

doi: 10.12029/gc20180406

李平, 刘红旭, 丁波, 田明明. 2018. 伊犁盆地南缘琼博拉二长花岗岩锆石 U-Pb 年代学及形成动力学机制[J]. 中国地质, 45(4): 720-739.

Li Ping, Liu Hongxu, Ding Bo, Tian Mingming. 2018. The Zircon U-Pb geochronology and dynamics mechanism for the formation of monzonitic granite in the Qiongbola area, south of Yili basin[J]. Geology in China, 45(4): 720-739(in Chinese with English abstract).

## 伊犁盆地南缘琼博拉二长花岗岩锆石年代学 及形成动力学机制

李平 刘红旭 丁波 田明明

(核工业北京地质研究院, 北京 100029)

**摘要:** 西天山造山带内琼博拉地区的长条状岩体位于伊犁盆地南缘, 由二长花岗岩组成。为厘定该二长花岗岩的形成机制, 本文对该二长花岗岩进行了详细的锆石 U-Pb 年代学、主量元素、微量元素以及 Sr-Nd-Pb 同位素研究。LA-ICP-MS 锆石年代学研究揭示出琼博拉地区二长花岗岩成岩年龄为  $(330.5 \pm 2.2)$  Ma、 $(339.7 \pm 2.2)$  Ma、 $(351.2 \pm 3.0)$  Ma, 为早中石炭世花岗岩, 比伊犁盆地 511 矿床含矿砂体的 U-Pb 同位素等时线年龄  $(308 \pm 26)$  Ma 老, 表明该二长花岗岩体可能是该含矿砂体的一部分物质来源。岩石主量元素、微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素测试结果揭示该二长花岗岩具有以下特征: (1)  $\text{SiO}_2$  (70.15%~73.38%) 含量高, 碱质 ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  含量为 6.32%~7.88%) 含量较高,  $\text{A/CNK}$  (0.82~1.03) 较高, 表明二长花岗岩为准铝质岩石, 属于高钾钙碱性系列; (2) LREE ( $50.19 \times 10^{-6}$ ~ $87.92 \times 10^{-6}$ ) 相对富集, HREE ( $9.44 \times 10^{-6}$ ~ $12.08 \times 10^{-6}$ ) 相对亏损, 无明显 Eu 异常 ( $\delta\text{Eu}$  为 0.71~0.97); (3) 富集 Rb、Th、K、Pb 和 Sr 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、Zr、P 和 Ti 等高场强元素; (4) 初始铈同位素比值为 0.7050 ~ 0.7082,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值为 0.512217 ~ 0.512254,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 0.3 ~ 1.0, Nd 模式年龄为 1010~1098 Ma。二长花岗岩的 Sr、Nd、Pb 同位素组成表明该岩石是由幔源玄武质岩浆与地壳重熔形成的硅铝质岩浆混染形成。结合区域构造演化, 本文认为二长花岗岩形成于板块的同碰撞构造环境。

**关键词:** 二长花岗岩; 锆石年代学; Sr-Nd-Pb 同位素; 琼博拉; 西天山

中图分类号: P581; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)04-0720-20

## The Zircon U-Pb geochronology and dynamics mechanism for the formation of monzonitic granite in the Qiongbola area, south of Yili basin

LI Ping, LIU Hongxu, DING Bo, TIAN Mingming

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Located in the south of Yili basin, the Western Tianshan Orogen belt played an essential provenance role in the formation of Yili basin. This paper focused on the dominant monzonitic granites of Qiongbola area, which is situated on the northern margin of

收稿日期: 2016-10-31; 改回日期: 2017-01-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目“典型产铀盆地成矿机理与成矿模式研究”(2015CB453004)及中国地质调查局“塔里木盆地北缘库车坳陷西段铀矿资源调查评价”项目(DD2016013628)联合资助。

作者简介: 李平, 女, 1988 生, 硕士, 工程师, 现从事矿物学、岩石学、地球化学及铀矿地质研究; E-mail: lp100029@163.com。

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2018, 45(4)

Western Tianshan belt. The authors investigated their U–Pb geochronology by using zircon and geochemistry. These granites are Early Carboniferous intrusions, which mainly include three stages, which are  $(351.2 \pm 3.0)$  Ma,  $(339.7 \pm 2.2)$  Ma, and  $(330.5 \pm 2.2)$  Ma, respectively, according to the LA–ICP–MS U–Pb dating results of zircons. The whole–rock U–Pb dating of ore–bearing sandstone of 511 U deposit yielded an isochron age of  $308 \pm 26$  Ma, suggesting that these granites were probably the main provenance for ore–bearing sandstone. The  $\text{SiO}_2$  content of these granites varies from 70.15% to 73.38%, the  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  values vary from 6.32% to 7.88%, and the A/CNK ratios vary from 0.82 to 1.03, suggesting that these intrusions are high–K calc–alkaline granites. The LREE values are from  $50.19 \times 10^{-6}$  to  $87.92 \times 10^{-6}$ , suggesting relatively more enriched than HREE which are  $9.44 \times 10^{-6}$  to  $12.08 \times 10^{-6}$ , with  $\delta\text{Eu}$  being commonly 0.71 to 0.97. In addition, these granites are commonly rich in Rb, Th, K, Pb, and Sr and depleted in Nb, Ta, Zr, P, and Ti. The Sr isotope ratios range from 0.7050 to 0.7082, the  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ratios vary from 0.512217 to 0.512254, and the  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  vary from 0.3 to 1.0, with model ages being from 1010 to 1098 Ma. These geochemical results highly suggest that these intrusions were the mixture of mantle–derived basaltic and crustal molten magma, and were formed in the syn–collision tectonic environment.

**Key words:** geochemistry; zircon U–Pb dating; Sr–Nd–Pb isotope; monzonitic granite; Qiongbola

**About the first author:** LI Ping, female, born in 1988, master, engineer, mainly engages in mineralogy, petrology, geochemistry and uranium geology research; E–mail: lp100029@163.com.

**Fund support:** Supported by National Key Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2015CB453004) and China Geological Survey program (No. DD2016013628).

## 1 引言

天山造山带不仅是中亚巨型造山带的组成部分,也是中国西部晚古生代岩浆活动的集中区,蕴含着丰富的古亚洲洋演化的地质信息。尽管对该造山带的研究已经有百余年的历史,但是关于该山脉的形成演化,特别是关于西天山古生代花岗岩类的成因和构造环境仍有不同的认识。朱志新等(2011)对西天山部分晚古生代侵入岩进行了研究,认为其主要为一套与洋盆收敛俯冲有关的钙碱性花岗岩,晚石炭世及其之后的古生代侵入岩则具有面状分布的特点,主要为一套与同碰撞有关的富铝花岗岩和后造山的富钾花岗岩。Windley 等认为早古生代至晚石炭世岩浆岩是南天山洋和北天山洋向伊犁—中天山地块之下俯冲的产物(Windley et al., 1990; Long et al., 2011)。韩宝福等(2004)认为西天山早古生代花岗岩形成于 380~490 Ma,认为其主要是与洋盆扩张过程或与早古生代的一次造山过程有关的铝质 A 型花岗岩。

新疆西天山造山带中部的伊犁盆地(图 1a),北邻天山—兴蒙造山带,南部和塔里木陆块相邻,地理上总体呈西宽东窄的三角形。伊犁盆地是在石炭纪—二叠纪裂谷基础上发展演化而成的内陆中新世山间断陷—拗陷复合型盆地(张良臣, 1985; 郝继鹏, 1991; 车自成等, 1994; 廖世南, 1992; 张国

伟等, 1999; 左国朝等, 2008), 碰撞缝合后属于西天山造山带内的山间盆地。

伊犁盆地南缘为中国重要的砂岩型铀矿集区, 分布有众多的铀矿床、铀矿(化)点, 资源潜力巨大(张金带, 2010; 刘红旭, 2015)。根据现有研究认识, 盆地南部察布查尔山大范围出露的古生代中酸性花岗岩及火山岩为盆地砂岩型铀矿含矿目的层的物源供给区, 因其花岗岩的成岩环境及其含铀性决定了盆地砂岩型铀矿化的规模而备受关注(陈戴生等, 1994; 陈戴生等, 1997; 李胜祥等, 2005; 李胜祥等, 2006)。该花岗岩成岩环境及其构造背景研究对于认识中生代盆地基底构造属性、评价盆地产铀潜力具有重要的科学意义。

本文在前人研究基础上, 结合近年来区域地质调查成果, 通过对位于西天山西段察布查尔山北坡琼博拉花岗岩的岩石学、岩石地球化学及同位素年代学等方面的研究, 查明该花岗岩岩石地球化学特征及其成岩年代, 恢复其成岩环境, 探讨伊犁盆地晚古生代基底构造格局及其动力学演化机制, 为进一步深化西天山地区板块动力学演化过程和新生代盆地演化动力学背景研究提供科学依据。

## 2 地质概况

研究区位于西天山西段伊犁盆地南缘(图 1a), 该区出露了大量的晚古生代石炭纪岩浆岩(图 1b),

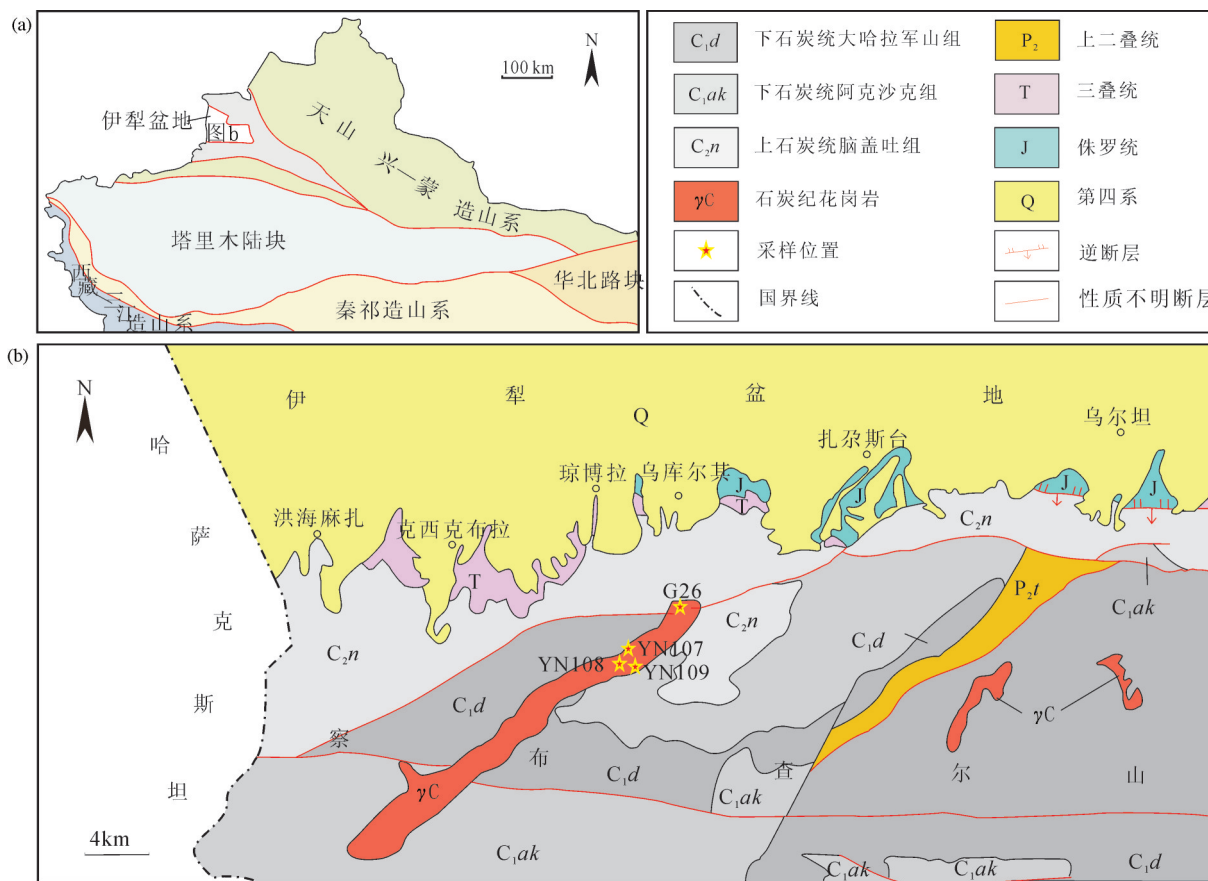


图1 研究区的区域地质图(a)及伊犁盆地南缘琼博拉地区地质简图(b)(据伊犁盆地1:20万地质图修改)  
Fig.1 Regional geologic map of the study area (a) and geological sketch map of the Qiongbola area in south of Yili Basin (b)  
(after 1 : 200000 Geologic Map of Yili Basin)

包括下石炭统大哈拉军山组( $C_{1d}$ )、阿克沙克组( $C_{1ak}$ )、上石炭统脑盖吐组( $C_{2n}$ )。大哈拉军山组由玄武岩、玄武安山岩、安山岩、粗面安山岩、英安岩、流纹岩及基性—中酸性火山碎屑凝灰岩组成(茹艳娇等,2012),这些火山岩被认为是板块俯冲碰撞造山的地质记录(朱永峰等,2005;邵铁全等,2006;张江苏等,2006;李注苍等,2006;程春华等,2010;茹艳娇等,2012;朱志新等,2012),具有岛弧火山岩的特征,分布于察布查尔山中部。阿克沙克组主要岩性为砾岩、砂岩、泥岩、灰岩、凝灰岩、凝灰质砂岩(熊绍云等,2011),为俯冲大地构造背景下的弧前深海—半深海相沉积(何国琦等,2005;李永军等,2010),与大哈拉军山组角岩、火山碎屑岩,呈角度不整合接触。脑盖吐组为一套中性、中酸性火山熔岩,岩石组合包括玄武质晶屑凝灰岩、玄武玢岩、安山质玻屑熔结凝灰岩、辉石安山玢岩、英安斑岩、含角砾熔岩、安山质火山角砾岩、浆屑晶屑熔结凝灰

