

鲁西铜石杂岩体边缘物化探特征及找矿前景

殷天涛^{1,2}, 邱光辉², 李守军¹, 彭明章², 申文环², 赵青涛²,
张启生², 张海亮², 张超²

(1. 山东科技大学, 山东青岛 266590; 2. 中化地质矿山总局山东地质勘查院, 山东济南 250013)

[摘要] 归来庄金矿的发现为鲁西地区金矿勘探提供了重要线索, 其所在的鲁西铜石杂岩体外围多年来金矿不断突破, 随着金矿勘探的进一步需求, 为探索其外围找矿前景, 本文在成矿地质背景基础上, 对研究区进行物探、化探异常查证工作, 研究表明研究区 Au、Ag 异常值较高, 伴生元素多为高温热液成矿元素组合, 主要分布在研究区断层及断裂带交汇部位, 特别是频繁的岩浆活动为金矿的运移和富集创造了条件, 为该区金矿勘探指明了方向。

[关键词] 铜石杂岩体 地球物理特征 地球化学特征 成矿背景 鲁西地区

[中图分类号] P612; P618.51 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2019)05-11

Yin Tiantao, Qiu Guanghui, Li Shoujun, Peng Mingzhang, Shen Wenhuan, Zhao Qingtao, Zhang Qisheng, Zhang Hailiang, Zhang Chao. Geophysical and geochemical characteristics and ore search prospect in the margin of the Tongshi igneous complex in western Shandong[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(5): 1153-1163.

0 引言

鲁西铜石金矿聚集区自 20 世纪末发现以来, 先后发现了诸如归来庄(沈昆等, 2001; 胡华斌等, 2005; 于学峰等, 2009; 毛广钰等, 2015)、卓家庄(沈远超等, 2000; 曾庆栋等, 2001)、磨房沟(牛树银等, 2005; 于学峰和韩作振, 2008)等多个大中型金矿床, 对于其区域成矿背景、矿床地质特征及成矿作用, 众多学者进行了不同的研究(陈汲清等, 1995; 曾庆栋等, 2000; 胡华斌等, 2005; Benzazoua et al., 2007; 于学峰, 2009; 张原庆等, 2010; 殷天涛等, 2016), 充分体现了该地区金矿找矿的巨大潜力。那么其外围如何, 有无成矿的可能性, 成为了众多地质工作者的难题。本文针对铜石杂岩体外围, 通过物探、化探方法, 结合区域成矿背景进行综合分析评价, 旨在为铜石金矿田外围进一步矿产勘探提供一点指示意义, 以促进后续相关地质勘探。

1 成矿地质背景

研究区位于山东省平邑县东部铜石镇, 地处滨西太平洋成矿域, 沂沭断裂带西侧, 鲁西隆起区、鲁中隆起尼山-平邑断隆的平邑凹陷与尼山凸起的接合部位(图 1)(张增奇等, 2014)。地层出露主要有新太古代泰山岩群、寒武纪-奥陶纪碳酸盐岩、侏罗纪-白垩纪碎屑岩以及第四纪坡积砂砾岩、含砾砂质粘土。

研究区主要发育新太古代岩浆岩、中生代岩浆岩, 而铜石火山杂岩体的形成(胡华斌等, 2004)加剧了周围岩浆活动, 形成了隐爆角砾岩型归来庄金矿及磨房沟式金矿。研究显示杂岩体与周围金矿床(化)密切相关(于学峰等, 2001), 在一定程度上决定了金元素的运移、富集。

区内结晶基底遭受多期变形改造, 发育各种面状、线状构造, 中生代燕山期地壳强烈抬升, 形成了一系列环状、放射状断裂构造。尤其是 NNW 燕甘断裂是研究区规模较大的断裂构造(陈华国等,

[收稿日期] 2018-11-29; **[改回日期]** 2019-05-21; **[责任编辑]** 衣俊杰。

[基金项目] 中国地质调查局“燕山-太行成矿带地质矿产调查项目”子项目(编号: 12120113060600)资助。

[第一作者] 殷天涛(1983 年-), 男, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业, 工程师, 长期从事矿产勘查、区域成矿学研究等工作。E-mail: derek0408@163.com。

[通讯作者] 李守军(1962 年-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事岩石学、区域成矿教学与科研工作。E-mail: lishoujun@126.com。

2 典型矿床成矿模式

研究区位于鲁西成矿区鲁中南中生代杂岩体分布区,该成矿区内的铜石金矿田发现了归来庄、磨坊沟及卓家庄金矿床,位于铜石杂岩体的边缘或接触带附近。其矿化类型主要是隐爆角砾岩型,镁质碳酸盐岩微细浸染型(于学峰,2001;2009),研究分析产出部位多位于郯庐断裂带邻侧

及邻近断裂构造区域,成矿与中生代岩浆作用相关,属于中低温热液成矿,通过分析前人资料(邱检生等,1994;陈永清等,1995;曾庆栋等,2000;王照波和高传波,2001;毛景文等,2003;胡华斌等,2004;司荣军等,2004;于学峰等,2008,2009;田京祥等,2015;张国权等,2017;卢燕等,2017),结合区域地质情况,总结了铜石地区典型金矿床特征及成矿模式(表1,图2)。

表1 鲁西铜石地区典型金矿床特征

Table 1 Characteristics of typical gold deposits in Tongshi area, western Shandong

成矿系列	成因类型	代表矿床	控矿构造	制约机制	成矿环境及矿化特征	矿石特征
鲁西中生代侵入岩 Au 成矿系列	隐爆角砾岩型	归来庄	受区域 NNW 向断裂,燕甘断裂控制,	由于铜石杂岩体造成的火山穹隆,受其制约形成了环状、放射状裂隙控制隐爆角砾岩分布	位于杂岩体东部边缘隐爆角砾岩带中,近矿围岩主要为碳酸盐岩、角砾岩等,以某一较大矿体为例,长度 550m、斜深 650m 以上,金品位一般为 $3.50 \times 10^{-6} \sim 12.0 \times 10^{-6}$	自然金、银,金属矿物有褐铁矿、黄铁矿,其次为黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等,非金属矿物为斜长石、钾长石、方解石等。结构主要有晶粒结构、假象结构、浸蚀结构等,构造主要是角砾状构造、浸染状构造等
		卓家庄	受区内 NW 向断裂控制	隐爆角砾岩筒主要发育于呈 NW、EW 向断裂构造相互交汇处	位于杂岩体西北边缘,呈筒状的隐爆角砾岩内,围岩为二长斑岩、二长闪长玢岩,富矿石金品位多在 1000×10^{-6} ,弱矿化矿石 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$	自然金、银金矿,金属矿物为黄铁矿、方铅矿等,脉石矿物为石英、长石等,角砾状构造、块状构造等
	镁质碳酸盐岩微细浸染型	磨坊沟	受区域 NNW 向断裂,燕甘断裂控制,	铜石潜火山杂岩体与寒武系底朱砂洞组的接触部位	位于铜石杂岩体西南边缘,寒武系底碳酸盐岩中;围岩以灰岩为主,其矿体呈似层状,金平均品位为 3.63×10^{-6}	自然金和银金矿,主要金属矿物为黄铁矿、磁铁矿等,非金属矿物主要有方解石、石英、白云石等,结构有粒状结构、微晶结构,构造有浸染状构造、脉状构造等

