

辽宁青城子铅锌多金属矿田晚三叠世岩浆岩年代学、地球化学及地质意义^{*}

段晓侠^{1,2} 刘建明¹ 王永彬^{1,2} 周伶俐^{1,2} 李永贵³ 李斌³ 张壮^{1,2} 张作伦⁴

DUAN XiaoXia^{1,2}, LIU JianMing¹, WANG YongBin^{1,2}, ZHOU LingLi^{1,2}, LI YongGui³, LI Bin³, ZHANG Zhuang^{1,2} and ZHANG ZuoLun⁴

1. 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室,北京 100029

2. 中国科学院研究生院,北京 100049

3. 丹东青城子矿业有限公司,丹东 118107

4. 中铁资源地质勘查有限公司,北京 100039

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Dandong Qingchengzi Mining Co, LTD., Dandong 118107, China

4. China Railway Resources Exploration Company, Beijing 100039, China

2011-08-01 收稿, 2011-10-27 改回.

Duan XX, Liu JM, WangYB, Zhou LL, Li YG, Li B, Zhang Z and Zhang ZL. 2012. Geochronology, geochemistry and geological significance of Late Triassic magmatism in Qingchengzi orefield, Liaoning. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 595–606

Abstract The Qingchengzi orefield which lies in geotectogene of Liaodong rift is an important polymetallic mineral district in northern China for its clustering several large Pb-Zn, Ag and Au deposits. A phase of Late Triassic magmatism, represented by Shuangdinggou biotite monzogranite and Xinling granite, is intimately related to polymetallic mineralization. LA-ICPMS zircon U-Pb age of 224.2 ± 1.2 Ma was obtained for the Shuangdinggou intrusion. Geochemical data for the Shuangdinggou intrusion reveal SiO_2 content of 69.07% ~ 71.31%, while K_2O accounts for 3.53% ~ 5.22% and Na_2O for 3.87% ~ 4.14%, indicating it belongs to high K calc-alkaline series. Al_2O_3 content ranges between 12.46% ~ 14.48% and $\text{A}/\text{CNK} < 1$ suggest metaluminous feature. Trace element geochemistry of the biotite monzogranite displays high total REE content and demonstrate strong fractionation between light and heavy REE elements [$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 35.43 \sim 79.01$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 23.09 \sim 35.10$] and minor negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.68 \sim 0.97$). The biotite monzogranite also shows LILE (such as Rb, Th, K, Pb) enrichment and HFSE (including Nb, Ta, P, Ti) depletion, with unusual high Ba and Sr, low Y and Yb abundances manifesting adakitic geochemical signature. Based on above-stated petrological and geochemical data it is inferred that the biotite monzogranitic magma might be derived from the partial melting of a thickened lower crust with prominent garnet and rutile retained in the residual assemblages, and magma mixing is probably involved based on the unusually high Nb/Ta ratio (18.4 ~ 21.2). It is suggested that slab break-off during the process of Yangtze Craton and North China Craton continental deep subduction in Late Triassic may be responsible for the ore-related magmatism.

Key words Zircon U-Pb dating; Adakitic intrusions; Syn-collisional granite; Qingchengzi orefield, Liaoning

摘 要 辽宁青城子铅锌矿田产出在辽东裂谷凹陷带,是中国北方重要的铅锌金银多金属矿田。研究表明,矿区内发育的以双顶沟黑云母二长花岗岩和新岭花岗岩为代表的晚三叠世花岗质岩浆事件,应与本区的矿化作用密切相关。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果显示双顶沟岩体侵位时间为 224.2 ± 1.2 Ma。双顶沟岩体岩石化学组成呈现 SiO_2 69.07% ~ 71.31%, K_2O 3.53% ~ 5.22%, Na_2O 3.87% ~ 4.14%,属于钙碱性岩石系列。 Al_2O_3 为 12.46% ~ 14.48%, $\text{A}/\text{CNK} < 1$,具有准铝质特征。

^{*} 本文受全国危机矿山找矿资源专项综合研究项目(20089931)、国家自然科学基金面上项目(40972065)和国家重点基础研究项目(2006CB403507)联合资助。

第一作者简介: 段晓侠,女,1988年生,博士生,矿床学专业,E-mail: duan861168@163.com

微量元素数据显示稀土总量较高,轻重稀土元素之间强烈分馏, $[(La/Yb)_N = 35.43 \sim 79.01, LREE/HREE = 23.09 \sim 35.10]$, Eu 负异常不明显($\delta Eu = 0.68 \sim 0.97$)。富集大离子亲石元素 Rb、Th、K、Pb 等,而亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 等。具有高 Sr、Ba 含量,低的 Y、Yb 含量特征,属于具有类似埃达克质亲和性的 I 型花岗岩,具有高 Nb/Ta ($18.4 \sim 21.2$),上述岩石地球化学特征,表明其岩浆源区残留固相矿物组合中包含可观的石榴子石和金红石,可能起源于加厚下地壳的部分熔融,并可能存在与幔源基性岩浆混合作用。推测扬子和华北板块深俯冲过程中板片断离可能是诱发与成矿有关岩浆的地球动力学原因。

关键词 锆石 U-Pb 年代学;埃达克质岩石;同碰撞花岗岩;辽宁青城子矿田

中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

辽宁青城子铅锌矿位于东西向展布的辽东裂谷带轴部的一个断陷盆地,裂谷带介于南部狼林地块和北部龙岗地块之间。裂谷发育过程中沉积变质作用及区域上多期次岩浆活动对该区域的成岩成矿作用有显著影响和贡献,使其成为我国北方重要的成矿带(辽东-吉南成矿带),产出世界最大的菱镁矿,世界第四位的滑石矿床,独特的硼矿床以及二十多处中大型铅锌金银铜钴铁等矿床。

青城子铅锌矿自明朝开采至今已有四百多年历史。早期主要开采铅锌矿,后又逐步发现金、银矿及钼矿,成为一个大型多金属矿田。前人研究集中于辽东裂谷及区域成矿带的探讨(张进红和施林道,1992;骆辉和李俊建,2002;翟安民等,2005;董耀松和杨言辰,2006)、矿床地球化学特征、构造演化等研究,并提出多种矿床成因认识,最早的认识是中温岩浆热液型成因,燕山期新岭花岗岩为成矿母岩(103 地质队,1976^①),后续有提出沉积阶段形成了初始矿源层,在辽吉裂谷带闭合、含矿建造变形变质作用中,变质热液使成矿物质再富集而成矿(刘红霞等,2006)。另外刘志远等(2007)对矿区内硅质岩的研究强调了海底喷流沉积成矿作用的重要性。刘国平(1999)提出多期构造热事件的热点趋于在同一空间部位产出,有利于成矿流体集中向一部分迁移沉淀成矿,青城子矿集区存在这种“同位成矿”作用。现阶段多数认为是多阶段复成因,即古元古代海底喷气沉积变质和中生代构造岩浆活动叠加复合(蒋少涌和魏菊英,1989;芮宗瑶等,1994;王秀福等,2010)。近年来的研究显示中生代岩浆活动对成矿作用可能非常重要。薛春纪等(2003),刘国平和艾永富(2002)对矿区内金、银矿进行的年代学研究都显示中生代成矿的特征,Yu *et al.* (2009)通过精细的闪锌矿 Rb-Sr 等时线法给出成矿年龄 $221 \pm 12\text{Ma}$,并据此提出三叠纪是矿区最主要的成矿时期。

前人研究结果说明中生代印支期的岩浆活动与成矿密切相关(芮宗瑶等,1994;薛春纪等,2003;Yu *et al.*, 2009)。但是缺乏该期岩体的精细年代学和地球化学的系统研究,区域上辽东地区晚三叠世岩浆活动相对较少,研究也相对较弱,所以本文对年代学和地球化学方面对矿田内的印支期岩体——双顶沟岩体进行详细分析,探讨岩浆岩源区及成因,地球动力学背景以及与矿化关系等问题。

2 矿床地质背景

辽宁青城子铅锌银金矿集区(图1)密集地分布着榛子沟、喜鹊沟、南山、甸南等12个大中型铅锌矿、1个银多金属矿、4个金矿,累计已探明铅锌储量150万吨、金200余吨、银1100余吨。铅锌矿化呈似层状、脉状、侧羽毛状三种产状赋存在大石桥组和浪子山组大理岩中,而金银矿化赋存在较高层位的盖县组片岩中。矿石矿物组合为闪锌矿,方铅矿,黄铁矿。脉石矿物主要是方解石、石英。矿区铅锌矿蚀变很弱,金银矿发育强硅化、绢云母化、绿泥石化等蚀变。

该矿田所属的辽东裂谷是在太古宙克拉通基底上经拉张裂解-快速沉降-慢速沉降-回返挤压形成的陆间裂谷。从早到晚经历了由非补偿沉积至超补偿沉积、由海进至海退,早期有基性岩喷溢、中晚期有中酸性火山岩及硅质岩喷流,组成一套特有的碎屑岩-碳酸盐岩-粘土质碎屑岩沉积建造。其间伴生出硼、菱镁矿、铅锌、铜、钴、金、铀矿等多种矿产。