岩和凝灰砂岩等(左国朝等,2008),主要分布于察布查尔山北缘,逆冲于盆地盖层之上,与大哈拉军山组和阿克沙克组逆冲断层接触。

### 3 岩相学

琼博拉地区发育二长花岗岩,出露面积大约81 km<sup>2</sup>(图1b),主要位于研究区的中部和东南部,侵入于下石炭统大哈拉军山组的基性—中性—酸性火山岩中,呈长条状产出。岩石为肉红色和灰白色,中粒结构,块状构造。该二长花岗岩(图2)的主要矿物为钾长石(35%)、石英(25%)、斜长石(33%)、黑云母和角闪石(4%),不透明矿物主要是磁铁矿,副矿物主要为锆石等,可见锆石和磷灰石包裹于角闪石中。

### 4 样品采集及分析测试方法

#### 4.1 样品采集

本次采集的岩石样品均取自伊犁盆地南缘琼

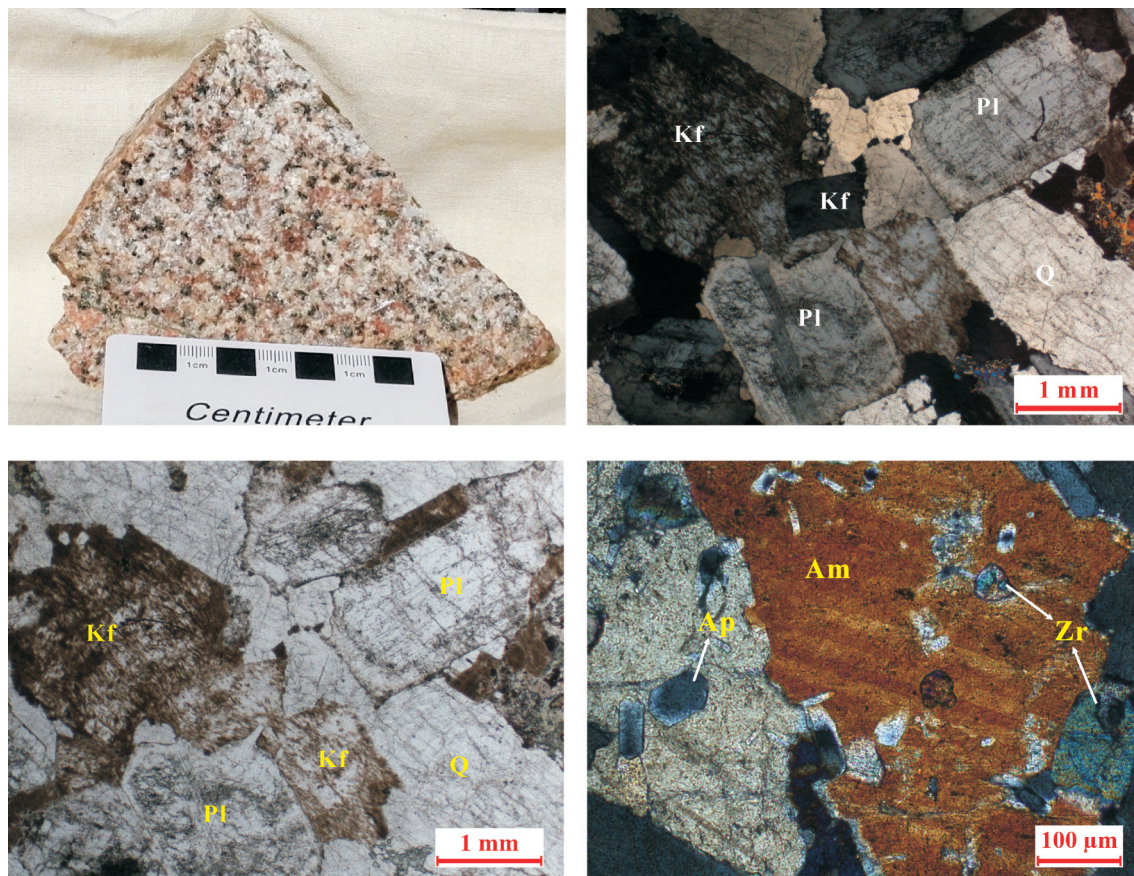


图2 二长花岗岩的岩石手标本和镜下特征

Q—石英;Pl—斜长石;Kf—钾长石;Bi—黑云母;Am—角闪石;Zr—锆石;Ap—磷灰石

Fig.2 Sample of monzonitic granite and its microphotograph

Q—Quartz; Pl—Plagioclase; Kf—Potassium feldspar; Bi—Biotite; Am—Hornblende; Zr—Zircon; Ap—Apatite

博拉花岗岩体,样品以无裂隙、弱风化为标准进行采集并编号。通过显微镜观察,选择风化较弱、裂隙和细脉不发育的样品,共计17件做地球化学分析(采样位置见图1b)。其中主微量元素分析17件,Sr-Nd同位素分析5件,Pb同位素分析10件。

#### 4.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

为了精确厘定二长花岗岩的形成年代,在琼博拉地区采集了典型的二长花岗岩样品,从中挑选锆石,经过手工挑选、制靶、剖光和照相观察。锆石的分选工作是在北京大学地质系完成。岩石样品经粉碎后,再经淘洗、磁选和重液分选,分离出尽可能多的锆石颗粒。再经双目镜人工挑出不同晶形、不同颜色的锆石,剔除颗粒较小、内含包裹体及裂隙、杂质较多的颗粒。锆石制靶以及阴极发光照相工作在北京锆年领航科技有限公司完成。在双目显微镜下挑选至少150颗锆石粘到双面胶上,加注环

氧树脂,待固化后,将靶内锆石打磨至原尺寸一半大小。样品靶抛光之后在光学显微镜下拍摄锆石反射光和透射光照片,以观察其抛光面和内部结构情况。通过对锆石靶上碎屑锆石颗粒的形态、锆石的内部结构和颗粒大小等方面的系统研究,选择岩浆环带明显、晶形完整、内部结构简单、少有变质增生边的锆石作为本次测试的对象。通过对照阴极发光、透射光和反射光图像,查明锆石内部结构和裂隙分布情况,选取锆石U-Pb测试点。本次的锆石测年采用LA-ICPMS方法,测试工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。所用仪器为Agilent 7500a ICP-MS和德国Lambda Physik AG公司GeoLas 2005 ArF193 nm紫外准分子激光剥蚀系统。其中激光器的单脉冲能量为220 mJ,最高重复频率20 Hz;测试采用8 Hz的激光频率,20 μm的激光束斑直径,激光剥蚀样品的深度为20~40 μm,测

试时间 45 s,以 91500 作为工作标样,详细测试方法可参见袁洪林(2012)。对测试结果首先使用 Anderson (2002)的方法处理普通铅的校正,在此基础上完成谐和年龄的计算,并借助 Isoplot4.0 处理数据结果及图件。所测定的锆石年龄均 < 1000 Ma, U-Pb 同位素年龄取  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  所对应的年龄值,所选取锆石年龄谐和度误差在  $\pm 10\%$  范围内。

#### 4.3 元素地球化学测试

切割去除岩石风化面,在玛瑙研钵中研磨至 200 目以下,进行主微量元素和 Sr、Nd、Pb 同位素分析测试。所有样品分析均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。主量元素分析使用 Philips PW2404 型 X 荧光光谱仪(XRF)完成,分析误差优于 1%;微量元素分析使用 Finnigan MAT Element I 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成,微量元素分析采用酸溶法溶样,分析结果包括 Li、Be、Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、U、Pb、Y 和 14 个稀土元素 REE 和 W、Re、Tl、Bi、Th、Zr 和 Hf。主微量元素具体分析见文献(Norrish and Hutton, 1969; Qu et al., 2004)。Sr-Nd 同位素分析根据微量元素中 Rb-Sr、Sm-Nd 含量称取适量样品于 Teflon 闷罐中,加入  $^{87}\text{Rb}$ - $^{84}\text{Sr}$  和  $^{149}\text{Sm}$ - $^{150}\text{Nd}$  混合稀释剂并用 HF、HNO<sub>3</sub> 和 HClO<sub>4</sub> 充分溶解后,用离子交换树脂分离出 Rb、Sr、Sm 和 Nd,最后在 ISOPROBE-T 热电离质谱仪(TIMMS)上测试。整个分析流程实验本底为: Rb、Sr <  $100 \times 10^{-12}$ ; Sm、Nd <  $50 \times 10^{-12}$ 。全岩 Pb 同位素采用离子交换法分离提纯 Pb,由热表面电离质谱完成,仪器型号为 ISOPROBE-T,对 1  $\mu\text{g}$  的  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ,其相对误差  $\leq 0.005\%$  ( $2\sigma$ ),整个流程的 Pb 空白本底为 0.1 ng,详细的分析流程见相关文献(张理刚等, 1993)。岩石化学和地球化学图解用路远发(2004)开发的 Geokit 软件编辑。

## 5 分析结果

### 5.1 二长花岗岩结晶年龄

样品 G26 采自伊犁盆地南缘察布查尔山西段琼博拉花岗岩体,据 1:20 万地质图(图幅号 K-44-4)资料显示,该花岗岩为石炭纪花岗岩(图 1b)。样品中所挑选的锆石呈黄褐色,包体较为发育。自形-半自形,短柱状、棱角状,具有明显的岩浆环带

结构,粒度介于 100~250  $\mu\text{m}$ (图 3)。CL 图像(图 3)显示绝大多数锆石内部结构具有明显的韵律环带,结构上表明锆石为岩浆成因(Crofu et al., 2003; Koschek, 1993; 吴元保等, 2004; 李长民, 2009)。二长花岗岩中锆石 Th/U 比值介于 0.61~2.55(平均值为 1.89),从化学成分上也证明锆石为典型的岩浆成因(Belousova et al., 2002)。

研究区二长花岗岩样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果见表 1 和图 3(其中表 1 用粗线分为 3 段,分别对应图 3a、图 3b 和图 3c 的锆石测点)。从图 3 中可以看出,其中 28 个锆石测点分 3 组均匀地落在谐和线的三段线上。第一个晶体群有 10 个锆石测点,这些测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $(330.5 \pm 2.2)\text{Ma}$ , MSWD = 0.63;第二个晶体群有 12 个锆石测点,这些测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $(339.7 \pm 2.2)\text{Ma}$ , MSWD = 0.19;第三个晶体群有 6 个锆石测点,这些测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $(351.2 \pm 3.0)\text{Ma}$ , MSWD = 0.77;这代表了该花岗岩体侵位年龄,即为早石炭世花岗岩,而且该花岗岩岩浆可能有两次构造-热事件,每次时间均相差 10 Ma 左右。

### 5.2 主量元素化学特征

在研究区取 17 个样品进行主量元素分析结果见表 2。二长花岗岩 SiO<sub>2</sub> 含量在 70.15%~73.38%,岩石中碱质含量较高, (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O) 含量为 6.32%~7.88%,且 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 均大于 1(除 YN109-3、YN109-5、YN109-9 外),相对富钾;相对贫 TiO<sub>2</sub> (0.312%~0.363%)、MnO (0.022%~0.055%) 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.068%~0.09%);岩石中 Fe 含量较高, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 含量在 1.94%~3.57%,平均值为 2.85%,可能与岩石中含有黑云母有关。

二长花岗岩的 A/CNK (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 的摩尔比)变化于 0.82~1.03,铝饱和指数图解 (Peccerillo and Taylor, 1976) (图 4a) 显示,二长花岗岩属于准铝质岩石(除 YN108-4 为过铝质岩石)。从 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解 (Peccerillo and Taylor, 1976) (图 4b) 中可以看出,二长花岗岩样品的投影点落入了高钾钙碱性系列(除 YN109-3 的投影点落入了钙碱性系列)。从数据(表 2)上看,YN109-3 之所以与其他样品不同,是因为其 SiO<sub>2</sub> (73.38%) 的含量偏高, K<sub>2</sub>O (2.23%) 的含量偏低导致的。

