

王学阳,杨言辰,刘志宏,等. 长江中下游成矿带大金山地区综合信息找矿效果及深部找矿潜力分析. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(1): 125-138. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230239.

Wang Xueyang, Yang Yanchen, Liu Zhihong, et al. Effect and Deep Potential of Comprehensive Information Prospecting in the Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt, Dajinshan Area. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 125-138. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230239.

# 长江中下游成矿带大金山地区综合信息 找矿效果及深部找矿潜力分析

王学阳<sup>1,2</sup>, 杨言辰<sup>1</sup>, 刘志宏<sup>3</sup>, 张继武<sup>2</sup>, 戴台鹏<sup>2</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130026

2. 长春黄金研究院有限公司, 长春 130012

3. 江苏省地质调查研究院, 南京 210018

**摘要:**大金山地区大地构造位置处于扬子板块北缘,长江中下游成矿带宁芜矿集区,该地区成矿地质条件优越,具有进一步找矿的潜力。为揭示大金山地区找矿潜力,本文结合区域成矿地质背景、大金山地区地质特征,对激电中梯、土壤地球化学测量成果开展相关性分析。研究表明:北西向断裂破碎带显示高阻高充电异常,而北西向断裂带控制了矿体的产出,因此高阻高充电异常可间接指导找矿;土壤地球化学测量圈定的 10 处综合异常具有一定找矿潜力。在高阻高充电异常及强烈 Au 异常的视电阻率异常  $R_1$  和  $R_5$ 、视充电率异常  $M_2$ 、综合异常 HT-10 的套合区域布设了 2 个钻孔,探获了 3 条铜矿体、3 条硫铁矿体,取得了找矿突破。通过与区域内成矿特征相似的典型矿床(大岭岗金铜矿床、南门头铜矿床)进行对比,结合钻孔岩心原生晕分析,认为大金山地区深部具有良好的找矿潜力。根据斑岩型铜金矿床的赋矿岩石、构造环境和深部探获的斑状二长花岗岩,认为大金山地区深部有盲矿体存在,且具有探获斑岩型铜金矿床的潜力。

**关键词:**综合信息;典型矿床;原生晕;深部找矿潜力;大金山地区;宁芜矿集区;长江中下游成矿带;斑岩型铜金矿床

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230239

中图分类号:P618.4;P618.51

文献标志码:A

收稿日期:2023-09-15

作者简介:王学阳(1990—),男,工程师,博士研究生,主要从事矿床地质、矿产勘查方面的研究,E-mail:553970726@qq.com

通信作者:刘志宏(1984—),男,高级工程师,硕士,主要从事矿产勘查方面的研究,E-mail:287738032@qq.com

基金项目:中国地质调查局发展研究中心项目(中地调研合同[2020]第 296 号);江苏省地质局地质勘查基金项目(苏地质发[2022]82 号);江苏省地质勘查基金项目(苏财建[2016]140 号);江苏省国土资源厅找矿项目(苏国土资函[2010]8 号)

Supported by the Development Research Center Project of China Geological Survey (Zhongdi Research Contract [2020] No. 296), the Geological Exploration Fund Project of Jiangsu Provincial Geological Bureau (Su Geological Development [2022] No. 82), the Jiangsu Provincial Geological Exploration Fund Project (Su Cai Jian [2016] No. 140) and the Exploration Project of Jiangsu Provincial Department of Land and Resources (Su Guo Tu Zi Han [2010] No. 8)

# Effect and Deep Potential of Comprehensive Information Prospecting in the Middle – Lower Yangtze Metallogenic Belt, Dajinshan Area

Wang Xueyang<sup>1,2</sup>, Yang Yanchen<sup>1</sup>, Liu Zhihong<sup>3</sup>, Zhang Jiwu<sup>2</sup>, Dai Taipeng<sup>2</sup>

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130026, China

2. Changchun Gold Research Institute Co., Ltd., Changchun 130012, China

3. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China

**Abstract:** The Dajinshan area is located in the Ning-Wu ore concentration zone along the Middle – Lower Yangtze metallogenic belt at the northern margin of Yangtze plate. The area has favorable geological conditions for mineralization and shows potential for further prospecting. To identify the prospecting potentials in Dajinshan area, this study performed a correlation analysis between induced polarization(IP) medium gradient survey and soil geochemical survey results. The results show that a NW-trending fractured and broken zone exhibits high resistance and chargeability anomalies, which are indicative of controlling mineralization. These anomalies can thus serve as indirect guides for prospecting. Ten comprehensive anomalies were identified through soil geochemical surveys that indicate significant prospecting potential. Two drill holes were drilled in areas where high resistance, chargeability, and strong Au anomalies overlapped, leading to the discovery of three copper orebodies and three pyrite orebodies, achieving a major prospecting advancement. By comparing these findings with similar metallogenic characteristics (Dalinggang gold-copper deposit, Nanmentou copper deposit), and analyzing the primary halo in drill core samples, it is believed that the deeper parts of the Dajinshan area likely have promising prospecting potentials. Based on the ore-bearing rocks, tectonic environment, and the discovery of porphyritic monzonite granites in the deeper parts of porphyry-type copper-gold deposits, it is believed that blind orebodies may exist at depth, suggesting the potential for porphyry-type copper-gold deposits.

**Key words:** comprehensive information; typical deposits; primary halo; prospecting potential in the deep part; Dajinshan area; Ning-Wu ore concentration area; Middle – Lower Yangtze metallogenic belt; porphyry-type copper-gold deposit

## 0 引言

大金山地区位于长江中下游成矿带,该成矿带作为环太平洋成矿域的重要组成部分,经历了复杂而又多期的岩浆-构造活动,成矿地质条件极为优越,产出了大量斑岩-矽卡岩型铜金铁矿床和玢岩型铁矿床,是中国重要的铁铜金多金属成矿带<sup>[1-5]</sup>。根据产出矿种及成矿作用的差异,将长江中下游成矿带划分为 8 个矿集区,分别为鄂东南、九瑞、安庆—贵池、庐枞、铜陵、宣城、宁芜和宁镇等矿集区<sup>[6]</sup>。其中,大金山地区位于宁芜矿集区内。

随着科技信息飞速发展及找矿信息的大量累

积,找矿研究已进入数据密集型科学范畴,使得综合信息驱动的找矿预测及矿体空间定位成为当前的研究热点与前沿<sup>[7-9]</sup>。综合信息找矿是系统研究一定时空范围内成矿作用的综合产物,包括利用成矿地质特征、地球物理特征、地球化学特征、遥感特征等信息<sup>[10-15]</sup>,对成矿信息进行综合分析,进而进行找矿预测及矿体空间定位,且效果显著<sup>[16-19]</sup>。

对于长江中下游成矿带,前人<sup>[20-23]</sup>进行了许多综合信息找矿工作,且取得了显著成果。杨晓勇等<sup>[20]</sup>对长江中下游成矿带内的安徽贵池地区燕山期岩浆岩与铜金钼成矿关系进行了研究,通过利用地质-地球化学-地球物理等综合信息找矿方法,确

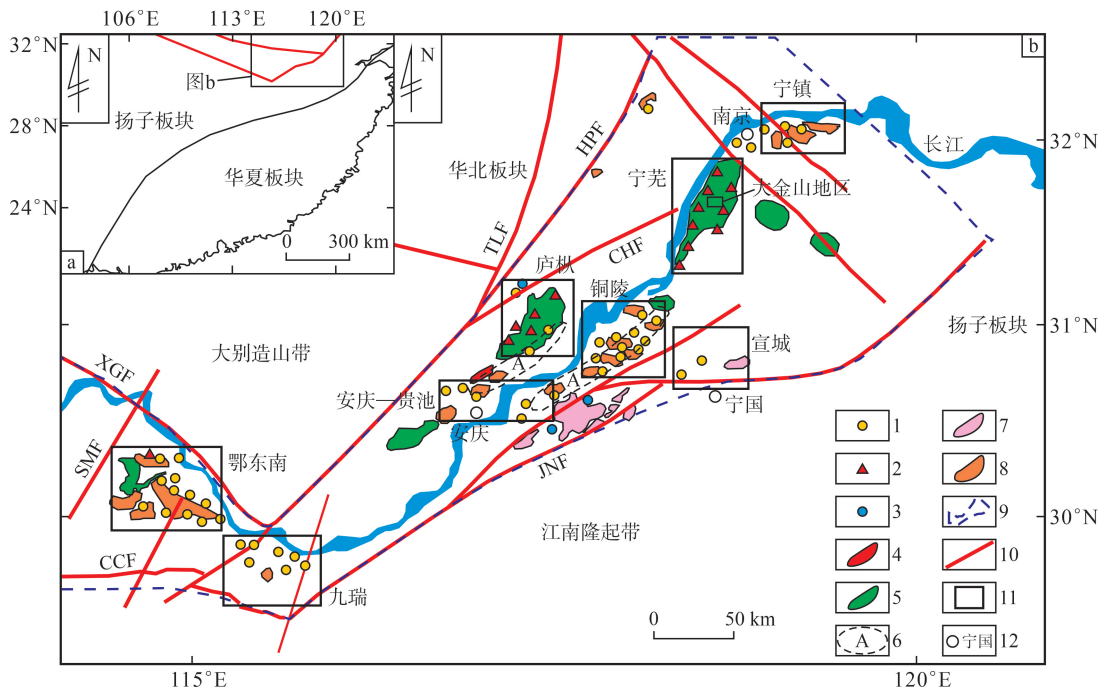
定了第二期(125 Ma)岩浆活动与铜金钼成矿关系密切,并建立了找矿标志,为后续找矿提供了科学依据;黄宗理等<sup>[21]</sup>利用地球物理及基于深地震反射资料的重磁交叉梯度等综合信息找矿方法,对长江中下游成矿带及其重点矿集区——九瑞矿集区和铜陵矿集区开展了找矿预测,有效圈定了重点找矿靶区,确定了此类方法的有效性;毛景文等<sup>[22]</sup>通过对长江中下游成矿带成矿作用新进展及存在问题的分析,认为采用红外技术(SWIR)及三维成矿预测等综合信息找矿方法,为寻找隐伏矿体,取得找矿突破增添了新途径。但是,对于长江中下游成矿带宁芜矿集区内的大金山地区还未开展过综合信息找矿工作,前人仅从单一角度,如地质填图、总结区域找矿标志等方面对大金山地区开展了研究工作<sup>[23]</sup>,导致该地区找矿工作一直未取得突破。因此,本研究通过对大金山地区找矿信息进行综合分析的基础上,对成矿有利区域布设了探矿工程,取得了找矿突破,结合与典型矿床对比及原生晕分析,对深部找矿潜力进行了分析,以期对区内后续找矿工作提供支撑。

