

山东栾家河断裂带岩石地球化学特征及其意义

韩代成^{1,2,3*}, 李洪奎^{1,2,3#}, 陈莉^{1,2,3}, 韩学林^{1,2,3}, 张玉波^{1,2,3}, 陈国栋^{1,2,3}, 王海芹^{1,2,3}, 梁太涛^{1,2,3}

¹山东省地质科学研究所, 山东 济南

²自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东 济南

³山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南

Email: #lhklhk126@126.com

收稿日期: 2020年8月27日; 录用日期: 2020年9月9日; 发布日期: 2020年9月16日

摘要

栾家河断裂带是胶西北地区一条重要的断裂构造, 它出露长约45 km、宽15~260 m, 总体展布为北东30°~50°, 倾向南东, 倾角60°~85°。断裂带显示南东盘下降、北西盘上升, 呈右行张裂走滑特点, 带内构造岩主要由碎裂岩、构造角砾岩组成, 是胶东地区玲珑金矿田的东部边界断裂, 备受地质工作者所关注, 前人多认为是一条控矿断裂。本次以栾家河断裂带外围花岗岩、花岗碎裂岩的主、微量和稀土元素地球化学资料为依据, 研究其化学成分、微量元素和稀土元素在不同岩矿石中的变化情况并得出初步认识。在化学成分方面, 外围花岗岩SiO₂含量与花岗碎裂岩相比在正常范围内, 从带内碎裂岩的化学成分带入带出的相对百分比分析, 碎裂蚀变的岩石具有相对较高的Al₂O₃、K₂O、Na₂O、CaO和P₂O₅, 可能代表了早期的钾化现象, 而SiO₂及Fe₂O₃、MgO、MnO质相对百分比低。K₂O、Na₂O含量的增高钾质交代所致, 钾化是一种找矿标志。微量元素方面, 断裂带围岩中Au、Cu、Zn元素含量低于正常玲珑花岗岩含量的平均值, 但Ag、Pb等元素则普遍含量较高, 是平均值的0.5~2倍, 这是花岗岩在破碎蚀变过程中有Au元素富集蚀变所致。断裂带中成矿元素Au的含量高于围岩和玲珑花岗岩, 反映了栾家河断裂带具有普遍的金元素富集现象。亲硫元素As、Cu、Zn普遍偏低, 说明断裂带中硫化物矿化弱, 对成矿不利。稀土元素方面, 断裂带中碎裂岩具有较低的稀土总量, 稀土配分模式具有相似特征, 总体右倾型, ΣREE偏低, 以富含LREE和HREE亏损为特征, 说明断裂带中稀土元素更多的是反映从流体体系中带入相对偏少。通过本次研究并结合有关矿产勘查资料, 认为栾家河断裂带是金矿的矿后断裂, 它对多金属矿产具有一定的控制作用。

关键词

岩石化学, 微量元素, 稀土元素, 碎裂岩, 栾家河断裂, 山东

Petrogeochemical Characteristics and Significance of Luanjiahe Fault Zone in Shandong Province

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 韩代成, 李洪奎, 陈莉, 韩学林, 张玉波, 陈国栋, 王海芹, 梁太涛. 山东栾家河断裂带岩石地球化学特征及其意义[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(9): 826-838. DOI: 10.12677/ag.2020.109082

Daicheng Han^{1,2,3*}, Hongkui Li^{1,2,3#}, Li Chen^{1,2,3}, Xuelin Han^{1,2,3}, Yubo Zhang^{1,2,3},
Guodong Chen^{1,2,3}, Haiqin Wang^{1,2,3}, Taitao Liang^{1,2,3}

¹Shandong Geological Sciences Institute, Jinan Shandong

²Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resources Utilization Subordinated to the Ministry of Natural Resources, Jinan Shandong

³Shandong Key Laboratory of Geological Processes and Resource Utilization in Metallic Minerals, Jinan Shandong
Email: "lhklhk126@126.com"

Received: Aug. 27th, 2020; accepted: Sep. 9th, 2020; published: Sep. 16th, 2020

Abstract

The Luanjiahe fault zone is an important fault structure in the northwestern Area of Jiaoxibei outlying 45 km long and 15 - 260 m wide, with an overall distribution is 30° - 50° southward, and dip angle is 60° - 85°. The fault zone shows that the south-eastern plate is falling and the north-western plate is rising, and is characterized by right-lateral tension strike slip. The tectonic rocks in the zone are mainly composed of cataclastic rocks and tectonic breccia, which is the eastern boundary fault of Linglong gold field in Jiaodong area, and has attracted much attention from geologists. The previous thought is a prospecting fault. Based on the geochemical data of the major trace elements and rare earth elements of the granite and granite fragmentation in the periphery of Luanjiahe fault zone, this paper studies the changes of their chemical composition, trace elements and rare earth elements in different rock ores and obtains a preliminary understanding. In terms of chemical composition, peripheral granite SiO₂ content compared with fractured granite rock within the normal range, from the in-band carried off by the chemical composition of cataclastic rock into relative percentage analysis, cataclastic altered rock has a relatively high Al₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO and P₂O₅, may represent early potassium phenomenon, and SiO₂ and Fe₂O₃, MgO style, MnO quality, and the relative percentage is low. The increased content of K₂O and Na₂O is caused by potassium metasomatism, and potassium is a prospecting indicator. In terms of trace elements, the content of Au, Cu and Zn in the surrounding rocks of the fault zone is lower than the average value of normal Linglong granite, but the content of Ag, Pb and other elements is generally higher, 0.5 - 2 times of the average value, which is caused by the enrichment of Au elements in granite during the crushing and alteration process. The content of Au in the fault zone is higher than that of surrounding rock and Linglong granite, which reflects that Luanjiahe fault zone has a general gold enrichment phenomenon. As, Cu and Zn are generally low, indicating that sulfide mineralization in the fault zone is weak and unfavorable to mineralization. Rare earth elements, cataclastic rock in the fault zone has a lower total rare earth, rare earth distribution patterns with similar features, overall the right type, ΣREE on the low side, is characterized by rich in LREE and HREE loss, rare earth elements in fault zone that more is reflected from the fluid system into the relatively less. Through this study and combining with relevant mineral exploration data, it is considered that Luanjiahe fault zone is a post-ore fault of gold deposit, and it has a certain control effect on polymetallic minerals.

