

青海大黑山钨矿黑云二长花岗岩的锆石 U-Pb 同位素定年及岩石地球化学特征*

刘敏^{1,2} 张作衡² 向君峰² 曹德智³ 杨光华⁴

LIU Min^{1,2}, ZHANG ZuoHeng², XIANG JunFeng², CAO DeZhi³ and YANG GuangHua⁴

1. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

2. 中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037

3. 青海省地质调查院,西宁 810012

4. 西安地质矿产勘查开发院,西安 710100

1. School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

3. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, China

4. Xi'an Institute of Geological and Mineral Exploration, Xi'an 710100, China

2013-09-02 收稿, 2013-12-09 改回.

Liu M, Zhang ZH, Xiang JF, Cao DZ and Yang GH. 2014. Zircon U-Pb isotopic dating and lithochemical features of the biotite monzonitic granite in Daheishan tungsten deposit, Qinghai Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1):139 – 151

Abstract The Daheishan tungsten deposit related to the biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons locates at the Caledonian orogeny of Qilian Mountains. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons shows that the formation age of biotite monzonitic granite is 450.2 ± 2.8 Ma, indicating that the pluton was formed at Caledonian magmatic-thermal event. Geochemical data reveal that the biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons is rich in silicon (73.03% ~ 74.18%), alkalis ($K_2O/Na_2O = 1.13 \sim 1.94$, $K_2O + Na_2O = 7.25\% \sim 8.51\%$) and is peraluminous ($A/CNK = 1.04 \sim 1.12$). The biotite monzonitic granites from Baokuhe peraluminous plutons should be high potassic calc-alkaline granite. P_2O_5 content of the granites is low, and shows a trend of decrease with the increase of SiO_2 content. The content of rare earth element is low. Chondrite-normalized REE patterns are right-inclined and display significant negative Eu anomalies. Differentiation of LREE is strong, and that of HREE is weak. Based on spider diagram of trace elements, Th, U, Pb, Zr, Hf are obviously positive anomaly, and Ba, Sr, Ta, Nb, P, Ti are negative anomaly. It suggests that it is an I-type granite. Combined with the tectonic evolution of the North Qilian, we suggest that the biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons formed in the active continental margin, and the magmas were derived from the melting of crustal rocks, followed by crystal fractionation.

Key words Zircon U-Pb age; Geochemistry; Baoku River granite; Daheishan tungsten deposit; Qinghai Province

摘要 大黑山钨矿位于祁连山加里东造山带,其形成与宝库河黑云二长花岗岩密切相关。黑云二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果显示其形成年龄为: 450.2 ± 2.8 Ma,为加里东期岩浆活动的产物。地球化学数据显示,宝库河黑云二长花岗岩富硅(SiO_2 含量为 73.03% ~ 74.18%)、富钾(K_2O/Na_2O 为 1.13 ~ 1.94, $K_2O + Na_2O$ 含量为 7.25% ~ 8.51%)、铝过饱和(A/CNK 为 1.04 ~ 1.12),为过铝质钙碱性-高钾钙碱性花岗岩。 P_2O_5 含量低(0.03% ~ 0.08%),且具有随 SiO_2 含量的增长呈现负增长的趋势。稀土含量低, Eu 明显负异常, LREE 分异强烈, HREE 分异不明显。微量元素蛛网图中 Th、U、Pb、Zr、Hf 呈现明显的正异常, Ba、Sr、Ta、Nb、P、Ti 呈现负异常, 为 I 型花岗岩。结合对区域动力地质背景的分析,表明宝库河黑云二长花岗岩形成于活动大陆边缘,由地壳物质熔融并结晶形成。

关键词 锆石 U-Pb 年龄;地球化学;宝库河花岗岩;大黑山钨矿;青海

中图法分类号 P588.121; P597.3

* 本文受中国地质调查局地质调查工作项目(1212010634001、1212010818090)资助。

第一作者简介:刘敏,女,1983年生,博士生,助理研究员,矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: liuminhello@163.com

1 引言

祁连山加里东造山带是我国西北地区重要的钨资源地,区内相继发现了塔儿沟和小柳沟大型钨矿床及一些中小型矿床(《中国矿床》编委会,1994;毛景文等,1999;Mao *et al.*, 1999a, b; 张作衡等,2002;杨忠堂等,2002, 2004;林国芳和林凤萍,2003),初步显示了该成矿带找钨矿的巨大潜力。大黑山钨矿位于青海宝库河上游大黑山一带,距大通县城120km。该矿床由青海省地质矿产勘查院于2002年发现(曹德智和薛培林,2008^①),目前正处于普查阶段,研究程度较低,已有报导仅限于大黑山钨矿地质特征及找矿标志的研究(曹德智和薛培林,2008;王飞等,2012;吴少锋等,2012;丁成旺等,2013),对与成矿有关花岗岩的年代学、岩石学、地球化学尚未进行详细的研究,在一定程度上影响了钨矿成因、形成环境等的深入探讨。本文通过对与成矿有关花岗岩的岩石学、年代学和地球化学的研究,探讨了花岗岩的形成时代、地球化学特征、岩石成因及来源,为祁连山加里东造山带钨矿成矿带的成矿背景研究提供新的依据。

2 矿区地质

青海大黑山钨矿位于青海省门源回族自治县、大通回族自治县以及海晏县三县管辖地区,其地理坐标为:东经101°02'15",北纬37°24'130"(吴少锋等,2012)。构造上位于秦祁昆晚加里东造山系祁连山带北祁连造山亚带与中祁连元古宙古陆块体接合部位的南侧(图1)。该区地质构造十分复杂,经历了多次构造运动,其中以加里东运动最为强烈,是一条多旋回造山带,总的构造线方向为北西西向。区域构造以断裂构造为主,褶皱构造为辅。其主要的断裂构造是贯穿全区的北西西向的逆断层,后期断裂具明显的继承性活动特点,在其南、北侧依次形成较多的次级断裂。次级断裂的附近岩石破碎蚀变及片理化现象较普遍,形成了多条与区域构造线方向一致的破碎蚀变带。此外还产生一组北北西向高角度平移断层。中北祁连之间的深大断裂呈北西-南东向延伸,倾向南西,该断裂北东部为北祁连的上奥陶统,断裂长期活动对南北两侧沉积作用、变质作用及岩浆活动有明显的控制作用。加里东褶皱构造较为发育,其主要表现在中、下元

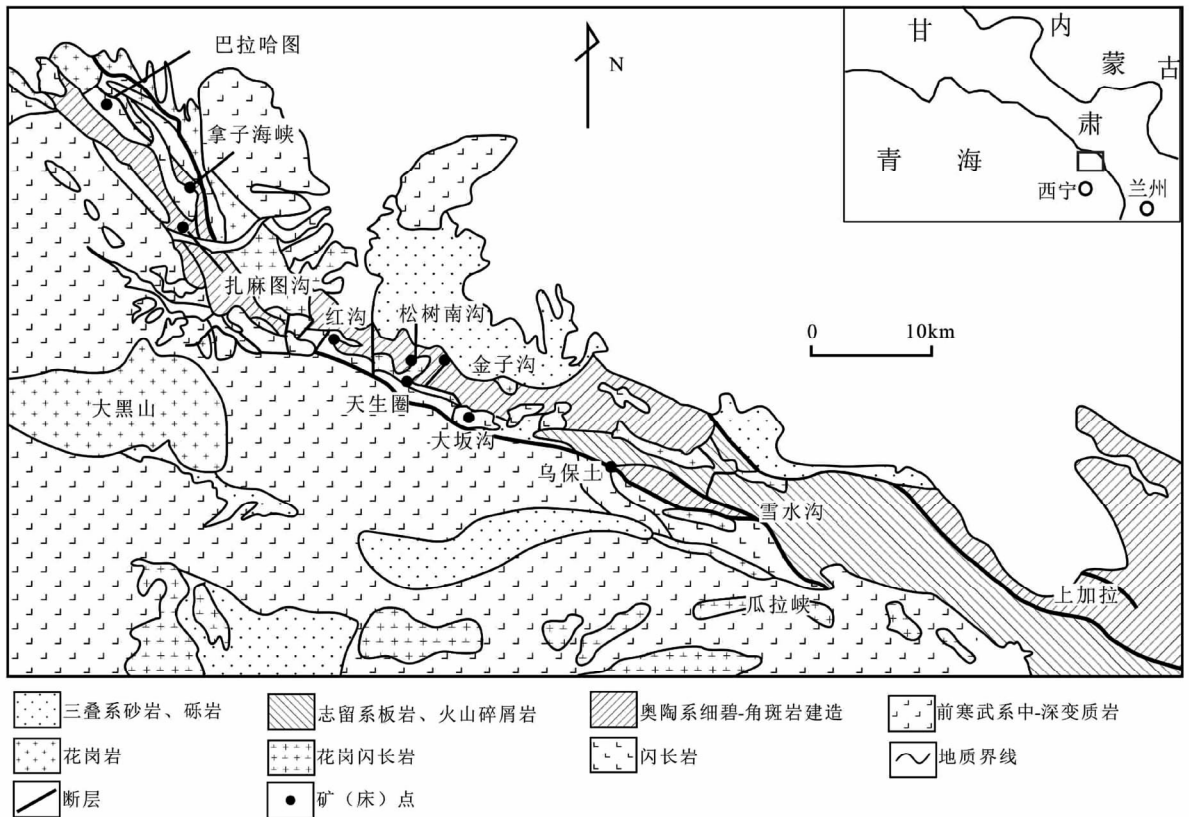


图1 北祁连大坂山区域地质图(据王飞等,2012)

Fig. 1 Geological sketch map of Daban mountains in the northern Qilian (after Wang *et al.*, 2012)

