

锡铁山块状硫化物铅锌矿床成矿构造环境及矿区南部找矿潜力:来自滩间山群火山岩岩石化学、地球化学证据^{*}

孙华山¹ 赵立军² 吴冠斌³ 宁钧陶⁴ 陈巧妹¹ 姜楚灵¹

SUN HuaShan¹, ZHAO LiJun², WU GuanBin³, NING JunTao⁴, CHEN QiaoMei¹ and JIANG ChuLing¹

1. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074

2. 中国地质大学图书馆, 武汉 430074

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

4. 湖南省地质矿产勘查开发局 402 队, 长沙 410004

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Library, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4. 402 Geological Team of Geology and Mineral Resources Development Bureau, Hunan Province, Changsha 410004, China

2011-08-11 收稿, 2011-10-27 改回.

Sun HS, Zhao LJ, Wu GB, Ning JT, Chen QM and Jiang CL. 2012. Metallogenic tectonic setting and ore-finding potential of Xitieshan massive sulfide lead-zinc deposit: Evidence from lithochemistry and geochemistry of ore-hosted volcanic strata, Tanjianshan Group. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2):652–664

Abstract Recent research of submarine massive sulfide deposit (MSD) showed that the MSD generation was closely related to some processes of tectonic structure and volcanism, which occurred in a special period of tectonic evolution and generally ore-forming time-span within several million years. The Xitieshan deposit, located in the northern margin of the Qaidam basin, Qinghai Province, is the largest MSD in the northwest of China. Based on systematic petrochemical and geochemical research of ore-hosting volcanic rocks, named the Tanjianshan Group, it can be stated that, (1) petrochemistry and geochemistry of volcanic rocks of the Tanjianshan Group indicate that the magmas were originated from an identical source, evolving from acidic to mafic and thus generating various volcanic rocks with a transitional petrochemical and geochemical trend. (2) Attributes of REE and trace elements, and tectonic discrimination diagrams collectively display that the tectonic settings for generating the Tanjianshan Group volcanic had been evolved continuously from continental magmatic arc, through transitional arc, to oceanic basin. (3) The magma evolution and Rb-Sr isotope systematics imply that the tectonic setting of the Xitieshan MSD might be a continental back-arc basin similar to Okinawa trough in the southwest Pacific. (4) As to the mineral prediction, it is concluded that, the volcanic-sedimentary successions within the bimodal volcanic sequence formed during the early back-arc extension, are believed to be the important target in the Xitieshan orefield and its vicinities, but the upper stratigraphic successions of the Tanjianshan Group are not favorable in finding MSD mineralization.

Key words Metallogenic tectonic setting; Ore-finding significance; Massive sulfide deposit; Xitieshan

摘 要 近年来海底块状硫化物矿床的深入研究表明,块状硫化物矿床形成与其成矿构造环境演化期间特定阶段的构造-火山作用有关,矿床持续形成时间一般不超过几个百万年。锡铁山矿床是我国西北地区最大的海底热液块状硫化物铅锌矿床,本文通过锡铁山矿床赋矿岩系火山岩岩石化学及地球化学特征的系统研究,对锡铁山矿床赋矿火山岩系岩浆演化过程及成矿构造环境得出如下几点认识:(1)锡铁山矿区赋矿滩间山群火山岩岩石化学及地球化学特征一致表明滩间山群岩浆活动具有自酸性向基性同源岩浆演化的特点。矿区滩间山群不同岩组/段的火山岩代表了同源岩浆不同演化阶段的产物。自

^{*} 本文受国家自然科学基金项目(41172087)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(CUG090102)联合资助。

第一作者简介:孙华山,男,1969年生,博士,副教授,主要从事成矿理论及成矿预测教学与科研工作,E-mail:sunhsh@cug.edu.cn

$O_{1-2}tna-1$ 岩段、 $O_{1-2}tnb$ 岩组→ $O_{1-2}tnd-1$ 岩段→ $O_{1-2}tnd-3$ 岩段,矿区火山岩岩石化学及稀土与微量元素地球化学具有明显的渐变过渡关系。(2) 矿区滩间山群火山岩稀土、微量元素组成特征及成岩构造环境判别图解一致揭示,从 $O_{1-2}tna-1$ 岩段、 $O_{1-2}tnb$ 岩组→ $O_{1-2}tnd-1$ 岩段→ $O_{1-2}tnd-3$ 岩段,滩间山群火山岩成岩构造环境经历了从陆缘基底岛弧→洋陆过渡型地壳→典型大洋地壳的连续过渡变化。(3) 矿区滩间山群火山岩岩浆演化过程及 Rb、Sr 组分变化趋势与大陆边缘弧后盆地火山岩岩浆演化过程相近,与现代西太平洋冲绳海槽形成过程相似。(4) 综上推断,矿区深部及外围找矿工作的重点对象是弧后盆地拉张早期形成的具有双峰式火山岩组合的下部火山-沉积组合,而矿区南部 $O_{1-2}tnd$ 岩组找寻同类矿床的可能性不大。

关键词 成矿构造环境;找矿指示;块状硫化物矿床;锡铁山

中图法分类号 P588.14; P618.42; P618.43

块状硫化物矿床具有巨大的经济价值。自二十世纪七十年代以来,人们开始注意到海底块状硫化物矿床的产出和分布与成矿构造环境之间具有十分密切的关系(Sawkins, 1972, 1976; Hutchinson, 1980)。进入二十一世纪后,随着全球海底块状硫化物矿床研究的不断深入,人们开始注意到,尽管海底块状硫化物的形成与成矿构造环境之间具有十分密切的联系,但是,就某一具体成矿构造环境而言,并不是整个成矿构造环境演化过程中都有块状硫化物矿床的形成,相反,矿床的形成仅与成矿构造环境演化过程中某些特定阶段的构造-岩浆作用事件有关。几乎所有块状硫化物矿床成矿作用持续的时间一般不超过几个百万年,大多只有 1~2 个百万年(Large *et al.*, 2008)。如,产于弧后盆地的块状硫化物矿床其演化过程可以概括为如下三阶段模式(Allen *et al.*, 2002):第一阶段(地壳异常伸展阶段,时间: X Ma):地幔上

涌,地壳伸展减薄、下沉,地堑系统形成,安山质岛弧火山作用逐渐减弱,陆源沉积作用逐渐增强,弧后盆地充填。第二阶段(块状硫化物矿床形成阶段,时间: X Ma + (1~2) Ma):地壳持续伸展、下沉,裂谷双峰式火山岩出现,裂谷峰期大量长英质火山岩沿裂谷断裂高位上侵,海底含矿热液对流系统形成,块状硫化物矿床形成。第三阶段(挤压反转阶段,时间: X Ma + (1~2) Ma + X Ma):地壳挤压,安山质岛弧火山作用再次增强,火山-沉积碎屑盆地充填,上覆于赋矿裂谷火山岩系之上,褶皱抬升。由此可见,产于弧后盆地的块状硫化物矿床成矿作用仅与弧后伸展裂谷火山作用阶段有关,并且持续的时间有限,而与整个弧后盆地演化的其它大部分时间阶段无关。由此表明,古弧后盆地海底块状硫化物矿床找寻的关键是在受到强烈改造的岛弧火山岩系中厘清火山作用的演化过程,明确演化阶段,查明成矿作用与成矿构造环

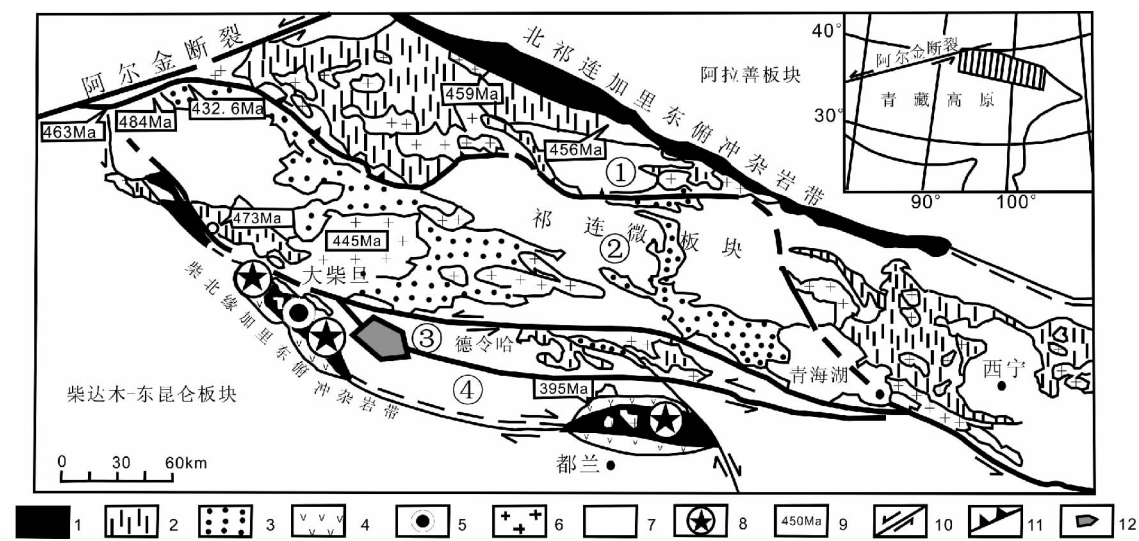


图1 祁连山中南部和柴北缘地区构造图(据许志琴等,2003 修编)

1-俯冲碰撞杂岩带; 2-元古宙变质岩; 3-下古生代浅变质岩; 4-晚寒武世-早奥陶世岛弧火山岩; 5-后加里东盖层; 6-花岗岩; 7-石榴子橄榄岩; 8-榴辉岩; 9-同位素年龄; 10-平移断层; 11-逆冲断层; 12-研究区范围; ①-中祁连变质基底; ②-南祁连加里东褶皱构造带; ③-欧龙布鲁克地块; ④-全吉地块

Fig.1 Tectonic map of the south-central of the Qilian Mountains and the north Qaidam area (modified after Xu *et al.*, 2003)

1-subduction-collision complex zone; 2-Proterozoic metamorphic rocks; 3-Lower Paleozoic low-grade metamorphic rocks; 4-Late Cambrian-Early Ordovician island arc volcanic rocks; 5-post-Caledonian covers; 6-granite; 7-garnet peridotite; 8-eclogite; 9-isotopic age; 10-strike-slip fault; 11-thrust; 12-research area; ①-central Qilian metamorphic basement; ②-south Qilian Caledonian folding belt; ③-Oulongbuluke massif; ④-Quanji massif