### 1 成矿地质背景

大金山地区大地构造位置处于扬子板块北缘(图 1a),南北两侧分别为大别造山带、江南隆起带(图 1b)。其成矿区带划分属于长江中下游成矿带内的宁芜矿集区,夹持于长江断裂、南京—湖熟断裂、方山—小丹阳断裂、芜湖断裂之间(图 2)。宁芜矿集区除了产出众多铁矿床之外,还广泛发育一系列与火山—侵入作用相关的热液型脉状铜金矿床<sup>[1,23-25]</sup>。

区域地层发育,主要出露中生界(图 2),包括中三叠统黄马青组( $T_2h$ )、下侏罗统钟山组( $J_1z$ )、上侏罗统龙王山组( $J_3l$ )与大王山组( $J_3d$ )、下白垩统姑山组( $K_1g$ )、上白垩统娘娘山组( $K_2n$ )等。其中,黄马青组主要发育砂岩、灰岩,与铁矿床形成关系密切。龙王山组、大王山组等为一套以安山岩、火山角砾岩、凝灰岩为主的火山沉积建造,与铜、金、铁等矿床形成关系密切<sup>[25]</sup>。

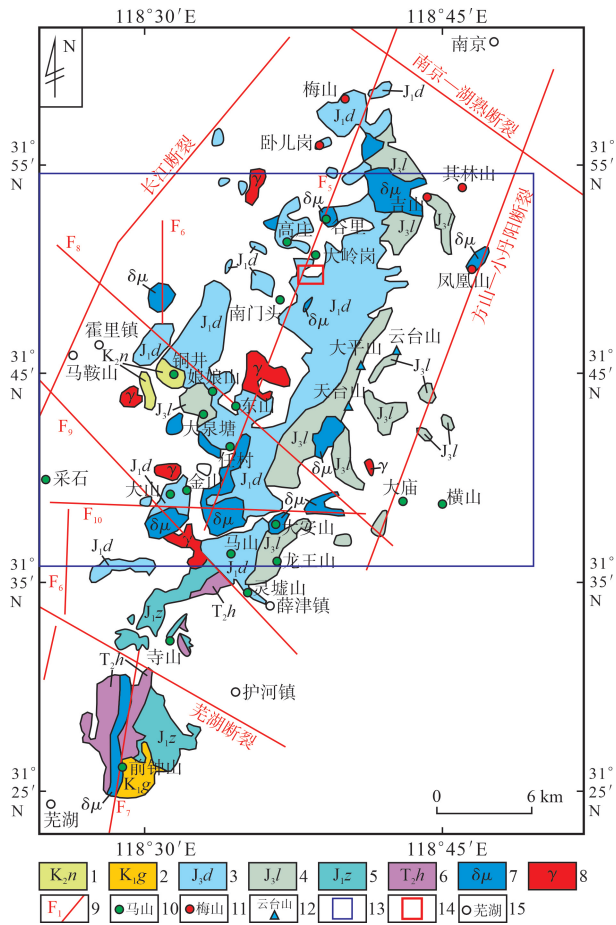
区域构造发育,主要为褶皱和断裂(图 3)。褶



1. 铜金多金属矿床;2. 硫铁矿床;3. 钨多金属矿床;4. 中带 145~135 Ma 中酸性侵入岩;5. 中带 135~127 Ma 火山岩;6. 中带 127~123 Ma A 型花岗岩;7. 南亚热带 147~127 Ma 中酸性侵入岩;8. 北亚热带 147~127 Ma 中酸性侵入岩;9. 长江中下游成矿带范围;10. 断裂;11. 矿集区;12. 地名。XGF. 襄樊—广济断裂;TLF. 郟庐断裂;HPF. 黄栗树—破凉亭断裂;SMF. 商麻—团风—梁子湖断裂;CCF. 崇阳—常州断裂;CHF. 滁河断裂;JNF. 江南断裂。据文献<sup>[1]</sup>修编。

图 1 大金山地区大地构造位置图(a)及成矿区带划分图(b)

Fig.1 Geotectonic location map (a) and metallogenic zone division map (b) of Dajinshan area



1. 娘娘山组;2. 姑山组;3. 大王山组;4. 龙王山组;5. 钟山组;6. 黄马青组;7. 闪长玢岩;8. 花岗岩;9. 断裂及编号;10. 铜(金)矿床及名称;11. 铁矿床及名称;12. 硫铁矿床及名称;13. 图 3 范围;14. 研究区;15. 地名。据文献[24]修编。

图 2 宁芜矿集区地质矿产图

Fig.2 Geology and minerals in Ning - Wu ore concentration area

皱主要为宁芜向斜、凤凰山背斜、陶吴背斜、大平山背斜。其中,宁芜向斜为主要褶皱,向斜中心位于霍里镇—梅山一线,轴向 10°~60°。东南翼在大平山、云台山一线,出露火山岩,向斜西北翼位于马鞍山至采石一带,受长江断裂切割,地层出露不如东南翼完整。断裂按走向可分为北东向断裂、北西向断裂及东西向断裂。其中:北东向断裂主要有长江断裂、吉山—朱门断裂、方山—小丹阳断裂等。北西向断裂主要有板桥—凤凰山断裂、江宁—横溪断裂和铜井—小丹阳断裂等。北东向断裂及北西向断裂控制了区域内主要金、铜、铁等矿床的空间展布,是主要的控矿构造[24-27]。

区域岩浆岩发育,火山-岩浆活动主要发生在燕

山期。侵入岩岩性主要为花岗岩及闪长玢岩。花岗岩及闪长玢岩为区域内铁、铜、金矿床的成矿母岩。侵入岩均有不同程度的蚀变现象,发育较为普遍的有碳酸盐化、高岭土化、绢云母化等,部分具有磁铁矿化、黄铁矿化和矽卡岩化。总之,不同位置的侵入岩虽略有差异,但副矿物成分相近,是同源异相产物,可能为花岗岩、花岗闪长岩的边缘相,由于侵入的部位和围岩的介质不同,而形成略有差异的岩浆产物[26]。

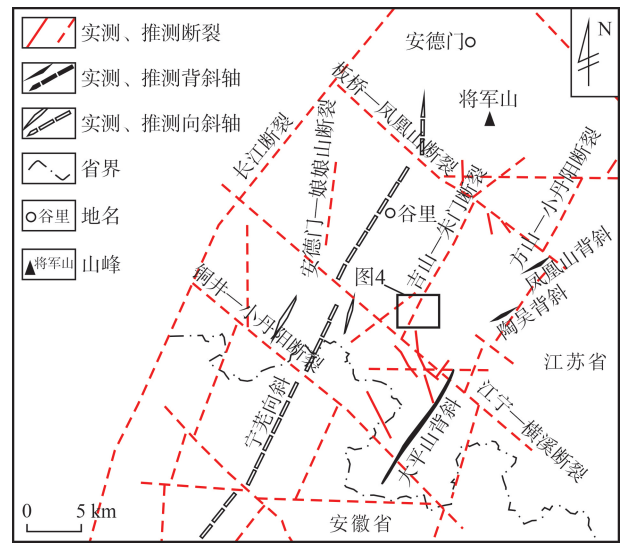


图 3 宁芜矿集区北部构造分布特征

Fig.3 Tectonic distribution characteristics in the northern part of Ning - Wu ore concentration area

区域内矿产丰富,金属矿产以铁、铜、金、硫铁为主。其中,铁矿床主要有梅山(大型)、吉山(大型)、卧儿岗(中型)、凤凰山(中型)、其林山(中型)等,集中分布于宁芜矿集区北段,构成梅吉矿田。硫铁矿床主要分布于宁芜矿集区东南部,以云台山(中型)、天台山(中型)等硫铁矿床为主。铜金矿床主要分布于宁芜矿集区中南部,有铜井铜金矿床、大岭岗金铜矿床、谷里铜矿床、大平山铜矿床、南门头铜矿床等[23-27]。

