

青海五龙沟金矿多属性地球化学异常研究

张东^{1,2)}, 朱立新³⁾, 苏磊¹⁾, 马生明¹⁾, 陈宏强²⁾, 李景运¹⁾

1) 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊, 065000;
2) 中国地质大学, 北京, 100083; 3) 中国地质科学院, 北京, 100083

内容提要:五龙沟金矿位于东昆仑山中段北侧,是柴达木盆地周边贵金属矿产重要勘查区之一。该矿床分布严格受断裂构造控制,具有造山型金矿的典型特征。深入研究成矿系统中地球化学异常及其形成机制,对指导该区深部和外围找矿具有重要的借鉴意义。本文以多维异常体系理论为指导,通过系统总结元素富集贫化规律,揭示成矿系统中存在的多属性异常,利用 Grant 方程计算元素迁移量,进而探讨元素迁移方向,即各属性异常形成机制,建立多属性异常结构模式。结果表明:试验区内与金成矿有关的斜长花岗岩和凝灰质板岩中 Na₂O、Ba、Sr 等带出作用明显,形成显著的负异常。负异常范围涵盖了成矿元素及其伴生元素 Au、As、Sb 等由带入作用形成的正异常,丰富了成矿指示信息。此外,另一个重要发现是矿化剂元素 S 及其含量变化与金矿成矿密切相关,并由此进一步阐明了初始矿源对该区金矿成矿的控制作用。本项研究成果是从元素层面对造山型金矿成矿系统中元素活动特性的全新认识,为深入探讨此类矿床的成矿机制和找矿方法提供了思路和案例。

关键词:五龙沟金矿;多属性异常;异常形成机制;异常结构模式

五龙沟金矿位于青海省都兰县,大地构造位置上属华北—塔里木板块西南缘过渡带柴达木盆地南缘,昆中断裂带以北的东昆仑中段构造—岩浆岩带中(Li Houmin et al., 2001)。试验区内目前已发现含矿构造蚀变带 90 余条,大型岩金矿床 1 处(深水潭金矿床),中型岩金矿床 1 处(石灰沟金矿床),小型金矿床 4 处(淡水沟、红旗沟、中支沟、打柴沟金矿床)(青海省第一地质矿产勘查院,2013,内部资料),进一步找矿潜力巨大。

在金矿勘查中,地球化学理论和方法发挥了重要作用,从注重成矿系统中主成矿元素及其伴生元素正异常,逐步发展到兼顾成矿元素或其他元素负异常及正负异常构成的异常模式(Dunlop et al., 1979; Chaffee, et al., 1981; Robertson et al., 1987; Sun Chengyuan et al. 1993; Shi Changyi et al. 1996; Shi Changyi, 2002; Ma Shengming et al., 2013),发现负异常不仅分布范围广(Zhu Xun, 1983; Ji Kejian et al., 1992),而且异常明显(Ma Shengming et al., 2011, 2015)。除此之外,研究还发现,矿化剂元素在成矿元素迁移、沉淀等方面发挥直接控制作用(Ni Shijun et al. 1994),不同矿化剂

元素对金属成矿具有一定的专属性,并且对成矿强度具有特殊的指示意义(Chen Yongqing et al., 2009a, 2009b; Xi Mingjie et al., 2009; Ma Shengming et al., 2014)。随着对不同属性异常认识的逐渐深入,提出了多维异常体系概念(Ma Shengming et al., 2014),代表了勘查地球化学理论方法的最新进展,对金矿勘查具有重要指导意义。五龙沟试验区内断裂构造发育,岩浆活动频繁,变质作用强烈,为开展多维异常体系研究提供了先决有利条件。本文以金属矿床多维异常体系理论为指导,在钻孔岩石测量结果基础上,总结元素富集贫化特征,筛选多属性异常指标,揭示五龙沟金矿成矿系统中多属性异常特征,构建异常结构模型,利用 Grant 质量方程(Grant, 1986)计算元素迁移量,进而探讨元素迁移方向,即异常形成机制。通过文章结果,给该矿床深部和外围找矿提供了方向,也为该地区同类型矿床勘查提供了思路和案例。

1 试验区概况

青海五龙沟金矿属于柴达木盆地周边贵金属矿产勘查区的一部分,总体研究程度较高(Qian

注:本文为国家科技支撑计划(项目编号:2014BAB05B00);中国地质调查局地质矿产调查评价项目(项目编号:12120114060301)资助的成果。
收稿日期:2016-04-17;改回日期:2016-09-30;责任编辑:郝梓国,黄敏。
作者简介:张东(1991 年—),男,在读硕士研究生,地球化学方向。Email:724080372@qq.com。通讯作者:马生明(1963 年—),男,博士,教授级高工,主要从事矿产勘查地球化学理论方法研究。Email:mashengming@igge.cn。

Zhuangzhi et al. ,2000; Liu Zengtie, 2005; Zhang Wenqin et al. ,2004; An Guoying, 2015)。试验区总体构造线呈北西—南东向展布,其主要构造形迹以三条脆韧性剪切带为特征,构成了五龙沟地区三个主要的控矿构造带,基本控制了区内含金蚀变带及金矿体的分布,为本区寻找金矿(化)体的有利地段(Zhang Dequan et al. ,2001;2007)。本区出露的地层主要有早元古代金水口群(Pt_1J)、中元古代长城系小庙组(Pt_2Chx)、晚元古代青白口系(Pt_3Qb)及小部分新生界地层。这些地层中,含金量较高,推测可能为矿床的形成提供了成矿物质。区内中酸性岩侵入岩发育,其出露面积约占基岩面积 60% 以上,分别属于中元古代—中生代不同构造演化阶段的岩浆活动产物(Guo Xiaodong et al. ,2004)。

本文选择了位于红旗沟—黄龙沟—水闸东沟的 XI 号含金蚀变带西部矿段作为试验研究对象。XI 号含金蚀变带呈北西西向带状展布,长度大于 20km,宽 1~2km,倾向北东,倾角 $50^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 。带内金矿化比较普遍,矿化带宽几至几十米(Shi Jinyou, 1997)。金矿体多以隐伏矿体为主,以似层状、脉状分布于破碎带内的主断裂(走滑断层)两侧至北侧平行断裂(凝灰质板岩与斜长花岗岩接触部位)之间,其在走向、倾向上均存在膨大、狭缩和尖灭再现的特征。岩石均发生了不同程度的热液蚀变,蚀变类型主要有硅化、绢云母化、高岭土化、碳酸盐化。矿区金属矿物组合主要有:黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿和黄铜矿。研究表明,该区硅化、黄铁矿化、绢云母化、高岭土化与金矿化呈正相关关系。

2 试验方法

2.1 样品采集与测试

在五龙沟金矿试验区,选择 39、43、77、81、89、93、95、105 和 129 号勘探线剖面(图 1b),系统采集剖面上钻孔中矿床围岩、蚀变岩、矿化体和矿体样品。基本采样间距 3~8m,样品采集选择分层连续捡块方式,重量为 200~300g。指标初选试验选择在 81、89 和 93 勘探线剖面进行,共采集样品 284 件,分析测试 42 项元素;其他钻孔样品用作元素富集贫化特征与规律研究,共计 1168 件,其中斜长花岗岩样品 430 件,凝灰质板岩样品 528 件,分析测试 20 项元素(表 1);受文章篇幅所限,元素质量迁移规律研究以 93 号勘探线剖面为例(图 2),涉及样品 180 件。成矿地球化学环境及物质来源研究样品 12 件,测试 15 项稀土元素。样品测试由中国地质科学

院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室完成。分析质量采用标准物质和重复分析方式,样品分析测试合格率 100%。

2.2 元素富集贫化规律研究

试验区钻孔中出露的岩性主要为斜长花岗岩和凝灰质板岩,元素富集贫化特征和规律即按这两种岩性进行统计。为了更清晰展示元素的富集贫化特征和规律,按元素地球化学性质将试验中分析测试的元素分为以下几种类型:成矿元素、亲铜元素、亲石分散元素、常量元素、矿化剂元素、铁族元素、稀有元素以及稀土元素。以主成矿元素 Au 含量变化为基准,分段统计随着主成矿元素 Au 含量增高,其他元素含量的变化特征和规律,并从中筛选出发生明显富集和贫化的元素,将这些元素视为该矿床成矿指示元素。