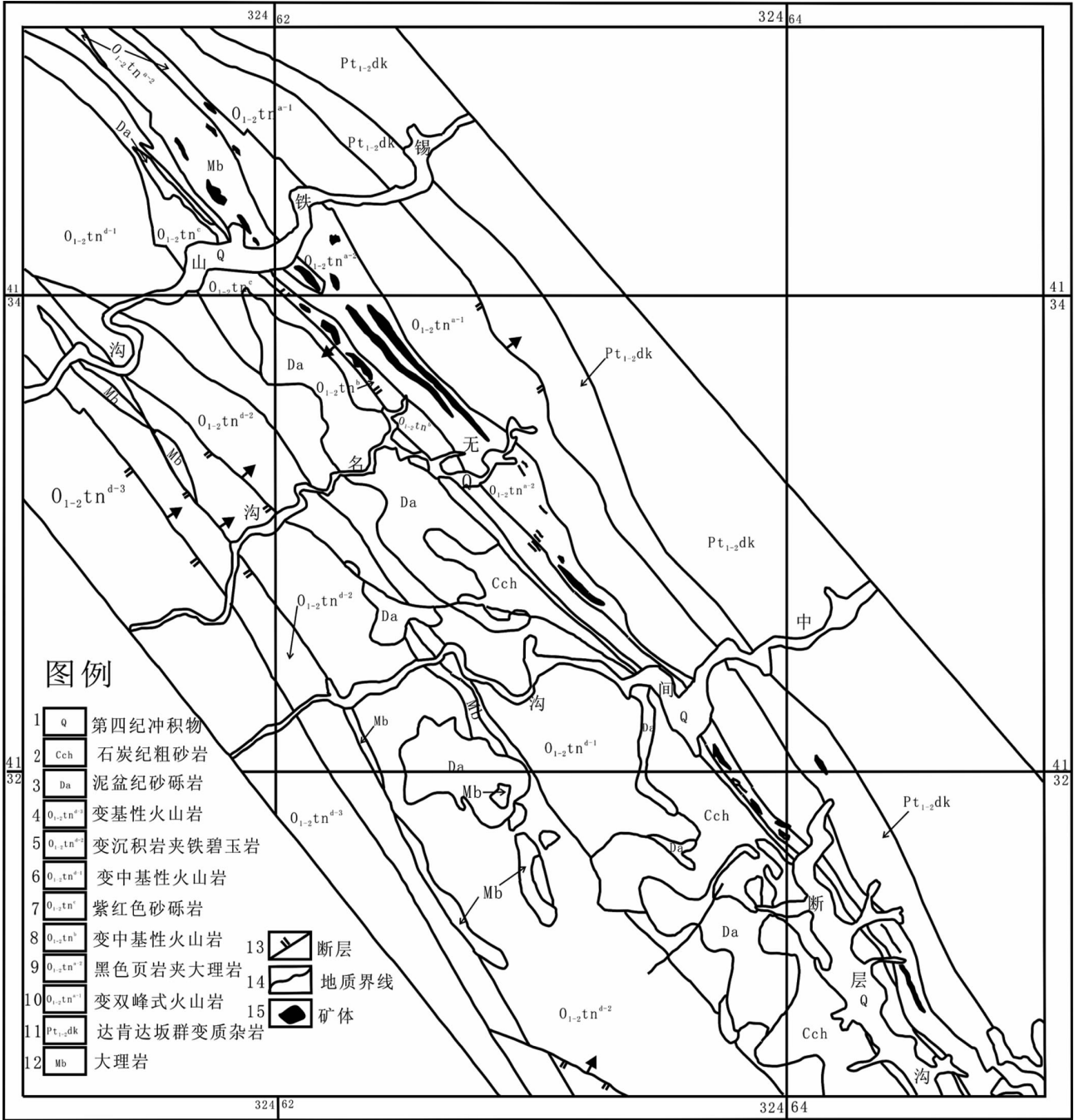


图2 锡铁山矿区地质图(据刘亮明和赵义来,2006^①修改)
Fig. 2 The geological map of Xitianshan mine area

境演化的关系,指导找矿。

锡铁山铅锌矿床位于柴达木盆地北缘,是我国西北地区大型铅锌矿床之一。近年来,该矿床成矿研究不断深入,取得了一些新的研究成果。如,大规模喷流管道系统的发现(祝新友等,2007a),海底热液与海水混合成矿机制认识(祝新友等,2007b),海底不同喷流系统成矿热液特征(王莉娟

等,2008),矿床类型既非以往认为的 VHMS 型块状硫化物矿床(郭介人等,1987)也非目前认为的 SEDEX 型块状硫化物矿床(邓吉牛,1998^②;张德全等,2005),而是属于二者之间的一种过渡类型,称为 VSHMS 型块状硫化物矿床(冯志兴等,2010)。但是,从当前全球块状硫化物矿床成矿研究发展趋势来看,目前锡铁山矿床成矿研究存在一个明显的不足:

① 刘亮明,赵义来. 2006. 锡铁山矿区中间沟西南段找矿预测与评价西部矿业公司科研报告. 1-68
② 邓吉牛. 1998. 青海锡铁山铅锌矿床及外围成矿规律与找矿潜力分析. 锡铁山矿务局科研报告. 1-91

即缺乏深入的块状硫化物矿床成矿构造环境及其演化的研究。而由上可知,查明成矿作用与成矿构造环境演化的关系是古代海底块状硫化物矿床找矿的关键。也正是因为这方面研究的不足,导致了锡铁山矿区南部滩间山群 d 岩组找矿潜力长期争议、悬而未决的局面。本文力图通过赋矿滩间山群火山岩岩石化学、地球化学及成矿构造环境的系统研究,对该矿床成矿构造环境演化过程及找矿方向进行探讨。

1 矿区地质概况

锡铁山铅锌矿床位于柴达木盆地北缘(简称柴北缘)中段,柴达木盆地北缘是全吉地块与柴达木地块早古生代结合带,一级构造单元隶属秦祁昆造山系,包括柴北缘蛇绿混杂岩带和滩间山火山弧两个三级构造单元(图 1,许志琴等,2003;潘桂棠等,2009)。矿区出露地层包括(图 2):古-中元古代达肯达坂群(Pt_{1-2dk})、早古生代滩间山群($O_{1-2}tn$)、晚古生代泥盆纪阿姆尼克组(Da)和石炭纪城墙沟组(Cch)。达肯达坂群(Pt_{1-2dk})为本区的结晶基底,岩性主要为白云母石英片岩、片麻岩,含超高压变质岩捕虏体(张建新等,2000)。达肯达坂群之上为滩间山群($O_{1-2}tn$),二者之间为隐蔽断层接触(汪劲草,2000)。矿床赋存在滩间山群内部。矿区滩间山群由上、下两个火山-沉积旋回构成,其中,下部火山-沉积

旋回自下至上被划分为 a、b、c 三个岩组,a 岩组又进一步划分为 $O_{1-2}tn\ a-1$ 和 $O_{1-2}tn\ a-2$ 两个岩段。 $O_{1-2}tn\ a-1$ 岩段岩性为双峰式火山岩(下部为流纹质和英安质火山岩,上部为基性火山岩,现已变质成斜长角闪岩); $O_{1-2}tn\ a-2$ 岩段为变沉积岩,是该矿区的主含矿层。 $O_{1-2}tn\ a-1$ 岩段变质英安岩中单颗粒锆石的 U-Pb 年龄为 $486 \pm 13Ma$ (赵风清等,2003),表明锡铁山矿区滩间山群形成于早奥陶世; $O_{1-2}tn\ b$ 岩组岩性由变质的中-基性火山岩(已变质为斜长绢云绿泥片岩等)及沉积岩夹层组成。该岩组的火山岩中偶见含 Cu(黄铜矿)的铅锌矿化,是矿区的一个次要含矿层; $O_{1-2}tn\ c$ 岩组由紫红色变砂岩夹含砾杂砂岩构成,夹少量砾岩。最近,樊俊昌和李峰(2006)根据 $O_{1-2}tn\ c$ 岩组中含有滩间山群绿片岩相砾石成分及其粒序充填具有下细上粗的特点,认为 $O_{1-2}tn\ c$ 岩组应晚于滩间山群形成,推断其为早志留世造山期后前陆盆地沉积产物。上部火山-沉积旋回统称为 $O_{1-2}tn\ d$ 岩组,自下至上进一步划分为 $O_{1-2}tn\ d-1$ 、 $O_{1-2}tn\ d-2$ 、 $O_{1-2}tn\ d-3$ 和 $O_{1-2}tn\ d-4$ 四个岩段。除 $O_{1-2}tn\ d-2$ 岩段为变沉积岩外,其它三个岩段均为中-基性火山岩。其中, $O_{1-2}tn\ d-1$ 岩段岩性主要由变基性火山碎屑、变基性火山熔岩和含赤铁矿重晶石岩组成; $O_{1-2}tn\ d-3$ 岩段岩石类型主要有变余辉长岩、方解石绿泥石片岩和石英阳起石钠长石片岩; $O_{1-2}tn\ d-4$ 岩段岩性特征与 $O_{1-2}tn\ d-3$ 相似,但局部发育海底火山熔岩的枕状构造。滩间山群之

