

Geochemical Characteristics and Significance of Inner Vein Rocks in Linglong Rock Mass, Shandong Province

Hongkui Li^{1,2,3}, Yubo Zhang^{1,2,3}, Taitao Liang^{1,2,3}, Guodong Chen^{1,2,3}, Jimei Liu^{1,2,3}, Daicheng Han^{1,2,3}, Chunfa Zhang^{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: Jan. 30th, 2020; accepted: Feb. 12th, 2020; published: Feb. 19th, 2020

Abstract

Widely distributed in Jiaodong region development in Mesozoic intrusive rocks and Linglong-Zhaofengding, Jushan-Longmenkou and Laoshan-Dazhushan vein rock belt, vein rock composition is very complicated, including almost all the types of magmatic rocks from the ultrabasic, basic to acidic and alkaline vein rocks are exposed, lamprophyre, flash inclined cloud porphyry, fai green porphyrite, gabbro vein, quartz diorite porphyrite, diorite porphyrite diorite porphyry, granite, quartz monzonitic porphyry, granite porphyry, monzonitic porphyry, is long porphyry, quartz vein and carbonate vein, they should be a combination of different periods and different era. In this paper, the geochemical studies on the chemical composition, trace elements and rare earth elements of the vein rocks produced in linglong granite in the area of guojia-xiejiazhuang, shimen, zhaoyuan, show that compared with the quartz diorite of the same type in the area, the content of SiO₂ is slightly higher, while the content of other components is lower. Trace elements in vein rock are characterized by sulfur-loving elements and lithophile elements, while Ag, W, Pb and Zn are obviously on the high side, while As, Mo and Cu are on the low side. Iron loving elements Co and Ni are relatively high; among the large ionic lithophile elements, Li, Be, Rb, Sr, Ba and V are mostly in the enriched state, while other elements are in the deficit state. Total rare earth Σ REE averaged 168.50×10^{-6} , Σ LREE on average 157.57×10^{-6} , Σ HREE average 10.93×10^{-6} , Σ LREE/ Σ HREE is 15.79, fractionation between light and heavy rare earth is stronger, vein rocks rare earth curves gently to the right, light and heavy rare earth elements fractionating degree is low. The fact that the average δ Eu value is greater than 1.10 indicates that the vein rocks in this area are formed by remelting or magmatic differentiation of relatively basic rocks deep in the crust. On the comprehensive analysis of the regional linglong granite and ground data, vein rocks and the linglong granite from different material source area, vein rocks are formed by remelting or magmatic differentiation of relatively basic rocks in the deep crust, exquisite is stuck half *in-situ* metasomatic type granites, the formation of vein rocks is the product of area extending action results. The tectonic environment of the basic-intermediate-acid vein rocks in Jiaodong area is closely related to the formation of gold deposits.

Keywords

Vein Rocks, Geochemistry, Characteristic, Tectonic Environment, Xie Guzhuang, Jiaodong Region, Shandong Province

山东玲珑岩体脉岩地球化学特征及其意义

李洪奎^{1,2,3}, 张玉波^{1,2,3}, 梁太涛^{1,2,3}, 陈国栋^{1,2,3}, 刘继梅^{1,2,3}, 韩代成^{1,2,3}, 张春法^{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地质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1月30日; 录用日期: 2020年2月12日; 发布日期: 2020年2月19日

摘要

在胶东地区广泛分布的中生代侵入岩中发育有玲珑-招风顶、巨山-龙门口和崂山-大珠山三条脉岩带, 脉岩成分十分复杂, 几乎包括了所有的岩浆岩类型, 从超基性-基性到中酸性以及碱性脉岩皆有出露, 主要有煌斑岩、闪斜云斑岩、辉绿玢岩、辉长岩脉、石英闪长玢岩、闪长玢岩、花岗闪长斑岩、石英二长斑岩、花岗斑岩、二长斑岩、正长斑岩、石英脉和碳酸盐岩脉等, 它们是不同的构造期和不同时代的综合产物。本文通过对招远石门郭家-谢家庄一带产于玲珑花岗岩中的脉岩进行岩石化学成分、微量元素、稀土元素地球化学研究表明, 其化学成分与区内同类型的石英二长闪长岩相比, SiO_2 含量稍微偏高, 而其它成分含量均偏低; 脉岩微量元素以亲硫元素和富亲石元素为特征, 亲铜元素Ag、W、Pb、Zn明显偏高, As、Mo、Cu偏低; 亲铁元素Co、Ni偏高; 在大离子亲石元素中, Li、Be、Rb、Sr、Ba、V大多呈富集状态, 而其它元素均呈亏损状态。稀土总量 ΣREE 平均为 168.50×10^{-6} , ΣLREE 平均 157.57×10^{-6} , ΣHREE 平均 10.93×10^{-6} , $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为15.79, 轻重稀土间分馏较强, 脉岩稀土曲线平缓右倾, 轻、重稀土元素分馏程度均较低, 从 δEu 值平均大于1.10说明区内脉岩是由地壳深部较基性的岩石经重熔作用或基性岩浆分异作用形成。根据区域玲珑花岗岩和脉岩资料综合分析, 脉岩与玲珑花岗岩来源于不同的物质源区, 脉岩是由地壳深部较基性的岩石经重熔作用或基性岩浆分异作用形成的, 玲珑花岗岩是原地半原地交代型花岗岩, 脉岩的形成是区域伸展作用结果的产物。胶东地区基性-中酸性脉岩形成的构造环境与金矿有着内在的成因联系, 中基性脉岩中有一期与金矿形成关系密切。