2.3 多属性异常研究

多属性异常研究选择在 93 号勘探线剖面上进行。根据成矿指示元素筛选结果,以试验区所有样品中相应元素中位数作为背景值,利用 Grant 方程(Grant,1986)计算成矿指示元素迁移量,根据成矿指示元素迁移量编制异常图,总结各属性异常特征,根据迁移量异常分布规律及其与矿体空间位置关系,探讨成矿指示元素迁移方向,进而揭示各属性异常形成机制,建立多属性异常结构模式。

3 元素富集贫化规律及勘查指标

元素富集贫化特征和规律研究过程中,选择中国花岗岩、凝灰质板岩的元素平均化学组成(Chi Qinghua et al. ,2007)作为斜长花岗岩、凝灰质板岩的区域背景值,利用富集系数(用 q 表示,定义为参加统计样品元素含量平均值与区域背景值之比)对元素富集贫化特征进行判断(表 1)。依据元素含量随着主成矿元素(Au)含量增高的变化规律,可以筛选出矿床的成矿指示元素(Ma Shengming et al. , 2009;Ai Jinbiao et al. ,2013a;2013b;Liu Yanpeng et al. ,2015;Chen Hongqiang et al. ,2015)。参照这种方式,对试验区主要岩性中元素富集贫化规律进行了探讨。

3.1 元素富集贫化规律

与中国花岗岩中相应元素丰度相比,斜长花岗岩中 As、Bi、Sb、Ag、Cu、Zn、Hg、S、MgO、CaO、 K_2O 、 Fe_2O_3 均表现为富集的特征(表 1),其中 As、Cu、Hg、Sb 随着 Au 矿化增强,其富集程度有增大的趋势,表现为正相关性的特点。当 Au 含量小于 1000

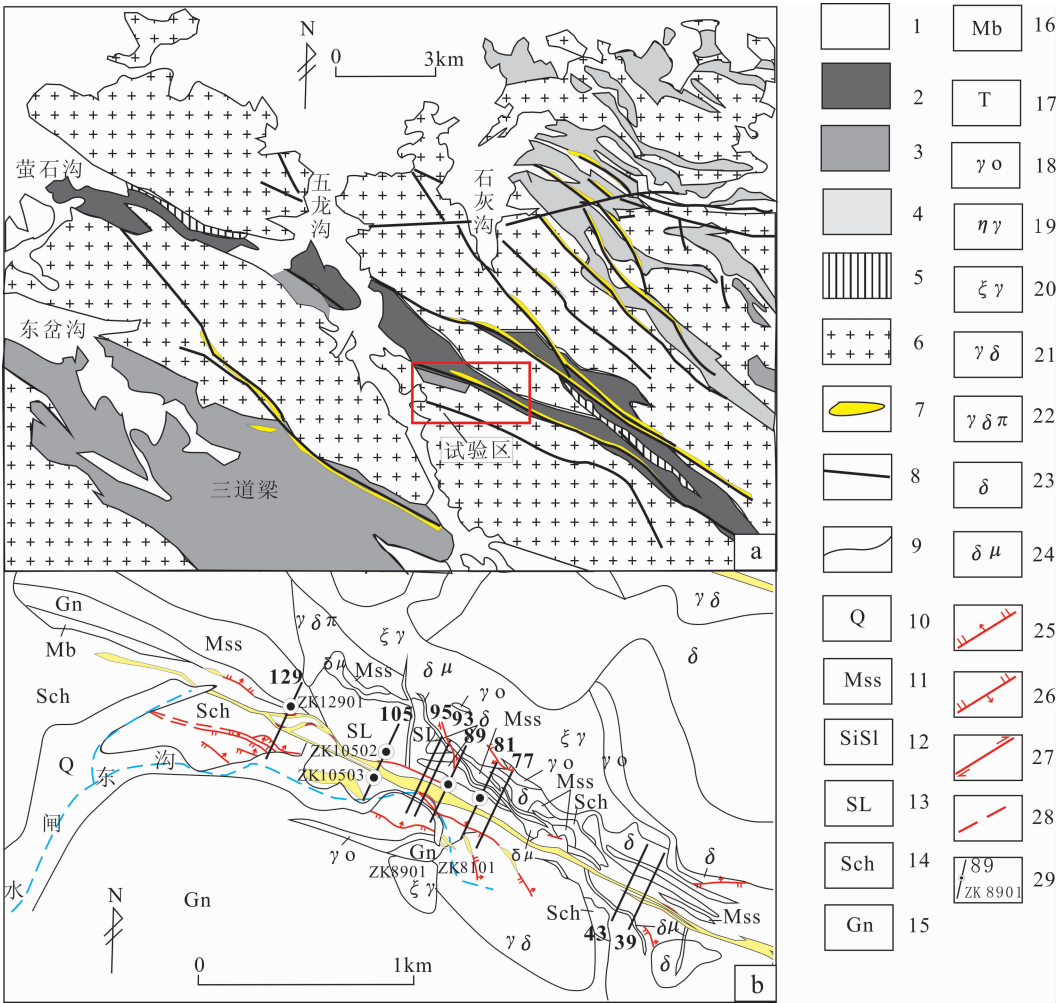


图 1 五龙沟试验区地质及试验工作部署示意图

Fig. 1 The geological and engineering map of Wulonggou experimental area

1—第四纪;2—新元古界丘吉东沟组变质砂岩/凝灰岩/凝灰质板岩;3—中元古界小庙组斜长片麻岩/黑云石英片岩;4—古元古界金水口群黑云斜长片麻岩;5—早中生代侵入体;6—早古生代侵入体;7—(含 Au)蚀变破碎带;8—主要断裂带;9—地质界线;10—第四系;11—变砂岩;12—硅质板岩;13—凝灰质板岩;14—石英片岩;15—斜长片麻岩;16—大理岩;17—晶屑凝灰岩;18—斜长花岗岩;19—二长花岗岩;20—钾长花岗岩;21—花岗闪长岩;22—花岗闪长斑岩;23—闪长岩;24—闪长玢岩;25—正断层;26—逆断层;27—平移断层;28—性质不明断层;29—试验剖面、钻孔位置

1—Quaternary;2—Neoproterozoic Qiuji Donggou Formation metamorphic sandstone/tuff/ tuffaceous slate;3—Mesoproterozoic Xiaomiao group plagiogneiss/biotite quartz schist;4—Palaeoproterozoic Jinshuikou group biotite plagiogneiss;5—Early Mesozoic intrusions;6—Early Paleozoic intrusive;7—(Au) altered fracture zone;8—fault zone;9—geological boundary;10—Quaternary;11—sandstone;12—siliceous slate;13—tuffaceous slate;14—quartz schist;15—plagiogneiss;16—marble;17—crystal tuff;18—plagioclase granite;19—monzonitic granite;20—moyite;21—granodiorite;22—granodiorite porphyry;23—diorite;24—diorite porphyrite;25—normal fault;26—reverse fault;27—translation fault;28—unknown fault;29—test section, drilling position

$\times 10^{-9}$ 时,Ag、Pb随着 Au 矿化增强,其富集程度增大,也表现为正相关性的特点;当 Au 含量大于 1000×10^{-9} 时,富集程度相对降低,该趋势与矿化剂元素 S 和铁族元素 Fe_2O_3 的变化规律一致。

Ba、Sr、 Na_2O 、 K_2O 、 SiO_2 表基本低于各自中国花岗岩丰度(表 1),表现出贫化特征;常量元素 Na_2O 随着 Au 含量增高贫化程度逐渐加大,两者呈现出明显负相关性,亲石分散元素 Ba、Sr 与 Na_2O 含

量变化规律大体一致。

常量元素 Al_2O_3 和稀有元素 Zr 表现为惰性。其含量变化比较稳定,不随 Au 矿化程度而变化。其他元素富集或贫化程度各异,与 Au 矿化强度没有明显的相关性。

与中国凝灰质板岩丰度相比,试验区凝灰质板岩中 As、Bi、S、Ag、Cu、Hg、Pb、Zn、CaO、MgO、 Fe_2O_3 表现出富集的特征(表 1)。其中,随着 Au 含量

的增高,亲铜元素 Ag、As、Hg、Sb、Pb、Zn 富集程度逐渐增大,表现出与 Au 含量的正相关性。当 Au 的含量小于 1000×10^{-9} 时,矿化剂元素 S 和铁族元素 Fe_2O_3 随着 Au 含量增高富集系数变大的规律性很明显,只是当 Au 含量大于 1000×10^{-9} 之后,富集程度相对变小,这一变化特征与斜长花岗岩中一致(表 2,表 3)。

表 1 五龙沟试验区不同岩性中元素平均含量特征统计表
Table 1 Statistics of characteristics of the average element content in different lithology of Wulonggou experimental area