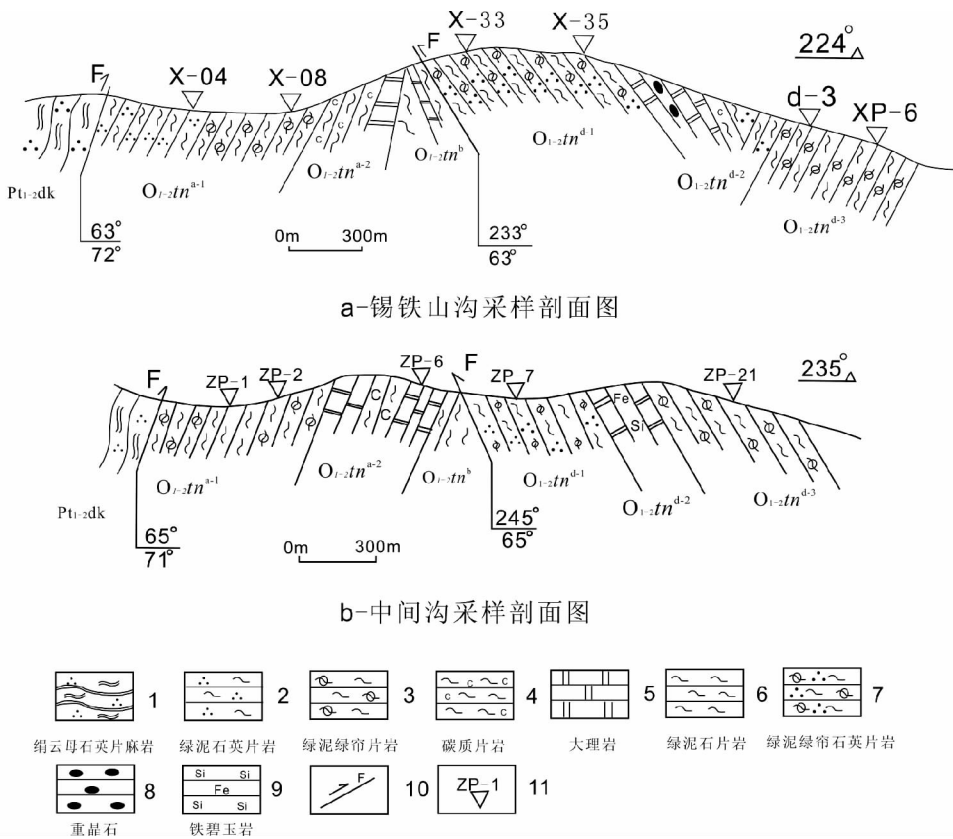


图 3 采样剖面图

Fig. 3 Distribution of samples collected from Xitieshangou and Zhongjiangou

上为泥盆纪阿姆尼克组(Da),二者之间为角度不整合接触。阿姆尼克组主要为一套紫红色砾岩。该组之上为石炭纪城墙沟组(Cch),岩性为黄褐色粗粒长石石英砂岩,二者之间为角度不整合接触。

2 样品采集及测试分析

在系统收集前人可用数据的基础上,本次研究工作进一步补充采集了14件火山岩样品进行主量元素、微量元素和稀土元素分析。样品采集的过程中始终坚持采取新鲜、风化作用改造较弱、岩性层位稳定的原则。其中,D-1样品采自断层沟b岩性组,ZK4407-19-6、ZK4407-19-2分别采自07号勘探线19号钻孔O₁₋₂tn^b和O₁₋₂tn^{d-1}岩性段,其余样品采集地点见锡铁山沟和中间沟采样剖面图(图3)。所有测试样品首先在室内进行了岩矿鉴定工作,其中,ZP-6号样品因含有较多碳酸盐而未参与分析。样品首先用玛瑙研钵碎至200目以下,元素分析测试工作均在中国地质大学地质过程与矿产资源评价国家重点实验室完成。主量元素测试方法采用日立180-70原子吸收光谱仪和紫外线可见分光光度计完成,微量稀土元素的分析仪器为Agilent7500a型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)。ICP-MS分析用岩石样品溶解过程流程如下:1)称取粉末样品50±1mg置于Teflon坩埚中;2)用1~2滴高纯水润湿样品,并依次加入1mL HNO₃和1mL HF;3)将Teflon坩埚放入钢套,拧紧后于烘箱中190℃加热48h;4)冷却后开盖置于电热板上(115℃)蒸干,加入1mL HNO₃并再次蒸干(保证Teflon坩埚壁无液体);5)加入3mL 30% HNO₃,再次置Teflon坩埚入钢套,拧紧后在烘箱中190℃加热12h;6)溶液转入聚乙烯塑料瓶中,用2% HNO₃稀释至约100g左右,待测(为了避免Nb、Ta在稀硝酸介质中不稳定问题,微量元素ICP-MS分析工作均在样品定容后12h内完成)。主量、微量数据分析结果见表1、表2。

3 火山岩岩石化学特征

在火山岩TAS分类图解上(图4),滩间山群火山岩总体上集中分布在两个区域内,两分性较明显。其中,O₁₋₂tn^{a-1}和O₁₋₂tn^b两个岩组/段样品主要落在英安岩与流纹岩过渡区(O₃-R),只有O₁₋₂tn^{a-1}岩段有个别样品落在玄武岩或粗面质玄武岩区域(B-S);O₁₋₂tnd-1和O₁₋₂tnd-3岩段样品全部落在玄武岩、粗面质玄武岩和玄武质粗面安山岩区域(B-S)。

在SiO₂-(Na₂O+K₂O)硅碱火山岩系列划分图解上,O₁₋₂tna-1和O₁₋₂tnb两个岩组/段样品主要落在钙碱性火山岩系列,与TAS图解显示的情况相同,O₁₋₂tna-1岩段有个别样品落在碱性火山岩系列区域,显示出双峰式火山岩的特征;O₁₋₂tnd-1和O₁₋₂tnd-3岩段样品全部落在碱性系列和碱性系列与钙碱性系列过渡区。

在FeO[#]/MgO-SiO₂图解上(图5),两元分化现象十分明

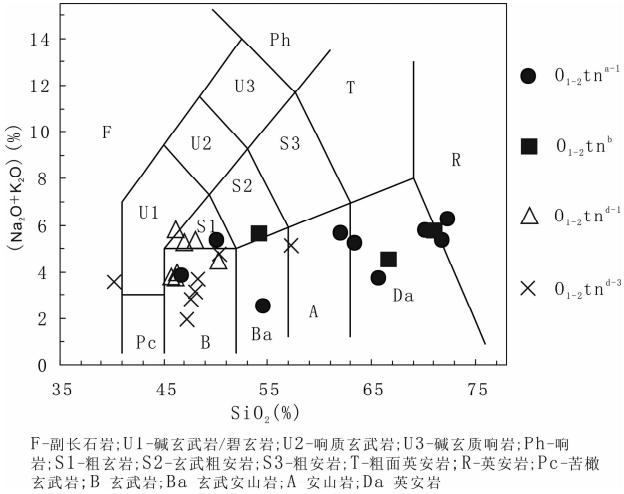


图4 火山岩TAS分类图解(底图据Le Bas *et al.*, 1986)
Fig.4 TAS diagram of volcanic rocks (after Le Bas *et al.*, 1986)

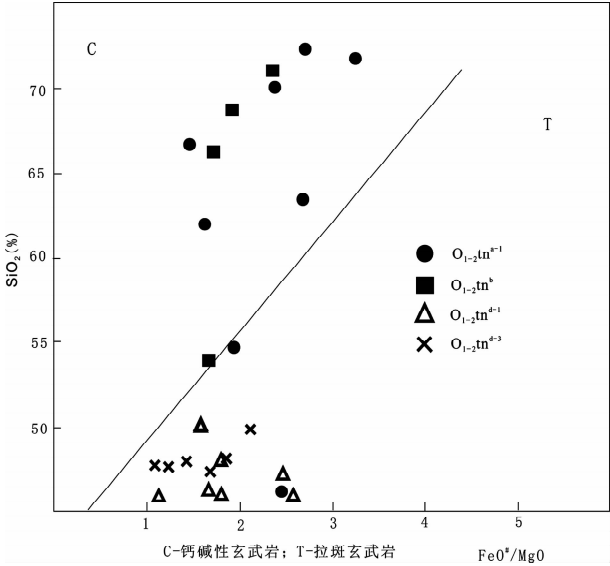


图5 FeO[#]/MgO-SiO₂火山岩系列分类图解(底图据Miyashiro, 1974)
图例与图4相同
Fig.5 FeO[#]/MgO-SiO₂ diagram of volcanic rocks (after Miyashiro, 1974)
Symbols in Fig.5 is the same as in Fig.4

显,其中,O₁₋₂tna-1和O₁₋₂tnb两个岩组/段主要落在钙碱性火山岩区域,而O₁₋₂tnd-1和O₁₋₂tnd-3岩段样品全部落在拉斑玄武岩区域,此外,O₁₋₂tna-1岩段中同样有个别样品落在了与O₁₋₂tnd岩性组相同的区内,进一步表明O₁₋₂tna-1岩段双峰式火山岩特征。O₁₋₂tna-1和O₁₋₂tnb两个岩组/段总体上具有分异指数(DI)高(一般大于60%),固结指数(SI)低,铝碱指数(A/CNK)高(一般大于1.0)的特点;相反,O₁₋₂tnd-1和

表 1 锡铁山矿区淮间山群火山岩主量元素组成 (wt%)

Table 1 The compositions of major elements of Tanjianshan Group (wt%)

样品号	岩组	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	烧失量	分异质数 (DI)	固结指数 (SI)	铝碱指数 (A/CNK)	岩石系列	资料来源
ZP-1	O ₁₋₂ tna-1	65.6	13.30	1.77	3.51	3.27	3.16	2.3	1.5	0.53	0.11	0.09	4.00	64.57	26.61	1.201	钙碱性	本文
X-04		46.6	16.86	4.24	7.18	4.60	2.00	3.2	0.7	0.70	0.36	0.16	4.6	48.6	23.14	1.754	碱性	本文
ZP-2		54.5	14.96	2.82	3.73	3.20	10.02	1.8	0.8	0.41	0.12	0.10	7.26	39.45	26.13	0.681	拉斑玄武	本文
X-08		61.9	21.15	1.51	1.38	1.68	3.45	4.9	0.8	0.44	0.11	0.05	2.62	68.21	16.42	1.392	钙碱性	本文
79(3)		72.3	14.59	1.19	1.51	0.95	1.9	5.5	0.8	0.21	0.05	0.03	1.10	83.33	9.59	1.103	钙碱性	①
3		50.0	14.28	4.70	7.69	5.56	6.80	0.38	5.0	2.32	0.41	0.28	2.60	39.38	23.85	0.777	碱性	本文
107		71.8	13.14	1.36	2.37	1.09	2.4	3.8	1.6	0.27	0.06	0.06	2.20	78.75	10.73	1.07	钙碱性	本文
XT-2		70.2	13.36	1.00	1.3	0.92	2.92	3.9	1.9	0.21	0.07	0.05	4.19	79.88	10.21	0.97	钙碱性	②
D-1		66.5	15.79	1.27	2.96	2.29	1.66	2.5	2.1	0.56	0.13	0.04	3.92	72.27	20.67	1.387	钙碱性	本文
Zk4407-19-6	O ₁₋₃ tnb	54.1	20.10	2.62	5.76	4.35	0.25	0.1	5.6	0.83	0.18	0.14	5.00	59.75	23.63	3.013	拉斑玄武	本文
GS-29	O ₁₋₂ tnd-1	71.0	13.36	1.00	1.3	0.92	2.9	4	1.9	0.21	0.07	0.1	3.4	80.0	10.2	0.971	钙碱性	①
X-33		45.7	16.00	4.02	6.14	5.65	8.71	3.1	0.8	1.77	0.33	0.16	6.86	32.84	28.87	0.738	碱性	本文
X-35		46.1	15.95	1.81	7.85	7.33	6.77	3.5	0.2	1.59	0.24	0.14	7.19	33.80	35.39	0.871	碱性	本文
ZP-7		46.1	16.89	4.37	5.78	3.69	8.13	4.9	0.9	1.75	0.33	0.12	5.80	54.41	18.87	0.710	碱性	本文
Zk4407-19-2		50.3	16.17	1.02	6.1	4.25	5.32	2.1	2.3	1.24	0.21	0.19	9.5	44.5	26.8	1.028	亚碱性	本文
GS-42		46.9	14.63	5.36	6.71	4.83	6.14	4.8	0.4	1.85	0.34	0.17	7.60	46.87	21.90	0.749	碱性	①
GS-26		46.2	13.60	5.33	6.84	6.50	6.09	3.7	0.3	2.14	0.04	0.20	7.78	36.36	28.82	0.778	碱性	本文
GS-27		48.1	16.43	2.30	7.33	4.99	5.98	4.6	0.7	1.85	0.35	0.14	6.16	46.66	25.00	0.854	碱性	本文
d-3		48.3	14.35	3.69	8.33	6.31	9.95	3.42	0.2	1.06	0.09	0.19	2.58	31.60	28.71	0.599	拉斑玄武	本文
ZP-21		47.2	11.34	1.42	8.1	5.28	10.47	1.9	0.0	0.86	0.08	0.17	11.62	26.33	31.51	0.510	拉斑玄武	本文
XP-6	O ₁₋₂ tnd-3	40.2	18.34	5.22	2.96	3.06	16.51	3.2	0.4	0.85	0.14	0.15	8.4	18.49	21.08	0.515	碱性	本文
GS-06		50.3	18.09	2.90	5.84	3.94	8.58	4.5	0.3	0.52	0.18	0.26	4.4	41.56	22.59	0.777	碱性	①
GS-38		48.0	15.49	3.33	7.72	7.64	9.70	2.8	0.3	0.92	0.09	0.17	3.02	26.77	35.01	0.685	拉斑玄武	本文
GS-13		47.6	15.24	3.26	6.66	8.06	11.42	2.5	0.3	0.71	0.20	0.19	3.2	24.00	38.73	0.604	拉斑玄武	本文
GS-15		57.2	14.92	2	5.13	3.8	7.3	5	0.2	0.91	0.45	0.13	2.6	52.65	23.57	0.695	钙碱性	本文