关键词

脉岩, 地球化学, 特征, 构造环境, 谢家庄, 胶东地区, 山东省

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

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

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



Open Access

1. 引言

山东胶东地区因是我国著名的金矿集中区而蜚声国内外, 而与金矿关系密切的是中生代花岗岩。在

胶东地区发育有二大侵入岩浆岩带，一是平度-招远-蓬莱岩浆岩带，二是崂山-海阳-文登-威海岩浆岩带。在二大岩浆岩带中，分布有三条脉岩带(群)，它们是玲珑-招风顶脉岩带、巨山-龙门口脉岩带和崂山-大珠山脉岩带(图 1)。对于脉岩带(群)的形成时代，历来争议颇大。宋明春等认为三条脉岩带(群)都是燕山晚期的产物，按其形成时序分为燕山晚期早、中、晚期脉岩带[1]。李洪奎在研究胶东金矿成矿环境时认为脉岩带(群)与构造-岩浆事件密切相关，玲珑-招风顶脉岩带是玲珑花岗岩侵位后伸展的物质反映[2]-[6]。张增奇等根据脉岩与侵入岩产出的依附关系将玲珑-招风顶脉岩带置于玲珑花岗岩之后为晚侏罗世脉岩，巨山-龙门口脉岩带放入伟德山侵入岩之后属早白垩世中期，而崂山-大珠山脉岩带则列入崂山花岗岩之后属早白垩世晚期[7]。王建国等认为招远地区中基性脉岩形成年代包含了金的成矿年龄阶段，是与金成矿同时的产物，其形成年龄为 130 Ma~110 Ma [8]；梁亚运等对胶东地区脉岩成因与金成矿关系进行了研究[9]，认为胶东脉岩与金矿联系最紧密的是早白垩世镁铁质脉岩，它们在空间上紧密共生，在时间上属于同一时代，为相同构造背景的产物；许多学者对胶东地区脉岩尤其是煌斑岩与金矿的关系进行了较为广泛的研究[10] [11] [12] [13]。本文是在前人研究基础上，以招远石门郭家-谢家庄一带的石英闪长玢岩脉岩为研究对象，进一步研究脉岩的岩相学、岩石化学、微量元素、稀土元素等地球化学特征，追溯胶东玲珑岩体中脉岩的原岩性质、形成环境及其所经历的地质作用过程，利用脉岩的主微量元素地球化学特征，试图探讨脉岩与金矿形成的关系。

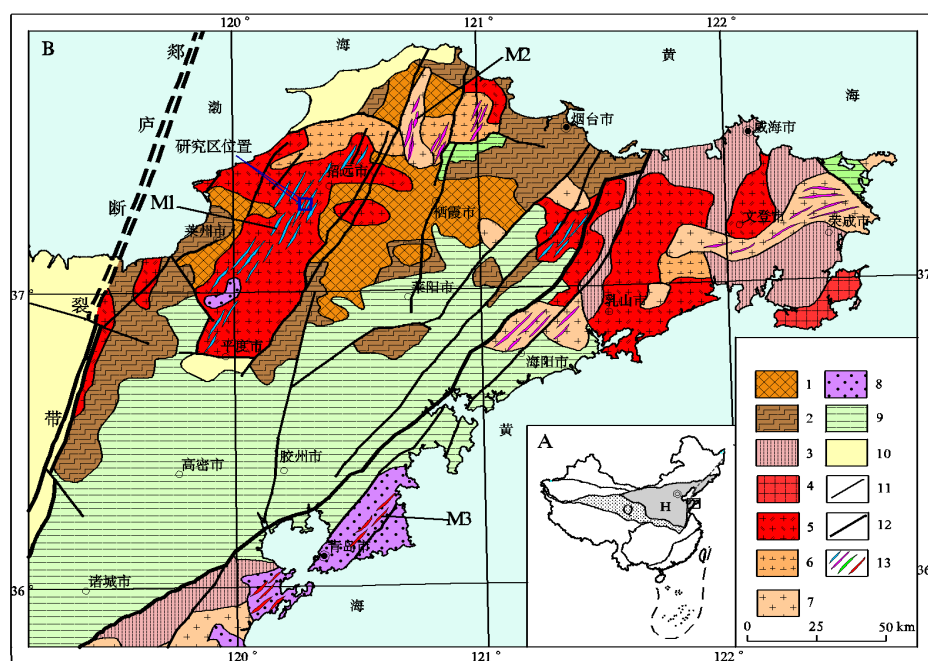


Figure 1. An outline of the distribution area of vein rock belt in Jiaodong area. (A) H: North China plate; Q: Qinqikun Orogenic system. (B) 1: Archean TTG and supracrustal rocks; 2: Proterozoic supracrustal rocks; 3: Proterozoic syn-collision igneous complex; 4: Triassic igneous complex; 5: Jurassic Linglong orogenic intrusions; 6: Early Cretaceous Guojialing orogenic intrusions; 7: Early Cretaceous Weideshan orogenic intrusions; 8: Early Cretaceous Laoshan orogenic intrusions; 9: Cretaceous sedimentary and volcano-sedimentary rocks; 10: Cenozoic sedimentary and volcano-sedimentary rocks; 11: main geological boundaries; 12: main faults; 13: Vein-rock belt (group). M1: Linglong-Zhaofengding vein rock belt; M2: Jushan-Longmenkou vein rock belt; M3: Laoshan-Dazhushan vein rock belt

图 1. 胶东地区脉岩带分布区域略图。(A) H: 华北板块; Q: 秦祁昆造山系。(B) 1: 太古宙 TTG+表壳岩; 2: 元古宙变质表壳岩; 3: 高压-超高压变质带; 4: 三叠纪岩浆杂岩; 5: 侏罗纪玲珑侵入岩; 6: 早白垩世郭家岭侵入岩; 7: 早白垩世伟德山侵入岩; 8: 早白垩世崂山侵入岩; 9: 白垩纪沉积-火山沉积岩系; 10: 新生代沉积-火山沉积岩系; 11: 主要地质界线; 12: 主要断裂; 13: 脉岩带(群)。M1: 玲珑-招风顶脉岩带; M2: 巨山-龙门口脉岩带; M3: 崂山-大珠山脉岩带