① 曹德智,薛培林. 2008. 青海省大通县大黑山地区钨矿普查报告. 内部资料, 1-93

古界及上奥陶统扣门子组的斜长黑云片麻岩、黑云石英片岩之中,常见早期褶曲被后期次级褶曲所叠加,次级褶曲又被更次级褶曲所复杂化,同时其表现形态及其组合方式比较复杂,但主体产状仍以北西-南东向为主。区域岩浆活动强烈,规模较大,岩性从超基性-酸性均有出露。侵入岩岩性以酸性为主,中性、基性、超基性岩次之。以岩基式酸性花岗岩为主(宝库河花岗岩体),岩株、岩脉式中、酸性闪长岩、花岗岩次之,存在着多期次、侵入广泛的特点。

矿区出露地层主要为下元古界托赖岩群片麻岩组、大理岩组和第四系。断裂构造不甚发育,裂隙、节理等紧紧围绕宝库河花岗岩体,具放射状分布的特点。矿区褶皱构造均以揉皱、褶曲形式出现,较为发育,呈北西-南东向紧密-稀疏状展布,与地层走向一致,局部亦有南北向褶曲。

区内岩浆岩主要有宝库河花岗岩、大坂山蛇绿岩等。其中宝库河花岗岩体为一复式岩体,是矿区的主要岩体,分布于矿区中南部,出露面积较大。岩性以灰白色粗中粒黑云二长花岗岩、中细粒英云闪长岩为主。

区内主要矿带均位于花岗岩外接触带中,元古代片麻岩呈岛屿状残存于花岗岩体内,而含矿的矽卡岩带又赋存在元古代片麻岩地层内,黑云二长花岗岩呈岩枝状沿片麻岩片麻理侵入的小岩体与围岩的外接触带则是矿体集中赋存的部位。矿区共划分出 6 个矿带,其中以 II 号矿带规模最大,由 6 条断续平行排列的矿体组合而成,矿体总体呈平行南北向分布(图 2),北端被一东西向断层截断并受其控制,其它矿带规模较小。矿体形态较为复杂,呈似层状、囊状、分支脉状、或具复合膨大的复杂透镜体状,走向稳定,多产于透辉石矽卡岩中,矽卡岩围岩为黑云石英片岩。

矿化类型主要是白钨矿化矽卡岩型,局部可见有白钨矿化二长花岗岩型和萤石石英脉型,其中,矽卡岩型是主要的矿石类型,目前约占全区矿石总量的 90% 以上。矿石主要呈均匀粒状变晶结构,纤状变晶结构、柱状变晶结构、交代结构和交代残余结构,块状、浸染状及斑杂状构造(丁成旺等, 2013)。地表矿石中主要金属矿物是白钨矿,局部伴生微量黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、褐铁矿;非金属矿物有透辉石、石榴石、绿帘石、萤石、透闪石、斜长石、硅灰石、矽线石、阳起石、石英、磷灰石、方解石、榍石。深部钻孔内矿石中金属矿物除白钨矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿外还见有闪锌矿等,非金属矿物还出现了橄榄石、石榴石等典型矽卡岩的矿物组合。

围岩蚀变类型主要为矽卡岩化、硅化、云英岩化及黄铁矿化等。成矿过程可划分为 4 个阶段,即:(1)矽卡岩阶段:主要矿物有透辉石、符山石、石榴石等;(2)退化蚀变阶段:除第 1 阶段所形成的矽卡岩化的一般矿物外,尚有大量的透闪石、斜长石、白云母及白钨矿、绿帘石、石英等矿物生成,该阶段为本矿床主要成矿阶段。(3)石英硫化物阶段:主要矿物为石英,含少量黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿和白钨矿

等,多呈脉状、细脉状和浸染状叠加于矽卡岩和退化蚀变岩之上;(4)碳酸盐-萤石阶段:以形成细脉状、浸染状和块状方解石和萤石组合为特征,方解石-萤石细脉叠加于石英-硫化物细脉之上(吴少锋等,2012;丁成旺等,2013)。

3 岩体地质及岩相学特征

宝库河花岗岩是矿区的主要岩体,主要分布于矿区中南部,所占面积较大。岩体侵入于下元古界托赖岩群内,位于宝库河背斜轴部。接触界线中间部分向北凸起呈弯曲状,内接触带岩石颗粒变细,暗色矿物具定向排列,长石被交代呈蚕食状边缘。局部出现片麻状构造,接触面与围岩片理或片麻理基本一致。岩体边缘部见有围岩(黑云母石英片岩、角闪片岩、石英片岩)捕虏体。外接触带宽度不等,一般为 300 ~ 500m。片岩、片麻岩遭受混合岩化。岩体侵入深度不大,成岩后剥蚀程度中等。目前所发现含白钨矿矽卡岩多产于该套花岗岩和片麻岩之中。

岩体的主要岩性为灰白色中粗粒黑云二长花岗岩、中细粒-中粒英云闪长岩。

灰白色中粗粒黑云二长花岗岩(图 3a-d):块状构造,二长结构,主要矿物为斜长石、石英、微斜长石、黑云母等。斜长石 25% ~ 40%,属更长石,多呈半自形板柱状,双晶发育,晶粒粗大,具环带状结构,表面常发育泥化、绢云母化及高岭土化而呈现土灰色(图 3c),聚片双晶及卡钠复合双晶发育。钾长石 20% ~ 45%,属微斜长石、他形粒状、半自形、格子双晶,晶粒粗大有轻微粘土化,充填于斜长石空隙之中。局部具有条纹结构、蠕虫结构。石英 20% ~ 35%,呈他形粒状、柱状充填于斜长石之间的孔隙中,也见少量包裹于长石中的呈半自形-自形粒状的石英,多具波状消光,部分石英在结晶后受压破碎,呈集合体状出现,分布在长石晶粒之间略具定向排列,有的交代长石使得长石边缘呈蚕食状。黑云母 2% ~ 10%(图 3c),褐色、多色性显著,呈自形片状,略具定向排列,部分被白云母、绿泥石交代呈残留状,见有铁质、榍石沿原解理缝充填。副矿物有锆石、磷灰石、金红石、萤石、白钨矿、独居石、磁铁矿、石榴石、黄铁矿、褐铁矿、方铅矿、钼矿等呈微粒状零星分布。

中细粒-中粒英云闪长岩:块状构造,花岗结构,主要矿物为斜长石、石英、钾长石,少量黑云母、白云母等。斜长石 50% ~ 65%,半自形板柱状,具环带状结构。粒度较小,不规则排列,且分布不均,绢云母化较发育。石英 20% ~ 30%,呈他形粒状充填于斜长石之间的孔隙中,略具定向排列,因动力变质作用的参与,使其原始结晶形态发生一定改变,常见有压碎或沿某一方向拉长的现象,具波状消光,粒径为 0.06 ~ 1.26mm 之间,常于局部聚集。钾长石 10% ~ 15%,属微斜长石,多呈他形-半自形粒状,格状双晶发育,晶粒较斜长石和石英粗大,充填于斜长石空隙之中,且普遍发育轻微泥化,局部具有碎粒化的特点。黑云母 2% ~ 15%,褐色、多色性显

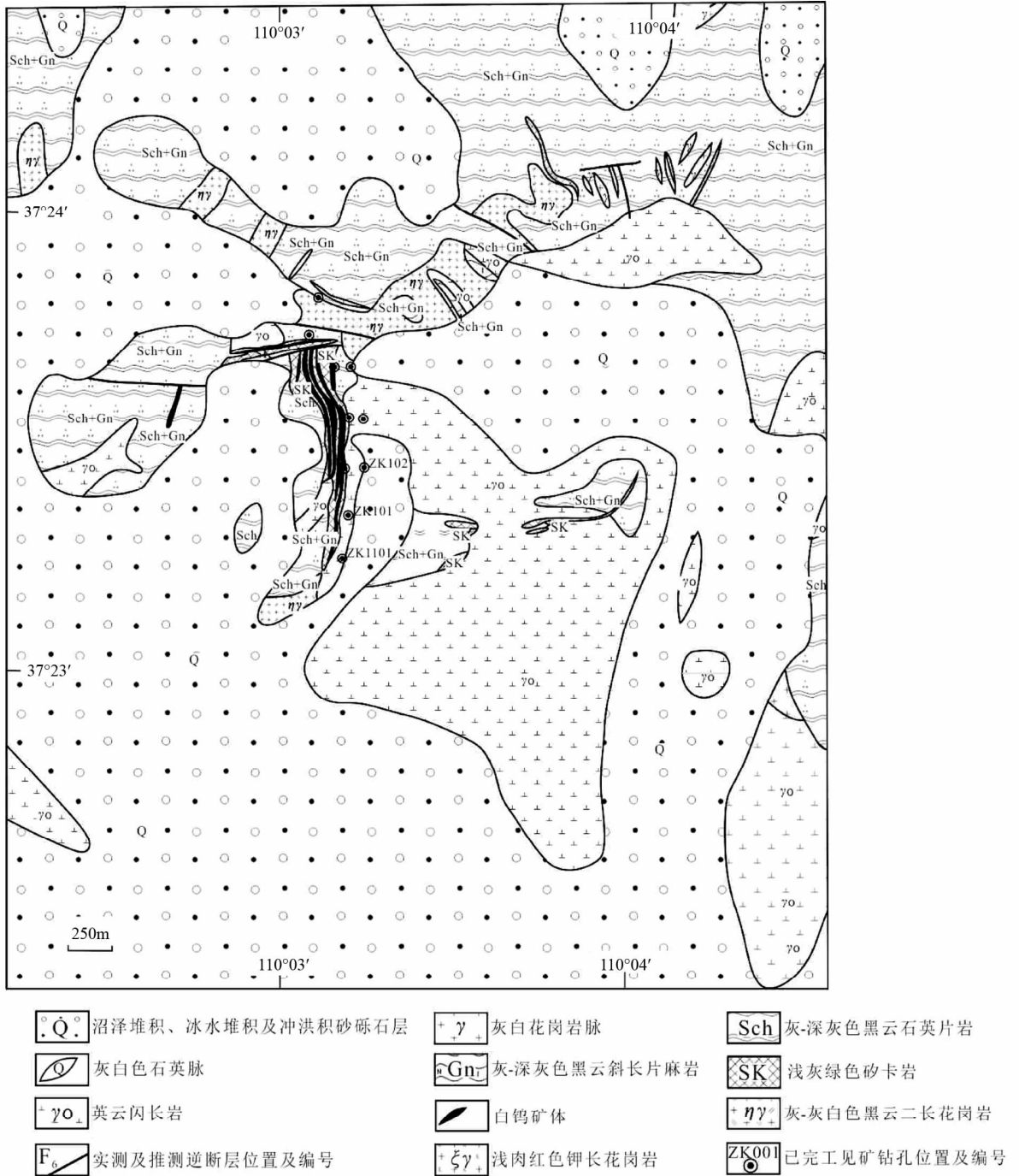


图2 大黑山钨矿地质图(据曹德智和薛培林,2008 修改)

