

doi:10.3799/dqkx.2013.069

# 燕山造山带后石湖山碱性环状杂岩体的成因与形成过程

文霞, 马昌前\*, 桑隆康, Roger Mason, 余振兵, 熊富浩

中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 后石湖山杂岩体是与垮塌破火山口有关的碱性环状杂岩体, 主要由呈环形分布的碱性火山岩、环状岩墙(斑状石英正长岩)、嵌套的中心复式岩株(晶洞碱长花岗岩和斑状碱长花岗岩)和锥状岩席(石英正长斑岩和花岗岩斑岩)组成。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学分析表明, 斑状石英正长岩环状岩墙、石英正长斑岩和花岗岩斑岩锥状岩席的侵位年龄分别为  $119 \pm 3$  Ma、 $121 \pm 2$  Ma 和  $121 \pm 2$  Ma。该环状杂岩体火山岩与侵入岩的形成年龄相近, 体现了它作为火山-侵入杂岩体的特征。斑状石英正长岩富碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 10.0\% \sim 10.5\%$ ),  $\text{K}_2\text{O}$  含量较高( $5.21\% \sim 5.42\%$ ), 具正的 Eu 异常( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.05 \sim 1.40$ )。碱长花岗岩和斑岩均具有富碱、高  $\text{FeO}^{\text{tot}}/\text{MgO}$ 、Ga/Al、Zr、Nb 和 REE 值(Eu 除外), 以及低  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、CaO、MgO、Ba、Sr 和 Eu 含量的特征, 都属于 A 型花岗岩质岩石。其中斑岩为铝质 A 型花岗岩, 具有高的初始岩浆温度( $880 \sim 901$  °C)。所有 A 型花岗岩质岩石均具有较富集的 Nd 同位素组成,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化于  $-13.9 \sim -12.2$  之间。斑状石英正长岩是下地壳中一基性麻粒岩和片麻岩部分熔融产生的熔体与幔源玄武质岩浆混合, 后又发生单斜辉石分离结晶的产物; 碱长花岗岩源于上地壳长英质岩石部分熔融产生的熔体与幔源玄武质岩浆混合, 随后经历长石的分离结晶作用而成; 斑岩是受幔源岩浆底侵加热的上地壳长英质岩石的部分熔融产生的熔体, 并经历了长石的分离结晶作用而产生。该环状杂岩体的形成过程可以概括为: (1) 火山爆炸性喷发形成大量的碱性火山熔岩和火山碎屑岩; (2) 地下岩浆房空虚导致压力下降, 其顶板围岩失稳而沿火山口周围近直立的环状断裂垮塌, 形成塌陷的破火山口。与此同时, 下覆岩浆房的岩浆被动挤入环状断裂而形成斑状石英正长岩环状岩墙; (3) 浅部地壳的长英质岩浆房过压, 促使其高温过碱质 A 型花岗岩质岩浆上升侵位形成了中心的斑状碱长花岗岩岩株, 这些岩浆的上涌导致上覆围岩产生倾角中-陡的、内倾的锥状裂隙, 为石英正长斑岩锥状岩席侵位提供了空间; (4) 浅部岩浆房复活, 高温过碱质 A 型花岗岩质岩浆再度上升侵位形成被嵌套的晶洞碱长花岗岩岩株。同样, 这种岩浆的再度上侵导致上覆围岩产生了倾角较陡而内倾的锥状裂隙, 为花岗岩斑岩锥状岩席提供了侵位空间。后石湖山碱性环状杂岩体的形成是华北东部早白垩世与克拉通破坏相关的伸展构造体制下的产物, 这种构造体制可能与古太平洋板块的俯冲作用有关。

**关键词:** 环状杂岩体; 地质学; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 形成过程; 燕山造山带。

**中图分类号:** P581; P586

**文章编号:** 1000-2383(2013)04-0689-26

**收稿日期:** 2013-02-21

## The Origin and Evolution of the Houshishushan Alkaline Ring Complex in the Yanshan Orogenic Belt

WEN Xia, MA Chang-qian\*, SANG Long-kang, ROGER Mason, SHE Zhen-bing, XIONG Fu-hao

Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The Houshishushan complex is an alkaline ring complex associated with a collapsed caldera, consisting of a circular screen of alkaline volcanic rocks and post-collapse resurgent intrusions including a ring dyke of porphyritic quartz syenite, a central composite hypabyssal intrusion of nested stocks of drusy alkali-feldspar granite and porphyritic alkali-feldspar granite, and cone sheets of quartz syenite porphyry and granite porphyry. Zircon LA-ICPMS U-Pb analyses yields mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of  $119 \pm 3$  Ma for porphyritic quartz syenite,  $121 \pm 2$  Ma for quartz syenite and  $121 \pm 2$  Ma for granite porphyry, respectively. Volcanic rocks of the Houshishushan Ring Complex (HRC) have similar ages to those of the intrusive rocks, confirming it as a volcanic-intrusive complex. Porphyritic quartz syenites have high contents of  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  ( $10.0\% - 10.5\%$ ) and  $\text{K}_2\text{O}$

**基金项目:** 湖北省自然科学基金重点项目(No. 2009CDA004); 教育部和国家外国专家局高等学校学科创新引智计划(No. B07039)。

**作者简介:** 文霞(1982-), 女, 博士研究生, 主要从事岩石学与矿物学研究。E-mail: lili\_xiaxia@163.com

\* 通讯作者: 马昌前, E-mail: cqma@cug.edu.cn

(5.21%—5.42%) with positive Eu anomalies ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.05-1.40$ ). Alkali-feldspar granites and porphyries are characterized by enriched  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}^{\text{tot}}/\text{MgO}$ ,  $\text{Ga}/\text{Al}$ , Zr, Nb and REE (except for Eu) and low abundance of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO, MgO, Ba, Sr and Eu, indicative of A-type granitic rocks. The porphyries can be classified as aluminous A-type granites, and show high zircon saturation temperatures (880—901 °C). All the A-type granites of the HRC possess negative  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values from -13.9 to -12.2. Porphyritic quartz syenite magmas were derived from partial melting of intermediate to mafic granulites and gneisses in the lower crust that mixed with enriched mantle-derived basaltic magma, with subsequent differentiation of clinopyroxene. Alkali-feldspar granite magmas were produced by mixing of mantle-derived basaltic magmas with upper crustal felsic melts, with fractionation of feldspars. The petrogenetic processes of porphyritic magmas involved partial melting of quartzfeldspathic rocks at shallow crust depths coupled with differentiation of feldspars. We suggest that development of the HRC involved the following four-stage sequence: (1) massive alkaline lavas and pyroclastics erupted explosively; (2) the subsided caldera formed because of loss of magma from an underlying magma chamber which reduced magma pressure and facilitated collapse of the roof of the magma chamber along near-vertical ring faults. Magma intruded passively up the opening ring-faults to form the ring dyke of porphyritic quartz syenite during caldera collapse; (3) the high-level magma chamber became overpressured, and hot peralkaline A-type granite magma was emplaced as the central stock of porphyritic alkali-feldspar granite. The overlying crust was fractured to generate cone fractures that provided space for the ascent of felsic melts to form cone sheets of quartz syenite porphyry; (4) the chamber resurged and a cogenetic pluton was emplaced as the nested stock of drusy alkali-feldspar granite. Build-up of magma overpressure within the central source chamber imparted upward force to fracture the host rock and form new conical fractures. These fractures were filled with magma to form cone sheets of granite porphyry. The Houshishushan alkaline ring complex formed over a brief time period in an extensional setting related to destruction of the eastern North China Craton during Early Cretaceous, possibly associated with subduction of paleo-Pacific plate.