Keywords

Petrochemistry, Trace Elements, Rare Earth Elements, Cataclastic Rock, Luanjiahe Fault, Shandong Province

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

胶东地区因盛产金矿而蜚声国内外。与金矿成矿关系密切的三大基础条件是：前寒武纪结晶基底岩系、中生代花岗岩和断裂构造，断裂构造是区内金矿的定位场所和赋存空间，是研究金矿和进行金矿勘查的主要找寻标志。李洪奎[1] [2]对胶东地区中生代构造-岩浆-沉积-成矿事件框架进行了详细划分、提出了挤压-伸展的金矿成矿模式并认为胶东地区存在有三次造山和三次伸展期，而每一构造幕的伸展阶段是金矿成矿的集中期；李逸凡[3]在研究胶东金矿形成的挤压-伸展构造环境时认为与中生代四期六阶段不同力学性质和方向的挤压-伸展特征相伴随的金矿成矿作用主要发生在第三期 125~110 Ma 北西向引张活动的断层及右行张扭断裂的伸展期；李士先[4]则提出了成矿前、成矿期和矿后断裂的认识，李洪奎[5]在对胶东地区三大控矿构造——招远-平度断裂带特征及控矿性研究中发现无论矿前、成矿期还是矿后断裂，其蚀变具有相似性，它们在空间上紧密共生，为相同构造背景的产物，陈光远等[6]对断裂带内的矿物进行了成因研究。本文以招远栾家河断裂带为研究对象，进一步研究断裂带内蚀变岩石的岩石化学、微量元素、稀土元素等地球化学特征，追溯构造蚀变过程中的原岩性质、形成环境及其所经历的地质作用过程，利用构造蚀变岩的主微量元素地球化学特征，试图探讨蚀变岩与金矿形成的关系。

2. 区域地质背景

胶东地区位于郯庐断裂东侧，基本构造格架为北东向断裂和南北向盆岭相间出现，自北而南依次为龙口盆地、胶北隆起和胶莱盆地(图 1)，这种隆降格局是中生代地幔上隆和岩石圈减薄在表壳的响应[7]。在胶西北隆起区，区内以前寒武纪结晶基底为主，盖层不发育。基底岩系有中太古代唐家庄岩群、新太古代胶东岩群，古元古代荆山群、粉子山群和新元古代蓬莱群，在断陷盆地内有中生代莱阳群、青山群、王氏群和新生代古近系、新近系、第四系分布[1] [2]。区内构造表现为发育在基底岩系中的推覆、走滑韧性剪切带，浅构层的 NNE、NE 断裂十分发育，NW、EW 向断裂次之。岩浆岩有新太古代 TTG 岩系、震旦期片麻状二长花岗岩系列，三叠纪岩浆杂岩、侏罗纪玲珑花岗岩、早白垩世郭家岭花岗闪长岩-花岗岩、伟德山二长岩-花岗闪长岩-花岗岩、崂山碱性花岗岩等发育，呈岩基、岩株产出[1] [5] [8]。

3. 断裂带特征

3.1. 断裂带总体特征

栾家河断裂带是玲珑金矿田的东部边界断裂，多年来山东省区域地质调查队、山东省第六地质矿产勘查院等单位对栾家河断裂进行过系统地观测和研究，近几年多家地勘单位开展了以栾家河断裂为目标的金矿普查工作，部分地段进行了 1:1 万构造地质填图，提高了其研究程度。

栾家河断裂因在招远市阜山镇栾家河最具典型而命名。该断裂南起招远市陡崖曹家村、向北东经大吴家、涝坡及断裂带中部的栾家河、周家庄子、山姜家至龙口市草屋、到石良镇进入龙口盆地而踪迹不明，出露长约 45 km (图 1)。断裂带总体上中部宽而两端窄，最宽处在栾家河至周家庄子一带，约 260 m，南北两端窄处约 15 m 或更窄，在南西端并入复合到招远-平度断裂带中。断裂带总体展向为北东 30°~50°，局部有向东或向北偏转，总体倾向南东，倾角 60°~85°，局部反倾。断裂带总体显示南东盘下降、北西盘上升，呈右行张裂走滑特点，切割错开了玲珑花岗岩，最大平移距离 2.5 km。带内构造岩主要由碎裂岩、构造角砾岩组成，据碎裂岩产状判断其形成有两期，早期形成挤压变形的片理化岩石、挤压透镜体，晚期为脆性变形的碎粒岩、碎斑岩、碎裂岩等，以后期碎裂岩为特征，普遍发育热液蚀变。根据近期山东省第六地质矿产勘查院金矿勘查资料¹，栾家河断裂切割了招远水旺庄大型金矿床 II 号矿体(矿体控制走