元素分类	元素	斜长花岗岩 (n=430)			凝灰质板岩 (n=528)		
		平均含量	平均化学组成	q	平均含量	平均化学组成	q
成矿元素	Au	398	0.48	829	178	1.7	105
亲铜元素	Ag	330	60	5.5	90	53	1.7
	As	1193	1.2	994	291	9.5	31
	Bi	3.1	0.24	12.7	2.5	0.22	11
	Cu	60	5.5	11	65	27	2.4
	Hg	33	6.4	5.1	17	7	2.4
	Pb	167	26	6.4	27	14	1.9
	Sb	13	0.13	98	3.8	0.57	6.7
	Zn	312	40	7.8	128	78	1.6
亲石分散元素	Ba	548	680	0.81	474	690	0.69
	Sr	112	220	0.50	180	170	1.1
常量元素	SiO ₂	61	72.4	0.84	60	63.87	0.94
	Al ₂ O ₃	16	13.83	1.1	15	16.43	0.89
	MgO	2.3	0.64	3.6	3.8	2.14	1.8
	CaO	3.3	1.34	2.5	3.8	1.85	2.0
	Na ₂ O	1.4	3.55	0.40	2.3	2.21	1.1
	K ₂ O	3.6	4.34	0.83	2.2	3.08	0.73
矿化剂元素	S	13837	90	154	9163	120	76
铁族元素	Fe ₂ O ₃	6.6	1.23	5.3	7.5	1.67	4.5
稀有元素	Zr	197	155	1.3	120	220	0.55

注:岩石平均化学组成据迟清华和郅明才(Chi Qinghua et al., 2007);x:元素含量平均值;q:元素含量平均值与区域背景值之比;微量元素含量单位: Au、Ag($\times10^{-9}$),其余微量元素($\times10^{-6}$);常量元素质量分数单位为 10^{-2} 。

Ba、Al₂O₃、K₂O、Zr 表现出贫化特征(表 1)。亲石分散元素 Ba 随着 Au 矿化强度的增大,贫化程度逐渐减低,但始终为贫化的状态;当 Au 含量小于 30×10^{-9} 时,亲石元素 Sr 和常量元素 Na₂O 表现为富集,在 Au 含量大于 30×10^{-9} 之后,两者转变为贫化状态,随着矿化程度的增大,与 Au 含量呈负相关关系。与 K₂O、Zr 的情况恰好相反。

常量元素 SiO₂、Al₂O₃ 含量与 Au 含量变化无关,为惰性元素。其他元素富集或贫化程度各异,与 Au 矿化强度没有相关性。

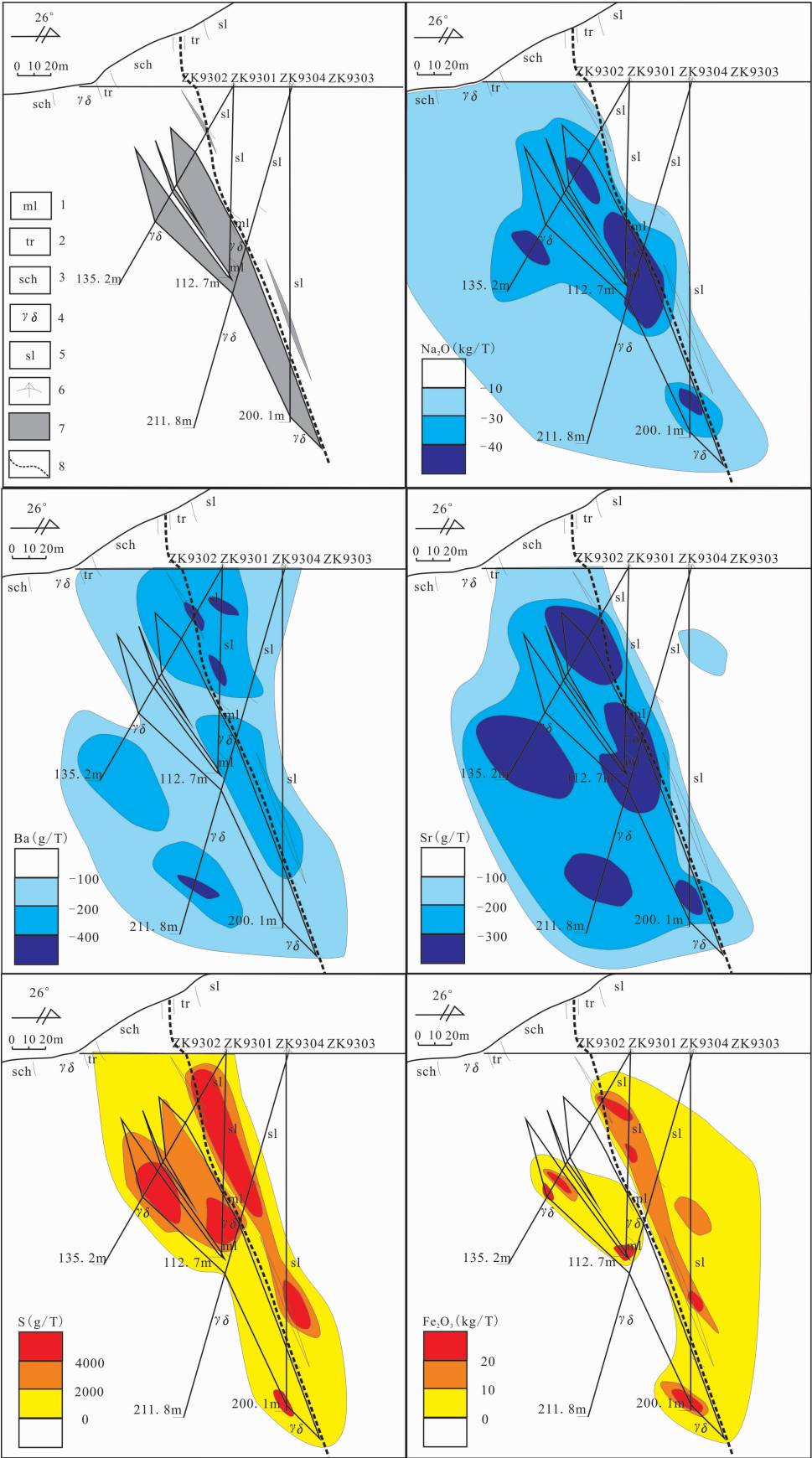
3.2 异常指标筛选

综合表 1,表 2 和表 3 试验结果不难看出,在五龙沟金矿主要赋矿围岩斜长花岗岩和凝灰质板岩中,部分元素富集贫化特征明显,而且规律性很强。在两种岩石中均发生富集的元素有亲铜元素 Ag、As、Bi、Cu、Hg、Pb、Sb、Zn、常量元素 MgO、CaO、矿化剂元素 S 和铁族元素 Fe_2O_3 ,其中以斜长花岗岩中 As、Sb 和 S 的富集程度最大。在两种岩石中均发生贫化的元素有亲石分散元素 Ba 和常量元素 K₂O。Al₂O₃ 基本表现为惰性。随着 Au 含量增大,As、Sb、S 含量增大,富集程度增强,与 Au 含量表现出显著的正相关关系,斜长花岗岩中,Na₂O、Sr 呈现贫化,而且贫化程度随 Au 含量增大增强;Na₂O 和 Sr 在凝灰质板岩中平均富集系数大于 1,表现出富集特征,但是随着 Au 含量增大,这两个元素含量有规律地降低,与 Au 含量间的负相关关系明显。据此,依据赋矿围岩中元素富集贫化特征和规律,以多维异常体系理论为指导,选择了 Na₂O、Ba、Sr、S、 Fe_2O_3 、Au、Ag、As、Sb 和 Al₂O₃ 等指标,用来指示不同属性的异常(表 4)。

4 多属性异常特征

筛选多属性异常指标的目的,是为探讨多属性异常奠定基础。试验研究以 93 勘探线为对象,选择了该勘探线上 ZK9301、ZK9302、ZK9303、ZK9304 四个钻孔。为了更直观展示各种属性异常及其形成机制,在钻孔中岩石测量样品分析测试结果基础上,根据惰性元素质量守恒原理,将元素含量转变为成矿过程中元素的迁移量。计算过程参照元素迁移量定量计算的方式(Ai Jinbiao et al., 2013; Liu Yanpeng et al., 2015; Chen Hongqiang et al., 2015),计算公式为: $\Delta C_i = \Delta M_i / M^0 = (M^A / M^0) C_i^A - C_i^0 = (C_i^0 / C_i^A) C_i^A - C_i^0$ 。其中, C_i^A 、 C_i^0 为蚀变岩和原岩中元素 i 的质量分数, C_i^A 、 C_i^0 为原岩和蚀变岩中惰性元素 i 的浓度,原岩中 i 元素的质量分数通过中位数的方法来确定; ΔC_i 为元素 i 的质量变化; M^A 、 M^0 为蚀变岩和原岩的质量。当 $\Delta C_i > 0$ 时,代表该元素在蚀变过程中发生了带入; $\Delta C_i < 0$ 则被带出。