**Key words:** ring complex; geology; zircon U-Pb geochronology; geochemistry; evolution; Yanshan orogenic belt.

## 0 引言

环状杂岩体一般发育在具有地表破火山口的火山岩带内(Lipman, 1984; Walter, 2008),包括锥状岩席、环状岩墙及块状中心侵入体等不同侵入相,它们通常代表了浅部岩浆房与地表破火山口之间的岩浆运移通道(Johnson *et al.*, 1999).对其精细结构和成因模式的研究是认识次火山岩浆系统与上地壳岩浆运移带演化的重要方式之一(Johnson *et al.*, 2002).系统的地质学、年代学及地球化学研究,可以有效地揭示这类杂岩体的成因和演化过程(Vallinayagam and Kochhar, 2011).

出露于华北克拉通北缘燕山造山带东部山海关地区的后石湖山环状杂岩体是我国华北与破火山口有关的碱性杂岩体之一.虽然前人对该环状杂岩体作了大量的岩石地球化学(刘红涛等, 2002; Wei *et al.*, 2008)、同位素年代学(许保良等, 1999; Yang *et al.*, 2008)等研究工作.然而,对其形成和演化过程还没有给出合理的解释.

本研究对后石湖山环状杂岩体进行了详细的野外地质调查、岩石学、年代学和地球化学研究,以探讨该环状杂岩体的成因和形成过程,并为开展华北克拉通北缘晚中生代岩浆活动的动力学背景研究提供一定制约.

## 1 地质背景

华北克拉通北邻中亚造山带(Xiao *et al.*, 2010),南接秦岭—大别—苏鲁造山带(Meng and Zhang, 2000; 图 1a).它具有 2.5~3.8 Ga 的太古宙陆核(Liu *et al.*, 1992; Song *et al.*, 1996),是世界上最古老的克拉通之一.燕山造山带位于华北克拉通的北缘东段,为侏罗—白垩纪 EW 向阴山—燕山造山带的东延部分(图 1a),主要由早太古代—古元古代的基底岩石,及上覆的中元古代—中、新生代未变质沉积盖层组成.太古代—古元古代基底的变形、变质作用主要发生于~1.85 Ga,标志着华北的克拉通化作用过程(Zhao *et al.*, 2001).中元古代—古生代以稳定克拉通内的沉积建造为主,缺乏强烈的岩浆活动.自早中生代以来,区内经历大规模的陆内构造—岩浆事件(如李武平, 2012; 张金阳等, 2013),主要受环克拉通的俯冲和碰撞作用影响(Davis *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2009; Ma *et al.*, 2012).早白垩世广泛发育岩浆活动和伸展构造,包括变质核杂岩(Davis *et al.*, 2001; Darby *et al.*, 2004)及伸展盆地(Meng, 2003; Cope and Graham, 2007; Wei *et al.*, 2011).