注：数据来源：①青海省地质局. 1988. 1/5 万区域地质调查报告（锡铁山幅、全集河幅）. 1—138；②李峰，吴志亮. 2006. 柴北缘古生代裂谷演化与控矿及锡铁山矿区 1/万地质图修测. 西部矿业公司科研报告. 1—75

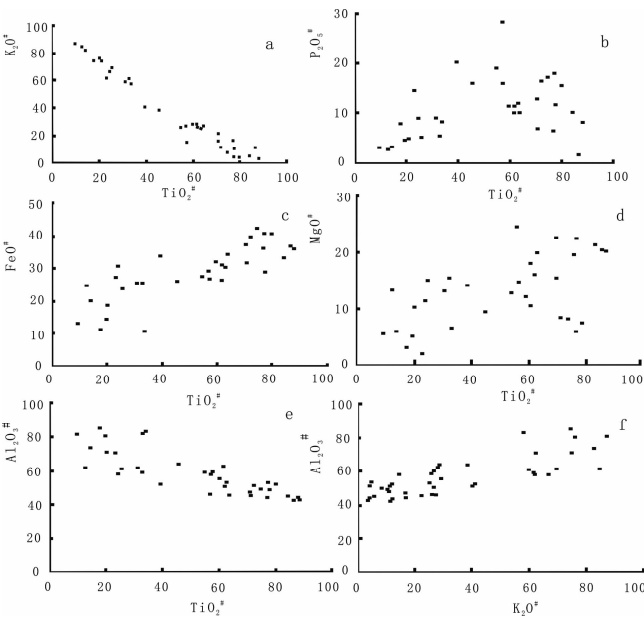


图6 主量元素岩石化学参数图解

Fig.6 Diagrams of lithochemical parameter of major elements

O₁₋₂tnd-3 岩段总体具有分异指数(DI)低(一般大于 50%), 固结指数(SI)高, 铝碱指数(A/CNK)低(一般小于 1.0)的特点, 见表 1。

此外, 根据酸性岩相对富集 Si、K、Al 成分, 基性岩相对富集 Ti、Fe、Mg、P 组分的一般规律, 分别计算出各岩组/段上述组分的岩石化学参数, 见表 3, 并做出这些组分对的散点图, 见图 6。由图表可见, 在 TiO₂[#]-K₂O[#]、Al₂O₃[#]-TiO₂[#] 和 Al₂O₃[#]-K₂O[#]散点图上, 上述各组分表现出很好的线性相关行为, 即随着 TiO₂[#] 的升高, K₂O[#] 和 Al₂O₃[#] 按照一定的反比例关系降低, 或者随着 K₂O[#] 的升高, Al₂O₃[#] 按照一定的正比例关系升高。值得指出的是, 在成分连续过渡的中间, 均出现一个成分间断区域, 据此间断, 可将矿区滩间山群火山岩划分为化学成分相对独立的两部分。其中, 一部分与 O₁₋₂tna-1 和 O₁₋₂tnb 两个岩组/段相对应, 具有低 TiO₂[#]、高 K₂O[#]、高 Al₂O₃[#] 的特征; 另一部分与 O₁₋₂tnd-1 和 O₁₋₂tnd-3 岩段对应, 具有高 TiO₂[#]、低 K₂O[#]、低 Al₂O₃[#] 的特征(见表 3, 图 6a-c)。此外, 在 TiO₂[#]-P₂O₅[#]、TiO₂[#]-FeO[#] 和 TiO₂[#]-MgO[#]散点图上, 虽然上述组分对之间不向 TiO₂[#]-K₂O[#]、Al₂O₃[#]-TiO₂[#] 和 Al₂O₃[#]-K₂O[#]之间具有

表 2 锡铁山地区火山岩微量元素组成(×10⁻⁶)

Table 2 The composition of minor elements of Xitieshan Group (×10⁻⁶)

样品号	ZP-1	X-04	ZP-2	X-08	D-1	ZK4407-19-6	X-33	X-35	ZP-7	ZK4407-19-2	d-3	d-3	ZP-21	XP-6
岩性组	O ₁₋₂ tna-1				O ₁₋₂ tnb		O ₁₋₂ tnd-1				O ₁₋₂ tnd-3			
Be	1.42	1.35	0.56	0.77	1.39	2.60	0.94	0.76	0.90	1.62	0.36	0.38	0.15	0.46
Sc	15.6	22.0	22.9	12.8	14.7	17.7	32.2	27.0	25.8	24.0	38.1	40.1	35.1	21.5
V	98.7	259	164	79.9	119	139	257	206	262	203	308	319	219	193
Cr	186	87.1	36.1	11.3	54.0	101	151	58.9	49.0	92.2	96.1	100	76.5	249
Co	18.2	32.7	17.8	8.94	10.4	18.9	34.2	36.2	28.5	25.2	41.6	44.2	35.9	26.2
Ni	58.8	34.0	11.3	7.55	33.0	44.9	71.0	33.7	23.8	41.2	62.2	65.0	53.3	57.9
Cu	25.9	122	28.0	50.2	3.88	4.88	37.6	31.3	16.8	312	179	182	87.8	12.9
Zn	57.6	72.2	73.2	26.9	14.9	451	78.4	159	72.5	87.7	94.4	97.3	74.9	44.7
Ga	14.0	17.4	13.0	18.9	20.3	22.3	18.1	16.6	21.0	19.4	16.9	17.6	12.8	21.4
Rb	57.3	20.1	35.4	19.4	64.4	216	23.8	2.72	11.9	76.9	5.12	5.09	0.82	6.20
Sr	133	851	272	219	80.4	26.4	197	167	247	106	155	157	58.1	612
Y	23.4	23.5	17.5	33.4	17.3	32.0	34.8	25.9	26.1	37.7	24.8	25.4	15.2	19.3
Zr	158	116	74.8	105	176	176	151	128	129	212	58.4	58.6	43.8	57.7
Nb	8.17	5.39	8.50	6.39	11.9	14.6	14.9	14.3	14.0	12.6	3.10	3.14	2.32	5.85
Sn	1.99	1.58	1.01	1.53	3.77	19.0	1.68	1.24	1.51	2.55	0.62	0.59	0.45	0.79
Cs	3.89	1.25	7.76	0.57	1.47	10.4	0.83	0.24	0.61	5.21	0.37	0.37	0.098	0.26
Ba	260	262	298	425	402	602	102	54.0	201	607	57.6	55.6	15.3	59.4
La	28.4	43.5	26.0	38.7	131	41.7	17.6	12.7	18.8	38.6	4.44	4.43	3.90	10.3
Ce	49.1	85.5	42.9	43.4	258	81.3	36.9	27.9	37.0	75.6	9.28	9.33	5.91	16.7
Pr	5.86	10.6	5.03	5.18	29.9	9.23	4.94	3.90	4.96	9.02	1.51	1.49	0.92	2.54
Nd	21.0	40.2	18.2	19.8	103	34.0	20.9	17.3	20.8	34.2	7.52	7.48	4.48	11.1
Sm	4.33	7.77	3.32	4.04	15.4	6.85	5.51	4.50	5.17	7.39	2.58	2.51	1.51	3.00