大金山地区与同一矿集区内的大岭岗金铜矿床和南门头铜矿床的地理位置十分相近,且成矿地质条件也极为相似。大岭岗金铜矿床位于大金山地区北部,为近年来发现的铜金矿床,主要探获了大岭岗、梨山、石头山等 3 条金铜矿体,目前查明矿体深度超过 300 m,且该深度以下矿体未尖灭,矿体向深部的延伸未得到控制[27],预测大岭岗金铜矿床沿倾

斜方向延伸至数百 m 仍会有厚大矿体存在。南头门铜矿床位于大金山地区西南部,是近年来在宁芜北部南门头地区深部矿产勘查中,于 ZK4001 和 ZK4331 钻孔中发现的热液型脉状铜矿床,主要探获了 3 个铜矿体<sup>[25-26]</sup>(I 号矿体、II 号矿体、III 号矿体),目前查明矿体深度超过 1 100 m。侯丹丹等<sup>[25-26]</sup>通过流体包裹体测试分析,认为该矿床成矿深度为 480~1 320 m,且深部存在花岗岩体,花岗岩体与矿床形成具有成因联系,为成矿提供了成矿物质及热源,并认为南门头铜矿床深部具有进一步找矿的潜力。因此,笔者认为大金山地区无论是地表还是深部,均具有实现找矿突破的潜力。

## 2 研究区地质特征

大金山地区地层发育,出露地层为上侏罗统龙王山组、大王山组,以及第四系(Q)(图 4),经钻孔揭露深部有下一中侏罗统象山群( $J_{1-2}Xn$ )。其中,大王山组可细分为下段( $J_3d^1$ )和中段( $J_3d^2$ ),且构成了矿区地层的主要部分。大王山组中段岩性主要为安山质火山碎屑岩,以断裂破碎带为界,以东主要岩性有安山岩、安山质角砾凝灰岩、安山质火山角砾岩等,以西分布有角砾熔岩。大王山组下段岩性主要为沉积相的沉凝灰岩、沉角砾凝灰岩等。钻孔中见

到铜矿化体的围岩为大王山组中段安山质火山碎屑岩,与大岭岗金铜矿床含矿围岩相似。此外,安山质火山碎屑岩中黄铁矿化也较为发育,局部硫含量可达边界品位及以上。

大金山地区构造以断裂及断裂破碎带为主。断裂走向主要为北东向及北西向。其中,北西向断裂尤为发育,与两侧破碎岩石共同构成了断裂破碎带。大金山地区最主要的断裂破碎带为位于其中部的北西向大岭岗—大金山断裂破碎带(图 4),该断裂破碎带性质为张扭性。前人<sup>[23]</sup>在大金山地区发现多条北西向断裂破碎带中铜矿化强烈,局部可达边界品位以上。

大金山地区侵入岩主要为闪长玢岩、辉石闪长玢岩、角闪闪长玢岩,局部出露二长花岗岩、石英二长斑岩。其中,区域内许多铜金矿区内的闪长玢岩为成矿母岩,为成矿提供了物源及热源。此外,钻孔揭露深部有斑状二长花岗岩。斑状二长花岗岩中硅质和碳酸盐细脉发育,部分细脉中含浸染状铜矿化,表明斑状二长花岗岩与成矿关系密切。经镜下鉴定,斑状二长花岗岩呈斑状结构,强烈蚀变,主要是高岭石化、绢云母化、碳酸盐化。

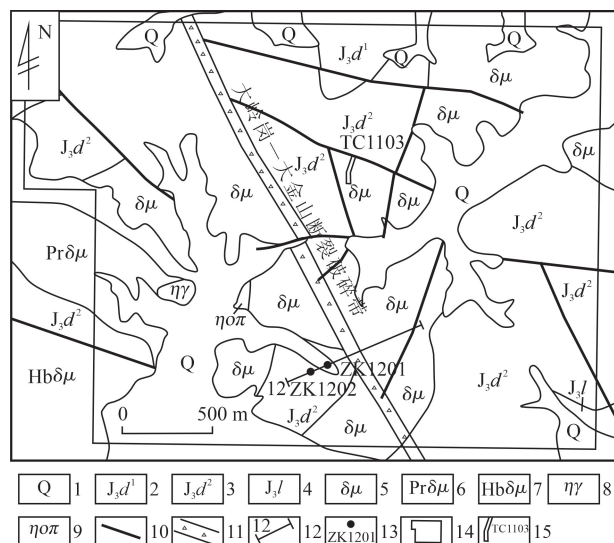
## 3 综合信息找矿效果

为实现找矿突破,在系统总结区域地质及成矿特征、大金山地区地质特征的基础上,在大金山地区开展了土壤地球化学测量、激电中梯测量。土壤地球化学测量、激电中梯测量的测量比例尺均为 1 : 10 000,测线方位为 67°,与大岭岗—大金山断裂破碎带走向垂直,土壤地球化学测量的测量网度为 100 m×20 m,激电中梯测量的测量网度为 100 m×40 m。

### 3.1 地球化学特征

#### 3.1.1 元素含量特征

大金山地区土壤地球化学元素参数特征见表 1。从变异系数来看,Mo、Pb、Sb、W、Zn 变异系数均小于或等于 0.30,变异系数较小,表明这些元素属于均匀分布;Ag、As、Au、Bi、Cd、Cu、Hg 变异系数均介于 0.30~0.60 之间,变异系数较大,表明这些元素属于不均匀分布,具有富集成矿的可能;Mn 变异系数为 0.61,大于 0.60,变异系数大,表明该元素分布很不均匀,富集成矿的可能较大。从富集系数来看,Ag、As、Au、Cd、Cu、Mo、Pb、W、Zn 富集系数均大于或等于 1.00,表明这些元素处于高背景场,具有



1. 第四系; 2. 大王山组下段; 3. 大王山组中段; 4. 龙王山组; 5. 闪长玢岩; 6. 辉石闪长玢岩; 7. 角闪闪长玢岩; 8. 二长花岗岩; 9. 石英二长斑岩; 10. 断裂; 11. 断裂破碎带; 12. 勘探线及编号; 13. 钻孔及编号; 14. 研究区范围; 15. 探槽及编号。

图 4 大金山地区地质及探矿工程布置图

Fig. 4 Geology and exploration engineering layout in the Dajinshan area

表 1 大金山地区土壤地球化学元素参数特征

Table 1 Characteristics of soil geochemical element parameters in the Dajinshan area

元素	$w_B/10^{-6}$						变异系数	富集系数
	平均值	最大值	最小值	标准离差	背景值	异常内带值		
Ag	0.09	0.82	0.01	0.04	0.09	0.68	0.41	1.00
As	11.66	95.50	2.95	4.66	10.00	83.92	0.40	1.17
Au	2.29	35.50	0.29	0.96	2.00	16.84	0.42	1.15
Bi	0.93	9.25	0.12	0.43	1.00	7.16	0.46	0.93
Cd	0.11	0.49	0.03	0.04	0.10	0.76	0.38	1.10
Cu	24.94	658.00	6.65	8.28	25.00	166.00	0.33	1.00
Hg	0.09	0.79	0.01	0.03	0.10	0.60	0.40	0.90
Mn	587.92	2 618.00	29.40	360.51	600.00	5 235.76	0.61	0.98
Mo	1.05	8.28	0.22	0.32	1.00	6.76	0.30	1.05
Pb	23.52	238.00	5.24	6.61	20.00	146.96	0.28	1.18
Sb	0.99	19.80	0.25	0.28	1.00	6.20	0.29	0.99
W	2.19	74.40	0.35	0.47	2.00	12.52	0.22	1.10
Zn	67.06	245.00	25.70	18.88	60.00	419.28	0.28	1.12

注: Au 质量分数单位为  $10^{-9}$ 。

一定成矿的可能。从最大值来看, Au、Cu、Sb、W 最大值均大于异常内带值的 2 倍, 因此具有富集成矿的可能。综上所述, 认为 Au、Cu、W 等在大金山地区具有富集成矿的潜力, 可作为主攻矿种。

3.1.2 综合异常特征

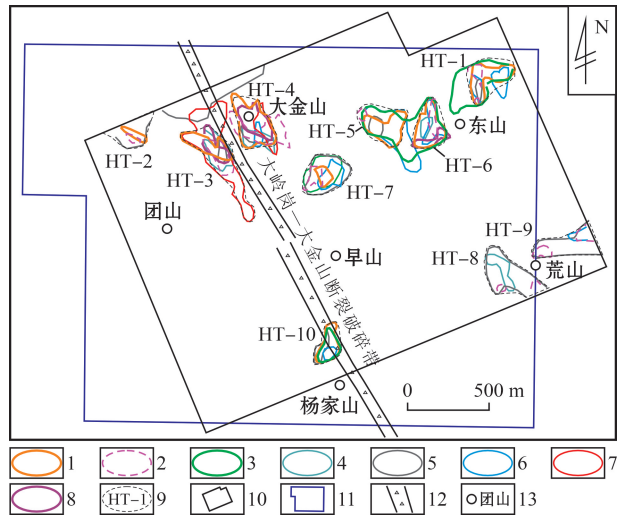
大金山地区共圈出综合异常 10 处(图 5)。综合地质特征, 对元素套合较好、成矿潜力较大的 5 处综合异常进行详细分析。