后石湖山环状杂岩体位于燕山造山带东部的秦

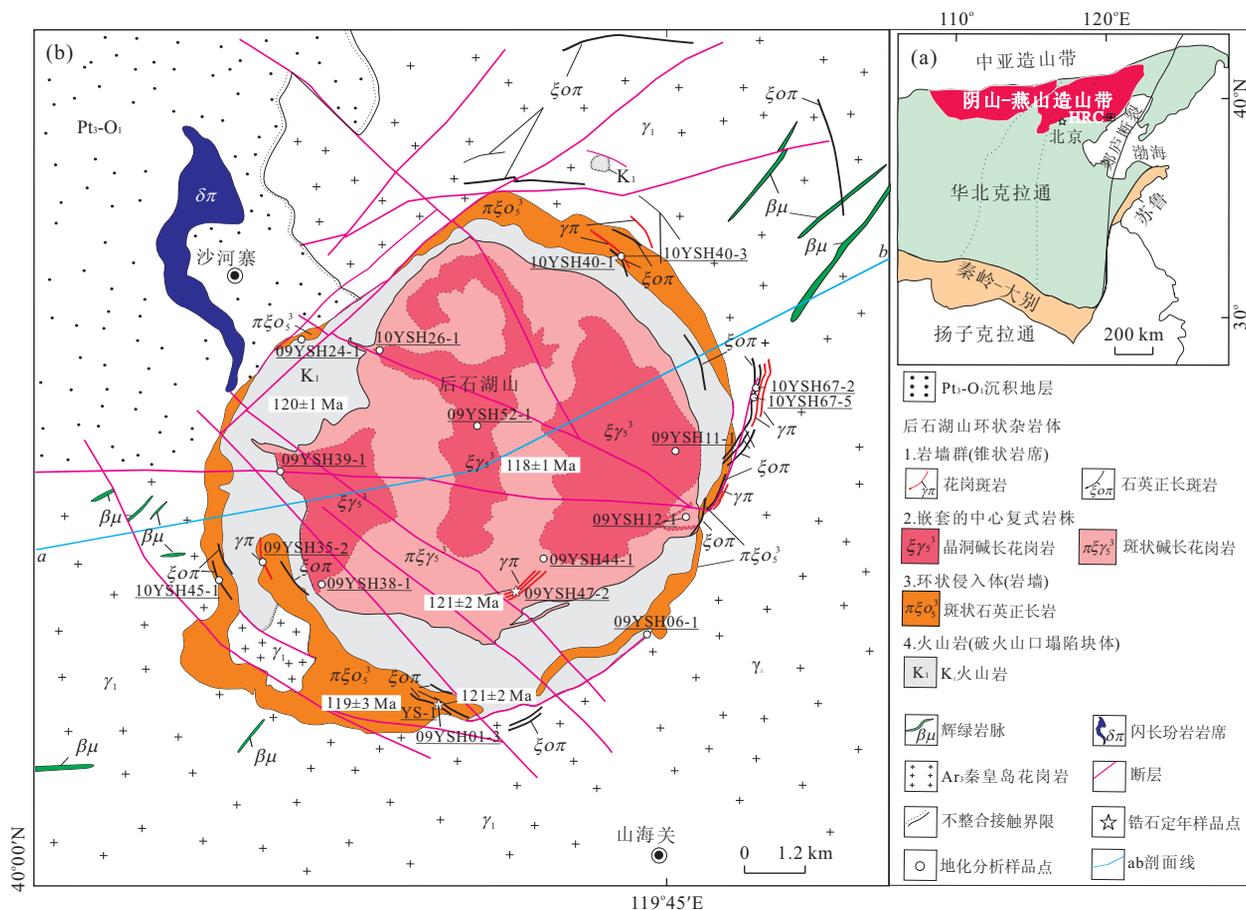


图 1 (a) 中国东部主要构造单元的地质简图, 后石湖山环状杂岩体(HRC)位于燕山造山带最东端;(b)后石湖山环状杂岩体地质图(据河北省地质局第二区域地质调查队 1:20 万山海关幅(1974)、河北省地矿局区域地质调查大队 1:5 万山海关幅(1988);中国地质大学(北京)地质调查研究院 1:25 万青龙县幅(2002)修改)

Fig. 1 (a) Simplified geological map showing major tectonic units in eastern China. The Houshishushan ring complex is located in the eastern part of the Yanshan orogenic belt; (b) Geological map of the Houshishushan ring complex (HRC)

皇岛市山海关一带(图 1), 面积约为 100 km<sup>2</sup>. 在空间分布上, 它是受 NW 与 NE 向断层控制的、形态呈圆一椭圆形较规则地质体, 其长轴为 NE 向, 岩体断裂和节理发育(图 1b). 它的岩性复杂, 主要包括外环的石英正长岩侵入体(119±1 Ma, 锆石 U-Pb 年龄; Yang *et al.*, 2008)、中心的碱长花岗岩岩株(118±1 Ma, 锆石 U-Pb 年龄; Yang *et al.*, 2008)以及内环的碱长粗面岩(125 Ma, 全岩 K-Ar 年龄; 许保良等, 1999)、碱流岩(120±1 Ma, 锆石 U-Pb 年龄; Yang *et al.*, 2008)、碱性流纹质熔结凝灰岩(117 Ma, 全岩 K-Ar 年龄; 许保良等, 1999)等早白垩世(K<sub>1</sub>)火山岩, 体现侵入岩与火山岩的共生特征, 从而构成了一个典型的火山-侵入杂岩体. 杂岩体围岩为新太古代秦皇岛花岗岩及新元古代-古生代早奥陶世的沉积地层.