矿区内出露地层主要为古元古代的辽河群及太古代的鞍山群。矿区地层最底部的鞍山群经历混合岩化形成一套混合质变粒岩、混合花岗岩。由于经历后期区域性热动力变质变形作用,辽河群发生绿片岩相-角闪岩相变质作用形成大理岩、夕线石云母片岩、石榴子石云母片、斜长角闪岩。辽河群从下到上可进一步划分为浪子山组(Ptll),以石墨大理岩、角闪片岩、夕线石云母片岩组成为主;大石桥组(Ptld),主要岩性为厚层白云质大理岩、云母条带大理岩夹薄层变粒岩及石榴石云母片岩、夕线石云母片岩,是铅锌矿的主要赋矿层位;盖县组(Ptlgx),主要为云母片岩、夕线石云母片岩,是金银矿化的主要赋矿层位。

青城子矿田构造复杂,NW 和 NE 向各种性质的断裂相互交切,不同期次褶皱构造相互迭加。整体上形成两条弧形倒转褶皱和两条大断裂(NW 向的尖山子断裂和 NE 向的喜鹊沟-二道沟断裂)构成的两弧两直线的构造封闭空间(刘君,1995),几乎所有矿床都分布在这两条断裂围限的区域内。

矿区出露大面积的岩浆岩,前人研究认为存在三期岩浆活动(芮宗瑶等,1994):元古代的大顶子岩体,岩性为黑云母斜长花岗岩;中生代印支期双顶沟岩体和新岭岩体,分别为

① 103 地质队. 1976. 青城子矿区地质调查报告(内部资料). 90 - 97

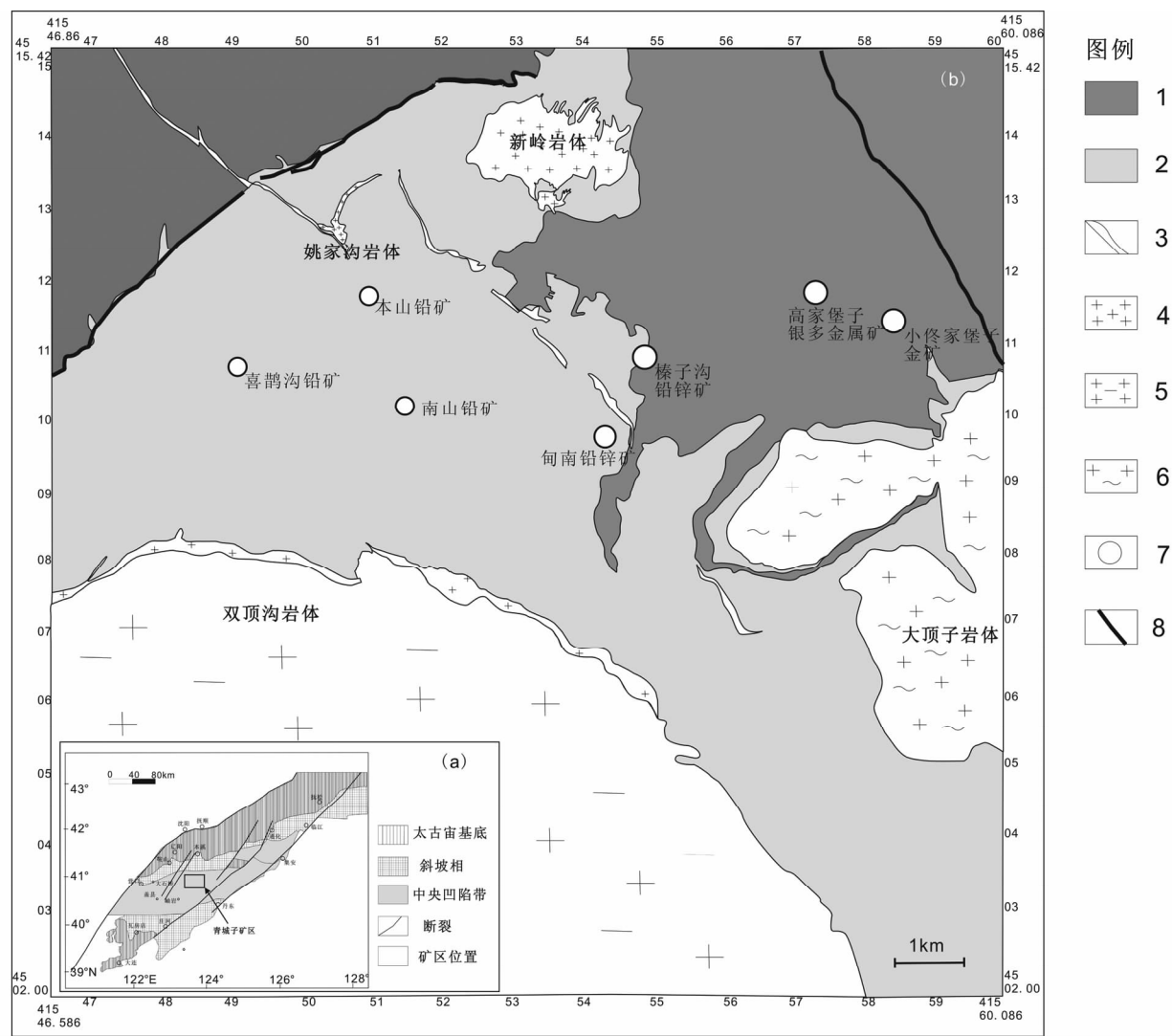


图1 辽宁青城子铅锌矿田地质简图

1-盖县组云母片岩;2-大石桥组大理岩;3-闪长岩脉;4-花岗岩;5-黑云母二长花岗岩;6-斜长花岗岩;7-矿区;8-断裂

Fig.1 Geological sketch map of Qingchengzi orefield and the inset shows its location in Liaodong rift

1-mica schist of Gaixian Formation (Ptlgx); 2-marble of Dashiqiao Formation (Ptld); 3-diorite dyke; 4-granite; 5-biotite monzogranite; 6-plagioclase granite; 7-ore deposits; 8-faults

黑云母二长花岗岩和黑云母花岗岩;燕山期姚家沟岩体,岩性为花岗斑岩。由于新岭岩体发育强烈的蚀变,没有相应的新鲜地球化学样品,而且岩体的 U-Pb 年龄也有前人研究 (Yu *et al.*, 2009),所以本文只选取双顶沟岩体为印支期岩浆活动事件的代表。该岩体呈东西向分布在双顶沟以南老爷岭,石庙子,钢铁峪一带,出露面积共达 300km²。沿着背斜轴部附近侵入的深成-半深成侵入体,局部含基性暗色包体。

3 样品特征及分析方法

3.1 岩相学研究

岩石样品为野外采集的新鲜双顶沟似斑状黑云母二长

花岗岩(图 2a),不包括暗色包体。镜下观察显示,双顶沟岩石具有典型的似斑状结构(图 2b),斑晶主要是钾长石,很多显示条纹结构,自行板状,3~6cm;另外有斜长石斑晶 2~4cm。基质包括钾长石,斜长石,石英和黑云母。钾长石约占 50%,斜长石 15%~25%,石英 20%左右,黑云母大于 5%,少量的角闪石,暗色矿物含量在 10%左右,副矿物有榍石,锆石,磷灰石等(图 2c)。显微镜下可以看到细粒的不规则边界的石英颗粒交生,并存在波状消光现象,呈现出动态重结晶特征。部分斜长石斑晶具有环带结构(图 2d),少量高岭土化,绿泥石化。

