲ级查证采样工作,以期进一步缩小找矿区域。本次共采集样品93件。

此外,局部奇异性方法圈定的火石沟北西方向

3 km处的异常未在本次水系沉积物加密采样范围。该区位于燕山期斑状花岗岩和红旗营子群变质岩接触部位,是形成“蔡家营式”铅锌银多金属矿床的有利部位,应引起下一步找矿工作的重视。

2.2 矿区1:5万水系沉积物异常

对以3条断裂为中心的有利成矿区域采集的1:5万化探数据,按照1:20万数据处理的思路和方法,分别采用统计法和局部奇异性法圈定了Pb、Zn、Ag等成矿元素异常区(图5~7)。结果显示不同采样密度所圈定的异常具有很好的重现性,表明异常为矿致异常^[33]。加密采样后原异常分解,可圈出3个化探异常区域。其中Ⅲ号异常为已知Ⅰ、Ⅱ矿带引起。Ⅰ、Ⅱ号异常区域出露地层均为蓟县系雾迷山组白云岩地层,两异常无论从规模、浓度值等方面均优于Ⅲ号异常,且地表未发现矿体(图8)。尤其是Ⅱ号异常处于F3和F1两条断裂的交叉部位,成矿条件优越,找矿潜力较大,应为该区寻找多金属矿床的首选区域。

对比2种方法所圈异常可以看出,2种方法均在F1和F3两条断裂的交叉区域圈出了Ⅱ号综合异常。但局部奇异性方法圈定的Ⅱ号异常周边(以南边、东边最为显著)明显的出现元素异常贫化区域,沿F1断裂方向Pb、Zn元素贫化现象明显,清楚的显示了热液中成矿元素运移、富集的轨迹。此外,局部奇异性方法在Ⅰ号异常南部均圈出了Pb、Zn、Ag元素的异常区域,而统计法均未在此圈定3种元素异常。为慎重起见,本次选择了两种方法均圈出的异常区域进行野外踏勘和路线地球化学剖面测量。

3 异常区基岩地球化学剖面

为验证所圈异常区域的可靠性,对所圈定的Ⅱ号异常进行了基岩原生晕地球化学测量。路线地球化学剖面(图8)导线方向尽量垂直于地层走向。工作方法为路线地质描述和定点取样。路线长度2.2 km,沿途根据岩性、结构构造变化及蚀变情况,共取岩石样14件,取样位置采用手持GPS仪器定位。岩石中成矿元素测试结果显示,在异常中心区域,硅化较强的白云岩(DDG-04-1, DDG04-2)Pb、Zn、Ag元素含量均呈明显增高(图9)。其中Ag元素含量高于中国东部白云岩平均含量30~40倍以上,Zn高出2.3~4.6倍,Pb高出近5倍(中国东部白云

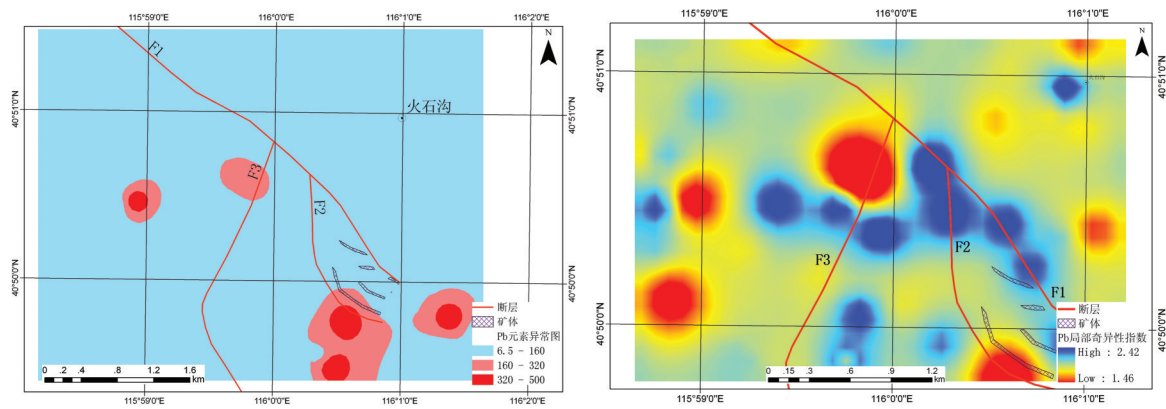


图5 成矿有利靶区Pb元素异常圈定结果对比图(统计法和局部奇异性法)
Fig.5 Contrast map of different methods for delineating Pb favorable targets