根据惰性元素质量守恒原理,在利用质量平衡方程进行元素迁移量计算时,惰性元素(j)的选择尤为重要。根据本文元素富集贫化特征和规律研究结果,选择了 Al₂O₃ 作为惰性元素。试验区内各元素的背景值采用试验剖面钻孔岩石测量样品分析数据中位数(表 5)。



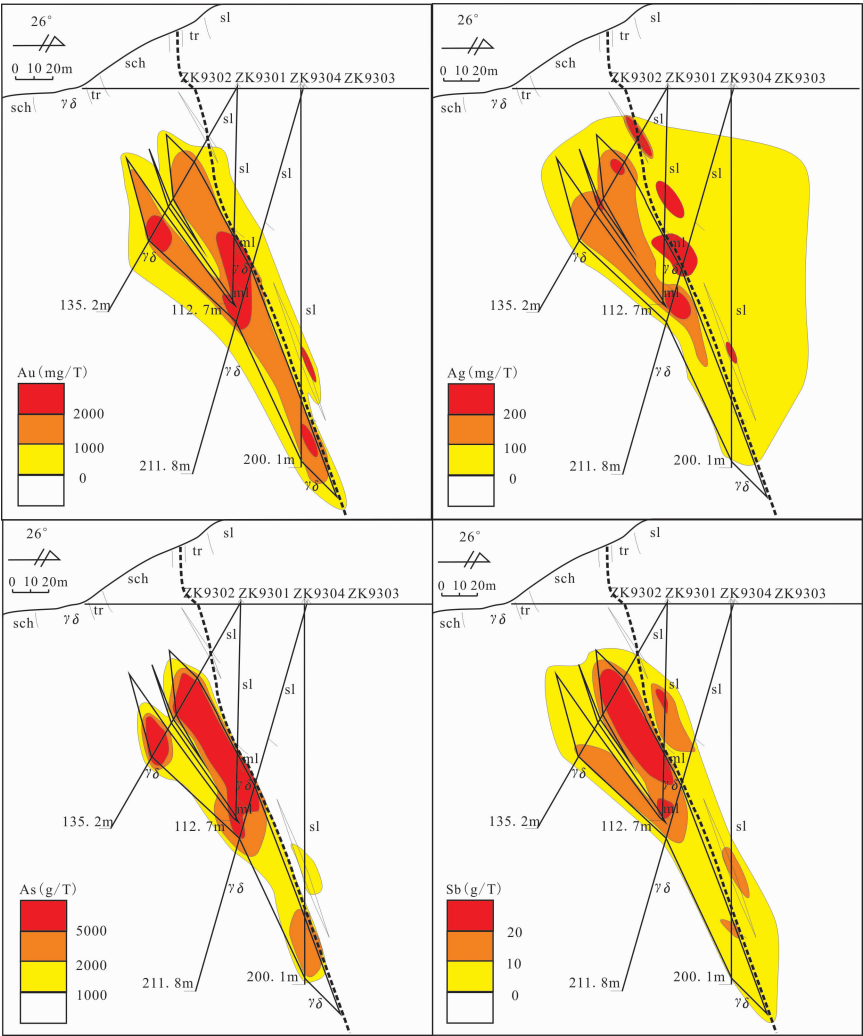


图 2 五龙沟试验区 93 号勘探线剖面图和元素迁移量异常图
Fig. 2 The profile of the 93 exploration line and geochemistry anomalous of element migration in Wulonggou experimental area

1—糜棱岩;2—碎裂岩;3—黑云石英片岩;4—斜长花岗岩;5—凝灰质板岩;6—钻孔位置及编号;7—金矿体;8—主断裂带
1—Mylonite;2—cataclasite;3—biotite quartz schist;4—plagiogranite;5—tuffaceous slate;
6—drilling position and number;7—gold ore body;8—main fault zone

4.1 负异常

在五龙沟金矿试验剖面上,出现最明显负异常的元素是 Na_2O ,Ba,Sr(图 2),从元素迁移量计算结果可知(表 5),这些元素的负异常是由于带出作用引起的。在矿体部位 Na_2O 表现出极显著的带出特征,越接近矿体位置,带出量越大。带出量大于 10kg/T 的范围很大,且分布连续,向矿体上盘方向元素带出现象逐渐减弱直至消失,而向矿体下盘方向 Na_2O 负异常却没有封闭。亲石元素 Ba,Sr 也表现出明显带出特征,Ba 带出量异常($>100\text{ g/T}$)和 Sr 带出量异常($>100\text{ g/T}$)分布范围大且连续。以 Na_2O ,Ba,Sr 为代表的负异常涵盖整个 Au 矿体以及 Au,Ag,As,Sb 等成矿和伴生元素异常,将五龙

沟金矿限定在由热液活动形成的负异常之内。

4.2 矿化剂元素 S 异常

研究表明,五龙沟金矿石中的金以可见金及显微包裹金的形式赋存于毒砂、含砷黄铁矿等硫化物和硫砷化物中(Li Houmin et al., 2001),由此就不难理解试验剖面上 Au 矿体与 S 异常总体一致的空间分布关系。试验区内矿化剂元素 S 在斜长花岗岩和凝灰质板岩中的背景值较相同类型岩石中 S 的平均化学组成分别高出 42 倍和 27 倍,可见这两种岩石中 S 存在明显的初始富集。S 迁移量计算结果表明,在 Au 矿化范围内,S 表现为带入特征,越接近矿体或断裂带 S 带入量越大,通常大于 4000g/T 。据此推测,富 S 地质体中的 S 在热液活动影响下发

表 2 试验区斜长花岗岩中元素含量随 Au 含量变化规律统计表

Table 2 Statistics of the variations of average element contents with the increasing of Au content in Plagiogranite of Wulonggou experimental area

元素分类	元素	丰度 *	Au 含量段									
			<6(<i>n</i> =77)		6~30(<i>n</i> =139)		30~100(<i>n</i> =80)		100~1000(<i>n</i> =86)		>1000(<i>n</i> =47)	
			X	q	X	q	X	q	X	q	X	q
成矿元素	Au	0.48	2.8	6	15	31	59	122	361	751	2825	5886
亲铜元素	Ag	60	132	2.2	132	2.2	195	3	978	16	288	4.8
	As	1.2	27	22	223	185	1036	863	1484	1236	5709	4757
	Bi	0.24	0.68	2.8	0.87	3.6	4.3	18	3.6	15	10	42
	Cu	5.5	40	7	58	10	64	12	68	12	73	13
	Hg	6.4	20	3.1	32	5	33	5	39	6	43	6.8
	Pb	26	43.3	1.7	75	2.9	80	3.1	557	21	74	2.9
	Sb	0.13	2.5	19	3.8	29	5.9	45	18	139	58	446
	Zn	40	209	5.2	196	4.9	592	15	363	9.1	254	6.3
亲石分散元素	Ba	680	473	0.70	536	0.79	625	0.92	575	0.85	525	0.77
	Sr	220	99	0.45	126	0.57	126	0.57	103	0.47	85	0.38
常量元素	SiO ₂	72.4	63	0.87	62	0.86	59	0.81	61	0.84	58	0.80
	Al ₂ O ₃	13.83	17	1.2	16	1.1	15	1.1	15	1.1	16	1.2
	MgO	0.64	2.0	3.2	2.4	3.7	2.5	3.9	2.3	3.6	2.3	3.6
	CaO	1.34	1.9	1.4	3.0	2.2	4.7	3.5	3.5	2.6	3.9	2.9
	Na ₂ O	3.55	1.6	0.45	1.7	0.47	1.5	0.41	1.1	0.32	0.74	0.21
	K ₂ O	4.34	3.9	0.89	3.5	0.8	3.4	0.78	3.7	0.85	3.8	0.86
矿化剂元素	S	90	9595	107	11255	125	15852	176	18748	208	16011	178
铁族元素	Fe ₂ O ₃	1.23	6.0	4.9	6.3	5.1	7.0	5.7	6.9	5.6	6.9	5.6
稀有元素	Zr	155	203	1.3	190	1.2	196	1.3	208	1.3	190	1.2