¹山东省第六地质矿产勘查院，山东省招远市水旺庄-李家庄大型金矿床深部及外围金矿普查报告，2019 年。

向长 2560 m, 倾斜深 4993 m, 一般厚度 1.25~31.49 m, 平均厚度 5.46 m), 呈正断层性质, 其南东盘为下降盘。

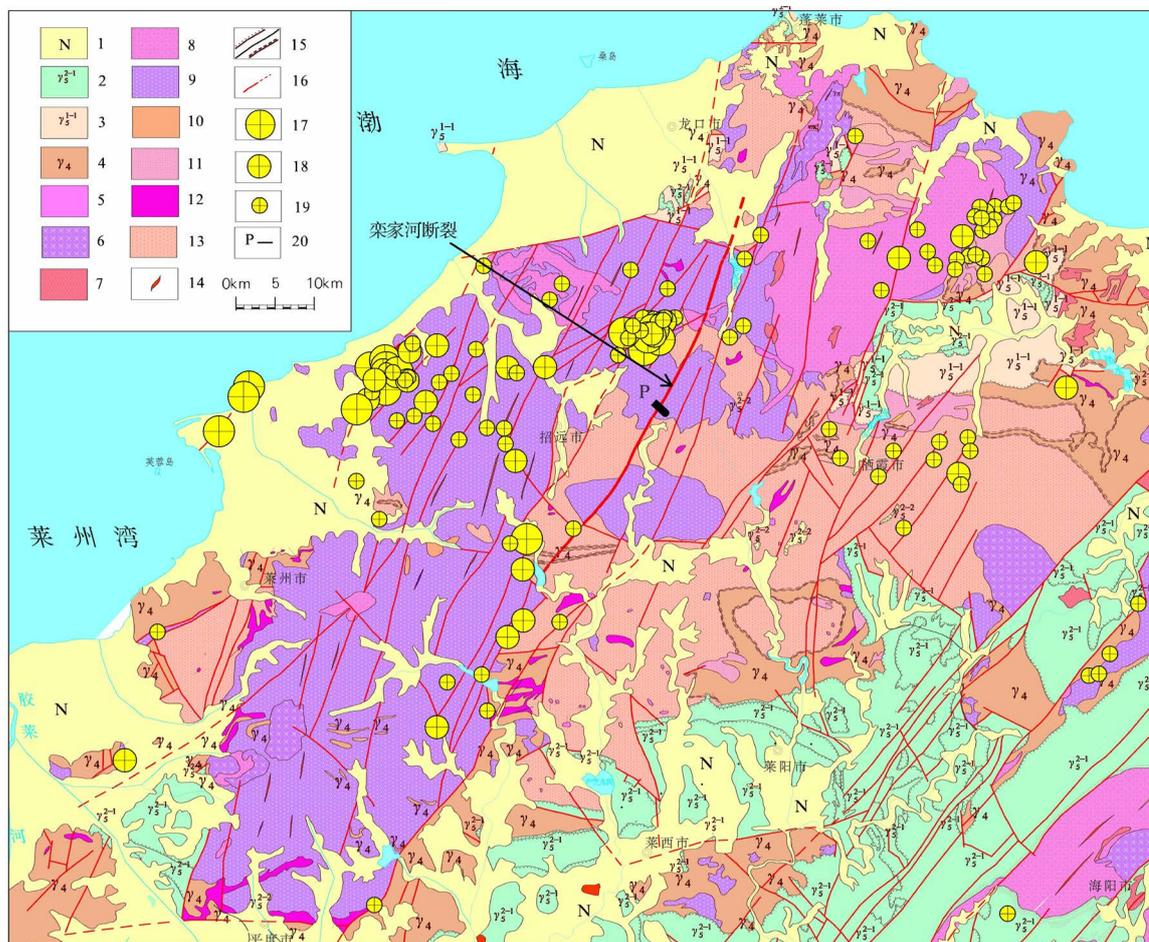


Figure 1. Regional geological and mineral map of Luanjiahe fault in Jaodong. 1-Neovascularization; 2-Mesozoic group; 3-New Proterozoic group; 4-Paleoproterozoic; 5-Ancient space; 6-Late Jurassic Porphyromonite; 7-Early Cretaceous Guo-Jialing granodiorite; 8-Late Jurassic Porphyromonite; 9-Middle Jurassic Wendeng granite; 10-Triassic granite; 11-Neoproterozoic monzogranites; 12-Paleoproterozoic Mesozoic intrusive rocks; 13-Archean TTG granite; 14-Intermediate-acid dike; 15-Geological boundary, angular unconformity boundary and parallel unconformity boundary; 16-fault; 17-Large primary gold deposits; 18-Medium primary gold deposits; 19-Small primary gold deposits; 20-Section position

图 1. 胶东栾家河断裂区域地质矿产略图。1-新生界; 2-中生界; 3-新元古界; 4-古元古界; 5-太古宇; 6-早白垩世伟德山花岗岩; 7-早白垩世郭家岭花岗闪长岩; 8-晚侏罗世斑状二长花岗岩; 9-中侏罗世文登花岗岩; 10-三叠纪花岗岩; 11-新元古代二长花岗岩; 12-古元古代中基性侵入岩; 13-太古宙 TTG 质花岗岩; 14-中酸性岩脉; 15-地质界线、角度不整合界线及平行不整合界线; 16-断层; 17-大型原生金矿; 18-中型原生金矿; 19-小型原生金矿; 20-剖面位置

3.2. 断裂带碎裂岩特征

栾家河断裂带内碎裂岩成分较复杂, 具有不同力学性质的构造岩特征, 显示了多期构造应力作用。主要表现为: 挤压构造岩、碎粉岩(断层泥)、构造碎裂岩、构造透镜体和挤压片理化带。

挤压构造岩带: 在断裂带构造岩带发育不均匀, 在断裂的不同部位, 间或发育强烈的挤压带(图 2), 在 4 号取样点附近表现出强烈的挤压带, 由挤压片理和挤压透镜体组成, 其挤压带产状 $145^{\circ} \angle 82^{\circ}$, 代表了一期挤压作用。

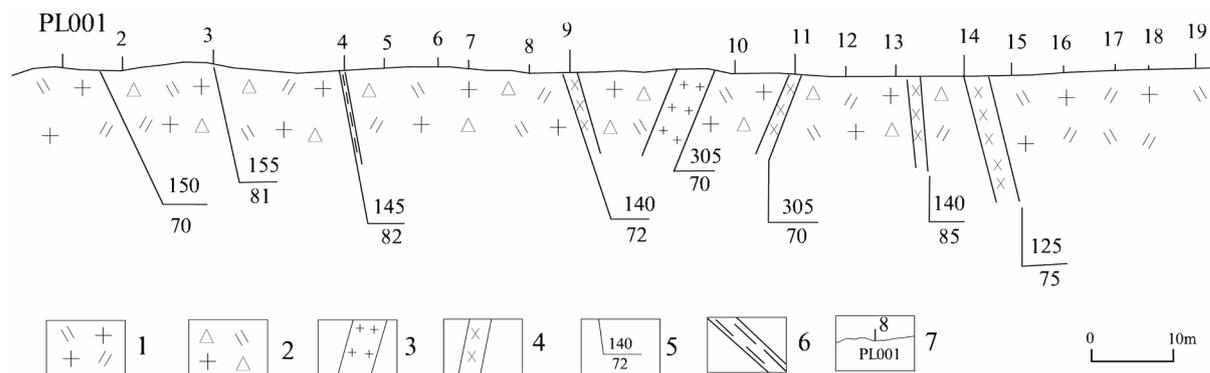


Figure 2. Profile sketch of Luanjiahe fault. 1-Monzogranites; 2-Granitic cataclastic rock; 3-Granitic fine grain dike, Lamprophyre vein; 4-Lamprophyre vein; 5-Occurrence, tendency/inclination; 6-Compressional rock zone; 7-Section number and sampling location

图 2. 栾家河断裂剖面素描图。1-二长花岗岩；2-花岗碎裂岩；3-花岗细晶岩脉；4-煌斑岩脉；5-产状，倾向/倾角；6-挤压岩带；7-剖面编号及取样位置

构造碎裂岩：是带内的主要碎裂岩类型，由碎裂岩、碎粒岩和碎粉岩等组成，构造角砾岩是由棱角状及磨圆碎屑组成的岩石，碎屑成分含量不等，成分为花岗岩，主要是断层的压碎作用和研磨作用的产物。断层泥是一种由断裂带剪切作用和研磨作用所形成的粒度小于 0.02 mm 的粉屑物质，在水的作用下形成。所见断层泥中多含有岩屑成分。

构造透镜体：在断裂带内有构造透镜体及构造擦痕，构造透镜体规模差异很大，其长轴从几 cm 到 20 m 不等。排列形式也各不相同，既有右列，又有左列分布。栾家河断裂挤压破碎带中的构造透镜体，呈左列形式。ab 面产状 $130^{\circ} \angle 80^{\circ}$ ，示断裂两盘在剖面上曾有右旋活动，透镜体由花岗岩组成。

4. 样品与测试方法

4.1. 样品采集与测试

本文研究所采集的样品包括栾家河断裂带及其围岩，围岩为晚侏罗世玲珑花岗岩，带内岩石为花岗碎裂岩及其内的煌斑岩脉，样品取样位置如图 2 所示，对矿石样品进行了化学成分分析、微量元素分析和稀土元素分析。