Fig.2 Geological map of Daheishan tungsten ore deposit (modified after Cao and Xue, 2008)

著,呈自形片状,部分被白云母交代。副矿物主要有铁铝榴石、榍石等。

4 样品和分析方法

分析测试样品均为无蚀变和矿化影响或蚀变甚弱的样

品,其中用于定年的样品为黑云母二长花岗岩(BKY-20)。

主量元素、微量元素、稀土元素的测试在国家地质实验测试中心测试完成,主量元素主要采用X荧光光谱仪(2100)测定;微量元素及稀土元素采用等离子质谱(X-series)测定,以AMH-1和GBPG-1为参考标样,相对偏差(RSD)均小于5%。

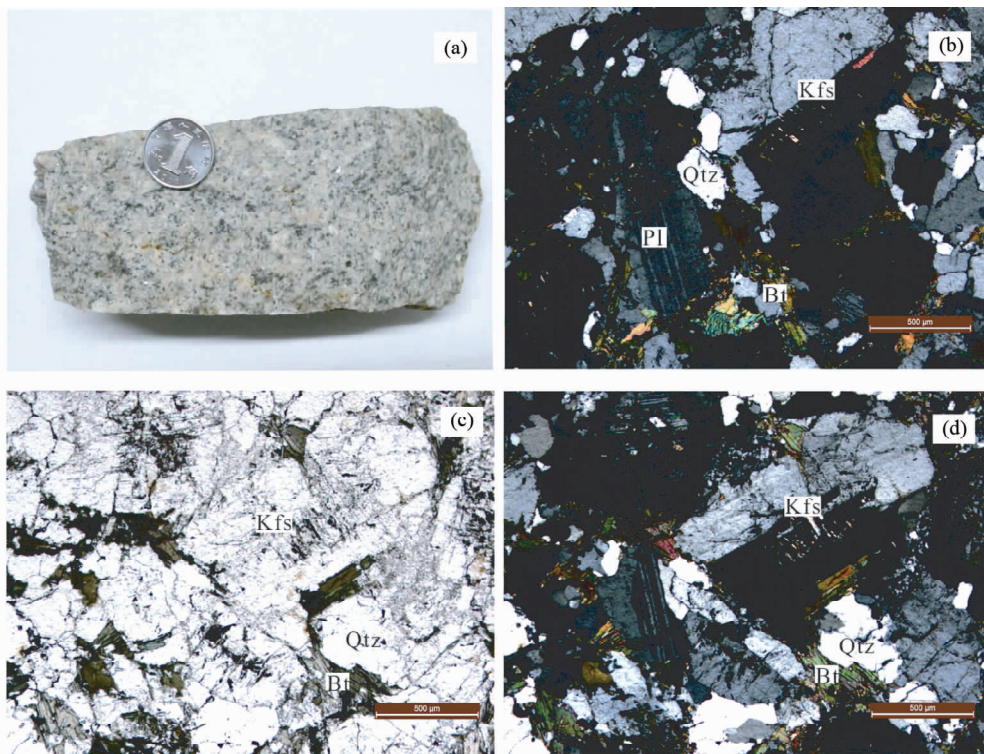


图3 宝库河黑云二长花岗岩的野外(a)及显微(b-d)照片

Qtz-石英;Kfs-钾长石;Bt-黑云母;Pl-斜长石

Fig.3 Photographs (a) and micrographes (b-d) of biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons

用于 U-Pb 测年的锆石是将样品经人工破碎,采用常规的重力和磁选方法分离后,在双目显微镜下人工挑选获得。将代表性的锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后抛光至锆石露出一个平面。然后进行透、反射和阴极发光 (CL) 照像,结合这些图像选择适宜的测试点位。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室完成。采用仪器为 Agilent 7500a ICP-MS,实验原理和详细测试方法对照 Jackson *et al.* (2004) 所述。其工作参数为:等离子气体 Ar 16L/min,辅助气体 Ar 1L/min,剥蚀物质载气 He 0.9 ~ 1.2L/min。激光剥蚀系统波长 213nm,激光脉冲频率 5Hz,宽度 5ns,剥蚀孔径 40 μ m,剥蚀时间 80s,背景测量时间 40s,脉冲能量为 10 ~ 20J/cm²,²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th 和 ²³⁸U 的停留时间依次为 15、30、10、10 和 15ms。应用锆石标样 GJ-1 进行同位素分馏校正,GJ-1 锆石标样的测试值为 (601 ± 12) Ma;此外,在分析中加入“未知”标样 Mud Tank (分析值 735 ± 12Ma),用于监控测试的重现性和仪器的稳定性,本实验室对 GJ-1 和 Mud Tank 锆石标样的测试结果与其他实验室的测试结果一致。质谱的分析数据通过即时分析软件 GLITTER 计算获得相应的同位素比值、年龄以及误差,上述数据采用目前较为广泛接受的方法进行普通铅校正,校正后的最终结果应用 Isoplot (路远发,2004) 程序完成年龄计算和

谐和图的绘制。

5 分析结果

5.1 锆石 U-Pb 年代学

用于锆石定年的样品中锆石大小基本一致,颗粒较大,粒径 200 ~ 400 μ m,多呈长柱状,自形程度较好,大部分锆石颗粒以灰白色、淡棕色为主。阴极发光 (CL) 图像显示 (图 4),大部分锆石具有明显的密集振荡环带,显示岩浆成因锆石的典型特征 (吴元保和郑永飞,2004)。锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果见表 1 及图 5。

对样品 BKY20 (黑云母二长花岗岩) 测试了 21 个点,其中三个不谐和的 ²⁰⁶Pb-²³⁸U 年龄 (分别为 151Ma、157Ma、431Ma) 可能是 Pb 丢失的结果。其余的 18 个点均投影于谐和线上或谐和线附近,具有较一致的 ²⁰⁶Pb-²³⁸U 年龄,变化于 443 ~ 451Ma。黑云母二长花岗岩中锆石 U 的含量为 55 × 10⁻⁶ ~ 1110 × 10⁻⁶,Th 含量为 65 × 10⁻⁶ ~ 1191 × 10⁻⁶,Th/U 为 0.48 ~ 1.60,平均为 1.02,均大于 0.4,属岩浆成因锆石。其 ²⁰⁶Pb-²³⁸U 加权平均年龄为 450.2 ± 2.8Ma,MSWD 值为 0.102。

可见宝库河黑云二长花岗岩形成于晚奥陶世,即加里东期花岗岩。

表1 宝库河黑云母二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon dating result of the biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons

测点号	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/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	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1σ		
BKY20-1	248	194	1.28	0.05471	0.00114	0.54628	0.01157	0.07242	0.00097	0.02158	0.00088	400	25	443	8	451	6	432	16
BKY20-3	352	740	0.48	0.05512	0.00077	0.55083	0.00833	0.07248	0.00091	0.02237	0.00081	417	15	446	5	451	5	447	16
BKY20-4	336	430	0.78	0.05553	0.00095	0.5546	0.0099	0.07244	0.00094	0.02191	0.00081	434	19	448	6	451	6	438	16
BKY20-5	296	342	0.87	0.06229	0.00308	0.61375	0.02906	0.07146	0.001	0.02197	0.00028	684	108	448	18	445	6	439	5
BKY20-6	602	426	1.41	0.05599	0.00398	0.54923	0.03823	0.07115	0.00102	0.02215	0.00027	452	163	444	25	443	6	443	5
BKY20-7	261	227	1.15	0.05567	0.00113	0.55667	0.01152	0.07253	0.00097	0.02262	0.00084	439	24	449	8	451	6	452	17
BKY20-8	220	157	1.41	0.05589	0.00197	0.55776	0.01912	0.07238	0.00119	0.02314	0.00098	448	47	450	12	450	7	462	19
BKY20-9	65	55	1.17	0.05593	0.00222	0.55913	0.02148	0.07252	0.00126	0.02375	0.00108	450	55	451	14	451	8	474	21
BKY20-10	285	312	0.91	0.05521	0.00109	0.55208	0.01113	0.07253	0.00096	0.02365	0.00089	421	23	446	7	451	6	472	18
BKY20-11	506	546	0.93	0.05681	0.00108	0.56658	0.01087	0.07233	0.00092	0.02058	0.00102	484	22	456	7	450	6	412	20
BKY20-12	1191	956	1.25	0.05611	0.0009	0.56018	0.00931	0.07241	0.00089	0.02309	0.00112	457	18	452	6	451	5	461	22
BKY20-13	892	860	1.04	0.05663	0.00102	0.55943	0.01021	0.07165	0.0009	0.02215	0.00108	477	20	451	7	446	5	443	21
BKY20-14	134	107	1.25	0.0557	0.00274	0.55527	0.02634	0.07235	0.00137	0.02502	0.00145	440	72	449	17	450	8	499	29
BKY20-15	568	545	1.04	0.05786	0.00101	0.57764	0.01026	0.07241	0.0009	0.02371	0.00116	524	19	463	7	451	5	474	23
BKY20-16	625	1110	0.56	0.05726	0.00098	0.57173	0.00998	0.07243	0.0009	0.02225	0.0011	502	19	459	6	451	5	445	22
BKY20-17	491	948	0.52	0.0552	0.00089	0.551	0.00914	0.0724	0.00089	0.02441	0.0012	420	18	446	6	451	5	487	24
BKY20-19	481	656	0.73	0.05502	0.00116	0.54911	0.01156	0.07239	0.00094	0.02337	0.00118	413	25	444	8	451	6	467	23
BKY20-21	155	96	1.60	0.05839	0.00353	0.58285	0.03379	0.07241	0.00163	0.02166	0.00135	544	87	466	22	451	10	433	27