HT-1 综合异常位于东山东北坡, 产于石英闪长玢岩中。异常呈扇形, 组合元素为 Au、Cu、Ag、As、Mo, 异常面积  $0.06 \text{ km}^2$ 。Au 为主异常元素,  $w(\text{Au})$  为  $5.30 \times 10^{-9} \sim 13.60 \times 10^{-9}$ 。As、Mo 异常的分布与 Au 异常吻合,  $w(\text{As})$  为  $20.20 \times 10^{-6} \sim 39.90 \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Mo})$  为  $1.50 \times 10^{-6} \sim 6.10 \times 10^{-6}$ 。Cu、Ag 异常规模小, 由单点或数点控制, 呈散状分布于 Au 异常中,  $w(\text{Cu})$  为  $44.40 \times 10^{-6} \sim 90.00 \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Ag})$  为  $0.15 \times 10^{-6} \sim 0.28 \times 10^{-6}$ 。该综合异常可能由闪长玢岩中黄铁矿化引起, Au 异常的存在说明黄铁矿化中可能伴生金。

HT-3 综合异常沿大岭岗—大金山断裂破碎带呈带状分布, 异常面积  $0.07 \text{ km}^2$ 。组合元素以 Hg、Au、Cd、Bi 为主, Cu、Ag 次之。Hg 异常范围最大,  $w(\text{Hg})$  为  $0.15 \times 10^{-6} \sim 0.33 \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Au})$  为  $4.00 \times 10^{-9} \sim 11.50 \times 10^{-9}$ ,  $w(\text{Cd})$  为  $0.20 \times 10^{-6} \sim 0.50 \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Bi})$  为  $2.20 \times 10^{-6} \sim 4.40 \times 10^{-6}$ 。

Cu、Ag 异常规模较小,  $w(\text{Cu})$  为  $40.60 \times 10^{-6} \sim 82.30 \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Ag})$  为  $0.16 \times 10^{-6} \sim 0.17 \times 10^{-6}$ 。该综合异常推测由断裂破碎带中的硫化物引起, 成矿地质条件良好。

HT-5 综合异常位于东山西南坡, 异常面积  $0.06 \text{ km}^2$ 。异常呈不规则状, 组合元素主要为 Au、



1. Au 异常; 2. Ag 异常; 3. Mo 异常; 4. Cd 异常; 5. Cu 异常; 6. As 异常; 7. Hg 异常; 8. Bi 异常; 9. 综合异常及编号; 10. 地球化学测量范围; 11. 研究区范围; 12. 断裂破碎带; 13. 地名。

图 5 大金山地区土壤地球化学综合异常图  
Fig.5 Soil geochemistry comprehensive anomaly in Dajinshan area

Cu,As。 $w(\text{Au})$ 为  $4.00 \times 10^{-9} \sim 12.10 \times 10^{-9}$ ; $w(\text{As})$ 为  $20.80 \times 10^{-6} \sim 95.50 \times 10^{-6}$ , $w(\text{Cu})$ 为  $41.40 \times 10^{-6} \sim 79.70 \times 10^{-6}$ 。该综合异常位于大王山组与闪长玢岩的接触带及附近,是成矿的有利部位。

HT-7 综合异常位于大金山东南坡山谷闪长玢岩中,异常沿山谷呈扇形,异常面积  $0.06 \text{ km}^2$ 。组合元素主要为 Cu,As,Mo,Au,Ag 次之。 $w(\text{Cu})$ 为  $43.60 \times 10^{-6} \sim 120.00 \times 10^{-6}$ , $w(\text{As})$ 为  $21.00 \times 10^{-6} \sim 55.40 \times 10^{-6}$ , $w(\text{Mo})$ 为  $1.50 \times 10^{-6} \sim 2.55 \times 10^{-6}$ , $w(\text{Au})$ 为  $4.40 \times 10^{-9} \sim 7.30 \times 10^{-9}$ , $w(\text{Ag})$ 为  $0.10 \times 10^{-6} \sim 0.30 \times 10^{-6}$ 。在该综合异常部位施工了 TC1103 探槽,槽长 86.10 m,全槽均发育铜矿化,铜品位为  $0.01\% \sim 0.08\%$ 。

HT-10 综合异常位于杨家山北坡山脊部位,产于闪长玢岩中,地表发育大岭岗一大金山断裂破碎带,呈北东向椭圆状展布,异常面积  $0.03 \text{ km}^2$ 。组合元素为 Au,Mo,As,Cu。 $w(\text{Au})$ 为  $8.40 \times 10^{-9} \sim 35.50 \times 10^{-9}$ , $31.20 \times 10^{-9}$  为大金山地区最高值。 $w(\text{Mo})$ 为  $1.60 \times 10^{-6} \sim 8.10 \times 10^{-6}$ , $w(\text{As})$ 为  $20.80 \times 10^{-6} \sim 44.90 \times 10^{-6}$ 。Cu 异常规模小,由 3 个点控制, $w(\text{Cu})$ 为  $43.30 \times 10^{-6} \sim 117.00 \times 10^{-6}$ 。该综合异常推测由断裂破碎带中的硫化物引起,深部岩体中黄铁矿化较为发育,黄铁矿化中可能伴生金。

### 3.2 地球物理特征

#### 3.2.1 视电阻率异常特征

大金山地区共圈出 5 处视电阻率异常(图 6a)。

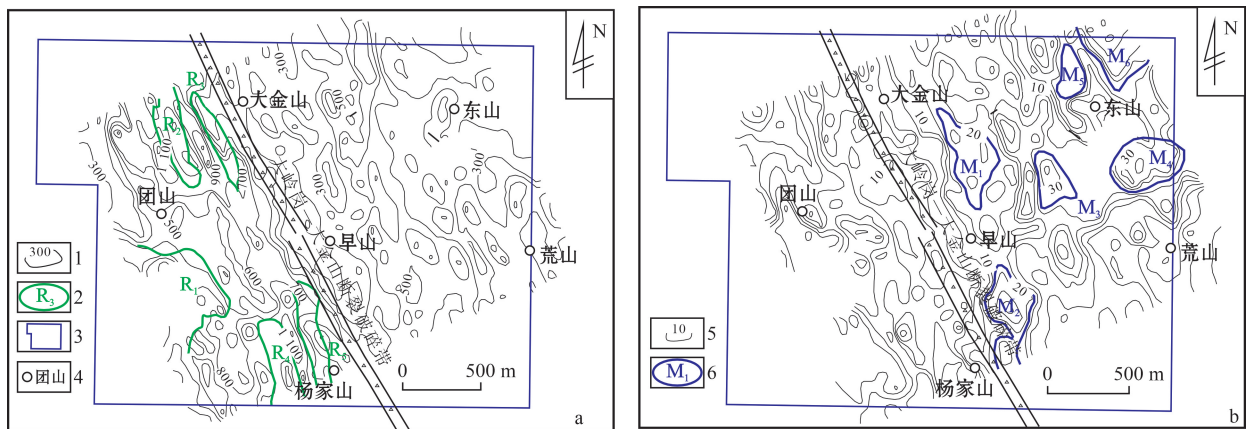
视电阻率异常以  $900 \Omega \cdot \text{m}$  圈定,主要分布于大金山—早山—杨家山一线以西,呈北西向条带状展布。其中,视电阻率异常  $R_1$  位于团山东南部,异常呈近等轴状,视电阻率最大值为  $2\,300 \Omega \cdot \text{m}$ ;视电阻率异常  $R_2$  位于团山东北部,呈北西向条带状展布,视电阻率最大值为  $1\,800 \Omega \cdot \text{m}$ ;视电阻率异常  $R_3$  位于大金山西南侧,呈北西向条带状展布;视电阻率异常  $R_4$  位于杨家山西北侧,由南部条带状和北部近等轴状异常组成,视电阻率最大值  $4\,000 \Omega \cdot \text{m}$ ;视电阻率异常  $R_5$  位于视电阻率异常  $R_4$  东侧,异常特征与电阻率异常  $R_4$  相似,只是最大值相对较低。

#### 3.2.2 视充电率异常特征

大金山地区共圈出 6 处视充电率异常(图 6b)。

视充电率异常  $M_1$ :呈北西向近椭圆状展布,视充电率最大值为  $35\%$ 。该异常区出露闪长玢岩,闪长玢岩与两侧火山岩地层呈断裂接触。该部位具有面积较大的 Cu 异常, $w(\text{Cu})$ 为  $64 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$ 。经 TC1103 探槽揭露,铜品位最大值为  $0.08\%$ ,铜矿化及褐铁矿化较弱,但比较普遍,认为深部具一定的找矿潜力。

视充电率异常  $M_2$ :呈北西向等轴状展布,视充电率最大值为  $46\%$ 。该异常位于大岭岗一大金山断裂破碎带东侧,地表见闪长玢岩。该部位以 Au 异常为主, $w(\text{Au})$ 为  $8.4 \times 10^{-9} \sim 31.2 \times 10^{-9}$ ,推测可能共生有金矿(化)体。前人在实施“江苏宁镇地区铁铜矿远景调查<sup>①</sup>”时,在该异常的北东缘和南西



a. 视电阻率;b. 视充电率。1. 视电阻率等值线及异常值( $\Omega \cdot \text{m}$ );2. 视电阻率异常及编号;3. 研究区范围;4. 地名;5. 视充电率等值线及异常值(%);6. 视充电率异常及编号。

图 6 大金山地区视电阻率(a)及视充电率(b)异常图

Fig.6 Diagram of apparent resistivity (a) and apparent charging rate (b) anomalies in the Dajinshan area

①刘志宏,孙国曦,范钦成,等.江苏宁镇地区铁铜矿远景调查报告.南京:江苏省地质调查研究院,2013.

