

内蒙古复兴屯超大型银铅锌矿床地质特征及找矿标志*

李海军¹, 张善明^{2,3**}, 梁新强⁴, 胡二红⁵, 郝智慧⁶, 王亚楠⁷, 武斌⁷, 康建飞⁵,
白涛³, 周立军⁷

(1 中化地质矿山总局内蒙古地质勘查院, 内蒙古呼和浩特 010000; 2 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;
3 内蒙古矿业开发有限责任公司, 内蒙古呼和浩特 010011; 4 内蒙古国土资源勘查开发有限责任公司, 内蒙古呼和浩特
010020; 5 内蒙古第八地质矿产勘查开发有限责任公司, 内蒙古乌海 016000; 6 鄂尔多斯市地质调查监测院, 内蒙古
鄂尔多斯 017000; 7 内蒙古地质矿产(集团)有限责任公司, 内蒙古呼和浩特 010011)

摘要 复兴屯银铅锌矿床位于大兴安岭南段中生代宝石火山沉积盆地内, 是内蒙古近年来地质找矿的一大突破。文章通过分析复兴屯区域地质背景及矿床地质特征, 详细介绍了地球物理及地球化学在该矿床找矿过程中的应用, 最后总结了矿床的找矿标志。复兴屯银铅锌矿体产于晚侏罗世一早白垩世陆相火山碎屑岩内, 其形态、规模、产状受火山机构-网格状断裂构造体系控制, 呈“拱形”产出。矿床以独立银矿体、银铅锌共生矿体为主, 其次为锌矿体、铅矿体、锌铅矿体, 均为隐伏矿体。矿体形态为似层状、透镜状, 主要矿化蚀变有叶腊石化、绿泥石化、高岭土化、碳酸盐化、菱锰矿化、闪锌矿化、方铅矿、黄铁矿化, 局部见黄铜矿化。该矿床推断 Ag 金属资源量 5258 t, 平均品位 198.21 g/t; Zn 金属推断资源量 17.6 万 t, 平均品位 1.61%; Pb 金属推断资源量 3.3 万 t, 平均品位 1.36%, 达超大型规模。文章初步总结出复兴屯矿床找矿标志: 晚侏罗世一早白垩世陆相火山碎屑岩、网格状断裂构造体系、破火山口和火山盆地、矿化蚀变(铁锰碳酸盐化、硅化、叶腊石化、黄铁矿化、铅锌矿化)、平面及垂向 Ag-Pb-Zn-Cu-Au 元素异常组合、环状平稳负磁异常和低阻高极化激电异常。复兴屯超大型银铅锌矿床地质特征及找矿标志的研究为大兴安岭地区类似矿床提供找矿思路, 同时也为该区寻找隐伏矿体提供一种有效的勘查模型。

关键词 地质特征; 找矿标志; 银铅锌矿床; 复兴屯; 大兴安岭南段

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Geological characteristics and prospecting indicators of Fuxingtun giant Ag-Pb-Zn deposit in Inner Mongolia

LI HaiJun¹, ZHANG ShanMing^{2,3**}, LIANG XinQiang⁴, HU ErHong⁵, HAO ZhiHui⁶, WANG YaNan⁷, WU Bin⁷,
KANG JianFei³, BAI Tao³ and ZHOU LiJun⁷

(1 Inner Mongolia Geological Exploration Institute of Sinochem Geology and Mining Bureau, Hohhot 010000, Inner Mongolia, China;
2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Inner Mongolia Mining
Development Co. Ltd., Hohhot 010011, Inner Mongolia, China; 4 Inner Mongolia Land Resources Exploration and Development
Co. Ltd., Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 5 Inner Mongolia No.8 Geological and Mineral Exploration and Development
Co. Ltd., Wuhai 016000, Inner Mongolia, China; 6 Ordos Geological Survey and Monitoring Institute, Ordos 017000, Inner
Mongolia, China; 7 Inner Mongolia Geology and Mineral Resources (Group) Co., Ltd., Hohhot 010011, Inner Mongolia, China)

Abstract

The giant Fuxingtun Ag-Pb-Zn deposit is located in the Mesozoic Baoshi volcanic-sedimentary basin of the southern Da Hinggan Mountains. The discovery of this deposit is a major breakthrough in geological prospecting

* 本文得到内蒙古自治区地质勘查基金管理中心项目(编号:11-1-KC11)资助

第一作者简介 李海军,男,1986年生,高级工程师,主要从事区域地质调查及矿产勘查工作。Email:512288648@qq.com

** 通讯作者 张善明,男,1983年生,博士,教授级高级工程师,主要从事区域矿产地质调查工作。Email:shanming.zhang@163.com

收稿日期 2021-12-05;改回日期 2023-07-29。赵海杰编辑。

in Inner Mongolia in recent years. The orebodies of the deposit occur within the Late Jurassic-Early Cretaceous continental pyroclastic rock and are controlled by both the volcanic mechanism and grid fault structural system. The inferred resource of Ag metal is 5258 t with an average grade of 198.21g/t, the inferred resource of Zn metal is 1.76 hundred thousand tons with an average grade of 1.61%, and the inferred resource of Pb metal is 0.33 hundred thousand tons with an average grade of 1.36%. Based on the analyses of the regional geological setting and geological characteristics of the Fuxingtun deposit, it is preliminarily considered that the prospecting indicators of this type of deposit are as follows: ① Late Jurassic-Early Cretaceous continental pyroclastic rocks; ② grid fault structural system; ③ caldera and volcanic basin; ④ Fe-Mn carbonation, silicification, pyrophyllitization, pyritization, Pb-Zn mineralization; ⑤ Ag-Pb-Zn-Cu-Au element anomaly combinations; ⑥ annular stable negative magnetic anomaly; and ⑦ low resistance and high induced polarization anomaly. Through the study on the geological characteristics and prospecting indicators of the Fuxingtun deposit, this paper aims to provide prospecting ideas for similar deposits in the Da Hinggan Mountains and also provide an effective exploration model for finding concealed ore bodies in this area.

Key words: geological characteristics, prospecting indicators, Ag-Pb-Zn deposit, Fuxingtun, southern Da Hinggan Mountains

大兴安岭地区是中生代环太平洋成矿域的重要组成部分(Xu et al., 2013; 周振华等, 2019), 区内发育众多的铅锌银多金属矿床(江思宏等, 2018), 是中国重要的有色金属及贵金属矿产基地(吴晓林等, 2021)。强烈的中生代火山-侵入岩浆作用导致在该区域形成一个与构造-岩浆活动密切相关的铅锌银铜锡钼多金属矿床成矿系列(闫聪等, 2011; Wu et al., 2011; 阮班晓等, 2013; Li et al., 2013; Xu et al., 2013; Tang et al., 2014; 武广等, 2014; 董旭舟等, 2014), 并引起众多地质工作者及学者的关注。然而, 位于大兴安岭南段东南坡的科尔沁右翼前旗一带地处偏远, 工作程度较低。近年来, 内蒙古国土资源勘查开发有限责任公司依托内蒙古自治区地勘基金项目《内蒙古自治区科尔沁右翼前旗复兴屯矿区1区银矿普查》, 在科尔沁右翼前旗复兴屯取得了重大找矿突破, 在复兴屯矿区1区发现超大型银铅锌矿床, Ag金属推断资源量5258 t, 平均品位198.21 g/t; Zn金属推断资源量17.6万t, 平均品位为1.61%; Pb金属推断资源量3.3万t, 平均品位为1.36%。另有低品位锌铅矿体, 估算Zn金属量776万t, 平均品位1.07%; Pb金属量22万t, 平均品位0.4%。外围另有8个预查区正在开展工作, 部分区块显示出较好的找矿潜力。

复兴屯超大型银铅锌矿的发现是内蒙古近几年地质找矿工作的重要进展, 被评为中国地质学会2019年度十大地质找矿成果之一, 该矿不仅经济价值巨大, 对它的研究深入推进该区域内的地质勘探

工作。本文结合区域成矿地质背景, 详细介绍了复兴屯超大型银铅锌矿床地质特征, 以及地球物理和地球化学方法在该矿床找矿勘查中的应用, 最后总结了矿床的找矿标志, 期望为今后在大兴安岭地区找矿勘查提供了新的思路 and 方向, 并为区域勘查找矿提供参考借鉴。

1 区域地质

复兴屯超大型银铅锌矿床位于大兴安岭南段, 大地构造位置属于西伯利亚板块东南缘蒙古中生代造山带锡林浩特陆缘弧之艾里格庙-霍林郭勒晚古生代岛弧(李锦轶等, 2019; 徐备等, 2018), 主要表现为条带状的古生代基底隆起和中生代火山盆地的相间排列, 形成了NNE走向的大兴安岭火山岩带。

区域出露地层主要有二叠系、侏罗系、白垩系、新近系及第四系, 其中以侏罗纪火山岩分布最广(图1)。区域构造为二叠系大石寨基底隆起带、晚侏罗世一早白垩世火山构造, 断裂构造以东北向和北西向为主, 其次为东西向和南北向, 这些断裂构造是区内的控岩、控矿构造。区域侵入岩出露面积较小, 大面积被中生代喷出岩覆盖。侵入岩主要为早白垩世石英二长岩、花岗闪长斑岩, 其次为晚二叠世闪长岩、正长花岗岩, 呈岩基、岩株状产出。

复兴屯矿区位于大兴安岭成矿省, 突泉-翁牛特Pb、Zn、Ag、Sn、Cu、Mo、Au成矿带索伦镇-黄岗Fe

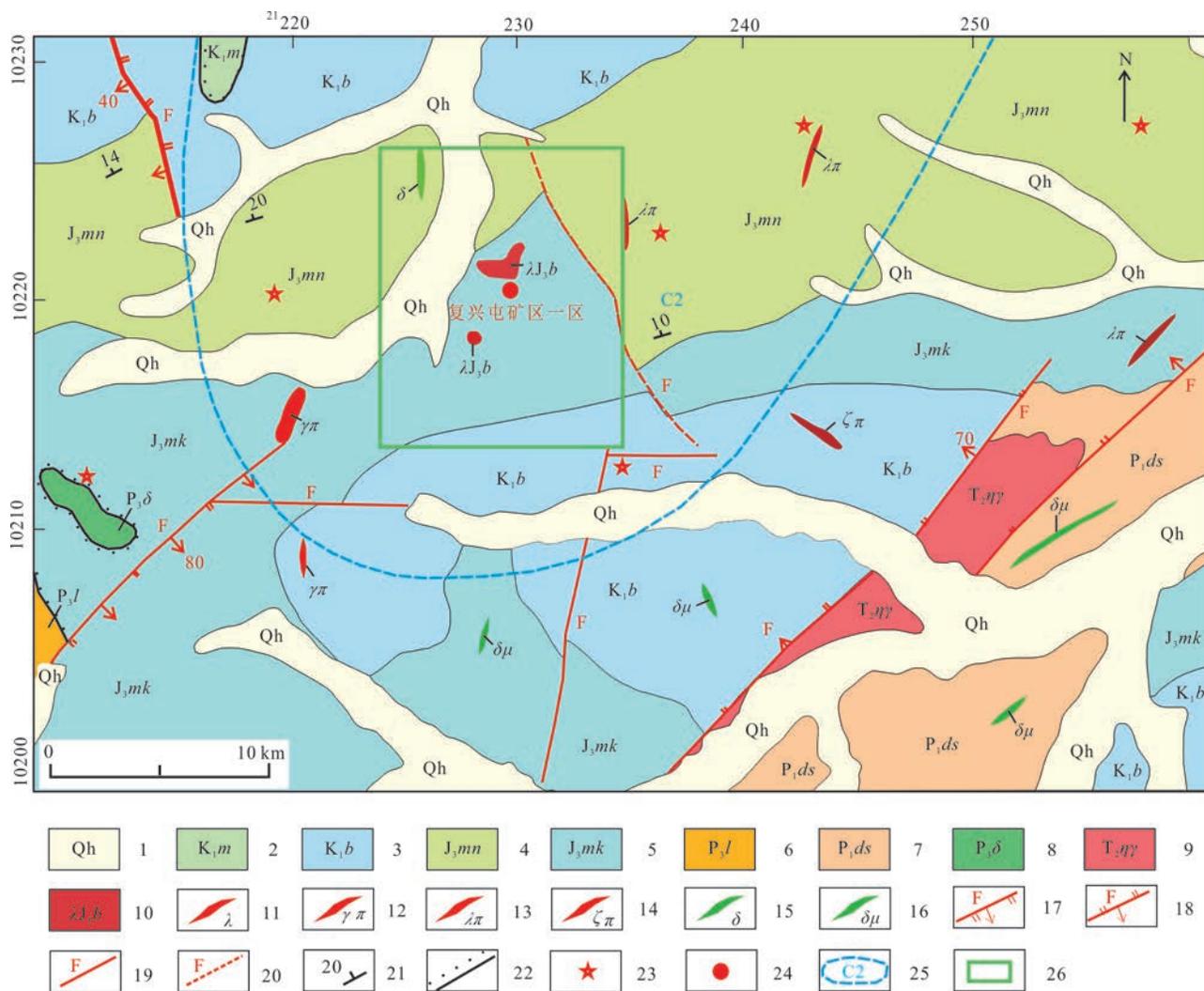


图 1 复兴屯地区区域地质图

1—第四系;2—下白垩统梅勒图组;3—下白垩统白音高老组;4—上侏罗统玛尼吐组;5—上侏罗统满克头鄂博组;6—上二叠统林西组;7—下二叠统大石寨组;8—晚二叠世闪长岩;9—中三叠世二长花岗岩;10—晚侏罗世次流纹岩;11—花岗岩脉;12—花岗斑岩脉;13—流纹斑岩脉;14—正长斑岩脉;15—闪长岩脉;16—闪长玢岩脉;17—正断层;18—逆断层;19—性质不明断层;20—推测断层;21—地层产状;22—不整合接触;23—火山口;24—银铅锌矿床(点);25—航磁异常范围及编号;26—矿区位置及范围