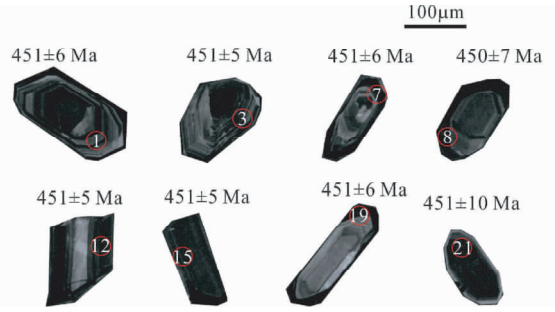


图4 宝库河黑云母二长花岗岩体部分锆石样品阴极发光(CL)图像

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircon from the biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons

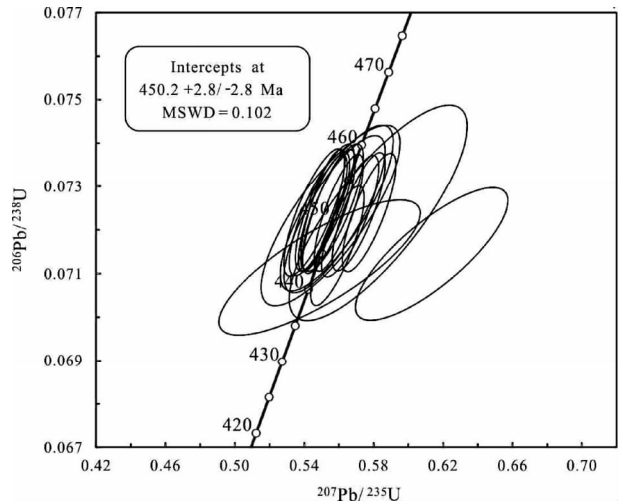


图5 宝库河黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 The zircon U-Pb concordia diagram of the biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons

5.2 地球化学特征

5.2.1 主量元素

元素地球化学分析结果见表2。黑云母二长花岗岩的 SiO_2 含量为 73.03% ~ 74.18%, 平均为 73.49%; Al_2O_3 含量为 13.48% ~ 13.94%, 平均为 13.71%; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 7.25% ~ 8.51%, 平均为 8.00%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.13 ~ 1.94, 平均为 1.54。铝饱和指数 (A/CNK) 介于 1.04 ~ 1.12, 平均为 1.07。 P_2O_5 含量为 0.03% ~ 0.08%, 平均为 0.05%。

黑云母二长花岗岩主要为高钾钙碱性系列(图6)。在 $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$ 图中(图7)主要落于过铝质花岗岩区域。

5.2.2 稀土元素

宝库河花岗岩稀土元素组成测试结果及相关参数见表2。黑云母二长花岗岩稀土元素总量 ($\sum \text{REE}$) 偏低, 为 110.5×10^{-6} ~ 214.4×10^{-6} , 平均值为 178.1×10^{-6} , 低于世界花岗岩的平均值 ($\sum \text{REE} = 254.3 \times 10^{-6}$, Vinogradov, 1962)。

表2 宝库河黑云母二长花岗岩的主量(wt%)、微量和稀土元素($\times 10^{-6}$)组成Table 2 Major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) data for the biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons

样品号	BKY-1	BKY-3	BKY-8	BKY-10	BKY-11	BKY-13	BKY-14	BKY-21	BKY-26
SiO ₂	73.43	73.03	73.23	73.35	73.29	73.52	74.18	73.50	73.91
Al ₂ O ₃	13.73	13.80	13.55	13.94	13.70	13.87	13.48	13.68	13.60
Fe ₂ O ₃	0.14	0.32	0.11	0.39	0.14	0.45	0.22	0.17	0.30
FeO	1.45	1.42	1.51	1.49	1.38	1.24	1.24	1.45	1.10
CaO	1.59	1.38	1.15	1.50	1.04	1.57	1.29	1.33	1.08
MgO	0.37	0.39	0.43	0.50	0.36	0.46	0.37	0.42	0.37
K ₂ O	4.07	4.83	5.42	3.94	5.50	4.27	4.74	5.20	5.47
Na ₂ O	3.61	3.24	2.80	3.31	3.01	3.43	3.22	3.00	2.94
TiO ₂	0.15	0.17	0.17	0.21	0.13	0.17	0.14	0.16	0.16
MnO	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07	0.07	0.06	0.07	0.05
P ₂ O ₅	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.06	0.04	0.05	0.04
H ₂ O ⁺	0.64	0.72	0.70	0.76	0.42	0.62	0.62	0.64	0.62
CO ₂	0.29	0.12	0.12	0.12	0.21	0.03	0.12	0.12	0.12
LOI	0.69	0.61	0.61	0.50	0.54	0.31	0.35	0.56	0.38
K ₂ O + Na ₂ O	7.68	8.07	8.22	7.25	8.51	7.70	7.96	8.20	8.41
K ₂ O/Na ₂ O	1.13	1.49	1.94	1.19	1.82	1.24	1.47	1.71	1.86
A/NK	1.33	1.31	1.29	1.43	1.25	1.35	1.29	1.29	1.26
A/CNK	1.04	1.05	1.08	1.12	1.07	1.06	1.05	1.05	1.07
σ	1.94	2.17	2.24	1.73	2.39	1.94	2.03	2.20	2.29
Zr	134	142	132	169	179	137	96.2	125	157
Hf	4.52	4.62	4.28	4.77	5.99	4.09	3.02	4.07	5.63
Li	18.2	18.9	24.5	25.0	36.5	36.7	19.2	28.8	20.0
Be	2.87	2.44	1.77	2.29	1.78	1.91	2.18	1.97	1.74
Cr	14.1	6.46	7.00	7.63	7.17	6.63	6.45	6.86	4.78
Co	1.63	1.64	1.90	2.41	1.71	2.27	1.68	2.00	1.63
Ni	6.04	3.17	2.75	3.46	3.10	3.50	3.83	3.58	3.00
Cu	8.70	10.5	5.26	6.46	8.43	6.33	5.16	8.54	5.87
Zn	17.5	21.0	28.7	33.2	28.9	33.1	26.8	26.6	22.8
Ga	14.0	14.1	13.1	14.1	13.0	14.1	13.6	13.6	13.8
Mo	0.87	0.61	0.44	0.58	0.52	0.63	0.48	0.62	0.38
Ta	1.04	1.09	0.89	1.01	1.18	1.30	1.40	1.14	1.51
W	1.53	1.51	1.22	2.24	2.60	1.07	1.69	4.49	0.77
Pb	45.2	45.9	40.9	33.1	45.4	43.0	41.9	44.3	48.9
Th	46.3	56.7	54.1	36.9	37.3	27.5	26.4	41.7	54.1
U	6.43	7.96	4.17	2.76	3.83	2.41	3.18	4.14	5.76
Ba	536	667	1437	1227	1001	888	679	1224	652
Sr	110	108	187	196	131	157	129	183	112
V	9.43	10.6	12.3	14.4	7.07	10.3	9.83	12.1	10.1
Sc	3.50	3.90	2.90	3.23	3.20	4.11	2.97	3.58	3.60
Rb	165	205	244	192	263	216	219	256	231
Nb	12.6	14.1	9.22	11.0	12.4	13.0	14.2	13.0	11.3
Cs	14.4	13.9	6.40	12.0	6.25	9.72	7.52	9.14	6.41
Y	37.5	30.2	12.1	10.8	12.8	14.8	10.4	16.0	11.4
Rb/Sr	1.50	1.90	1.30	0.98	2.01	1.38	1.70	1.40	2.06
Nb/Ta	12.12	12.94	10.36	10.89	10.51	10.00	10.14	11.40	7.48
La	46.9	57.5	61.9	63.0	41.8	40.0	31.4	53.2	50.1
Ce	78.0	96.4	98.8	98.4	66.9	64.6	48.6	89.5	84.1
Pr	7.64	9.18	9.56	9.45	6.71	6.21	4.87	8.34	8.29
Nd	23.8	28.3	29.3	29.0	21.2	19.5	15.2	26.0	26.1
Sm	4.51	4.95	4.51	3.98	3.66	3.35	2.53	4.35	4.62
Eu	0.38	0.39	0.57	0.63	0.41	0.41	0.38	0.57	0.43
Gd	3.88	4.17	2.88	2.62	2.84	2.87	2.05	3.09	3.26
Tb	0.75	0.70	0.40	0.35	0.43	0.43	0.32	0.46	0.44
Dy	5.14	4.41	2.24	2.03	2.42	2.54	1.82	2.79	2.29
Ho	1.32	1.00	0.46	0.40	0.47	0.52	0.38	0.56	0.43
Er	4.08	3.13	1.25	1.16	1.36	1.53	1.14	1.73	1.22
Tm	0.63	0.49	0.18	0.17	0.19	0.22	0.19	0.26	0.17
Yb	4.37	3.30	1.26	1.23	1.37	1.54	1.43	1.76	1.36
Lu	0.65	0.48	0.19	0.19	0.21	0.23	0.21	0.26	0.20
Σ REE	182.1	214.4	213.5	212.6	150.0	144.0	110.5	192.9	183.0
L/H	7.74	11.13	23.10	25.09	15.14	13.57	13.66	16.68	18.53
δ Eu	0.27	0.26	0.45	0.56	0.37	0.39	0.49	0.45	0.32
(La/Yb) _N	7.70	12.50	35.24	36.74	21.88	18.63	15.75	21.68	26.42
(La/Sm) _N	6.71	7.50	8.86	10.22	7.37	7.71	8.01	7.90	7.00
(Gd/Yb) _N	0.73	1.05	1.89	1.76	1.71	1.54	1.19	1.45	1.98