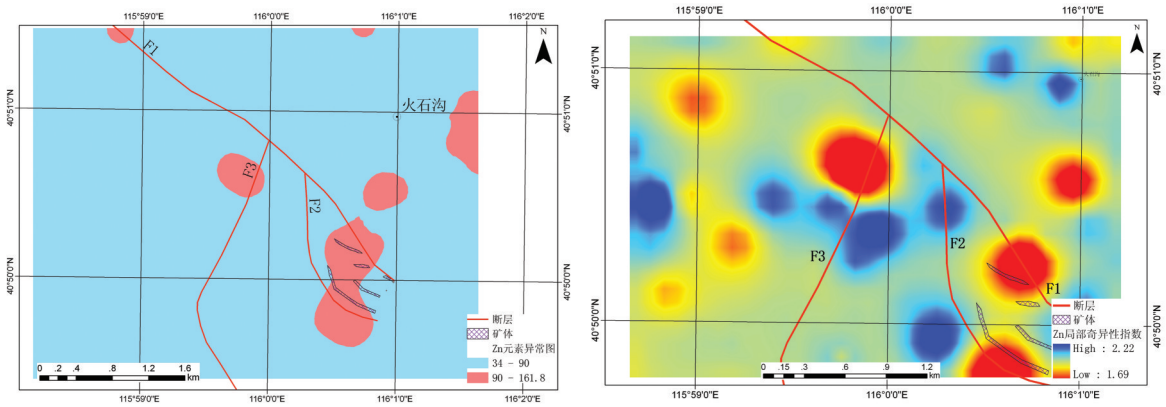


图6 成矿有利靶区Zn元素异常圈定结果对比图(统计法和局部奇异性法)
Fig.6 Contrast map of different methods for delineating Zn favorable targets

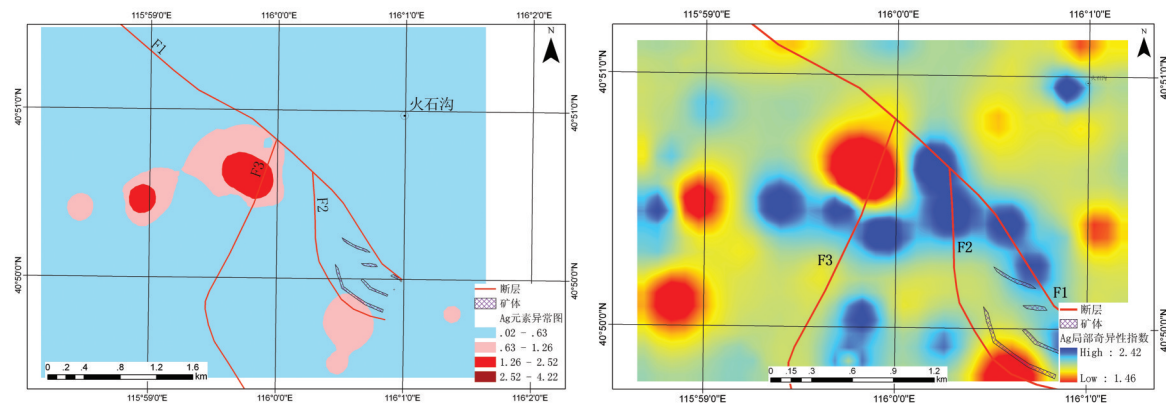


图7 成矿有利靶区Ag元素异常圈定结果对比图(统计法和局部奇异性法)
Fig.7 Contrast map of different methods for delineating Ag favorable targets