2. 地质背景

胶东地区地跨华北板块和苏鲁造山带二个 I 级大地构造单元[2] [3] [14] [15] [16], 进一步分为胶北隆起、威海隆起和胶莱盆地。在隆起区内前寒武纪基底主要包括中 - 新太古代壳岩(唐家庄岩群和胶东岩群)、TTG 质片麻岩和古元古代荆山群、粉子山群、芝罘群及新元古代蓬莱群, 中生代花岗岩广泛发育; 而在盆地区则发育白垩纪莱阳群、青山群和王氏群及新生界。岩浆岩为基性超基性、中酸性和碱性侵入岩, 时代为新太古代、古元古代、新元古代及中生代。

中生代侵入岩在胶东地区最为发育, 包括晚三叠世碱性正长岩 - 正长花岗岩系列、中侏罗世花岗闪长岩 - 二长花岗岩系列、晚侏罗世玲珑二长花岗岩系列、早白垩世郭家岭花岗闪长岩、伟德山花岗闪长岩 - 二长花岗岩和崂山晶洞碱性正长岩系列等。

玲珑花岗岩主要分布于平度、招远和乳山、牟平等地, 因与金矿关系密切, 历来为广大地质工作者所关注。玲珑 - 招风顶脉岩带即出露于平度、招远等地的玲珑岩体中(图 1 中 M1 所示), 脉岩带呈北东、北北东走向, 岩石类型主要有煌斑岩、闪斜云斑岩、辉绿玢岩、辉长岩脉、石英闪长玢岩、闪长玢岩、花岗闪长斑岩、石英二长斑岩、花岗斑岩、二长斑岩、正长斑岩、石英脉和碳酸盐岩脉等, 其产出密度多在 5~15 条/1000 m, 出露宽 0.5 m~30 m 不等, 在招远城南等地密度最大, 达到 46 条/1000 m。

研究区位于招远市南西约 6 km、大户陈家乡东 3 km 处石门郭家 - 谢家庄一带(图 1)。区内出露的主体岩性为玲珑花岗岩之九曲弱片麻状细中粒含石榴二长花岗岩、崔召中粒黑云二长花岗岩和郭家店中粗粒二长花岗岩, 三者为侵入接触关系。在花岗岩体内广泛发育各种脉岩, 脉岩均穿切玲珑花岗岩所属的单元, 脉岩岩性主要为石英闪长玢岩、闪长玢岩、花岗闪长斑岩、石英二长斑岩、花岗斑岩、石英脉及少量的中基性脉岩(图 2)。研究者对脉岩的产状无分歧, 但对于脉岩的产出时代则存有较大分歧和不同认识。

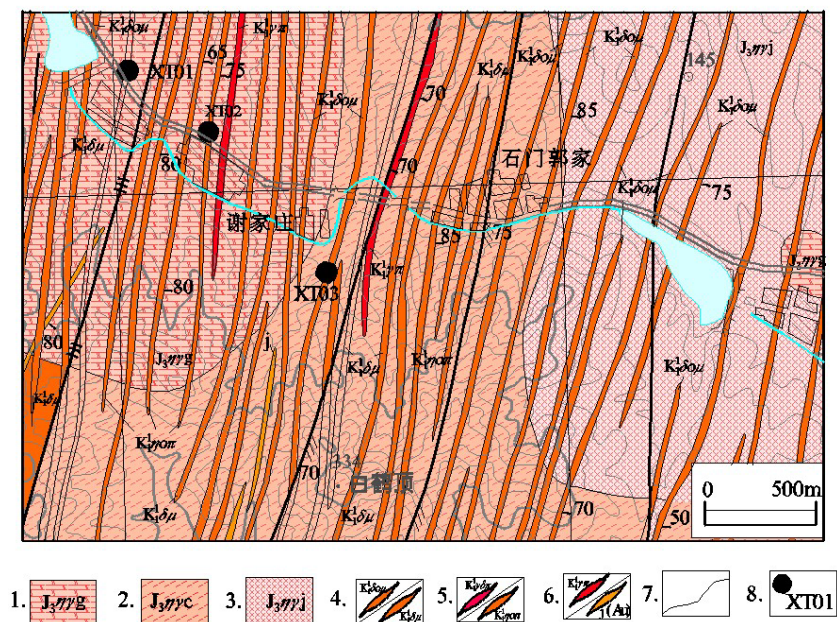


Figure 2. Geological and sampling location map of the study area. 1: Guojiadian medium-grained monzogranite; 2: Cui Zhao medium monzogranite; 3: Jiuqu weakly gneiss fine-medium grained monzogranite; 4: Quartz diorite porphyrite/diorite porphyrite; 5: Granite diorite porphyry/quartz diorite porphyry; 6: Granite porphyry/gold-bearing quartz veins; 7: Geological boundaries; 8: Location and number of sampling points

图 2. 研究区地质及采样位置图。1: 郭家店中粗粒二长花岗岩; 2: 崔召中粒二长花岗岩; 3: 九曲弱片麻状细中粒二长花岗岩; 4: 石英闪长玢岩/闪长玢岩; 5: 花岗闪长斑岩/石英二长斑岩; 6: 花岗斑岩/含金石英脉; 7: 地质界线; 8: 取样点位置及编号