栾家河断裂带剖面直角坐标：起点 $X = 4129950$, $Y = 21274860$ ，终点 $X = 4129880$, $Y = 21274915$ 。样品围岩为正常中粒黑云二长花岗岩，带内岩石为蚀变花岗质碎裂岩，以及侵入碎裂带内的煌斑岩脉。其中样品 PL001、PL015~PL019 为中粒黑云二长花岗岩，样品 PL002~PL008、PL010、PL012~PL014 为蚀变花岗碎裂岩，样品 PL009、PL011 为煌斑岩脉。

岩矿化学成份和微量、稀土元素分析均在自然资源部济南矿产资源监督检测中心进行，控制编号：GJJZ-JL69-07-2017。硅酸盐岩石分析依据为 DZ/T 0279-2016 区域地球化学化学样品分析方法之标准，主元素和微量元素分析采用全谱直读等离子体发射光谱仪，仪器型号为 IRIS Intrepid II 和双道原子荧光光谱仪 AFS-820 进行分析。分析条件：加速电压 15 kV、束流 20 An、修正方法 PHRZ。稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪，仪器型号为 XSERIES2 分析。

4.2. 分析质量

4.2.1. 化学分析

化学分析样品加工严格按照《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T0130-2006)执行。分析样品粒度为-200 目。

样品加工流程有称重、烘干、粗碎、中碎、缩分、细碎、混匀等工序,遵循切乔特公式($Q = kd^2$)进行缩分,将其中 300 g 作为粗副样保存,将其中 500 g 样品用棒磨机进行细碎,加工 8~10 小时,至-200 目,混匀后,取 20g 送样分析。剩余者留作分析正样保存。粗碎、中碎、细碎过程中的样品损耗率分别小于 2%、4%、6%,缩分误差小于 3%。经检测,样品加工、缩分符合质量要求。

按《地质矿产实验室测试质量管理规范》DZ/T0130.2-2006 要求检测分析过程中每批次(50 件)插入一个国家一级标准物质,并统计合格率。经统计分析准确度、精密度符合规范要求,总体合格率 99.5%。

4.2.2. 微量元素、稀土分析

微量元素分析包括两部分,稀土元素和难溶元素的测定选取粉末样品在石墨坩埚中与助熔剂 $\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 混合,放在马弗炉中熔化用硝酸稀释溶解后,再进行 ICP-MS 分析;另外单独选取 0.5 g 经王水溶解的进行 ICP-MS 分析贵金属的含量。

选定标准物质,对 Au、Hg、Cu、Zn、Sb、Pb、Bi、As、Nb、Ta、Mo、W、Co 分别插入国家一级标准物质,Ag、Sn 插入两个国家一级标准质和两个二级标准物质监控,密码插入每批(约 50 个号码)样品内同样品一起分析,并计算 4 个监控样测定值与标准值之间的平均对数误差 $\Delta = 1 \text{ g (GRD)}$ 值,以衡量批与批间的分析偏倚,同时计算四个监控样对数误差的标准偏差 $s \text{ (GRD)}$ 值,由实测值统计出准确度、精密度。

内检分析监控:按样品总数随机抽取 5% 样品进行密码内部检查分析,基本分析和内检分析由不同人员交叉相互进行,计算基本分析与检查分析的对数差 $\Delta \lg C$ 或相对偏差 RD ,计算内部检查合格率为 97.0%~100%。

4.3. 分析结果

栾家河断裂带岩石化学成分、微量元素、稀土元素分析结果,分别列于表 1、表 2 和表 3 中。

5. 地球化学特征

5.1. 主元素地球化学

栾家河断裂带主元素化学成分列于表 1 中。围岩样品中粒黑云二长花岗岩的 SiO_2 含量与花岗碎裂岩相比在正常范围内,从带内碎裂岩的化学成分带内带出的相对百分比分析(图 3),碎裂蚀变的岩石具有相对较高的 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 和 P_2O_5 ,可能代表了早期的钾化现象,而 SiO_2 及 Fe_2O_3 、 MgO 、 MnO 质相对百分比低则说明与原玲珑花岗岩总体岩石化学特征相一致。

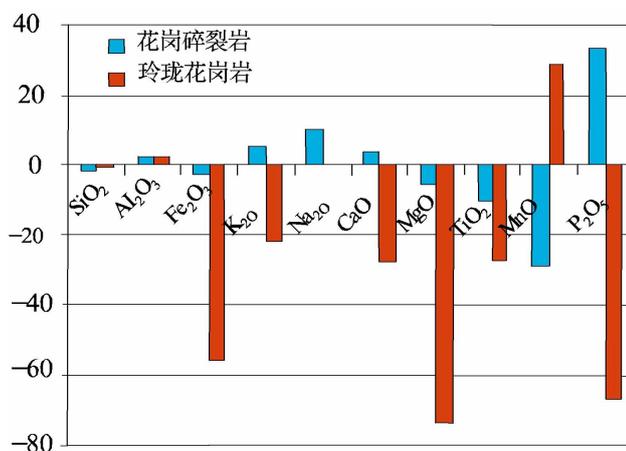


Figure 3. Comparison of rock chemical composition in and out of Luanjiahe fault zone
图 3. 栾家河断裂带岩石化学成分带内带出对比图

Table 1. Rock chemical composition results of Luanjiahe Fault Zone (Unit: %)
表 1. 柴家河断裂带岩石化学成分结果表(单位: %)