3.2 锆石 LA-ICPMS 定年

锆石由河北省地质矿产调查研究所实验室挑选,然后在

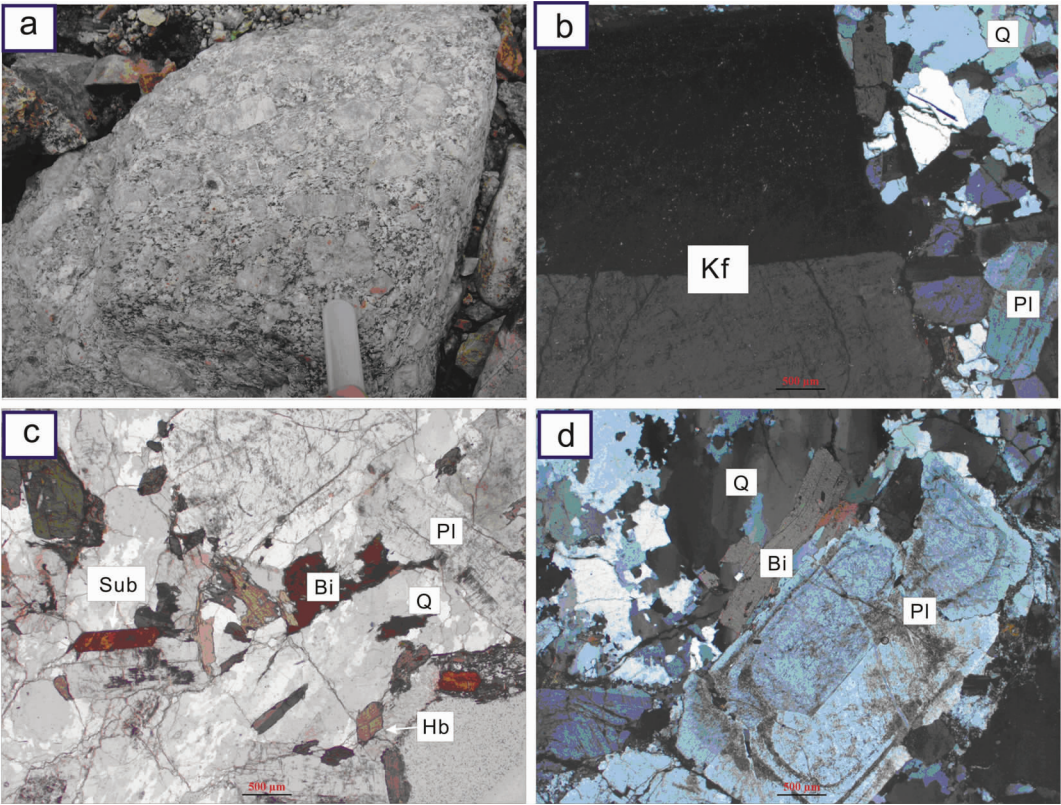


图2 辽宁青城子矿田双顶沟岩体野外和镜下照片
(a)-双顶沟岩体野外照片,具有似斑状结构;(b)-典型的钾长石大斑晶,正交偏光;(c)-发育暗色矿物黑云母,角闪石,副矿物榍石等,单偏光;(d)-斜长石具有环带结构,局部绢云母化,正交偏光
Fig.2 Field photo and photomicrographs of Shuangdinggou monzogranite in Qingchengzi orefield, Liaoning
(a)-field photo of Shuangdinggou monzogranite, demonstrating porphyritic texture, with orthoclase as phenocryst; (b)-typical orthoclase phenocryst, under crossed polarizer; (c)-abundant melanocratic minerals such as biotite, hornblende, accessory minerals sphene, under single polarizer; (d)-banded structure of feldspar, partially sericitized, under crossed polarizer

双目镜下挑选出晶形较好,无明显裂痕和包体的锆石颗粒,并将其粘贴在环氧树脂表面,打磨抛光后露出锆石的表面,对其进行透射光、反射光和阴极发光 (CL) 图像的采集。锆石 U-Pb 测试在中国科学院地质与地球物理研究所多通道等离子质谱实验室完成。测试仪器为 Agilent 7500a 四极杆等离子体质谱仪 (Q-ICPMS) 和 193nm 的激光剥蚀进样系统。测样时激光束直径 40 ~ 60μm,剥蚀时间 80 ~ 120s,剥蚀深度为 40 ~ 60μm。以国际标准锆石 91500, GJ-1 作为标样,美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃 NIST610 作为外标,²⁹Si 为内标。测试使用的激光脉冲速率为 8 ~ 10Hz,激光束脉冲能量 0.6 ~ 1.3MJ。具体分析过程及数据精度等详见 Griffin *et al.* (2004), Jackson *et al.* (2004), 谢烈文等 (2008)。数据通过 GLITTER (Van Achterbergh *et al.*, 2001) 软件计算获得相应的同位素比值,年龄及误差,并采用 Andersen (2002) 的方法进行必要的普通铅校正。年龄计算采用国际标准程序 Isoplot 程序出图 (Ludwig, 2001)。

3.3 主微量元素测试

对新鲜的双顶沟岩石样品进行了主、微量元素测试工

作。测试工作在核工业地质研究院完成。主量元素测试方法为 X 射线荧光光谱法测定。测试仪器为飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪,分析精度优于 5%。微量元素利用酸溶法制备样品并在 HR-ICPMS (Element I) 电感耦合等离子体质谱测试。分析精度为:当元素含量大于 10 × 10⁻⁶,精度优于 5%,当含量小于 10 × 10⁻⁶时,精度优于 10%。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

辽宁青城子矿田双顶沟岩体的锆石 U-Pb 年代学数据列于表 1 中。显微镜和锆石透反射观察显示,双顶沟岩体锆石呈自形晶,较小,长约 50 ~ 200μm,长短轴比主要分布在 1 : 1 到 1 : 2 之间。阴极发光 (CL) 图像 (图 3) 显示锆石均发育振荡环带。锆石微量元素测试数据显示,双顶沟岩体锆石²³⁸U = 494 × 10⁻⁶ ~ 1302 × 10⁻⁶, ²³²Th = 194 × 10⁻⁶ ~ 966 × 10⁻⁶, Th/U = 0.39 ~ 0.81。结合振荡环带和锆石的 U, Th 含量可以判断测试的锆石均为岩浆锆石。

双顶沟岩体锆石 U-Pb 协和年龄作图 (图 4) 上除了 4 个

表 1 辽宁青城子矿田双顶沟岩体锆石 U-Pb 定年数据

Table 1 Zircon U-Pb data for Shuangdinggou monzogranite, Qingchengzi orefield, Liaoning

序号	测点号	含量(×10 ⁻⁶)		$\frac{\text{Th}}{\text{U}}$	同位素比值						年龄(Ma)					
		²³² Th	²³⁸ U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
双顶沟黑云母二长花岗岩 18 个测点年龄:224.2 ± 1.2Ma(²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 加权平均年龄)																
1	QCZ-3-1	380.3	661.2	0.58	0.05287	0.00109	0.26274	0.00444	0.03604	0.00042	323	48	237	4	228	3
2	QCZ-3-2	439.9	826.2	0.53	0.05043	0.00078	0.24864	0.00353	0.03576	0.00041	215	15	225	3	226	3
3	QCZ-3-3	311.6	733.9	0.42	0.05052	0.00106	0.24703	0.00475	0.03547	0.00046	219	22	224	4	225	3
4	QCZ-3-4	411.9	761.6	0.54	0.05078	0.00084	0.24918	0.00377	0.03559	0.00042	231	16	226	3	225	3
5	QCZ-3-5	440.1	869.4	0.51	0.05074	0.00095	0.24757	0.00424	0.03539	0.00043	229	19	225	3	224	3
6	QCZ-3-6	613.9	1077	0.57	0.04871	0.00085	0.24082	0.00386	0.03585	0.00042	134	18	219	3	227	3
7	QCZ-3-7	462.5	792.3	0.58	0.05068	0.00102	0.24499	0.00451	0.03506	0.00044	226	21	222	4	222	3
8	QCZ-3-8	497.3	828.1	0.60	0.05059	0.00089	0.24419	0.00393	0.035	0.00042	222	18	222	3	222	3
9	QCZ-3-9	966	1302	0.74	0.0506	0.00074	0.24822	0.00332	0.03557	0.00039	223	14	225	3	225	2
10	QCZ-3-10	663.5	984.4	0.67	0.05359	0.00094	0.26258	0.0042	0.03553	0.00042	354	17	237	3	225	3
11	QCZ-3-11	387.1	777	0.50	0.05057	0.00084	0.24642	0.00374	0.03533	0.00041	221	16	224	3	224	3
12	QCZ-3-12	548	888.5	0.62	0.05456	0.00113	0.26507	0.00499	0.03522	0.00045	394	21	239	4	223	3
13	QCZ-3-13	194.3	494.8	0.39	0.04951	0.00091	0.24205	0.00406	0.03544	0.00042	172	19	220	3	225	3
14	QCZ-3-14	699.8	1054	0.66	0.05203	0.00072	0.25163	0.0032	0.03507	0.00038	287	13	228	3	222	2
15	QCZ-3-15	591.1	1017	0.58	0.0505	0.00072	0.24492	0.00321	0.03516	0.00038	218	14	222	3	223	2
16	QCZ-3-16	522.7	939.5	0.56	0.05065	0.00078	0.24666	0.0035	0.0353	0.0004	225	15	224	3	224	2
17	QCZ-3-17	477.9	897.7	0.53	0.05062	0.00082	0.24744	0.00365	0.03544	0.0004	224	16	224	3	225	2
18	QCZ-3-18	734	1189	0.62	0.05062	0.00062	0.24669	0.00276	0.03533	0.00037	224	12	224	2	224	2



图 3 辽宁青城子矿田双顶沟岩体锆石阴极发光(CL)图像
Fig.3 CL images of representative zircons of Shuangdinggou monzogranite in Qingchengzi orefield, Liaoning

年龄有点偏离谐和线外(QCZ-3-1,6,10,12),多数数据点在U-Pb 谐和线附近(图4),经过普通铅校正以后,以²⁰⁶Pb/²³⁸U 计算(误差为2σ)得到加权平均年龄为224.2±1.2Ma(n=18,MSWD=0.37),代表岩浆结晶年龄。

前人对新岭岩体进行过U-Pb 定年工作,得到年龄为225.3±1.8Ma(Yu *et al.*, 2009),可见双顶沟岩体和新岭岩体年龄一致。前人航磁资料揭示两者在深部相连(芮宗瑶等,1994),这次定年结果确定了这一推测。

4.2 岩体地球化学特征

4.2.1 主量元素特征

双顶沟黑云母二长花岗岩的主量元素数据(表2)显示,

SiO₂ 含量在69.07%~71.31%之间,K₂O 3.53%~5.22%,Na₂O 3.87%~4.14%,K₂O/Na₂O=0.85~1.32。在K₂O-SiO₂ 图解上投在高钾钙碱性系列,个别点投在过渡到钾玄岩系列(图5a)。里特曼指数σ⁴³在1.95~3.32之间,大部分小于3.3,指示其属于钙碱性岩石系列。Al₂O₃ 在12.46~14.48之间,A/CNK<1(0.88~0.92),具有准铝质特征(图5b)。另外相对较高的MgO(0.79%~1.33%),FeO(0.6%~2.55%)。分异指数不高,在84.56~89.32之间。利用主量元素计算的CIPW 标准矿物含量可知,样品中Q 大于20%,据Q,An,Ab,Or 含量按三氏法经验公式计算碱性长石A 和斜长石P 含量并投影到QAP 图解(图5c),岩石全部落入二长花岗岩区域。