3. 样品采集与分析

3.1. 样品采集

本文所研究的脉岩为产于玲珑花岗岩中的石英闪长玢岩和花岗斑岩，样品采自招远南西部石门郭家 - 谢家庄一带的玲珑花岗岩中，来自路边采石场中挖开的新鲜岩石，样品重量为 5 kg，共采集三套样品，编号为 D181199 XT1-XT3。D181199XT1 直角坐标为 X = 4136650.50, Y = 21264200.35; D181199 XT2 直角坐标为 X = 4136096.75, Y = 21264510.70; D181199 XT3 直角坐标为 X = 4135654.40, Y = 21265557.80。其中 XT1 和 XT3 岩性为石英闪长玢岩，XT2 岩性为花岗斑岩。

矿物化学成份分析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-JL69-07-2016。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。

3.2. 分析结果

本次对脉岩岩相学进行了鉴定，对岩石化学成分、微量元素、稀土元素进行了分析，同时收集了前人对谢家庄等地玲珑花岗岩中的脉岩所做的岩石化学成分资料，分别列于表 1、表 2 和表 3 中。

Table 1. Table of chemical composition of rocks in Xiejiazhuang dike rock (Unit: %)

表 1. 谢家庄脉岩岩石化学成分表(单位: %)

野外编号	分析编号	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
XT1	21800336	53.13	15.65	6.36	2.4	3.6	6.22	6.26	0.934	0.109	0.4577
XT2	21800337	70.5	15.88	2.21	3.09	3.34	0.24	0.71	0.213	0.051	0.0398
XT3	21800338	66.66	15.95	2.76	3.44	4.02	2.43	1.1	0.385	0.069	0.1297
XP09	21800313	56.32	14.47	5.07	2.62	2.18	7.51	0.67	0.8475	0.169	0.4161
XP11	21800315	57.6	13.86	5.85	2.34	3.07	5.36	4.98	0.7923	0.0966	0.3229
石英二长闪长岩(平均)		58.11	16.57	7.14	3.9	3.68	5.60	3.59	0.81	0.12	0.52
玲珑花岗岩(平均)		73.28	14.48	2.00	4.28	4.05	1.35	0.31	0.15	0.05	0.05

Table 2. Analysis results of trace elements in Xiejiazhuang dike rock

表 2. 谢家庄脉岩微量元素分析结果表

野外编号	分析编号	Li	Be	Se	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Zr	Nb
XT1	21800336	14.46	1.38	17.51	210.5	26.72	99.6	6.82	97.9	66	314.6	10.9
XT2	21800337	11.9	1.45	4.24	21.2	5.42	8.45	28.6	160	87	109	2.87
XT3	21800338	14.4	1.68	4.28	27.2	5.67	7.64	3.08	73.6	84	294	7
XP09	21800313	41.3	4.55	14.95	174	17.21	64.3	25.8	135	106	527	9.95
XP11	21800315	52	2.27	15.32	237	22.4	92.3	30.7	92.2	69.4	466	9.61
野外编号	分析编号	Mo	Au	Ag	Sn	Pb	Bi	W	As	Sr	V	Ba
XT1	21800336	0.28	2.9	0.023	1.11	16.7	0.05	0.5	0.46	868	146.55	1807
XT2	21800337	0.42	1.5	0.279	1.01	37.6	2.08	1.3	0.72	345	33.55	744
XT3	21800338	0.82	4.5	0.126	1.07	39.3	0.09	0.58	0.55	803	31.96	1932
XP09	21800313	0.17	0.9	0.104	1.49	83.6	0.07	1.33	0.99	1471	123	1050
XP11	21800315	0.34	2.3	0.076	1.25	27.5	0.15	0.48	0.44	761	111	2720

注：元素含量单位 Au 为 $\times 10^{-9}$ ，其它元素为 $\times 10^{-6}$ 。

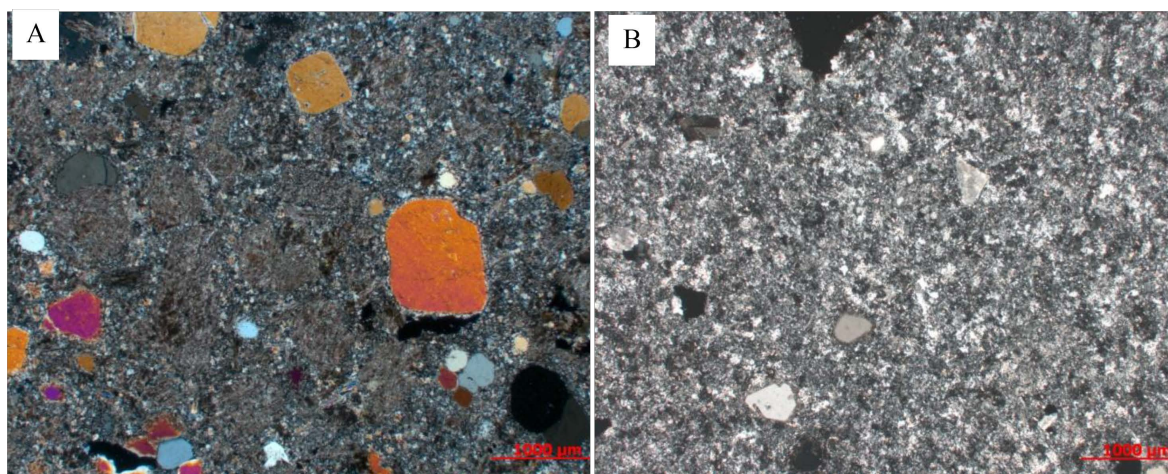
Table 3. Analysis results of rare earth elements in Xiejiazhuang dike rock (Unit: $\times 10^{-6}$)**表 3.** 谢家庄脉岩稀土元素分析结果表(单位: $\times 10^{-6}$)