Fig. 1 Regional geological map of the Fuxingtun area

1—Quaternary; 2— Lower Cretaceous Meiletu Formation; 3—Lower Cretaceous Baiyingaolao Formation; 4—Upper Jurassic Manitu Formation; 5—Upper Jurassic Manketouebo Formation; 6—Upper Permian Linxi Formation; 7—Lower Permian Dashizhai Formation; 8—Late Permian diorite; 9—Middle Triassic monzogranite; 10—Late Jurassic sub rhyolite; 11—Granitic vein; 12—Granite porphyry dyke; 13—Rhyolitic porphyry dyke; 14—Syenite porphyry vein; 15—Diorite dyke; 16—Diorite porphyrite dyke; 17—Normal fault; 18—Reverse fault; 19—Fault of unknown nature; 20—Inferred fault; 21—Attitude of strata; 22—Unconformity bounitary; 23—Volcanic vent; 24—Ag-Pb-Zn Ore deposit/occurrence; 25—Range and number of aeromagnetic anomaly; 26—Location and scope of ore district

(Sn)、Cu、Pb、Zn、Ag 成矿亚带中段(邵和明等, 2016)。区域上典型矿床主要有扎木钦大型铅锌银矿床、桦树沟铜多金属矿、水泉沟大型叶腊石高岭石矿床等(马玉波等, 2016)。复兴屯矿区位于中生代宝石火山沉积盆地内, 西南直距扎木钦大型铅锌银矿床约 12 km, 二者均位于二连浩特-扎

兰屯深大断裂与 NNE 向大兴安岭主脊断裂交汇处附近(周富华等, 2014; 何鹏等, 2018), 大兴安岭主脊成矿地质条件优越、成矿期次多、强度大、矿床类型多样, 有丰富的 Cu、Pb、Zn、Ag、W、Sn 等多金属矿产(许立权等, 2016), 非金属矿产主要有叶腊石、高岭石等。

2 矿床地质

2.1 地质特征

2.1.1 地层与岩浆岩

矿区内出露的地层由老到新主要有上侏罗统满克头鄂博组、玛尼吐组、下白垩统白音高老组和梅勒图组及第四系全新统(图1b)。地层总体走向北东、倾向北西。满克头鄂博组上部为流纹质含角砾凝灰岩、珍珠岩和流纹岩,下部为流纹质凝灰岩及火山角砾岩,为矿区主要赋矿层位,岩石整体蚀变强烈,普遍发育有高岭石化、叶腊石化、绿泥石化、菱锰矿化、菱铁矿化、方解石化等。玛尼吐组上部主要为安山质凝灰岩及安山质含角砾凝灰岩,下部为英安质含角砾凝灰岩和英安质火山角砾岩。白音高老组岩性以流纹质凝灰岩、流纹岩、流纹质火山角砾岩为主,岩石蚀变强烈,普遍发育高岭石化、叶腊石化和碳酸盐化。第四系主要为松散亚砂土、腐殖土等。

区内次火山岩主要为早白垩世次流纹岩,分布于区内穹状火山的中心部位,呈岩枝状产出。脉岩主要有碳酸盐脉、石英脉、正长斑岩脉、流纹斑岩脉及珍珠岩脉等。

2.1.2 构造

矿区整体为一个长轴走向NE的火山构造洼地,主火山机构位于矿区南部的阿拉巴拉沟东侧满克头鄂博组内,并发育放射状的断裂及珍珠岩脉。以火山口为中心,晚侏罗世满克头鄂博期喷发相的流纹岩、火山碎屑岩向四周呈围斜外倾,北东一侧厚度较大,南西一侧厚度较薄,经历了满克头鄂博期、玛尼吐期2期火山活动,玛尼吐组英安质含角砾火山碎屑岩整合覆盖在满克头鄂博组流纹质火山碎屑岩之上。2个次火山口分布在矿区中部的测风塔及阿拉达坂北一带,火山活动时期为白音高老期,不整合叠加在主火山机构的北端。阿拉达坂北西满克头鄂博期珍珠岩风化壳与其上石泡流纹岩之间的不整合界面证实,本区火山洼地形成(塌陷)于前二期火山活动之后,同白音高老期火山活动之间存在一个喷发间断,主火山机构经历了中心塌陷,次流纹岩沿环状主火山机构外围的火山断裂侵入,呈岩柱状、环形脉状,这一过程结束了早白垩世火山活动。早白垩世环状火山断裂分布在火山机构外围,矿区北部的F14为南倾正断层,倾角70°左右,环状沟谷较发育,上盘下沉塌陷;西南部的F17、F18为倾向北东的正断层,倾角

75°左右。放射状断裂在南部主火山口四周较为发育,表现为呈弧形环绕火山口分布的陡立珍珠岩脉侵位和张扭性剪切断面和破碎带。早白垩世梅勒图组的火山活动在矿区仅表现为基性岩浆溢流,由于后期的整体抬升,爆发相、溢流相层位均被剥蚀殆尽,仅表现为中心相的岩颈和岩墙就位,受NE向区域断裂构造控制呈串珠状排列,显示裂隙-中心式喷发特征。

矿区断裂构造主要以NE向与NW向2组为主,EW向及SN向次之。二叠纪形成的NE向断裂为成矿前基底构造,与其大致平行的NE向断裂是晚侏罗世末期形成的区域性构造,控制早白垩世玄武岩的展布及新生代带状凹陷的形态。这组断裂主要有F1、F2、F3、F4共4条,走向23°~62°,总体倾向NW或SE的正断层,倾角80°~85°,延长530~6200m,为区内控岩、控矿构造,其次级断裂、裂隙构造为容岩、容矿构造;NW向断裂为区内派生的次一级构造,主要有F5、F6、F7、F8共4条,基本都分布在矿区中部,为成矿期控矿、容矿构造,属于正断层,走向305°~340°,总体倾向NE或SW,倾角75°~80°,延长840~1500m。NE向与NW向2组断裂一起控制了区内火山通道及火山岩的串珠状分布,其组合形成网格状构造形态,既是含矿热液的运移通道,同时也为矿液的沉淀提供了有利空间。EW向及SN向构造在区内为挤压破碎带及张扭性断层所构成,切割满克头鄂博、白音高老组火山岩,与NE向断裂一起控制了区内火山通道次流纹岩及银铅锌矿体的分布。

总体来看,银多金属矿体主要受火山机构内部的水压裂隙及隐爆角砾岩控制,成矿与火山-次火山热液活动关系密切,火山构造和次火山岩侵入体派生的同生裂隙系统控制了矿体的产出,很少见到区域性断裂控制的脉状矿体。

2.2 矿体特征

区内共圈定575条矿体,主要赋存于满克头鄂博组酸性火山岩中,以独立银矿体、银铅锌共生矿体为主,其次为锌矿体、铅矿体、锌铅矿体(图2a),均为隐伏矿体,总体走向317°~20°,呈“拱形”产出,西翼倾向230°~290°,东翼倾向47°~92°,倾角1°~45°。矿体形态为似层状、透镜状(图2b),主要矿化蚀变有叶腊石化、绿泥石化、高岭土化、碳酸盐化、菱锰矿化、闪锌矿化、方铅矿、黄铁矿化,局部见黄铜矿化。

(1) 银矿体

矿区银矿体92条,编号为Ag1-Ag92,其中独立

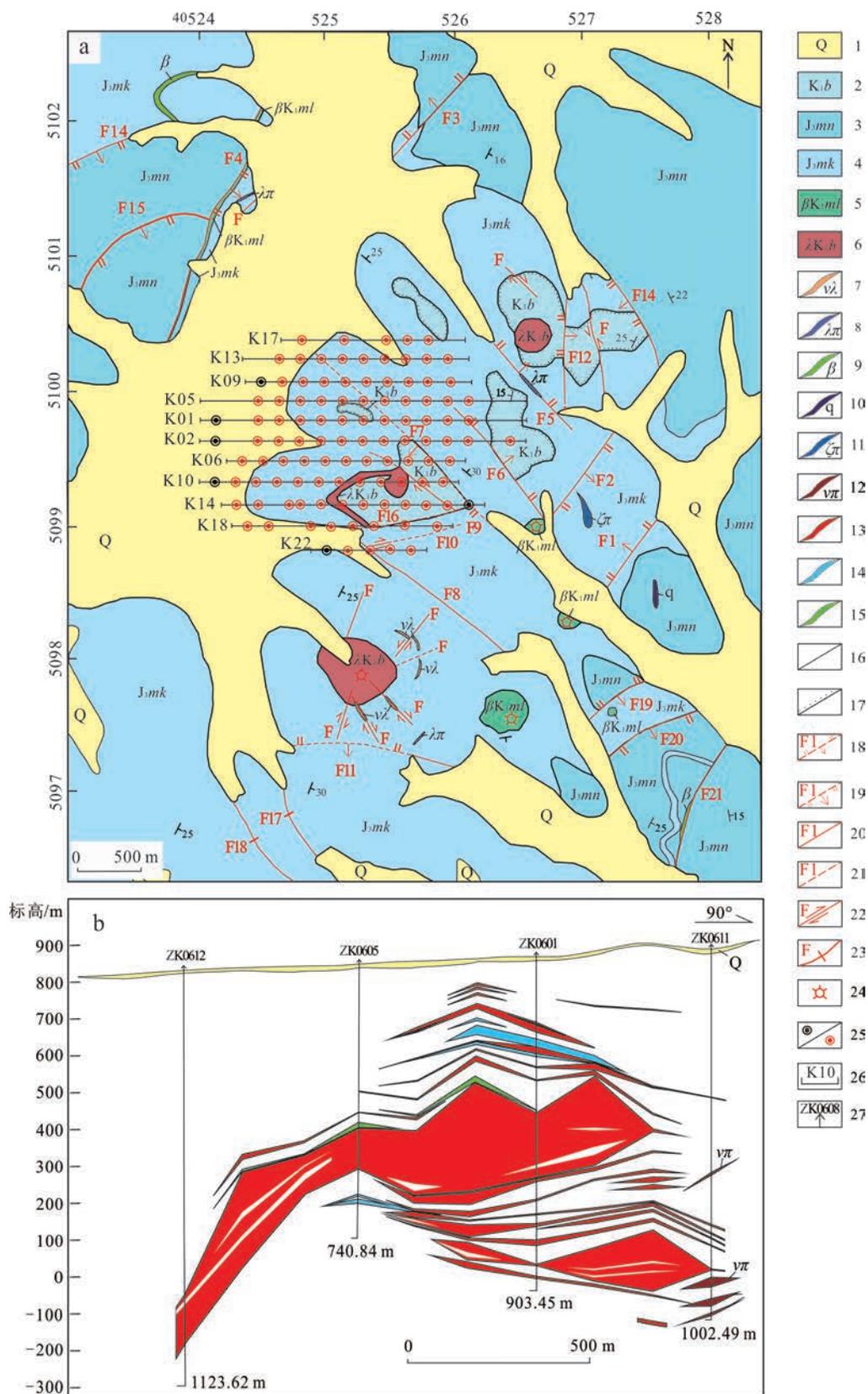


图2 复兴屯矿区1区地质图(a)及K06勘探线剖面图(b)

1—第四系;2—下白垩统白音高老组;3—上侏罗统玛尼吐组;4—上侏罗统满克头鄂博组;5—梅勒图期次玄武岩;6—白音高老期次流纹岩;
7—珍珠岩脉;8—石英斑岩脉;9—玄武岩脉;10—石英脉;11—英安岩脉;12—霏细岩;13—锌矿体;14—银矿体;15—铅矿体;16—整合地质界

线; 17—不整合地质界线; 18—逆断层及编号; 19—正断层及编号; 20—性质不明断层及编号; 21—推测断层及编号; 22—走滑断层; 23—火山断裂; 24—火山口; 25—见矿/未见矿钻孔; 26—勘探线位置及编号; 27—钻孔位置及编号

Fig.2 Geological map (a) of the No. 1 district in Fuxingtun deposit and the K06 exploration line profiles(b)

1—Quaternary; 2—Lower Cretaceous Baiyingaolao Formation; 3—Upper Jurassic Manitu Formation; 4—Upper Jurassic Manketouebo Formation; 5—Meiletu stage basalt; 6—Baiyingaolao sub rhyolite; 7—Perlite vein; 8—Quartz porphyry vein; 9—Diabase dyke; 10—Quartz vein; 11—Dacite vein; 12—Felsite; 13—Zinc ore body; 14—Silver ore body; 15—Lead ore body; 16—Integrated geological boundary; 17—Unconformity geological boundary; 18—Reverse fault and its number; 19—Normal fault and its number; 20—Unknown fault and its number; 21—Inferred fault and its number; 22—Strike-slip fault; 23—Volcanic fault; 24—Crater; 25—Ore drill hole/Dry drill hole; 26—Location and number of exploration line; 27—Drilling location and its number