缘施工了 2 个钻孔,钻孔中黄铁矿化较为普遍,局部富集可达边界品位以上,金矿化较弱。这 2 个钻孔位于该异常的边部,推测在异常中心部位可能有黄铁矿(化)体存在,并与金矿(化)体共生。

视充电率异常  $M_3$ 、 $M_4$ :分别呈北西向、北东向椭圆状展布,视充电率最大值为 40%。该异常区为火山岩与闪长玢岩接触部位,并有北西向断裂通过,是成矿的有利部位。

视充电率异常  $M_5$ :呈北西向椭圆状展布,视充电率最大值为 50%。该异常可能由普遍发育的黄铁矿引起。该部位以 Au 异常为主, $\omega(\text{Au})$ 为  $5.3 \times 10^{-9} \sim 13.6 \times 10^{-9}$ ,可能有共生金矿(化)体。

视充电率异常  $M_6$ :未圈闭,特征与视充电率异常  $M_5$ 相似,可能由普遍发育的黄铁矿引起。

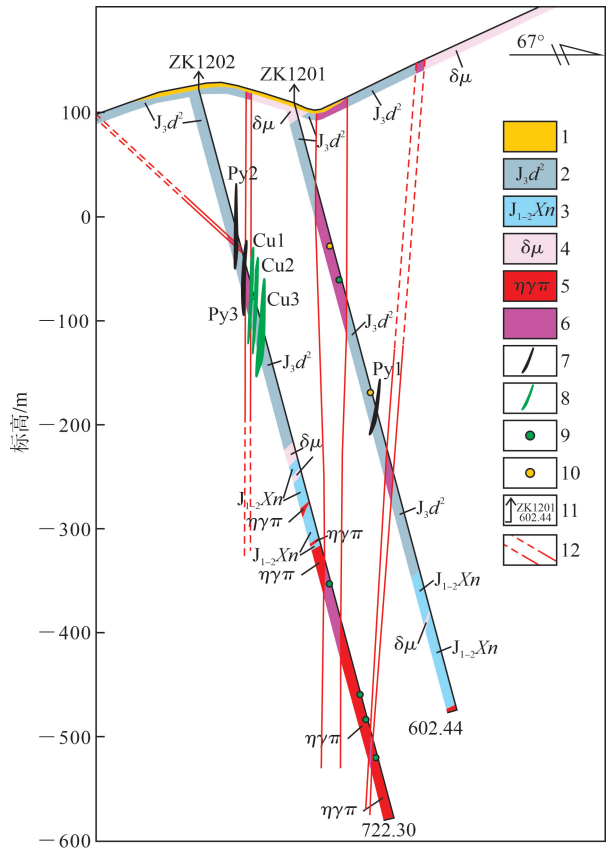
综上所述,北西向断裂破碎带显示为高阻高充电异常,而北西向断裂带控制了矿体的产出,因此高阻高充电异常可间接指导大金山地区找矿。

### 3.3 找矿效果

以区域地质特征及成矿特征、大金山地区地质特征为基础,结合对地球物理及地球化学特征的分析与评价,认为高阻高充电异常及强烈 Au 异常的视电阻率异常  $R_4$  和  $R_5$ 、视充电率异常  $M_2$ 、综合异常 HT-10 的套合区域,具有良好的找矿潜力,在该套合区域布设探矿工程(图 4),以期取得找矿突破。在 12 号勘探线布设了 2 个钻孔(ZK12101、ZK1202),探获了 3 条铜矿体(Cu1、Cu2、Cu3)、3 条硫铁矿体(Py1、Py2、Py3)(图 7)。

铜矿体及硫铁矿体受构造控制明显,产于大岭岗—大金山断裂破碎带中或附近,总体走向  $157^\circ$ ,呈脉状分布,长 50~200 m,赋存在 -200~100 m 标高,产状较陡或近直立。

Cu1 矿体:铜品位为 2.42%,黄铜矿(图 8a、b)呈脉状和团块状产于断裂破碎带内的烟灰色石英脉中。石英脉中有少量团块状碳酸盐矿物,其两侧也分布有碳酸盐脉,但碳酸盐脉延伸较小,具尖灭再现特点。Cu2 矿体:铜品位为 0.23%,黄铜矿和黄铁矿主要呈细脉状产于近于平行的数条石英、碳酸盐细脉中,原岩为角砾凝灰岩,虽然破碎程度不强,但含矿细脉产状与相邻构造带产状一致,近于直立。Cu3 矿体:铜品位为 0.28%,黄铜矿与黄铁矿呈浸染状、脉状和团块状分布于烟灰色石英脉中。



1. 第四系;2. 大王山组中段;3. 象山群;4. 闪长玢岩;5. 斑状二长花岗岩;6. 断裂破碎带;7. 硫铁矿体;8. 铜矿体;9. 铜矿化;10. 金矿化;11. 孔号及孔深(m);12. 断裂。

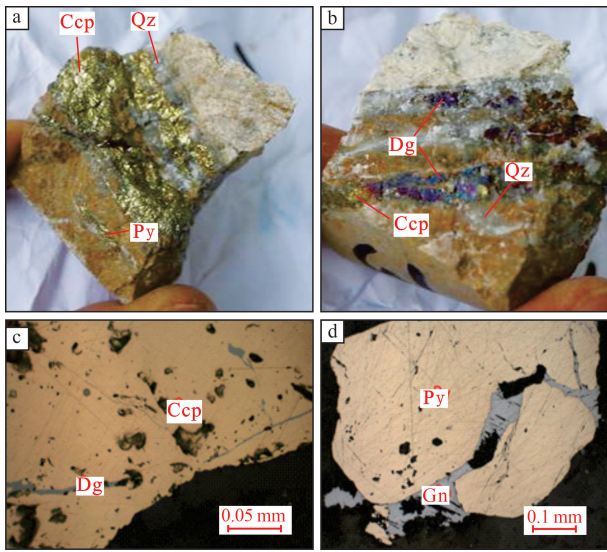
图 7 大金山地区 12 号勘探线钻孔剖面图

Fig.7 Section of drill holes on Exploration Line 12 in the Dajinshan area

Py1 矿体:硫品位为 8.77%,黄铁矿主要呈浸染状、脉状和团斑状分布,脉状黄铁矿产状较陡,近直立。Py2 矿体:硫品位为 10.14%~17.08%,黄铁矿主要呈浸染状、脉状、团块状分布,褐铁矿分布于黄铁矿周围。Py3 矿体:硫品位为 9.51%,黄铁矿呈浸染状、脉状,少量呈团块状分布,产于断裂破碎带附近,脉状黄铁矿产状较陡,近直立,原岩为硅化角砾凝灰岩。

矿石中的金属矿物主要为黄铁矿和黄铜矿,含少量白铁矿、蓝辉铜矿、方铅矿(图 8)。脉石矿物主要为石英、白云石、方解石。矿石结构主要有自形—他形粒状结构、压碎结构、交代结构等,矿石构造主要为脉状构造、浸染状构造、团块状构造等。

钻孔 ZK1201 在孔深 597.14~602.44 m 处见斑状二长花岗岩,且在斑状二长花岗岩中见铜矿化。



a, b. 矿石手标本; c. 蓝辉铜矿交代黄铜矿; d. 方铅矿交代黄铁矿。  
Ccp. 黄铜矿; Py. 黄铁矿; Qz. 石英; Dg. 蓝辉铜矿; Gn. 方铅矿。

图 8 典型矿石手标本及显微相照片

Fig. 8 Pictures of hand-marked specimen and microscopic mineragraphy of typical ores

钻孔 ZK1202 在孔深 450.00~722.30 m 见斑状二长花岗岩。斑状二长花岗岩蚀变强烈,主要为高岭土化、绢云母化、硅化、碳酸盐化、钾化等。斑状二长花岗岩中发育有陡倾角不规则深色硅质细脉,局部为网脉状,在深色硅质细脉中可见微细粒浸染状黄铜矿,铜品位约为 0.03%。此外,在钻孔中多处见黄铜矿化及金矿化。

## 4 深部找矿潜力分析

### 4.1 典型矿床对比

为探明大金山地区成矿规律及找矿潜力,通过与区域上成矿特征相似,且空间距离较近的大岭岗金铜矿床、南门头铜矿床特征进行对比,结果见表 2。

大金山地区与大岭岗金铜矿床、南门头铜矿床空间距离较近,均为宁芜矿集区内热液型矿床,矿体均赋存于大王山组中,受北西向断裂、北东向断裂控制,闪长玢岩及深部探获的花岗质岩类为成矿提供

表 2 大金山地区与区域内典型金矿床特征对比

Table 2 Comparison of the characteristics between the Dajinshan area and typical gold deposits in the area