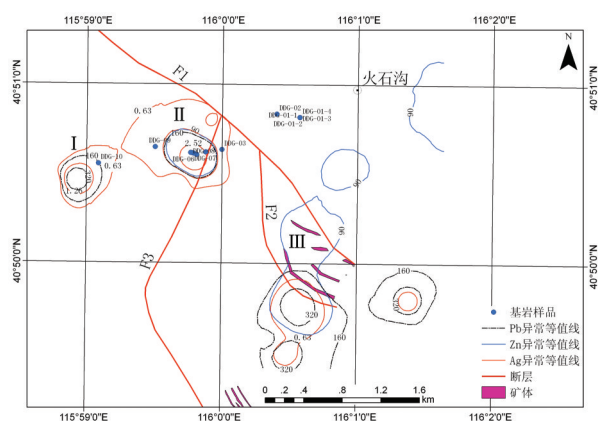


图8 研究区综合异常分布图

Fig.8 Comprehensive anomaly map of the study area

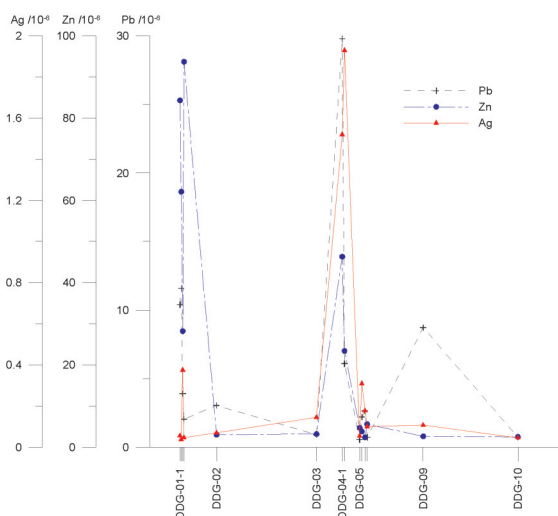


图9 II号异常区基岩地球化学剖面

Fig.9 Geochemical profile of No. II anomaly

岩 Ag 元素平均含量为 0.05×10^{-6} , Pb 为 6.2×10^{-6} , Zn 为 10×10^{-6} ^[34]。显示 II 号异常找矿潜力较大, 该区域可能存在隐伏热液型铅锌银多金属矿床。

4 结 论

(1) 统计法与局部奇异性方法相比, 两者虽在异常整体形态上基本相似, 但后者对局部范围内弱异常或低缓异常具有较好的识别和圈定作用。尤其是对所圈异常周边结构的解析, 能更加清晰的反映成矿元素迁移、富集的轨迹。如沿异常区周边、F1

断裂出现显著的矿化元素贫化区域。

(2) 找矿有利区域的选择遵循以 1: 20 万异常区为对象, 结合矿区成矿作用特点(如热液矿床与断裂构造关系密切), 选择重点成矿地段进行加密采样和野外踏勘、异常区基岩地球化学剖面测量验证的方法进行。为慎重起见, 应采用多种方法圈定异常区, 选择共同异常区域进行验证。

(3) 局部奇异性方法圈定的其他异常区域, 如火石沟北西方向 3 km 异常和 I 号异常南部区域, 结合区内成矿地质条件分析, 成矿潜力较大, 也应作为下一步找矿工作的重点区域。

致谢: 审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见, 在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 李随民. 河北省张家口北部铅锌银多金属矿床成矿规律及找矿方向研究[R]. 中国地质大学(武汉), 博士后出站报告, 2008.
Li Suimin. Metallogenic Regularities and Prospecting Direction of Lead-Zinc-Silver Polymetallic Deposit in Northern Zhangjiakou Region, Hebei Province[R]. China University of Geosciences (Wuhan), Postdoc Report, 2008.
- [2] 任耀武. 红旗营子群研究——冀北铅锌银矿床的矿源层[J]. 华北地质矿产杂志, 1997, 12(1): 44-51.
Ren Yaowu. A study on Hongqiyingsi Group—the source bed of Pb-Zn-Ag deposits in north Hebei[J]. Jour. Geol. & Min. Res. North China, 1997, 12(1): 44-51 (in Chinese with English abstract).
- [3] 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 等. 华北地块北缘中段铅锌银矿床成矿作用讨论[J]. 前寒武纪研究进展, 2002, 25(2): 105-111.
Mao Debao, Zhong Changting, Chen Zhihong, et al. On the metallogenic aspects of Pb-Zn-Ag deposits in the middle north margin of North China Block[J]. Progress in Precambrian Research, 2002, 25(2): 105-111 (in Chinese with English abstract).
- [4] 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 等. 铅同位素特征对成矿物质来源的制约——以华北地块北缘中段铅锌银矿床为例[J]. 前寒武纪研究进展, 2001, 24(4): 193-200.
Mao Debao, Zhong Changting, Chen Zhihong, et al. Pb isotope characteristics of Pb-Zn-(Ag) deposits in the middle north margin of North China Block: Constraints on source Process[J]. Progress in Precambrian Research, 2001, 24(4): 193-200 (in Chinese with English abstract).
- [5] 宋瑞先, 魏明辉, 何宇青, 等. 张家口地质矿产[M]. 北京: 地质出版社, 2013
Song Ruixian, Wei Minghui, He Yuqing, et al. Geology and Mineral Resources of Zhangjiakou Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013(in Chinese).
- [6] 芮宗瑶, 施林道, 方如恒. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地