银矿体 41 条、银锌共生矿体 25 条, 银铅共生矿体 4 条, 银铅锌共生矿体 22 条。Ag9、Ag10 富集特征最为显著, 矿体主要赋存在 200 m 标高之上, 平均品位 198.21g/t, 共生 Zn 平均品位 1.613%、Pb 平均品位 1.361%。Ag9 为独立银矿体, 由 15 个钻孔控制, 矿体控制长度 1000 m, 控制最大斜深 742 m, 埋深 147~464 m, 赋矿标高 704~413 m。总体走向 2°, 西翼倾向 272°, 倾角 8°~4°, 东翼倾向 92°, 倾角 12°~36°。矿体为似层状, 厚度 0.98~23.91 m, 平均厚度 11.34 m, 厚度变化系数 69.31%, 厚度稳定, 矿体品位 Ag88.69~598.18 g/t, 平均品位 Ag220.29 g/t, 品位变化系数 Ag63.33%。Ag10 为银锌共生矿体, 由 18 个钻孔控制, 矿体控制长度 560 m, 控制最大斜深 864m, 埋深 225~561 m, 赋矿标高 640~305 m。总体走向 334°, 西翼倾向 244°, 倾角 6°~32°, 东翼倾向 64°, 倾角 5°~14°, 矿体为似层状, 厚 0.85~14.43 m, 平均厚 3.82 m, 厚度变化系数 94.77%, 矿体品位 Ag 80.73~396.60 g/t, 平均品位 131.10 g/t, 品位变化系数 Ag55.27%, 共生 Zn 品位 0.045%~6.505%, 平均品位 1.501%, 品位变化系数 Zn123.82%。

(2) 锌铅矿体

矿区锌铅矿体 454 条, 编号为 Zn1-Zn454, 其中锌铅矿体 41 条, 低品位锌矿体 413 条, 铅矿体 29 条。以 Zn45、Pb3 矿体特征最为显著。Zn45 为独立锌矿体, 由 24 个钻孔控制, 矿体控制长度 560m, 控制最大斜深 1182 m, 埋深 446~922 m, 赋矿标高 -70~392m。总体走向 340°, 倾向 245°~250°, 倾角 7°~32°; 东翼倾向 65°~70°, 倾角 3°~34°。矿体形态为似层状, 厚 1.65~123.45 m, 平均厚 24.91 m, 厚度变化系数 129.50%。其中 K06 线矿体厚度较大, 矿体品位 Zn1.04%~4.403%, 平均品位 1.895%, 品位变化系数 Zn42.80%。Pb3 为独立铅矿体, 由 5 个钻孔控制, 控制长度 240 m, 控制最大斜深 580 m, 埋深 332~588 m, 赋矿标高 551~278 m, 总体走向 340°, 倾向 250°, 倾角 19°~32°, 形态为透镜状, 厚 1.76~7.87 m, 平均厚

3.55 m, 厚度变化系数 70.55%, 矿体品位 Pb 0.70%~1.129%, 平均品位 0.982%, 品位变化系数 Pb18.67%。

2.3 矿石特征

银铅锌矿体主要赋存于流纹质裂隙内(图 3a~d), 矿体可分为 3 种类型: 第一种为密集陡立细脉状矿体, 见于矿床深部, 受水压裂隙控制, 常形成规模大而品位较低的锌矿体; 第二种为隐爆角砾岩型矿体, 位于矿床浅部, 受隐爆角砾岩控制, 在 10 号勘探线见于地表以下 100~400 m 处, 其中根据夹石分布情况可划分出多条矿体, 控制着该矿床中主要的银铅锌矿体及银矿体; 第三种为脉状铜锌矿体, 呈粗脉状展布, 仅见于 14 号勘探线底部。复兴屯矿床矿体形态常呈似层状或透镜状。

银(锌)金属矿物主要有针碲金银(AL)、自然银(Nsl)、银黝铜矿(Fh)、闪锌矿(Sph)、方铅矿(Gn)、黄铜矿(Cp)、黄铁矿(Py)、毒砂(Ars)、菱锰矿(Rds), 非金属矿物主要有石英、玉髓和方解石(图 3e~h)。矿物生成顺序: 黄铁矿→毒砂→闪锌矿→黄铜矿→方铅矿→针碲金银矿。

2.4 围岩蚀变特征

复兴屯矿床主要发育中-低温热液蚀变, 主要蚀变类型有高岭土化、菱锰矿化、硅化、叶腊石化、伊利石化、绿泥石化、及绢云母化等, 归纳总结为 5 类蚀变特征: I 碳酸盐化: 在本区广泛发育, 其中菱锰矿化是本区最主要的特征蚀变类型之一, 分布范围较广, 在铜锌矿化、铅锌矿化和银铅锌矿化阶段均有发育, 矿体及附近岩石都可发现其存在; II 高岭土化和叶腊石化: 在该矿区中分布范围最广, 几乎所有流纹质凝灰岩均发生了不同程度的高岭土化和叶腊石化, 这是由于在热液作用下, 流纹质凝灰岩孔隙度较大且易于发生蚀变所致, 蚀变程度以顶部的银铅锌矿体附近较强, 在深部低品位锌矿体及铜锌矿体周围蚀变程度相应减弱; III 绢云母化: 常见于流纹质凝灰岩中, 由长石经热液蚀变而成, 多分布于铜锌矿体或低品位锌矿体附近, 常与石英、黄铁矿共

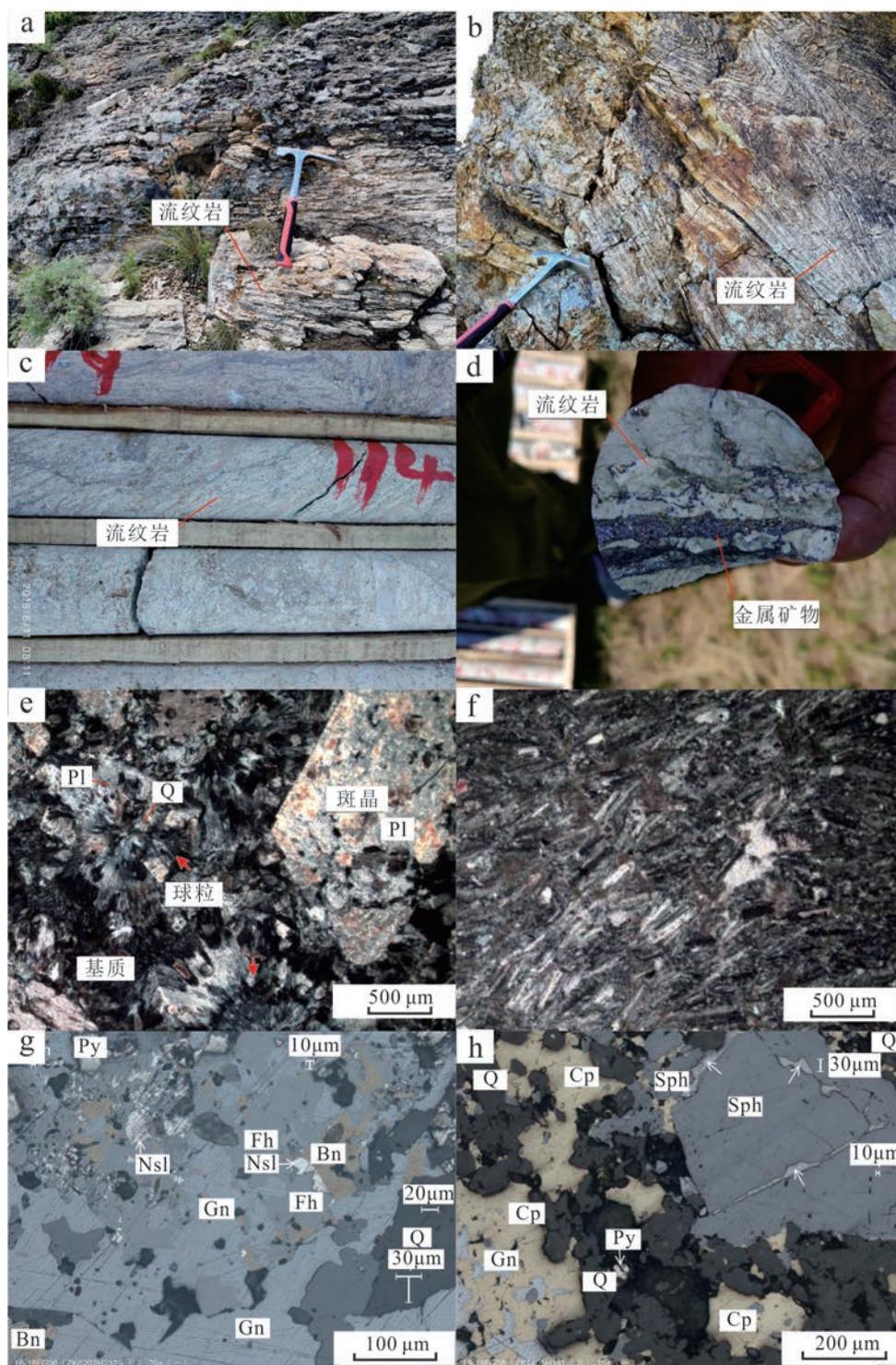


图3 复兴屯矿区主要赋矿围岩(a~d)和矿石显微照片(e~f)

a, b. 含矿流纹岩; c, d. 含矿流纹岩岩芯; e. 流纹岩镜下特征; f. 矿化蚀变流纹岩镜下特征; g. 铅矿化火山角砾岩; h. 锌铜矿化火山角砾岩
 Q—石英; PI—斜长石; Nsl—自然银; Sph—闪锌矿; Gn—方铅矿; Fh—银黝铜矿; Bn—斑铜矿; Cp—黄铜矿; Py—黄铁矿

Fig. 3 Representative photographs of main host-rocks (a~d) and ores (e~f) from the Fuxingtun ore district
 a, b. Rhyolite with Ag-Pb-Zn mineralization; c, d. Ore-bearing rhyolite core; e. Microscopic characteristics of rhyolite; f. Microscopic characteristics of ore-bearing rhyolite; g. Microscopic characteristics of lead mineralization of volcanic breccia; h. Microscopic characteristics of zinc and copper mineralization of volcanic breccia

Q—Quartz; PI—Plagioclase; Nsl—Natural silver; Sph—Sphalerite; Gn—Galena; Fh—Freibergite; Bn—Bornite; Cp—Chalcopyrite; Py—Pyrite

生,构成黄铁绢英岩化。Ⅳ硅化:在矿区亦较为发育,存在于成矿各阶段,但各阶段硅化的表现形式略有区别,铜锌矿体附近主要呈细粒石英的形式存在,而在锌矿体、尤其是在银铅锌矿体中,常以玉髓形式发育。Ⅵ伊利石化和绿泥石化:在矿区亦有发现,但是分布相对局限,与上述几种蚀变类型相比整体发育程度较弱。

总之,蚀变的分带性规律不太明显,但整体看亦有演变趋势:深部的铜锌矿体和低品位锌矿体周围发育以硅化、菱锰矿化和绢云母化为主的蚀变带,向上为低品位锌矿体最为发育的部位,该段绢云母化程度减弱,高岭土化和叶腊石化较深部增强,石英粒度变细,菱锰矿化增多,偶见伊利石化发育;顶部银铅锌矿体围岩发育强高岭土化和叶腊石化,菱锰矿化亦较为常见,该部位石英多以玉髓形式发育。

2.5 成矿阶段

结合野外观察和室内光薄片鉴定结果,复兴屯矿床的成矿过程可以划分为3个成矿阶段:

Ⅰ铜锌硫化物阶段:为矿床中发育的脉状铜锌矿体,该阶段金属矿物以闪锌矿、黄铜矿和黄铁矿为主,亦有少量方铅矿、黝铜矿和银黝铜矿等,脉石矿物主要以石英和菱锰矿为主,石英晶型相对较好,该阶段矿石常呈块状或脉状构造;Ⅱ铅锌硫化物阶段:该阶段主要发育细脉状矿石,构成低品位锌矿体和低品位铅矿体,金属矿物主要发育有闪锌矿、方铅矿、银黝铜矿、硫锑铜银矿、黝铜矿、黄铁矿等,亦有少量毒砂,该阶段脉石矿物以菱锰(铁)矿为主,亦有部分石英/玉髓发育;Ⅲ银锌硫化物阶段:该阶段主要发育角砾岩型矿石,主要构成银矿体、银铅锌矿体和部分锌矿体,金属矿物以黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和银矿物为主,脉石矿物以玉髓、方解石和菱锰矿为主,常形成角砾状及细脉浸染状矿石。

3 地球物理特征

3.1 区域地球物理特征

研究区位于兴蒙造山带北东段,区域内地质条件复杂,构造运动强烈,岩浆活动频繁,各时代地层和各类岩浆岩分布广泛。根据1:5万航磁 ΔT 等值线平面图(图4)可以看出,区域上磁场总体呈北东-南西向条带状展布,为一个变化多端、正负相伴的杂乱磁异常区,负磁异常场值介于-70~-1800 nT之间;正磁