矿床特征	大金山地区	大岭岗金铜矿床	南门头铜矿床
赋矿地层	大王山组	大王山组	姑山组、大王山组
控矿构造	北东向断裂、北西向断裂、北西向断裂破碎带	北东向断裂、北西向断裂、北西向断裂破碎带	北东向断裂、北西向断裂
控矿岩体	闪长玢岩、斑状二长花岗岩	闪长玢岩	辉石闪长玢岩、石英正长岩-(角闪)二长岩-二长花岗岩
矿体形态	脉状	脉状、复脉状、透镜状	脉状
矿体产状	走向北西,倾向北东,倾角较陡	走向北西,倾向北东,倾角为 74°~86°	走向北西,倾向北东
矿石类型	石英-碳酸盐-黄铁矿-黄铜矿矿石、石英-碳酸盐-黄铜矿矿石	黄铜矿矿石、黄铁矿矿石、镜铁矿矿石、黄铜矿矿石	氧化矿石、原生矿石
金属矿物	主要为黄铁矿和黄铜矿,少量白铁矿、蓝辉铜矿、方铅矿	黄铁矿、黄铜矿、镜铁矿、斑铜矿、辉铜矿,少量铜蓝、黝铜矿、自然金、孔雀石、褐铁矿	黄铜矿、辉铜矿、黄铁矿、镜铁矿等
脉石矿物	石英、白云石、方解石	石英、碳酸盐、重晶石、钠长石、绢云母、高岭土等	石英、方解石、重晶石等
矿石结构	自形-他形粒状结构、压碎结构、交代结构	自形-他形晶粒状结构、边缘结构、脉状-网脉状结构、次文象结构、环带状结构	自形-半自形粒状结构、包含结构、充填结构等
矿石构造	脉状构造、浸染状构造、团块状构造	块状构造、脉状构造、浸染状构造、角砾状或似角砾状构造	脉状、浸染状构造
围岩蚀变	硅化、碳酸盐化、高岭土化、绢云母化等	硅化、绢云母化、碳酸盐化、钠长石化、高岭土化、绿泥石化、绿帘石化等	硅化、碳酸盐化、绿泥石化、钾化等
矿床类型	中低温热液型、斑岩型	中低温热液型	浅成低温热液型
探明矿体深度/m		>300	>1 100

注:大岭岗金铜矿床据文献[26-28],南门头铜矿床据文献[23-25,29-30]。

了物源及热源,且三者 在矿体形态、矿体产状、矿石类型、金属矿物、脉石矿物、矿石结构、矿石构造、围岩蚀变等方面具有很好的相似性,根据相似类比的勘查理论,成矿特征相似的矿床,找矿方向也具有相似性<sup>[31-33]</sup>。目前,大岭岗金铜矿床、南门头铜矿床在深部均具有一定的找矿潜力,尤其是南门头铜矿床已探明矿体深度超过了 1 100 m,表明大金山地区深部同样具有找矿潜力。

### 4.2 钻孔原生晕对深部找矿的指示

对大金山地区 12 号勘探线施工钻孔的岩心采集原生晕样品,重点采集了断裂破碎带、深部岩体的样品,以了解相关元素迁移富集情况,探索深部找矿潜力,共采集样品 133 件,分析 As、Hg、Pb、Zn、W、Bi、Cu、Au 等 8 种元素,结果见图 9。

前缘晕:热液矿床的前缘晕低温元素主要为 As、Hg、Sb,且分布特征相似。以 As、Hg 为例,在

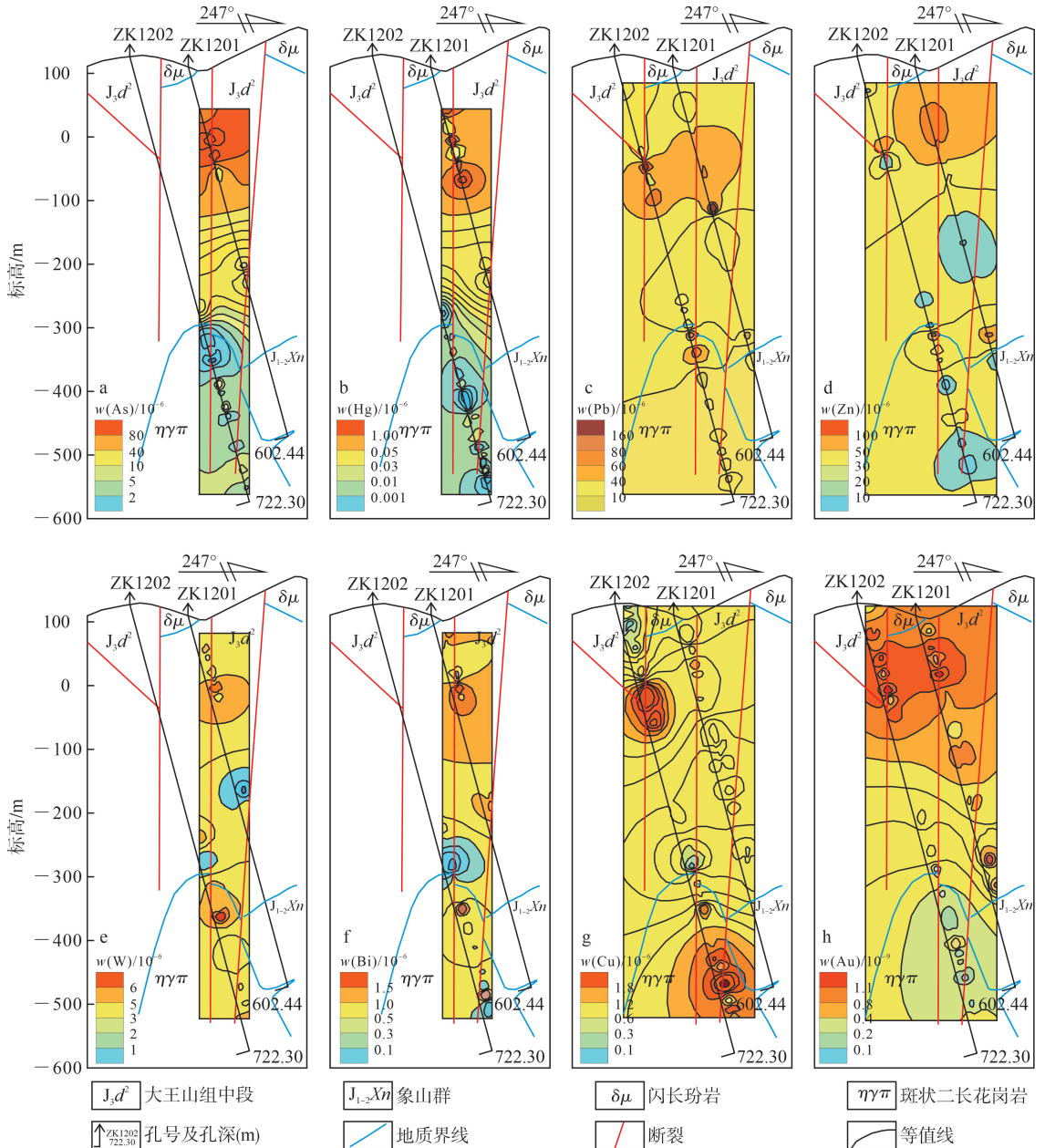


图 9 大金山地区 12 号勘探线原生晕剖面图

Fig.9 Primary halo section of Exploration Line 12 in the Dajinshan area

断裂破碎带浅部富集,向深部质量分数逐渐降低。在浅部, $w(\text{As})$ 为 $40 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$ ,最高为 $190 \times 10^{-6}$ ;在深部, $w(\text{As})$ 大多不足 $5 \times 10^{-6}$ 。 $\text{Hg}$ 在浅部局部富集, $w(\text{Hg})$ 为 $0.50 \times 10^{-6} \sim 2.22 \times 10^{-6}$ ;在深部, $w(\text{Hg})$ 为 $0.001 \times 10^{-6} \sim 0.05 \times 10^{-6}$ 。

近矿晕:热液矿床的近矿晕中温元素主要为 $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Ag}$ 。以 $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$ 为例,其分布特征略有差异,但总体特征类似,均在浅部富集。在浅部, $w(\text{Pb})$ 为 $40 \times 10^{-6} \sim 209 \times 10^{-6}$ ;在深部, $w(\text{Pb})$ 为 $20 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$ 。 $\text{Zn}$ 向深部总体呈降低趋势,但富集程度较低,在浅部质量分数较高, $w(\text{Zn})$ 为 $80 \times 10^{-6} \sim 168 \times 10^{-6}$ ;在深部, $w(\text{Zn})$ 多在 $50 \times 10^{-6}$ 以下。

尾晕:热液矿床的尾晕高温元素主要为 $\text{W}$ 、 $\text{Bi}$ 、 $\text{Mo}$ 、 $\text{Mn}$ 。以 $\text{W}$ 、 $\text{Bi}$ 为例,其分布总体特征为在浅部有明显的富集,深部零星样品质量分数较高。在浅部, $w(\text{W})$ 为 $3 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ ;在深部,局部富集, $w(\text{W})$ 最高可达 $9.7 \times 10^{-6}$ ,为全孔最高值。在浅部, $w(\text{Bi})$ 为 $0.5 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-6}$ ;在深部, $w(\text{Bi})$ 多小于 $0.3 \times 10^{-6}$ ,少数为 $0.5 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ 。