表1 琼博拉地区二长花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测定结果  
(表分为3段,年龄从小到大排列,分别对应图3a、图3b和图3c的锆石测点)  
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of the monzonitic granite from Qiongbola area

| 测点号          | 含量/ $10^{-6}$ |     |     | 同位素比值 |               |                                   |               |                                  |               | 年龄/Ma                            |               |                                   |               |
|--------------|---------------|-----|-----|-------|---------------|-----------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|
|              | Pb            | Th  | U   | Th/U  |               | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ |               | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ |               | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ |               | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ |               |
|              |               |     |     | 比值    | 误差/ $1\sigma$ | 比值                                | 误差/ $1\sigma$ | 比值                               | 误差/ $1\sigma$ | 比值                               | 误差/ $1\sigma$ | 年龄                                | 误差/ $1\sigma$ |
| 20121025B030 | 70            | 140 | 261 | 1.86  | 0.0533        | 0.0030                            | 0.3819        | 0.0213                           | 0.0520        | 0.0006                           | 0.0006        | 340.0                             | 132.00        |
| 20121024D153 | 58            | 125 | 228 | 1.83  | 0.0479        | 0.0020                            | 0.3433        | 0.0138                           | 0.0521        | 0.0006                           | 0.0006        | 92.3                              | 96.98         |
| 20121025B006 | 69            | 125 | 264 | 2.11  | 0.0584        | 0.0030                            | 0.4200        | 0.0211                           | 0.0522        | 0.0006                           | 0.0006        | 545.0                             | 116.00        |
| 20121025B028 | 99            | 211 | 387 | 1.83  | 0.0531        | 0.0018                            | 0.3826        | 0.0122                           | 0.0523        | 0.0005                           | 0.0005        | 331.0                             | 74.29         |
| 20121024D152 | 76            | 179 | 291 | 1.62  | 0.0472        | 0.0018                            | 0.3415        | 0.0122                           | 0.0526        | 0.0006                           | 0.0006        | 56.7                              | 86.45         |
| 20121024D157 | 86            | 239 | 339 | 1.42  | 0.0497        | 0.0017                            | 0.3587        | 0.0114                           | 0.0525        | 0.0005                           | 0.0005        | 179.7                             | 75.48         |
| 20121025B021 | 67            | 124 | 248 | 2.00  | 0.0710        | 0.0026                            | 0.5256        | 0.0183                           | 0.0537        | 0.0006                           | 0.0006        | 957.8                             | 73.28         |
| 20121025B014 | 37            | 61  | 132 | 2.17  | 0.0546        | 0.0028                            | 0.3989        | 0.0198                           | 0.0530        | 0.0007                           | 0.0007        | 394.4                             | 110.53        |
| 20121025B029 | 53            | 100 | 213 | 2.14  | 0.0542        | 0.0023                            | 0.3978        | 0.0164                           | 0.0533        | 0.0006                           | 0.0006        | 378.0                             | 93.21         |
| 20121025B025 | 85            | 234 | 332 | 1.42  | 0.0568        | 0.0019                            | 0.4180        | 0.0133                           | 0.0533        | 0.0005                           | 0.0005        | 484.4                             | 72.71         |
| 20121025B005 | 50            | 101 | 198 | 1.97  | 0.0520        | 0.0026                            | 0.3867        | 0.0187                           | 0.0539        | 0.0007                           | 0.0007        | 286.5                             | 110.39        |
| 20121025B008 | 70            | 115 | 293 | 2.54  | 0.0547        | 0.0023                            | 0.4066        | 0.0165                           | 0.0539        | 0.0006                           | 0.0006        | 400.1                             | 91.80         |
| 20121025B015 | 107           | 219 | 411 | 1.88  | 0.0591        | 0.0019                            | 0.4401        | 0.0137                           | 0.0540        | 0.0005                           | 0.0005        | 569.4                             | 69.98         |
| 20121025B011 | 71            | 146 | 256 | 1.75  | 0.0575        | 0.0023                            | 0.4280        | 0.0165                           | 0.0540        | 0.0006                           | 0.0006        | 508.4                             | 86.05         |
| 20121025B012 | 85            | 133 | 329 | 2.47  | 0.0573        | 0.0024                            | 0.4266        | 0.0170                           | 0.0539        | 0.0006                           | 0.0006        | 504.2                             | 89.29         |
| 20121024D155 | 61            | 97  | 197 | 2.03  | 0.0520        | 0.0020                            | 0.3860        | 0.0145                           | 0.0539        | 0.0006                           | 0.0006        | 284.4                             | 86.84         |
| 20121025B009 | 61            | 93  | 202 | 2.16  | 0.0546        | 0.0024                            | 0.4079        | 0.0170                           | 0.0542        | 0.0007                           | 0.0007        | 394.5                             | 93.59         |
| 20121024D159 | 69            | 121 | 252 | 2.08  | 0.0541        | 0.0021                            | 0.4038        | 0.0152                           | 0.0542        | 0.0006                           | 0.0006        | 375.2                             | 84.98         |
| 20121025B020 | 75            | 152 | 286 | 1.88  | 0.0565        | 0.0022                            | 0.4228        | 0.0154                           | 0.0543        | 0.0006                           | 0.0006        | 469.5                             | 82.82         |
| 20121025B031 | 62            | 111 | 216 | 1.95  | 0.0536        | 0.0022                            | 0.4093        | 0.0164                           | 0.0554        | 0.0006                           | 0.0006        | 354.4                             | 91.07         |
| 20121024D160 | 39            | 67  | 125 | 1.86  | 0.0600        | 0.0029                            | 0.4505        | 0.0208                           | 0.0545        | 0.0007                           | 0.0007        | 604.2                             | 100.26        |
| 20121024D158 | 58            | 129 | 227 | 1.76  | 0.0496        | 0.0021                            | 0.3731        | 0.0151                           | 0.0546        | 0.0006                           | 0.0006        | 175.9                             | 95.02         |
| 20121025B031 | 62            | 111 | 216 | 1.95  | 0.0536        | 0.0022                            | 0.4093        | 0.0164                           | 0.0554        | 0.0006                           | 0.0006        | 354.4                             | 91.07         |
| 20121025B023 | 55            | 96  | 191 | 1.99  | 0.0600        | 0.0027                            | 0.4615        | 0.0196                           | 0.0558        | 0.0007                           | 0.0007        | 601.7                             | 92.82         |
| 20121025B007 | 75            | 146 | 294 | 2.02  | 0.0559        | 0.0021                            | 0.4296        | 0.0153                           | 0.0557        | 0.0006                           | 0.0006        | 448.8                             | 80.40         |
| 20121024D149 | 49            | 93  | 182 | 1.95  | 0.0565        | 0.0022                            | 0.4373        | 0.0166                           | 0.0562        | 0.0007                           | 0.0007        | 471.5                             | 85.90         |
| 20121024D156 | 237           | 504 | 793 | 1.57  | 0.0618        | 0.0013                            | 0.4843        | 0.0092                           | 0.0569        | 0.0004                           | 0.0004        | 668.5                             | 43.82         |
| 20121025B032 | 67            | 113 | 240 | 2.13  | 0.0533        | 0.0023                            | 0.4163        | 0.0170                           | 0.0567        | 0.0007                           | 0.0007        | 339.7                             | 92.99         |
|              |               |     |     |       |               |                                   |               |                                  |               |                                  |               | 353.4                             | 12.18         |
|              |               |     |     |       |               |                                   |               |                                  |               |                                  |               | 348.3                             | 11.8          |
|              |               |     |     |       |               |                                   |               |                                  |               |                                  |               | 385.3                             | 13.62         |
|              |               |     |     |       |               |                                   |               |                                  |               |                                  |               | 362.9                             | 10.83         |
|              |               |     |     |       |               |                                   |               |                                  |               |                                  |               | 368.3                             | 11.73         |
|              |               |     |     |       |               |                                   |               |                                  |               |                                  |               | 401.0                             | 6.30          |
|              |               |     |     |       |               |                                   |               |                                  |               |                                  |               | 356.7                             | 2.65          |
|              |               |     |     |       |               |                                   |               |                                  |               |                                  |               | 355.5                             | 4.04          |

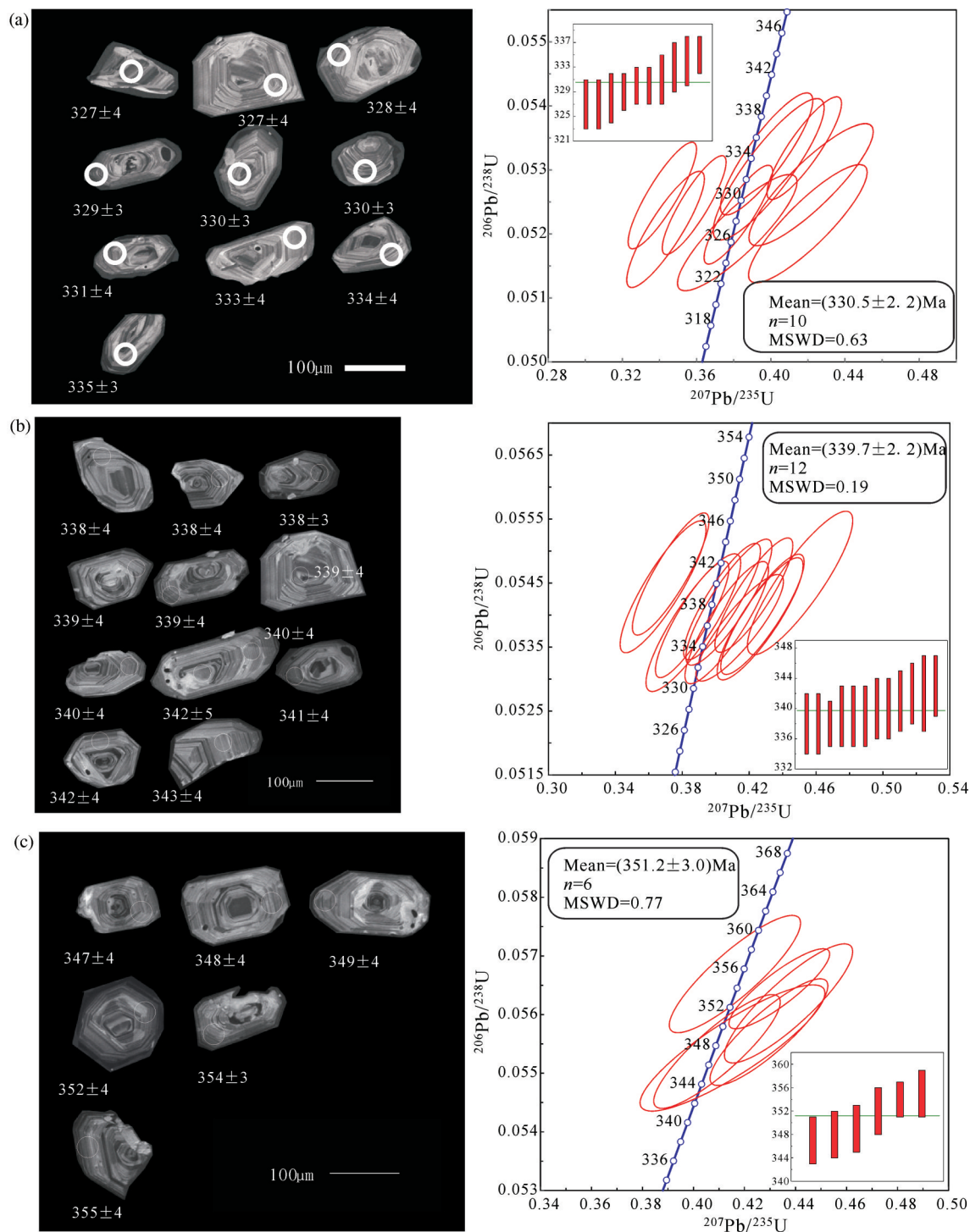


图3 样品 G26 锆石 330.5 Ma 左右的晶体群的测点位置和 LA-ICP MS U-Pb 同位素谐和图(a)、样品 G26 锆石 339.7 Ma 左右的晶体群的测点位置和 LA-ICP MS U-Pb 同位素谐和图(b)及样品 G26 锆石 351.2 Ma 左右的晶体群的测点位置和 LA-ICP MS U-Pb 同位素谐和图(c)

Fig.3 Dating spots and zircon LA-ICP MS U-Pb isotopic concordia plots for the 330.5 Ma zircons of sample G26(a); Dating spots and zircon LA-ICP MS U-Pb isotopic concordia plots for the 339.7 Ma zircons of sample G26 (b); Dating spots and zircon LA-ICP MS U-Pb isotopic concordia plots for the 351.2 Ma zircons of sample G26(c)

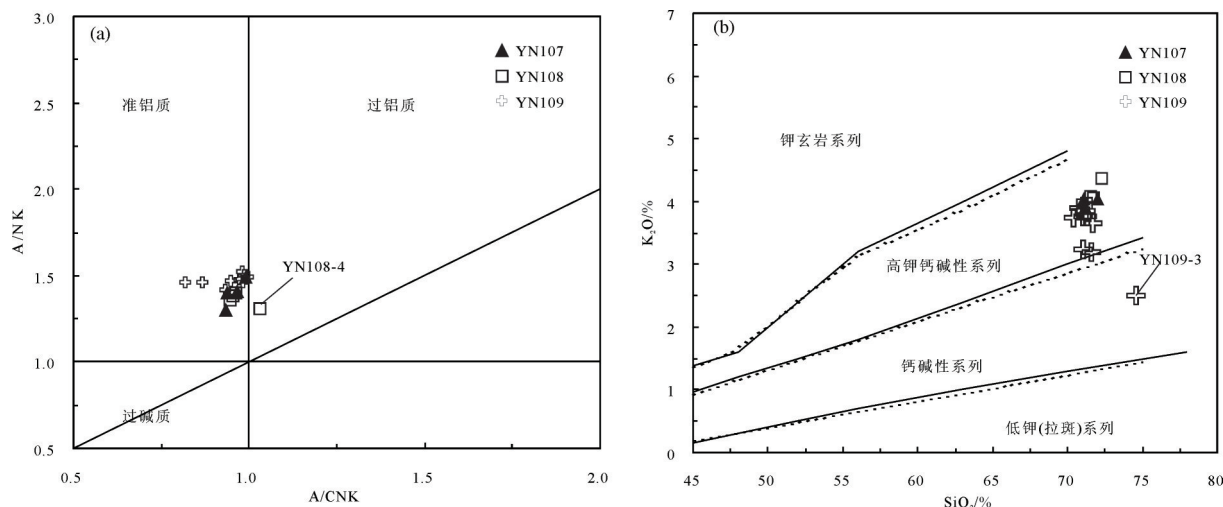


图4 A/CNK-A/NK 图解(a)和二长花岗岩 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解(b)(据 Peccerillo and Taylor, 1976)

A/CNK = molar [ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / ( CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O ) ], A/NK = molar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / ( Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O )

Fig.4 A/CNK-A/NK diagram (a) and SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram of Monzonitic granite (b)(after Peccerillo and Taylor, 1976)

A/CNK = molar [ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / ( CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O ) ], A/NK = molar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / ( Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O )