表 2 辽宁青城子矿田双顶沟岩体主量元素含量(wt%)

Table 2 Bulk-rock major element data for Shuangdinggou monzogranite in Qingchengzi orefield, Liaoning (wt%)

样品号	DB-20	DB-21	DB-22	DB-23	DB-24	DB-25	Db-19
SiO ₂	70.42	71.22	70.06	69.83	70.13	71.31	69.07
TiO ₂	0.55	0.43	0.36	0.54	0.49	0.58	0.44
Al ₂ O ₃	13.07	13.36	14.18	13.25	13.61	12.46	14.48
Fe ₂ O ₃ ^T	3.35	3.12	2.71	3.9	3.15	3.69	3.15
MnO	0.051	0.048	0.044	0.061	0.05	0.059	0.048
MgO	0.91	0.9	0.79	1.21	0.92	1.33	1.1
CaO	2.17	1.84	1.75	2.06	1.92	2.21	1.9
Na ₂ O	4.14	4.01	3.95	3.82	3.97	3.87	4.13
K ₂ O	3.55	4.28	5.22	4.65	4.99	3.53	5.13
P ₂ O ₅	0.2	0.19	0.18	0.24	0.2	0.3	0.21
FeO	1.95	0.65	0.6	2.15	1.85	2.55	1.9
LOI	1.48	0.51	0.67	0.43	0.57	0.59	0.3
TOTAL	101.84	100.56	100.51	102.14	101.85	102.48	101.86
A/CNK	0.895	0.917	0.925	0.880	0.882	0.877	0.916
A/NK	1.227	1.190	1.167	1.171	1.141	1.223	1.173
σ ⁴³	2.16	2.43	3.1	2.7	2.98	1.95	3.32
石英(Q)	27.3	26.83	22.7	23.94	22.96	28.9	19.8
磷灰石(Ap)	0.39	0.37	0.35	0.47	0.39	0.59	0.41
锆石(Zr)	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
磁铁矿(Mt)	1.73	1.25	1.15	2.05	1.74	2	1.780

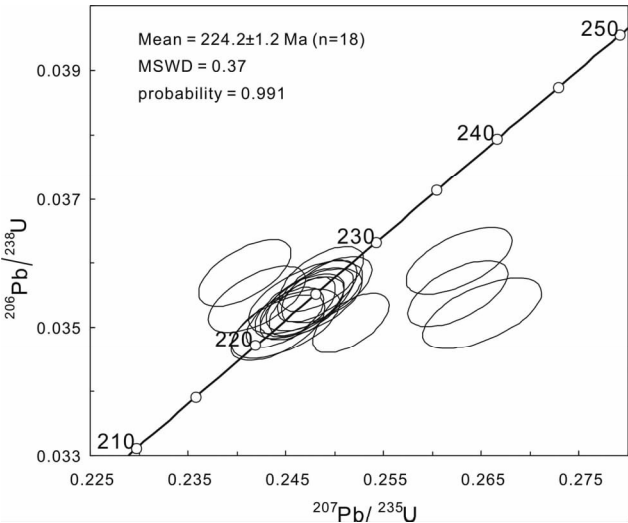


图 4 辽宁青城子矿田双顶沟似斑状黑云母二长花岗岩的 U-Pb 协和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram of zircon from Shuangdinggou monzogranite in Qingchengzi orefield, Liaoning

4. 2. 2 微量元素特征

微量元素结果表明(表 3), ΣREE 为 249 × 10⁻⁶ ~ 469 × 10⁻⁶, 其中 (La/Yb)_N = 35. 43 ~ 79. 02, (Gd/Yb)_N = 2. 97 ~ 3. 64, (La/Sm)_N = 6. 28 ~ 11. 20, LREE/HREE = 23. 09 ~ 35. 10, δEu = 0. 68 ~ 0. 97, 双顶沟岩体稀土总量很高, 轻重稀土之间的分馏很强烈, 轻稀土之间有一定分馏, 但是重稀土

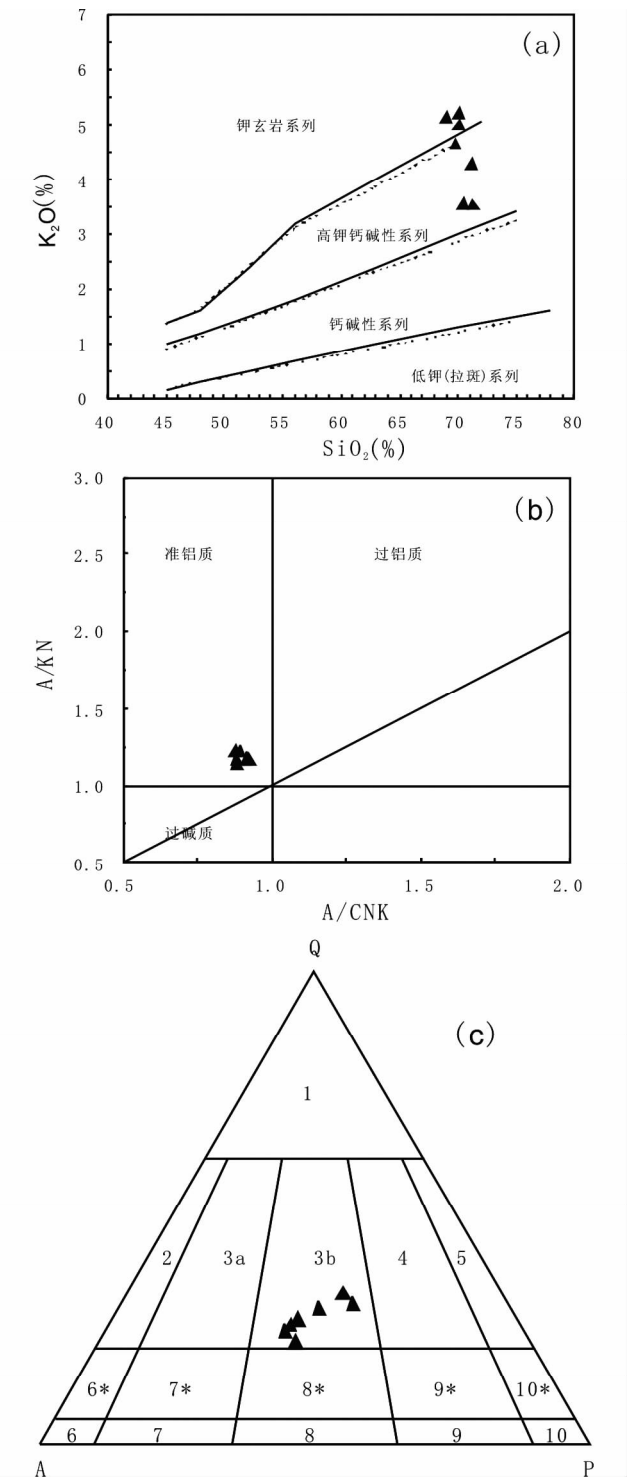


图 5 青城子矿田双顶沟黑云母二长花岗岩的 SiO₂-K₂O 相关图(a)、A/CNK-A/NK 相关图(b, 据 Maniar and Piccoli, 1989)和 QAP 图解(c, 据 Streckeisen and Le Maitre, 1979)

Fig. 5 SiO₂-K₂O diagram (a), A/CNK-A/NK diagram (b, after Maniar and Piccoli, 1989) and QAP diagram (c, after Streckeisen and Le Maitre, 1979) of Shuangdinggou monzogranite in Qingchengzi orefield

表 3 辽宁青城子矿田双顶沟岩体微量元素含量(× 10⁻⁶)

Table 3 Trace element data for Shuangdinggou monzogranite in Qingchengzi orefield, Liaoning (× 10⁻⁶)