野外号	分析号	岩性	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Σ
PL001	21800305	二长花岗岩	71.82	15.51	1.62	3.4	3.64	0.96	0.25	0.1572	0.0779	0.0119	97.447
PL015	21800319	二长花岗岩	73.14	15.09	1.03	3.81	3.87	0.82	0.18	0.1239	0.0478	0.0270	98.139
PL016	21800320	二长花岗岩	71.69	14.99	1.19	3.73	4.14	1.64	0.22	0.1203	0.0606	0.0286	97.810
PL017	21800321	二长花岗岩	72.74	15.06	1.09	3.58	4.28	0.98	0.18	0.1246	0.0813	0.0446	98.161
PL018	21800322	二长花岗岩	77.96	12.72	0.9	2.51	2.84	0.67	0.18	0.0564	0.1151	0.0071	97.959
PL019	21800323	二长花岗岩	73.41	14.75	1.19	3.72	4.05	1.39	0.19	0.1269	0.0664	0.0309	98.924
		平均	73.46	14.69	1.17	3.46	3.80	1.08	0.20	0.1182	0.0749	0.0250	98.073
PL002	21800306	花岗碎裂岩	72.02	14.95	1.04	3.85	3.88	0.55	0.17	0.1155	0.0625	0.0139	96.652
PL003	21800307	花岗碎裂岩	74.2	15.07	1.37	1.98	4.48	0.18	0.3	0.0615	0.0898	0.0071	97.738
PL004	21800308	花岗碎裂岩	72.86	15.06	1.33	3.77	4.17	0.98	0.11	0.1121	0.0630	0.0294	98.485
PL005	21800309	花岗碎裂岩	72.6	15.31	1.27	3.86	4.18	0.68	0.13	0.1181	0.0714	0.0361	98.256
PL006	21800310	花岗碎裂岩	77.68	13.46	0.7	2.77	4.14	0.15	0.081	0.0567	0.1037	0.0051	99.147
PL007	21800311	花岗碎裂岩	72.28	14.3	1.09	3.22	3.93	1.76	0.21	0.1097	0.1089	0.0307	97.039
PL008	21800312	花岗碎裂岩	72.5	15.05	1.12	3.86	4.17	0.87	0.17	0.1061	0.0526	0.0318	97.931
PL010	21800314	花岗碎裂岩	72.28	15.19	1.15	3.72	4.14	1.09	0.22	0.1273	0.0637	0.0359	98.017
PL012	21800316	花岗碎裂岩	71.5	15.36	1.32	3.51	4.24	1.67	0.25	0.1387	0.0842	0.0331	98.106
PL013	21800317	花岗碎裂岩	72.79	14.9	1.26	3.74	4.11	1.53	0.22	0.1234	0.0745	0.0292	98.777
PL014	21800318	花岗碎裂岩	71.6	14.92	1.29	3.57	4.05	1.58	0.25	0.1344	0.0873	0.0322	97.514
		平均	72.94	14.87	1.18	3.44	4.14	1.00	0.19	0.1094	0.0783	0.0259	97.969
PL009	21800313	煌斑岩	56.32	14.47	5.07	2.62	2.18	7.51	0.67	0.8475	0.1690	0.4161	90.273
PL011	21800315	煌斑岩	57.6	13.86	5.85	2.34	3.07	5.36	4.98	0.7923	0.0966	0.3229	94.272
		平均	56.96	14.17	5.46	2.48	2.63	6.44	2.83	0.8199	0.1328	0.3695	92.272
		玲珑花岗岩	73.37	14.54	1.82	4.25	4.12	1.33	0.33	0.14	0.05	0.1400	101.82

Table 2. Analysis results of trace elements in rocks of Luanjiahe fault Zone ($Au \times 10^{-6}$; Other elements $\times 10^{-9}$)
表 2. 菜家河断裂带岩石微量元素分析结果表(单位: $Au \times 10^{-6}$; 其它元素 $\times 10^{-9}$)

野外号	岩性	Ag	As	Au	Ba	Be	Bi	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Nb	Ni	Pb	Rb	Se	Sn	Sr	V	W	Zn	Zr
PL001	二长花岗岩	0.029	1.7	1.4	1050	2.28	0.09	1.99	17.2	3.57	27.52	0.72	11.3	6.18	34.1	135	2.91	1.31	328	15.59	0.13	48.1	41
PL015	二长花岗岩	0.023	0.35	0.5	1214	2.13	0.02	0.84	15.8	1.03	36.7	0.3	10.5	2.36	44.2	139	2.29	1.01	307	7.58	0.024	38.9	25
PL016	二长花岗岩	0.036	0.24	0.8	1175	2.17	0.05	1.15	17.1	1.53	21.1	0.48	10.52	4.12	35.8	143	2.28	1.21	392	9.11	0.047	44.5	27.8
PL017	二长花岗岩	0.088	0.5	0.5	1112	2.39	0.06	0.95	16	1.41	21.7	0.5	10	3.52	29.4	138	2.22	1.16	359	9.44	0.12	58.1	24.8
PL018	二长花岗岩	0.112	0.44	1	107	6.51	2.2	0.5	16.7	2.15	53.5	0.62	52.7	2.71	70.6	294	5.63	6.67	51.9	0.72	2.37	65.1	178
PL019	二长花岗岩	0.02	0.36	0.9	1342	1.82	0.05	1.23	17.1	1.5	25.29	0.32	10.69	3.65	33.6	1411	2.26	1.08	450	8.72	0.029	43.5	28.1
	平均值	0.051	0.598	0.850	1000	2.883	0.412	1.110	16.65	1.865	30.97	0.490	17.62	3.757	41.28	377	2.932	2.073	314.7	8.527	0.453	49.70	54.12
PL002	碎裂花岗岩	0.024	0.84	0.7	1107	2.29	0.05	1.11	22.4	4.77	38.2	0.53	10.2	4.93	41.1	155	2.42	1.26	333	9.07	0.21	44.3	29.9
PL003	碎裂花岗岩	0.02	0.51	0.5	122	3.89	0.69	0.44	14.6	0.8	34.5	0.36	54	2.62	40.1	161	6.15	4.1	59.2	0.97	1.08	60.3	170
PL004	碎裂花岗岩	0.023	0.57	2	1138	2.29	0.04	1.02	16.1	1.72	32.8	0.85	9.87	5.2	37.6	140	2.12	1.21	328	10.21	0.007	41.4	31.7
PL005	碎裂花岗岩	0.034	0.44	0.5	1017	2.24	0.01	1.11	18.8	1.46	19.57	0.41	10.24	3.36	44.3	167	2.29	1.38	314	10.18	0.077	43.8	30.5
PL006	碎裂花岗岩	0.062	0.48	0.5	165	3.71	0.47	0.55	15.9	1.97	35.2	0.56	50.6	2.92	57.5	282	5.49	4.44	27.9	1.09	1.72	56.4	210
PL007	碎裂花岗岩	0.034	0.46	0.9	871	2.44	0.06	1.03	15.9	1.28	14.2	0.48	10.5	4.1	27.6	134	2.24	1.22	401	9.43	0.08	32.2	37.1
PL008	碎裂花岗岩	0.02	0.6	14.2	1145	1.88	0.03	1.18	14.1	1.34	31.4	0.43	9.71	3.4	30.5	140	2.04	1.14	333	9.75	0.026	40.1	29.7
PL010	碎裂花岗岩	0.025	0.37	0.7	1280	2.15	0.07	1.35	19.9	1.63	23.44	0.57	10.98	4.73	33.4	139	2.28	1.29	389	10.27	0.73	40.9	32.6
PL012	碎裂花岗岩	0.02	0.38	0.5	1282	2.23	0.05	1.58	19.9	2.11	34.3	0.88	12.1	6.03	46.2	129	2.5	1.28	447	9.78	0.045	46.2	33.4
PL013	碎裂花岗岩	0.02	0.29	3	1382	2.13	0.02	1.19	18.2	1.35	33.48	0.65	10.8	4.28	39.8	141	2.15	1.13	439	9.15	0.036	41.7	28.8
PL014	碎裂花岗岩	0.028	0.35	0.5	1374	1.75	0.02	1.32	20.3	1.54	36.6	0.5	11.8	3.78	40.3	141	2.54	1.25	442	7.42	0.015	46.6	30.1
	平均值	0.03	0.48	2.18	989	2.45	0.14	1.08	17.83	1.82	30.34	0.57	18.25	4.12	39.85	157	2.93	1.79	319	7.94	0.37	44.90	60.35
PL009	煌斑岩	0.104	0.99	0.9	1050	4.55	0.07	17.21	174	25.8	41.3	0.17	9.95	64.3	83.6	106	14.95	1.49	1471	123	1.33	135	527
PL011	煌斑岩	0.076	0.44	2.3	2720	2.27	0.15	22.4	237	30.7	52	0.34	9.61	92.3	27.5	69.4	15.32	1.25	761	111	0.48	92.2	466
	平均值	0.09	0.715	1.6	1885	3.41	0.11	19.805	205.5	28.25	46.65	0.255	9.78	78.3	55.55	87.7	15.135	1.37	1116	117	0.905	113.6	496.5
	玲珑花岗岩平均值	0.03	0.56	1.68	1471	5.09	0.15	3.24	9.88	22.67	21.83	4.89	76.55	6.79	35.42	71.94	3.07	3.92	438.9	9.58	50	55.33	163