野外编号	XT1	XT2	XT3	野外编号	XT1	XT2	XT3
分析编号	21800336	21800337	21800338	分析编号	21800336	21800337	21800338
La	56.5	25.9	41.9	Yb	2.27	0.47	1.05
Ce	102.4	45.4	69.4	Lu	0.34	0.069	0.19
Pr	12.2	5.18	7.74	Y	24.5	5.14	11.2
Nd	43.7	18	26.2	Σ REE+Y	266.880	108.472	170.980
Sm	6.88	2.75	3.89	Σ REE	242.380	103.332	159.780
Eu	2.3	0.87	1.49	Σ LREE	223.980	98.100	150.620
Gd	6.17	2.32	3.51	Σ HREE	18.400	5.232	9.160
Tb	0.86	0.27	0.43	Σ LREE/ Σ HREE	12.173	18.750	16.443
Dy	4.86	1.24	2.24	Eu/Eu*	1.06	1.03	1.21
Ho	0.91	0.2	0.39	Eu/Sm	0.882	0.835	1.010
Er	2.62	0.58	1.19	Ce/Yb	12.53	26.83	18.36
Tm	0.37	0.083	0.16				

4. 脉岩地球化学研究

4.1. 矿物学特征

本次岩矿鉴定在自然资源部济南矿产资源监督检测中心完成。批样编号: YK18021, 产品名称: 岩石和矿物鉴定及定名, 检测类别: 岩石和矿物鉴定。检测依据为 GB/T17412.1-1998 火成岩岩石分类和命名方案、GB/T17412.3-1998 变质岩岩石分类和命名方案, 偏光显微镜型号为 Axio Scope.A1, 仪器编号 YK-420, 检测环境条件: 温度 24℃, 相对湿度 49%。岩石类型为石英闪长玢岩和花岗斑岩, 野外定名与岩矿鉴定结果一致(图 3)。

**Figure 3.** Photo of Xiejiazhuang's gangue mirror**图 3.** 谢家庄脉岩镜下照片

XT1 具斑状结构, 块状构造, 薄片岩石主要由斑晶和基质两部分组成。斑晶主要为石英(8%±), 和绢云母化的斜长石(15%±), 可见少量的黑云母(2%±)和透闪石(2%±), 粒度约 0.1~1.6 mm, 局部可见斜长

石残余；石英呈粒状，可见熔蚀港湾，边缘发育一圈显微文象交生结构，消光不均匀。斜长石被绢云母交代，留有部分残余，表面较脏，部分发生粘土化。黑云母呈片状，部分发育一组解理，褐色~浅褐色，有的围绕在透闪石边缘发育，透闪石呈柱状，含量较少，部分被黑云母交代蚀变。基质为斜长石、石英、绢云母、黑云母和不透明矿物等，粒度 0.02~0.05 mm，呈微晶结构，主要为斜长石(40%±)、石英(22%±)、绢云母(7%±)、黑云母(2%±)和不透明矿物等。斜长石颗粒表面不干净，大部分发生绢云母化；石英呈他形粒状，波状消光；黑云母呈片状、隐晶质状，含量较少。

XT2 具斑状结构、基质呈霏细结构，块状构造，薄片中心岩石主要由斑晶和基质组成。斑晶较少，主要为石英，含量 5%±，呈粒状，粒度约 0.1~0.48 mm，可见熔蚀港湾，四周环绕着由钾长石、石英形成的斑边显微文象交生结构；钾长石和斜长石少量，含量各占 1.5%±，钾长石呈板状，粒度约 0.1~0.6 mm，部分可见卡式双晶，表面较浑浊，发生粘土化；斜长石呈柱状，粒度约 0.1~0.7 mm，可见卡钠复合双晶，表面较干净。基质由显微隐晶、难以辨认的、粒度较均匀的长石、石英、绢云母和不透明矿物组成，颗粒细小，边界不清晰，长石大多发生粘土化，绢云母由斜长石蚀变而成，长英质矿物 86%±，呈霏细结构。

4.2. 主元素地球化学

谢家庄脉岩的主元素地球化学中(表 1)，所研究的岩石样品的 SiO_2 含量介于 53.13%~70.5%之间，因 XT2 为花岗斑岩，剔除后平均 58.43%，与区内近同类型的石英二长闪长岩相比，研究区脉岩 SiO_2 含量稍微偏高，而其它成分含量均偏低。在以区石英二长闪长岩作为对比的含量百分图上(图 4)，也反映出成分的变化，这可能与源区不同有关，因为玲珑花岗岩是交代重熔型花岗岩。

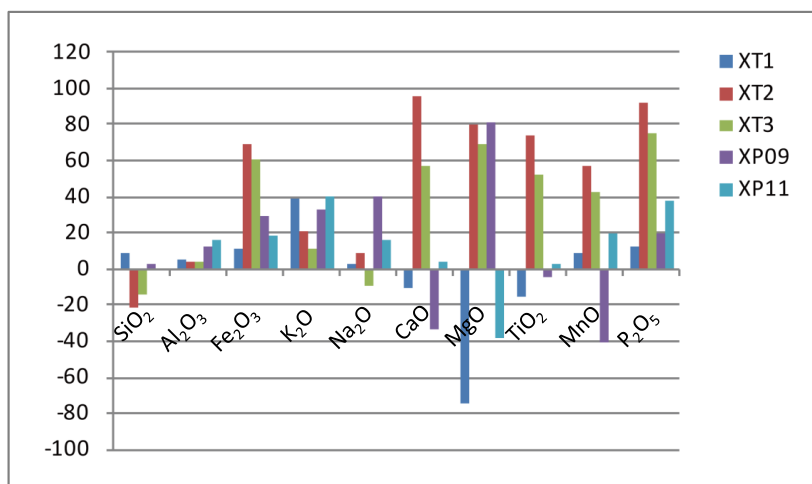


Figure 4. Chemical composition comparison diagram of Xiejiazhuang vein rock
图 4. 谢家庄脉岩化学成分含量对比图