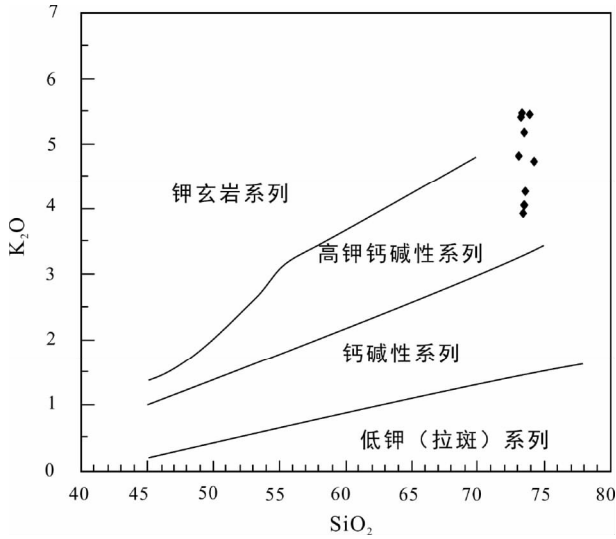


图6 宝库河黑云母二长花岗岩 SiO₂-K₂O 图解(据 Rickwood, 1989)

Fig. 6 SiO₂ vs. K₂O diagram of the biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons (after Rickwood, 1989)

其 δEu 值变化于 0.26 ~ 0.56, (La/Yb)_N 值为 7.70 ~ 36.74, (La/Sm)_N 值为 6.71 ~ 10.22, (Gd/Yb)_N 值为 0.73 ~ 1.98。

稀土元素球粒陨石标准化图解显示(图 8b),黑云二长花岗岩具有较一致的分布模式,其稀土配分模式曲线均为向右缓倾, Eu 明显负异常,其轻稀土 La-Sm 基本呈陡右倾折线, LREE 分异强烈;重稀土 Cd-Lu 曲线变化则较为复杂,呈一略向上或向下平缓折线, HREE 分异不明显。明显不同于典型 S 型花岗岩常表现出的“海鸥型”稀土配分型式。

5.2.3 微量元素

宝库河花岗岩微量元素组成测试结果及相关参数见

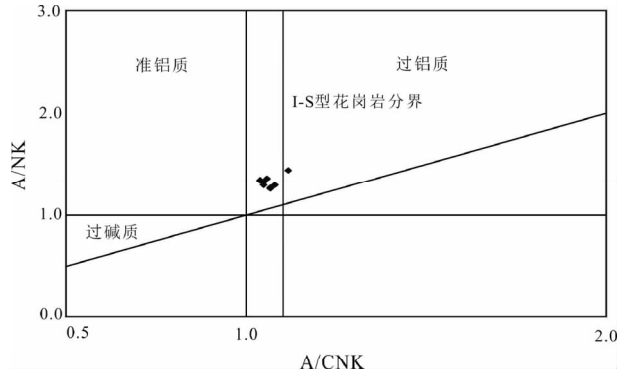
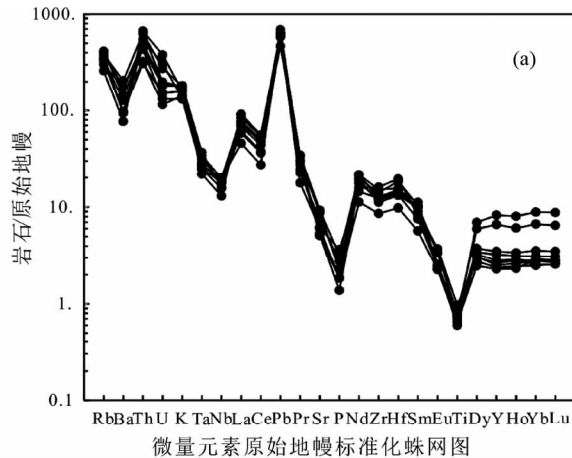


图7 大黑山宝库河花岗岩 A/NK-A/CNK 图解(据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 7 A/NK vs. A/CNK diagram of the biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons (after Peccerillo and Taylor, 1976)

表2。

黑云母二长花岗岩的高场强元素含量较高, Th 为 $26.4 \times 10^{-6} \sim 56.7 \times 10^{-6}$, U 为 $2.41 \times 10^{-6} \sim 7.96 \times 10^{-6}$, Pb 为 $33.1 \times 10^{-6} \sim 48.9 \times 10^{-6}$, Zr 为 $96.2 \times 10^{-6} \sim 179 \times 10^{-6}$, Hf 为 $3.02 \times 10^{-6} \sim 5.99 \times 10^{-6}$, 但 Nb ($9.22 \times 10^{-6} \sim 14.2 \times 10^{-6}$) 与 Ta ($0.89 \times 10^{-6} \sim 1.51 \times 10^{-6}$) 的含量相对较低, Nb/Ta 比值较高, 为 7.48 ~ 12.94。大离子亲石元素 Ba 含量为 $536 \times 10^{-6} \sim 1437 \times 10^{-6}$, Sr 为 $108 \times 10^{-6} \sim 196 \times 10^{-6}$ 。此外岩石还具有较低的 Cr ($4.78 \times 10^{-6} \sim 14.1 \times 10^{-6}$) 及 Ni ($2.75 \times 10^{-6} \sim 6.04 \times 10^{-6}$)。在原始地幔标准化蛛网图中(图 8a)总体显示了较为一致的分布模式, 大离子亲石元素 Ba, Sr 呈现明显的负异常, 高场强元素 Th, U, Pb, Zr, Hf 呈现明显的正异常, Nb, Ta, Ti 呈现负异常。P 呈现负异常。

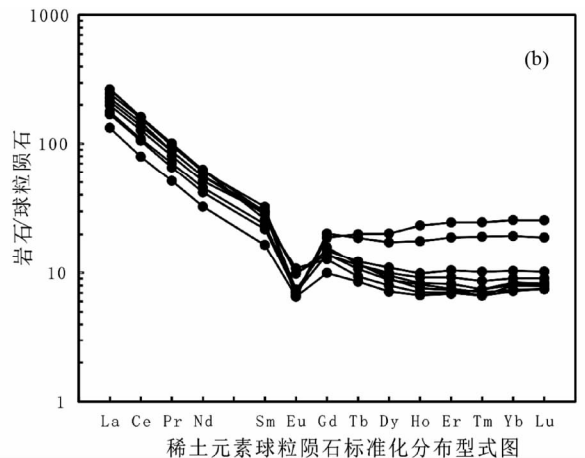


图8 宝库河黑云母二长花岗岩微量元素原始地幔配分模式图(a)和稀土元素配分模式图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element patterns and chondrite-normalized REE patterns diagrams of the biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

6 讨论

6.1 岩体的形成时代

本文获得的黑云母二长花岗岩锆石的²⁰⁶Pb-²³⁸U 加权平均年龄为:450.2 ± 2.8Ma,即晚奥陶世,加里东期。可以代表该花岗岩的侵位结晶时代。

黑云母二长花岗岩 450.2 ± 2.8Ma 的结晶年龄与已知的区域花岗岩的年龄及钨大规模成矿时代很相近。毛景文等(1999, 2000a, b, 2003)及 Mao *et al.* (2000)认为北祁连西段发育有三条花岗质岩带,南部边缘的花岗闪长岩岩带、北部边缘的黑云母花岗岩带及南部的碱性岩带。这三条岩带在 1:20 万区域地质调查时被厘定为加里东期的产物。目前已获得野牛滩岩体锆石 U-Pb 年龄为 459.6 ± 2.5Ma (Mao *et al.*, 2000);小柳沟二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 454.0 ± 2.0Ma (赵辛敏等,2014);车路沟岩体锆石 U-Pb 年龄 445.6 ± 3.2Ma (贾群子等,2007);桦树沟闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄 421 ± 24Ma (张兰英等,2008);金佛寺岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 谐和年龄为 424Ma (吴才来等,2010);中祁连西段肃北岩体花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 415 ± 3Ma,石包城岩体花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 435 ± 4Ma (李建锋等,2010)。众多年龄均反映出在加里东及海西期祁连地区岩浆活动强烈。Mao *et al.* (1995, 1998)、毛景文等(2003)、杨钟堂等(2002, 2004)、陈生民(2007)、杨国庆和杨春茂(2009)认为祁连地区岩浆活动强烈,加里东期及海西期是区内酸性岩浆活动的鼎盛时期。吴少锋等(2012)的研究表明本矿床中加里东期二长花岗岩中钨元素丰度值明显高于其它花岗岩,空间上大黑山钨矿也与加里东期二长花岗岩关系最密切,说明本区钨矿的形成与加里东期酸性岩浆形成具有决定关系。