### 5.3 稀土与微量元素地球化学特征

由球粒陨石稀土元素标准化配分曲线(图 5a)和表 3 可以看出,琼博拉地区二长花岗岩的稀土含量( $\sum \text{REE}$ )在  $59.63 \times 10^{-6} \sim 100.01 \times 10^{-6}$ ,变化较小;轻重稀土分馏明显(LREE/HREE=5.32~7.58, La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>=4.21~8.1),轻稀土元素相对富集( $\sum \text{LREE} = 50.19 \times 10^{-6} \sim 87.92 \times 10^{-6}$ ),重稀土元素相对亏损( $\sum \text{HREE} = 9.44 \times 10^{-6} \sim 12.08 \times 10^{-6}$ ),岩石中 $\delta \text{Eu}$ 为 0.71~0.97, Eu 弱异常或不明显。琼博拉花岗岩稀土元素配分模式呈弱右倾型,稀土总量低;轻重稀土分馏较明显,说明其源区可能有石榴石残留;多数样品铕异常不明显,说明岩浆演化过程中不存在斜长石的结晶分离或源区无斜长石的残留。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 5b)中,二长花岗岩的微量元素变化特征基本一致,具有相对一致的配分型式。均表现为富集 Rb、Th、K、Pb 和 Sr 等大离子亲石元素,相对亏损 Nb、Ta、Zr、P 和 Ti 等高场强元素。Nb= $4.92 \times 10^{-6} \sim 6.42 \times 10^{-6}$ ,接近大陆岛弧的含量( $(3.3 \pm 1.6) \times 10^{-6}$ , McCulloch and Gamble, 1991)。

### 5.4 全岩 Sr-Nb-Pb 同位素的特征

琼博拉地区二长花岗岩 Sr-Nd 同位素组成见表 4,计算时采用的年龄为本文利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法获得的二长花岗岩锆石年龄( $337.7 \pm 3.4$ ) Ma。在计算 Nd 模式年龄时,采用两阶

段模式。所采用的参数见表 4,计算公式引自 Li and McCulloch (1996)。

二长花岗岩的 Sr 初始比值  $I_{\text{Sr}} = 0.7050 \sim 0.7082$ ,平均值为 0.7057;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值为  $0.512217 \sim 0.512254$ ,平均值为 0.512236,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 0.3 ~ 1.0, Nd 模式年龄为 1010~1098 Ma。二长花岗岩的  $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$  均为负值,数值介于 -0.41 ~ -0.37,表明源区的稀土元素 Sm、Nd 分馏相对不太明显,说明用上述测试数据计算的钆同位素模式年龄是相对可靠的。

琼博拉二长花岗岩在  $\varepsilon_{\text{Sr}}(t) - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  (图 6) 相关图解(韩吟文等, 2003; Janh et al., 1999) 中均显示了混合成因的特点。

琼博拉地区二长花岗岩的全岩 Pb 同位素分析结果见表 5。其现今的全岩 Pb 同位素组成为:  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.908 \sim 40.228$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.617 \sim 15.66$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.793 \sim 20.183$ 。根据二长花岗岩中岩浆锆石的 U-Pb 定年结果及测定的全岩现今 Pb 同位素比值和 U、Th、Pb 含量,计算岩石现今的  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$  比值,据此按 Pb 同位素单阶段演化模型计算岩石的初始 Pb 同位素比值。结果表明,二长花岗岩计算的初始 Pb 同位素组成为:  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 36.1617 \sim 38.0538$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.5458 \sim 15.6198$ ,  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 18.0376 \sim 18.9538$ 。计算的初始 Pb 同位素比值和现今的全岩 Pb 同位素组成之间较大的差别,这主要与它们具有古老的形成时代和相对较高的

表2 琼博拉花岗岩主量元素含量(%)及计算结果

Table 2 Analytical result of major elements (%) of granites from Qionbola

| 样品编号                                        | YN107-1  | YN107-2 | YN107-3 | YN107-4 |          | YN108-1 | YN108-2 | YN108-3 | YN108-4 |
|---------------------------------------------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| 岩性                                          | 肉红色二长花岗岩 |         |         |         | 肉红色二长花岗岩 |         |         |         |         |
| SiO <sub>2</sub>                            | 70.33    | 70.59   | 71.1    | 70.53   |          | 71.21   | 70.93   | 70.4    | 71.32   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 14.2     | 14.08   | 13.9    | 14.08   |          | 13.85   | 14.02   | 14.03   | 13.63   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup> | 3.22     | 2.84    | 2.11    | 3.19    |          | 3.02    | 2.73    | 2.8     | 3.04    |
| MgO                                         | 1.02     | 1.05    | 0.991   | 0.93    |          | 0.894   | 0.926   | 0.992   | 0.948   |
| CaO                                         | 2.64     | 2.72    | 2.29    | 2.54    |          | 2.5     | 2.52    | 2.48    | 1.52    |
| Na <sub>2</sub> O                           | 3.2      | 3.47    | 3.89    | 3.52    |          | 3.35    | 3.48    | 3.68    | 3.51    |
| K <sub>2</sub> O                            | 3.96     | 4       | 3.99    | 3.87    |          | 4.03    | 4.05    | 3.93    | 4.31    |
| MnO                                         | 0.055    | 0.041   | 0.038   | 0.052   |          | 0.043   | 0.044   | 0.042   | 0.037   |
| TiO <sub>2</sub>                            | 0.347    | 0.363   | 0.352   | 0.335   |          | 0.317   | 0.326   | 0.343   | 0.312   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>               | 0.082    | 0.09    | 0.085   | 0.077   |          | 0.076   | 0.074   | 0.077   | 0.069   |
| LOI                                         | 0.75     | 0.59    | 1.06    | 0.7     |          | 0.53    | 0.72    | 1.04    | 1.19    |
| TOTAL                                       | 99.804   | 99.834  | 99.806  | 99.824  |          | 99.82   | 99.82   | 99.814  | 99.886  |
| FeO                                         | 2.12     | 1.76    | 1.61    | 2.16    |          | 1.87    | 1.66    | 1.59    | 1.91    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 2.86     | 2.96    | 2.95    | 2.80    |          | 2.96    | 2.99    | 2.88    | 3.16    |
| Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O          | 7.16     | 7.47    | 7.88    | 7.39    |          | 7.38    | 7.53    | 7.61    | 7.82    |
| K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O          | 1.24     | 1.15    | 1.03    | 1.10    |          | 1.20    | 1.16    | 1.07    | 1.23    |
| A/NK                                        | 1.49     | 1.40    | 1.30    | 1.41    |          | 1.40    | 1.39    | 1.36    | 1.31    |
| A/CNK                                       | 0.99     | 0.94    | 0.93    | 0.96    |          | 0.96    | 0.95    | 0.95    | 1.03    |

| 样品编号                                        | YN109-1  | YN109-2 | YN109-3 | YN109-4 | YN109-5 | YN109-6 | YN109-7 | YN109-8 | YN109-9 |
|---------------------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 岩性                                          | 灰白色二长花岗岩 |         |         |         |         |         |         |         |         |
| SiO <sub>2</sub>                            | 70.34    | 70.15   | 73.38   | 70.71   | 71.32   | 71.32   | 70.78   | 70.99   | 70.63   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 14.22    | 14.07   | 13.59   | 14.09   | 14.21   | 13.92   | 14.07   | 14.02   | 14.45   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup> | 3.41     | 3.82    | 1.98    | 3.14    | 1.94    | 2.92    | 3.57    | 3.38    | 1.31    |
| MgO                                         | 0.984    | 1.03    | 0.931   | 0.989   | 0.971   | 0.89    | 0.97    | 0.888   | 1.08    |
| CaO                                         | 2.7      | 2.87    | 2.51    | 2.6     | 3.65    | 2.74    | 2.74    | 2.67    | 4.27    |
| Na <sub>2</sub> O                           | 3.33     | 3.38    | 4.09    | 3.4     | 3.83    | 3.6     | 3.23    | 3.39    | 3.9     |
| K <sub>2</sub> O                            | 3.86     | 3.72    | 2.23    | 3.73    | 3.18    | 3.62    | 3.73    | 3.83    | 3.21    |
| MnO                                         | 0.054    | 0.051   | 0.028   | 0.035   | 0.029   | 0.04    | 0.047   | 0.044   | 0.022   |
| TiO <sub>2</sub>                            | 0.334    | 0.346   | 0.332   | 0.345   | 0.327   | 0.318   | 0.337   | 0.313   | 0.36    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>               | 0.086    | 0.081   | 0.068   | 0.077   | 0.074   | 0.074   | 0.078   | 0.071   | 0.086   |
| LOI                                         | 0.52     | 0.32    | 0.71    | 0.71    | 0.32    | 0.4     | 0.29    | 0.24    | 0.52    |
| TOTAL                                       | 99.838   | 99.838  | 99.849  | 99.826  | 99.851  | 99.842  | 99.842  | 99.836  | 99.838  |
| FeO                                         | 1.99     | 3.13    | 1.61    | 2.08    | 1.55    | 1.84    | 2.27    | 2.83    | 1.03    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 2.78     | 2.66    | 1.13    | 2.64    | 2.22    | 2.58    | 2.64    | 2.76    | 2.30    |
| Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O          | 7.19     | 7.1     | 6.32    | 7.13    | 7.01    | 7.22    | 6.96    | 7.22    | 7.11    |
| K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O          | 1.16     | 1.10    | 0.55    | 1.10    | 0.83    | 1.01    | 1.15    | 1.13    | 0.82    |
| A/NK                                        | 1.47     | 1.47    | 1.49    | 1.46    | 1.46    | 1.41    | 1.50    | 1.44    | 1.46    |
| A/CNK                                       | 0.98     | 0.95    | 0.99    | 0.98    | 0.87    | 0.94    | 0.98    | 0.96    | 0.82    |

注:Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>为全铁,设FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0.89,FeO由湿化学法单独测定。

Th、U含量相关。在铅构造模式演化图(朱炳泉, 1998)(图7)中,其数据点分布在造山带演化线和地幔演化线之间,反映Pb可能不是单一来源(除YN107-1落在造山带演化线和上地壳演化线之间)。成岩物质来源可能主要由地幔物质和造山带

物质提供,混有少量上地壳物质,以造山带Pb为主。

## 6 讨 论

### 6.1 成因分析

琼博拉地区二长花岗岩的SiO<sub>2</sub>含量在70.15%~

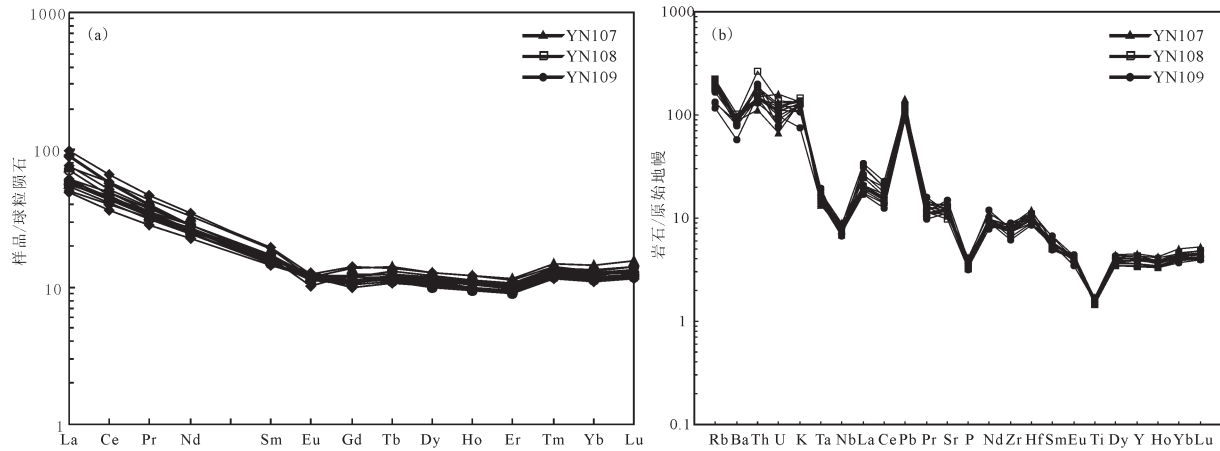


图5 琼博拉二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a)及琼博拉二长花岗岩微量元素原始地幔标准化图解(b)  
(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of monzonitic granites from Qiongbola(a); trace element spider diagram of monzonitic granites from Qiongbola(b) (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

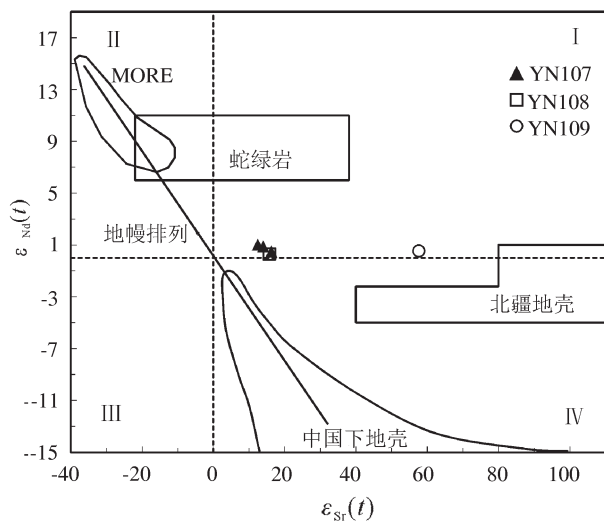


图6 琼博拉花岗岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  图解  
(幔源系列分布在 II, 陆壳改造型系列在 IV 右下侧, 同熔型系列在 IV 左上侧)

Fig.6 Diagram of  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  of the granites from Qiongbola

73.38%, 岩石中碱质含量较高, 相对富钾; A/CNK 的值变化于 0.82 ~ 1.03, 为准铝质-弱过铝质岩石, 属于钙碱性-高钾钙碱性系列。球粒陨石稀土元素标准化配分曲线表现为右倾斜的 V 型曲线, Eu 呈现弱负异常。二长花岗岩的微量元素变化特征基本一致, 具有相对一致的配分型式。均表现为富集 Rb、Th、K、Pb 和 Sr 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、Zr、P 和 Ti 等高场强元素。因 Rb、Th 富集和 Eu