- 质[M].北京:地质出版社,1994,161-168.
- Rui Zongyao, Shi Lindao, Fang Ruheng. Geology of Nonferrous Metallic Deposits in the Northern Margin of the North China Landmass and its Adjacent Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 161-168(in Chinese).
- [7] 崔盛芹, 李锦蓉, 吴珍汉, 等. 燕山地区中生代陆内造山作用[M].北京:地质出版社,2002.
- Cui Shengqin, Li Jinrong, Wu Zhenhan, et al. Mesozoic and Cenozoic Intracontinental Orogenesis of the Yanshan Area, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002(in Chinese).
- [8] 朱建华. 化探在辽宁大杨树沟钼矿发现中的作用与意义[J]. 中国地质, 2007, 34(2): 342-346.
- Zhu Jianhua. Role and significance of geochemical exploration in the discovery of the Dayangshugou molybdenum deposit, Liaoning[J]. Geology in China, 2007, 34(2): 342-346(in Chinese with English abstract).
- [9] 李赛赛, 魏刚锋, 崔敏利. 陕西勉县王家沟金矿区物化探勘查技术应用及找矿预测[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 474-485.
- Li Saisai, Wei Gangfeng, Cui Minli. The application of geophysical and geochemical exploration and metallogenic prediction in the Wangjiagou gold ore district of Mianxian County, Shaanxi Province[J]. Geology in China, 2012, 39(2): 474-485(in Chinese with English abstract).
- [10] 景宝盛, 潘维良, 单金忠, 等. 新疆祁漫塔格东段区域化探及其找矿效果[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 264-284.
- Jing Baosheng, Pan Weiliang, Shan Jinzhong, et al. Regional geochemical exploration and ore-prospecting effect in eastern Qimantag, Xinjiang[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 264-284 (in Chinese with English abstract).
- [11] 赵武强, 崔森, 邹先武, 等. 湖南禾库地区水系沉积物地球化学特征及找矿预测[J]. 中国地质, 2014, 41(2): 638-647.
- Zhao Wuqiang, Cui Sen, Zou Xianwu, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and metallogenic prognosis of Heku area, Hunan Province[J]. Geology in China, 2014, 41(2): 638-647(in Chinese with English abstract).
- [12] 邹长毅, 史长义. 五龙沟金矿区域地球化学异常特征及找矿标志[J]. 中国地质, 2004, 31(4): 421-423.
- Zou Changyi, Shi Changyi. Characteristics of regional geochemical anomalies and ore indications in the Wulonggou gold deposit[J]. Geology in China, 2004, 31(4): 421-423(in Chinese with English abstract).
- [13] 奚小环, 李敏. 中国区域化探若干基本问题研究: 1999—2009[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 267-282.
- Xi Xiaohuan, Li min. Regional geochemical exploration in China: from 1999 to 2009[J]. Geology in China, 2012, 39(2): 267-282(in Chinese with English abstract).
- [14] 程志中, 谢学锦. 岩石中元素背景值变化对地球化学成矿预测的影响[J]. 中国地质, 2006, 33(2): 411-417.
- Cheng Zhizhong, Xie Xuejing. Influence of variation in element back ground values in rocks on metallogenic prognosis in geochemical maps[J]. Geology in China, 2006, 33(2): 411-4174 (in Chinese with English abstract)
- [15] 李随民, 姚书振, 韩玉丑. Surfer软件中利用趋势面方法圈定化探异常[J]. 地质与勘探, 2007, 43(2): 72-75.
- Li Suimin, Yao Shuzhen, Han Yuchou. Using tendency analysis method to deal with geochemical data based on the surfer software[J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(2): 72-754 (in Chinese with English abstract)
- [16] 李随民, 姚书振. 基于MAPGIS的分形方法确定化探异常[J]. 地球学报, 2005, 26(2): 187-190.
- Li Suimin, Yao Shuzhen. The determination of thresholds by the fractal method based on MapGIS[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26(2): 187-1904 (in Chinese with English abstract).
- [17] 史长义. 勘查数据分析(EDA)技术的应用[J]. 地质与勘探, 1993, 29(11): 52-58.
- Shi Changyi. Application of the exploratory data analysis technique[J]. Geology and Prospecting, 1993, 29(11): 52-584 (in Chinese with English abstract).
- [18] 郝立波, 李巍, 陆继龙. 确定岩性复杂区的地球化学背景与异常的方法[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1531-1535.
- Hao Libo, Li Wei, Lu Jilong. Method for determining the geochemical background and anomalies in areas with complex lithology [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(12): 1531-15354 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王明志, 董方灵, 梁群峰, 等. 模糊决策树技术在化探异常提取中的应用[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 762-769.
- Wang Mingzhi, Dong Fangling, Liang Qunfeng, et al. The application of fuzzy decision tree to extracting geochemical anomalies[J]. Geology in China, 2011, 38(3): 762-769(in Chinese with English abstract).
- [20] 成秋明. 多维分形理论和地球化学元素分布规律[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2000, 25(3): 311-318.
- Cheng Qiuming. Multifractal theory and geochemical element distribution pattern[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(3): 311-3184 (in Chinese with English abstract).
- [21] Cheng Q. Spatial and scaling modeling for geochemical anomaly separation[J]. J Geochem Explor, 1999, 65: 175-194.
- [22] 成秋明. 地质异常的奇异性度量与隐伏源致矿异常识别[J]. 地球科学, 2011, 36(2): 307-316.
- Cheng Qiuming. Singularity modeling of geonomalies and recognition of anomalies caused by buried sources[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(2): 307-316 (in Chinese with English abstract).
- [23] Cheng Qiuming. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China[J]. Ore Geology Review, 2007, 32: 314-324.