异常场值介于0~5573.5 nT之间。平面上磁异常多呈不规则片状、点状、条带状,剖平图上呈多峰、正负跳跃的磁场特征,这些特征在航磁垂向一阶导数等值线平面图中表现的更为明显,结合研究区地质特征,该区主要分布白垩系白音高老组、侏罗系满克头鄂博组及玛尼吐组火山岩。由岩石磁性特征可知,各种岩石的感磁和剩磁差别很大,即使同种岩石的磁性变化也很大,必然形成磁场强度变化很大且呈正负交替的锯齿状异常,但其中也有分布较为规则的正异常和规模、强度较大、连续性好的负异常(图4,异常编号:C3),C3异常位于多个独立正磁异常和带状正磁异常所形成的环状正异常内,呈北东-南西向延伸,尾部转为向北,呈“鱼”状,主异常长约18 km,平均宽约3.5 km,中间最宽约4.5 km, ΔT 极大值-1800 nT,在该负异常周边伴有强度不等、正负交替的杂乱磁异常。异常区地表出露地层有白垩系白音高老组流纹质-英安质凝灰岩、中酸性火山碎屑岩夹碎屑沉积岩、中性熔岩等,负异常周边出露侏罗系玛尼吐组安山岩、英安岩、粗面岩、粗安岩。正长斑岩体(脉)、二长斑岩脉、花岗岩脉,从物性特征分析,这几种岩石的磁性均较弱,故推测负磁异常应为深部具弱磁性的岩体所致。因此作者认为,复兴屯地区磁异常主要为火山岩引起,研究区是一个较为典型的火山岩磁场特征。正负掺杂成群并出现集群式杂乱分布的磁异常,受北东向断裂控制的环链状火山机构群控制,复兴屯1区处于环链状火山机构群内,其异常中心对应于塌陷破火山口,异常平稳由火山口塌陷岩石破碎去磁所致(朱小三等,2018)。依据异常强度与空间分布形态并结合地质背景推知,火山机构中心地带火山热液活动相对比较强烈,有利于矿物质富集成矿。

由航磁 ΔT 化极等值线平面图可见(图4),研究区内及周边已经查明的扎木钦大型铅锌矿床、复兴屯超大型银铅锌多金属矿床、桦树沟铜铅锌矿床、复兴屯4区铅锌矿床等均位于-100~200 nT弱磁场范围内,通过以上综合分析认为,下一步的工作中应加强对环形构造内外侧、断裂构造发育、磁场强度 ΔT 在-100~200 nT、负异常边部或正负异常交界处零等值线上的研究和找矿勘查。

3.2 矿区地球物理特征

(1) 1:1万高精度磁法测量

矿区1:1万高精度磁法测量划定磁场分区6处(图5),编号为Ch1、Ch2、Ch3、Ch4、Ch5、Ch6。经正

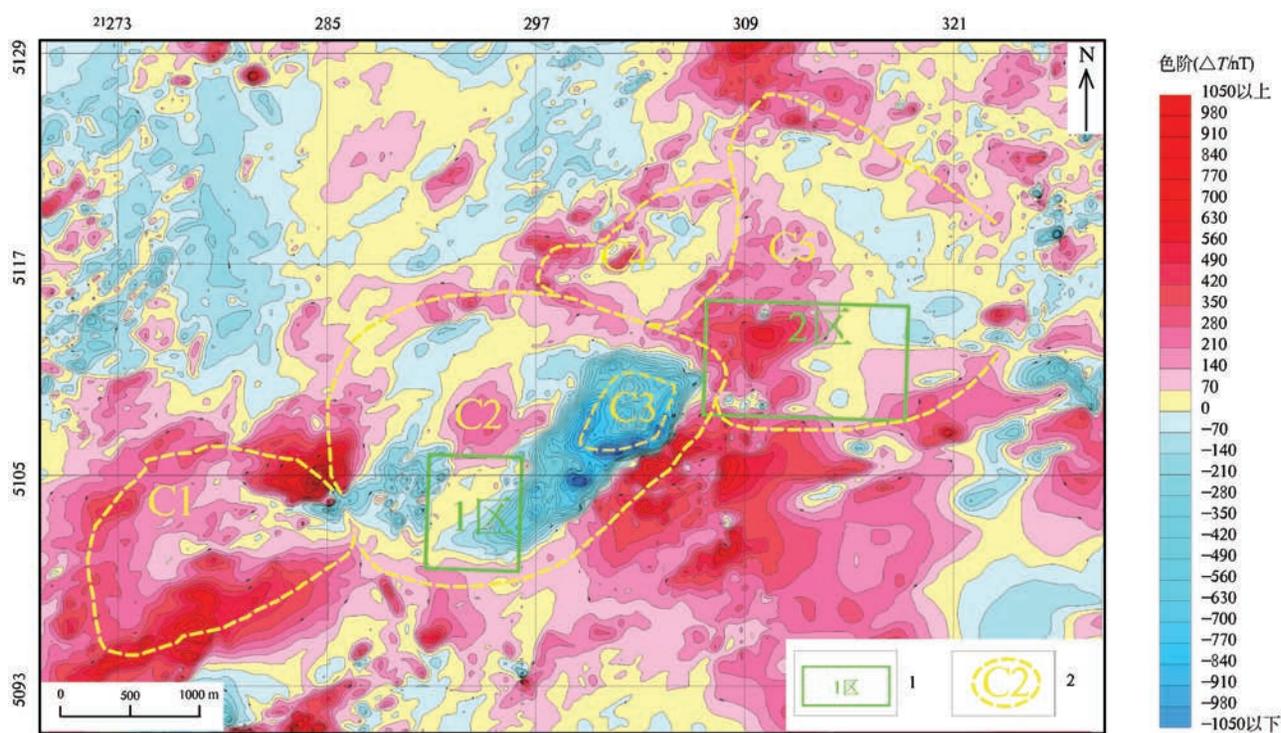


图4 复兴屯一带航磁 ΔT 化极等值线平面图(据乔占华等,2019修编)

1—工作区范围;2—环状异常范围

Fig. 4 Contour plan of aeromagnetic ΔT of the Fuxingtun area, reduced to the pole (modified after Qiao et al., 2019)

1—Workspace scope; 2—Circular anomaly range

则化滤波,圈定具有一定规模异常5处,编号为CL1、CL2、CL3、CL4、CL5(图6)。CL1异常对应地质体为火山小洼地;CL2-2、CL2-3异常对应地质体为火山锥;CL3异常对应地质体为破火山口断陷盆地;CL4异常对应地质体为火山塞;CL5-1、CL5-2异常对应地质体为火山锥。火山洼地(火山机构小规模塌陷)绕塌陷盆地四周密集分布,整体构成莲蓬状火山机构构造群。放射状断裂构造由盆地向外辐射,对四周火山机构进行分割。高维等(2016)认为破火山口断陷盆地、火山洼地及放射状断裂的共同叠加往往会体现矿体的形态、规模,该结论与研究区特征基本一致。

(2) 1:1万激电中梯测量

根据矿区电法资料,矿区视极化率中部及东北部和南部(η_s) $\geq 2.0\%$ 为主(图7),异常范围较大,中部的异常主要呈南北向展布,北侧异常未封闭,在其周边视极化率(η_s)为 $1.0\% \sim 2.0\%$,赋矿区域 η_s 值一般在 $1.8\% \sim 3.0\%$ 之间(等值线);矿区视电阻率整体呈现四周高阻,中部低阻的特征(图8),视电阻率异常高低反映明显。可将视电阻率大致分为高阻区和低阻

区2个区段:高阻区视电阻率介于 $193 \sim 300 \Omega \cdot m$ 之间,主要分布于矿区的四周边部,等值线较为稀疏,封闭的等值线呈近南北向展布,出露满克头鄂博组酸性凝灰岩及流纹质凝灰岩,局部被第四系覆盖;低阻区视电阻率 $< 193 \Omega \cdot m$,主要分布于矿区中部及南部,等值线较为稀疏,封闭的等值线呈南北向分布,出露满克头鄂博组酸性凝灰岩、流纹岩,矿体分布与低阻区有关。

总之,视极化率 η_s 较高的部位与视电阻率 ρ_s 低值区吻合较好,高值异常区总体反映赋矿岩石及围岩受热液蚀变造成黄铁矿化、铅锌矿化等金属硫化物富集有关,显示铅锌成矿区为低电阻、高极化区特征(图7、图8)。低电阻率与钻孔中测定的各岩石电性标本值相差不大,反映本区岩石受热液蚀变强烈,疏松、破碎。

4 地球化学特征

4.1 区域地球化学特征

1:5万区域地球化学异常AS7、AS8主要分布在

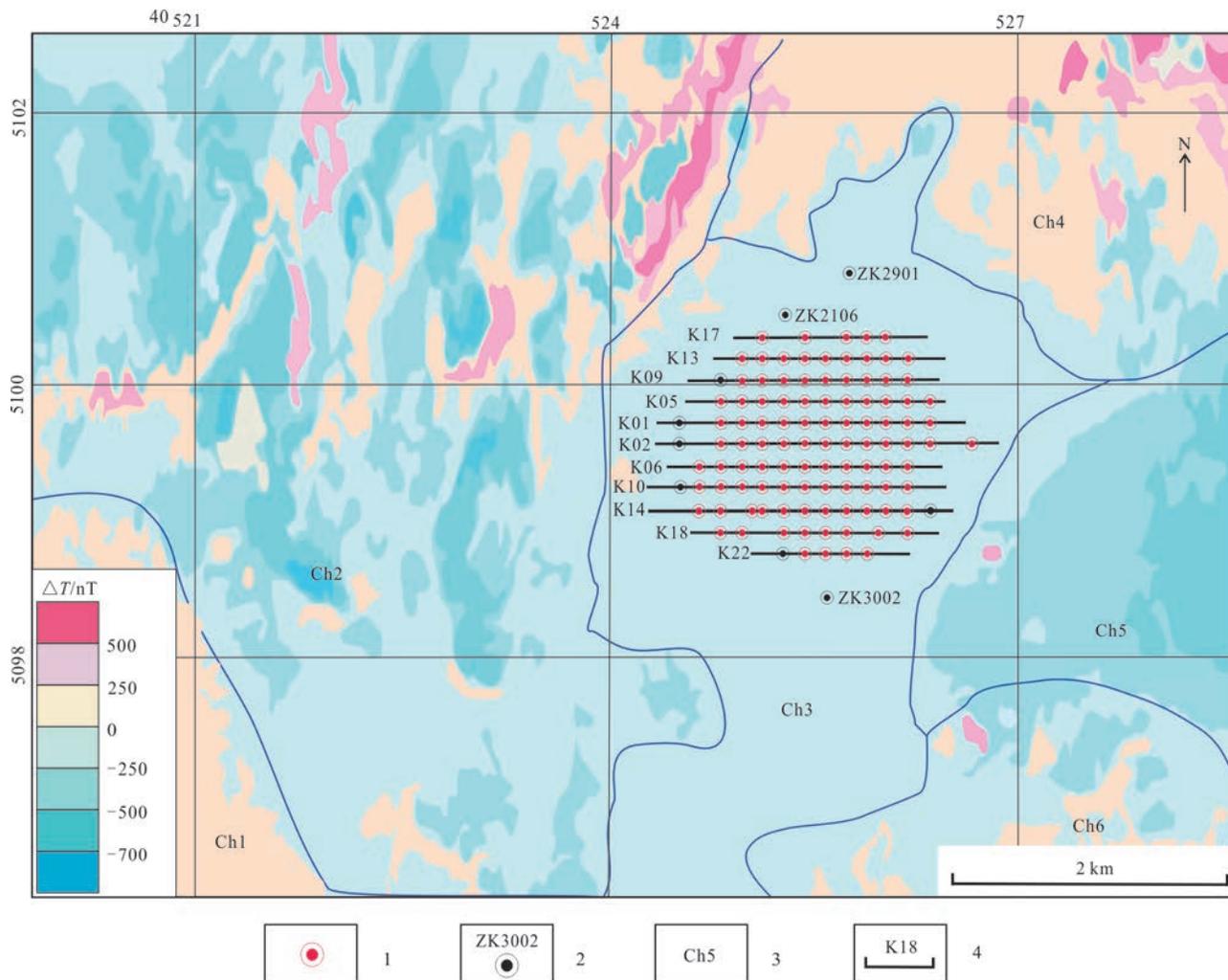


图5 复兴屯矿区1:10 000高精磁测 ΔT 化极等值线平面图

1—见矿钻孔;2—未见矿钻孔;3—磁场分区;4—勘探线位置及编号

Fig.5 Contour plan for the ΔT of 1:10 000 scale high precision magnetic survey in the Fuxingtun ore district, reduced to the pole
1—Ore drilling; 2—Dry drilling; 3—Division of magnetic field; 4—Location and number of exploration line

侏罗系上统满克头鄂博组、玛尼吐组火山岩中,总体呈北东向展布(图9)。Ag、Pb、Zn、Au、Mo等元素在本区有富集趋势,其丰度值较高,变异系数较大,显示强分异特征,为区内主要成矿元素。其他元素呈弱分异,分布均匀,浓集克拉克值接近大兴安岭地区丰度值。侏罗系上统火山岩内,主要成矿元素Pb、Zn、Ag具明显的富集和分异特征,异常强度高、套合好,具有一定规模,经异常查证,各元素峰值Ag: 10×10^{-6} , Pb: 1000×10^{-6} , Zn: 1000×10^{-6} ,并伴有As、Sb、Bi、Mn等元素异常,元素组合具中低温热液成矿特征。