亏损指示壳源的特征; Zr 富集, 是地壳物质的指示, 贫化是上地幔起源的象征; P 富集, 起源于富集型地幔未混染的玄武岩, 贫化则起源于亏损地幔或地壳岩石; Nb-Ta 槽说明与陆壳有密切关系; Ti 的习性与 Zr 相反 (Smith, 1976; Pearce et al., 1984; Sun and McDonough, 1989; 李昌年, 1992; 林景仟, 1994; Rollison H R et al., 2000; 郝晓飞等, 2014)。这都说明了琼博拉二长花岗岩的母岩浆来源于地幔, 后在上升过程中受到了壳源物质的混染。

根据 Sr 同位素在花岗岩类岩石的成因研究 (刘英俊, 1987; Hugh and Rollison, 2000; 肖庆辉, 邓晋福等, 2002), 可以将琼博拉二长花岗岩的 Sr 初始值分为两类。低铷花岗岩,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值介于 0.702 ~ 0.706, 为玄武岩的初始比值, 一般认为是幔源型花岗岩, 代表样品为 YN107-1、YN107-2、YN107-4、YN108-2; 中等铷花岗岩,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值介于 0.706 ~ 0.712, 主要由于壳幔混熔或下地壳物质部分熔融所致, 代表性样品为 YN109-9, 其  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值为 0.7082。

根据 Nd 同位素在花岗岩类岩石的成因研究 (刘英俊, 1987; Hugh and Rollison, 2000; 肖庆辉, 邓晋福等, 2002), 琼博拉二长花岗岩的 Nd 初始值属于  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) > 0$  系列, 表明它们来源于亏损地幔, 正值越大, 表明它们来源于轻稀土亏损愈明显的地幔源区, 琼博拉二长花岗岩样品的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  均大于 0, 其值介于 0.3 ~ 1.5, 平均值为 0.64。Nd 模式年龄为 1010 ~

表3 琼博拉花岗岩微量元素含量( $10^{-6}$ )  
Table 3 Analytical result of trace elements ( $10^{-6}$ ) of granites from Qionbola

| 样品编号 | YN107-1 | YN107-2 | YN107-3 | YN107-4 | YN108-1 | YN108-2 | YN108-3 | YN108-4 | YN109-1 | YN109-2 | YN109-3 | YN109-4 | YN109-5 | YN109-6 | YN109-7 | YN109-8 | YN109-9 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Li   | 2.25    | 1.8     | 1.73    | 2.08    | 1.6     | 1.71    | 1.87    | 2.29    | 2.93    | 2.71    | 2.94    | 2.68    | 1.47    | 2.3     | 3.93    | 3.31    | 2.57    |
| Be   | 1.13    | 1.29    | 1.21    | 1.14    | 1.67    | 1.16    | 1.24    | 1.23    | 1.27    | 1.16    | 1.26    | 1.17    | 1.34    | 1.3     | 1.22    | 1.09    | 1.24    |
| Sc   | 7.39    | 7.88    | 7.52    | 6.63    | 6.65    | 6.46    | 8.08    | 6.22    | 7.52    | 7       | 5.67    | 6.81    | 7.02    | 6.59    | 7.28    | 6.57    | 7.82    |
| V    | 54.1    | 55.8    | 45.9    | 49.6    | 48.6    | 49.2    | 55.3    | 43.8    | 56.9    | 52.7    | 40.8    | 54.4    | 48.9    | 48.5    | 51.3    | 48.5    | 58.7    |
| Cr   | 5.81    | 7.07    | 7.2     | 7.24    | 7.37    | 6.43    | 6.63    | 6.22    | 7.46    | 7.68    | 6.9     | 7.36    | 7.88    | 5.75    | 6.89    | 6.79    | 6.96    |
| Co   | 6.36    | 4.04    | 2.85    | 4.8     | 3.63    | 3.57    | 3.99    | 4.95    | 6.48    | 5.53    | 2.29    | 5.43    | 2.29    | 4.52    | 5.88    | 4.47    | 1.82    |
| Ni   | 2.54    | 3.12    | 3.24    | 3.26    | 3.34    | 2.89    | 3.05    | 2.92    | 3.28    | 3.47    | 2.25    | 3.27    | 3.36    | 2.69    | 3.07    | 3       | 2.66    |
| Cu   | 5.16    | 12.6    | 7.15    | 6.71    | 3.45    | 2.92    | 5.53    | 24      | 5.33    | 5.99    | 3.08    | 8.01    | 4.61    | 7.46    | 6.08    | 9.62    | 3.71    |
| Zn   | 22.1    | 15.8    | 19      | 23.5    | 13.3    | 14.2    | 21.6    | 17      | 39.6    | 18.6    | 17.7    | 15.6    | 12.9    | 14      | 18.1    | 15.5    | 18.1    |
| Ga   | 13.3    | 13.6    | 12.7    | 13.1    | 13      | 12.4    | 13.6    | 12.8    | 14      | 12.9    | 12.6    | 13.2    | 13.8    | 13      | 13.5    | 13.2    | 13.2    |
| Rb   | 131     | 115     | 117     | 120     | 122     | 118     | 125     | 140     | 139     | 118     | 73.4    | 117     | 85      | 106     | 121     | 118     | 83.2    |
| Sr   | 241     | 251     | 223     | 265     | 259     | 252     | 267     | 207     | 239     | 226     | 287     | 261     | 285     | 233     | 239     | 234     | 317     |
| Nb   | 5.43    | 6.42    | 6.11    | 5.38    | 5.12    | 4.92    | 5.71    | 5.16    | 6.12    | 5.82    | 4.76    | 5.03    | 5.49    | 5.17    | 5.75    | 5.16    | 5.64    |
| Mo   | 3.47    | 2.53    | 4.35    | 4.32    | 4.25    | 3.34    | 2.96    | 3.49    | 7.31    | 5.73    | 4.57    | 6.46    | 6.06    | 2.66    | 3.89    | 5.28    | 3.22    |
| Cd   | 0.052   | 0.039   | 0.04    | 0.089   | 0.055   | 0.066   | 0.098   | 0.052   | 0.045   | 0.045   | 0.083   | 0.082   | 0.057   | 0.042   | 0.053   | 0.08    | 0.05    |
| In   | 0.025   | 0.029   | 0.029   | 0.026   | 0.02    | 0.021   | 0.024   | 0.018   | 0.026   | 0.02    | 0.013   | 0.014   | 0.014   | 0.023   | 0.021   | 0.021   | 0.018   |
| Sb   | 0.219   | 0.221   | 0.292   | 0.313   | 0.236   | 0.311   | 0.223   | 0.25    | 0.291   | 0.268   | 0.229   | 1.25    | 0.269   | 0.167   | 0.186   | 0.218   | 0.185   |
| Cs   | 1.87    | 1.56    | 1.16    | 1.49    | 2.23    | 2.15    | 1.61    | 1.21    | 1.9     | 1.49    | 1.41    | 1.33    | 0.982   | 1.37    | 1.73    | 1.49    | 1.17    |
| Ba   | 618     | 654     | 669     | 619     | 647     | 616     | 662     | 719     | 649     | 547     | 406     | 669     | 555     | 605     | 616     | 643     | 603     |
| Ta   | 0.55    | 0.735   | 0.679   | 0.576   | 0.611   | 0.595   | 0.687   | 0.614   | 0.66    | 0.653   | 0.585   | 0.588   | 0.777   | 0.653   | 0.618   | 0.795   | 0.712   |
| W    | 0.72    | 0.772   | 0.898   | 0.551   | 1.09    | 0.463   | 0.755   | 0.7     | 0.627   | 0.658   | 1.02    | 0.609   | 0.396   | 0.755   | 0.434   | 0.433   | 0.335   |
| Tl   | 0.359   | 0.271   | 0.284   | 0.308   | 0.276   | 0.26    | 0.289   | 0.35    | 0.381   | 0.308   | 0.185   | 0.251   | 0.181   | 0.261   | 0.333   | 0.296   | 0.182   |
| Pb   | 7.47    | 7.21    | 8.67    | 10.1    | 7.98    | 7.07    | 8.6     | 6.48    | 8.8     | 7.16    | 6.97    | 8.26    | 7.26    | 6.3     | 7.79    | 6.4     | 7.8     |
| Bi   | 0.069   | 0.283   | 0.2     | 0.11    | 0.115   | 0.041   | 0.117   | 0.176   | 0.059   | 0.111   | 0.065   | 0.075   | 0.069   | 0.509   | 0.079   | 0.05    | 0.046   |

续表3

| 样品编号                             | YN107-1 | YN107-2 | YN107-3 | YN107-4 | YN108-1 | YN108-2 | YN108-3 | YN108-4 | YN109-1 | YN109-2 | YN109-3 | YN109-4 | YN109-5 | YN109-6 | YN109-7 | YN109-8 | YN109-9 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Th                               | 9.57    | 11.6    | 12.7    | 12      | 14.9    | 15      | 22.4    | 12.4    | 16      | 12.3    | 13      | 11      | 15.7    | 12.8    | 16.8    | 12.6    | 12.7    |
| U                                | 1.42    | 2.74    | 3.36    | 2.26    | 2.54    | 2.57    | 2.84    | 2.33    | 1.62    | 1.63    | 2.06    | 1.86    | 2.7     | 2.5     | 2.07    | 2.29    | 2.33    |
| Zr                               | 81.7    | 91.2    | 95      | 86.9    | 91.8    | 91.1    | 93.1    | 82.4    | 88      | 87.6    | 73.9    | 85.3    | 88.6    | 101     | 81.3    | 99.4    | 69.1    |
| Hf                               | 2.79    | 3.53    | 3.72    | 3.19    | 3.37    | 3.21    | 3.18    | 3.09    | 3.17    | 3.17    | 2.78    | 3.02    | 3.44    | 3.04    | 2.96    | 3.46    | 2.62    |
| La                               | 13.4    | 17.6    | 14.4    | 14.6    | 12.8    | 13.9    | 13.2    | 16.9    | 23.1    | 14.2    | 21.1    | 21.8    | 14.4    | 12      | 18.2    | 11.7    | 13      |
| Ce                               | 26.4    | 35.5    | 30.2    | 26.8    | 25.1    | 26.4    | 27.9    | 28.8    | 40.6    | 28.1    | 35.1    | 35.5    | 30.3    | 24.8    | 31.4    | 22.3    | 28.3    |
| Pr                               | 3.16    | 4.11    | 3.54    | 3.11    | 3       | 3.09    | 3.37    | 3.14    | 4.44    | 3.25    | 3.74    | 3.78    | 3.37    | 3.06    | 3.61    | 2.7     | 3.22    |
| Nd                               | 12.5    | 15.2    | 13.1    | 11.9    | 11.4    | 11.5    | 13.1    | 11.6    | 16.1    | 12.4    | 13.3    | 13.3    | 12.3    | 11.5    | 13.3    | 10.6    | 12.3    |
| Sm                               | 2.54    | 2.92    | 2.59    | 2.43    | 2.29    | 2.24    | 2.62    | 2.25    | 2.96    | 2.47    | 2.47    | 2.44    | 2.32    | 2.38    | 2.57    | 2.21    | 2.42    |
| Eu                               | 0.675   | 0.685   | 0.694   | 0.701   | 0.656   | 0.68    | 0.703   | 0.673   | 0.724   | 0.671   | 0.583   | 0.721   | 0.677   | 0.646   | 0.694   | 0.681   | 0.733   |
| Gd                               | 2.33    | 2.82    | 2.46    | 2.33    | 2.15    | 2.15    | 2.45    | 2.24    | 2.87    | 2.33    | 2.53    | 2.4     | 2.31    | 2.22    | 2.51    | 2.03    | 2.32    |
| Tb                               | 0.445   | 0.526   | 0.469   | 0.458   | 0.411   | 0.407   | 0.482   | 0.415   | 0.517   | 0.458   | 0.463   | 0.44    | 0.429   | 0.432   | 0.467   | 0.404   | 0.44    |
| Dy                               | 2.8     | 3.27    | 3       | 2.83    | 2.65    | 2.54    | 3.06    | 2.57    | 3.21    | 2.88    | 2.87    | 2.71    | 2.66    | 2.77    | 2.96    | 2.57    | 2.81    |
| Ho                               | 0.587   | 0.691   | 0.633   | 0.599   | 0.554   | 0.539   | 0.634   | 0.542   | 0.679   | 0.603   | 0.614   | 0.566   | 0.542   | 0.568   | 0.615   | 0.542   | 0.599   |
| Er                               | 1.6     | 1.91    | 1.72    | 1.64    | 1.51    | 1.5     | 1.75    | 1.51    | 1.85    | 1.63    | 1.67    | 1.57    | 1.51    | 1.58    | 1.73    | 1.47    | 1.64    |
| Tm                               | 0.32    | 0.381   | 0.346   | 0.329   | 0.308   | 0.299   | 0.352   | 0.301   | 0.363   | 0.331   | 0.333   | 0.305   | 0.31    | 0.31    | 0.343   | 0.292   | 0.324   |
| Yb                               | 2.03    | 2.46    | 2.19    | 2.12    | 1.94    | 1.91    | 2.25    | 1.91    | 2.24    | 2.08    | 2.09    | 1.93    | 1.94    | 1.97    | 2.11    | 1.84    | 2.05    |
| Lu                               | 0.313   | 0.391   | 0.341   | 0.331   | 0.313   | 0.302   | 0.358   | 0.299   | 0.353   | 0.333   | 0.323   | 0.305   | 0.31    | 0.311   | 0.335   | 0.295   | 0.33    |
| Y                                | 17.9    | 20.6    | 18.9    | 17.9    | 16.6    | 15.4    | 19.5    | 15.6    | 19.6    | 17.7    | 17.7    | 16.4    | 16.4    | 16.6    | 18.5    | 15.8    | 17.4    |
| ΣREE                             | 69.10   | 88.46   | 75.68   | 70.18   | 65.08   | 67.46   | 72.23   | 73.15   | 100.01  | 71.74   | 87.19   | 87.77   | 73.38   | 64.55   | 80.84   | 59.63   | 70.49   |
| LREE                             | 58.68   | 76.02   | 64.52   | 59.54   | 55.25   | 57.81   | 60.89   | 63.36   | 87.92   | 61.09   | 76.29   | 77.54   | 63.37   | 54.39   | 69.77   | 50.19   | 59.97   |
| HREE                             | 10.43   | 12.45   | 11.16   | 10.64   | 9.84    | 9.65    | 11.34   | 9.79    | 12.08   | 10.65   | 10.89   | 10.23   | 10.01   | 10.16   | 11.07   | 9.44    | 10.51   |
| LREE/HREE                        | 5.63    | 6.11    | 5.78    | 5.60    | 5.62    | 5.99    | 5.37    | 6.47    | 7.28    | 5.74    | 7.00    | 7.58    | 6.33    | 5.35    | 6.30    | 5.32    | 5.70    |
| La <sub>N</sub> /Y <sub>bN</sub> | 4.73    | 5.13    | 4.72    | 4.94    | 4.73    | 5.22    | 4.21    | 6.35    | 7.40    | 4.90    | 7.24    | 8.10    | 5.32    | 4.37    | 6.19    | 4.56    | 4.55    |
| δEu                              | 0.83    | 0.72    | 0.83    | 0.89    | 0.89    | 0.93    | 0.83    | 0.91    | 0.75    | 0.84    | 0.71    | 0.90    | 0.88    | 0.85    | 0.82    | 0.97    | 0.93    |