样品号	DB-20	DB-21	DB-22	DB-23	DB-24	DB-25	Db-19	样品号	DB-20	DB-21	DB-22	DB-23	DB-24	DB-25	Db-19
Li	35.8	35	29.3	37.5	32.3	43.9	34.7	Tb	0.665	0.442	0.465	0.546	0.606	0.575	0.444
Be	4.52	4.43	3.63	4.28	4.42	4.62	4.34	Dy	3.11	1.98	2.15	2.48	2.74	2.64	2.07
Sc	4.27	4.37	4.84	5.88	4.82	5.92	4.6	Ho	0.502	0.327	0.35	0.418	0.455	0.422	0.342
V	37.1	31.9	31.8	38.9	34.5	41.9	32.2	Er	1.41	0.929	0.937	1.21	1.24	1.23	0.952
Cr	25.7	25	26.5	28.3	26.3	29.9	22.9	Tm	0.212	0.144	0.143	0.176	0.197	0.179	0.139
Co	6.13	5.92	5.08	7.16	5.88	7.82	5.87	Yb	1.28	0.867	0.872	1.16	1.11	1.12	0.9
Ni	5.88	5.12	5.7	8.29	7.64	9.25	6.47	Lu	0.19	0.145	0.14	0.187	0.183	0.183	0.131
Cu	6.36	2.2	3.13	2.88	2.81	3.28	3.68	Ta	2.04	1.31	1.31	1.69	1.92	1.75	1.29
Zn	53.6	49.9	56.1	55.9	47	64.9	53.7	W	2	0.22	0.247	0.134	0.304	0.415	0.104
Ga	24	22.5	23	22.8	23.3	23.8	23.2	Tl	0.916	1.06	1.03	1.16	1.07	1.09	1.02
Rb	177	194	211	218	202	204	204	Pb	21.4	23.6	25.9	24.5	25.6	20.1	29.1
Sr	561	561	671	563	572	458	758	Bi	0.072	0.062	0.061	0.059	0.063	0.068	0.063
Y	13.3	9.23	9.55	11.7	12.1	12.2	9.54	Th	45.9	33.1	24.6	31.1	29.1	39.4	30.1
Nb	39	26.3	26.4	33.2	35.4	35.3	27.4	U	3.84	3.17	2.95	3.33	2.73	4.24	3.1
Mo	0.372	0.439	0.274	0.235	0.371	0.341	0.398	Zr	199	198	182	236	200	271	180
Cd	0.085	0.053	0.057	0.049	0.057	0.031	0.023	Hf	5.47	5.47	5.3	6.5	5.04	7.13	4.75
In	0.027	0.024	0.028	0.032	0.025	0.031	0.022	ΣREE	469.3	263.3	273.1	249.3	297.8	321.7	298.0
Sb	0.036	0.012	0.027	0.019	0.029	0.011	0.039	LREE	456.3	254.9	264.3	238.9	286.8	310.9	289.2
Cs	2.76	2.91	2.56	3.19	2.79	3.78	2.13	HREE	13.00	8.39	8.79	10.35	11.00	10.85	8.80
Ba	786	952	1388	950	1101	576	1502	LREE/HREE	35.10	30.36	30.07	23.09	26.07	28.66	32.87
La	141	77.5	79.3	57.3	72.4	86.9	79.3	(La/Yb) _N	79.02	64.12	65.23	35.43	46.79	55.66	63.20
Ce	213	118	119	119	145	150	147	δEu	0.71	0.82	0.91	0.81	0.88	0.68	0.97
Pr	22.7	12.7	13.5	12.3	14.2	15.6	13.2	(La/Sm) _N	11.20	9.93	8.97	6.28	7.38	8.77	9.57
Nd	69.9	40.5	45.4	43.1	47.3	50.8	42.9	(Gd/Yb) _N	3.64	3.40	3.54	2.97	3.33	3.32	3.51
Sm	8.13	5.04	5.71	5.89	6.33	6.4	5.35	Nb/Ta	19.12	20.08	20.15	19.68	18.44	20.17	21.24
Eu	1.58	1.13	1.37	1.31	1.53	1.19	1.43	Zr/Hf	36.38	36.20	34.34	36.31	39.68	38.01	37.89
Gd	5.63	3.56	3.73	4.17	4.47	4.5	3.82								

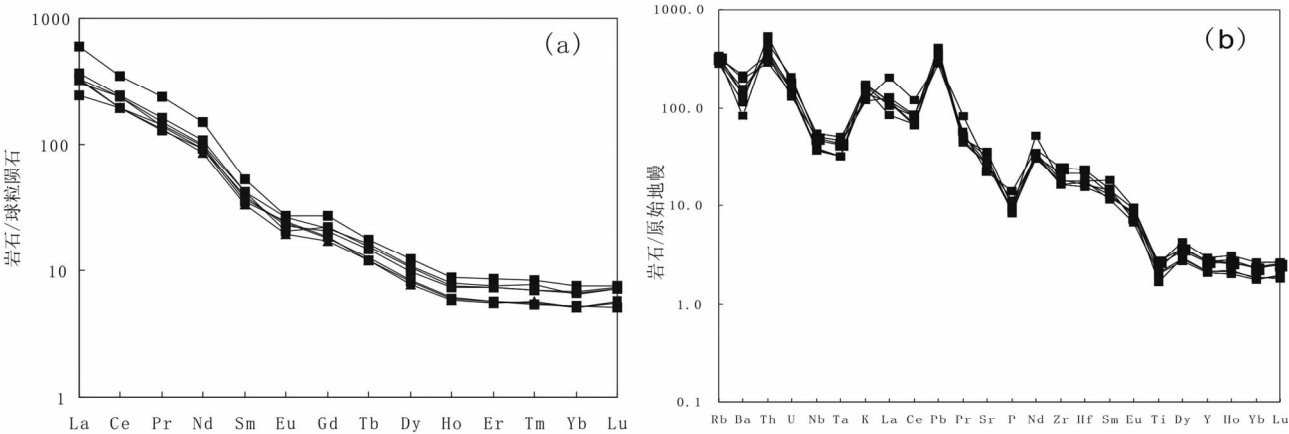


图 6 辽宁青城子矿田双顶沟黑云母二长花岗岩的稀土配分曲线(a)和微量蛛网图(b) (标准值据 Sun and Mcdonough, 1989)
Fig.6 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive-mantle normalized trace element pattern (b) for Shuangdinggou monzogranite in Qingchengzi orefield, Liaoning (normalization values after Sun and Mcdonough, 1989)

之间分馏较弱, Eu 负异常不明显。在球粒陨石标准化图解 (图 6a) 上表现为陡的右倾曲线。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图 (图 6b) 上, Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素明显亏损, 而 Rb、Th、K、Pb 等大离子亲石元素富集。数据显示高 Sr ($458 \times 10^{-6} \sim 758 \times 10^{-6}$), Ba ($576 \times 10^{-6} \sim 1502 \times 10^{-6}$) 含量, 低的 Y ($9.23 \times 10^{-6} \sim 13.3 \times 10^{-6}$), Yb ($0.867 \times 10^{-6} \sim 1.28 \times 10^{-6}$) 含量。Rb/Sr 比值较低, 集中在 $0.27 \sim 0.44$, Nb/Ta = $18.4 \sim 21.2$, Zr/Hf 在 $34.3 \sim 39.68$ 之间。

5 讨论

5.1 成岩时代讨论

区域上,辽东半岛中生代岩浆活动主要有三期(Yang *et al.*, 2007b; 吴福元等, 2005):晚三叠世(233 ~ 212Ma)、侏罗纪(156 ~ 180Ma)与早白垩世(131 ~ 117Ma)。前人资料显示双顶沟锆石 U-Pb 年龄为 200 ~ 220Ma(蒋少涌和魏菊英, 1989)和 230.7 ± 5Ma(芮宗瑶等, 1994)。我们给出精确的锆石 U-Pb 年代学结果:双顶沟岩体侵位年龄为 224.2 ± 1.2Ma, 结合矿区内小佟家堡子闪长岩 214 ± 2Ma(吴福元等, 2005)说明矿区内存在一期晚三叠世岩浆活动, 区域上岫岩岩体(211 ± 1Ma, Yang *et al.*, 2007b), 老尖顶子闪长岩(220 ± 1Ma, 吴福元等, 2005)都对应于该期晚三叠世岩浆活动。更大范围上, 胶东和吉南地区也具有可对比的同一时期的岩浆作用:胶东地区存在三叠纪晚期 210Ma 左右岩浆活动(郭敬辉等, 2005), 如甲子山正长岩(205 ~ 215Ma, 林景仟等, 1996; Chen *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2005)。还有吉南的蚂蚁河岩体(224 ± 4Ma, 225.8 ± 3.3Ma, 裴福萍, 2008), 通化地区的龙头岩体(TIMES U-Pb 定年结果 203 ~ 217Ma, 路孝平等, 2003), 可以看出华北克拉通东部从胶东-辽东-吉南形成一条北东东向展布的晚三叠世岩浆岩带。

矿区内该期岩浆活动可能与成矿密切相关。据 Yu *et al.* (2009)对榛子沟矿区闪锌矿的 Rb-Sr 定年结果(221Ma), 铅锌成矿与该期岩浆岩年龄接近, 说明至少存在一期矿化与该晚三叠世岩浆作用密切相关, 野外工作发现新岭岩体附近钻孔深部发现花岗斑岩里直接发育铅锌矿化, 而且新岭岩体本身发育很强的硅化, 黄铁矿化等热液蚀变(图 7), 进一步说明新岭岩体可能提供成矿热液。最近完成的矿区内辉钼矿 Re-Os 定年显示存在一期约 165Ma 的钼矿化(作者未刊资料)与区内燕山期的姚家沟岩体对应。另外矿区内纹层状浅褐色闪锌矿体的存在结合前人资料对硅质岩的研究(刘志远等, 2007), 说明可能还存在更早一期古元古代的喷流沉积成矿作用。综上, 青城子矿田可能存在三期矿化, 最早一期早元古代的裂谷盆地的喷流沉积形成纹层状矿体, 中生代三叠纪岩浆作用改造并叠加形成第二期, 最后白垩纪岩浆岩进一步侵位并叠加岩浆热液形成一期以 Mo 为中心的, 边部叠加改造 Pb、Zn, 更外侧为 Au、Ag 的矿化体系。

5.2 岩石成因及源区性质

双顶沟岩体高硅, 富碱, 钾钠比接近于 1, 硅钾投图显示高钾钙碱性系列, A/CNK < 1.1, 轻重稀土元素分馏很显著, 弱-中等 Eu 负异常, 表现为 I 型花岗岩特征。另外值得注意的是, 该岩体微量元素亏损重稀土元素, 具有高 Sr ($458 \times 10^{-6} \sim 758 \times 10^{-6}$), 低 Y ($9.23 \times 10^{-6} \sim 13.3 \times 10^{-6}$) < 18×10^{-6} 和 Yb ($0.872 \times 10^{-6} \sim 1.28 \times 10^{-6}$) < 1.9×10^{-6} 特征, 表现为具有埃达克质特征的岩浆岩。综上可把该岩体定位于