4.2 矿区地球化学特征

1:1万土壤测量在矿区共圈定化探异常4处,编号为AP1-1、AP1-2、AP1-3、AP1-4(图9)。银铅锌矿对

应AP1-1异常,该异常主成矿元素Ag、Pb、Zn浓集中心明显,异常强度高、规模大且吻合性好,具有中-低温热液型银铅锌多金属矿元素组合特征(表1、图10a~h)。侏罗系上统满克头鄂博组是本区的主要赋矿层位,Ag、Pb、Zn等成矿元素在该地层中富集明显。钻孔深部已见厚层银铅锌矿体,表明该异常为矿化导致。

4.3 矿床元素分带模式

在复兴屯矿区东西向K10勘探线统计6个钻孔(ZK1010、ZK1008、ZK1006、ZK1004、ZK1003、ZK1005)原生晕测量数据,在南北向Z3线统计4个钻孔(ZK1802、ZK0602、ZK0102、ZK0903)原生晕数据,大致建立了矿床元素分带模式。

利用直观经验对比法,从K10原生晕剖面图

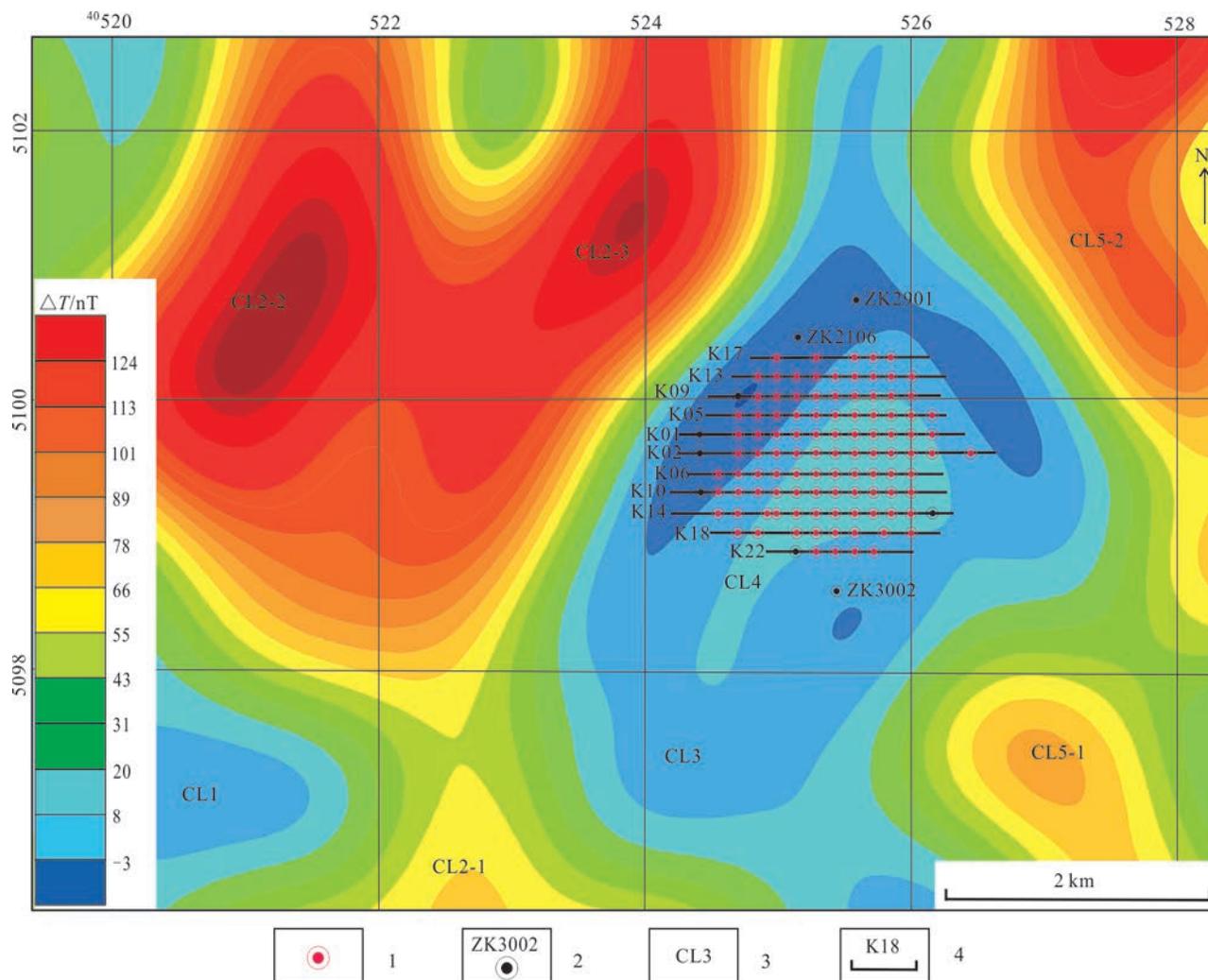


图6 复兴屯矿区 1:10000 高精磁测 ΔT 正则化滤波等值线平面图

1—见矿钻孔;2—未见矿钻孔;3—磁异常编号;4—勘探线位置及编号

Fig 6 Contour plan for the ΔT of 1:10000 scale high precision magnetic survey in the Fuxingtun ore district, ΔT regularized filtering
1—Ore drill hole; 2—Dry borehole; 3—Magnetic anomaly number; 4—Location and number of exploration line

(图 11a~o) 可以看到, 各主成矿元素 Ag、Pb、Zn 异常面积较大, 三级浓度分带清楚围绕矿体四周分布, 且异常在地表均有发育。Ag、Pb 异常主体分布在标高 200 m 以上(图 11b~c), 为偏矿上元素, 另一处浓集中心位于标高 -200 m 附近。Ag、Pb、Zn、Mn、Cd 异常吻合性好, 且具有很好的相关性。As、Sb 异常主要集中于东部钻孔 600 m 标高及以上(图 11g、h)。Cu、Au、Bi、W、Sn、Co 异常分布在标高 200 m 以下(图 11e~f、i~j、k、m)。Cu、Bi 异常吻合好, 有 3 处浓集中心, 分别位于标高 200 m 和 -200 m 附近。Au、W、Sn、Co 异常吻合好。因此, 初步可以对异常的分带性从矿上-矿体-矿下分为: (As、Sb)-Ag (Pb、Zn)-(Cd、Cu、Au、Bi、Co、Sn、W), 与 Beus 等(1977)

建立的热液矿床标准分带基本一致, 且与花敖包特 Pb-Zn-Ag 多金属矿床可以对比(陈永清等, 2011)。Mo 元素异常集中分布于标高 600~800 m 以及 -200 m 附近(图 11), 在剖面上具两处浓集中心。结合南北向剖面总体分析认为成矿热液可能源于西北方向。

从南北向 Z3 线原生晕剖面图(图 12a~l) 可以看到, 元素异常分布与东西向 K10 线基本一致, Ag、Pb、Zn 异常面积较大(图 12a~c), Ag、Pb 异常主要分布在矿体上部, 具多处浓集中心。As 异常浓集中心分别位于标高 700~800 m 和 0~400 m(图 12f)。Sb 异常集中于偏南部钻孔 ZK0602 和 ZK1802 中标高 600~700 m 和 400 m 附近(图 12g)。Hg 异常主要集

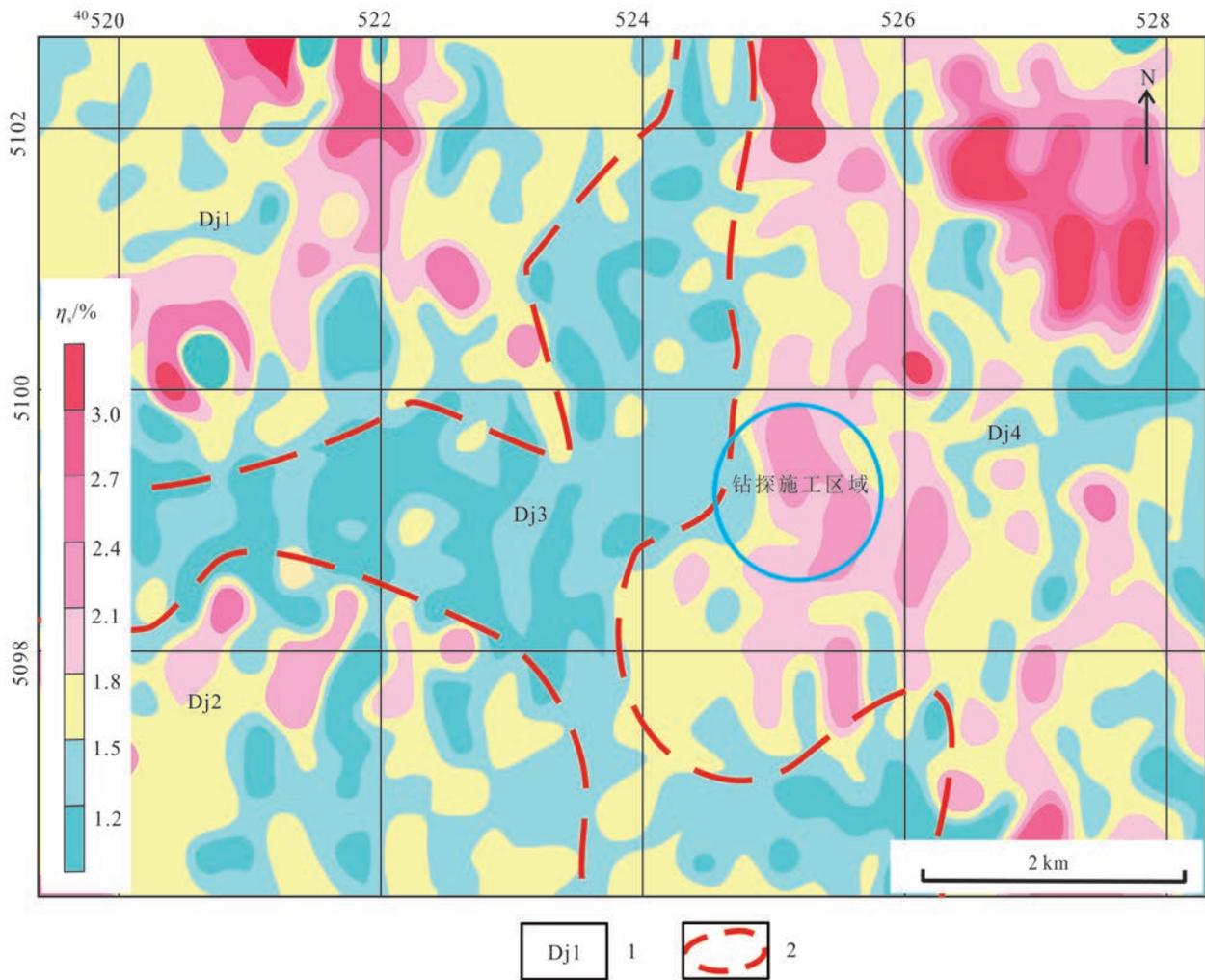


图7 复兴屯1区时间域激发极化法测量极化率异常等值线平面图

1—极化率异常分区编号;2—极化率异常分区界限

Fig.7 Plan of abnormal isoline of polarizability measured by time domain induced polarization method in the No. 1 district of Fuxingtun deposit

1—Polarizability anomaly area number; 2—Boundary of polarizability anomaly area

中于ZK0602和ZK1802中标高600~800 m(图12i)。Au、Bi、W、Sn、Mo等元素具一定的相关性,异常吻合性好。Au、Bi异常浓集中心位于ZK0602的0~100 m(图12e、f)。Sn异常位于ZK0102和ZK0602底部-200~0 m(图12k)。W异常集中于标高-200~200 m(图12j)。由此可见,该剖面自地表向下垂向分带序列大体表现为(Hg、Mo、As、Sb)-Ag(Pb、Zn)-(Cu、As、Au、Bi、W、Sn、Mo)。

5 找矿标志

通过对矿区开展综合勘查,研究地物化信息的

找矿指示意义,作者总结了如下找矿规律:

(1) 晚侏罗世—早白垩世陆相火山碎屑岩

大兴安岭成矿带南段分布的众多银铅锌矿往往与晚侏罗世—早白垩世陆相火山碎屑岩关系密切,如扎木钦、复兴屯2区、复兴屯4区、昌图希力以及本研究区,是该成矿带主要的银铅锌含矿地层,区内与银铅锌相关的地层为满克头鄂博组(J_3mk)和白音高老组(K_1b)酸性火山碎屑岩,主要岩性为流纹质(含)角砾晶屑岩屑凝灰岩、流纹质(含)角砾岩屑凝灰岩、流纹质(含)角砾凝灰岩、流纹质凝灰岩、流纹岩、流纹质火山角砾岩等,尤其是发育菱锰矿化、硅化、叶腊石化等蚀变地段为银铅锌主要