4.3. 微量元素地球化学

微量元素特征(表 2)显示，亲铜元素 Ag、W、Pb、Zn 明显偏高，As、Mo、Cu 偏低；亲铁元素 Co、Ni 偏高；在大离子亲石元素中，Li、Be、Rb、Sr、Ba、V 大多呈富集状态，而其它元素均呈亏损状态。从脉岩中微量元素丰减图(图 5)中可以看出：Ag、W、Pb、Zn 元素在脉岩中呈较明显的富集变化，而 As、Mo、Sb、Bi 等则呈减量变化，Au、Cu 则具有跳跃性，在某个样品中呈增量变化，而部分样品则呈减量变化，说明 Au、Cu 这两种元素含量的跳跃性特征。

总体上，区内脉岩微量元素以亲硫元素和富亲石元素为特征。

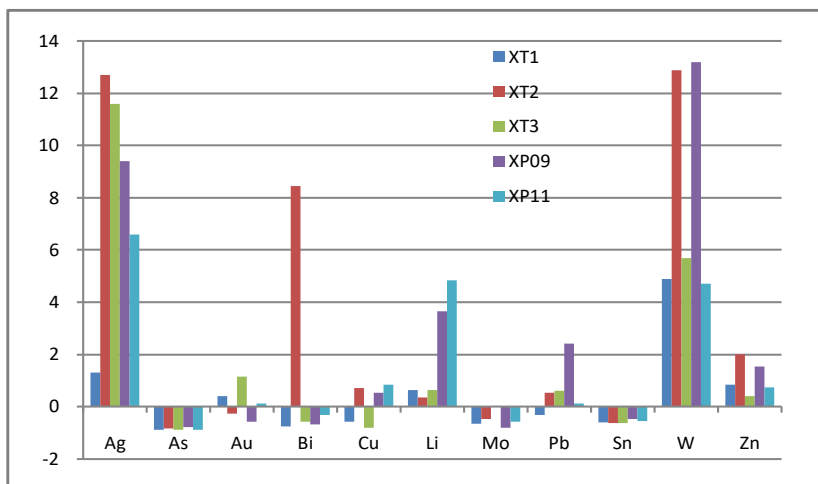


Figure 5. Abundance and decrease of trace elements in xijiazhuang vein rock (note: the serial number is the same as in Table 3)

图 5. 谢家庄脉岩微量元素含量丰减图(注: 序号与表 3 同)

4.4. 稀土元素地球化学

脉岩的稀土元素地球化学特征见表 3，其球粒陨石标准化稀土配分模式属 LREE 富集右倾型(图 6)，稀土总量 ΣREE 为 $103.332 \times 10^{-6} \sim 242.380 \times 10^{-6}$ ，平均为 168.50×10^{-6} ； ΣLREE 总量平均值为 157.57×10^{-6} ， ΣHREE 总量平均值为 10.93×10^{-6} ， $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 15.79，轻重稀土间分馏较强， Eu/Eu^* 、 Eu/Sm 、 Ce/Yb 均值分别为 1.10、0.91、19.24，表明轻重稀土元素内部分馏均较小， δCe 异常不明显，表明成矿环境为弱氧化环境。

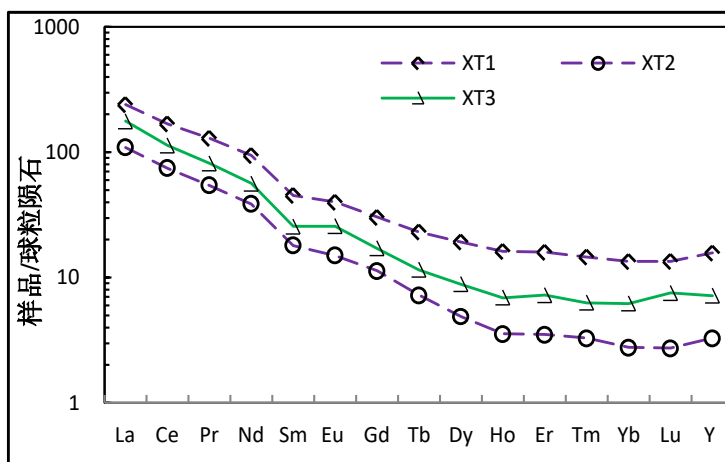


Figure 6. Standardization model of rare earth element chondrites in Xi-jiazhuang vein rock

图 6. 谢家庄脉岩稀土元素球粒陨石标准化模式图

从图 6 中看出：脉岩稀土曲线平缓右倾，轻、重稀土元素分馏程度均较低。理论上讲，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[17]，从 δEu 值平均大于 1.10 说明区内脉岩是由地壳深部较基性的岩石经重熔作用或基性岩浆分异作用形成[18] [19]，与基础地质资料相吻合。

对于脉岩的地球化学特征,中南大学等对金亨岭金矿区内的闪长玢岩、花岗闪长斑岩、闪长岩、石英闪长玢岩、辉石闪长岩等脉岩进行了岩矿学研究,认为上述脉岩可能具有共同的岩浆来源及相似的岩浆演化过程,脉岩与金矿不仅具有较为密切的时空关系,而且有一定的成因关系¹。玲珑后地金矿的闪长玢岩脉与岩体内的闪长玢岩脉相比具有较高的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 和较低的 K_2O 、 Na_2O 、 CaO [20], 招远地区的中基性脉岩主量元素具有低 SiO_2 高 MgO 、 K_2O 、微量元素和稀土元素以富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素和重稀土元素的特点[21]。与前人研究成果相比,本次研究 SiO_2 含量偏高,而微量元素和稀土元素则具有相似性。