续表 2

Continued Table 2

样品号	ZP-1	X-04	ZP-2	X-08	D-1	ZK4407-19-6	X-33	X-35	ZP-7	ZK4407-19-2	d-3	d-3	ZP-21	XP-6
岩性组	O ₁₋₂ tna-1				O ₁₋₂ tnb		O ₁₋₂ tnd-1				O ₁₋₂ tnd-3			
Eu	0.91	1.89	0.83	0.90	1.64	1.46	1.81	1.41	1.79	1.89	0.97	0.97	0.42	1.19
Gd	3.80	5.92	2.82	3.74	8.19	5.83	5.80	4.65	4.88	6.85	3.27	3.19	1.87	3.26
Tb	0.60	0.80	0.43	0.56	0.86	0.89	0.94	0.74	0.79	1.03	0.60	0.59	0.35	0.51
Dy	3.74	4.45	2.71	3.79	3.53	5.84	6.33	4.80	5.02	6.71	4.16	4.23	2.54	3.22
Ho	0.78	0.85	0.58	0.83	0.58	1.14	1.30	0.96	0.96	1.37	0.90	0.92	0.57	0.67
Er	2.21	2.29	1.68	2.38	1.61	3.31	3.53	2.57	2.53	3.79	2.63	2.54	1.72	1.74
Tm	0.32	0.30	0.25	0.36	0.23	0.48	0.49	0.36	0.35	0.54	0.38	0.36	0.24	0.23
Yb	2.11	2.00	1.70	2.39	1.68	3.16	3.15	2.22	2.23	3.35	2.61	2.49	1.77	1.42
Lu	0.33	0.30	0.27	0.38	0.25	0.47	0.44	0.33	0.30	0.50	0.38	0.37	0.30	0.20
Hf	4.12	2.82	2.02	2.74	4.69	4.71	3.54	3.00	3.05	5.52	1.67	1.60	1.25	1.39
Ta	0.70	0.32	0.50	0.47	0.94	1.07	1.02	0.94	0.93	1.00	0.21	0.21	0.17	0.41
Tl	0.40	0.19	0.31	0.17	0.33	2.35	0.11	0.044	0.12	0.73	0.089	0.070	0.017	0.057
Pb	21.0	15.0	57.9	10.6	4.50	466	9.97	4.42	5.62	12.2	10.3	9.83	3.32	11.6
Th	10.7	11.2	7.46	9.06	16.0	18.9	1.83	1.26	1.27	14.3	0.29	0.28	0.23	0.58
U	1.94	2.77	1.72	1.82	5.39	3.20	0.51	0.46	0.64	2.73	0.17	0.16	0.15	0.19
ΣREE	123.5	206.3	106.7	126.6	555.2	195.7	109.6	84.31	105.6	190.9	41.22	40.90	26.49	56.00
(La/Yb) _N	9.64	15.6	11.0	11.6	55.6	9.47	3.99	4.10	6.06	8.27	1.22	1.27	1.58	5.19
δEu	0.67	0.82	0.81	0.69	0.40	0.69	0.97	0.93	1.07	0.80	1.02	1.05	0.77	1.16
δCe	0.88	0.95	0.86	0.65	0.97	0.97	0.96	0.96	0.92	0.96	0.88	0.89	0.74	0.78

注：微量元素组成测定结果中两个 d-3 样品数据是用来对比两次测试结果

明显的线性相关性,但是,仍然可见明显的组分间断现象(见表 3,图 6d-f),进一步显示出矿区滩间山群火山岩实际上由化学成分相对独立的两部分构成,上部 O₁₋₂tnd-1、O₁₋₂tnd-3 岩段与下部 O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb 岩组/段在化学成分上具有明显差异。

4 火山岩地球化学特征

4.1 稀土元素地球化学特征

由表 2 可见,滩间山群火山岩稀土元素总量(ΣREE)在 26.49×10⁻⁶~555.2×10⁻⁶之间,变化范围较大,并且从 O₁₋₂tna-1 至 O₁₋₂tnd-3 岩组/段稀土元素总量具有逐渐减少的趋势。其中,O₁₋₂tna-1 岩段 ΣREE 变化于 106.7×10⁻⁶~206.3×10⁻⁶之间,平均为 140.8×10⁻⁶;O₁₋₂tnb 岩组 ΣREE 变化于 195.7×10⁻⁶~555.2×10⁻⁶之间,平均为 375.4×10⁻⁶;O₁₋₂tnd-1 岩段 ΣREE 变化于 84.31×10⁻⁶~190.9×10⁻⁶,平均为 122.6×10⁻⁶;O₁₋₂tnd-3 岩段 ΣREE 变化于 26.49×10⁻⁶~56.00×10⁻⁶,平均为 41.15×10⁻⁶。由此可见,自 O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb 岩组/段向 O₁₋₂tnd-1、O₁₋₂tnd-3 岩段 ΣREE 降低的趋势十分明显。

O₁₋₂tna-1 岩段(La/Yb)_N变化范围为 9.64~15.58,平均为 11.96;O₁₋₂tnb 岩组(La/Yb)_N变化范围为 9.47~55.62,平均为 32.55;O₁₋₂tnd-1 岩组(La/Yb)_N变化范围为 3.99~8.27,平均为 5.60;O₁₋₂tnd-3 岩组(La/Yb)_N变化范围为 1.22~

5.19,平均为 2.31。由此可见,自 O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb 岩组/段向 O₁₋₂tnd-1、O₁₋₂tnd-3 岩段轻重稀土分异趋势明显减弱,并且在稀土配分模式图上(图 7),自 O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb→O₁₋₂tnd-1→O₁₋₂tnd-3 轻重稀土分异程度逐渐转弱的趋势十分明显,其中,O₁₋₂tnd-3 岩段稀土配分模式基本上与大洋中脊玄武岩一致。

O₁₋₂tna-1 岩段 δEu 变化于 0.67~0.82 之间,平均为 0.75;O₁₋₂tnb 岩组 δEu 变化于 0.4~0.69 之间,平均为 0.55;O₁₋₂tnd-1 岩段 δEu 变化于 0.93~1.07 之间,平均为 0.94;O₁₋₂tnd-3 岩段 δEu 变化于 0.77~1.16 之间,平均为 1.0。由此表明,自 O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb→O₁₋₂tnd-1→O₁₋₂tnd-3,岩浆结晶分异的程度逐渐转弱,这与岩石化学所反映出的岩浆演化趋势认识一致。而 δCe 变化范围不大,集中在 0.83~0.95 之间,可能反映了岩浆演化过程中氧化还原条件较为稳定。

4.2 微量元素地球化学特征

在微量元素蛛网图上(图 7),O₁₋₂tna-1 和 O₁₋₂tnb 呈三隆起的型式(图 7 右上),表现为 Rb、K、Ba、Sr、Th 等大离子亲石元素的富集,Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素的亏损,Ce、Sm 表现富集,Ti 具有显著的亏损,(Nb/Th)_N<1。O₁₋₂tnd-3 岩段的微量元素蛛网图呈现出典型的洋中脊玄武岩的特征(图 7 右下),洋中脊玄武岩标准化曲线呈接近 1 的平坦型分布型式,无明显的波峰和波谷,P 之前的元素略有富集,P 之后的元素稍显亏损。O₁₋₂tnd-1 岩段的微量元素蛛网图呈现为单一的隆起(图 7 右中),富集 Rb、K、Ba、Sr、Th 等大离子亲

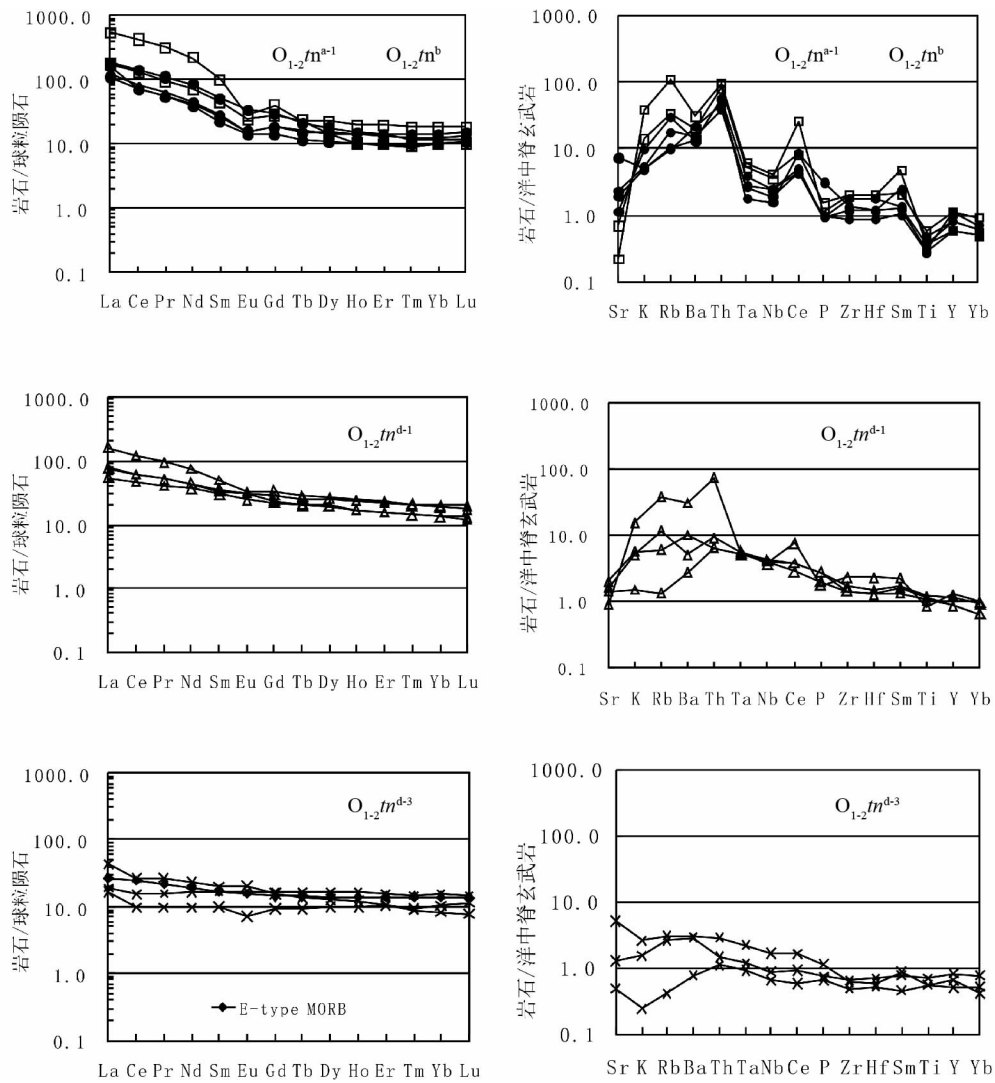


图7 濰间山群火山岩稀土元素配分模式图和微量元素蛛网图(球粒陨石、E-type MORB 和洋中脊玄武岩标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and MORB-normalized trace element patterns of the Tianjianshan Group volcanic rocks (the chondrite-normalized data, MORB-normalized data and E-type MORB data after Sun and McDonough, 1989)

石元素,但富集程度较 $O_{1-2}tna-1$ 和 $O_{1-2}tnb$ 低一个数量级,Ti 和 P 稍有亏损,但亏损程度很低。总体特征与稀土元素配分模式图一样,介于 $O_{1-2}tna-1$ 、 $O_{1-2}tnb$ 和 $O_{1-2}tnd-3$ 之间,指示出过渡阶段的特点。