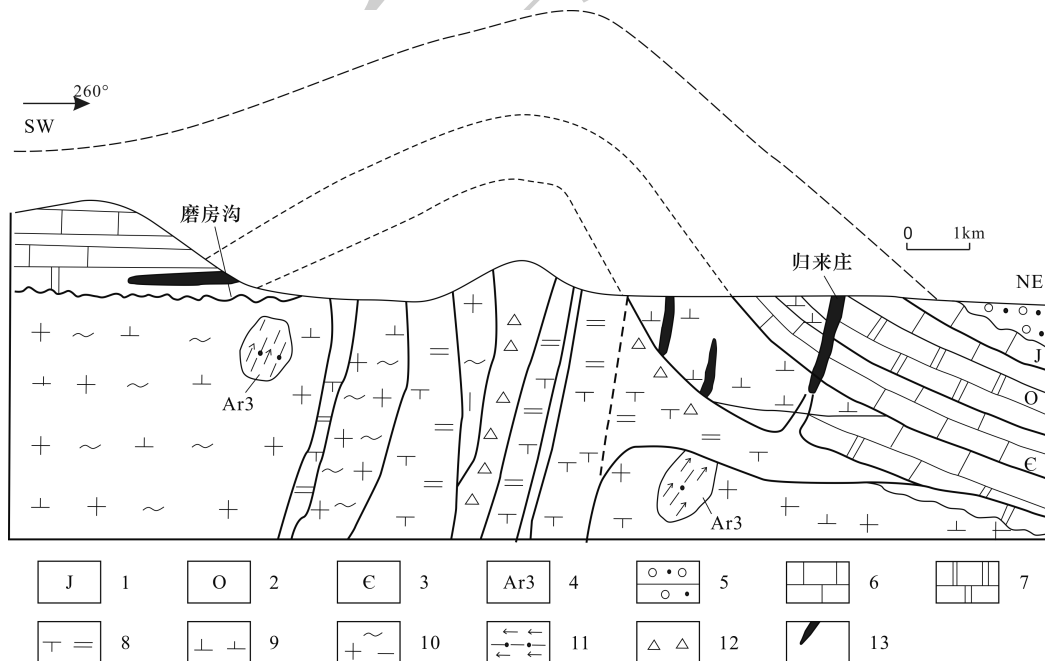


图2 鲁西铜石地区金矿田矿床成矿模式图(据于学峰,2009 修改)

Fig. 2 Metallogenic model map of gold ore deposits in the Tongshi area, western Shandong Province (modified from Yu, 2009)

1 - 侏罗系; 2 - 奥陶系; 3 - 寒武系; 4 - 山草峪组; 5 - 砾岩; 6 - 石灰岩; 7 - 白云岩; 8 - 二长斑岩; 9 - 二长闪长玢岩; 10 - 片麻状花岗闪长岩; 11 - 黑云角闪变粒岩; 12 - 隐爆角砾岩; 13 - 金矿体

1 - Jurassic; 2 - Ordovician; 3 - Cambrian; 4 - Shancaoyu Formation; 5 - conglomerate; 6 - limestone; 7 - dolomite; 8 - ivernite; 9 - monzodiorite porphyrite; 10 - gneissic granodiorite; 11 - biotite hornblende granulite; 12 - cryptoexplosive breccia; 13 - gold ore body

上述三个矿床成因都与铜石杂岩体有关(徐述平等,2007;于学峰,2009,2016;毛广钰等,2015),属中低温热液矿床,受底部火山穹隆控制,可能由于构造、区域等原因,鲁西中生代金矿床赋存在不同的地质部位,但成矿物质来源、控矿条件等具备相似的成矿地质背景,形成鲁西铜石地区成矿模式(图2)。

3 化探异常特征

地球化学方法示踪矿床来源多已取得重要进展(李随民和姚书振,2005;谢学锦等,2008;Emmanuel and Carranza,2011;陈亮等,2018;蔡永丰等,2018;王春林等,2018),其思路主要是对研究区成矿元素的异常进行圈定,并通过不同的分析方法进行评价,诸如数据统计法(李随民和姚书振,2005)。统计法最重要的是要确定其背景值以及异常下限,通常通过正态分布来实现(陈亮等,2018),假设数据为对数正态分布,其平均值和标准离差则需将原始数据换成对数,对呈非正态分布数据,则需要不断剔除高

值和低点后进行换算。本次分析将地质统计法结合R型因子聚类分析对化探数据进行分析,从而保证化探分析的准确性。

3.1 异常下限的确定

由于本区元素地球化学场无显著差异,异常下限以全区样品进行统计,利用迭代法在剔除高值点的基础上所获得的背景平均值加2倍标准差求得理论异常下限作参考,结合其所指示地质、矿化意义、异常分布、面积、形状做进一步修正确定其实用异常下限 C_a ,圈定异常。

3.2 地球化学特征参数统计

在研究区内开展了1:10000土壤地球化学测量工作,面积为19.1km²,网度为100m×40m,测线走向为43°。根据工作目的确定本区指示元素为Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Bi、Mo、W、Hg。

通过对研究区土壤化探工作,结合区域测量资料及地球化学元素反映的信息,来探讨研究区地球化学特征,研究区地球化学参数表见表2。

表2 研究区地球化学参数统计表
Table 2 Statistics of geochemical parameters in the study area

元素	样品数(N)	平均值($\bar{X}$)	中位数(M)	标准差(S)	变化系数(C_v)	最大值	最小值	浓集克拉克值(C)
Au	3831	1.893	1.81	0.626	0.44	10.03	0.42	0.489
Ag	3872	69.203	69	13.663	0.248	256	20	1.415
Hg	3735	23.683	23	6.39	0.501	145	9	0.327
Cu	3882	26.205	26.1	3.718	0.181	79.7	10.9	0.699
Mo	3891	0.583	0.56	0.219	0.435	2.71	0.09	0.301
Pb	3834	30.02	29.7	3.68	0.17	109.6	4.7	2.036
W	3924	2.217	2.2	0.523	0.253	6	0.2	0.93
Zn	3851	66.321	66.3	9.708	0.238	303.8	27	0.792
Bi	3903	0.331	0.33	0.05	0.216	1.83	0.16	0.003
As	3932	12.931	13.2	2.457	0.218	49.3	3.5	6.854