5. 讨论

5.1. 关于脉岩的构造环境

脉岩是岩浆作用过程中一定阶段的产物,一般形成于大规模岩石圈伸展构造背景下[22] [23]。脉岩既可以代表源区物质,又可以反映源区构造应力场,同时也是有效的找矿标志[24]。玲珑花岗岩中的脉岩成分十分复杂,几乎包括了所有的岩浆岩类型,从超基性-基性到中酸性以及碱性脉岩皆有出露,主要有煌斑岩、闪斜云斑岩、辉绿玢岩、辉长岩脉、石英闪长玢岩、闪长玢岩、花岗闪长斑岩、石英二长斑岩、花岗斑岩、二长斑岩、正长斑岩、石英脉和碳酸盐岩脉等,它们应是不同构造期和不同时代的综合产物。李洪奎等认为晚侏罗世玲珑花岗岩组合,是区域构造挤压导致地壳增厚引起地壳重熔的产物,其后的伸展引张形成了玲珑花岗岩中各种密集分布的脉岩群[2] [3] [6] [25]。从本次对岩石化学成分、微量元素、稀土元素研究结果对比可知,脉岩与玲珑花岗岩来源于不同的物质源区,稀土元素特征表明脉岩是由地壳深部较基性的岩石经重熔作用或基性岩浆分异作用形成的,其动力学基础是源于太平洋板块俯冲作用形成的富集岩石圈地幔,在构造复杂区域脉岩源区受到相应的影响,脉岩的形成是区域伸展作用结果的产物[14] [24]。

5.2. 脉岩与金矿关系

脉岩对金矿形成的作用已引起众多地质学者的重视,也有学者认为胶东金矿的形成与基性脉有关,尤其是煌斑岩与金矿的关系,代表了金质是幔源成因的观点[26]-[32]。毛景文等[33]认为金矿成矿作用与中基性岩墙在时间和空间上具有一致性,煌斑岩墙和中基性岩墙广泛出现于几乎各个金矿区,成岩时代 103~123 Ma 与金矿成矿时代几乎完全吻合,多阶段煌斑岩墙和长英质岩墙既反映了在成矿期间发生了强烈壳幔作用,又暗示出岩墙所占据的断裂可能是成矿时流体活动的通道。王建国等[8]认为金成矿作用的发生与脉岩有着时间上的相近性、空间上的相依性,以及近同源性特点;马芳[34]研究切割焦家金矿矿体的云斜煌岩的 K-Ar 年龄为 $93.5 \pm 1.4 \text{ Ma}$,限定了焦家金矿的成矿下限。山东省地质科学研究院在开展山东胶东金矿与深源脉岩关系研究时总结了三期基性脉岩的形成时限与金矿成矿的关系²,成矿前深源脉岩(拉辉煌斑岩、煌斑岩、云斜煌岩等)具有较明显的被矿脉穿插特征,其形成年龄 $142.4 \pm 1.0 \text{ Ma}$ ~ $188.6 \pm 1.0 \text{ Ma}$,代表了具幔源特征的深源脉岩。成矿期深源脉岩本身含金,与含金石英脉及蚀变岩等共生构成矿体,其成岩年龄 $112.23 \pm 0.65 \text{ Ma}$ ~ $126.50 \pm 0.54 \text{ Ma}$,这些深源脉岩均含有自然金,铅石晶形与幔源岩浆铅石晶形相同。而成矿后深源脉岩穿切金矿体,成岩年龄 $83.03 \pm 0.76 \text{ Ma}$ ~ $87.8 \pm 1.3 \text{ Ma}$,具有明确的限时性特征。

胶北地区脉岩岩石组合为超基性-基性-中性-酸性-碱性,脉岩的形成是在岩浆侵入热事件之后的一次强烈的伸展作用的结果,而金矿形成大都是在伸展构造环境中形成的[35] [36],这也解释了脉岩与

¹中南大学、桂林理工大学,招平断裂带招远-夏甸段金矿深部找矿预测报告,2014年。

²马晓东等,山东省地质科学研究院,山东胶东金矿与深源脉岩关系研究报告,2015年。

金矿形成之间具有一定的内在成因联系。但金矿的形成毕竟是在长期地质作用过程中的最终产物,它是地质作用的一个特殊组成部分,脉岩对金矿形成的贡献度也有待进一步研究。

6. 结论

1) 玲珑花岗岩中的脉岩是在岩体形成之后地壳在拉张环境下侵位中浅成脉岩,其岩性复杂,包含了基性、中性、酸性和碱性成份的各种脉岩,但以闪长玢岩、花岗斑岩为主体。

2) 采自招远南西部石门郭家-谢家庄一带的脉岩,其化学成分与区内同类型的石英二长闪长岩相比, SiO_2 含量稍微偏高,而其它成分含量均偏低;脉岩微量元素以亲硫元素和富亲石元素为特征,亲铜元素Ag、W、Pb、Zn明显偏高,As、Mo、Cu偏低;亲铁元素Co、Ni偏高;在大离子亲石元素中,Li、Be、Rb、Sr、Ba、V大多呈富集状态,而其它元素均呈亏损状态。稀土总量 ΣREE 平均为 168.50×10^{-6} , ΣLREE 平均 157.57×10^{-6} , ΣHREE 平均 10.93×10^{-6} , $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为15.79,轻重稀土间分馏较强,脉岩稀土曲线平缓右倾,轻、重稀土元素分馏程度均较低,从 δEu 值平均大于1.10说明区内脉岩是由地壳深部较基性的岩石经重熔作用或基性岩浆分异作用形成。

3) 根据区域玲珑花岗岩和脉岩资料综合分析,脉岩与玲珑花岗岩来源于不同的物质源区,脉岩是由地壳深部较基性的岩石经重熔作用或基性岩浆分异作用形成的,玲珑花岗岩是原地半原地交代型花岗岩,脉岩的形成是区域伸展作用结果的产物。