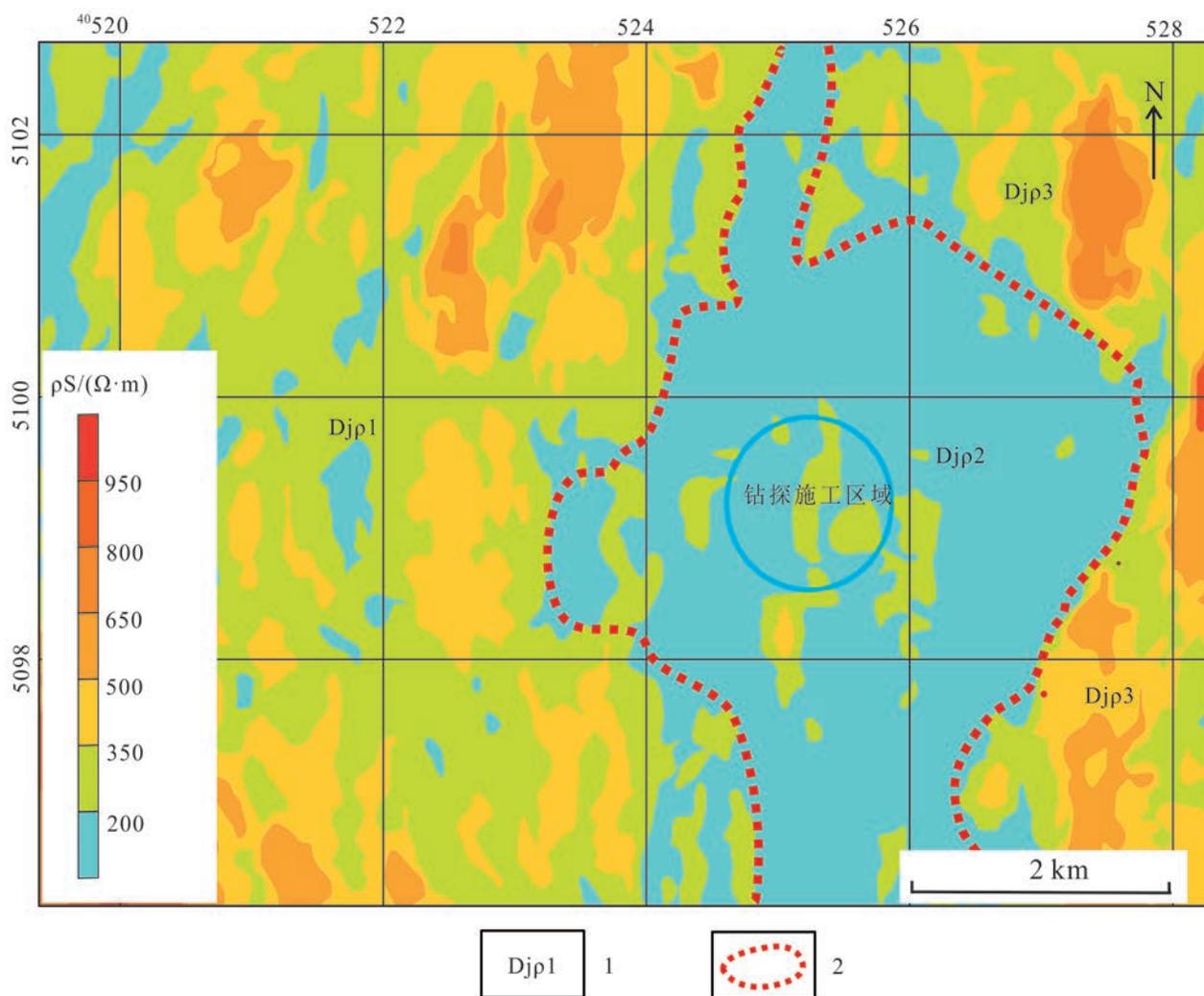


图 8 复兴屯 1 区时间域激发极化法测量视电阻率等值线平面图

1—电阻率异常分区编号;2—电阻率异常分区界限

Fig. 8 Plan of resistivity isoline measured by induced polarization method in time domain in the No. 1 district of Fuxingtun deposit

1—Resistivity anomaly area number; 2—Boundary of resistivity anomaly area

含矿层位。

(2) 网格状断裂构造体系

区域上,前中生代基底隆起属大石寨基底隆起带西缘,中心部位分布于桃合木-复兴屯-树木沟一带。基底隆起内中心部位呈抬升趋势,断裂构造发育,北西一侧断面多向北西倾,南东方向断面向南东倾。北东向、北西向构造在火山活动结束以后扭曲变形,从而形成较为陡倾的正断层,和隆起带两侧的基底凹陷共同构成走向北东的堑-垒构造体系。NE-NNE 向以及近 EW 向深大断裂整体控制了火山岩的空间展布,同时也控制了大兴安岭成矿带的展布。具体到矿区内,北东向断裂构造控制中生代火山机

构的分布,通过矿区中心部位,呈隐伏性质存在,是火山活动之前的基底断裂构造。与其大致平行的北东向断层构造是晚侏罗世末期形成的区域断裂构造,控制早白垩世玄武岩展布及新生代带状凹陷的形态;东西向及南北向构造在区内为挤压破碎带及张扭性断层所构成,根据钻孔岩芯观察沿南北向小裂隙矿化较发育;北西向断裂主要分布在矿区中部,与北东向断裂一起控制了区内火山通道及火山岩的串珠状分布,这 2 组构造形成网格状构造形态,既是含矿热液的运移通道,同时也为矿液的沉淀提供有利空间。这些大断裂的次级断裂及其交汇部位,则进一步控制了成矿流体的运移和矿质沉淀,这些控

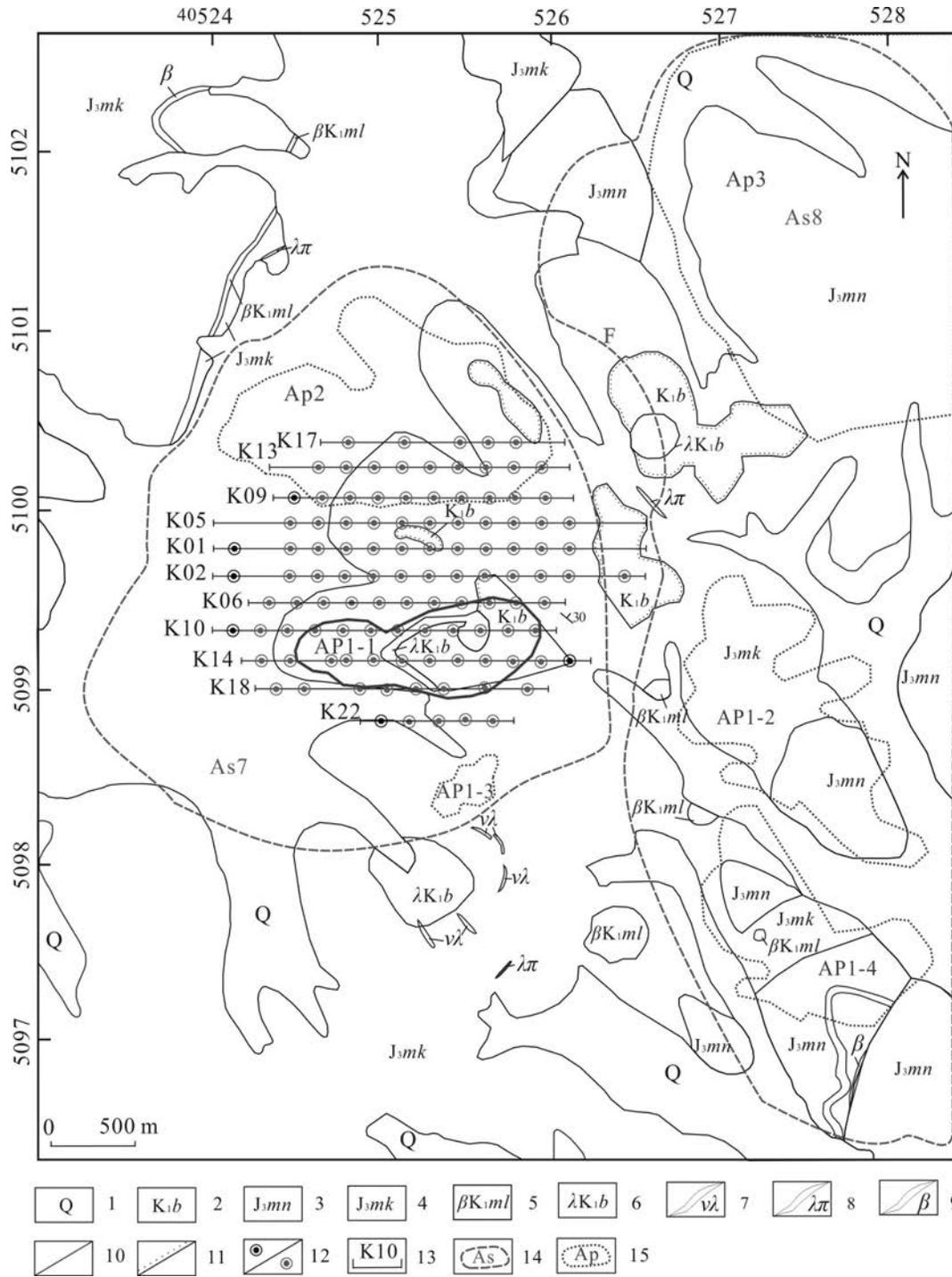


图9 复兴屯地区 Ag、Pb、Zn 元素化探组合异常图

1—第四系; 2—下白垩统白音高老组; 3—上侏罗统玛尼吐组; 4—上侏罗统满克头鄂博组; 5—梅勒图期玄武岩; 6—白音高老期次流纹岩;
 7—珍珠岩脉; 8—石英斑岩脉; 9—辉绿岩脉; 10—整合地质界线; 11—不整合地质界线; 12—见矿/未见矿钻孔; 13—勘探线位置及编号;
 14—化探综合异常范围(1:50 000); 15—化探综合异常范围(1:10 000)

Fig.9 Geochemical exploration combination anomaly map of Ag, Pb and Zn elements in the Fuxingtun area

1—Quaternary; 2—Lower Cretaceous Baiyingaolao Formation; 3—Upper Jurassic Manitu Formation; 4— Upper Jurassic Manketoubo Formation;
 5—Meiletu stage basalt; 6—Baiyingo sub rhyolite; 7—Perlite vein; 8—Quartz porphyry vein; 9—Diabase vein; 10—Integrated geological boundary;
 11—Unconformity geological boundary; 12—Ore bearing drilling/Barren ore drilling; 13—Location and number of exploration line;
 14—Comprehensive range of geochemical anomaly(1:50 000); 15—Comprehensive range of geochemical anomaly(1:10 000)

表 1 AP1-1 异常特征值表

Table 1 AP1-1 geochemical anomaly characteristic values

对比项	Sb	Ag	Pb	Zn	Mn	Cu	W	Sn
面积/km ²	0.3793	0.3458	0.2955	0.2769	0.0587	0.0141	0.0122	0.0013
形状	不规则	不规则	不规则	不规则	椭圆形	椭圆形	不规则	椭圆形
最高值/10 ⁻⁶	33.70	10.00	1000.0	1000.0	10000	42.50	5.12	4.13
平均值/10 ⁻⁶	4.70	2.23	323.97	419.65	7075.9	28.75	3.76	3.18
标准离差	4.67	1.73	346.63	281.78	2477.2	19.45	0.67	0.42
衬度	2.94	4.46	5.40	2.80	1.77	1.92	1.25	1.06
规模	1.119	1.5432	1.5955	0.7747	0.1038	0.0270	0.0153	0.0014
浓度分带	4	4	4	4	2	2	1	1
异常下限	1.6	0.5	60	150	4000	15	3	3

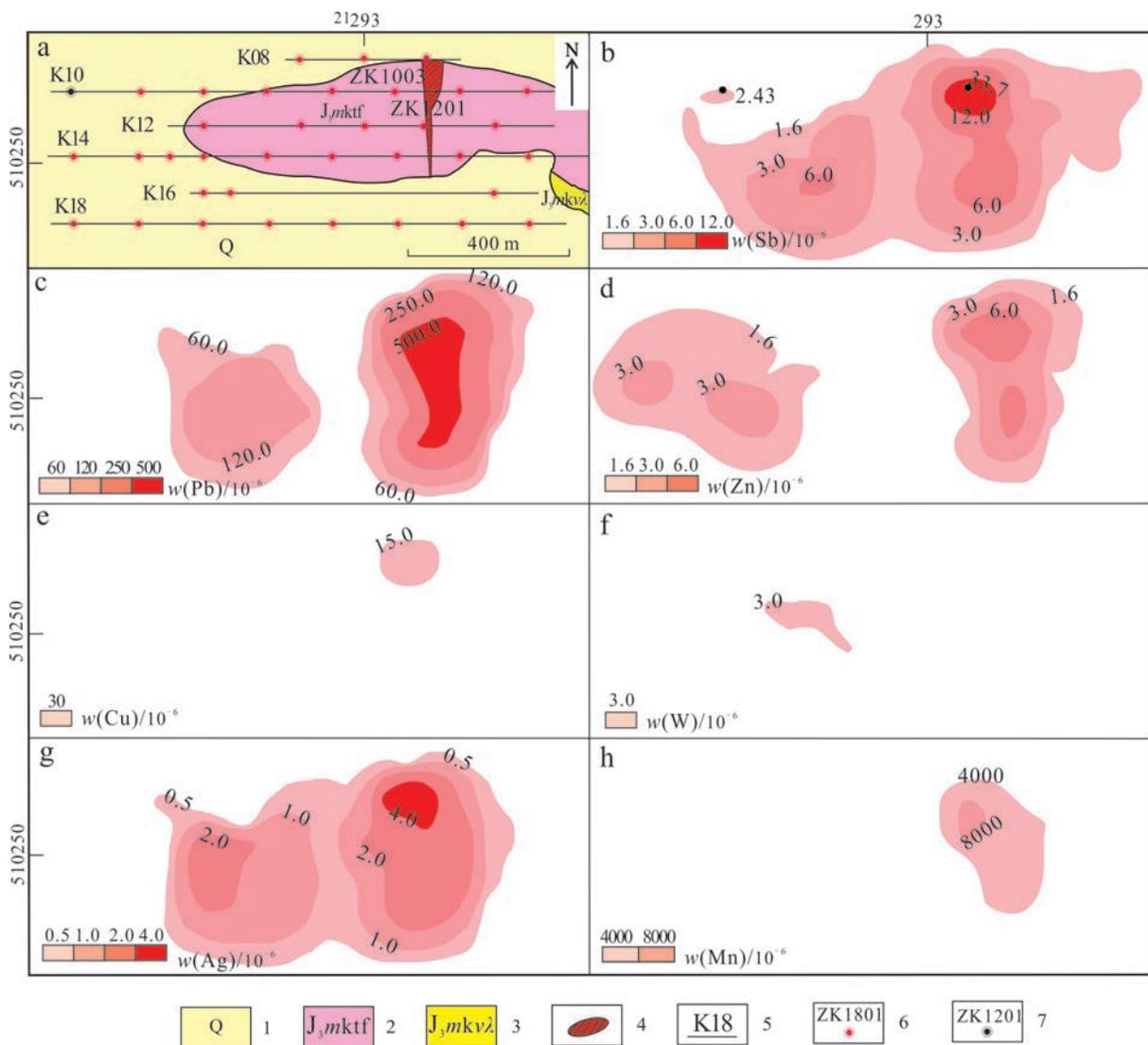


图 10 复兴屯矿区 AP1-1 化探异常剖析图

1—第四系;2—满克头鄂博组晶屑、岩屑凝灰岩;3—满克头鄂博组珍珠岩;4—矿化体;5—勘探线及编号;6—见矿钻孔及编号;7—未见矿钻孔及编号

Fig.10 Analysis map of AP1-1 geochemical anomaly in the Fuxingtun ore district

1—Quaternary; 2—Crystal and lithic tuff of Manketouebo Formation; 3—Perlite of Manketouebo Formation; 4—Mineralized bodies; 5—Exploration line; 6—Ore drill hole location and its number; 7—Dry drillhole location and its number