5 讨论

5.1 火山岩成岩构造环境

近年来柴北缘地区区域地质研究表明,早古生代柴北缘地区的构造环境为一岛弧火山岩带,伴随加里东期俯冲碰撞作用该岛弧火山岩带与超高压-高压变质岩一起构成北侧全吉地块和南侧柴达木地块之间的俯冲碰撞杂岩带(赖少聪等,1996;张建新等,2000;杨经绥等,2001;陆松年等,2002;许

志勤等,2003;王惠初等,2003,见图1)。尽管如此,李峰和吴志亮(2006)在早古生代柴北缘裂谷演化研究中认为,柴北缘濰间山群火山岩形成于不同的大地构造环境。其中下部火山岩总体显示大陆裂谷环境特征,上部火山岩总体显示类岛弧环境特征。由下至上,由双峰式火山岩向类岛弧钙碱性火山岩演变,典型的洋脊玄武岩很少。因此,柴北缘造山带是在元古宙古陆壳上发展而来的。柴北缘早古生代火山岩特点指示其经历了一个由开(裂谷)→合(闭合)的过程。所以它不同于洋壳向陆壳俯冲的典型活动陆缘岛弧环境,应是演化阶段更高级和更复杂的微陆块间“开-合构造”。上述结论与早期郭介人等(1987)通过研究得出的锡铁山矿床成矿构造环境为大陆裂谷的认识一致。事实上,目前大多研究者在锡铁山矿床成矿研究中仍然持大陆裂谷的观点(如,樊俊昌

表 3 矿区滩间山群火山岩岩石化学参数表

Table 3 Lithochemical parameters of Xitieshan Group volcanic rocks

样品号	岩性组	TiO ₂ [#]	K ₂ O [#]	P ₂ O ₅ [#]	FeO [#]	MgO [#]	Al ₂ O ₃ [#]
ZP-1		25.24	69.52	5.24	23.54	15.09	61.37
X-04		39.33	40.45	20.22	33.87	14.17	51.95
ZP-2		31.06	59.85	9.09	25.65	13.10	61.25
X-08		33.59	58.02	8.40	10.71	6.57	82.72
8XB79(3)	O ₁₋₂ tna-1	19.63	75.70	4.67	14.24	5.24	80.52
3		14.29	82.54	3.17	20.16	6.12	73.73
82XB107		14.29	82.54	3.17	20.16	6.12	73.73
Zk44003-17-1		19.63	75.70	4.67	14.24	5.24	80.52
XT-2		9.55	87.27	3.18	13.34	5.58	81.07
D-1		20.36	74.91	4.73	18.49	10.32	71.18
Zk4407-19-6	O ₁₋₂ tnb	12.63	84.63	2.74	24.92	13.36	61.72
GS-29		9.55	87.27	3.18	13.34	5.58	81.07
X-33		61.89	26.57	11.54	31.06	17.99	50.95
X-35		77.56	10.73	11.71	28.93	22.38	48.69
ZP-7		59.73	29.01	11.26	32.05	12.18	55.76
Zk4407-19-2	O ₁₋₂ tnd-1	32.72	61.74	5.54	25.57	15.49	58.94
GS-42		70.61	16.41	12.98	37.20	15.59	47.21
GS-26		86.64	11.74	1.62	36.66	20.48	42.86
GS-27		62.93	25.17	11.90	30.49	16.19	53.31
d-3		76.81	16.67	6.52	36.05	19.53	44.42
ZP-21		88.02	3.79	8.19	36.07	20.31	43.62
XP-6		61.59	28.26	10.14	26.34	10.53	63.13
GS-06	O ₁₋₂ tnd-3	54.74	26.32	18.95	27.72	12.93	59.36
GS-38		70.77	22.31	6.92	31.66	22.57	45.77
GS-13		56.80	27.20	16.00	29.16	24.51	46.34
GS-15		57.23	14.47	28.30	26.86	14.69	58.45

注：K₂O[#] = K₂O/(K₂O + TiO₂ + P₂O₅) × 100；FeO[#] = (FeO + 0.899Fe₂O₃)/(FeO + 0.899Fe₂O₃ + MgO + Al₂O₃) × 100；TiO₂[#] = TiO₂/(TiO₂ + K₂O + P₂O₅) × 100；P₂O₅[#] = P₂O₅/(P₂O₅ + TiO₂ + K₂O) × 100；MgO[#] = MgO/(MgO + FeO[#] + Al₂O₃) × 100；Al₂O₃[#] = Al₂O₃/(Al₂O₃ + FeO[#] + MgO) × 100

和李峰,2006;吴昌志等,2008)。因此,锡铁山矿床成矿构造环境认识不仅与区域地质认识存在着差异,而且大陆裂谷认识在当前锡铁山矿床成矿研究中仍然占据着统治地位。

将本次研究测试分析的矿区滩间山群不同岩组火山岩样品分别投影在 Hf/3-Th-Ta、Th-Ta 及 Ti-Zr 等火山岩成岩构造环境判别图解上,由图 8 可见,O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb 岩组/段和 O₁₋₂tnd 岩组火山岩成岩构造环境显著不同,其中,O₁₋₂tna-1 和 O₁₋₂tnb 均集中落在岛弧钙碱性玄武岩区域;O₁₋₂tnd-1 除一个样品落在岛弧钙碱性玄武岩区外,其余样品均落在 E 型洋中脊玄武岩(E-MORB)与板内玄武岩(WPB)复合区靠近板内玄武岩一侧;O₁₋₂tnd-3 除了一例与 O₁₋₂tnd-1 落在相同区域外,其它样品均落在 N 型洋中脊玄武岩(N-MORB)区域。由此可见,从 O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb→O₁₋₂tnd-1→O₁₋₂tnd-3,滩间山群火山岩成岩构造环境经历了从陆缘岛弧→陆缘岛弧向洋中脊过渡→洋中脊的依次转变过程,火山岩从岛弧钙碱性→E

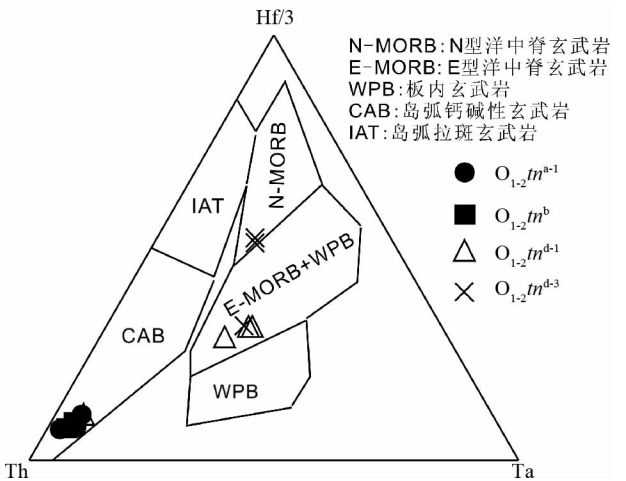


图 8 Hf/3-Th-Ta 构造环境判别图解(底图据 Wood, 1980)

Fig. 8 Hf/3-Th-Ta diagram for tectonic environment discriminating (after Wood, 1980)

型洋中脊玄武岩→N 型洋中脊玄武岩转变,进而揭示了火山岩成岩构造环境从陆缘性质→洋陆过渡→大洋中脊的完整演变过程。此判别图解揭示出的火山岩构造环境演变过程与稀土微量元素揭示出的火山岩岩浆演化过程具有很好的相互佐证意义。

在图 9 上,O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb 和 O₁₋₂tnd 明显被区分于分界线的两侧,与 Hf/3-Th-Ta 判别图解一样,O₁₋₂tna-1 和 O₁₋₂tnb 均落在岛弧玄武岩范围内,O₁₋₂tnd-1 岩组除有一例落在岛弧玄武岩区域外,其余样品均与 O₁₋₂tnd-3 岩组一样落在了洋中脊玄武岩与板内玄武岩叠加区域内。由此进一步表明,矿区滩间山群下部 O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb 岩组/段火山岩成岩构造环境与 O₁₋₂tnd-1 和 O₁₋₂tnd-3 岩段有明显差异。其中,O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb 成岩构造环境为岛弧环境,而 O₁₋₂tnd 成岩构造环境与洋中脊相似。与上述 Hf/3-Th-Ta 判别图解得出的结论一致。

在 Ti-Zr 火山岩成岩构造环境判别图解上,O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb 均落在岛弧钙碱性玄武岩范围内,显示了岛弧环境。O₁₋₂tnd-1 和 O₁₋₂tnd-3 分别落入洋中脊环境,同样两套岩性组并未在图上重叠而是各自集中分布,显示了两者的形成环境不完全相同。此图解的判别结果再次肯定了 O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb 形成于岛弧环境,O₁₋₂tnd-3 形成于洋中脊环境,O₁₋₂tnd-1 代表了两种环境间的一种过渡类型的事实。

5.2 成矿构造环境演化过程

通过上述火山岩岩石化学与地球化学特征及成岩构造环境判别,可以将锡铁山海底块状硫化物矿床成矿构造环境演化过程综合分析如下:

(1)从火山岩岩石化学特征来看,矿区滩间山群火山岩自 O₁₋₂tna-1、O₁₋₂tnb 到 O₁₋₂tnd,化学成分显著不同,前者明显富 SiO₂,相对富 K₂O、Na₂O 和 Al₂O₃,后者明显富 FeO[#]、MgO、CaO、TiO₂、P₂O₅,贫 SiO₂、Al₂O₃、K₂O 和 Na₂O。上述岩石化

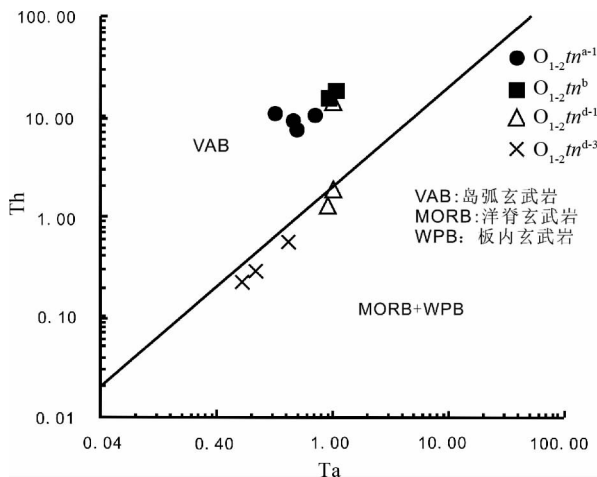


图9 Th-Ta 构造环境判别图解(底图据 Wood, 1980)

Fig. 9 Th-Ta diagram for discriminating tectonic settings (after Wood, 1980)