表4 琼博拉花岗岩 Sr 和 Nd 同位素分析结果  
Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of the granites from Qiongbola

| 样号                                                 | YN107-1     | YN107-2     | YN107-4     | YN108-2     | YN109-9     |
|----------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Rb/ $10^{-6}$                                      | 131         | 115         | 120         | 118         | 83.2        |
| Sr/ $10^{-6}$                                      | 241         | 251         | 265         | 252         | 317         |
| ( $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ) <sub>m</sub>   | 1.5735      | 1.3261      | 1.3107      | 1.3554      | 0.7597      |
| ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) <sub>m</sub>   | 0.712552    | 0.711467    | 0.711553    | 0.711734    | 0.711819    |
| $\pm 2\sigma$                                      | 0.000014    | 0.000012    | 0.000014    | 0.000011    | 0.00001     |
| ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) <sub>i</sub>   | 0.7050      | 0.7051      | 0.7052      | 0.7052      | 0.7082      |
| $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$                          | 12.5        | 14.0        | 16.3        | 15.8        | 57.7        |
| Sm/ $10^{-6}$                                      | 2.54        | 2.92        | 2.43        | 2.24        | 2.42        |
| Nd/ $10^{-6}$                                      | 12.5        | 15.2        | 11.9        | 11.5        | 12.3        |
| ( $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ) <sub>m</sub> | 0.1228      | 0.1161      | 0.1234      | 0.1177      | 0.1189      |
| ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) <sub>m</sub> | 0.512526    | 0.512505    | 0.512501    | 0.512478    | 0.512493    |
| $\pm 2\sigma$                                      | 0.000009    | 0.000012    | 0.000006    | 0.000008    | 0.000008    |
| ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) <sub>i</sub> | 0.512254214 | 0.512248055 | 0.512227876 | 0.512217476 | 0.512229846 |
| $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$                          | -0.38       | -0.41       | -0.37       | -0.40       | -0.40       |
| $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$                          | -2.18       | -2.59       | -2.67       | -3.12       | -2.83       |
| $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$                          | 1.0         | 0.9         | 0.5         | 0.3         | 0.5         |
| $T_{\text{DM1}}$                                   | 1049        | 1010        | 1098        | 1070        | 1059        |
| $T_{\text{DM2}}$                                   | 1013        | 1023        | 1055        | 1072        | 1052        |

注:  $\epsilon_{\text{Nd}} = ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1) \times 10000$ ,  $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = ((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} / (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1)$ , 其中 m= sample,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$  和  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1966$ ; 模式年龄  $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln(1 + ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} - 0.51315) / ((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} - 0.2137))$ ;  $t_{\text{DM2}} = t_{\text{DM1}} - (t_{\text{DM1}} - t)(f_{\text{cc}} - f_{\text{s}}) / (f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})$ ;  $f_{\text{cc}}$ ,  $f_{\text{s}}$ ,  $f_{\text{DM}}$  分别为地壳、样品和亏损地幔的  $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$  平均值;  $f_{\text{cc}} = -0.4$ ,  $f_{\text{DM}} = 0.08592$ ,  $t$  = 岩体侵位年龄;  $-0.6 < f_{\text{Sm}/\text{Nd}} < -0.2$  采用  $t_{\text{DM1}}$ ,  $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} < -0.6$  或  $> -0.2$  采用  $t_{\text{DM2}}$ 。

1098 Ma, 指示该二长花岗岩的源区是早石炭世早期与岩浆形成年龄一致的亏损地幔和古老地壳混合源区(徐学义, 2010)。

综上所述, 该二长花岗岩的 Sr、Nd 同位素组成暗示该岩石是由地幔源岩浆上侵形成的新生地壳, 再经部分熔融形成;  $\epsilon_{\text{Sr}}(t) - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$  (图6) 相关图解均显示了混合成因的特点; Pb 同位素组成(图7) 同样显示了混合成因的特点。因此, 琼博拉二长花岗岩是幔源岩浆底侵形成的新生地壳, 新生地壳部分熔融的产物。

## 6.2 构造背景及形成机制

花岗岩类构造环境的判别不仅需要根据其地球化学特征, 在更大程度上还需要对岩体自身构造特征及产出区域构造背景等进行多方面的综合研究(王生云, 2013; 朱志新, 2011)。在琼博拉地区二长花岗岩的出露规模相对于火山岩, 其总量相对较

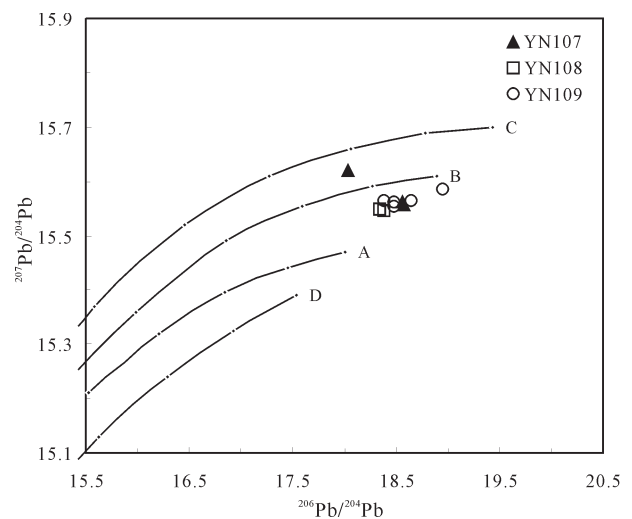


图7 二长花岗岩铅构造模式演化图(底图据朱炳泉, 1998)

A—地幔; B—造山带; C—上地壳; D—下地壳

Fig.7 The lead tectonic diagram of monzonitic granites (after Zhu, 1998)

A—Mantle; B—Orogenic belt; C—Upper crust; D—Lower crust

表5 琼博拉花岗岩 Pb 同位素分析结果

Table 5 Pb isotopic compositions of the granites from Qiongbola

| 样号                                    | YN107-1 | YN107-2 | YN107-4 | YN108-2 | YN108-3 | YN109-5 | YN109-6 | YN109-7 | YN109-8 | YN109-9 |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Th/ $10^{-6}$                         | 9.57    | 11.6    | 12      | 15      | 22.4    | 15.7    | 12.8    | 16.8    | 12.6    | 12.7    |
| U/ $10^{-6}$                          | 1.42    | 2.74    | 2.26    | 2.57    | 2.84    | 2.7     | 2.5     | 2.07    | 2.29    | 2.33    |
| Pb/ $10^{-6}$                         | 7.47    | 7.21    | 10.1    | 7.07    | 8.6     | 7.26    | 6.3     | 7.79    | 6.4     | 7.8     |
| $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$     | 18.793  | 20.113  | 19.474  | 19.813  | 19.713  | 20.001  | 20.11   | 19.723  | 19.835  | 20.183  |
| $\pm 2\sigma$                         | 0.002   | 0.002   | 0.001   | 0.002   | 0.002   | 0.003   | 0.002   | 0.003   | 0.002   | 0.002   |
| $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$     | 15.66   | 15.646  | 15.604  | 15.628  | 15.617  | 15.635  | 15.648  | 15.623  | 15.642  | 15.652  |
| $\pm 2\sigma$                         | 0.002   | 0.001   | 0.001   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.001   | 0.002   | 0.002   | 0.002   |
| $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$     | 38.908  | 39.907  | 39.162  | 39.647  | 39.492  | 40.228  | 39.949  | 39.815  | 39.895  | 40.168  |
| $\pm 2\sigma$                         | 0.004   | 0.004   | 0.003   | 0.004   | 0.004   | 0.005   | 0.003   | 0.005   | 0.004   | 0.004   |
| $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ | 18.0376 | 18.556  | 18.5743 | 18.3349 | 18.3749 | 18.4734 | 18.4833 | 18.6415 | 18.3746 | 18.9538 |
| $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ | 15.6198 | 15.5631 | 15.5561 | 15.5493 | 15.5458 | 15.5537 | 15.5614 | 15.5654 | 15.5642 | 15.5865 |
| $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ | 37.3015 | 37.827  | 37.6545 | 36.9248 | 36.1617 | 37.425  | 37.3209 | 37.0452 | 37.3595 | 38.0538 |

少,岩体呈岩墙形式产出。前人研究认为,西天山段(塔里木与伊犁—中天山地块)的碰撞起始时间在早石炭世(345 Ma),结束时间为石炭纪末(300 Ma左右)(高俊,2006);西天山在晚石炭世时南、北天山洋盆已闭合,由于板块碰撞形成了碰撞型改造花岗岩(朱志新,2011)。本次研究获得的二长花岗岩的 U-Pb 年龄为(330.5±2.2)Ma、(339.7±2.2)Ma、

(351.2±3.0)Ma 三段,属于石炭纪早中期,属于板块碰撞型改造花岗岩。

在花岗岩形成环境的微量元素(Yb+Ta)-Rb 和 Yb-Ta 判别图解(图 8a、b)中样品投影点主要落入火山弧花岗岩区域。而且在 Rb/30-Hf-Ta\*3 构造环境判别图解(图 9)中主要落入火山弧的区域;而在  $R_1$ - $R_2$  构造环境判别图解(图 10)主要落入板块碰

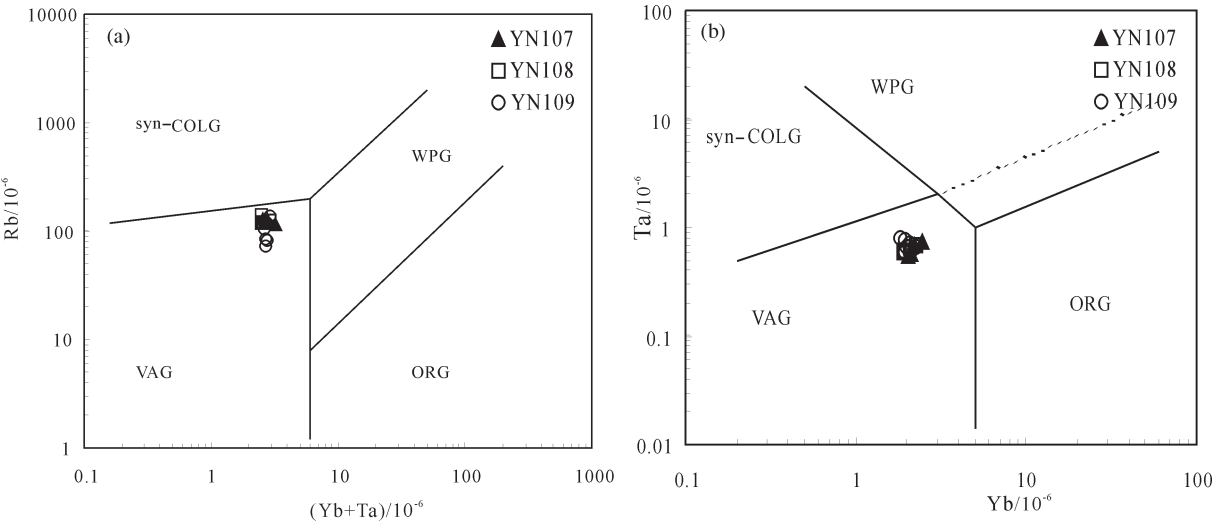


图8 二长花岗岩(Yb+Ta)-Rb(a)和Yb-Ta(b)构造环境判别图解(据Pearce,1984)

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

Fig.8 (Yb+Ta)-Rb (a) and Yb-Ta (b) diagram for discrimination of tectonic environment of monzonitic granites from Qiongbola (after Pearce,1984 )

Syn-COLG-collisional granite; WPG-Intraplate granite; VAG-Volcanic arc granite; ORG-Oceanic ridge granite

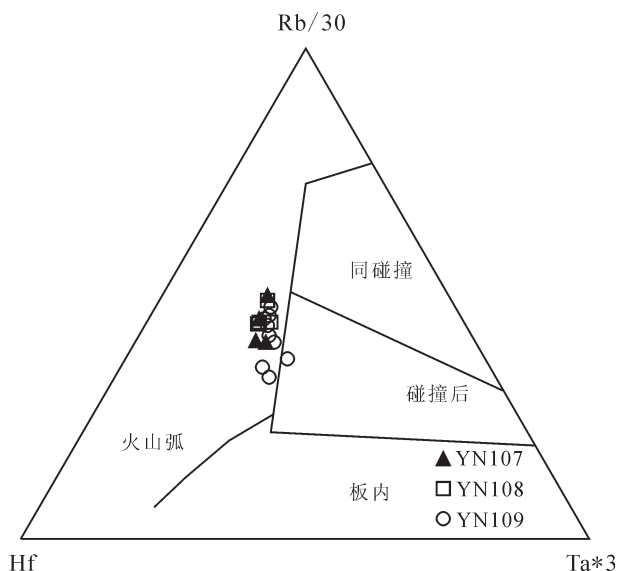


图9 二长花岗岩 Rb/30-Hf-Ta\*3 构造环境判别图解  
(据 Harris et al., 1986)