注:岩石平均化学组成据迟清华和鄢明才(Chi Qinghua et al.,2007);x:元素含量平均值;q:元素含量平均值与区域背景值之比;微量元素含量单位:Au、Ag(×10⁻⁹),其余微量元素(×10⁻⁶);常量元素质量分数单位为 10⁻²。

表 3 试验区凝灰质板岩中元素含量随 Au 含量变化规律统计表

Table 3 Statistics of the variations of average element contents with the increasing of Au content in Tuffaceous slate of Wulonggou experimental area

元素分类	元素	丰度 *	Au 含量段									
			<6(<i>n</i> =167)		6~30(<i>n</i> =231)		30~100(<i>n</i> =111)		100~1000(<i>n</i> =43)		>1000(<i>n</i> =19)	
			X	q	X	q	X	q	X	q	X	q
成矿元素	Au	1.7	3.8	2	13	8	162	95	329	193	3817	2245
亲铜元素	Ag	53	72	1.4	83	1.6	111	2.1	126	2.4	211	4.0
	As	9.5	58	6	98	10	629	66	1217	128	2750	289
	Bi	0.22	0.48	2.2	1.3	5.9	7.2	33	7.5	34	6.7	31
	Cu	27	48	1.8	69	2.6	84	3.1	91	3.4	60	2.2
	Hg	7	15	2.1	16	2.3	18	2.6	20	2.9	39	5.5
	Pb	14	17	1.2	29	2.1	29	2.1	39	2.8	70	5
	Sb	0.57	2.1	3.7	2.9	5.1	5.6	9.9	7.6	13	20	35
	Zn	78	86	1.1	106	1.4	173	2.2	180	2.3	530	6.8
亲石分散元素	Ba	690	486	0.70	453	0.66	477	0.69	489	0.71	610	0.88
	Sr	170	203	1.2	181	1.1	158	0.93	146	0.86	91	0.53
常量元素	SiO ₂	63.87	61	0.96	60	0.94	58	0.91	58	0.91	60	0.94
	Al ₂ O ₃	16.43	15	0.89	15	0.89	14	0.88	14	0.86	16	0.99
	MgO	2.14	3.8	1.8	4.0	1.8	3.8	1.8	3.7	1.7	2.3	1.1
	CaO	1.85	3.3	1.8	4.0	2.1	4.2	2.2	4.3	2.3	3.6	1.9
	Na ₂ O	2.21	2.7	1.2	2.4	1.1	2	0.91	1.6	0.73	0.93	0.42
	K ₂ O	3.08	2.2	0.70	2.1	0.69	2.3	0.75	2.6	0.84	4.0	1.3
矿化剂元素	S	120	3755	31	8395	70	18641	155	22496	187	11371	95
铁族元素	Fe ₂ O ₃	1.67	7.2	4.3	7.4	4.4	8.3	5.0	8.7	5.2	6.0	3.6
稀有元素	Zr	220	112	0.51	117	0.53	130	0.59	142	0.65	180	0.82

注:岩石平均化学组成据迟清华(Chi Qinghua et al.,2007);x:元素含量平均值;q:元素含量平均值与区域背景值之比;微量元素含量单位:Au、Ag(×10⁻⁹),其余元素(×10⁻⁶);常量元素质量分数单位为 10⁻²。

表 4 五龙沟试验区地球化学指标与异常属性表

Table 4 The geochemical index and attribute geochemical anomalies in Wulonggou experimental area

元素	异常属性及作用
Na ₂ O、Ba、Sr	负异常:指示成矿前提
S	矿化剂元素异常:指示成矿强度及物质
Fe ₂ O ₃	展示 S 与 Fe 和成矿元素间协同平衡
Au	成矿元素:表示成矿强度及物质
Ag、As、Sb	成矿伴生元素:指示成矿作用
Al ₂ O ₃	惰性元素:元素迁移量计算

表 5 五龙沟试验区 93 号勘探线钻孔岩心元素平均迁移量

Table 5 Statistics of Migration quantity in exploration line 93 of Wulonggou experimental area

元素	斜长花岗岩(n=84)				凝灰质板岩(n=80)			
	ΔC _i	χ	Q	丰度	ΔC _i	χ	Q	丰度
Na ₂ O	-3.3	3.6	1	3.6	0.29	2.2	1	2.2
Ba	-100	680	1	680	-212	690	1	690
Sr	-279	220	1	220	22	170	1	170
S	2491	5062	56	90	1296	3236	27	120
Fe ₂ O ₃	0.5	6.3	5.1	1.2	2.0	7.3	4.4	1.7
Au	1134	33	68	0.48	46	10	6	1.7
Ag	85	100	1.7	60	40	66	1.2	53
As	2345	188	157	1.2	164	43	4.5	9.5
Sb	9.7	4.0	31	0.13	2.5	2.1	3.6	0.57

注:*n* 为参加统计的样品数,Δ*C_i* 为试验钻孔中元素平均迁移量,χ 为元素背景值,*Q* 为试验钻孔中元素背景值与平均化学组成的比值,平均化学组成据迟清华等(Chi Qinghua et al., 2007);Au、Ag 迁移量单位为 ug/T,As、Sb、Ba、Sr、S 迁移量单位为 g/T,Na₂O、Fe₂O₃ 迁移量为 kg/T;Au、Ag 含量单位为 10⁻⁹,其他微量元素含量单位为 10⁻⁶,常量元素含量单位为 %。

生了活化、迁移和再富集。从 S 迁移量异常图上不难看出,无论是斜长花岗岩还是凝灰质板岩中,S 迁移量都是从外围向断裂带方向增大,导致断裂带两侧斜长花岗岩和凝灰质板岩中 S 的带入量最大,这就是说赋矿围岩中的 S 是从外围向矿体货断裂带方向迁移的。

表 6 五龙沟试验区元素 S 含量对比表

Table 6 The comparison of the content element S in Wulonggou experimental area

岩性	斜长花岗岩		凝灰质板岩	
	见矿 (<i>n</i> =22)	不见矿 (<i>n</i> =265)	见矿 (<i>n</i> =5)	不见矿 (<i>n</i> =270)
Au 平均含量	2521	93	1343	38
S 平均含量	29166	16308	17966	12721

注:*n*:样品个数;Au(×10⁻⁹),S(×10⁻⁶)。

鉴于 S 对五龙沟金矿床的形成具有直接控制作用,对 S 含量和金成矿的关系进行了更深入探讨。从表 6 中可以看出,无论是见矿还是不见矿地段,赋矿围岩中 S 含量都显著富集,只是在见矿地段富集

幅度更大。在赋矿斜长花岗岩中,见矿地段 S 的平均含量比不见矿地段高出了 13000×10⁻⁶左右。凝灰质板岩中见矿地段 S 的平均含量也比不见矿地段高出了 6000×10⁻⁶左右。由此认为,尽管对五龙沟金矿而言 S 不是构成成矿矿物的物质,但却是金矿物寄主矿物的组成物质,因此斜长花岗岩和凝灰质板岩中 S 的初始富集为金矿的形成奠定了有利条件,在后期热液作用下 S 又发生活化、迁移和再富集,对试验区内金矿床的形成起到直接控制作用。

4.3 S 与 Fe₂O₃ 的协调平衡

前已述及,在赋矿断裂带两侧,即 Au 矿体上、下盘围岩中,S 均表现出带入特性,但是在断裂带下盘斜长花岗岩中有 Au 矿体产出,而在断裂带上盘的凝灰质板岩中却没有发现 Au 矿体,出现这种现象的原因,可以认为是凝灰质板岩中不具备形成金矿床的物质条件,不过依据本文研究结果,可以从 Fe₂O₃ 迁移特性中得到解释。在成矿系统中,常量元素 Fe 和成矿及其伴生元素(Cu、Pb、Zn、Ag、As、Sb 等)都可以与 S 结合生成金属硫化物矿物。岩石中元素含量统计结果显示,斜长花岗岩和凝灰质板岩中全铁含量(表示为 Fe₂O₃)较相同类型岩石高出了 4~5 倍,由此不仅反映出试验区赋矿围岩化学组成的特殊性,而且还预示 Fe 的活动特性将对 Au 矿的形成产生影响。从图 3 中可以看到,Fe₂O₃ 带入量大于 10kg/T 的范围主要集中在断裂带上盘凝灰质板岩中,与 S 带入量大于 2000g/T 的地段吻合。由此判断,在断裂带上盘 S 的带入更多的是与 Fe 伴生,这样就可能导致大量黄铁矿的生成,从而抑制金的寄主矿物,如毒砂、含砷黄铁矿等的形成,进而间接地限制 Au 矿床的形成。在断裂带下盘斜长花岗岩中,S 带入现象明显,而且范围较大,程度较高,而 Fe 带入地段相对局限,程度也不高,两者的相关性不强,与断裂带上盘情况存在明显差异。