学特征揭示出矿区滩间山群岩浆活动具有自酸性向基性演化的特点,与所观察到的火山岩岩石学特征一致。主量元素分析表明,矿区滩间山群火山岩具有同源岩浆演化的一般特点,表现为自 $O_{1-2} tna-1$ 、 $O_{1-2} tnb$ 到 $O_{1-2} tnd$,火山岩主量元素在成分变异图上具有较好的协调变化趋势,显示出较好的线性相关性;主量元素化学参数散点图上进一步揭示出元素变化的协调性和相关性特征。因此,矿区滩间山群不同岩组内部的火山岩代表了同源岩浆不同演化阶段的产物,并且自 $O_{1-2} tna-1$ 、 $O_{1-2} tnb \rightarrow O_{1-2} tnd-1 \rightarrow O_{1-2} tnd-3$,具有明显的渐变过渡关系。

(2)从稀土元素和微量元素特征来看,矿区滩间山群火山岩连续渐变式过渡关系反映的更加明显。其中, $O_{1-2} tna-1$ 、 $O_{1-2} tnb$ 轻重稀土的分异强烈,大离子亲石元素(LILE)的强烈富集,Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素的亏损,Ce、Sm 富集,Ti 的显著亏损,微量元素蛛网图三隆起型式等均与岛弧钙碱性火山岩特征相近(Pearce and Cann, 1973; Piercey *et al.*, 2004; Pearce *et al.*, 2005; Verma *et al.*, 2006; 夏林圻等, 2007),进而表明早期火山岩的成岩构造背景应属岛弧环境; $O_{1-2} tnd-1$ 轻重稀土虽有分异,大离子亲石元素(LILE)虽有富集,但均比 $O_{1-2} tna-1$ 、 $O_{1-2} tnb$ 明显减弱,微量元素蛛网图亦由三隆起转变为单隆起; $O_{1-2} tnd-3$ 稀土微量元素分异特征均已不明显,并与典型大洋中脊玄武岩稀土微量元素特征相近(Pearce and Cann, 1973; Sun and McDonough, 1989)。由此表明,从 $O_{1-2} tna-1$ 、 $O_{1-2} tnb \rightarrow O_{1-2} tnd-1 \rightarrow O_{1-2} tnd-3$,矿区滩间山群火山岩成岩构造环境经历了从陆缘基底岛弧→洋陆过渡型地壳→典型大洋地壳的连续过渡变化,结合本区区域研究认识,具有上述连续过渡变化特征的成矿构造背景应属大陆边缘弧后盆地拉张环境。

(3)不同火山岩地球化学成岩构造环境判别图解一致表明,矿区滩间山群火山岩 $O_{1-2} tna-1$ 、 $O_{1-2} tnb$ 成岩构造环境为

岛弧, $O_{1-2} tnd-1$ 成岩构造环境为洋中脊与板内重叠环境, $O_{1-2} tnd-3$ 岩组为典型大洋中脊。进一步表明自 $O_{1-2} tna-1$ 、 $O_{1-2} tnb \rightarrow O_{1-2} tnd-1 \rightarrow O_{1-2} tnd-3$,火山岩成岩构造背景经历了一个连续变化的过程,与岩石化学及稀土元素和微量元素得出的认识相互验证。

(4)一般认为,板块边缘火山岩中 Rb、Sr 组分的含量对反映火山区的地壳厚度是灵敏的。在 Rb-Sr—地壳厚度格网图上,矿区滩间山群火山岩样品均投在了地壳厚度 <30km 的范围内,虽然不同岩组/段投点地壳厚度变化范围较大(可能与变质作用中 Rb、Sr 组分的活动有关),但是总体上矿区滩间山群火山岩成岩时的地壳厚度在 15~30km 之间,与弧后盆地拉张区环境相当。由此进一步对上述火山岩岩石化学、稀土元素和微量元素特征揭示出的成岩构造环境起到了相互验证的目的。

(5)综上,本文认为矿区滩间山群火山岩岩石化学演化趋势与西太平洋琉球群岛冲绳海槽火山岩演化趋势相似。翟世奎等(1994)通过冲绳海槽代表性柱状岩芯矿物学、岩石化学系统研究,结果表明冲绳海槽岩浆活动有自酸性向基性演化的趋势,随着海槽的扩张,岩浆活动会加剧,海槽地壳由过渡型向大洋型过渡。与锡铁山矿区滩间山群火山岩成岩构造环境相似。此外,Piercey (2007)通过岛弧环境块状硫化物矿床双峰式火山岩岩石化学对比研究指出:在有陆壳成分卷入以长英质火山岩为主的环境中形成的块状硫化物矿床,以碱性玄武岩出现为特征(玄武岩具有似洋岛、似洋中脊或似弧后盆地玄武岩特点)。这些环境产出的碱性玄武岩上覆于长英质岩石和矿化层之上,并分别代表了软流圈地幔和岩石圈地幔局部熔融来源。锡铁山矿区赋矿滩间山群火山岩从 $O_{1-2} tna-1$ 、 $O_{1-2} tnb$ 岩组/段(以钙碱性英安岩、流纹岩出现为特征)→ $O_{1-2} tnd$ 岩组(从洋陆过渡碱性玄武岩到标准大洋拉斑玄武岩)变化过程与此认识相似。由此,可以将锡铁山块状硫化物矿床成矿构造环境演化过程推测如下:

第一阶段:弧后拉张的早期,地壳伸展、减薄、凹陷,弧后地堑系统形成,陆缘碎屑为主夹少量火山物质地堑充填。此部分以陆缘碎屑为主的早期盆地充填产物,由于加里东造山期后强烈伸展剥离作用,不仅变形变质强烈,而且大部分已被剥离,仅在矿区个别地段残留,与下伏基底达肯达坂群之间构成隐蔽断层接触(汪劲草等,2000);第二阶段:裂谷火山作用,块状硫化物形成阶段。弧后拉张持续,地壳进一步减薄,地堑系统逐渐发展成为弧后裂谷/海槽,该阶段以 $O_{1-2} tna-1$ 、 $O_{1-2} tnb$ 岩组/段双峰式火山岩发育为标志,酸性流纹质、英安质火山岩岩浆沿裂谷断裂系统上侵,形成高位岩浆房,与裂谷断裂系统及下渗海水构成海底热液喷流系统,在闭塞、还原性的海底($O_{1-2} tna-2$ 黑色页岩为证),喷流热液中的金属离子与海底还原环境中的低价硫离子结合,形成海底块状硫化物矿床;第三阶段,拉张作用持续,裂谷进一步发展,地壳持续减薄至完全消失,洋中脊玄武岩出现并逐渐由 E 型-洋中脊玄武岩演化为 N 型-洋中脊玄武岩。第四阶段:挤

压褶皱隆起,弧后拉张结束。可见,锡铁山海底块状硫化物矿床成矿构造环境演化过程与 Allen *et al.* (2002) 总结的全球古代弧后区块状硫化物矿床成矿构造环境演化过程相似。

5.3 矿区南部滩间山群 $O_{1-2}tnd$ 岩组找矿潜力

以往认为 $O_{1-2}tnd$ 岩组可能存在找矿潜力的几个理论依据为:

(1)南部 $O_{1-2}tnd$ 岩组比北部赋矿的 $O_{1-2}tna-1$ 、 $O_{1-2}tnb$ 岩组有更大的厚度,而厚度常常是裂谷中盆地地下陷程度的反映,即厚度大,下陷深。因此,南部绿片岩系应具有较好的成矿前景(季克俭,1997^①)。

(2)锡铁山矿区总体构造格架为“W”型,其中北部为锡铁山沟紧闭倒转口袋状向斜,南部为中间沟向斜,中间存在一个背斜。因此,南、北两侧地层对称性重复,其中, $O_{1-2}tnd-2$ 岩段与 $O_{1-2}tna-2$ 岩段相当,因此, $O_{1-2}tnd-2$ 岩段可能存在与北部赋矿层位 $O_{1-2}tna-2$ 相同类型的矿床(邓吉牛,1998)。

(3)矿区南部 $O_{1-2}tnd-1$ 岩段和北部 $O_{1-2}tna-1$ 、 $O_{1-2}tnb$ 岩组/段,南部 $O_{1-2}tnd-2$ 岩段和北部 $O_{1-2}tna-2$ 岩段是同层异相关系,因此,它们形成时代相同,形成环境相似, $O_{1-2}tnd-2$ 岩段可能产出与北部 $O_{1-2}tna-2$ 岩段相同的矿床类型(李峰和吴志亮,2006;刘亮明和赵义来,2006)。

本文认为,在缺乏深入的成岩成矿构造环境研究之前,上述认识都是合理的推测。但是,通过本次研究,我们认为上述认识很可能不再成立。原因在于:岩石学、岩石化学和地球化学证据一致表明,矿区滩间山群地层自 $O_{1-2}tna-1$ 、 $O_{1-2}tnb \rightarrow O_{1-2}tnd-1 \rightarrow O_{1-2}tnd-3$ 是弧后裂谷拉张连续变化的产物,因此,将矿区地层视为对称性重复或同层异相的观点是不能成立的,进而试图将 $O_{1-2}tnd-2$ 岩段与 $O_{1-2}tna-2$ 岩段形成时代及成矿环境等同起来也是不能成立的。此外,南部火山岩系厚度虽然较大,但是沉积环境偏氧化(存在含赤铁矿重晶石、含赤铁矿硅质岩),因此,即使可以形成海底块状硫化物矿床,也不利于保存。因此,矿区南部找到与北部相同类型矿床的可能性不大。

6 结论

锡铁山矿区赋矿滩间山群火山岩岩石化学及地球化学特征一致表明滩间山群岩浆活动具有自酸性向基性同源岩浆演化的特点。矿区滩间山群不同岩组的火山岩代表了同源岩浆不同演化阶段的产物,自 $O_{1-2}tna-1$ 、 $O_{1-2}tnb \rightarrow O_{1-2}tnd-1 \rightarrow O_{1-2}tnd-3$,火山岩岩石化学及稀土元素与微量元素特征具有明显的渐变过渡关系。矿区滩间山群火山岩稀土、微量元素组成特征及成岩构造环境判别图解一致揭示从 $O_{1-2}tna-1$ 、 $O_{1-2}tnb \rightarrow O_{1-2}tnd-1 \rightarrow O_{1-2}tnd-3$,滩间山群火山岩成岩构造环境经历了从陆缘基底岛弧→洋陆过渡型地壳→典型大洋地壳的连续过渡变化。矿区滩间山群火山岩岩浆演化过程及 Rb、Sr 组分变化趋势与大陆边缘弧后盆地火山岩岩浆演化