Fig. 9 Rb/30-Hf-Ta\*3 diagram for discrimination of tectonic environment of monzonitic granites (after Harris et al., 1986)

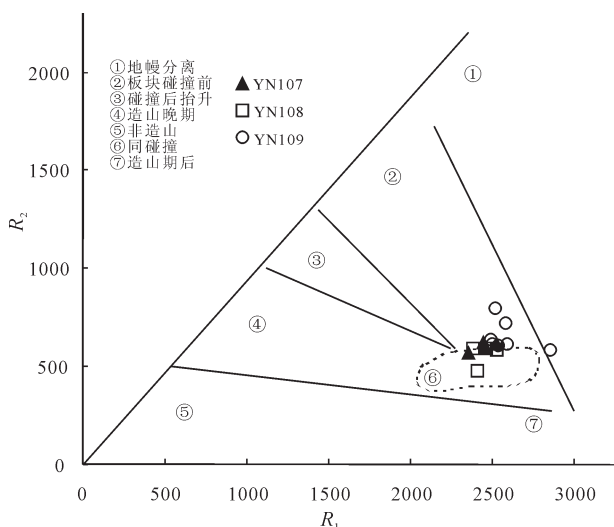


图10 二长花岗岩  $R_1$ - $R_2$  构造环境判别图解(据 Bechelor, 1985)

Fig.10  $R_1$ - $R_2$  diagram for discrimination of tectonic environment of monzonitic granites. (after Bechelor, 1985)

撞前花岗岩区和同碰撞花岗岩区。前人研究认为, 中亚(型)造山带在古生代时期经历了围绕古陆的向洋的岛弧杂岩的侧向(水平)增生和洋盆闭合后的后碰撞幔源物质底垫的垂向增生两种过程(Han B et al., 1997; 洪大卫等, 2000; Gao et al., 2002;

Jahn., 2004; Zhou et al., 2004; 李锦铁等, 2006; 高俊, 2006; 唐功建等, 2008), 南天山洋在早古生代晚期 436 Ma 已出现大洋俯冲消减作用(Gao et al., 1999; 张成立, 2007), 大部分学者认为南天山洋在早石炭世闭合(Allen et al., 1993; Carroll et al., 1995; Coleman, 1989; Gao et al., 1998; 高俊等, 2006), 少部分学者认为其在石炭纪之前(Xia et al., 2004)或三叠纪(Zhang et al., 2007a, 2007b)闭合。

因此, 琼博拉二长花岗岩属于板块的同碰撞构造环境。微量元素构造环境判别落入火山弧花岗岩, 是由于板块碰撞前大洋俯冲消减作用使之前增生的岛弧杂岩重熔; 后在板块碰撞阶段, 幔源岩浆在上升过程中受到了少量重熔的下地壳和拆沉重熔的岛弧杂岩混染形成混合岩浆; 最后侵位形成二长花岗岩。

### 6.3 二长花岗岩与铀源的关系

研究区二长花岗岩的侵位年龄分为 3 组:  $(330.5 \pm 2.2)$  Ma、 $(339.7 \pm 2.2)$  Ma、 $(351.2 \pm 3.0)$  Ma。而在伊犁盆地 511 矿区, 从含矿砂体精选出的锆石, 其 U-Pb 同位素等时线年龄为  $(308 \pm 26)$  Ma (夏毓亮, 2002), 与研究区的最晚期的花岗岩年龄一致, 从而肯定二长花岗岩是该含矿砂体的部分物质来源。

## 7 结 论

(1) 琼博拉地区二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果其侵位年龄分为 3 组:  $(330.5 \pm 2.2)$  Ma、 $(339.7 \pm 2.2)$  Ma、 $(351.2 \pm 3.0)$  Ma, 为早中石炭世花岗岩, 属于板块的同碰撞构造环境, 为伊犁盆地 511 砂岩型铀矿床含矿砂体的部分物质来源。

(2) 琼博拉二长花岗岩中  $\text{SiO}_2$  含量 70.15%~73.38%, 碱质含量较高, 相对富钾; A/CNK 的值变化于 0.82~1.03, 为准铝质-弱过铝质岩石, 属于钙碱性-高钾钙碱性系列; 富集轻稀土和 Rb、Th、K、Pb 和 Sr 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、Zr、P 和 Ti 等高场强元素; 初始铈同位素比值为 0.7050~0.7082,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值为 0.512217~0.512254,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 0.3~1.0, Nd 模式年龄为 1010~1098 Ma。分析表明二长花岗岩具有壳幔混染的特点。

(3) 伊犁盆地南缘琼博拉二长花岗岩可能是在南天山洋和北天山洋闭合后, 在塔里木与伊犁-中天山地块同碰撞的环境下, 岩石圈地幔加厚, 使减

压熔融形成的幔源岩浆发生底侵,为陆壳(哈萨克斯坦—伊犁板块)熔融提供热量,在上升过程中形成新生地壳,并且经过部分熔融形成混合岩浆,沿深断裂上升、侵位冷凝、结晶而成。

**致谢:**成文过程中得益于张松、王生云高级工程师和东前博士后提出的宝贵意见;数据测试工作得到了核工业北京地质研究院分析测试中心、西北大学地质研究实验室的大力帮助,在此一并致谢。

## References

- Allen M B, Windley B F, Zhang C. 1993. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia[J]. *Tectonophysics*, 220(1/4): 89–115.
- Bechelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1): 43–55.
- Belousova E A, Griffin W, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622.
- Carroll A R, Graham S A, Hendrix M S, Ying D, Zhou D. 1995. Late Paleozoic tectonic amalgamation of northwestern China: Sedimentary record of the northern Tarim, northwestern Turpan, and southern Junggar basins[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 107(5): 571–594.
- Che Zicheng, Liu Hongfu, Liu Liang, Luo Jin-mei. 1994. Formation and Evolution of the Middle Tianshan Mountain Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Chen Daisheng, Wang Ruiying, Li Shengxiang, Zhang Kefang. 1994. Metallogenic Geologic Conditions and Prospecting Direction of Sandstone Type Uranium Mineralizations in Yili Basin of Xinjiang[R]. China Nuclear Science & Technology Report, S1: 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Chen Daisheng, Wang Ruiying, Li Shengxiang. 1997. Metallogenic model of the sandstone-type Uranium deposits in interlayer oxidation zone of Yili Basin[J]. *Uranium Geology*, 13(6): 327–335 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhaobo, Li Shengxiang, Cai Yuqi, Chen Daisheng. 2002. Geologic evolution and Uranium metallogenic regularity in Yili Basin[J]. *Mineral Deposits*, 21(S1): 849–852 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Chunhua, Zhang Fangrong, Yu Quan, Lou Fasheng. 2010. The tectonic setting of volcanic rocks for Dahalajunshan Formation in Wusun mountain region, West Tianshan Mountain[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 33(1): 22–28 (in Chinese with English abstract).
- Crofu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 469–495.
- Gao J, Li M S, Tang Y Q, He G Q. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. *Tectonophysics*, 287(1/4): 213–231.
- Gao Jun, Long Lingli, Qian Qing, Huang Dezhi, Su Wen, Klemd R. 2006. South Tianshan: A Late Paleozoic or a Triassic orogen?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1049–1061 (in Chinese with English abstract).
- Gao J, Xiao W, Li J, Han B, Gao Z and Wang J. 2002. Central-Asia type Orogenesis and Metallogenesis in western China[C]//Abstracts of IGCP 420 Protect workshop, 39.
- Gao J, Long L L, Klemd R, Qian Q, Liu D Y, Xiong X M, Su W, Liu W, Wang Y T, Yang F Q. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1221–1238.
- Gao S, Ling W L, Qiu Y M, Lian Z, Hartmann G, Simon K. 1999. Contrasting geochemical and Sm–Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(13/14): 2071–2088.
- Han Baofu, He Guoqi, Wu Tairan, Li Huimin. 2004. Zircon U–Pb dating and geochemical features of early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: Implications for tectonic evolution[J]. *Xinjiang Geology*, 22(1): 4–11 (in Chinese with English abstract).
- Han B, Wang S, Jahn B M, Hong D, Kagami H, Sun Y. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd–Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. *Chemical Geology*, 138(3/4): 135–159.
- Han Yinwen, Ma Zhendong, Zhang Hongfei, Zhang Benren, Li Fanglin, Gao Shan, Bao Zhengyu. 2003. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Hao Jipeng. 1991. Permian sedimentary facies and palaeogeography in Ili Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 12(3): 190–197 (in Chinese with English abstract).
- Hao Xiaofei, Sun Mingqun, Song Hairui. 2014. The analysis of the magmatic activities and dynamic environment in Mesozoic of five bifurcated channel[C]//Progress Report on China Nuclear & Technology, Vol. 3, Part 1: Uranium Geology. Beijing: China Atomic Energy Press, 234–241 (in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism, collision tectonics[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 19(1): 67–81.
- He Guoqi, Zhu Yongfeng. 2006. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang, China, and its adjacent regions[J].

- Geology in China, 33(3): 451–460 (in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, Zhang Jisheng. 2000. Genesis of positive  $\Sigma$  (Nd, t) granitoids in the Da Hinggan Mts. – Mongolia orogenic belt and growth continental crust[J]. Earth Science Frontiers, 7(2): 441–456 (in Chinese with English abstract).
- Huang He, Zhang Zhaochong, Zhang Dongyang, Du Hongxing, Ma Letian, Kang Jianli, Xue Chunji. 2011. Petrogenesis of late Carboniferous to early Permian granitoid plutons in the Chinese South Tianshan: Implications for crustal accretion[J]. Acta Geologica Sinica, 85(8): 1305–1333 (in Chinese with English abstract).
- Rollison H R. 2000. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. (tr. by Yang Xueming, Yang Xiaoyong, Chen Shuangxi). Hefei: University of Science & Technology China Press (in Chinese).
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, Tsai C H. 1999. Crust–mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr–Nd isotopic evidence from post–collisional mafic–ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China[J]. Chemical Geology, 157(1/2): 119–146.
- Jahn B M. 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 23(5): 599–603.
- Koschek G. 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon[J]. Journal of Microscopy, 171(3): 223–232.
- Li Changmin. 2009. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of Zircons[J]. Geological Survey and Research, 33(3): 161–174 (in Chinese with English abstract).
- Li Changnian. 1992. Petrology of the Trace Elements in Igneous Rock[M]. Beijing: China University of Geosciences Press (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, Li Huaqin, Sun Guihua, Yang Tiannan, Gao Liming, Zhu Zhixin. 2006. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation[J]. Acta Geologica Sinica, 80(1): 145–168 (in Chinese with English abstract).
- Li Shengxiang, Cai Yuqi, Zheng Enjiu, Han Xiaozhong, Wang Baoqun, Li Xigen. 2005. The mineralization characteristics and the prospective prediction of the in–situ leachable sandstone–type Uranium deposit of Middle Jurassic Series Xishanyao Formation on the south rim of Yili Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 24(S1): 251–252 (in Chinese with English abstract).
- Li Shengxiang, Ou Guangxi, Han Xiaozhong, Cai Yuqi, Zheng Enjiu, Li Xigen. 2006. Study on the relationship between oil–gas and ore–formation of the in–situ leachable sandstone–type Uranium deposit in Yili Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 80(1): 112–118 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, McCulloch M T. 1996. Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozoic sediments from the southern margin of Yangze Block: Evidence for a Proterozoic continental collision in southeast China[J]. Precambrian Research, 76(1/2): 67–76.
- Li Yongjun, Li Zhucang, Tong Lili, Gao Zhanhua, Tong Liming. 2010. Revisit the constraints on the closure of the Tianshan ancient oceanic basin: New evidence from Yining block of the Carboniferous[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(10): 2905–2912 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhucang, Li Yongjun, Li Jinghong, Luan Xindong, Guo Wenjie. 2006. Geochemical characteristics of the Dahalajunshan Formation volcanic rocks and their implications on the tectonic setting in Awulale area[J]. Xinjiang Geology, 24(2): 120–124 (in Chinese with English abstract).
- Liao Shinan. 1992. A general review for formation and evolution of Ili Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 13(2): 108–115 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jingqian. 1994. Petrochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Liu Hongxu, Zhang Xiao, Ding Bo, Pan Chengyu. 2015. Metallogenic model and prospecting orientation of sandstone type uranium deposits in the southern margin of Yili Basin[J]. Uranium Geology, 31(Supp.): 198–205 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming. 1987. Introduction to geochemistry of Elements[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Lu Yuanfa. 2004. GeoKit: A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. Geochimica, 33(5): 459–464 (in Chinese with English abstract).
- McCulloch M, Gamble J. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism[J]. Earth and Planetary Science Letters, 102(3/4): 358–374.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 25(4): 956–983.
- Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63–81.
- Ru Yanjiao, Xu Xueyi, Li Zhipei, Chen Juanlu, Bai Jianke, Li Ting. 2012. LA–ICP–MS zircon U–Pb age and tectonic background of the Dahalajunshan Formation volcanic rocks in Wusunshan area, West Tianshan Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 31(1): 50–62 (in Chinese with English abstract).
- Smith R E, Smith S E. 1976. Comment on the use of Ti, Zr, Y, Sr, K, P and Nb in classification of basaltic magmas[J]. Earth and Planetary Science Letters, 32(2): 114–120.
- Shao Tiequan, Shi Ying, Jin Hong, Song Yang, Zhu Zhixin, Wang Kezhao, Zhang Jiandong, Xu Da. 2006. Volcanic rock