注:地质单元为算术剔除高值和低值全区统计;除Au、Ag、Hg单位为 $\times 10^{-9}$,其余元素均为 $\times 10^{-6}$ 。

经过分析,研究区内元素的主要分布特征为Ag、As、Pb元素高于平均值,为高背景场区,其次是Au、Hg、Mo等元素。而从中位数与均值关系看,Au、Pb元素均值大于中位数,揭示存在活化迁移造成的局部富集。各个元素变异系数均在17%~50.1%,最大的是Au、Hg、Mo元素,表明该种元素富集程度较高,且周围断层分布,有利于热液活动,具备较好的成矿前景。

根据成矿元素离散程度图显示(图3),区内Hg的变化程度最大,其次为Au、Mo等,反映区内是以Au的成矿作用为主,Au、Hg单值最高分别达 77.92×10^{-9} 和 1564×10^{-9} 。

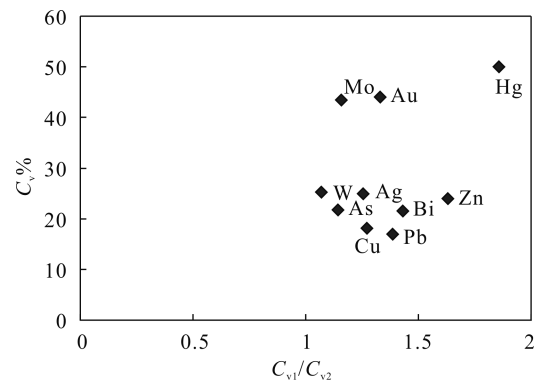


图3 研究区成矿元素离散程度图

Fig.3 Discrete degree of metallogenic elements in the study area

注: C_{v1} —原始数据变异系数; C_{v2} —剔除高值后的数据变异系数。

3.3 元素组合关系(因子分析)

众所周知,元素在自然界中以某种组合的形态呈现,为了揭示研究区内各元素之间的组合关系,及其赋存规律,对研究区内十种指示元素采用 R 型聚类进行分析研究。形成研究区元素聚类分析谱系图(图4)。

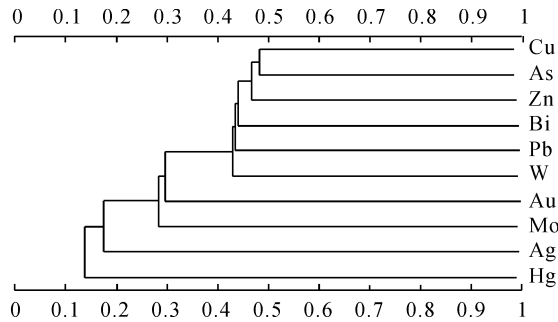


图4 研究区元素 R 型聚类分析谱系图

Fig. 4 Spectra of element R – type cluster analysis in the study area

因子分析多年以来被众多学者用以分析地球化学元素异常(时艳香等,2004;董毅等,2009;赵少卿等,2012)。因子分析是将具备复杂关系的变量通过一定方法归结为几个因子,即元素共生组合的一种统计方法(王学仁等,1982)。因子分析中包含的

主要元素,不仅表达了相互间的组合关系,还反映内在成因(董庆吉等,2008),同时,科学的组合也能反映出特定的地质环境。首先要对元素进行浓缩,并利用因子模型来确定因子荷载(时艳香等,2004),根据因子分析原理,计算元素相关系数矩阵,经过 SPSS 统计软件进行因子分析(赵少卿等,2012),得到研究区元素相关系数矩阵(表3)。

从十种元素聚类分析谱系图(图4)及相关系数矩阵(表3)中对元素进行分析,揭示区内元素之间相关性最强的元素为 Cu、Pb、Zn 元素组合。成因上讲,相关性最强的元素很可能在来源和成因上有相应的关联性(王雄军等,2008)。经分析研究区 Cu、Pb、Zn 与成矿元素伴生产出,揭示研究区具备中高温热液成矿条件,Au、Ag、Hg、Mo 与其他元素的相关性一般,反映 Au、Ag、Mo 等成矿元素主要受后期浅成低温热液作用,可能与区内部分二长石英脉及地层、构造热液活动有关。显示了与其有关的 Au、Ag、Hg、Mo 等元素成矿的专属性以及引起地球化学异常元素的共生组合类型,指示了相应地球化学异常发育的空间位置。元素组合即是相应元素的高背景分布地段,后续在工作区内通过槽探检查发现了蚀变岩,褐铁矿化严重,进一步佐证了这一证据。

表3 研究区元素相关系数矩阵

Table 3 Correlative coefficient matrix of elements in the study area

元素名称	Au	Ag	Hg	Cu	Mo	Pb	W	Zn	Bi	As
Au	1									
Ag	0.175	1								
Hg	0.139	0.137	1							
Cu	0.295	0.104	0.066	1						
Mo	0.283	0.179	0.109	0.288	1					
Pb	0.222	0.217	0.017	0.449	0.199	1				
W	0.112	-0.041	0.027	0.429	0.173	0.363	1			
Zn	0.135	0.063	0.06	0.466	0.153	0.254	0.359	1		
Bi	0.23	0.017	0.062	0.439	0.15	0.359	0.281	0.235	1	
As	0.292	0.116	0.037	0.483	0.289	0.418	0.248	0.196	0.41	1

3.4 综合异常特征

区内相关元素分布不均,含量变化较大。各元素在区内均有较高的峰值出现,但异常大小不一,面积各异。各异常虽各具特征,但它们的分布规律与成矿地质条件有一定的联系,且主要异常具有各自分布特点,各元素基本上反应了区内地层、构造、岩浆岩特征。因此,根据引起异常的主要物质来源、空

间展布、元素组合、异常规模、异常特点和地质环境条件等,研究区圈定2个综合异常带(表4,图1),编号分别为 Ht-1、Ht-2。

(1) Ht-1

该综合异常位于研究区西北部,异常区内主要为耕地,大部被第四系覆盖,出露地层有寒武纪炒米店组灰岩,寒武-奥陶纪三山子组中厚层白云岩及

表 4 研究区土壤综合异常特征一览表
Table 4 Comprehensive anomaly characteristics of soil in the study area

异常带编号	面积 (km ²)	形态与走向	元素组合	异常强度		地质背景
				平均值	最大值	
Ht-1	1.40	北东向带状	Au	4.90	9.71	灰岩、白云岩
			Ag	121.52	256.43	
Ht-2	1.51	近圆状	Au	6.50	14.80	灰岩、白云岩
			Ag	119.00	256.00	