Table 3. Analysis results of rare earth elements in rocks of Luanjiahe Fault Zone (unit: $\times 10^{-9}$)
表 3. 滦家河断裂带岩石稀土元素分析结果表(单位: $\times 10^{-9}$)

野外号	分析号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	LREE	HREE	LREE/ HREE	δ Eu	Eu/Sm	Ce/Yb
PL001	21800305	13.6	24	2.76	9.36	1.46	0.61	1.5	0.22	1.56	0.29	1.02	0.17	1.29	0.22	10.14	58.06	51.79	6.27	8.26	1.25	1.10	5.17
PL002	21800306	12.4	22.1	2.53	8.7	1.34	0.63	1.25	0.18	1.09	0.2	0.69	0.11	0.88	0.16	7.05	52.26	47.70	4.56	10.46	1.46	1.24	6.98
PL003	21800307	7.47	14.9	1.86	5.74	1.19	0.15	1.29	0.25	1.99	0.5	1.89	0.39	3.2	0.56	20.7	41.38	31.31	10.07	3.11	0.37	0.33	1.29
PL004	21800308	9.18	20.4	1.86	6.43	1.08	0.57	1.15	0.18	1.19	0.24	0.85	0.14	1.07	0.2	8	44.54	39.52	5.02	7.87	1.55	1.39	5.30
PL005	21800309	13.6	24.3	2.66	9.15	1.57	0.6	1.31	0.19	1.17	0.24	0.86	0.14	1.19	0.19	8.8	57.17	51.88	5.29	9.81	1.24	1.01	5.67
PL006	21800310	7.03	15.5	1.8	5.45	1.23	0.14	1.14	0.25	1.81	0.47	1.87	0.41	3.15	0.6	21.5	40.85	31.15	9.70	3.21	0.36	0.30	1.37
PL007	21800311	12.2	21.4	2.37	8.09	1.3	0.51	1.24	0.19	1.09	0.24	0.89	0.16	1.22	0.23	8.58	51.13	45.87	5.26	8.72	1.21	1.03	4.87
PL008	21800312	10.3	18.4	2.06	7.03	1.25	0.57	1.11	0.15	0.96	0.2	0.75	0.11	1.02	0.16	6.73	44.07	39.61	4.46	8.88	1.45	1.20	5.01
PL009	21800313	11.3	20.2	2.41	8.98	1.415	3.65	1.1	1.4	6.28	1.04	3.12	0.41	2.62	0.38	32.7	472.95	446.70	26.25	17.02	0.86	0.68	21.42
PL010	21800314	13.8	24.2	2.72	9.25	1.6	0.72	1.6	0.23	1.59	0.29	0.97	0.17	1.28	0.21	9.65	58.63	52.29	6.34	8.25	1.36	1.19	5.25
PL011	21800315	62.9	117	14.3	52	8.63	2.71	7.36	0.97	4.91	0.88	2.59	0.36	2.31	0.35	25.6	277.27	257.54	19.73	13.05	1.01	0.83	14.07
PL012	21800316	14	23.7	2.8	9.28	1.65	0.77	1.66	0.28	1.72	0.39	1.3	0.23	1.74	0.28	13.3	59.80	52.20	7.60	6.87	1.41	1.23	3.78
PL013	21800317	11.1	19.2	2.27	7.7	1.42	0.73	1.43	0.24	1.77	0.35	1.28	0.23	1.75	0.3	13.14	49.77	42.42	7.35	5.77	1.55	1.36	3.05
PL014	21800318	14.1	25	2.71	9.47	1.58	0.74	1.63	0.25	1.8	0.38	1.2	0.21	1.65	0.26	12.8	60.98	53.60	7.38	7.26	1.40	1.24	4.21
PL015	21800319	10.5	18.9	2.08	7.41	1.21	0.64	1.22	0.18	1.15	0.33	0.81	0.15	1.14	0.19	8.62	45.91	40.74	5.17	7.88	1.59	1.40	4.61
PL016	21800320	12.7	22.7	2.5	8.5	1.45	0.62	1.4	0.2	1.31	0.26	0.84	0.18	1.27	0.2	9.38	54.13	48.47	5.66	8.56	1.31	1.13	4.97
PL017	21800321	12.8	22.8	2.58	8.64	1.51	0.64	1.37	0.21	1.31	0.32	1.01	0.19	1.36	0.24	9.68	54.98	48.97	6.01	8.15	1.33	1.12	4.66
PL018	21800322	8.39	17.7	2.1	6.51	1.27	0.13	1.29	0.26	1.95	0.47	1.79	0.36	3	0.57	20.8	45.79	36.10	9.69	3.73	0.31	0.27	1.64
PL019	21800323	11.2	19.7	2.31	8.07	1.45	0.69	1.44	0.25	1.69	0.36	1.25	0.21	1.57	0.26	12.87	50.45	43.42	7.03	6.18	1.44	1.26	3.49

K_2O 、 Na_2O 含量的增高会造成钾化现象, 这种蚀变作用即通常所说的“红化”现象, 即花岗岩因斜长石被钾质交代而呈红色的钾化所致, 通常是一种有效的找矿标志。