4.4 成矿及其伴生元素异常

在整个试验区内,主成矿元素 Au 平均含量很高,表现出显著富集特征(表 1)。试验剖面上斜长花岗岩和凝灰质板岩中 Au 背景含量分别是 32.6×10⁻⁹和 10.2×10⁻⁹,也表现出明显富集的特征(表 5),表明试验区主要赋矿围岩中 Au 具备成矿的物质条件。在此基础上,Au 矿体产出地段 Au 又呈现出显著带入特征,表现为带入的范围大且分布连续,带入量大于 1000g/T 的范围涵盖了整个 Au 矿体,表明 Au 矿体的形成至少经历了两个阶段:一是赋矿围岩中 Au 初始富集;二是赋矿围岩中 Au 活化迁

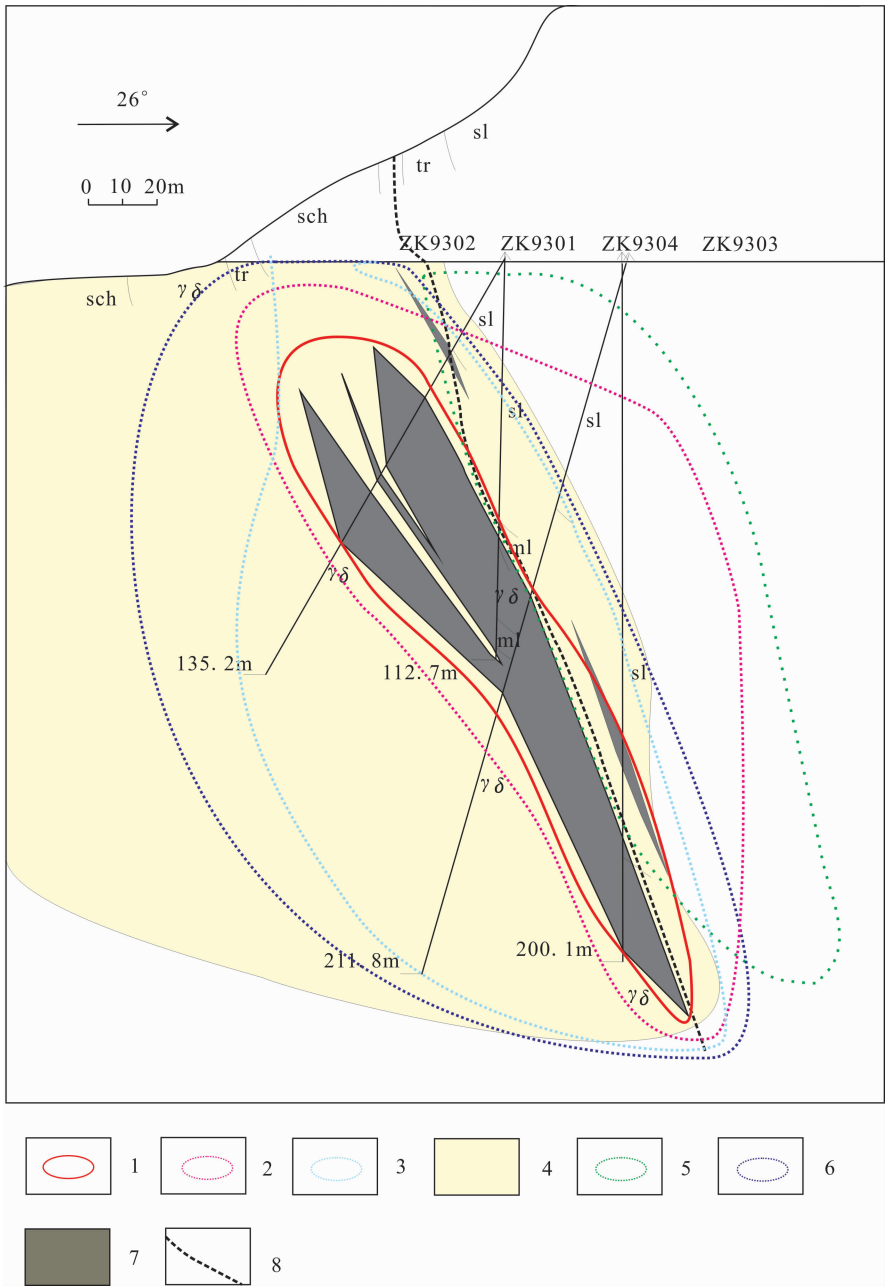


图 3 五龙沟金矿多属性异常结构模式示意图

Fig. 3 The mode of the anomalous structure in Wulonggou experimental area

1—Au、As、Sb 正异常；2—Ag 正异常；3—Ba、Sr 负异常；4—Na₂O 负异常；5—硅化带；
6—黄铁矿化，高岭土化，碳酸盐化，褐铁矿化带；7—Au 矿体；8—主断裂带
1—Au、As、Sb positive anomaly；2—Ag positive anomaly；3—Ba、Sr negative anomaly；4—Na₂O negative anomaly；
5—silicon zone；6—pyrite, kaolin, carbonate, limonite zone；7—gold ore body；8—main fault zone

移再富集。

Au 矿体产出部位成矿伴生元素 Ag、As、Sb 等也呈现出带入特征。Ag 发生带入的范围较大，斜长花岗岩和凝灰质板岩中均出现，不过最大带入量与 Au 矿体吻合很好。As 的显著带入主要发生在斜长花岗岩中，带入量大于 1000g/T 的范围与 Au 矿体位置吻合，这与 Au 矿化赋存在毒砂、含砷黄铁

矿中是一致的。Sb 在断裂带两侧的斜长花岗岩和凝灰质板岩中均呈带入特征，只是在斜长花岗岩中带入幅度更大，而且与 Au 矿体位置吻合。上述成矿元素及其伴生元素迁移量异常特征不仅揭示了五龙沟金矿成矿系统中元素的分布规律，也揭示了成矿过程中元素的活动性规律，对认识该地区金矿床的形成机制具有重要意义。

5 多属性异常结构模式

5.1 多属性异常结构

五龙沟金矿中的多属性异常,在成矿系统内构成了有规律的异常结构模式(图 3)。Na₂O、Ba、Sr 在 Au 矿化地段平均迁移量小于 0,表现为带出特性,形成负异常。这些元素的负异常分布范围最广,涵盖了成矿元素 Au、成矿伴生元素 Ag、As、Sb 及矿化剂元素 S 的正异常,代表了成矿过程中元素发生活化迁移的范围。其中发生 Na₂O 带出的范围最大,而且从外围到矿体位置带出作用增强,说明元素带出作用是从远离断裂带的地段向断裂带方向发展,越靠近热源中心(断裂带)带出作用越显著。矿化剂元素 S 与成矿元素 Au、成矿伴生元素 Ag、As、Sb 等在斜长花岗岩和凝灰质板岩中存在初始富集,构造成矿的矿源。这些元素在成矿过程中均表现为带入,并且越接近断裂带位置,带入作用越显著,体现出在热液活动的影响下,元素的带入由远离断裂带位置向断裂带方向发展,最终在断裂带下盘的斜长花岗岩中富集形成 Au 矿床以及相应的 Au 的寄主矿物。

5.2 找矿方向初步认识

五龙沟金矿多属性异常结构模式很好地展现出此类金矿成矿过程中元素的微观活动特性。根据异常结构模式及其形成机制,从元素层面分析,五龙沟金矿的形成至少经历了两个阶段:一是成矿元素(Au)、成矿伴生元素(Ag、As、Sb 等)以及矿化剂元素 S 的初始富集,构成有利于成矿的矿源,具体体现在斜长花岗岩和凝灰质板岩中这些元素的显著富集特征;二是在热液作用下矿源中的成矿元素(Au)、成矿伴生元素(Ag、As、Sb 等)以及矿化剂元素 S 发生活化、迁移和再富集。根据元素迁移量计算结果判定,赋矿斜长花岗岩中元素是从外围向矿体方向迁移,由此初步提出该地区外围金矿找矿方向。找矿目标体:富集成矿元素(Au)、成矿伴生元素(Ag、As、Sb 等)以及矿化剂元素 S 的斜长花岗岩;成矿有利地段:斜长花岗岩中出现构造断裂带部位;找矿地球化学标志:Na₂O、Ba、Sr 负异常增强和 Au、Ag、As、Sb、S 正异常增强方向。Na₂O、Ba、Sr 负异常增强代表热液作用增强,有助于成矿元素元素活化、迁移,有利于成矿元素再富集。Au、Ag、As、Sb、S 正异常增强代表成矿及其伴生元素的迁移方向,指示成矿元素可能的富集地段。至于五龙沟金矿深部找矿,需要围绕斜长花岗岩中的构造断裂带展开。利