注: Au、Ag 为 $\times 10^{-9}$, 其它为 $\times 10^{-6}$ 。

奥陶纪马家沟群中厚层灰岩、白云岩夹角砾状泥岩等。近东西向断层在异常中部穿过, 断层性质不明。

该综合异常 Au、Ag 为主, 异常带走向 NE, 呈条带状, 长约 3km, 宽 0.4 ~ 1.5km, 约 1.4km², 该异常位于断层附近区, 总体沿断层两侧分布形态。该综合异常中 Au、Ag 异常面积较大, 浓集中心明显, 异常部分元素组合形态均呈椭圆状圈闭。Au 异常强度较高, 异常峰值达 9.71×10^{-9} , 是背景值的十几倍, 推断其浓集中心和空间分布形态受附近地质实测东西向断裂带控制, 且 Au、Ag 是该区主要成矿元素, 成矿潜力较大, 对下一步找矿工作具有很好的指示意义。

(2) Ht-2

该综合异常位于岳庄水库的北部, Ht-1 异常的南西侧, 异常区大部被第四系覆盖, 主要为耕地, 出露地层同 Ht-1。

该综合异常是一个以 Au、Ag 为主的金属异常, 面积约 0.82km²。异常主要由 3 个 Au 异常 (Au-7 ~ Au-8)、5 个 Ag 异常 (Ag-7 ~ Ag-8) 组成。该综合异常中 Au、Ag 异常面积较大, 浓集中心明显。Au 异常强度较高, 峰值达 14.8×10^{-9} , 是背景值的十几倍, 且具有一定的规模和峰值。推断其浓集中心和空间分布形态受附近地质实测东西向断裂带控制。

结合成矿地质背景及区域地质条件, Ht-1、Ht-2 综合异常均位于断层附近, 进一步表明, 研究区经历了多期构造运动, 造成的不同规模的断裂构造体系, 频繁的岩浆活动为 Au 的富集和运移提供了有利的条件。

4 地球物理特征

在鲁西铜石地区杂岩体边缘, 由于受中生代燕山期的影响, 发育了较多侵入岩体 (于学峰, 2009; 毛广钰等, 2015), 而对铜石杂岩体外围的这些隐伏岩体通过空间进行分析研究较少, 本文主要通过

1:1 万激电中梯测量工作了解隐伏岩体的一些现象特征, 为地质找矿提供地球物理方面的证据。

在研究区内开展了 1:1 万激电中梯测量查证工作, 面积为 3.67km², 网度 100m $\times$ 20m, 测线与土壤测网走向一致, 为 30°。根据区域资料分析, 研究区第四系覆盖较浅, 下伏寒武纪、奥陶纪灰岩, 走向为 NW, 与电阻率异常分布基本一致。可推测视电阻率异常为灰岩岩性电性差异导致, 表明其极化率较低。研究区极化率异常呈近似椭圆状展布, 长轴走向 NW, 长约 1090m, 宽约 650m。该异常峰值高, 梯度大, 以 4.5% 的视极化率等值线圈定, 视极化率在 4.5% ~ 11.5% 之间, 该区分布有金元素地球化学异常。在研究区北东方向布置了激电测深剖面 2 条, 编号分别为: 1-2 (图 5)、1-3 (图 6)。

根据全区异常强度将测区极化率、电阻率异常分为以下三种:

(1) 中高极化率、低缓视电阻率场: 分布在研究区北部红石岭至太平安村一带。极化率在 2.5% ~ 11.5% 间, 视电阻率呈高低相间条带状展布, 高值在 $900\Omega \cdot m \sim 1100\Omega \cdot m$ 间, 低值在 $600\Omega \cdot m \sim 800\Omega \cdot m$ 间, 视电阻率场水平梯度小, 等值线间距宽大较平缓。该区第四系覆盖相对较厚, 下伏寒武纪和奥陶纪灰岩, 地层走向为北西向, 推断视电阻率异常特征为下伏地层岩性电性差异的反应, 由实测电性资料可知, 寒武纪、奥陶纪岩石极化率 $\eta < 1\%$, 该异常范围与土壤测量金元素异常分布形态近一致, 推测该极化率场可能为含金元素硫化矿物富集引起。

(2) 低缓极化率、高视电阻率场: 分布在研究区中部的东岭庄 - 太平安庄之间。极化率在 1% ~ 2% 间, 视电阻率值在 $1500\Omega \cdot m \sim 2200\Omega \cdot m$ 之间变化, 视电阻率场水平梯度较大、等值线密集。该区主要以寒武纪、奥陶纪灰岩为主, 高阻异常区推断为第四系浅覆盖及基岩出露所致, 经过实测标本电性得出, 所出露岩石自身极化率较低, 故呈低缓的极化率场特征。

(3)低缓极化率、中高视电阻率场:分布在研究区南部,整体呈北西向,高低相间条带状展布。极化率在1%~2%间,视电阻率高值在 $900\Omega\cdot\text{m}$ ~ $1300\Omega\cdot\text{m}$ 间,视电阻率场水平梯度相对较小,等值线相对较平缓。该区第四系覆盖较浅,下伏寒武纪、奥陶纪灰岩,地层走向为北西向,推断视电阻率异常特征为下伏地层岩性电性差异的反应,而寒武纪和奥陶纪灰岩极化率较低,故呈极化率呈低缓状态。该区地球化学土壤测量结果显示有北东向金元素异常,异常形态规则、峰值高、规模大,可为下步工作重

点研究地区。

综上所述,由视极化率拟断面图异常特征分析,1-2断面(图5),其极化率异常自上而下呈两低夹一高的特征,中部呈层状,倾向SW,倾角较缓。剖面北端AB/5=200m开始 $\eta_a > 5\%$,以 $\eta_a > 10\%$ 的异常中心位于AB/5=300m~390m之间,剖面南端AB/5=350m开始 $\eta_a > 5\%$,以 $\eta_a > 10\%$ 的异常中心位于AB/5=510m~650m之间,其高极化体层位呈上薄下厚的展布特征。其浅部均为低极化地质体,高低层位分明。