4) 胶东地区基性-中酸性脉岩形成的构造环境与金矿有着内在的成因联系,中基性脉岩中有一期与金矿形成关系密切。

致 谢

野外工作期间,得到了招金矿业股份有限公司地勘部汤磊、王杜涛和招金集团夏甸金矿的刘玉桥、李龙波、李寿磊在井下取样方面的帮助。地球科学前沿编辑部和审稿人提出了建设性修改建议,在此一并致以特别感谢。

基金项目

本文为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)、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)、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] 宋明春,王沛成.山东省区域地质[M].济南:山东省地图出版社,2003:157-216.
- [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] 李洪奎,耿科,嵇传源,等.胶东金矿构造环境与成矿作用[M].北京:地质出版社,2016:338-383.
- [4] 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.
- [5] 李洪奎,耿科,嵇传源,等.山东胶东碰撞造山型金矿形成的动力学背景[J].地球科学与环境,2010,32(z1):13-14.
- [6] 李洪奎,李逸凡,耿科,等.山东胶东碰撞造山型金矿成矿作用探讨[J].大地构造与成矿学,2011,35(4):533-542.
- [7] 张增奇,张成基,王世进,等.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,2014,30(3):1-21.
- [8] 王建国,李秀臣,刘洪臣.招平断裂带脉岩群对金成矿的约束[J].中国矿业,2008,17(12):64-70.

- [9] 梁亚运, 刘学飞, 李龚健, 等. 胶东地区脉岩成因与金成矿关系的研究: 年代学及 Sr-Nd-Pb 同位素的约束[J]. 地质科技情报, 2014, 33(3): 10-24.
- [10] 马晓东, 孙斌, 宋英昕, 等. 胶东埠上金矿区煌斑岩与金矿的关系[J]. 地质与资源, 2016, 25(4): 327-335.
- [11] 杨香月, 杨君敏, 张殿龙. 金岭金矿带脉岩特征及控矿作用[J]. 沈阳黄金学院学报, 1996, 15(4): 317-322.
- [12] 杨晋升, 阎书杰, 张殿龙, 等. 山东埠上金矿床花岗岩脉岩与金成矿关系研究[J]. 黄金科学技术, 2011, 4: 52-55.
- [13] 罗照华, 魏阳, 辛后田, 等. 造山后脉岩组合的岩石成因: 对岩石圈拆沉作用的约束[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 425-435.
- [14] 李洪奎, 李大鹏, 耿科, 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.
- [15] 李洪奎, 耿科, 嵇传源, 等. 山东胶东金矿四位一体成矿地质背景初探[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(2): 266-275.
- [16] 李洪奎, 耿科, 嵇传源, 等. 山东胶东碰撞造山型金矿形成的动力学背景[J]. 地球科学与环境, 2010, 32(z1): 13-14.
- [17] Rollinson, H.R. (1993) Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific and Technical, New York, 1-352.
- [18] 王中刚, 赵振华, 邹天人, 等. 新疆北部花岗岩类的成因类型及其成矿作用. 见: 新疆北部固体地球化学新进展[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 127-136.
- [19] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 85-127.
- [20] 孙雨沁, 马晓东, 牛志力, 等. 玲珑金矿西山脉岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 山东国土资源, 2016, 32(3): 10-16.
- [21] 龙群. 胶东地区中生代中基性岩墙地球化学研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 25-67.
- [22] 孙景贵, 胡受奚, 凌洪飞. 胶东金矿区高钾 - 钾质脉岩地球化学与俯冲 - 壳幔作用研究[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 401-412.
- [23] Halls, H.C. (1982) The Importance and Potential of Mafic Dyke Swarms in Studies of Geodynamic Processes. *Geoscience Canada*, 9, 145-154.
- [24] 毛景文, 李厚民, 王义天, 等. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧碳硫同位素证据[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 839-857.
- [25] 谭俊, 魏俊浩, 郭玲利, 等. 胶东郭城地区脉岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及斑晶 EPMA 研究: 对岩石圈演化的启示[J]. 地球科学, 2008, 38(8): 913-929.
- [26] 赫英. 地幔深部过程与金富集成矿研究取得重要进展[J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 136-136.
- [27] 赫英, 董振信, 岳可芬, 等. 中国东部地幔岩包体中的金含量及其成矿学意义[J]. 地质论评, 2004, 50(4): 418-425.
- [28] 胡文宣, 孙睿, 张文兰, 等. 金矿成矿流体特点深 - 浅部流体相互作用成矿机制[J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 281-288.
- [29] 邓军, 杨立强, 方云, 等. 胶东地区壳 - 幔作用与金成矿效应[J]. 地质科学, 2000, 35(1): 60-70.
- [30] 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等. 山东幔源岩浆岩的碳 - 氧和铍 - 铷同位素地球化学研究[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(10): 921-930.
- [31] 刘辅臣, 卢作祥, 范永香, 等. 玲珑金矿中基性岩脉与矿化的关系探讨[J]. 地球科学, 1984, 27(4): 37-46.
- [32] 翟建平, 胡凯, 陆建军. 乳山金矿煌斑岩及流体和氢、氧、铍同位素研究[J]. 矿床地质, 1996, 15(4): 358-364.
- [33] 毛景文, 赫英, 丁悌平. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据[J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 121-128.
- [34] 马芳, 孙丰月, 霍亮, 等. 山东焦家金矿煌斑岩特征及其与金矿化关系[J]. 世界地质, 2014, 33(2): 388-398.
- [35] 李洪奎, 李逸凡, 梁太涛, 等. 山东胶东金矿的概念及其特征[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(1): 1-8.
- [36] 李洪奎, 时文革, 李逸凡, 等. 山东胶东地区金矿成矿时代研究[J]. 黄金科学技术, 2013, 21(3): 1-9.