成矿元素 $\text{Au}$ 、 $\text{Cu}$ 与近矿晕分布较为吻合,在-450 m标高以下具局部富集特征,且向深部有进一步富集趋势。12号勘探线原生晕特征为前缘晕与尾晕分布位置基本吻合。符合前、尾晕共存准则<sup>[34-38]</sup>,指示深部可能有盲矿体存在。

#### 4.3 找矿前景

1)本次仅验证了视电阻率异常 $R_i$ 和 $R_s$ 、视充电率异常 $M_2$ 、综合异常 $\text{HT}-10$ 的套合区域,圈定的其他激电中梯异常及化探异常还未进行验证,需要加强进一步验证工作,可寻求更大找矿突破。

2)目前,长江中下游成矿带已发现的斑岩型铜金矿床赋矿围岩为火山岩和碎屑岩,大金山地区出露地层为大王山组安山岩、安山质火山碎屑岩,这为该地区寻找斑岩型铜金矿床提供了地层岩性条件。

3)大金山地区控矿构造为北西向断裂、北东向断裂,尤其是北西向断裂破碎带,该断裂带产状陡立,与已发现矿体产状一致。大金山地区深部基底有断裂穿过,形成该断裂的北东向朱门—吉山断裂喷发带与北西向大岭岗—大金山断裂破碎带在大金山地区南部相交,指示该地区具有形成斑岩型铜金矿床的构造环境。

4)钻孔中探获的斑状二长花岗岩呈斑状—似斑状结构,说明岩浆在岩浆房及侵位过程中多次停留,大岭岗—大金山断裂破碎带为张扭性,张扭性的构

造环境使岩浆侵位形成了负压区,长期的负压环境可以使深部和周围环境中含矿流体源源不断被抽吸上来,并逐步沉淀成矿。

5)斑状二长花岗岩体广泛发育低温热液蚀变,主要有硅化、碳酸盐化、高岭土化、绢云母化等。岩石中硅质细脉发育,可能是在岩浆冷凝过程中形成的,且部分硅质细脉中具有铜矿化显示。

根据斑岩型铜金矿床的赋矿岩石、构造环境和深部探获的斑状二长花岗岩,结合典型矿床对比及钻孔原生晕符合前、尾晕共存准则,指示岩体深部可能有盲矿体存在,认为大金山地区深部具有探获斑岩型铜金矿床的潜力。

## 5 结论

1)大金山地区矿体赋存于大王山组中,受北西向断裂、北东向断裂控制,尤其是北西向断裂破碎带控制了矿体的产出,闪长玢岩及深部探获的花岗质岩类为成矿提供了物源及热源。

2)高阻高充电异常可作为找矿的间接标志,土壤地球化学测量圈定的综合异常可作为找矿的直接标志。

3)通过综合分析,在12号勘探线布设的2个钻孔探获了3条铜矿体( $\text{Cu}1$ 、 $\text{Cu}2$ 、 $\text{Cu}3$ )、3条硫铁矿体( $\text{Py}1$ 、 $\text{Py}2$ 、 $\text{Py}3$ ),取得了找矿突破。

4)区域典型矿床对比、原生晕分析及深部探获斑状二长花岗岩等均指示大金山地区深部具有探获斑岩型铜金矿床的潜力。

#### 参考文献(References):

- [1] 周涛发,范裕,王世伟,等.长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式[J].岩石学报,2017,33(11):3353-3372. Zhou Taofa, Fan Yu, Wang Shiwei, et al. Metallogenic Regularity and Metallogenic Model of the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(11): 3353-3372.
- [2] 陈志洪,郭坤一,赵玲.与成矿相关的岩体成因:年代学,元素与 $\text{Sr}-\text{Nd}$ 、 $\text{Hf}$ 同位素地球化学特征:以江西九瑞矿集区宋家冲 $\text{Au}$ 、 $\text{Cu}-\text{Mo}$ 矿床为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(5):1351-1365. Chen Zhihong, Guo Kunyi, Zhao Ling. Petrogenesis of the Ore-Bearing Granitic Intrusion in the Songjiachong  $\text{Au}$ 、 $\text{Cu}-\text{Mo}$  Deposit, Jiujiang-Ruichang Metallogenic District in Jiangxi Province: Constraints from Zircon  $\text{U}-\text{Pb}$  Age, Geochemistry and  $\text{Sr}-\text{Nd}$ 、 $\text{Hf}$  Isotopes

- [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(5): 1351 - 1365.
- [3] 杨细浩, 胡文洁, 钟起泓, 等. 江西东坪石英脉型黑钨矿矿床地质特征、控矿因素及找矿标志[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(5): 1301 - 1316.  
Yang Xihao, Hu Wenjie, Zhong Qihong, et al. Geological Characteristics, Ore Controlling Factors and Prospecting Indicators of Dongping Quartz Vein Type Wolframite Deposit in Jiangxi[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(5): 1301 - 1316.
- [4] 孙明明, 王利民, 赵先超, 等. 长江中下游成矿带(安徽段)斑岩型铜金矿床成矿作用特征[J]. 矿产与地质, 2021, 35(2): 177 - 185.  
Sun Mingming, Wang Limin, Zhao Xianchao, et al. Metallogenic Characteristics of Porphyry Copper Gold Deposits in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Metallogenic Belt (Anhui Section)[J]. Mineral Resources and Geology, 2021, 35(2): 177 - 185.
- [5] 周涛发, 范裕, 陈静, 等. 长江中下游成矿带关键金属矿产研究现状与进展[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3665 - 3677.  
Zhou Taofa, Fan Yu, Chen Jing, et al. Critical Metal Resources in the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3665 - 3677.
- [6] 国显正, 周涛发, 汪方跃, 等. 长江中下游成矿带城门山斑岩-矽卡岩型铜金矿床碲元素赋存状态及沉淀机制初步研究[J]. 岩石学报, 2021, 37(9): 2723 - 2742.  
Guo Xianzheng, Zhou Taofa, Wang Fangyue, et al. Study of Occurrence States and Precipitation Mechanism of Tellurium in Chengmenshan Porphyry-Skarn Deposit from the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(9): 2723 - 2742.
- [7] Cheng Q M, Oberhänsli R, Zhao M L. A New International Initiative for Facilitating Data-Driven Earth Science Transformation[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2020, 499(1): 225 - 240.
- [8] 肖克炎, 樊铭静, 孙莉, 等. 矿床成矿系列综合信息预测理论方法及其应用[J]. 地球学报, 2023, 44(5): 769 - 780.  
Xiao Keyan, Fan Mingjing, Sun Li, et al. Theoretical Method of Integrated Geological Information Prediction of Metallogenic Series for Mineral Resource Potential Assessment[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(5): 769 - 780.
- [9] Xiao K Y, Xiang J, Fan M J, et al. 3D Mineral Prospectivity Mapping Based on Deep Metallogenic Prediction Theory: A Case Study of the Lala Copper Mine, Sichuan, China[J]. Journal of Earth Science, 2021, 32(2): 348 - 357.
- [10] 张永哲, 成山林, 李跃东, 等. 多源信息找矿预测技术研究及其在吉林省砂金沟金矿床为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(6): 1855 - 1866.  
Zhang Yongzhe, Cheng Shanlin, Li Yuedong, et al. Research and Application of Multi-Source Information for Ore Prospecting and Prediction: Taking Jilin Shajingou Gold Deposit as an Example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 1855 - 1866.
- [11] 柳炳利, 谢森, 孔韞辉, 等. 基于卷积自编码网络的夏河-合作地区金矿定量预测[J]. 地球学报, 2023, 44(5): 877 - 886.  
Liu Bingli, Xie Miao, Kong Yunhui, et al. Quantitative Gold Resources Prediction in Xiahe - Hezuo Area Based on Convolutional Auto-Encode Network[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(5): 877 - 886.
- [12] 王学阳, 李慧, 郭廷峰, 等. 吉林夹皮沟金矿田二道沟金矿区地球物理特征、地球化学特征及找矿效果[J]. 黄金, 2022, 43(12): 26 - 32, 38.  
Wang Xueyang, Li Hui, Guo Tingfeng, et al. Geophysical Characteristics, Geochemical Characteristics, and Prospecting Effect of Erdaogou Gold District, Jiapiyou Gold Field, Jilin[J]. Gold, 2022, 43(12): 26 - 32, 38.
- [13] 王诗元, 范继璋, 王森, 等. 吉林老岭成矿带金矿综合信息找矿模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(2): 211 - 216.  
Wang Shiyuan, Fan Jizhang, Wang Miao, et al. The Ore-Prospecting Model of Gold Deposits in the Laoling Metallogenic Belt [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(2): 211 - 216.
- [14] 刘宇轩. 大兴安岭北段尼尔基地区金银多金属矿综合信息矿产预测[D]. 长春: 吉林大学, 2022.  
Liu Yuxuan. Comprehensive Information Mineral Prediction of Gold and Silver Polymetallic Deposits in the Nierji Area of the Northern Section of the Greater Khingan Mountains [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [15] 刘伟, 黄理善, 丁汝福, 等. 广西五圩矿田箭猪坡锑多