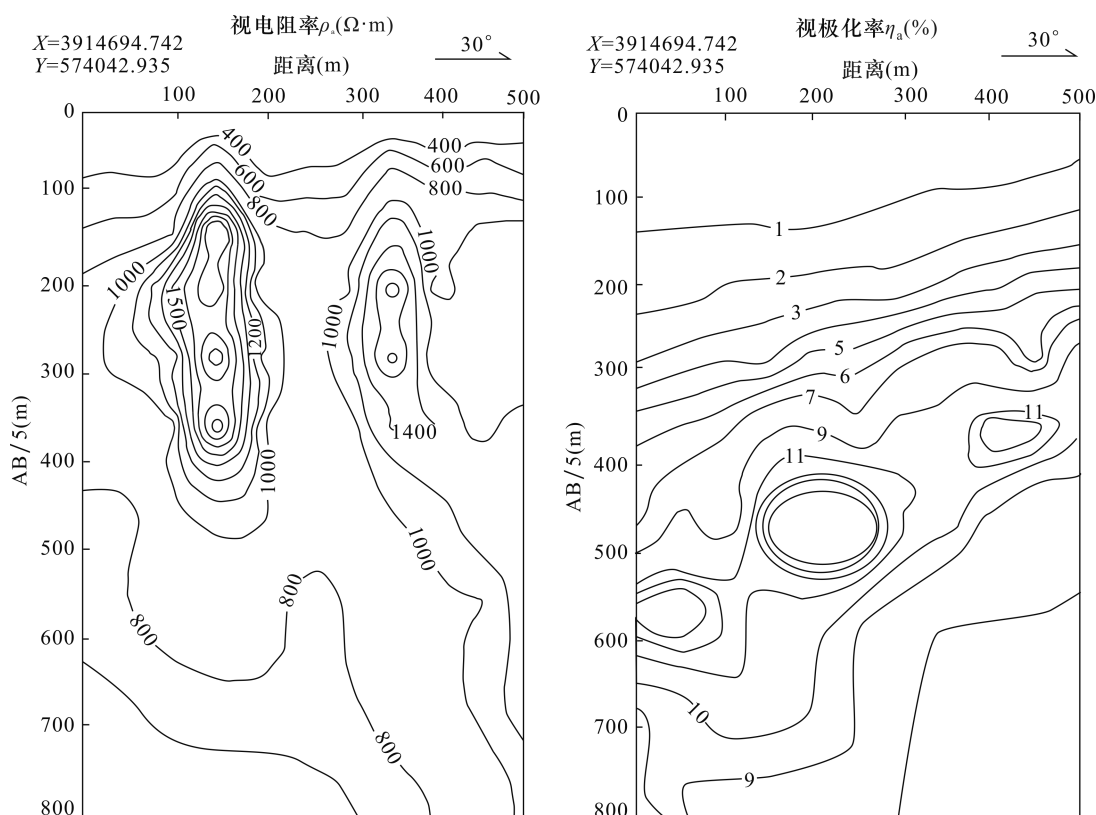


图5 研究区激电测深1-2拟断面图

Fig. 5 Quasi-cross sections of IP sounding 1-2 in the study area

由视电阻率拟断面图分析,该剖面在垂向上浅部和底部视电阻率相对低,中部电阻率相对较高,中部相对高阻异常水平层位不明显,与极化率异常无明显对应关系。横向上,呈两高夹一低的带状异常,中部低阻区向NE陡倾,剖面出现两组明显的高阻异常凸起,推断为中生代岩浆活动导致,该剖面的高极化地质体应为后期侵入体引起。

由图6激电测深1-3拟断面图可以看出,中部的高极化异常相对1-2剖面顶板埋藏浅,倾向及倾角基本一致。剖面北端AB/5=100m左右 $\eta_a > 5\%$,以 $\eta_a > 10\%$ 的异常中心位于AB/5=150m~

500m之间,剖面南端AB/5=280m开始 $\eta_a > 5\%$,以 $\eta_a > 10\%$ 的异常中心位于AB/5=380m~650m之间,其高极化体层位呈上厚下薄的展布特征。其浅部及深部均为相对低极化地质体,高低层位层位分明。

由视电阻率拟断面图分析,该剖面的中部高阻地质体中,自上而下有一明显的向南倾的条带状低阻体,低阻带的发育深度及倾向与高极化率异常有明显的对应关系,由此推断高极化地质体的层位与低阻地质体的展布层位具明显的对应关系。据此分析推断,该剖面的高极化地质体应为后期侵入体引起。

根据区域地质资料结合实地调查,该异常区基

岩为寒武纪、奥陶纪灰岩,推断研究区异常是由隐伏的中生代岩体侵入时,致使金属硫化物富集引起异常。异常的南西部分布有北东向的金元素异常,该

异常走向与激电测深剖面基本一致,形态规则,金元素异常浓集中心峰值高,分带明显。因此该异常具有较高的找矿前景。

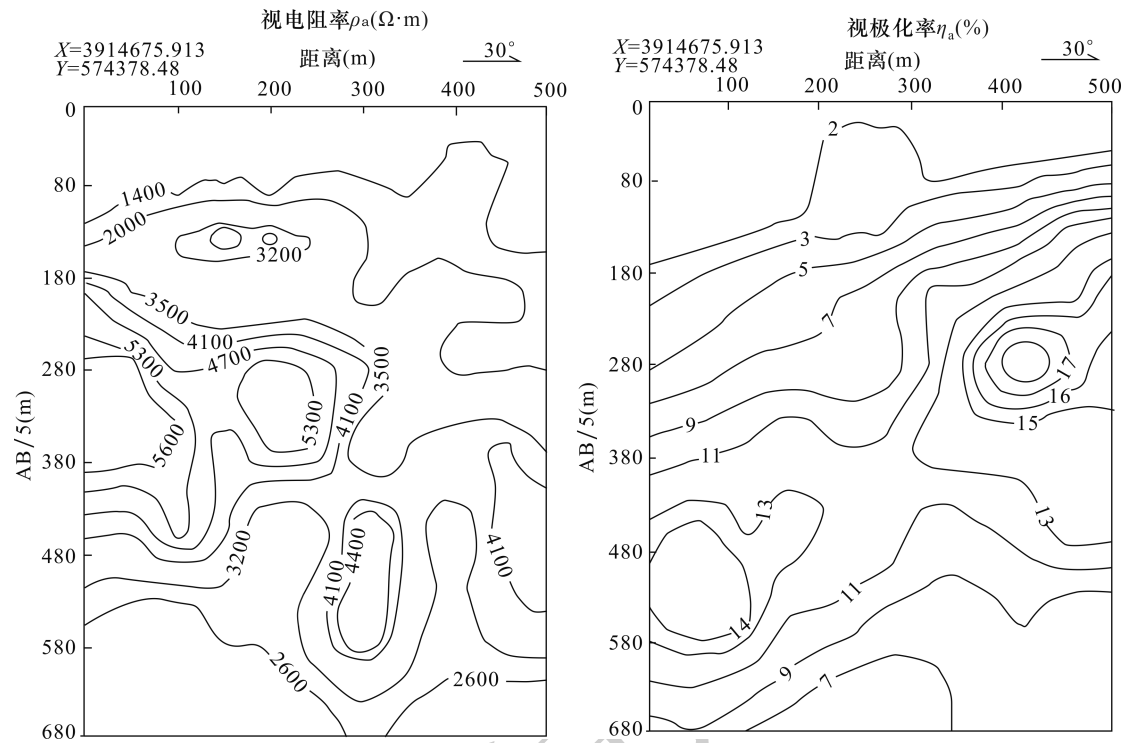


图6 研究区激电测深1-3 拟断面图
Fig.6 Quasi-cross sections of IP sounding 1-3 in the study area

5 槽探查证分析

为查证研究区物、化探异常,在研究区物化探异常范围内布设探槽予以查证,该探槽与激电测深剖面走向一致,均为30°,槽内见有由断裂构造造成的碎裂岩,该断裂走向近东西,断裂带宽6~20m,横穿圈定的激电异常及土壤综合异常Ht-1、Ht-2。