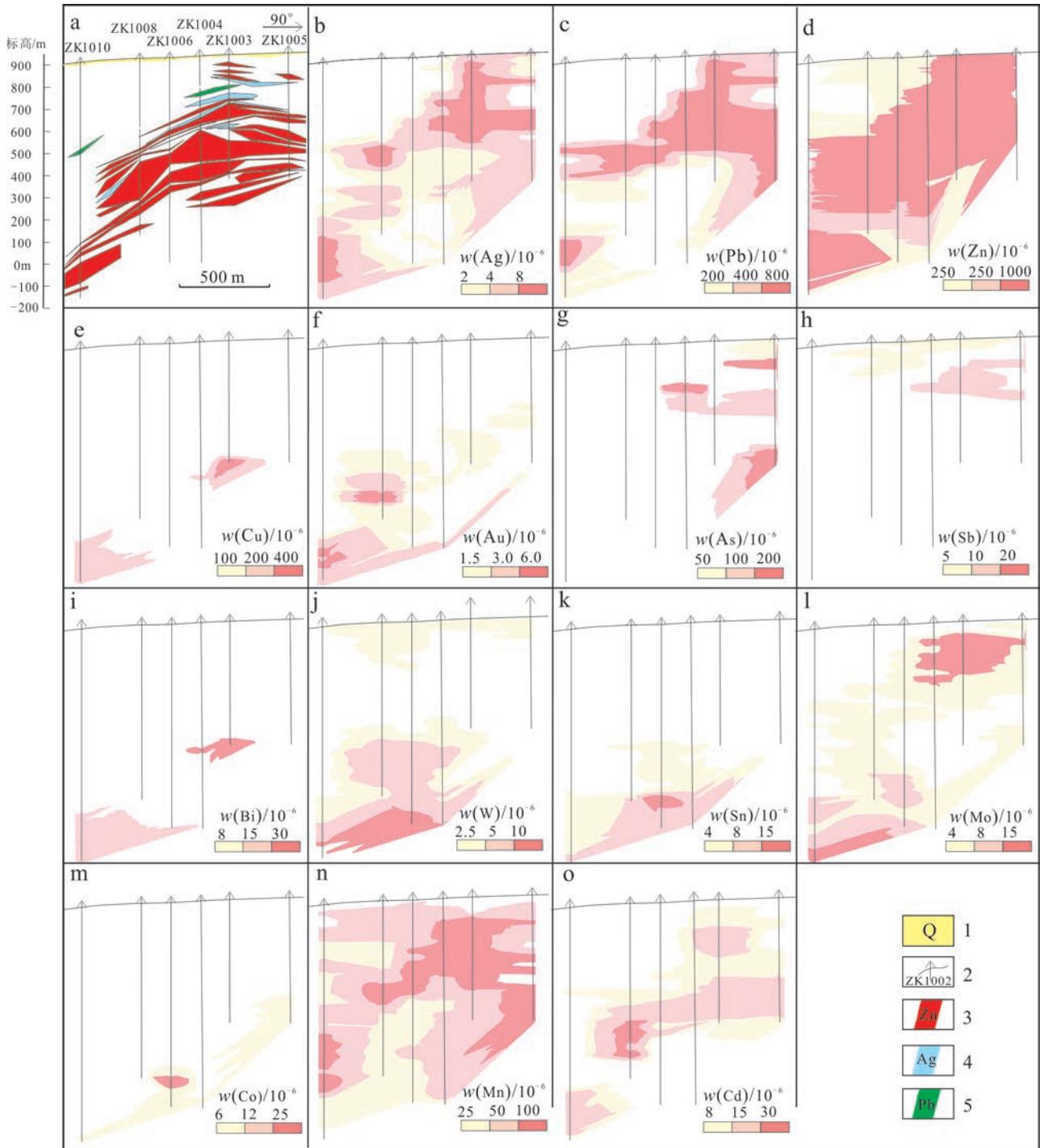


图 11 复兴屯矿区 K10 勘探线原生晕剖面图

1—第四系; 2—钻孔; 3—锌矿体; 4—银矿体; 5—铅矿体

Fig.11 Primary halo profile of the exploration line K10 in Fuxingtun ore district

1—Quaternary; 2—Drill hole; 3—Zinc ore body; 4—Silver ore body; 5—Lead ore body

矿断裂的方向主要为NW-NWW向、NE向, 次为EW向, 因此, 断裂构造的复合部位成为矿化比较集中的部位。且在多个矿区形成了网格状的构造体系(吕新彪等, 2020)。研究区内北东向构造与后期北西向

构造形成网格状构造形态<控制了银铅锌矿体的空间分布。

(3) 环状火山机构

矿区内晚侏罗世火山岩的分布及火山机构的北

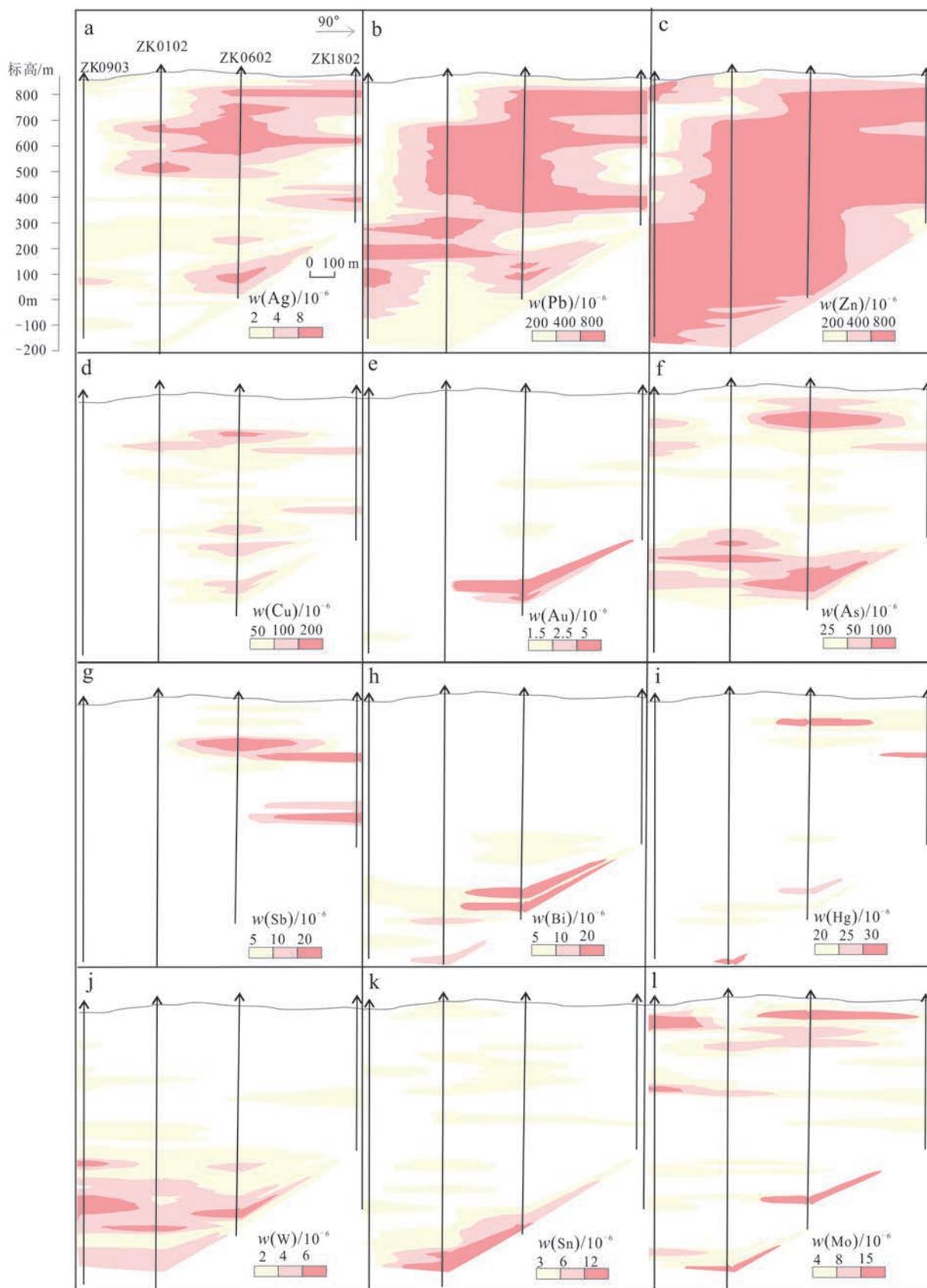


图 12 复兴屯矿区 Z3 线原生晕剖面图

Fig. 12 Primary halo profile of the line Z3 in the Fuxingtun ore district

东向串珠状排列明显受隐伏基底断裂构造的控制。古生代基地断裂构造的持续活化诱发了大规模的陆内岩浆作用的发生,使得北东向串珠状阿拉达坂火山构造洼地内被火山岩大面积覆盖,环状及放射状断裂主要出露于火山机构周围及火山喷发中心,围绕火山口呈环状或放射状展布,是火山机构的重要组成部分。同时也是成矿物质主要沉淀地段,复兴屯1区大型银铅锌多金属矿床即赋存于此。矿化范围被严格地限制在火山机构与边界断裂构造交汇部位,因此,破火山口断陷盆地、火山洼地及放射状断裂共同叠加控制矿体的形态、规模(高维等,2016),研究区内银铅锌矿体主要分布于环状火山机构(破火山口、火山盆地)内,火山热液活动往往在该区域发育,是矿化较为集中的部位,为本区找矿的重要靶区。

(4) 矿化蚀变标志

银铅锌矿主要产于晚侏罗世一早白垩世陆相火山碎屑岩内,地表矿化蚀变主要为高岭土化、菱锰矿化、硅化、叶腊石化、高岭石化、绿泥石化、碳酸盐化;钻孔深部主要为黄铁矿化、铅锌矿化,因此产于晚侏罗世一早白垩世陆相火山碎屑岩内的高岭石化、菱锰矿化、硅化、叶腊石化、绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿化、铅锌矿化是主要的矿化蚀变标志。

(5) 地球化学标志

1:5水系沉积物Ag、Pb、Zn、Mo、Sb、Mn元素组合异常,特别是Ag、Pb、Zn异常套合较好、浓集中心明显、异常强度高地段是找矿有利地区。1:1万土壤测量Ag、Pb、Zn、Sb元素组合异常,特别是上述元素均存在3~4级浓度分带地区常对应矿床位置。矿床原生晕分带显示:前缘晕主要为As、Sb、Hg、Ag组合,近矿晕以Ag、Pb、Zn组合为主,尾晕为Cd、Cu、Au、Bi、Co、Sn、W组合。因此,化探Ag、Pb、Zn、Sb(Mo、Mn)元素组合异常是复兴屯银铅锌矿床的主要地球化学找矿标志。

(6) 地球物理标志

研究显示,银铅锌矿体对应火山机构、环形构造内外侧、断裂构造发育、火山洼地(火山机构小规模塌陷)对应环状平稳负磁异常,磁场强度 ΔT 在-100~200 nT、负异常边部或正负异常交界处零等值线上是寻找多金属矿床重要标志。

激电异常显示视电阻率一般 $<300 \Omega \cdot m$,视极化率值以 $3.0\% > \eta_s > 1.80\%$ 。因此找矿过程中须注意平稳环形负磁异常、低阻高极化激电异常对应地区是重要的成矿地段。