6.2 岩石成因类型

毛景文等(1999)认为本区花岗岩为介于 I 型与 S 型花岗岩的一种过渡类型。吴才来等(2004)认为在北祁连东部存在两类 I 型花岗岩,一类以井子川岩体为代表,岩体形成的构造环境类似岛弧;一类以黄羊河岩体为代表,岩体形成于造山后隆起环境或板内环境。本次研究成果表明,宝库河加里东期黑云母二长花岗岩富硅、富钾、铝过饱和,属于过铝质高钾钙碱性系列花岗岩。A/NK-A/CNK 图解(图 7)上基本落于 I 型花岗岩范围内。铝过饱和, A/CNK 值主要介于 1 ~ 1.1,不同与典型 S 型花岗岩 A/CNK > 1.1 (Chappell and White, 1974, 1992)。P₂O₅ 的含量低,表 2 显示其含量具有随 SiO₂ 含量的增长呈现负增长的趋势,也显示了 I 型花岗岩的特征。稀土含量低, Eu 明显负异常, LREE 分异强烈, HREE 分异不明显。微量元素元素蛛网图中 Th、U、Pb、Zr、Hf 呈现明显的正异常、Ba、Sr、Nb、P、Ti 呈现负异常等。这些特征与本区的金佛寺花岗岩、野马咀花岗岩(吴才来等,2010)、

小柳沟花岗岩(赵辛敏等,2014)、新疆的铁木尔特花岗岩(柴凤梅等,2010)特征相类似,与南岭燕山早期花岗岩(李献华等,2007)的部分特征类似。结合本次研究成果认为宝库河加里东期黑云母二长花岗岩应该为 I 型花岗岩。

6.3 地质意义

北祁连是我国最早鉴定出的俯冲带之一,20 世纪 80 年代以来,该区早古生代的蛇绿岩、火山岩、高压变质岩及大地构造演化研究,取得了许多重要进展(王荃和刘雪亚,1976;肖序常等,1978;吴汉泉等,1990;许志琴等,1994;夏林圻等,1995,1996,1999,2000;冯益民,1997;张旗等,1997,2000;宋述光,1997;左国朝和吴汉泉,1997,左国朝等,1999;张建新和许志琴,1995;张建新等,1997,1998;毛景文等,1999;李文渊,2004;李文渊等,2005;吴才来等,2010)。冯益民(1997)认为祁连山造山带的构造演化可以划分为三个阶段,即:(1)晋宁期基底的形成和其后的大陆裂谷构造演化阶段;(2)晚寒武-早中奥陶世洋底扩张及沟弧盆体系大洋盆地演化;(3)早中奥陶世开始的造山作用阶段。在造山作用阶段,祁连山经历了俯冲造山、碰撞造山和陆内造山作用。俯冲造山开始于 460Ma 或更早,其结果是在北祁连形成了岛弧及岛弧链,并造就了晚奥陶世残留洋盆和中祁连北缘的陆缘裂谷。毛景文等(1999)认为加里东期板块俯冲晚期或碰撞造山早期及造山期后,在仰冲一侧有一系列花岗岩先后侵位,与钨矿有关花岗岩体由前期的花岗闪长岩和晚期黑云母花岗岩组成,从早期到晚期,岩石体积变小,分异程度增高,钨矿成矿作用与晚期岩体有密切关系。

宝库河黑云二长花岗岩微量元素特征显示 Th、U、Pb、Zr、Hf 呈现明显的正异常、Nb、Ta、Ti 呈现负异常等。具有岛弧型岩浆作用的基本特征(Wilson, 1989)。在微量元素环境判别图解上(图 9),宝库河二长黑云花岗岩也基本落于火山弧花岗岩的范围内。结合区域地质演化研究表明 450Ma 北祁连仍处于俯冲造山阶段,由于北祁连洋壳的俯冲,来自地壳的物质熔融形成岩浆。岩浆在上侵或运移过程中进一步分异,下元古界托赖岩群被花岗质岩浆交代,在岩浆热液驱动下,钨元素从地层中被逐渐萃取并迁移,从而达到在有利部位的富集,含钨岩浆热液首先形成矽卡岩,然后退化变质,形成白钨矿,流体演化到石英硫化物阶段又有白钨矿沉淀。而后含钨岩浆与后期含钨热液多次充填、交代作用下形成了现在的矽卡岩型白钨矿床。

7 结论

(1)宝库河黑云二长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄为:450.2 ± 2.8Ma;为加里东期岩浆活动的产物。

(2)宝库河黑云二长花岗岩富硅、富碱,铝过饱和,P₂O₅ 的含量低,且具有随 SiO₂ 含量的增长呈现负增长的趋势,属于过铝质高钾钙碱性系列花岗岩。稀土含量低, Eu 明显负

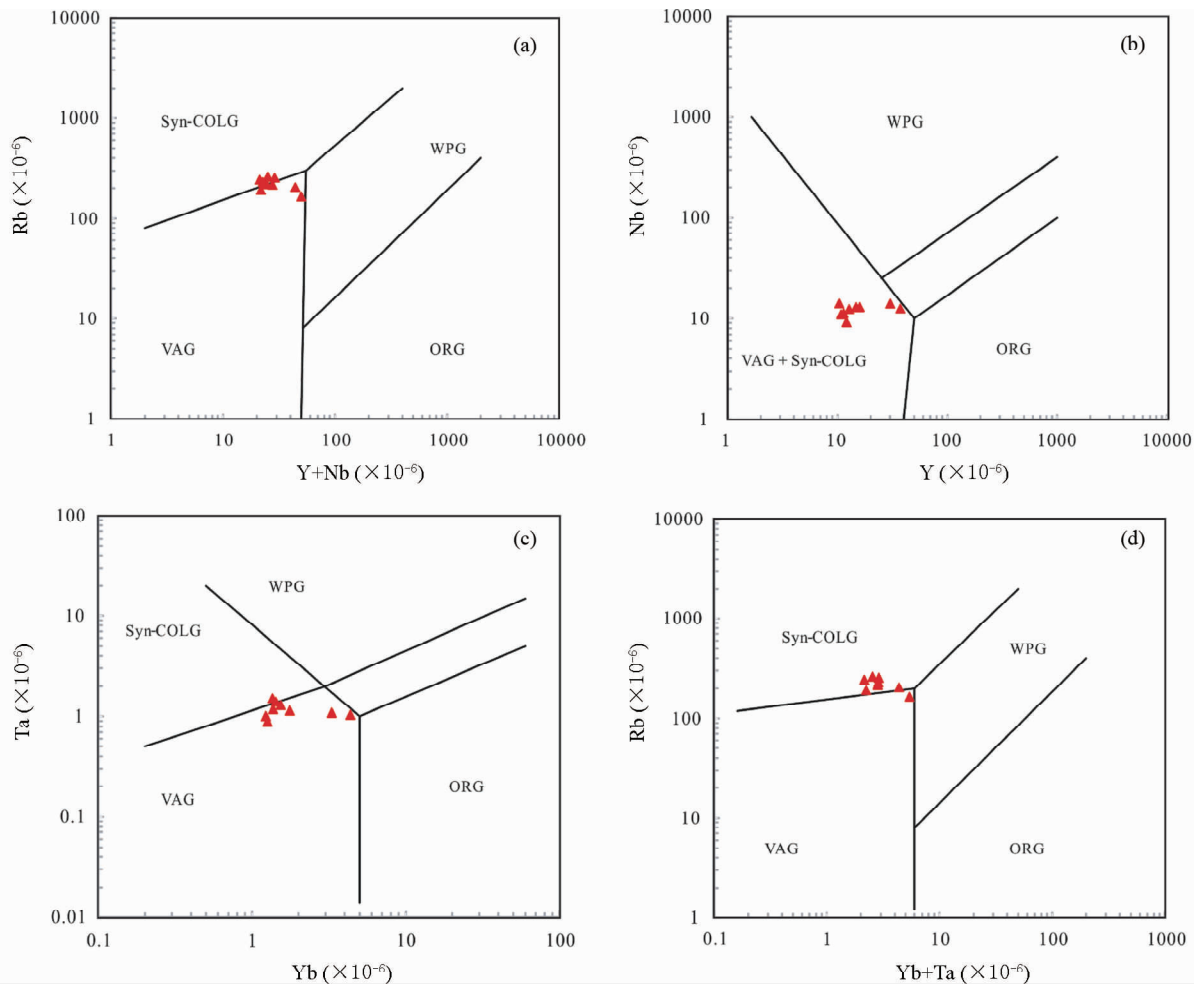


图9 宝库河黑云母二长花岗岩的微量元素环境判别图解(据 Pearce *et al.*, 1984)

(a)-(Y+Nb)-Rb; (b)-Y-Nb; (c)-Yb-Ta; (d)-(Yb+Ta)-Rb

ORG-洋中脊花岗岩;VAG-火山弧花岗岩;WPG-板内花岗岩;Syn-COLG-同碰撞花岗岩

Fig.9 Tectonic discrimination diagrams of biotite monzonitic granite from Baokuhe plutons (after Pearce *et al.*, 1984)