探槽围岩主要为白云质灰岩,褐铁矿化强烈,显示有热液活动的迹象,推断深部有更强烈热液活动,激电异常与此关系密切。在探槽南东侧发现一处金矿化点,该矿化点位于物探激电异常南西边缘,矿化

点处出露岩石与探槽内一致,同为白云质灰岩,但热液蚀变更加强,岩石呈紫红色,硅化、褐铁矿化明显,断层角砾发育,推测为岩浆后期热液侵蚀所致。经取样化验分析,Au含量为 0.3×10^{-6} 。

6 找矿模型研究

随着传统地质找矿方法的制约,本文将物探、化探异常特征结合研究区地质信息在前人研究基础上,在鲁西铜石杂岩体外围开展找矿分析工作,建立找矿模型(表5),以进一步促进该地区金矿找矿。

表5 鲁西铜石杂岩体外围找矿模型
Table 5 A prospecting model for the periphery of Tongshi complex in western Shandong

工作方法	特征名称	特征描述
地质分析	地层岩体	以铜石杂岩体为主,在其中、外环带,岩性以碳酸盐岩、二长斑岩、角砾岩、灰岩为主要研究对象
	控矿构造	区内NNW燕甘断裂为主,及区域内NW、EW等断裂构造的相互交汇处
	工程验证	通过总结成矿规律,工程中发现热液蚀变角砾岩、褐铁矿化等
地球物理	激电中梯	通过视电阻率与视极化率分析,研究区高极化地质体与地层展布的对对应关系,金元素异常浓集中心峰值高,分带明显
地球化学	元素异常	金元素异常是可提供的最直接信息,同时要考虑伴生元素Cu、Pb、Zn等

7 找矿前景分析

(1) 结合成矿地质背景及区域地质条件圈定 Ht-1、Ht-2 综合异常,且均位于断层附近,综合异常中 Au、Ag 异常面积较大,浓集中心明显,Au 异常峰值达 9.71×10^{-9} , 14.8×10^{-9} ,且研究区在经历多期构造运动后,产生多断裂构造体系,特别是燕山期以来频繁的岩浆活动为 Au 的富集和运移提供了有利的条件。

(2) 通过视电阻率与视极化率分析,揭示了高级化地质体与地层展布的对应关系,受中生代侵入岩影响,分带明显,金元素异常浓集中心峰值高。

(3) 研究区位于铜石杂岩体的东南缘,NW 向断裂发育,断裂带内角砾岩发育,热液蚀变强烈,在铜石地区及其外围发现众多金矿床,通过对典型矿床进行总结,揭示研究区在空间上、成因上与已发现的金矿床极具相似性,进一步表明该研究区具备良好的找矿前景。

(4) 通过物化探工作,研究区激电异常与土壤异常吻合较好,通过地质工程验证,进一步提出了地质方面的证据,蚀变较好,综合认为该区找矿潜力较大,为铜石地区及其外围找矿工作提供了一定的参考意义。

致谢:感谢中国地质调查局“燕山-太行成矿带地质矿产调查项目”子项目,感谢中化地质矿山总局山东地质勘查院各位同事对项目的完成和文章作出的贡献,该项目成果是集体的结晶,在此对在项目具体实施过程中给予支持和付出的同志们和本刊匿名审稿专家对本文提出的建设性修改意见,一并表示衷心的感谢!

[References]

- Benzaazoua M, Marion P, Robaut F, Pinto A. 2007. Gold-bearing arsenopyrite and pyrite in refractory ores: Analytical refinements and new understanding of gold mineralogy [J]. *Mineralogical Magazine*, 71(2): 123-142.
- Cai Yongfeng, Ma Yichao, Zhou Yun, Su Xiaoqian, Feng Zuohai, Ma Lianhua, Hu Rongguo. 2018. Characteristics of mineralogy, geochronology and geochemistry of the granite in Huashan, Guangxi and its tectonic implication [J]. *Geology and Exploration*, 54(5): 940-956 (in Chinese with English abstract).
- Chen Huaguo, Gan Yanjing, Quan Zhongwen. 2009. Relation between crypto-explosive function of Tongshi complex and gold mineralization and its significance on research [J]. *Land and Resources in Shandong*, 25(11): 26-30 (in Chinese).
- Chen Liang, Wang Huiyan, Sun Chengye. 2018. The application of anomaly contrast to extracting geochemical anomaly information: A study of Dubaoshan area in Heilongjiang Province [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 42(6): 1150-1155 (in Chinese).
- Chen Jiqing, Ji Hongjin, Li Senqiao. 1995. Geochemical prospecting pattern of Tongshi gold field [J]. *Geology and Prospecting*, 31(6): 49-53 (in Chinese with English abstract).
- Dong Qingji, Chen Jianping, Tang Yu. 2008. Application of R type factor analysis in mineralization prognosis by an example of Huangbuling gold deposit, Shandong Province [J]. *Geology and Prospecting*, 44(4): 64-68 (in Chinese with English abstract).
- Dong Yi, Fan Likun, Duan Huanchun, Wang Baoxun. 2009. Zonation of association of elements from geochemical survey for stream sediments in Dabanshan region, Qinghai Province [J]. *Geology and Exploration*, 45(1): 70-74 (in Chinese with English abstract).
- Emmanuel John M, Carranza. 2011. Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 110: 167-185.
- Hu Huabin, Mao Jingwen, Niu Shuyin, Li Mengwen, Chai Fengmei, Li Yongfeng, Liu Tao. 2005. Study on ore-forming fluids of the guilaizhuang gold deposits in Pingyi, western Shandong [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(1): 38-44 (in Chinese with English abstract).
- Hu Huabin, Mao Jingwen, Liu Dunyi. 2004. The SHRIMP age of zircon from Tongshi magmatic complex in western Shandong and its geological implications [J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geoscience)*, 11(2): 453-460 (in Chinese).
- Li Suimin, Yao Shuzhen. 2005. The determination of thresholds by the fractal method based on MAPGIS [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(2): 187-190 (in Chinese).
- Lu Yan, Zhou Yan, Zhang Hongliang, Yang Kai, Chen Shizhong, Xi Wanwan, Xiu Liancun, Xing Guangfu. 2017. Hydrothermal alteration and its significance for exploration at the Dongji gold-silver deposit in Zhenghe, Fujian Province [J]. *Geology and Exploration*, 53(6): 1039-1050 (in Chinese with English abstract).
- Mao Guangyu, Si Rongjun, Xiang Zhonglin, Liu Bangjun. 2015. Multi-information prognosis of gold mineralization in Tongshi area, western Shandong Province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 30(2): 208-214 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Li Xiaofeng, Zhang Zuoheng, Wang Yitian, Li Houmin, Hu Huabin. 2003. Geology, distribution, types and tectonic setting of Mesozoic epithermal gold deposits in east China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 620-637 (in Chinese with English abstract).
- Niu Shuyin, Hu Huabin, Mao Jingwen. 2005. Ore deposition controlled by detachment zones: A case study of Mofanggou style gold deposits in western Shandong [J]. *Geology in China*, 32(3): 447-451 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Ren Qijiang. 1994. The first example of tellurium-gold type epithermal deposit in China - The Guilaizhuang gold deposit [J]. *Geology and Exploration*, 30(1): 7-12 (in Chinese with English abstract).