6 结 论

(1) 内蒙古科尔沁右翼前旗复兴屯超大型银铅锌矿受火山机构内部的(破火山口及塌陷的火山盆地)水压裂隙及隐爆角砾岩-网格状断裂构造体系控制,成因类型为陆相火山-次火山热液型矿床。

(2) 矿区内具稳定环状负磁异常,场值一般在-250~0 nT之间;矿区整体呈低阻高极化激电异常特征,矿体主要集中分布在低阻区,视电阻率一般 $<300 \Omega \cdot m$,视极化率值以 $3.0\% > \eta_s > 1.80\%$ 找矿效果较好,具低阻高极化特征;矿区内Ag、Pb、Zn、Cu、Mo异常尤为显著,异常规模较大,套合较好;垂向上前缘晕(浅部)元素主要以As、Sb、Hg、Ag为主,近矿晕(中部)元素以Ag、Pb、Zn为主,并伴有Cu、Au,尾晕(深部)元素以Mo、Bi、Sn和少量的W为主,与典型热液矿床原生晕垂向分带基本一致。

(3) 复兴屯超大型银铅锌矿床找矿标志为晚侏罗世一早白垩世陆相酸性火山碎屑岩、网格状断裂构造体系、火山机构(环状放射性断裂围绕破火山口、塌陷的火山盆地展布)、矿化蚀变(高岭石化、菱锰矿化、碳酸盐化、硅化、叶腊石化、黄铁矿化、铅锌矿化)、平面及垂向Ag-Pb-Zn-Cu-Au元素异常组合、环状平稳负磁异常和低阻高极化激电异常。

(4) 该矿床的发现为大兴安岭地区寻找隐伏矿体提供了一种有效的勘查模式,工作思路为:综合大比例尺地物化扫面圈定靶区-精细地物化评价定位矿体-工程验证定性,勘查模式为:酸性火山-碎屑岩+特征蚀变+火山机构+网格状断裂构造系统+Ag、Pb、Zn异常+低电阻率高极化率异常+工程验证。

致 谢 中国地质科学院矿产资源研究所研究员武广老师以及内蒙古国土资源勘查有限责任公司各位专家学者提出的宝贵修改意见,对论文质量的提高至关重要,同时强化了作者的学术严谨意识,项目组人员尤其是顾宁同志付出了辛苦劳动,在此一并致以最真诚的感谢。

References

- Beus A A, and Grigorian S V. 1977. Geochemical exploration methods for mineral deposits[M]. Applied Publishing Ltd., USA. 1-270.
Chen Y Q, Han X L, Zhao H J, Cheng Z Z, Tang Y and Chen W, 2011.

- Characteristics of primary halo zonation and prediction pattern of deep orebody of the Huaaobaote Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Earth Science*, 36(2): 236-246(in Chinese with English abstract).
- Dong X Z, Zhou Z H, Wang R H, Li J W and He S J. 2014. Geochronology and geochemistry of granite in Aobaotu Pb-Zn deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 33(2): 323-338(in Chinese with English abstract).
- Gao W, Shu Q Xie S S, and Cai S K. 2016. Aeromagnetic anomalies of Cenozoic volcanic structure in northern Hainan island and its geological significance[J]. *Geological Review*, 60(1):237-249(in Chinese with English abstract).
- He F, Yang J J and Zhang T. 2016. Minerals resource prediction of the volcanic lead-zinc deposits in the Greater Khingan Range of Inner Mongolia[J]. *Journal of Geology*, 40(3):424-432(in Chinese with English abstract).
- He P, Guo S, Zhang T F, Su H and Fu Q L. 2018. The sources of ore-forming materials and genesis of the Zhamuqin Pb-Zn-Ag polymetallic deposit in the middle-southern segment of Da Hinggan Mountains: Constraints from S, Pb isotope geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12): 3597-3610(in Chinese with English abstract).
- Jia J F, Qiao Z H and Liu F Q. 2017. Inner Mongolia magnetic field characteristics and geological applications[M]. Beijing: China University of Geosciences Press. 1-226(in Chinese).
- Jiang S H, Zhang L L, Liu Y F, Liu C H, Kang H and Wang F X. 2018. Metallogeny of Xing-Meng Orogenic Belt and some related problems[J]. *Mineral Deposits*, 37(4):671-711(in Chinese with English abstract).
- Ma Y B, Xing S W, Xiao K Y, Zhang T, Tian F, Ding J H, Zhang Y and Ma L K. 2016. Geological characteristics and mineral resource potential of the Cu-Mo-Ag metallogenic Belt in Daxing'anling Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(7): 1316-1333(in Chinese with English abstract).
- Li J Y, Liu J F, Qu J F, Zheng R G, Zhao S, Zhang J, Sun L X, Li Y F, Yang X P, Wang L J and Zhang X W. 2019. Major geological features and crustal tectonic framework of Northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(10): 2989-3016(in Chinese with English abstract).
- Li S, Wang T, Wilde S A, and Tong Y. 2013. Evolution, source and tectonic significance of Early Mesozoic granitoid magmatism in the Central Asian Orogenic Belt(central segment) [J]. *Earth-Science Reviews*, 126: 206-234.
- Li W G, Li Q F and Jiang W D. 1996. Stratigraphy (lithostratic) of Inner Mongolia autonomous region[M]. Beijing: China University of Geosciences Press. 245-287(in Chinese).
- Lü X B, Yang J S, Fan X J, Wei W, Mei W, Ruan B X, Wang X D and Gun M S. 2020. Geology and genesis of lead-zinc polymetallic deposits in the Great Xing'an Range[J]. *Earth Science*, 45(12): 4399-4427(in Chinese with English abstract).
- Ruan B X, Lü X B, Liu S T and Yang W. 2013. Genesis of Bianjiadayu-an Pb-Zn-Ag deposit in Inner Mongolia: Constraints from U-Pb dating of zircon and multi-isotope geochemistry[J]. *Mineral Deposits*, 32(3): 501-514(in Chinese with English abstract).
- Shao H M and Zhang L Q. 2016. The main mineralization belts and metallogenic seriesin[M]. Beijing: China University of Geosciences Press. 38-43(in Chinese).
- Shen P, Pan H D, Li C H, Feng H X, Wu Y, Shi F P, Guo X C and Li W G. 2020. Carboniferous ore-controlling volcanic apparatus and metallogenic models for the large-scale iron deposits in the western Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(9): 2845-2868(in Chinese with English abstract).
- Tang J, Xu W L, Wang F, Wang W, Xu M J and Zhang Y H. 2014. Geochronology and geochemistry of Early-Middle Triassic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean[J]. *Lithos*, 184-187: 1-16.
- Wu FY, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A, and Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in north-eastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1-30.
- Wu G, Wang G R, Liu J, Zhou Z H, Li T G and Wu H. 2014. Metallogenic series and ore-forming pedigree of main ore deposits in Northern Great Xing'an Range[J]. *Mineral Deposits*, 33(6):1127-1150(in Chinese with English abstract).
- Wu X L, Zhao J F, Liu W Y, Wu Guang, Jiang B, Li Z Y and Sun H J. 2021. New discovery of tin mineralization in Shuangjianzishan Ag polymetallic deposit, Inner Mongolia and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 40(3):631-635(in Chinese with English abstract).
- Xu B, Zhao P, Wang Y Y, Liao W, Luo Z W, Bao Q Z and Zhou Y H. 2013. The pre-Devonian tectonic framework of Xing'an-Mongolia orogenic belt (XMOB) in North China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 183-196.
- Xu B, Wang Z W, Zhang L Y, Wang Z H, Yang Z N and He Y. 2018. The Xing-Meng intracontinent Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(10):2819-2844(in Chinese with English abstract).
- Xu L Q, Zhang T, Zhang M, Zhang Y Q, Zhang Y Q, Kang X L, Xu C and Han Z Q. 2016. Summary of ore-forming regularity of important mineral resources in Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 35(5): 966-980(in Chinese with English abstract).
- Xu W L, Pei F P, Wang F, Meng E, Ji W Q, Yang D B and Wang W. 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167-193.
- Zhou F H, Ouyang Z Z and Yang DN. 2014. Geology and genesis of the Zhamugin lead-zinc polymetallic deposit in Inner Mongolia[J]. *Geology and Resources*, 23(1): 79-96(in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Gao X, Ouyang H G, Liu J and Zhao J Q. 2019. Formation mechanism and intrinsic genetic relationship between tin-tungsten lithium mineralization and peripheral lead-zinc-silver-copper mineralization: Exemplified by Weilasituo tin-tungsten-lithium

polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 38(5): 1004-1022(in Chinese with English abstract).

Zhu X S, Lu M J, Guan Y and Zhang Y H. 2018. Experiment on revealing the regional metallogenic structure based on the aeromagnetic data in southern Da Hinggan Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 37(2/3): 299-313(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈永清, 韩学林, 赵红娟, 程志中, 唐宇, 陈武. 2011. 内蒙敖包特 Pb-Zn-Ag 多金属矿床原生晕分带特征与深部矿体预测模型[J]. 地球科学, 36(2): 236-246.
- 董旭舟, 周振华, 王润和, 李进文, 何姝. 2014. 内蒙古敖包吐铅锌矿床花岗岩类年代学及其地球化学特征[J]. 矿床地质, 33(2): 323-338.
- 高维, 舒晴, 谢顺盛, 蔡水库. 2016. 琼北新生代火山构造的航磁异常特征及其地质意义[J]. 地质评论, 60(1): 237-249.
- 何鹏, 郭硕, 张天福, 苏航, 付启龙. 2018. 大兴安岭中南段扎木钦铅锌银多金属矿床成矿物质来源及矿床成因: 来自 S、Pb 同位素的制约[J]. 岩石学报, 34(12): 3597-3610.
- 贺锋, 杨建军, 张彤. 2016. 内蒙古大兴安岭地区火山岩型铅锌矿床预测[J]. 地质学刊, 40(3): 424-432.
- 贾金福, 乔占华, 刘凤岐. 2017. 内蒙古自治区磁场特征及地质应用研究[M]. 北京: 中国地质大学出版社. 1-226.
- 江思宏, 张莉莉, 刘翼飞, 刘春花, 康欢, 王丰翔. 2018. 兴安造山带成矿规律及若干科学问题[J]. 矿床地质, 37(4): 671-711.
- 李锦轶, 刘建峰, 曲军峰, 郑荣国, 赵硕, 张进, 孙立新, 李永飞, 杨晓平, 王励嘉, 张晓卫. 2019. 中国东北地区主要地质特征和地壳构造格架[J]. 岩石学报, 35(10): 2989-3016.
- 李文国, 李庆福, 姜万德. 1996. 内蒙古自治区岩石地层[M]. 北京: 中国地质大学出版社. 245-287.
- 吕新彪, 杨俊声, 范谢均, 魏巍, 梅微, 阮班晓, 王祥东, 袁民汕. 2020. 大兴安岭地区铅锌多金属矿床时空分布、地质特征及成因[J]. 地球科学, 45(12): 4399-4427.
- 马玉波, 荆树文, 肖克炎, 张彤, 田放, 丁建华, 张勇, 马路阔. 2016. 大兴安岭 Cu-Mo-Ag 多金属成矿带主要地质成矿特征及潜力分析[J]. 地质学报, 90(7): 1316-1333.
- 阮班晓, 吕新彪, 刘申态, 杨梧. 2013. 内蒙古边家大院铅锌银矿床成因—来自锆石 U-Pb 年龄和多元同位素的制约[J]. 矿床地质, 32(3): 501-514.
- 邵和明, 张履桥. 2016. 内蒙古自治区主要成区(带)和成矿系列[M]. 北京: 中国地质大学出版社. 38-43
- 申萍, 潘鸿迪, 李昌昊, 冯浩轩, 武阳, 石福品, 郭新成, 李文广. 2020. 新疆西天山大型铁矿床石炭纪控矿火山机构及成矿模式[J]. 岩石学报, 36(9): 2845-2868.
- 吴晓林, 赵骏峰, 刘文元, 武广, 江彪, 李志远, 孙洪军. 2021. 内蒙古双尖子山银多金属矿床锡矿化的发现及其意义[J]. 矿床地质, 40(3): 631-635.
- 武广, 王国瑞, 刘军, 周振华, 李铁刚, 吴昊. 2014. 大兴安岭北部主要金属矿床成矿系列和区域矿床成矿谱系[J]. 矿床地质, 33(6): 1127-1150.
- 徐备, 王志伟, 张立杨, 王智慧, 杨振宁, 贺跃. 2018. 兴安陆内造山带[J]. 岩石学报, 34(10): 2819-2844.
- 许立权, 张彤, 张明, 张玉清, 张永清, 康小龙, 许晨, 韩宗庆. 2016. 内蒙古自治区重要矿种成矿规律综述[J]. 矿床地质, 35(5): 966-980.
- 周富华, 欧阳兆灼, 杨丹妮. 2014. 内蒙古扎木钦铅锌多金属矿床地质特征及成因初探[J]. 地质与资源, 23(1): 79-96.
- 周振华, 高旭, 欧阳荷根, 刘军, 赵家齐. 2019. 锡钨锂矿化与外围脉状铅锌银铜矿化的内在成因关系和形成机制——以内蒙古维拉斯托锡钨锂多金属矿床为例[J]. 矿床地质, 38(5): 1004-1022.
- 朱小三, 卢民杰, 管焯, 张颖慧. 2018. 基于航磁资料的大兴安岭南部区域成矿构造填图尝试[J]. 地质通报, 37(2/3): 299-313.