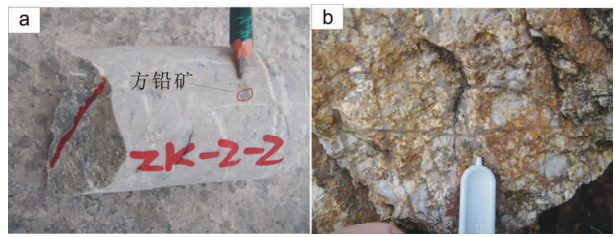


图 7 晚三叠世岩浆活动与矿化关系

(a)-新岭岩体附近的钻孔中岩体中发育方铅矿化; (b)-新岭岩体野外露头, 发育强烈硅化

Fig. 7 Late Triassic magma activities correlate with mineralization

(a)-galena developed in intensely altered intrusion in drill near Xinling intrusion; (b)-outcrop of Xinling intrusion, demonstrating strong silicification

具有埃达克质岩石亲和性的准铝质 I 型花岗岩。

岩浆岩微量元素在不同地质体间的分配具体主要受制于三个过程:(1)源区物质部分熔融过程中不同矿物相的熔离或残留, 可以有效的指示源区性质;(2)结晶过程的不断分异;(3)岩浆混合作用。对本岩体而言, 岩浆分异指数不高, 低的 Rb/Sr 值和高的 Nb/Ta 也不符合高演化花岗岩特征(一般很低), 所以岩体结晶分异作用并不显著。另一方面, 野外观察到岩体局部含有基性暗色包体, 并且辽东地区三叠纪岩体普遍发育镁铁质包体(杨进辉和吴福元, 2009), 所以存在岩浆混合作用的可能性。那么对双顶沟岩体我们需要考虑到源区不同矿物相的熔离或残留和混合作用对微量元素分配的共同制约, 据此分析岩浆源区及成因特征。

首先, 微量元素蛛网图显示富集 K、Rb、U、Th 等大离子亲石元素以及 Pb 而亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 由于 K、Rb、Sr、U、Th、REE 等大离子亲石元素在壳幔分异过程中倾向于进入熔体相(地壳)而在地壳中富集, 这说明具有壳源特征。进一步来说, 高 Sr、Ba 含量以及不明显的 Eu 负异常说明熔融过程中源区没有斜长石残留, 强烈亏损的 HREE 和 Y 说明源区中存在石榴子石等富含重稀土元素的矿物相残留, 说明源区较深。另外埃达克岩的形成压力多大于 1.5GPa, 斜长石和角闪石发生分解, 石榴子石(刘红涛等, 2004; 张旗等, 2005; Rapp *et al.*, 1999, 2003)和金红石残留(金红石稳定的压力下限为 1.5GPa, Xiong *et al.*, 2005), 指示埃达克岩浆是在含金红石榴辉岩相条件下熔融产生, 岩浆起源很深, 对应于 60 ~ 70km 深度。

埃达克质岩石起源有特殊的指示意义, 其形成机制目前有多种说法, 最早提出是年轻洋壳熔融的产物(Defant and Drummond, 1990, 1993), 而后提出的模式包括:加厚下地壳熔融(Kay and Kay, 1991; Kay and Abbruzzi, 1996; Kay and Mpodozis, 2002; Wang *et al.*, 2005; 张旗等, 2001)、拆沉下地壳熔融(Kay and Kay, 1993; Xu *et al.*, 2002), 以及低压下基性岩浆结晶分异(Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*,

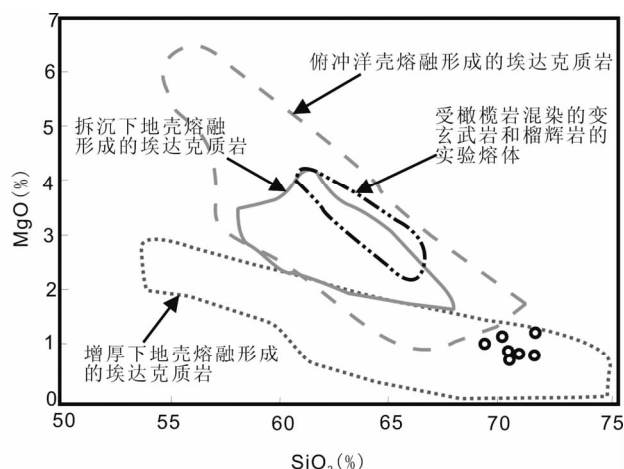


图8 辽宁青城子铅锌矿双顶沟岩体 MgO-SiO_2 判别图(底图据 Wang *et al.*, 2007)

Fig. 8 MgO-SiO_2 diagram for Shuangdinggou monzogranite in Qingchengzi orefield, Liaoning (after Wang *et al.*, 2007)

2006)等。在埃达克质岩石成因判别 $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ 图上, 双顶沟岩体样品落入由增厚下地壳熔融形成的埃达克质岩图区内(图8), 与前述的较深的源区深度结果一致。另外张旗等(2001)指出埃达克岩 K, Na 含量差异对应不同的形成机制, 富 Na 埃达克岩主要形成于板片俯冲消减过程, 而富 K 埃达克岩($\text{Na}_2\text{O/K}_2\text{O}$ 约为 1, 可划归到高钾钙碱性系列)源自加厚地壳熔融, 该岩体钾钠比约为 1, 说明为加厚下地壳熔融产物。

Nb、Ta 地球化学性质接近, 通常不发生分离, 在特定地质体系中比值保持恒定, 可作为判别源区物质的地球化学标志。双顶沟岩体 Nb/Ta 比值高于大陆地壳(11 ~ 17.5, Barth *et al.*, 2000)和原始地幔(17.5, Sun and McDonough, 1989), 这在花岗岩类中不常见, 一般花岗岩 Nb/Ta 比值 < 10。前人研究显示基性岩墙群 Nb/Ta 比值较高, 多数在 20 左右(赵振华等, 2008)。Yang *et al.* (2007a)对辽东半岛晚三叠世三组基性岩墙研究表明岩体具有高 Nb/Ta 比值(16 ~ 25), 结合 Sr-Nd-Hf 等同位素分析分别对应三种源区: 拆沉的下地壳发生熔融形成的熔体交代岩石圈地幔; 古老的再富集的岩石圈地幔的重熔或者富集软流圈地幔的部分熔融、并有上地壳物质的混染。三组结果都显示存在幔源物质的参与, 这说明了幔源物质的参与是 Nb/Ta 比值高的主要原因, 所以双顶沟岩体形成过程中有幔源物质参与。结合野外观察的岩体中含有暗色包体现象, 推测存在幔源基性岩浆与酸性岩浆的混合作用。

综上, 双顶沟岩体轻重稀土分异显著, 亏损 HREE 和 Y 等, 源区残留有石榴石和金红石, 属于加厚下地壳部分熔融的埃达克质岩, 并存在一定岩浆混合作用。但是该加厚下地壳的具体属性有两种可能: (1) 加厚的古老下地壳, 幔源玄武质岩浆底侵诱发下地壳部分熔融, 并发生与底侵的玄武质岩

浆的混合作用; (2) 新底侵的增厚玄武质下地壳, 这样的新生下地壳具有一定幔源特征。地幔玄武质岩浆底侵于地壳底部, 形成新增生的玄武质下地壳, 而后玄武质岩浆底侵作用再次发生, 使得新生下地壳发生部分熔融形成埃达克质岩。具体分析有待进一步数据的揭示。

5.3 地质意义

研究区大地构造背景属于华北克拉通东部, 其成岩成矿及大地构造等地质演化过程可能受制于中亚造山带(兴蒙造山带), 苏鲁大别造山带以及滨太平洋构造域三个构造域的影响, 但是就晚三叠世这个时限来说, 太平洋俯冲对东北的影响要更晚(早侏罗世, 中侏罗世), 而兴蒙造山带南缘显示造山后的引张环境(Wu *et al.*, 2003), 主要对应东西向展布的碱性岩带(牟保磊和阎国翰, 1992; 阎国翰等, 2000), 均与该岩体特征不符, 所以该岩体可能是苏鲁大别造山带有关。前述的北东东向的胶东-辽东-吉南晚三叠世岩浆岩带与苏鲁大别超高压变质带展布方向一致, 说明该岩浆岩带与扬子-华北俯冲相关。另外辽东地区南部晚三叠世辉绿岩中新元古代年龄捕获锆石(杨进辉等, 2004)的存在说明, 该地区这一时期的岩浆源区中存在扬子克拉通基底物质, 因为新元古代岩浆事件在扬子克拉通基底岩石中是广泛发育的, 而在华北克拉通基底中很少发现(郑永飞, 2003)。进一步证明了大别-苏鲁超高压变质带对本区晚三叠世岩浆活动的影响。