用钻孔岩石测量结果指导深部找矿时,不仅需要兼顾 Na₂O、Ba、Sr 等元素负异常和 Au、Ag、As、Sb、S 等元素正异常综合判断,还要兼顾异常强度和异常强度变化方向综合分析,负异常和正异常越强对成矿越有利;负异常和正异常均增强的方向指示最可能成矿地段。

6 结论

(1)与同种类型岩石平均化学组成相比,青海五龙沟金矿赋矿斜长花岗岩和凝灰质板岩中发生富集的元素有 Au、Ag、As、Bi、Cu、Hg、Pb、Sb、S、Zn、Fe、MgO、CaO。Au、Ag、As、Sb、S 等元素富集显著,富集程度随着 Au 矿化程度增强而增强,构成有利成矿的矿源。在斜长花岗岩和凝灰质板岩中,与同种类型岩石平均化学组成相比,Na₂O、Ba、Sr 等元素发生贫化,贫化程度随着矿化程度增强而增强,表明五龙沟金矿的形成经历了后期热液作用。

(2)元素迁移量计算结果显示,五龙沟金矿成矿系统中发生了元素带出带入作用,出现了由带出作用形成的负异常和由带入作用形成的正异常构成的多属性异常体系,具体有 Na₂O、Ba、Sr 负异常,矿化剂元素 S 异常,成矿元素 Au 异常和成矿伴生元素 Ag、As、Sb 异常,这些异常构成有规律的异常结构模式。

(3)综合异常结构模式形成机制分析,五龙沟金矿成矿系统中无论是元素的带出还是带入,其迁移都是从赋矿的斜长花岗岩和凝灰质板岩外围向矿体方向迁移。元素迁移方向更直观指示有利赋矿部位。

(4)五龙沟金矿外围找矿目标地质体是富 Au、Ag、As、Sb 和 S 的斜长花岗岩,有利成矿部位是斜长花岗岩中出现断裂构造带的部位。地球化学找矿标志是 Na₂O、Ba、Sr 等元素负异常和 Au、Ag、As、Sb、S 等元素正异常。无论是负异常还是正异常,异常越强,成矿前景越好。

References

Ai Jinbiao, Ma Shengming, Zhu Lixin, Xi Mingjie, Fan Lianjie, Hu Zhaoxin, Zhang Yan. 2013. Major elements migration regularity and mass change quantification of alteration zones in Matou porphyry Mo-Cu deposit, Anhui Province. *Mineral Deposits*, 32(6):1262~1274(in Chinese with English abstract).

Ai Jinbiao, Ma Shengming, Zhu Lixin, Fan Lianjie, Hu Zhaoxin, Xi Mingjie. 2013. Characteristic and migration regularity of majority elements and REEs in Matou porphyry Mo-Cu deposit

- in the middle-lower reaches of Yangtze river. *Acta Geologica Sinica*, 87(5):691~702(in Chinese with English abstract).
- An Guoying. 2015. Tectonic geochemistry of the central segment of the East Kunlun Mountains in Qinghai Province and its geological significance. *Geophysical and Geochemical exploration*, (1):69~75(in Chinese with English abstract).
- Chen Hongqiang, Ma Shengming, Cen Kuang, Li Jingyun. 2015. Regularities of elements migration and metallogenic prediction in Wulunbulake porphyry Copper deposits, Eastern Junggar, Xinjiang. *Geology and Prospecting*, 51(6): 1138 ~ 1149 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yongqing, Huang Jingning, Lu Yingxiang, Xia Qinglin, Sun Mingxiang, Li Jianrong. 2009. Geochemistry of elements, sulphur-lead isotopes and fluid inclusions from Jinla Pb-Zn-Ag Poly-metallic ore field at the joint area across China and Myanmar border. *Earth Science Frontiers*, (1): 344 ~ 362 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yongqing, Lu Yingxiang, Xia Qinglin, Jiang Chengxing, Liu Hongguang, Lv Zhicheng. 2009. Geochemical characteristics of the Hetaoping Pb-Zn deposit, Baoshan, Yunnan, and its genetic model and ore prospecting model pattern. *Geology in China*, 32(01):90~99(in Chinese with English abstract).
- Dunlop A C, Ambler E P, Avila E T. 1979. Surface lithogeochemical studies about a distal volcanogenic massive sulphide occurrence at Limerick, New South Wales. *Journal of Geochemical Exploration*, 11(3):285~297.
- Grant J A. The isocon diagram-A simple solution to Gresens' equation for Metasomatic alteration. *Economic Geology*, 1986, 81(8):1976~1982.
- Guo Xiaodong, Zhang Yujie, Liu Guige, Pan Aijun, Zhang Feng. 2004. Metallogenic regularities and prospecting direction of gold and copper in eastern Kunlun. *Gold Geology*, 10(4):16~22(in Chinese with English abstract).
- Ji Kejian, Wang Liben, Lv Fengxiang, Wang Wuyi, Zhang Jianhua. 1992. The negative haloes and geochemical field system of hydrothermal deposits. *Acta Geologica Sinica*, (4):350~361 (in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Shen Yuanchao, Hu Zhengguo, Qian Zhuangzhi. 2001. Minerogenetic mechanism and condition of Wulonggou gold deposit in East Kunlun Mountains, Qinghai province. *Geology and Prospecting*, 37(1): 65 ~ 69 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yanpeng, Ma Shengming, Zhu Lixin, Cao Wangda, Le Chengsheng. 2015. A 3D geochemical prospecting model for elemental mass transfer in Zhaojikou epithermal Pb-Zn deposit, Anhui Province. *Earth Science Frontier*, 22(4): 141~151(in Chinese with English abstract).
- Ma Shengming, Zhu Lixin, Liu Chongmin. 2009. A study of the enrichment and depletion regularity of trace elements in porphyry Cu (Mo) deposits. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 821~822(in Chinese with English abstract).
- Ma Shengming, Zhu Lixin, Liu Hailiang, Wang Huiqiang, Xu Mingzuan. 2011. A study of geochemical anomaly structure of the Huitongshan Copper deposit in Beishan area, Gansu Province. *Acta Geoscientica Sinica*, (4):405~412(in Chinese with English abstract).
- Ma Shengming, Zhu Lixin, Liu Chongmin, Xi Mingjie, Tang Shixin. 2013. Anomaly models of spatial structures for Copper-Molybdenum Ore Deposits and their application. *Acta Geologica Sinica(English edition)*, 87(3): 843 ~ 857 (in Chinese with English abstract).
- Ma Shengming, Zhu Lixin. 2014. Multidimensional anomaly system for hydrothermal nonferrous metal deposits: taking the Matou porphyry molybdenum copper mine in Anhui Province as an example. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, (1):134~144(in Chinese with English abstract).
- Ma Shengming, Zhu Lixin, Xi Mingjie, Tang Shixin, Su Lei. 2015. Geochemical identification marks of hydrothermal metallogenic system boundary of Matou mining area, Anhui Province. *Earth Science Frontiers*, 22(4): 131~140 (in Chinese with English abstract).
- Ni Shijun, Li Chaoyang, Zhang Cheng, Gao Rongde, Liu Chunfu. 1994. Contributions of meso-basic dyke rocks to gold mineralization, as exemplified for Xiaoqinling, China. *Journal of Chengdu institute of technology*, (3):70~78 (in Chinese with English abstract).
- Qian Zhuangzhi, Hu Zhengguo, Li Houmin, Liu Jiqing. 2000. Ore-forming characteristics and metallogenic model of gold deposits in the central belt of East Kunlun Mountains. *Mineral Deposits*, (4):315~321. Robertson I D M, Taylor G F. 1987. Depletion haloes in fresh rocks surrounding the Cobar orebodies, N S W, Australia: Implications for exploration and ore genesis. *Journal of Geochemical Exploration*, 27(87):77~101(in Chinese with English abstract).
- Sun Chengyuan, Zhang Gan. 1993. Negative Geochemical Anomaly over Mobin Au Mining Area and Their Significance to Ore Exploration. *Geology and Prospecting*, (3):47~52(in Chinese with English abstract).
- Shi Changyi, Zhang Jinhua, Huang Xiaomei. 1996. Regional geological-geochemical anomaly structural model of the Zijinshan continental volcanic copper-gold orefield. *Geophysical and Geochemical exploration*, 20(3): 180 ~ 188 (in Chinese with English abstract).
- Shi Jinyou. 1997. Geological features and prospecting criteria of Wulonggou gold deposit of Dulan County, Qinghai Province. *Process in Precambrian research*, (02):29~36(in Chinese with English abstract).
- Xi Mingjie, Ma Shengming, Zhu Lixin, Gong Qiuli. 2009. The application of sulfur isotope in the cause of geochemical abnormality. *Acta Geologica Sinica*, 83(5): 705 ~ 718 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dequan, Feng Chengyou, Li Daxin, Xu Wenyi, Yan Shenghao, She Hongquan, Dong Yingjun. 2001. Orogenic gold deposits in the north Qaidam and East Kunlun orogen, West

China. Mineral Deposits, 20(2):137~146 (in Chinese with English abstract).