5.2. 微量元素地球化学

微量元素分析结果如表 2 所示。断裂带围岩即中粒黑云二长花岗岩中 Au、Cu、Zn 元素含量普遍低于正常的玲珑花岗岩中含量的平均值, 但 Ag、Pb 等元素则普遍含量较高, 是平均值的 0.5~2 倍, 其它元素则基本与平均值相近, 这是花岗岩在破碎蚀变过程中有 Au 元素参与了蚀变所致。在栾家河断裂带中, 成矿元素 Au 的含量总体高于围岩和玲珑花岗岩(图 4), 反映了栾家河断裂带具有普遍的金元素富集现象。亲硫(亲铜)元素 As、Cu、Zn 普遍偏低, 说明断裂带中硫化物矿化弱, 对成矿不利。

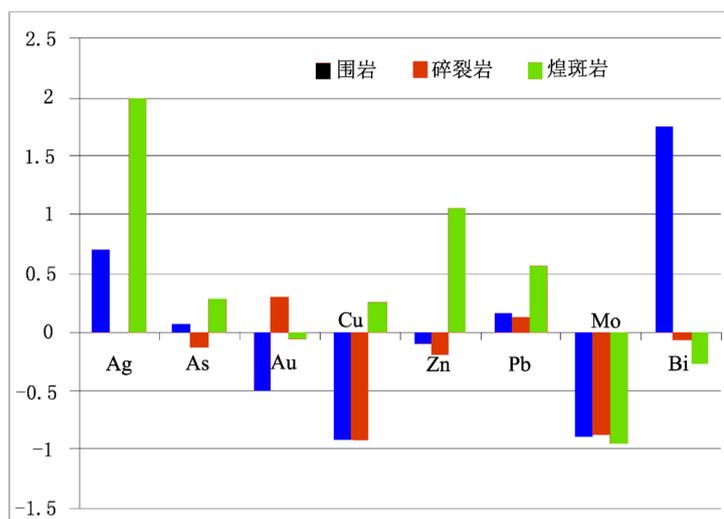


Figure 4. Enrichment map of main beneficial elements in rocks of Luanjiahe fault zone
图 4. 栾家河断裂带岩石主要有益元素富集图

由于断裂带普遍发生了蚀变, 这种蚀变主要是绢英岩化, 因此与金成矿有关的元素在构造带中稍有富集, 显示总体升高的趋势, 但由于蚀变弱, 尚达不到矿化的程度。

5.3. 稀土元素地球化学

稀土元素分析结果如表 3 所示。该区稀土元素地球化学总体特征为: 稀土总量变化范围很大, ΣREE 总量 $40.85 \times 10^{-6} \sim 472.95 \times 10^{-6}$, 平均值为 85.27×10^{-6} ; 轻稀土元素(LREE)富集, LREE 总量 $31.15 \times 10^{-6} \sim 446.70 \times 10^{-6}$, 平均值为 76.91×10^{-6} ; 重稀土元素(HREE)相对亏损且含量很低, HREE 总量 $4.46 \times 10^{-6} \sim 26.73 \times 10^{-6}$, 平均值为 8.36×10^{-6} ; LREE/HREE 比值为 3.11~17.02, 平均值为 8.05, 呈 LREE 高度富集的分布模式, 且轻重稀土间分馏作用较弱, δEu 值变化区间为 0.31~1.59, 平均值为 1.18, Eu/Sm 值变化区间为 0.27~1.40, 平均值为 1.02, Ce/Yb 值变化区间为 1.29~21.42, 平均值为 5.62, 表明轻重稀土内部分馏均较小, δCe 异常不明显。

不同岩石类型的稀土元素地球化学特征在本质上没有大的区别, 总体表现为轻稀土元素(LREE)富集、HREE 相对亏损且含量很低, 含量区间变化范围很窄, 并且具有均一性特点, 其稀土配分模式属 LREE 富集右倾型(图 5)。在稀土配分模式图上显示, 不同岩石类型的稀土配分模式图谱清楚。煌斑岩具有较陡的配分模式(图 5 上二条曲线), 而花岗岩则具有较平坦的稀土配分模式, 具有 Eu “V” 字型谷的二条曲线可能是其岩石未发生蚀变所致。

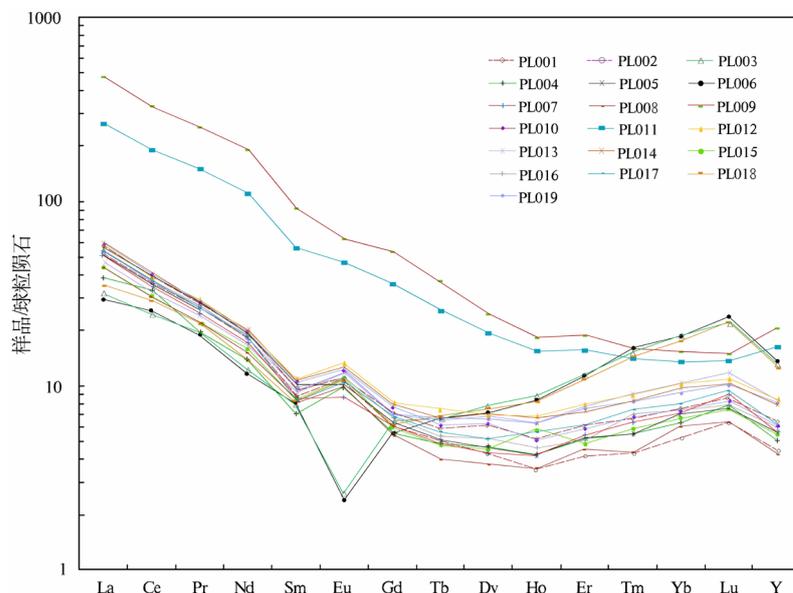


Figure 5. The rare earth partitioning model of rocks in Luanjiahe fault zone
图 5. 栾家河断裂带岩石稀土配分模式图

由于区内玲珑花岗岩是交代太古宙和元古宙结晶基底岩系而形成的原地、半原地交代型花岗岩，它具有独特的演化模式，反映结晶分异作用在岩浆演化过程中不占主导地位，或者说玲珑花岗岩仅经过了弱分异作用，说明岩浆源区没有长石等矿物大量残余[9]，其来源深度较深。稀土元素被认为是最少溶解的微量元素，并且能够在低级风化和热液交代作用中稳定[10]，样品 Ce 值异常不明显表明岩石形成后，构造破碎带内的岩石经历了一定的氧化作用相关[11]。

由于对稀土元素在金矿成矿过程中的地球化学行为的研究资料较少，大多的研究是与已知含量及图解的对比上，因此本次研究与前人的认识还是存有较大不同的，如何解释需要做进一步的研究。但现象表明，稀土元素的变化与迁移与原岩、花岗岩成因、热流体等具有改造性和继承性，这是毋庸置疑的。