异常,LREE 分异强烈,HREE 分异不明显。微量元素元素蛛网图中 Th、U、Pb、Zr、Hf 呈现明显的正异常、Ba、Sr、Nb、P、Ti 呈现负异常。为 I 型花岗岩。

(3) 宝库河黑云母二长花岗岩是由于北祁连洋壳的俯冲,地壳物质重熔而形成的。

致谢 野外工作期间得到了青海地调院与大黑山钨钼矿项目组的大力支持与帮助;数据分析过程中得到了中国地质科学院矿产资源研究所侯可军助理研究员的大力帮助;在论文成文过程中得到了王晓霞研究员、袁顺达副研究员的大量帮助;在此一并致以诚挚的谢意。

References

Chai FM, Dong LH, Yang FQ, Liu F, Geng XX and Huang CK. 2010. Age, geochemistry and petrogenesis of Tiemierite granites in the

- Kelang basin at the southern margin of Altay, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 377 - 386 (in Chinese with English abstract)
- Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173 - 174
- Chappell BW and White AJR. 1992. I and S-type granites in the Lachlan fold belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1-2): 1 - 26
- Chen SM. 2007. W ore characteristic and ore-exploration prospect analysis of Qilian area. *Gold Science and Technology*, 15(2): 26 - 35 (in Chinese with English abstract)
- Ding CW, He CF, Zhang HQ, Lu SY, Wang CP and Zhao SN. 2013. Analysis on genesis and prospecting marks of tungsten deposits in Daheishan area, Datong County, Qinghai Province. *Gansu Science and Technology*, 29(15): 35 - 37 (in Chinese)
- Editorial Board of China Deposits. 1994. *China Deposits (the Middle Volume)*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Feng YM. 1997. Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, China: History, presence and prospect. *Advance in Earth Sciences*, 12(4): 307 - 314 (in Chinese with English abstract)
- Jackson SE, Pearson NJ, Griffin WL and Belousova EA. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometer to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical*

- Geology, 211(1-2): 47-69
- Jia QZ, Yang ZT, Xiao ZY, Quan SC, Zou XH, Xiao SY, Wang SQ, Li BQ, Li BX, Wu YZ, Guo ZP, Duan YM, Su HL, Lei XW and Zhang C. 2007. Metallogenic Regularity and Prediction of Cu-Au-Pb-Zn Deposits in the Qilian Mountains. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Li JF, Zhang ZC and Han BF. 2010. Geochronology and geochemistry of Early Paleozoic granitic plutons from Subei and Shibaocheng areas, the western segment of Central Qilian and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2431-2444 (in Chinese with English abstract)
- Li WY. 2004. Main mineral deposit associations in the Qilian Mountains and their metallogenic dynamics. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(3): 313-320 (in Chinese with English abstract)
- Li WY, Guo ZP and Wang W. 2005. Caledonian convergent transformation and metallogenetic response in the North Qilian Mountains. *Geological Review*, 51(2): 120-127 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li WX and Li ZX. 2007. Revisiting the genetic classification and tectonic implication of the Early Yanshannian granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981-990 (in Chinese)
- Lin GF and Lin FP. 2003. Skarn-quartz vein type tungsten metallogenetic setting and prospecting potential in the southern margin of North Qilian Caledonian orogen Northwest China. *Acta Geologica Gansu*, 12(1): 78-84 (in Chinese with English abstract)
- Lu YF. 2004. GeoKit: A geochemical toolkit for Microsoft Excel. *Geochimica*, 33(5): 459-464 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Li HY and Pei RF. 1995. Geology and geochemistry of the Qianlishan granite stock and its relationship to polymetallic tungsten mineralization. *Mineral Deposits*, 14(1): 12-25 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Zhang Z and Yang J. 1999a. Geological characteristics and genesis of Ta'ergou tungsten deposit, North Qilian, Gansu Province. In: Stanley CJ *et al.* (eds.). *Mineral Deposits: Processes to Processing*. Balkema Rotterdam, 381-384
- Mao JW, Zhang ZC, Zhang ZH and Du AD. 1999b. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoligou W (Mo) deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11-12): 1815-1818
- Mao JW, Zhang ZC, Ren FS, Zuo GC, Zhang ZH, Yang JM, Wang ZL and Ye DJ. 1999. Temporal and spatial distribution and evolution of ore deposits in the west sector of the northern Qilian Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 73(1): 73-82 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Zhang ZH, Bernd L, Zhang ZC, Yang JM and Wang ZL. 2000. The Yeniutan grandiorite in Sunan County, Gansu Province, China; Petrological features geological setting and relationship to tungsten mineralization. *Episodes*, 23(3): 163-171
- Mao JW, Yang JM, Zhang ZH, Zhang ZC, Wang ZL and Tian F. 2000a. The study on petrology, mineralogy and geochemistry of tungsten-bearing granitic rocks in the Yeniutan, Subei Country, Gansu Province. *Acta Geologica Sinica*, 74(2): 142-155 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Zhang ZH, Jian P, Wang ZL, Yang JM and Zhang ZC. 2000b. U-Pb zircon dating of the Yeniutan granitic intrusion in the western part of the North Qilian Mountains. *Geological Review*, 46(6): 616-620 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Zhang ZC, Yang JM, Zuo GC, Zhang ZH, Ye DJ, Wang ZL, Ren FS, Zhang YJ, Peng C, Liu YZ and Jiang M. 2003. Metallogenic Series and Prospecting Evaluation of Cu-Au-Fe-W Polymetallic Deposits in Northwest Qilian Orogen. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983
- Peccerillo R and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247-263
- Song SG. 1997. Tectonic evolution of subductive complex belts in the North Qilian Mountains. *Advance in Earth Sciences*, 12(4): 353-365 (in Chinese with English abstract)
- 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 the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42: 313-345
- Vinogradov AP. 1962. Average content of chemical elements in the chief types of igneous rocks of the crust of the Earth. *Geokhimiya*, (7): 555-571
- Wang F, Yang N, Zhao P, Wang Z, Li FM and Lü JM. 2012. Geological-geochemical characteristics and metallogenic prediction of Dabanshan, northern Qilian, Qinghai. *Mineral Exploration*, 3(1): 63-68 (in Chinese with English abstract)
- Wang K and Liu XY. 1976. Paleo-oceanic crust of the Qilianshan region, western China and its tectonic significance. *Scientia Geologica Sinica*, 11(1): 42-55 (in Chinese with English abstract)
- Wu CL, Yang JS, Yang HY, Wooden JL, Shi RD, Chen SY and Zheng QG. 2004. Dating of two types of granite from North Qilian, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 425-432 (in Chinese with English abstract)
- Wu CL, Xu XF, Gao QM, Li XM, Lei M, Gao YH, Frost RB and Wooden JL. 2010. Early Palaeozoic granitoid magmatism and tectonic evolution in North Qilian, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1027-1044 (in Chinese with English abstract)
- Wu HQ, Feng YM, Huo YG, Zuo GC. 1990. The discovery of Ordovician lawsonite-glaucophane schist in the middle section of the northern Qilian Mountains, Sunan County, Gansu Province and its significance. *Geological Review*, 36(3): 277-280 (in Chinese with English abstract)
- Wu SF, Chen LB, Li JH, Wang SH and Zhang HQ. 2012. Geological features and the ore-search prospect of the Daheishan tungsten deposit in Datong County, Qinghai Province. *Gansu Science and Technology*, 28(19): 30-32 (in Chinese)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554-1569
- Xia LQ, Xia ZC and Xu XY. 1995. Dynamics of tectono-volcano-magmatic evolution from North Qilian Mountains China. *Northwest Geoscience*, 16(1): 1-28 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC and Xu XY. 1996. Petrogenesis of the Marine Volcanic Rocks from North Qilian. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Zhao JT, Yang HQ and Zhao DH. 1999. Proterozoic continental flood basalts from Qilian Mountains. *Geological Review*, 45(7): 1028-1037 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC, Zhao JT, Xu XY, Yang HQ and Zhao DH. 2000. Determination of properties of Proterozoic continental flood basalts of western part from North Qilian Mountains. *Science in China (Series D)*, 42(5): 506-514
- Xiao XC, Chen GM and Zhu ZZ. 1978. A preliminary study on the tectonics of ancient ophiolites in the Qilian Mountain, Northwest China. *Acta Geologica Sinica*, 54(4): 287-295 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Xu HF, Zhang JX, Li HB, Zhu ZZ, Qu JC, Chen DZ, Chen DL and Yang KC. 1994. The Nanshan Caledonian subductive complex in the northern Qilian Mountains Zhoulang and its dynamics. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 1-14 (in Chinese with English abstract)
- Yang GQ and Yang CM. 2009. Geological characteristics and prospecting direction of 1:50000 mineral prospects investigate of Taergou area. *Gansu Metallurgy*, 31(5): 52-59 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZT, Jia QZ, Xiao ZY, Zou XH, Ye DJ, Duan YM, Zhao JW and