- petrochemical characteristics of the Dahalajunshan Formation in the western Tianshan, Xinjiang and their geological significance[J]. *Xinjiang Geology*, 24(3): 218–222 (in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 48 (supp.): 26–30 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42 (1): 313–345.
- Tang Gongjian, Chen Haihong, Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Derek A. Wyman, Jiang Ziqi, Jia Xiaohui. 2008. Geochronological age and tectonic background of the Dabate A-type granite pluton in the west Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 947–958 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shengyun, Fan Honghai, Chen Jinyong, Gu Dazhao, Chen Donghuan, Gao Yang, Nie Jiangtao. 2013. Petrogenesis and tectonic setting of porphyritic granites in Gaudeamus area, Namibia[J]. *Global Geology*, 32(4): 773–782 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Study on the zircon genetic mineralogy and its constraint to U–Pb age interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Wang Lishe. 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9/10): 903–910 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yuliang, Lin Jinrong, Hou Yanxian, Liu Hanbin, Fan Guang. 2002. Characteristics of isotope geology of sandstone-type uranium deposit in Yili basin, Xinjiang[J]. *Uranium Geology*, 18(3): 150–155 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, Hong Dawei, Mo Xuanxue, Lu Xinxian, Li Zhichang, Wang Xiongwu, Ma Changqian, Wu Fuyuan, Luo Zhaohua, Wang Tao. 2002. Thought and Method on the Granitoid Research[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Xiong Shaoyun, Yu Chaofeng, Li Yuwen, Huang Ling. 2011. Sedimentary characteristics and evolution of the Lower Carboniferous Akeshake Formation in the Yili Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 797–805 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Ma Zhongping, Xia Zuchun, Xia Linqi, Li Xiangmin, Wang Lishe. 2005. Discussion of the sources and characteristics on Sr, Nd, Pb isotopes of the Carboniferous to Permian post-collision granites from Tianshan[J]. *Northwestern Geology*, 38(2): 1–18 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Wang Hongliang, Ma Guolin, Li Ping, Chen Juanlu, Li Ting. 2010. Geochronology and Hf isotope characteristics of the Paleozoic granite in Nalati area, West Tianshan Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 691–706 (in Chinese with English abstract).
- Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumbotectonics – the model[J]. *Tectonophysics*, 75(1/2): 135–162.
- Zhang Chengli, Zhou Dingwu, Wang Juli, Wang Runsan. 2007. Geochronology, geochemistry and Sr–Nd isotopic composition and genesis implications of Huangjianshishan granite intrusion in Kumishi area of southern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (8): 1821–1829 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Li Sanzhong, Liu Junxia, Teng Zhihong, Jin Hailong, Li Wei, Huang Xianxiong, Wu Yahong. 1999. Structural feature and evolution of Yili Basin, Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 6 (4): 203–215 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiangsu, Li Zhucang. 2006. Tectonic setting of the Dahalajunshan Formation volcanic rocks in Awulale of West Tianshan[J]. *Gansu Geology*, 15(2): 10–14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai, Xu Gaozhong, Lin Jinrong, Peng Yunbiao, Wang Guo. 2010. The implication of six kinds of new sandstone-type uranium deposits to uranium resources potential in North China[J]. *Geology in China*, 37(5): 1434–1449 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L F, Ai Y L, Li X P, Rubatto D, Song B, Williams S, Song S G, Ellis D, Liou J G. 2007a. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U–Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks[J]. *Lithos*, 96(1/2): 266–280.
- Zhang L F, Ai Y L, Song S G, Liou J, Wei C J. 2007b. A brief review of UHP meta-ophiolitic rocks, southwestern Tianshan, western China[J]. *International Geology Review*, 49(9): 811–823.
- Zhang Ligang, Xing Fengming. 1993. Lead isotope compositions of Mesozoic granitoids and Lead isotopic provinces from Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(3): 254–257 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangchen, Wu Naiyuan. 1985. The geotectonic and its evolution of Tianshan[J]. *Xinjiang Geology*, 3(3): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Leshner C M, Yang Z X, Li J W, Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni–Cu–(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwestern China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt[J]. *Chemical Geology*, 209(3/4): 233–257.
- Zhu Bingquan. 1998. Theory and Application of the Isotope Systematics in Geosciences and the Evolution of the Continental Crust and Mantle of China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhu Yongfeng, Zhang Lifei, Gu Libing, Guo Xuan, Zhou Jing. 2005. Study on SHRIMP Chronology of the Carboniferous volcanic rocks in West Tianshan and its geochemistry of trace elements[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2004–2014 (in Chinese with English abstract).

- Zhu Zhixin, Dong Lianhui, Liu Shucong, Li Jintie, Wang Kezhao, Zhao Tongyang, Li Ping, Jin Liuyuan. 2012. Volcanic rock geological characteristics and tectonic significance of the Late Paleozoic Yili Block in the western Tianshan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 30(3): 258–263 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhixin, Li Jintie, Dong Lianhui, Zhang Xiaofan, Hu Jianwei, Wang Kezhao. 2008. The age determination of Late Carboniferous intrusions in Mangqisu region and its constraints to the closure of oceanic basin in South Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 2761–2766 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhixin, Li Jintie, Dong Lianhui, Wang Kezhao, Zhang Xiaofan, Xu Shiqi. 2011. Geological characteristics and tectonic significance of Paleozoic intrusive rocks in Western Tianshan of Xinjiang Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 170–179 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhixin, Wang Kezhao, Zheng Yujie, Sun Guihua, Zhao Chao, Li Yaping. 2006. Zircon SHRIMP dating of Silurian and Devonian granitic intrusions in the southern Yili Block, Xinjiang and preliminary discussion on their tectonic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1193–1200 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Zhang Zuoheng, Wang Zhiliang, Liu Min, Wang Longsheng. 2008. Tectonic division, Stratigraphical system and the evolution of West Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 54(6): 748–767 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 车自成, 刘洪福, 刘良, 罗金梅. 1994. 中天山造山带的形成与演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈戴生, 王瑞英, 李胜祥, 张克方. 1994. 新疆伊犁盆地砂岩型铀矿成矿地质条件及找矿方向研究[R]. 中国核科技报告, S1: 1–13.
- 陈戴生, 王瑞英, 李胜祥. 1997. 伊犁盆地层间氧化带砂岩型铀矿成矿模式[J]. *铀矿地质*, 13(6): 327–335.
- 陈肇博, 李胜祥, 蔡煜琦, 陈戴生. 2002. 伊犁盆地地质演化与铀成矿规律[J]. *矿床地质*, 21(S1): 849–852.
- 程春华, 张芳荣, 余泉, 楼法生. 2010. 西天山乌孙山地区大哈拉军山组火山岩形成的构造背景[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 33(1): 22–28.
- 高俊, 龙灵利, 钱青, 黄德志, 苏文, Klemd R. 2006. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带?[J]. *岩石学报*, 22(5): 1049–1061.
- 韩宝福, 何国琦, 吴泰然, 李惠民. 2004. 天山早古生代花岗岩锆石 U–Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义[J]. *新疆地质*, 22(1): 4–11.
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 张本仁, 李方林, 高山, 鲍征宇. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 郝继鹏. 1991. 伊犁盆地二叠纪沉积相及古地理特征[J]. *新疆石油地质*, 12(3): 190–197.
- 郝晓飞, 孙明坤, 宋海瑞. 2014. 五岔沟—天池中生代岩浆活动及其动力学环境浅析[C]//中国核科学技术进展报告第3卷第1册. 北京: 中国原子能出版社, 234–241.
- 何国琦, 朱永峰. 2006. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究[J]. *中国地质*, 33(3): 451–460.
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. *地质前缘*, 7(2): 441–456.
- 黄河, 张招崇, 张东阳, 杜红星, 马乐天, 康建丽, 薛春纪. 2011. 中国南天山晚石炭世—早二叠世花岗质侵入岩的岩石成因与地壳增生[J]. *地质学报*, 85(8): 1305–1333.
- 李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述. 地质调查与研究[J]. 33(3): 161–174.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素地球化学[M]. 北京: 中国地质大学出版社.
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 李华芹, 孙桂华, 杨天南, 高立明, 朱志新. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. *地质学报*, 80(1): 145–168.
- 李胜祥, 蔡煜琦, 郑恩玖, 韩效忠, 王保群, 李细根. 2005. 伊犁盆地南缘中侏罗统西山窑组地浸砂岩型铀矿化特征及远景预测[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 24(Suppl.): 251–252.
- 李胜祥, 欧光习, 韩效忠, 蔡煜琦, 郑恩玖, 李细根. 2006. 伊犁盆地油气与地浸砂岩型铀矿成矿关系研究[J]. *地质学报*, 80(1): 112–118.
- 李永军, 李注苍, 佟丽莉, 高占华, 佟黎明. 2010. 论天山古洋盆关闭的地质时限: 来自伊宁地块石炭系的新证据[J]. *岩石学报*, 26(10): 2905–2912.
- 李注苍, 李永军, 李景宏, 栾新东, 郭文杰. 2006. 西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造环境分析[J]. *新疆地质*, 24(2): 120–124.
- 廖世南. 1992. 伊犁盆地生成发展概述[J]. *新疆石油地质*, 13(2): 108–115.
- 林景仟. 1994. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘红旭, 张晓, 丁波, 潘澄雨. 2015. 伊犁盆地南缘砂岩型铀矿成矿模式与找矿方向[J]. *铀矿地质*, 31(Suppl.): 198–205.
- 刘英俊, 曹励明. 1987. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 33(5): 459–464.
- Rollison H R. 2000. 岩石地球化学[M]. 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜译. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- 茹艳娇, 徐学义, 李智佩, 陈隽璐, 白建科, 李婷. 2012. 西天山乌孙山地区大哈拉军山组火山岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄及其构造环境[J]. *地质通报*, 31(1): 50–62.
- 邵铁全, 石莹, 靳红, 宋杨, 朱志新, 王克卓, 张建东, 徐达. 2006. 新疆西天山大哈拉军山组火山岩岩石化学特征及地质意义[J]. *新疆地质*, 24(3): 218–222.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 48(Suppl.): 26–30.
- 唐功建, 陈海红, 王强, 赵振华, Wyman D A, 姜子琦, 贾小辉. 2008. 西天山达巴特 A 型花岗岩的形成时代与构造背景[J]. *岩石学报*, 24(5): 947–958.
- 王生云, 范洪海, 陈金勇, 顾大钊, 陈东欢, 高阳, 聂江涛. 2013. 纳米比亚欢乐谷地区斑状花岗岩成因及构造背景[J]. *世界地质*, 32

- (4): 773–782.
- 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[J]. 科学通报, 49(16): 1589–1604.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平, 王立社. 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 23(9/10): 903–910.
- 夏毓亮, 林锦荣, 侯艳先, 刘汉彬, 范光. 2002. 伊犁盆地砂岩型铀成矿同位素地质特征. 铀矿地质, 18(3): 150–155.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 洪大卫, 莫宣学, 卢新祥, 李志昌, 汪雄武, 马昌前, 吴福元, 罗照华, 王涛. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社.
- 熊绍云, 余朝丰, 李玉文, 黄羚. 2011. 伊犁盆地下石炭统阿克沙克组沉积特征及演化[J]. 石油学报, 32(5): 797–805.
- 徐学义, 马中平, 夏祖春, 夏林圻, 李向民, 王立社. 2005. 天山石炭—二叠纪后碰撞花岗岩的Nd、Sr、Pb同位素源区示踪[J]. 西北地质, 38(2): 1–18.
- 徐学义, 王洪亮, 马国林, 李平, 陈隽璐, 李婷. 2010. 西天山那拉提地区古生代花岗岩的年代学和锆石Hf同位素研究[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 691–706.
- 张成立, 周鼎武, 王居里, 王润三. 2007. 南天山库米什黄尖石山岩体的年代学、地球化学和Sr、Nd同位素组成及其成因意义[J]. 岩石学报, 23(8): 1821–1829.
- 张国伟, 李三忠, 刘俊霞, 滕志宏, 金海龙, 李伟, 黄先雄, 吴亚红. 1999. 新疆伊犁盆地的构造特征与形成演化[J]. 地学前缘, 6(4): 203–215.
- 张江苏, 李注苍. 2006. 西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩构造环境分析[J]. 甘肃地质, 15(2): 10–14.
- 张理刚, 邢凤鸣. 1993. 安徽中生代花岗岩铅同位素组成与铅同位素省划分[J]. 岩石学报, 9(3): 254–257.
- 张良臣, 吴乃元. 1985. 天山地质构造及演化史[J]. 新疆地质, 3(3): 1–14.
- 张金带, 徐高中, 林锦荣, 彭云彪, 王果. 2010. 中国北方6种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J]. 中国地质, 37(5): 1434–1449.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社.
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 郭璇, 周晶. 2005. 西天山石炭纪火山岩SHRIMP年代学及其微量元素地球化学研究[J]. 科学通报, 50(18): 2004–2014.
- 朱志新, 董连慧, 刘淑聪, 李锦铁, 王克卓, 赵同阳, 李平, 靳留圆. 2012. 新疆西天山伊犁地块晚古生代火山岩地质特征及构造意义[J]. 新疆地质, 30(3): 258–263.
- 朱志新, 李锦铁, 董连慧, 张晓帆, 胡建卫, 王克卓. 2008. 新疆南天山盲起苏晚石炭世侵入岩的确定及对南天山洋盆闭合时限的限制[J]. 岩石学报, 28(12): 2761–2766.
- 朱志新, 李锦铁, 董连慧, 王克卓, 张晓帆, 徐仕琪. 2011. 新疆西天山古生代侵入岩的地质特征及构造意义[J]. 地学前缘, 18(2): 170–179.
- 朱志新, 王克卓, 郑玉洁, 孙桂华, 张超, 李亚萍. 2006. 新疆伊犁地块南缘志留纪和泥盆纪花岗质侵入体锆石SHRIMP定年及其形成时构造背景的初步探讨[J]. 岩石学报, 22(5): 1193–1200.
- 左国朝, 张作衡, 王志良, 刘敏, 王龙生. 2008. 新疆西天山地区构造单元划分、地层系统及其构造演化[J]. 地质论评, 54(6): 748–767.