- [24] Cheng Q, Bonham-Carter G, Wang W, et al. A spatially weighted principal component analysis for multi-element geochemical data for mapping locations of felsic intrusions in the Gejiu mineral district of Yunnan, China[J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37: 662-669.
- [25] Cheng Q, Xia Q, Li W, et al. Density/area power-law models for separating multi-scale anomalies of ore and toxic elements in stream sediments in Gejiu mineral district, Yunnan Province, China[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7: 3019-3025.
- [26] 李随民, 崔美娟, 魏明辉, 等. 张家口地区矿化元素异常信息提取与集成[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1925-1934.
Li Suimin, Cui Meijuan, Wei Minghui, et al. The extraction and integration of geochemical anomaly information from Zhangjiakou area, Hebei Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1925-1934(in Chinese with English abstract).
- [27] 陈永清, 张生元, 夏庆霖, 等. 应用多重分形滤波技术提取致矿地球化学异常: 以西南“三江”南段 Cu、Zn 致矿异常提取为例[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2006, 31(6): 861-866.
Chen Yongqing, Zhang Shengyuan, Xia Qinglin, et al. Application of multi fractal filtering to extraction of geochemical anomalies from Multi Geochemical Backgrounds: A case study of the southern section of “Sanjiang ore-forming zone”, southwestern China[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2006, 31(6): 861-866(in Chinese with English abstract).
- [28] 邹林, 彭省临, 杨自安, 等. 青海阿尔茨托山地区地球化学(异常)场的多重分形研究[J]. *中国地质*, 2004, 31(4): 436-441.
Zou Lin, Peng Shenglin, Yang Zi'an, et al. Multifractal study of geochemical (anomaly) fields in the Aercituoshan area, Qinghai[J]. *Geology in China*, 2004, 31(4): 436-441(in Chinese with English abstract).
- [29] Zeng L, Cheng L, Cheng Q, et al. A refinement of Lange's plagioclase-liquid hygrometer/thermometer based on quadratic log-contrast models for experiments with mixtures [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 141, 89-99.
- [30] 张焱, 周永章. 多重地球化学背景下地球化学弱异常增强识别与信息提取[J]. *地球化学*, 2012, 41(3): 278-291.
Zhang Yan, Zhou Yongzhang. Recognition and extraction of geochemical weak anomalies based on multiple geochemical background[J]. *Geochimica*, 2012, 41(3): 278-291(in Chinese with English abstract).
- [31] 张焱, 周永章. 奇异性理论在钦杭成矿带(南段)庞西垌银矿产资源预测中的应用[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(9): 3558-3564.
Zhang Yan, Zhou Yongzhang. Application of singularity theory in prediction of silver and gold mineral deposits in Qinzhou-Hangzhou tectonic joint belt Pangxidong area, Guangdong, China[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(9): 3558-3564(in Chinese with English abstract).
- [32] 李随民, 魏明辉, 李森文, 等. 张家口梁家沟铅锌银矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(2): 529-539.
Li Suimin, Wei Minghui, Li Senwen, et al. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of the Liangjiagou Pb-Zn-Ag ore deposit in Chicheng County of Zhangjiakou City and their geological implications [J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 529-539 (in Chinese with English abstract).
- [33] 王学求, 孙宏伟, 迟清华, 等. 地球化学异常再现性与可对比性[J]. *中国地质*, 2005, 32(1): 135-140.
Wang Xueqiu, Sun Hongwei, Chi Qinghua, et al. Reproducibility and comparison of geochemical anomalies[J]. *Geology in China*, 2005, 32(1): 135-140(in Chinese with English abstract).
- [34] 迟清华, 鄯明才, 编著. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版, 2007: 51-55.
Chi Qinghua, Yan Mingcai. Handbook of Elemental Abundance for Applied Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 51-55(in Chinese).