过程相近。根据成矿构造环境演化,推断矿区南部找到与北部相同类型矿床的可能性不大。

References

Allen RL, Weihed P and Blundell DJ. 2002. Global comparisons of volcanic-associated massive sulphide districts. Geological Society of London Special Publication, 204: 13–37

Fan JC and Li F. 2006. Revision on Tanjianshan Group in the Xitieshan mine, Qinghai Province. *Geology and Prospecting*, 42(6): 21–25 (in Chinese with English abstract)

Feng ZX, Sun HS, Wu GB and Wang YQ. 2010. A discussion on type of the Xitieshan Pb-Zn ore deposit, Qinghai. *Geological Review*, 56(4): 501–512 (in Chinese with English abstract)

Hutchinson RW. 1980. Massive base metal sulphide deposits as guides to tectonic evolution. In: Strangway DW (ed.). *The Continental Crust and Its Mineral Deposits*. Geological Association of Canada Special Paper, 20: 660–684

Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeisen A and Zanettin BA. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745–750

Lai SC, Deng JF and Zhao HL. 1996. Paleozoic ophiolites and its tectonic significance on north margin of Qaidam basin. *Geoscience, Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 10(1): 18–28 (in Chinese with English abstract)

Lu SN, Wang HC, Li HK, Yuan GB, Xin HT and Zheng JK. 2002. Redefinition of the “Dakendaban Group” on the northern margin of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 21(1): 19–23 (in Chinese with English abstract)

Large RR, Cooke D, McGoldrick P, Scott R and Selley D. 2008. Advances in genetic understanding of sediment hosted base metal and gold deposits (abstracts). In: *The 33rd international geological congress*. <http://lib.cug.edu.cn/GeoScienceWorld>

Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274(4): 321–355

Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290–300

Pearce JA, Stern RJ and Bloomer SH. 2005. Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: Implications for the nature and distribution of subduction components. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(7): 19–27

Piercey SJ, Murphy DC and Mortensen JK. 2004. Mid-Paleozoic initiation of the northern Cordilleran marginal backarc basin: Geologic, geochemical, and neodymium isotope evidence from the oldest mafic magmatic rocks in the Yukon-Tanana terrane, Finlayson Lake district, southeast Yukon, Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 116: 1087–1106

Piercey SJ. 2007. An overview of the use of petrochemistry in regional exploration for volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits advances in regional-scale geochemical methods. Paper 11. In: Milkereit B (ed.). “Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration”, 223–246

Pan GT, Xiao QH, Lu SN, Den JF, Feng YM, Zhang KX, Zhang ZY, Wang FG, Xing GF, Hao GJ and Feng YF. 2009. Subdivision of tectonic units in China. *Geology in China*, 36(1): 1–29 (in Chinese with English abstract)

Sawkins FJ. 1972. Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics. *Journal of Geology*, 80: 377–397

Sawkins FJ. 1976. Metal deposits related to intracontinental hotspot and rifting environments. *Journal of Geology*, 84: 653–671

① 季克俭. 1997. 关于锡铁山矿床成矿和找矿问题的一些认识. 锡铁山铅锌矿高层次地质找矿研讨会论文集. 锡铁山矿务局. 1–162

- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society Special Publications, 42: 313–345
- Verma SP, Guevara M and Agrawal S. 2006. Discriminating four tectonic settings: Five new geochemical diagrams for basic and ultrabasic volcanic rocks based on log-ratio transformation of major-element data. *Journal of Earth System Science*, 115(5): 485–528
- Wang HC, Lu SN, Yuan GB, Xin HT, Zhang BH, Wang QH and Tian Q. 2003. Tectonic setting and age of the “Tanjianshan Group” on the north margin of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 22(7): 487–493 (in Chinese with English abstract)
- Wang JC, Peng ES and Sun ZJ. 2000. Tectonic reconstruction of the Xitieshan Pb-Zn deposit after spout sediment, Qinghai Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(2): 163–169 (in Chinese with English abstract)
- Wang LJ, Zhu XY, Wang JB, Deng JN, Wang YW and Zhu HP. 2008. Study on fluid inclusions of the sedimentary-exhalative system (SEDEX) in Xitieshan lead-zinc deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2433–2440 (in Chinese with English abstract)
- Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11–30
- Wu CZ, Gu LX, Feng H, Zhang ZZ, Liu SH, Huang JH, Wang CH and Wang ZY. 2008. Genetic types of orebodies in Xitieshan lead-zinc deposit, Qinghai Province, western China. *Geology in China*, 35(6): 1185–1196 (in Chinese with English abstract)
- Wu JR, Ren BC, ZM, Gao DC, Zhao T, Zhang HW, Song ZG and Zhang QL. 1987. The genetic type and geological characteristics of the Xitieshan massive sulfide deposit, Qinghai. *Bulletin of Xi'an Institute of Geological Mineral Resources, Chinese Academic Geological Sciences*, 20: 1–30 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM and Ma ZP. 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77–89 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Wu CL, Li HB, Zhang JX, Qi XX, Song SG, Wan YS, Chen W and Qiu HJ. 2003. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Qaidam ultra-pressure metamorphic belt. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 163–176 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Song SG, Xu ZQ, Wu CL, Shi RD, Zhang JX, Li HB, Wan YS, Liu Y, Qiu HJ, Liu FL and Maruyama S. 2001. Discovery of coesite in the north Qaidam Early Paleozoic ultrahigh-high pressure (UHP-HP) metamorphic belt, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 175–179 (in Chinese with English abstract)
- Zhai SK, Chen LR, Shen SQ, Mao XY, Chai ZF and Ma SL. 1994. Magmatic evolution of Okinawa Trough during its early spreading stage. *Acta Oceanologica Sinica*, 16(3): 61–73 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Yang JS, Xu ZQ, Zhang ZM, Chen W and Li HB. 2000. Peak and retrograde age of eclogites at the northern margin of Qaidam basin, northwestern China: Evidences from U-Pb and Ar-Ar dates. *Geochimica*, 29(3): 217–222 (in Chinese with English abstract)
- Zhang DQ, Wang FC, Li DX, Feng CY, She HQ and Li JW. 2005. Two types of massive sulfide deposits on northern margin of Qaidam basin Qinghai Province: I. Xitieshan style SEDEX lead-zinc deposits. *Mineral Deposits*, 24(5): 471–480 (in Chinese with English abstract)
- Zhao FQ, Guo JJ and Li HK. 2003. Geological characteristics and isotopic age of Tanjianshan Group along northern margin of Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 22(1): 28–31 (in Chinese with English abstract)
- Zhu XY, Deng JN, Wang JB, Lin LJ, Fan JC and Sun SQ. 2007a. Identification and study of stockwork altered pipe of Xitieshan lead-zinc deposit, Qinghai Province. *Geochimica*, 36(1): 37–48 (in Chinese with English abstract)
- Zhu XY, Deng JN, Wang JB, Lin LJ, Fan JC and Sun SQ. 2007b. Study of marble of the Xitieshan lead-zinc SEDEX deposit, Qinghai Province: Interaction between exhaled brine and seawater. *Geological Review*, 53(1): 52–64 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 樊俊昌, 李峰. 2006. 青海锡铁山矿区滩间山群新认识. *地质与勘探*, 42(6): 21–25
- 冯志兴, 孙华山, 吴冠斌, 王玉奇. 2010. 青海锡铁山铅锌矿床类型刍议. *地质论评*, 56(4): 501–512
- 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 1996. 柴达木北缘古生代蛇绿岩及其构造意义. *现代地质*, 10(1): 18–28
- 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 袁桂邦, 辛后田, 郑健康. 2002. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定. *地质通报*, 21(1): 19–23
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分. *中国地质*, 36(1): 1–29
- 郭介人, 任秉琛, 张莓, 高栋丞, 赵统, 张汉文, 朱志高, 张群力. 1987. 青海锡铁山块状硫化物矿床的类型及地质特征. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 20: 1–30
- 汪劲草, 彭恩生, 孙振佳. 2000. 青海锡铁山铅锌矿床喷流沉积后的构造再造过程. *大地构造与成矿学*, 24(2): 163–169
- 王惠初, 陆松年, 袁桂邦, 辛后田, 张宝华, 王青海, 田琪. 2003. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代. *地质通报*, 22(7): 487–493
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2007. 利用地球化学方法判断大陆玄武岩和岛弧玄武岩. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 77–89
- 王莉娟, 祝新友, 王京斌, 邓吉牛, 王玉往, 朱和平. 2008. 青海锡铁山铅锌矿床喷流沉积系统(SEDEX)成矿流体研究. *岩石学报*, 24(10): 2433–2440
- 吴昌志, 顾连兴, 冯慧, 张遵忠, 刘四海, 黄建华, 王长华, 王震宇. 2008. 青海锡铁山铅锌矿床的矿体成因类型讨论. *中国地质*, 35(6): 1185–1196
- 许志琴, 杨经绥, 吴才来, 李海兵, 张建新, 戚学祥, 宋述光, 万渝生, 陈文, 邱海峻. 2003. 柴达木北缘超高压变质带形成与折返的时限及机制. *地质学报*, 77(2): 163–176
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 吴才来, 史仁灯, 张建新, 李海兵, 万渝生, 刘焰, 邱海峻, 刘福来, Maruyama S. 2001. 柴北缘早古生代高压-超高压变质带发现典型超高压矿物——柯石英. *地质学报*, 75(2): 175–179
- 翟世奎, 陈丽蓉, 申顺喜, 毛雪瑛, 柴之芳, 马淑兰. 1994. 冲绳海槽早期扩张作用中岩浆活动的演化. *海洋学报*, 16(3): 61–73
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 张泽文, 陈文, 李海兵. 2000. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄: 来自 U-Pb 及 Ar-Ar 同位素测定的证据. *地球化学*, 29(3): 217–222
- 赵凤清, 郭进京, 李怀坤. 2003. 青海锡铁山地区滩间山群地质特征及同位素年代学. *地质通报*, 22(1): 28–31
- 张德全, 王富春, 李大新, 丰成友, 余宏全, 李进文. 2005. 柴北缘地区的两类块状硫化物矿床 I. 锡铁山式 SEDEX 型铅锌矿床. *矿床地质*, 24(5): 471–480
- 祝新友, 邓吉牛, 王京彬, 林龙军, 樊俊昌, 孙淑秋. 2007a. 锡铁山铅锌矿床网脉状蚀变管道相的识别与研究. *地球化学*, 36(1): 37–48
- 祝新友, 邓吉牛, 王京彬, 林龙军, 樊俊昌, 孙淑秋. 2007b. 锡铁山喷流沉积矿床卤水与海水的相互作用. *地质论评*, 53(1): 52–64