Zhang Dequan, Wang Fuchun, She Hongquan, Feng Chengyou, Li Daxin, Li Jinwen. 2007. Three-order ore-controlling structural system of orogenic gold deposits in the northern Qaidam margin-East Kunlun region. Geology in China, (1):92~100 (in Chinese with English abstract).

Zhang Wenqin, Wang Caifang. 2004. A discussion on geological background of the East Kunlun area by geochemical exploration data. Geoscience, 16(3):257~262 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

艾金彪, 马生明, 朱立新, 席明杰, 樊连杰, 胡兆鑫, 张燕. 2013. 安徽马头斑岩型铜矿床蚀变带常量元素迁移规律及其定量计算. 矿床地质, 32(6):1262~1274.

艾金彪, 马生明, 朱立新, 樊连杰, 胡兆鑫, 席明杰. 2013. 长江中下游马头斑岩型铜矿床常量元素、稀土元素特征及迁移规律. 地质学报, 87(5):691~702.

安国英. 2015. 青海省东昆仑中段地区构造地球化学特征及地质意义. 物探与化探, (1):69~75.

陈宏强, 马生明, 岑况, 李景运. 2015. 新疆东准乌伦布拉克斑岩型铜矿床元素迁移规律研究及成矿预测. 地质与勘探, 51(6):1138~1149.

陈永清, 黄静宁, 卢映祥, 夏庆霖, 孙明祥, 李建荣. 2009. 中缅毗邻区金腊 Pb-Zn-Ag 多金属矿田花岗岩岩石 U-Pb 定年与地球化学特征. 地学前缘, (1):344~362.

陈永清, 卢映祥, 夏庆霖, 蒋成兴, 刘红光, 吕志成. 2009. 云南保山核桃坪铅锌矿床地球化学特征及其成矿模式与找矿模型. 中国地质, 32(1):90~99.

郭晓东, 张玉杰, 刘桂阁, 潘爱军, 张峰. 2004. 东昆仑地区金铜等成矿规律及找矿方向. 黄金地质, 10(4):16~22.

季克俭, 王立本, 吕凤翔, 王五一, 张建华. 1992. 热液矿床的负晕和地球化学场系. 地质学报, (4):350~361.

刘英俊. 1984. 元素地球化学. 北京:科学出版社.

刘增铁. 2005. 青海金矿. 北京:地质出版社.

刘艳鹏, 马生明, 朱立新, 曹旺达, 乐成生. 2015. 安徽兆吉口热液型铅锌矿区元素迁移量三维地球化学勘查模式. 地学前缘, 22

(4):141~151.

李厚民, 沈远超, 胡正国, 钱壮志. 2001. 青海东昆仑五龙沟金矿床成矿条件及成矿机理. 地质与勘探, 37(1):65~69.

马生明, 朱立新, 刘海良, 王会强, 徐明钻. 2011. 甘肃北山辉铜山铜矿地球化学异常结构研究. 地球学报, (4):405~412.

马生明, 朱立新, 席明杰, 唐世馨, 苏磊. 2015. 安徽马头矿区热液成矿边界的地球化学标志. 地学前缘, 22(4):131~140.

马生明, 朱立新. 2014. 热液成因有色金属矿多维异常体系—以马头斑岩型铜矿为例. 吉林大学学报:地球科学版, (1):134~144.

马生明, 朱立新, 刘崇民, 陈晓锋, 梁胜跃. 2009. 斑岩型 Cu(Mo)矿床中微量元素富集贫化规律研究. 地球学报, 30(6):821~822.

倪师军, 李朝阳, 张诚, 高荣德, 刘春富. 1994. 中基性脉岩对金矿成矿的贡献:以小秦岭金矿区为例. 成都理工学院学报, (3):70~78.

钱壮志, 胡正国, 李厚民, 刘继庆. 2000. 东昆仑中带金矿成矿特征及成矿模式. 矿床地质, (4):315~321.

孙承轅, 张干. 1993. 漠滨金矿区外围地层及矿区围岩中金的负异常及其地球化学意义. 地质与勘探, (3):47~52.

史长义, 张金华, 黄笑梅. 1996. 福建紫金山陆相火山岩型 Cu-Au 矿田区域地质地球化学异常结构模式. 物探与化探, 20(3):180~188.

史长义. 2002. 中国铜多金属矿田区域地质地球化学异常结构模式及预测评价. 北京:地质出版社.

石金友. 1997. 青海省都兰县五龙沟金矿成矿地质特征及找矿标志. 前寒武纪研究进展, (2):29~36.

席明杰, 马生明, 朱立新, 弓秋丽. 2009. 硫同位素在地球化学异常成因研究中的应用. 地质学报, 83(5):705~718.

张文秦, 汪彩芳. 2004. 依据化探成果对东昆仑地质背景的讨论. 现代地质, 16(3):257~262.

张德全, 丰成友, 李大新, 徐文艺, 阎升好, 余宏全, 董英君, 崔艳合. 2001. 柴北缘—东昆仑地区的造山型金矿床. 矿床地质, 20(2):137~146.

张德全, 王富春, 余宏全, 丰成友, 李大新, 李进文. 2007. 柴北缘—东昆仑地区造山型金矿床的三级控矿构造系统. 中国地质, (1):92~100.

朱训. 1983. 德兴斑岩铜矿. 北京:地质出版社.

Study on Multiple Attributes Geochemical Abnormal in Wulonggou Gold Deposit, Qinghai Province

ZHANG Dong^{1,2)}, ZHU Lixin³⁾, SU Lei¹⁾, MA Shengming¹⁾, CHEN Hongqiang²⁾, LI Jingyun¹⁾

1) *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Science, Langfang, Hebei, 065000*; 2) *China University of Geosciences, Beijing, 100083*;

3) *Chinese Academy of Geological Science Beijing, 100083*

Abstract

Wulonggou gold deposit locates in north area of the middle East Kunlun Mountains, belonging to a part of precious metal mineral exploration area in the Qaidam Basin surrounding. As a typical of orogenic gold deposits, the ore deposit is strictly controlled by the fault structure. It will be great significance to guide the exploration of the deep and the periphery of the area to further study the geochemical anomalies and its formation mechanism in the metallogenic system. The research is based on the theory of multidimensional anomaly system. By summing up the characteristics of elements enrichment and depletion, we reveal the existence of multi-attribute geochemical anomalies. Then using Grant equation to calculate the migration of elements and discuss the direction of element migration. That is the abnormal formation mechanism of each attribute. At last we construct the abnormal structure model in the test area. It shows that a substantial of Na₂O, Ba, Sr et al. in the Plagiogranite and Tuffaceous slate related to the gold deposit are taken out, the negative anomaly is significant. The range of negative anomaly is bigger than the positive anomaly range of ore-forming elements and associated elements of Au, As, Sb. That enriched the metallogenic indication information. In addition, another important discovery is that the S and its content are closely related to the mineralization of gold deposits. The control effect of initial ore source on gold mineralization in this area is further clarified. The result of this research is a new understanding of the characteristics of the elements in the orogenic gold mineralization system and provide a deep discussion on the metallogenic mechanism and ore prospecting methods of this kind of ore deposits.

Key words: Wulonggou gold deposit; multiple attributes geochemical abnormal; abnormal formation mechanism; abnormal structure model