- Shen Kun, Ni Pei, Lin Jingqian. 2001. Characteristic and evolution of ore fluids in Guilaizhuang gold deposit, southwest Shandong[J]. Chinese Journal of Geology, 36(1): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Shen Yuanchao, Zeng Qingdong, Liu Tiebing, Sun Xiuying. 2000. Geological features and metallogenetic prognostication of Zhuojiazhuang gold deposit, Pingyi County, Shandong Province[J]. Geology and Prospecting, 36(4): 20-23 (in Chinese with English abstract).
- Shi Yanxiang, Ji Hongjin, Lu Jilong, Ma Li, Duan Guozheng. 2004. Factor analysis method and application of stream sediment geochemical partition[J]. Geology and Prospecting, 40(5): 73-76 (in Chinese with English abstract).
- Si Rongjun, Yang Shengqi, Zang Xuenong, Gao Peng, Zhou Dengshi, Tan Dejun. 2005. Difficulties and counter measurement for ore search in the surroundings of Tongshi Au ore field in the west Shandong Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 20(4): 254-257 (in Chinese with English abstract).
- Tian Jingxiang, Li Xiuzhang, Song Zhiyong, Liu Handong, Huang Yongbo, Zhu Decheng. 2015. Environment, formation age and material sources of Mesozoic gold deposits in Western Shandong: A synthesis[J]. Acta Geologica Sinica, 89(8): 1530-1537 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunlin, Meng Mingliang, Lu Xiaojun, Yang Bo, Li Yong. 2018. Geochemical characteristics of intermediate-acid volcanic rocks of Late Mesozoic and the tectonic environment in the Duolun area, Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 54(5): 988-1000 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xuren. 1982. Multivariable statistical analysis of geological data[M]. Beijing: Science Press: 1-249 (in Chinese).
- Wang Xiongjun, Lai Jianqing, Lu Yanhong, Li Desheng, Zhou Jihua, Wang Jianbin. 2008. Main source of soil heavy metal pollution based on factor analysis in Taiyuan[J]. Ecology and Environment, 17(2): 671-676 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhaobo, Gao Chuanbo. 2001. Luxi Guilaizhuang gold deposit's genesis[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 16(4): 247-251 (in Chinese with English abstract).
- Xue Xuejin, Cheng Zhizhong, Zhang Lisheng. 2008. Geochemical Atlas of 76 Elements in Southwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-2 (in Chinese).
- Xu Shuping, Yang Liqiang, Gao Bangfei. 2007. The types of gold and ore-searching direction in western Shandong Province[J]. Gold Science and Technology, 15(5): 18-23 (in Chinese with English abstract).
- Yin Tiantao, Li Shoujun, Zhao Xiuli, Yuan Liyuan. 2016. Sequence stratigraphic and characteristics of carboniferous and Permian coal accumulation in Pengzhuang area of Shandong Province[J]. Land and Resources in Shandong, 32(12): 25-29 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xuefeng. 2001. Ore-forming series and model of Tongshi gold field in Pingyi, Shandong Province[J]. Geology of Shandong, 17(3-4): 60-64 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xuefeng. 2009. Geological characteristics and discussion on gold deposit forming in Tongshi area of Shandong Province[J]. Land and Resources in Shandong, 25(9): 12-19 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xuefeng, Han Zuozhen. 2008. Geology of micro-disseminated magnesium carbonate rock type gold deposit in the Tongshi area, western Shandong[J]. Geology and Prospecting, 44(4): 39-44 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingdong, Shen Yuanchao, Liu Tiebing, Sun Xiuying. 2001. Structure controlling ore factors and implications of Zhuojiazhuang gold deposit, Pingyi, Shandong Province[J]. Geology and Prospecting, 37(1): 52-54 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingdong, Shen Yuanchao, Liu Tiebing. 2000. Features and implication of fractal texture of gold tenor of ores in Zhuojiazhuang gold deposit, Pingyi, Shandong Province[J]. Geology and Prospecting, 36(3): 43-46 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guoquan. 2017. Study on characteristics and metallogenic mechanism of deep deposits in Guilaizhuang gold deposit in Pingyi County of Shandong Province[J]. Land and Resources in Shandong, 33(9): 7-13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanqing, Song Bingzhong, Wang Yufu, Zhang Ning. 2010. Metallogenetic rules and prediction of gold deposits around Tongshi complex, Western Shandong Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 40(6): 1287-1294 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zengqi, Zhang Chengji, Wang Shijin. 2014. Views on classification and contrast of tectonic units in star in Shandong Province[J]. Land and Resources in Shandong, 32(12): 25-29 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yingmei, Zhang Guoquan, Liu Chao. 2017. Geological characteristics and prospecting prospect in depth and surrounding areas of Guilaizhuang gold deposit in Pingyi County of Shandong Province[J]. Land and Resources in Shandong, 33(6): 6-11 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Shaoqing, Wei Junhao, Gao Xiang, Yi Jian, Chen Chong, Zhai Yafeng, Tian Ning, Qin Zhigang, Zhang Wensheng. 2012. Factor analysis in the geochemical subdivisions: Taking 1:50000 debris geochemical survey in the Shibanjing area of Inner Mongolia as an example[J]. Geological Science and Technology Information, 31(2): 27-34 (in Chinese).

[附中文参考文献]

- 蔡永丰, 麻芝超, 周一云, 苏小倩, 冯佐海, 马莲花, 胡荣国. 2018. 广西花山岩体矿物学、年代学、地球化学特征及其大地构造意义[J]. 地质与勘探, 54(5): 940-956.
- 陈华国, 甘延景, 全中文. 2009. 铜石杂岩体隐爆作用与金矿成矿的关系及其研究意义[J]. 山东国土资源, 25(11): 26-30.
- 陈亮, 王惠艳, 孙诚业. 2018. 多背景下异常衬值法在地球化学异常因袭提取中的应用[J]. 物探与化探, 42(6): 1150-1155.
- 陈汲清, 纪宏金, 李森乔. 1995. 铜石金矿田地球化学找矿模型[J]. 地质与勘探, 31(6): 49-53.
- 董庆吉, 陈建平, 唐宇. 2008. R型因子分析在矿床成矿预测中的应用-以山东黄埠岭金矿为例[J]. 地质与勘探, 44(4): 64-68.
- 董毅, 范丽琨, 段焕春, 王宝勋. 2009. 青海大坂山地区水系沉积物测量元素组合分区[J]. 地质与勘探, 45(1): 70-74.