- Su LH. 2002. Metallogenic geological conditions of Taergou-Xiaoliugou W-collecting area and regional prospecting in Qilian metallogenic belt. *Mineral Deposits*, 21 (Suppl.): 515 - 518 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZT, Xiao SY, Xiao CY, Li BQ, Guan YM and Su LH. 2004. Minerogenic features of tungsten deposits in the Qilian metallogenic belt and regional ore indications. *Geology in China*, 31(3): 301 - 307 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX and Xu ZQ. 1995. Caledonian subduction-accretionary complex/volcanic arc zone and its deformation features in the middle section of North Qilian Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 16(2): 153 - 163 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Xu ZQ, Chen W and Xu HF. 1997. A tentative discussion on the ages of the subduction-accretionary complex/volcanic arcs in the middle sector of North Qilian Mountain. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 112 - 119 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Xu ZQ, Xu HF and Li HB. 1998. Framework of North Qilian Caledonian subduction-accretionary wedge and its deformation dynamics. *Scientia Geologica Sinica*. 33(3): 290 - 299 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LY, Qu XM and Xin HB. 2008. Geochemical characteristics, zircon U-Pb LA-ICP-MS ages of medium-acid dykes in the Huashugou iron-copper deposit, Jingtieshan orefield, and their geological significances. *Geological Review*, 54(2): 253 - 262 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Sun XM, Zhou DJ *et al.* 1997. The characteristics of North Qilian ophiolites, forming settings and their tectonic significance. *Advance in Earth Science*, 12(4): 366 - 393 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y and Qian Q. 2000. The north Qilian oceanic basin of the Early Paleozoic age: An aulacogen or a large oceanic basin: A discussion with Ge Xiaohong. *Chinese Journal of Geology*, 35(1): 121 - 128 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZH, Mao JW, Yang JM, Wang ZL and Zhang ZC. 2002. Geology and genesis of Ta'ergou skarn-quartz vein type tungsten deposit in North Qilian Caledonian Orogen, Northwest China. *Mineral Deposits*, 21(2): 200 - 211 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XM, Zhang ZH, Li YS and Guo SF. 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the granites from the Xiaoliugou deposit in the western of the North Qilian. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 16 - 34 (in Chinese with English abstract)
- Zuo GC and Wu HQ. 1997. A Bi-subduction-collision orogenic model of Early-Paleozoic in the middle part of North Qilian areas. *Advance in Earth Sciences*, 12(4): 315 - 323 (in Chinese with English abstract)
- Zuo GC, Wu MB, Mao JW and Zhang ZC. 1999. Structural evolution of Early Paleozoic tectonic belt in the west section of northern Qilian area. *Acta Geologica Gansu*, 8(1): 6 - 13 (in Chinese with English abstract)
- 强, 李百祥, 伍跃中, 郭周平, 段永民, 苏亮红, 雷学武, 张传. 2007. 祁连山铜金钨铅锌矿床成矿规律和成矿预测. 北京: 地质出版社
- 李建锋, 张志诚, 韩宝福. 2010. 中祁连西段肃北、石包城地区早古生代花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 26(8): 2431 - 2444
- 李文渊. 2004. 祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析. *地球学报*, 25(3): 313 - 320
- 李文渊, 郭周平, 王伟. 2005. 北祁连山加里东期聚敛作用的构造转换及其成矿响应. *地质论评*, 51(2): 120 - 127
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. *科学通报*, 52(9): 981 - 990
- 林国芳, 林凤萍. 2003. 北祁连加里东造山带南缘钨矿成矿背景及找矿潜力. *甘肃地质学报*, 12(1): 78 - 84
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. *地球化学*, 33(5): 459 - 464
- 毛景文, 张招崇, 任丰寿, 左国朝, 张作衡, 杨建民, 王志良, 叶得金. 1999. 北祁连山西段金属矿床时空分布和生成演化. *地质学报*, 73(1): 73 - 82
- 毛景文, 杨建民, 张作衡, 张招崇, 王志良, 田锋. 2000a. 甘肃肃北野牛滩含钨花岗岩质岩石学、矿物学和地球化学研究. *地质学报*, 74(2): 142 - 155
- 毛景文, 张作衡, 简平, 王志良, 杨建民, 张招崇. 2000b. 北祁连西段花岗岩质岩体的锆石 U-Pb 年龄报道. *地质论评*, 46(6): 616 - 620
- 毛景文, 张招崇, 杨建民, 左国朝, 张作衡, 叶得金, 王志良, 任丰寿, 张玉君, 彭聪, 刘煜洲, 姜牧. 2003. 北祁连山西段铜金铁钨多金属矿床成矿系列和找矿评价. 北京: 地质出版社
- 宋述光. 1997. 北祁连山俯冲杂岩带的构造演化. *地球科学进展*, 12(4): 353 - 365
- 王飞, 燕宁, 赵萍, 王真, 李发明, 吕建民. 2012. 北祁连大坂山地质与地球化学特征及成矿预测. *矿产勘查*, 3(1): 63 - 68
- 王荃, 刘雪亚. 1976. 我国西部祁连山区的古海洋地壳及其大地构造意义. *地质科学*, 11(1): 42 - 55
- 吴才来, 杨经绥, 杨宏义, Wooden JL, 史仁灯, 陈松永, 郑秋光. 2004. 北祁连东部两类 I 型花岗岩定年及其地质意义. *岩石学报*, 20(3): 425 - 432
- 吴才来, 徐学义, 高前明, 李向民, 雷敏, 郜源红, Frost RB, Wooden JL. 2010. 北祁连早古生代花岗岩浆作用及构造演化. *岩石学报*: 26(4): 1027 - 1044
- 吴汉泉, 冯益民, 霍有光, 左国朝. 1990. 北祁连山中段甘肃南奥陶系变质硬柱石蓝闪片岩的发现及其意义. *地质论评*, 36(3): 277 - 280
- 吴少锋, 陈礼标, 李积红, 王少华, 张海青. 2012. 青海省大通县大黑山钨矿地质特征及找矿前景. *甘肃科技*, 28(19): 30 - 32
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49(16): 1589 - 1604
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1995. 北祁连山构造-火山岩浆演化动力学. *西北地质科学*, 16(1): 1 - 28
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 北祁连山海相火山岩岩石成因. 北京: 地质出版社

附中文参考文献

- 柴凤梅, 董连慧, 杨富全, 刘锋, 耿新霞, 黄承科. 2010. 阿尔泰山南缘克朗盆地铁木尔特花岗岩体年龄、地球化学特征及成因. *岩石学报*, 26(2): 377 - 386
- 陈生民. 2007. 祁连山地区钨矿特征及找矿前景分析. *黄金科学技术*, 15(2): 26 - 35
- 丁成旺, 何存发, 张海青, 卢世银, 汪成萍, 赵胜楠. 2013. 青海省大通县大黑山地区钨矿矿床成因及找矿标志浅析. *甘肃科技*, 29(15): 35 - 37
- 冯益民. 1997. 祁连造山带研究概况——历史、现状及展望. *地球科学进展*, 12(4): 307 - 314
- 贾群子, 杨忠堂, 肖朝阳, 全守村, 邹湘华, 肖思云, 王升勤, 李宝

- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 赵江天, 杨合群, 赵东宏. 1999. 祁连山元古宙大陆溢流玄武岩. 地质论评, 45(7): 1028 - 1037
- 夏林圻, 夏祖春, 赵江天, 徐学义, 杨合群, 赵东宏. 2000. 北祁连山西段元古宙大陆溢流玄武岩性质的确定. 中国科学(D辑), 30(1): 1 - 8
- 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 1978. 祁连山古蛇绿岩带的地质构造意义. 地质学报, 54(4): 287 - 295
- 许志琴, 徐慧芬, 张建新, 李海兵, 朱志直, 曲景川, 陈代璋, 陈金禄, 杨开春. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学. 地质学报, 68(1): 1 - 14
- 杨国庆, 杨春茂. 2009. 塔尔沟地区1/5万矿产远景调查地质特征及找矿方向. 甘肃冶金, 31(5): 52 - 59
- 杨钟堂, 贾群子, 肖朝阳, 邹湘华, 叶得金, 段永民, 赵俊伟, 苏亮红. 2002. 塔儿沟-小柳沟钨矿集区成矿条件及区域找钨. 矿床地质, 21(增刊): 515 - 518
- 杨钟堂, 肖思去, 肖朝阳, 李宝强, 段永民, 苏亮红. 2004. 祁连成矿带钨矿成矿特征及其区域找矿标志. 中国地质, 31(3): 301 - 307
- 张建新, 许志琴. 1995. 北祁连中段加里东俯冲-增生杂岩、火山弧带及其变形特征. 地球学报, 16(2): 153 - 163
- 张建新, 许志琴, 陈文, 徐慧芬. 1997. 北祁连中段俯冲-增生杂岩、火山弧的时代探讨. 岩石矿物学杂志, 16(2): 112 - 119
- 张建新, 许志琴, 徐慧芬, 李海兵. 1998. 北祁连加里东期俯冲-增生楔结构及动力学. 地质科学, 33(3): 290 - 299
- 张兰英, 曲晓明, 辛洪波. 2008. 镜铁山桦树沟铁铜矿区中酸性岩脉地球化学特征、锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄及其地质意义. 地质论评, 54(2): 253 - 262
- 张旗, 孙晓猛, 周德进等. 1997. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义. 地球科学进展, 12(4): 366 - 393
- 张旗, 王焰, 钱青. 2000. 北祁连早古生代洋盆是裂陷槽还是大洋盆——与葛肖虹讨论. 地质科学, 35(1): 121 - 128
- 张作衡, 毛景文, 杨建民, 王志良, 张招崇. 2002. 北祁连加里东造山带塔儿沟砂卡岩-石英脉型钨矿床地质及成因. 矿床地质, 21(2): 200 - 211
- 赵辛敏, 张作衡, 李育森, 郭少丰. 2014. 北祁连西段小柳沟矿区花岗岩岩石锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因研究. 岩石学报, 30(1): 16 - 34
- 中国矿床编委会. 1994. 中国矿床(中卷). 北京: 地质出版社, 75 - 80
- 左国朝, 吴汉泉. 1997. 北祁连中段早古生代双向俯冲-碰撞造山模式剖析. 地球科学进展, 12(4): 315 - 323
- 左国朝, 吴茂炳, 毛景文, 张招崇. 1999. 北祁连西段早古生代构造演化史. 甘肃地质学报, 8(1): 6 - 13