- 金属矿综合信息找矿模型[J].中国地质,2022,49(4):1250-1261.
- Liu Wei, Huang Lishan, Ding Rufu, et al. Comprehensive Information Prospecting Model for Jianzhupo Antimony Polymetallic Deposit in Wuxu Mine Field, Guangxi[J]. Geology in China, 2022, 49(4): 1250 - 1261.
- [16] 范文亮,王学阳,刘超,等.吉林夹皮沟金矿区东部找矿预测[J].黄金,2022,43(4):27-32.
- Fan Wenliang, Wang Xueyang, Liu Chao, et al. Prospecting Prediction in East of Jiapigou Gold District, Jilin[J]. Gold, 2022, 43(4): 27 - 32.
- [17] 韩雷,郑岩,李雪梅,等.内蒙古敖汉旗窑沟金矿床综合信息特征及找矿意义[J].黄金,2022,43(2):15-21.
- Han Lei, Zheng Yan, Li Xuemei, et al. Comprehensive Information Characteristics of Yaogou Gold Deposit in Aohan Banner, Inner Mongolia and Their Prospecting Significance[J]. Gold, 2022, 43(2): 15 - 21.
- [18] 刘志远,徐学纯.辽东青城子金银多金属成矿区综合信息找矿模型及找矿远景分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(3):437-443.
- Liu Zhiyuan, Xu Xuechun. Synthetic Information Models and Analyses of Prospecting Perspective of the Qingchengzi Polymetal Metallogenic Mine in Eastern Liaoning Province [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2007, 37(3): 437 - 443.
- [19] 江少卿,孙兴国,杨铁铮,等.藏北多龙斑岩铜金矿集区综合信息找矿模型研究[J].中国地质,2014,41(2):497-509.
- Jiang Shaoqing, Sun Xingguo, Yang Tiezheng, et al. Integrated Anomaly Model and Metallogenic Prediction of the Duolong Porphyry Copper-Gold Ore Concentration Area in Northern Tibet[J]. Geology in China, 2014, 41(2): 497 - 509.
- [20] 杨晓勇,古黄玲,严志忠,等.安徽贵池地区燕山期岩浆岩与铜金钼成矿关系:来自地质-地球化学-地球物理证据[J].地球科学与环境学报,2016,38(4):444-463.
- Yang Xiaoyong, Gu Huangling, Yan Zhizhong, et al. Metallogenic Relationship Between Yanshanian Magmatic Rocks and Cu - Au - Mo Deposits in Guichi Area of Anhui: Evidences from Geological-Geochemical-Geophysical Characteristics [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(4): 444 - 463.
- [21] 黄宗理,严加永,王昊.长江中下游成矿带和矿集区的地球物理标志及基于交叉梯度的找矿预测[J].地球物理学进展,2019,34(1):98-106.
- Huang Zongli, Yan Jiayong, Wang Hao. Geophysical Characteristic of the Middle and Lower Yangtze River Metallogenic Belt and Ore Concentration Area and Prospecting Prediction Based on Cross Gradient[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 98 - 106.
- [22] 毛景文,周涛发,谢桂青,等.长江中下游地区成矿作用研究新进展和存在问题的思考[J].矿床地质,2020,39(4):547-558.
- Mao Jingwen, Zhou Taofa, Xie Guiqing, et al. Metallogeny in Middle-Lower Yangtze River Ore Belt: Advances and Problems Remained[J]. Mineral Deposit, 2020, 39(4): 547 - 558.
- [23] 江苏省地质调查研究院.江苏省南京市大岭岗一大金山铜金矿普查报告[R].南京:江苏省地质调查研究院,2015.
- Geological Survey of Jiangsu Province. General Survey Report on Dalinggang-Dajinshan Copper and Gold Mine in Nanjing City, Jiangsu Province [R]. Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province, 2015.
- [24] 高丽坤,邹芝红,李书春,等.宁芜盆地热液脉型金铜矿床地质特征:以江苏铜井金铜矿床为例[J].地质与资源,2015,24(2):117-123.
- Gao Likun, Zou Zhihong, Li Shuchun, et al. Geological Characteristics of the Hydrothermal Vein Type Gold-Copper Deposits in Ningwu Basin: A Case Study of Tongjing Gold-Copper Deposit in Jiangsu Province [J]. Geology and Resources, 2015, 24(2): 117 - 123.
- [25] 侯丹丹.宁芜火山岩盆地中南段铜、金矿成矿规律和找矿预测[J].地质找矿论丛,2019,34(3):331-338.
- Hou Dandan. Prediction and Propsecting of Copper and in the Central South Ningwu Volcanic Basin[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2019, 34(3): 331 - 338.
- [26] 周小栋.宁芜北部脉状铜矿床成因及成矿机制研究[D].合肥:合肥工业大学,2013.
- Zhou Xiaodong. Genesis and Metallogenic Mechanism of Vein Type Copper Deposit in the Northern Area of Ningwu, Eastern China[J]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [27] 高丽坤,徐成华,汤国毅,等.宁芜盆地大岭岗金铜矿床地质特征及找矿前景[J].矿产与地质,2023,37(1):26-32.
- Gao Likun, Xu Chenghua, Tang Guoyi, et al.

- Geological Characteristics and Prospecting Potential of Dalinggang Gold-Copper Deposit in Ningwu Basin [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2023, 37(1): 26-32.
- [28] 曾普胜, 李睿哲, 刘斯文, 等. 中国东部燕山期大火成岩省: 岩浆-构造-资源-环境效应[J]. *地球学报*, 2021, 42(6): 721-748.  
Zeng Pusheng, Li Ruizhe, Liu Siwen, et al. Yanshanian Large Igneous Provinces in Eastern China: Magmatism-Tectonics-Resources-Environment Effects[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(6): 721-748.
- [29] 周小栋, 宋世明, 郭坤一, 等. 宁芜南门头铜矿碳、氧、硫、铅同位素地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(5): 960-967.  
Zhou Xiaodong, Song Shiming, Guo Kunyi, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Carbon, Oxygen, Sulfur and Lead Isotopes of the Nanmentou Copper Deposit in the Ningwu Area, East China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(5): 960-967.
- [30] 周小栋, 郭坤一, 陈国光, 等. 宁芜北部脉状铜矿床地质与成矿流体特征研究[J]. *中国地质*, 2013, 40(5): 1622-1633.  
Zhou Xiaodong, Guo Kunyi, Chen Guoguang, et al. Geological and Ore-Forming Fluid Characteristics of Vein Type Copper Deposits in Northern Ningwu Area [J]. *Geology in China*, 2013, 40(5): 1622-1633.
- [31] 叶天竺, 吕志成, 庞振山, 等. 勘查区找矿预测理论与方法(总论)[M]. 北京: 地质出版社, 2014.  
Ye Tianzhu, Lü Zhicheng, Pang Zhenshan, et al. Theory and Method of Prospecting Prediction in Exploration Areas (General) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [32] 叶天竺, 韦昌山, 王玉往, 等. 勘查区找矿预测理论与方法(各论)[M]. 北京: 地质出版社, 2017.  
Ye Tianzhu, Wei Changshan, Wang Yuwang, et al. Theory and Method of Prospecting Prediction in Exploration Areas (Monograph) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [33] 张继武, 张建良, 董超然, 等. 黑龙江省大青南山金矿床地质特征及深部探矿效果[J]. *黄金*, 2021, 42(9): 39-46.  
Zhang Jiwu, Zhang Jianliang, Dong Chaoran, et al. Geological Characteristics and Deep Prospecting Effect of Daqingnanshan Gold Deposit in Heilongjiang Province [J]. *Gold*, 2021, 42(9): 39-46.
- [34] 李惠, 王支农, 上官义宁, 等. 金矿床(体)深部盲矿预测的构造叠加晕前、尾晕共存准则[J]. *地质找矿论丛*, 2002, 17(3): 195-197.  
Li Hui, Wang Zhinong, Shangguan Yining, et al. Coexistence Criterion or Overprint of the Head and Tail Halo for Blind Ore Body Prediction [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2002, 17(3): 195-197.
- [35] 李惠, 禹斌, 魏江, 等. 勘查(新)区构造叠加晕研究方法及其预测参照实用理想模型[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(2): 351-359.  
Li Hui, Yu Bin, Wei Jiang, et al. Research on Prediction of Hidden Ore Bodies at Depth in Exploration (New) Areas Using Structural Superimposed Halos and a Reference Practical Ideal Model [J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(2): 351-359.
- [36] 魏子鑫, 秦连元, 要悦稳, 等. 青海省格尔木市白日其利金矿区构造叠加晕深部找矿预测[J]. *黄金*, 2023, 44(1): 75-81.  
Wei Zixin, Qin Lianyuan, Yao Yuewen, et al. Structural Superimposed Halo-Based Prediction Deep in Bairiqili Gold District, Golmud City, Qinghai Province [J]. *Gold*, 2023, 44(1): 75-81.
- [37] 张明超, 陈仁义, 叶天竺, 等. 宁镇矿集区安基山花岗岩闪长斑岩和韦岗花岗岩闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2018, 92(11): 2248-2268.  
Zhang Mingchao, Chen Renyi, Ye Tianzhu, et al. Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Compositions of the Anjishan Granodiorite Porphyry and Weigang Granodiorite in the Ningzhen Ore Cluster Area and Their Geological Implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(11): 2248-2268.
- [38] 吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 等. 长江中下游成矿带铁-铜成矿系统结构的地球物理探测: 综合分析[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2): 232-253.  
Lü Qingtian, Meng Guixiang, Yan Jiayong, et al. The Geophysical Exploration of Mesozoic Iron-Copper Mineral System in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt: A Synthesis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(2): 232-253.