6. 讨论与结论

6.1. 问题讨论

构造运动是地球物质运动的一种重要表现形式，其运动方式与热作用密切相关。在构造运动过程中，成矿元素相对集中的区域构成矿体，但更多的是有用元素在构造破碎带或其周围形成高异常区[12]，成矿地球化学研究的重要目的之一就是要揭示成矿作用中各种元素变化的时空规律。胶东地区的金矿皆与构造直接相关，目前已知的三山岛断裂带、焦家断裂带和招远-平度断裂带三条主要的控容矿构造内赋存的金资源储量经勘查证实的金属量已达 3317 吨[13] [14]。栾家河断裂带是胶西北地区一条规模较大的构造带，它与招远-平度断裂带小角度斜交，又处于玲珑金矿田的外围，多年来区内的地质勘查者对该带进行了多次探讨研究，双宝等[15]认为该带具有多金属矿化有进一步金矿找矿的前景，山东省第六地质矿产勘查院根据勘查结果认为是一条矿后断裂，虽有矿化蚀变但不成矿。

本次研究的栾家河断裂带剖面中，根据主微量和稀土元素地球化学特征分析，在化学成分方面，正常未破碎的黑云二长花岗岩中 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 MnO 和 P_2O_5 均低于玲珑花岗岩的平均值，但整体岩石化学特征具一致性；栾家河断裂带碎裂岩中 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 具有明显的增生现象，反映了在构造破碎后有热液蚀变钾化的发生，矿石化学成分则与原岩关系密切，这与构造带中的

岩石普遍发育绢英岩化作用有关。微量元素方面,断裂带中碎裂岩成矿元素 Au、Pb 明显增高,但 Cu、Zn、Mo 则具有降低趋势,说明构造带中矿化蚀变强度偏低,有用元素富集程度不均衡,有用成矿元素不集中,不利于矿床的形成。稀土元素显示,构造带内岩石和围岩均为轻稀土较为富集,为平缓右倾型,显示非典型岩浆花岗岩的环境。

6.2. 结论

(1) 栾家河断裂带是胶西北地区重要的一条断裂,具右行张裂走滑性质,它出露长约 45 km、宽 15~260 m,总体展向为北东 30°~50°,倾向南东,倾角 60°~85°。断裂带显示南东盘下降、北西盘上升,呈右行张裂走滑特点,带内构造岩主要由碎裂岩、构造角砾岩组成,是胶东地区玲珑金矿田的东部边界断裂,是胶东地区金矿成矿的矿后断裂。

(2) 根据栾家河断裂带剖面中主量元素、微量元素和稀土元素地球化学特征研究,外围花岗岩 SiO₂ 含量与花岗碎裂岩相比在正常范围内,从带内碎裂岩的化学成分带入带出的相对百分比分析,碎裂蚀变的岩石具有相对较高的 Al₂O₃、K₂O、Na₂O、CaO 和 P₂O₅,可能代表了早期的钾化现象,而 SiO₂ 及 Fe₂O₃、MgO、MnO 质相对百分比低。K₂O、Na₂O 含量的增高钾质交代所致,钾化是一种找矿标志。微量元素方面,断裂带围岩中 Au、Cu、Zn 元素含量低于正常玲珑花岗岩含量的平均值,但 Ag、Pb 等元素则普遍含量较高,是平均值的 0.5~2 倍,这是花岗岩在破碎蚀变过程中有 Au 元素富集蚀变所致。断裂带中成矿元素 Au 的含量高于围岩和玲珑花岗岩,反映了栾家河断裂带具有普遍的金元素富集现象。亲硫元素 As、Cu、Zn 普遍偏低,说明断裂带中硫化物矿化弱,对成矿不利。稀土元素方面,断裂带中碎裂岩具有较低的稀土总量,稀土配分模式具有相似特征,总体右倾型,ΣREE 偏低,以富含 LREE 和 HREE 亏损为特征,说明断裂带中稀土元素更多的是反映从流体体系中带入相对偏少。

(3) 根据新近矿产勘查资料结合本次的研究认为,栾家河断裂带是金矿的成矿后断裂,但带内具有多金属硫化物呈矿显示,说明该断裂对多金属矿具有控制作用。

致 谢

感谢哈本海总工程师在野外工作期间提供的方便,感谢地球科学前沿编辑部多年来对作者的热心支持和帮助,感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议!

基金项目

国家自然科学基金项目山东招远-平度断裂带夏甸金矿深部成矿特征研究(41572068)、国家重点研发计划项目胶西北地区深部构造格架研究-依托于深部反射地震(2016YFC0600107-5)、国家公益性专项胶东招平断裂带深部特征与金矿成矿过程研究(201511029)、招平断裂带中段深部金矿成矿理论找矿方法与成矿预测(2017CXGC1605)和山东省泰山学者建设工程专项联合资助。

参考文献

- [1] 李洪奎,耿科,糕传源,梁太涛. 胶东金矿构造环境与成矿作用[M]. 北京:地质出版社,2016: 338-383.
- [2] 李洪奎,于学峰. 山东省大地构造相研究[M]. 北京:地质出版社,2012: 281-314.
- [3] 李逸凡,李洪奎,陈国栋,等. 论山东胶东金矿形成的挤压-伸展构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(6): 1117-1132.
- [4] 李士先,刘长春,安郁宏,等. 胶东金矿地质[M]. 北京:地质出版社,2007: 77-96.
- [5] 李洪奎,翁占斌,董鑫,等. 招平断裂带金矿地质[M]. 北京:地质出版社,2019: 29-211.
- [6] 陈光远,孙岱生,邵伟. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆:重庆科技出版社,1989: 59-126.

- [7] 李洪奎, 李大鹏, 郭宝奎, 等. 胶东地区燕山期岩浆活动及其构造环境——来自单颗锆石 SHRIMP 年代学的记录[J]. 地质学报, 2017, 91(1): 163-179.
- [8] 宋明春, 徐军祥, 王沛成. 山东省大地构造格局和地质构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 36-37.
- [9] 李文昌. 义敦岛弧构造演化与普朗超大型铜矿成矿模型[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2007: 22-34.
- [10] Rollinson, H.R. (1993) Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific and Technical, New York, 1-352.
- [11] Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D. and Norry, M.J., Eds., *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society, Special Publication, London, 313 -345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- [12] 郭光裕, 林卓红. 脉状金矿床深部大比例尺统计预测理论与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 12-58.
- [13] 李洪奎, 于学峰, 嵯传源, 等. 山东胶东金矿成矿理论体系[J]. 山东国土资源, 2017, 33(7): 1-6.
- [14] 李洪奎, 陈国栋, 耿科, 等. 山东胶东金矿成矿地质背景初论[J]. 山东国土资源, 2018, 34(5): 34-41.
- [15] 双宝, 葛玉奇. 山东招远栾家河断裂北段表土矿物蚀变特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(6): 1049-1054.