该晚三叠世岩浆岩带形成机制有两种解释, 杨进辉和吴福元(2009)认为华北东部的晚三叠世花岗岩与华北岩石圈拆沉作用相关。而 Chen *et al.* (2003) 和郭敬辉等(2005)对胶东地区的三叠纪岩浆岩的研究认为是板片断离的产物。前人研究表明大别山-苏鲁造山带超高压变质时代是 240 ~ 226 Ma (Rowley *et al.*, 1997; Li *et al.*, 2000; Wan *et al.*, 2005), 双顶沟岩体侵位时间(224 Ma)与该时间接近, 说明其与扬子-华北板块碰撞事件时间一致, 且在构造判别投图上属于同碰撞花岗岩(图9), 而岩石圈拆沉作用通常发生在后碰撞阶段的调整过程。另外由于拆沉下地壳熔融形成埃达克质熔体上升过程中存在与地幔相互作用, 所以该成因的岩浆岩一般具有高的 MgO 含量(一般大于 2.0%)、相对高的过渡族元素(Sc、V、Cr、Co 和 Ni 等)含量(Xu *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006), 但是双顶沟岩体不具备这些特征, 所以岩石圈拆沉作用可能并非该岩浆形成的主要机制。由于该埃达克质岩反映加厚下地壳起源的特征, 并且侵位时间与大别-苏鲁造山带峰期变质时间接近, 我们推断, 双顶沟岩浆岩形成可能与华北-扬子深俯冲的大陆地壳折返有关的板片断离作用有关: 陆陆碰撞超高压条件下形成榴辉岩质加厚下地壳, 深俯冲过程中俯冲板片发生拉伸变形并发生板片断离, 软流圈通过裂隙上涌并导致上部地幔部分熔融形成玄武质岩浆, 该幔源岩浆底侵到加厚下地壳底部诱发部分熔融形成埃达克质岩浆。

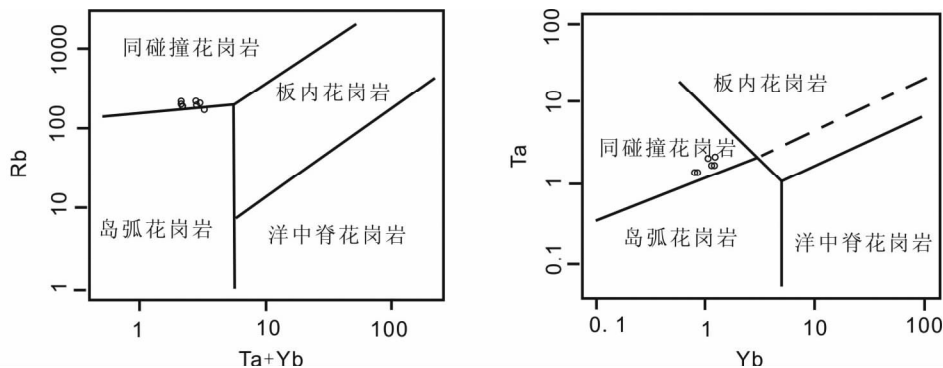


图9 辽宁青城子铅锌矿双顶沟岩体构造判别图解(据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 9 Discrimination diagrams for tectonic settings of Shuangdinggou monzogranite, Qingchengzi orefield, Liaoning (after Pearce *et al.*, 1984)

6 结论

对辽宁青城子铅锌矿田内晚三叠世双顶沟黑云母二长花岗岩的年代学和地球化学研究得到以下结论:

(1) 双顶沟黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 224.2 ± 1.2 Ma, 属于晚三叠世岩浆活动, 是胶东-辽东-吉南晚三叠世岩浆带的一部分, 该期岩浆活动直接影响青城子矿田内一期铅锌矿化作用。

(2) 双顶沟岩体高 SiO_2 , 富碱, 轻重稀土元素分馏强烈, 并具有高 Sr 低 Y, Yb, 低 Nb, Ta 特征, 反应出埃达克质地球化学亲和性, 可能是玄武岩岩浆底侵引发的加厚下地壳的部分熔融, 另外 Nb/Ta 比值较高, 说明存在幔源物质的参与, 与岩浆混合作用相关。

(3) 结合岩体地球化学特征和区域演化背景, 该岩体是同碰撞形成的埃达克质岩石, 可能是扬子-华北板块深俯冲过程中板片断离的产物。

致谢 本文锆石 U-Pb 实验测试过程 and 数据分析过程中得到中科院地质与地球物理研究所多通道等离子质谱实验室张艳斌老师的帮助; 野外工作得到青城子铅锌矿区多位同行和员工的大力协助; 文章写作过程得到刘红涛老师、徐兴旺老师的指导和帮助; 在此一并表示感谢。

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1–2): 50–79
 Barth MG, McDonough WF and Rudnick RL. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust. *Chemical Geology*, 165: 197–213
 Castillo PR, Janney PE and Solidum RU. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134(1): 33–51

Chen JF, Xie Z, Li HM, Zhang XD, Zhou TX, Park YS, Aan KS, Chen DG and Zhang X. 2003. U-Pb zircon ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China. *Geochemical Journal*, 37: 35–46
 Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662–665
 Defant MJ and Drummond MS. 1993. Mount St. Helens: Potential example of partial melting of subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21: 547–550
 Dong YS and Yang YC. 2006. Effect of the rift evolution on Pb-Zn mineralization: A case study of Liaoji rift. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21(1): 19–22 (in Chinese with English abstract)
 Griffin WL, Belousova EA, Shee SR, Pearson NJ and O'Reilly SY. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Research*, 131: 231–282
 Guo JH, Chen FK, Zhng XM, Siebel W and Zhai MG. 2005. Evolution of syn-to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt, eastern China: Zircon U-Pb geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1281–1301 (in Chinese with English abstract)
 Jackson SE, Pearson NJ, Griffin WL and Belousova EA. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211: 47–69
 Jiang SY and Wei JY. 1989. Geochemistry of the Qingchengzi lead-zinc deposit. *Mineral Deposits*, 8(4): 20–28 (in Chinese with English abstract)
 Kay RW and Kay SM. 1991. Creation and destruction of lower continental crust. *Geologische Rundschau*, 80: 259–278
 Kay RW and Kay SM. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219(1–3): 177–189
 Kay SM and Abbruzzi JM. 1996. Magmatic evidence for Neogene lithospheric evolution of the central Andean “flat slab” between 30°S and 32°S . *Tectonophysics*, 259: 15–28
 Kay SM and Mpodozis C. 2002. Magmatism as probe to the Neogene shallowing of the Nazca plate beneath the modern Chilean flatslab. *Journal of South American Earth Sciences*, 15: 39–57
 Li SG, Jagoutz E and Chen Y. 2000. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, central China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 1077–1093
 Lin JQ, Tan DJ and Jin Y. 1996. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages of Mesozoic igneous activities in western Shandong. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(3): 213–220 (in Chinese with English abstract)
 Liu GP. 1999. Isospatial metallogenesis in Qingchengzi orefield, Liaoning. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 8(5): 277