- 胡华斌,毛景文,牛树银,李蒙文,柴凤梅,李永峰,刘涛. 2005. 鲁西平邑归来庄金矿床成矿流体研究[J]. 矿物岩石, 25(1): 38-44.
- 胡华斌,毛景文,刘敦一. 2004. 鲁西铜石岩体的锆石 SHRIMP - Pb 年龄及其地质意义[J]. 地学前缘, 11(2): 453-460.
- 李随民,姚书振. 2005. 基于 MAPGIS 的分形方法确定化探异常[J]. 地球学报, 26(2): 187-190.
- 卢燕,周延,张红亮,杨凯,陈世忠,隰弯弯,修连存,刑光福. 2017. 福建政和东际金-银矿床的热液蚀变特征及其勘探指示意义[J]. 地质与勘探, 53(6): 1039-1050.
- 毛广钰,司荣军,向中林. 2015. 鲁西铜石地区金矿成矿综合信息预测[J]. 地质找矿论丛, 30(2): 208-214.
- 毛景文,李晓峰,张作衡,王义天,李厚民,胡华斌. 2003. 中国东部中生代浅成热液金矿的类型、特征及其地球动力学背景[J]. 高校地质学报, 9(4): 620-637.
- 牛树银,胡华斌,毛景文. 2005. 拆离带控矿的典型实例—以鲁西磨坊沟式金矿为例[J]. 中国地质, 32(3): 447-451.
- 邱检生,王德滋,任启江. 1994. 我国首例砾金型浅成低温热液金矿床—山东平邑归来庄金矿[J]. 地质与勘探, 30(1): 7-12.
- 沈昆,倪培,林景任. 2001. 鲁西南归来庄金矿成矿流体特征和演化[J]. 地质科学, 36(1): 1-13.
- 沈远超,曾庆栋,刘铁兵,孙秀英. 2000. 山东平邑卓家庄金矿地质特征及成矿预测[J]. 地质与勘探, 36(4): 20-23.
- 时艳香,纪宏金,陆继龙,马力,段国正. 2004. 水系沉积物地球化学分区的因子分析方法与应用[J]. 地质与勘探, 40(5): 73-76.
- 司荣军,杨升岐,臧雪衣,高鹏,周登诗,谭德军. 2005. 鲁西铜石金矿田外围找矿的困境与对策[J]. 地质找矿论丛, 20(4): 254-257.
- 田京祥,李秀章,宋志勇,刘汉栋,黄永波,祝德成. 2015. 鲁西中生代金矿形成时代、物质来源及问题讨论[J]. 地质学报, 89(8): 1530-1537.
- 王春林,孟明亮,鲁孝军,杨波,李勇. 2018. 内蒙古多伦晚中生代中酸性火山岩地球化学特征及构造环境分析[J]. 地质与勘探, 54(5): 988-1000.
- 王学仁. 1982. 地质数据的多变量统计分析[M]. 北京: 科学出版社: 1-249.
- 王雄军,赖健清,鲁艳红,李德胜,周继华,王建斌. 2008. 基于因子分析法研究太原市土壤重金属污染的主要来源[J]. 生态环境, 17(2): 671-676.
- 王照波,高传波. 2001. 鲁西归来庄金矿成因[J]. 地质找矿论丛, 16(4): 247-251.
- 徐述平,杨立强,高帮飞. 2007. 鲁西地区金矿类型与找矿方向[J]. 黄金科学技术, 15(5): 18-23.
- 谢学锦,程志中,张立生. 2008. 中国西南地区 76 种元素地球化学图集[M]. 北京: 地质出版社: 1-2.
- 殷天涛,李守军,赵秀丽,原丽媛. 2016. 山东彭庄石炭-二叠纪层序地层及聚煤特征[J]. 山东国土资源, 32(12): 25-29.
- 于学峰. 2001. 山东平邑铜石金矿田成矿系列及成矿模式[J]. 山东地质, 17(3-4): 60-64.
- 于学峰. 2009. 山东平邑铜石地区金矿成矿地质特征及深部找矿讨论[J]. 山东国土资源, 25(9): 12-19.
- 于学峰,韩作振. 2008. 鲁西铜石地区镁质碳酸盐岩微细浸染型金矿成矿地质特征[J]. 地质与勘探, 44(4): 39-44.
- 曾庆栋,沈远超,刘铁兵,孙秀英. 2001. 山东平邑卓家庄金矿构造控矿因素及其意义[J]. 地质与勘探, 37(1): 52-54.
- 曾庆栋,沈远超,刘铁兵. 2000. 山东平邑卓家庄金矿金品位的分形结构特征及意义[J]. 地质与勘探, 36(3): 43-46.
- 张国权. 2017. 山东省平邑归来庄金矿深部矿床特征及成矿规律研究[J]. 山东国土资源, 33(9): 7-13.
- 张英梅,张国权,刘超. 2017. 山东省平邑县归来庄金矿深部及外围地质特征及找矿前景分析[J]. 山东国土资源, 33(6): 6-11.
- 张原庆,宋炳忠,王玉福,张宁. 2010. 鲁西铜石岩体金成矿规律和成矿预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(6): 1287-1294.
- 张增奇,张成基,王世进. 2014. 山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见[J]. 山东国土资源, 30(3): 1-23.
- 赵少卿,魏俊浩,高翔,易建,陈冲,翟亚峰,田宁,秦志刚,张文胜. 2012. 因子分析在地球化学分区中的应用: 以内蒙古石板井地区 1:5 万岩屑地球化学测量数据为例[J]. 地质科技情报, 31(2): 27-34.

Geophysical and Geochemical Characteristics and Ore Search Prospect in the Margin of the Tongshi Igneous Complex in Western Shandong

YIN Tiantao^{1,2}, QIU Guanghui², LI Shoujun¹, PENG Mingzhang², SHEN Wenhuan², ZHAO Qingtao²,
ZHANG Qisheng², ZHANG Hailiang², ZHANG Chao²

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590; 2. Shandong Geological Prospecting Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Jinan, Shandong 250013)

Abstract: The discovery of the Guilaizhuang gold deposit provides an important clue for gold exploration in Western Shandong, where the periphery of the Tongshi complex witnesses many times of breaking through in prospecting in recent years. To meet the further demand of gold exploration at this place, to explore the prospecting prospects of its periphery, on the basis of metallogenic geological background, this work carries out verification to geophysical and geochemical anomalies in this area. Results show that the abnormal values of Au and Ag are relatively higher in the study area. The associated elements are mostly high temperature hydrothermal mineralization elements, which are mainly distributed at the intersection of faults and fault zones. In particular, frequent magmatic activities have created conditions for the migration and enrichment of gold deposits and point out the direction for gold exploration in this area.

Key words: tongshi complex, geophysical characteristics, geochemical characteristics, metallogenic background, western Shandong