- 282 (in Chinese with English abstract)
- Liu GP and Ai YF. 2002. Study on ore-forming epoch of Xiaotongjapuzi gold deposit, Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 21 (1): 53 - 57 (in Chinese with English abstract)
- Liu HT, Zhang Q, Liu JM, Ye J, Zeng QD and Yu CM. 2004. Adakite versus porphyry copper and epithermal gold deposits: A possible metallogenetic specialization of magmatism required in-deep assessment. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 205 - 218 (in Chinese with English abstract)
- Liu HX, Kong HQ and Yang YC. 2006. Geologic characteristics and genesis of Xiaotongjapuzi gold deposit, Liaoning Province. *Gold*, 5: 13 - 16 (in Chinese with English abstract)
- Liu J. 1995. Tectonic deformation texture and ore-controlling features of Qingchengzi orefield. *Geology of Liaoning Province*, 2: 148 - 157 (in Chinese with English abstract)
- Liu ZY, Xu XC, Tian YC, Yang DJ, Jiang YZ, Tian SH and Wei M. 2007. Relationship between sedimentation-exhalation ore-forming process and gold-silver polymetallic mineralization in Qingchengzi area, Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 26 (5): 563 - 571 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. Users manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, No. 1a, 55
- Lu XP, Wu FY, Zhao CB and Zhang YB. 2003. Triassic U-Pb age for zircon from granites in the Tonghua area and its response to the Dabie-Sulu ultrahigh-pressure collisional orogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 48(8): 843 - 849 (in Chinese)
- Luo H and Li JJ. 2002. Geological Features of Au, Ag, Pb, Zn, Cu and Co ore deposits and its forming conditions in the eastern region of Liaoning Province, China. *Progress in Precambrian Research*, 25(3 - 4): 240 - 245 (in Chinese with English abstract)
- Macpherson CG, Dreher ST and Thirlwall MF. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 243 (3/4): 581 - 593
- Maniar P and Piccoli P. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101: 635 - 643
- Mu BL and Yan GH. 1992. Geochemistry of Triassic alkaline of subalkaline igneous complexes in the Yan-Liao area and their significance. *Acta Geologica Sinica*, 2: 108 - 121 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956 - 983
- Pei FP. 2008. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic intrusive rocks in southern Liaoning and Jinlin provinces: Constraints on the spatial-temporal extent of the North China Craton destruction. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 1 - 115 (in Chinese with English summary)
- Rapp PR, Shimizu N, Norman MD and Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335 - 356
- Rapp PR, Shimizu N and Norman MD. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. *Nature*, 425: 605 - 609
- Rowley DB, Xue F, Tucker RD, Peng ZX, Baker J and Davis A. 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 151: 191 - 203
- Rui ZY, Shi LD and Fang RH. 1994. Nonferrous Metal Deposits in North Margin and Adjacent Region of North China Block. Beijing: Geological Publishing House, 66 - 67, 518 - 519 (in Chinese)
- Streckeisen A and Le Maitre RW. 1979. A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks. *N. Jb. Miner. Abh.*, 136: 169 - 206
- Sun SS and McDonough F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 42: 312 - 345
- Van Achterbergh E, Ryan C, Jackson SE and Griffin WL. 2001. Appendix 3 data reduction software for LA-ICP-MS. In: Sylvester P (ed.). *Laser-Ablation-ICP-MS in the Earth Sciences. Mineralogical Association of Canada, Short Course*, 239 - 243
- Wan YS, Li RW and Wilde SA. 2005. UHP metamorphism and exhumation of the Dabie Orogen, China: Evidence from SHRIMP dating of zircon and monazite from a UHP granitic gneiss cobble from the Hefei basin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69: 4333 - 4348
- Wang Q, McDermott F, Xu JF, Bellon H and Zhu YT. 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracontinental setting. *Geology*, 33 (6): 465 - 468
- Wang Q, Xu JF, Jian P, Bao ZW, Zhao ZH, Li CF, Xiong XL and Ma JL. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47: 119 - 144
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P and Zi F. 2007. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization. *J. Geology*, 115(2): 149 - 161
- Wang XF, Liu PD, Yang GL, Zhang XM and Yi X. 2010. Analyzing the geological features of the Qingchengzi Pb-Zn ore field. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 26 (2): 2 - 6 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Walker RJ, Ren XW, Sun DY and Zhou XH. 2003. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China. *Chemical Geology*, 197: 107 - 129
- Wu FY, Yang JH and Liu XM. 2005. Geochronological framework of the Mesozoic granitic magmatism in the Liaodong Peninsula, Northeast China. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 305 - 317 (in Chinese with English abstract)
- Xie LW, Zhang YB, Zhang HH, Sun JF and Wu FY. 2008. In-situ simultaneous determination of trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes in zircon and baddeleyite. *Chinese Science Bulletin*, 53: 1565 - 1573
- Xiong XL, Adam J and Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HSFE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218: 339 - 359
- Xu X, Shinjo R, Defant MJ, Wang Q and Papp RP. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rock in the Ningzhen area of East China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30: 1111 - 1114
- Xue CJ, Chen YC, Lu YF and Li HQ. 2003. Metallogenetic epochs of Au and Ag deposits in Qingchengzi ore-clustered area, eastern Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 22 (2): 177 - 184 (in Chinese with English abstract)
- Yan GH, Mou BL, Xu BL, He GQ, Tan LK, Zhao H, He ZF, Zhang RK and Qiao GS. 2000. The geochronological and Sr, Nd, Pb isotopic feature and significance of Triassic alkaline intrusions in Yinshan-Yan-Liao area. *Science in China (Series D)*, 30(4): 383 - 387 (in Chinese)
- Yang JH, Wu FY, Zhang YB and Zhang Q. 2004. Neoproterozoic zircon age discovered in Triassic diabase of southern part of Liaodong Peninsula. *Chinese Science Bulletin*, 49 (18): 1878 - 1882 (in Chinese)
- Yang JH, Chung SL, Wilde SA, Wu FY, Chu MF, Lo CH and Fan HR. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214(1 - 2): 99 - 125
- Yang JH, Sun JF, Chen FK, Simon A Wilde and Wu FY. 2007a. Sources and petrogenesis of Late Triassic dolerite dikes in the Liaodong Peninsula: Implications for post-collisional lithosphere thinning of the eastern north China Craton. *Journal of Petrology*, 48 (10): 1973 - 1997
- Yang JH, Wu FY and Simon A Wilde. 2007b. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North

- China Craton. *Chemical Geology*, 242: 155–175
- Yang JH and Wu FY. 2009. Triassic magmatism and its relation to decratonization in the eastern North China Craton. *Science in China (Series D)*, 39(7): 910–921 (in Chinese)
- Yu G, Chen JF and Xue CJ. 2009. Geochronological framework and Pb, Sr isotope geochemistry of the Qingchengzi Pb-Zn-Ag-Au orefield, Northeastern China. *Ore Geology Reviews*, 35: 367–382
- Zhai AM, Shen BF, Yang CL, Hu XD, Cao XL and Gong XH. 2005. Geological evolvement and ore-forming of the Liaoning-Jilin Paleoproterozoic rift. *Geological Survey and Research*, 28(4): 214–220 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JH and Shi LD. 1992. Regional metallogenic conditions of Proterozoic Pb-Zn deposits in eastern Liaoning-southern Jinling and northern Korea from a point of view on later activities of the rift. *Geological Exploration for Nonferrous Metals*, 1(5): 268–275 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang JH, Wang YL, Zhao TP and Guo GJ. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significance of the adakites in Yanshan Period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236–244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Li CD, Wang Y, Wang YL, Jin WJ, Jia XQ and Han S. 2005. Mesozoic high-Sr and Low-Yb granitoids and low-Sr and high-Yb granitoids in eastern China: Comparison and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1527–1537 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q and Qiao YL. 2008. Some aspects on geochemistry of Nb and Ta. *Geochimica*, 37(4): 304–320 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF. 2003. Magma activities and global changes in Neoproterozoic. *Chinese Science Bulletin*, 48(16): 1705–1720 (in Chinese)
- ### 附中文参考文献
- 董耀松, 杨言辰. 2006. 裂谷演化对铅锌矿成矿作用的影响-以辽吉裂谷为例. *地质找矿论丛*, 21(1): 19–22
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Siebel W, 翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学. *岩石学报*, 21(4): 1281–1301
- 蒋少涌, 魏菊英. 1989. 青城子铅锌矿床的地球化学. *矿床地质*, 8(4): 20–28
- 林景仟, 谭东娟, 金烨. 1996. 鲁西地区中生代火成活动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄. *岩石矿物学杂志*, 15(3): 213–220
- 刘国平. 1999. 辽宁青城子矿田的同位成矿作用. *有色金属矿产与勘察*, 8(5): 277–282
- 刘国平, 艾永富. 2002. 辽宁小佟家堡子金矿床成矿时代探讨. *矿床地质*, 21(1): 53–57
- 刘红涛, 张旗, 刘建明, 叶杰, 曾庆栋, 于昌明. 2004. 埃达克岩与 Cu-Au 成矿作用: 有待深入研究的岩浆成矿关系. *岩石学报*, 20(2): 205–218
- 刘红霞, 孔含泉, 杨言辰. 2006. 辽宁小佟家堡子金矿床地质特征及成因研究. *黄金*, 5: 13–16
- 刘君. 1995. 青城子矿田构造变形结构及其控矿特征. *辽宁地质*, 2: 148–157
- 刘志远, 徐学纯, 田豫才, 杨德江, 蒋永臻, 田树海, 魏民. 2007. 辽东青城子地区喷流-沉积成矿作用与金银多金属矿化关系. *矿床地质*, 26(5): 563–571
- 路孝平, 吴福元, 赵成弼, 张艳斌. 2003. 通化地区印支期花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其与大别-苏鲁超高压带碰撞造山作用之间的关系. *科学通报*, 48(8): 843–849
- 路辉, 李俊建. 2002. 辽东裂谷 Au、Ag、Pb、Zn、Cu、Co 金属矿床地质特征和成矿条件. *前寒武纪研究进展*, 25(3–4): 240–245
- 牟保磊, 阎国翰. 1992. 燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及意义. *地质学报*, (2): 108–121
- 裴福萍. 2008. 辽南-吉南中生代侵入岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学: 对华北克拉通破坏时空范围的制约. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 1–115
- 芮宗瑶, 施林道, 方如恒. 1994. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 66–67, 518–519
- 王秀福, 刘培栋, 桂桂莲, 张秀敏, 衣欣. 2010. 青城子铅锌矿田地质特征. *有色矿冶*, 26(2): 2–6
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. *高校地质学报*, 11(3): 305–317
- 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 孙金凤, 吴福元. 2008. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定. *科学通报*, 53: 220–228
- 薛春纪, 陈毓川, 路远发, 李华芹. 2003. 辽东青城子矿集区金、银成矿时代及地质意义. *矿床地质*, 22(2): 177–184
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 何国琦, 谭林坤, 赵晖, 何中甫, 张任桔, 乔广生. 2000. 燕辽阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义. *中国科学(D辑)*, 30(4): 383–387
- 杨进辉, 吴福元, 张艳斌, 张旗. 2004. 辽东半岛南部三叠纪辉绿岩中发现新元古代年龄锆石. *科学通报*, 49(18): 1878–1882
- 杨进辉, 吴福元. 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏. *中国科学(D辑)*, 39(7): 910–921
- 翟安民, 沈保丰, 杨春亮, 胡小蝶, 曹秀兰, 宫晓华. 2005. 辽东古裂谷地质演化与成矿. *地质调查与研究*, 28(4): 214–220
- 张进红, 施林道. 1992. 辽东-吉南地区和朝鲜北部元古宙铅锌矿的区域成矿条件. *有色金属矿产与勘察*, 1(5): 268–275
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. *岩石学报*, 17(2): 236–244
- 张旗, 李承东, 王焰, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤, 韩松. 2005. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义. *岩石学报*, 21(6): 1527–1537
- 赵振华, 熊小林, 王强, 乔玉楼. 2008. 铌与钽的某些地球化学问题. *地球化学*, 37(4): 304–320
- 郑永飞. 2003. 新元古代岩浆活动与全球变化. *科学通报*, 48(16): 1705–1720