## 2 野外地质调查

### 2.1 火山岩

杂岩体呈环状分布的火山岩以碱长粗面岩、碱流岩为主, 并在其南、西和北部如燕塞湖水库、蟠桃峪和九门口等地出露了大量集块岩、火山角砾岩和熔结凝灰岩等. 在小陈庄、九门口等地, 可见火山岩与围岩秦皇岛花岗岩的断层接触关系(图 2a), 而非前人所认为的不整合接触关系. 断层产状陡立, 平面上环绕杂岩体中心呈环状, 该环状断层大部分段落为斑状石英正长岩侵入体占据(图 1b).

### 2.2 斑状石英正长岩环状侵入体

斑状石英正长岩侵入体在平面上整体呈不连续环形的不整合侵入体沿杂岩体四周的环状断层分布(图 1b). 侵入体的宽度变化较大, 通常为几百米, 但可小到几米, 最宽处可达 1.2 km(图 1b); 在杂岩体



图 2 后石湖山环状杂岩体的野外地质

Fig. 2 Field geology of the Houshihushan ring complex

a. 火山岩( $K_1$ )与围岩秦皇岛花岗岩( $\gamma_1$ )的断层接触关系, $K_1$ 为含球粒流纹岩,白色虚线示断层线位置,小陈庄;b. 斑状石英正长岩( $\pi\xi_05^3$ )产状陡立,呈岩墙状侵入于 $K_1$ 的粗面岩中,九门口;c. 宽约 10 m 的晶洞碱长花岗岩岩枝侵入于斑状碱长花岗岩之中,三道关停车场;d. 侵入到斑状碱长花岗岩(左,浅色)之中的晶洞碱长花岗岩(右上角,暗色)岩枝边部发育有宽 1 ~ 2 m 冷凝边(中,灰色),三道关停车场;e. 石英正长斑岩(暗色)侵入于斑状石英正长岩(浅色)之中,岩墙产状  $20^\circ \angle 60^\circ$ ,燕塞湖停车场;f. 三条近平行的花岗斑岩岩墙群(暗色)侵入到中心的碱长花岗岩岩株,接触面较陡( $62^\circ$ ),向 N(杂岩体中心方向)倾斜,五佛公园

西南侧的蟠桃峪村和杂岩体北的九门口均可见斑状石英正长岩呈岩墙状侵入杂岩体粗面岩之中,其与粗面岩的接触面产状陡立(图 2b),侵入体边缘未见冷凝边。

### 2.3 碱长花岗岩中心岩株

杂岩体的中心岩株(面积约  $45 \text{ km}^2$ )为复式岩株,包括稍早期的斑状碱长花岗岩和稍晚期的晶洞碱长花岗岩两个单元(图 1b)。在碱长花岗岩与杂岩体火山岩或外围的秦皇岛花岗岩接触带,可见碱长花岗岩岩枝侵入到其中。

斑状碱长花岗岩平面上总体轮廓为圆形,分布在杂岩体中心位置,是中心岩株的主体,稍晚的晶洞碱长花岗岩则在平面上呈不规则状侵入于斑状碱长花岗岩中(图 1b)。在杂岩体东侧的三道关停车场可

见晶洞碱长花岗岩岩枝侵入到斑状碱长花岗岩(图 2c),岩枝边部发育有宽 1~2 m 的冷凝边,相应地在其围岩边缘发育数厘米宽的烘烤边(图 2d)。杂岩体西侧的晶洞碱长花岗岩顶部局部残留有火山凝灰岩顶盖,指示其顶部未受强烈剥蚀。

### 2.4 石英正长斑岩和花岗斑岩岩墙群

杂岩体内围绕中心岩株分布有许多呈环形或近环形的石英正长斑岩和花岗斑岩岩墙群,且多见岩墙群平行于 NE 和 NW 向断层侵入(如图 1b)。这些斑岩侵入到杂岩体的火山岩、外环的斑状石英正长岩、中心的碱长花岗岩岩株及外围的秦皇岛花岗岩围岩中(图 1b,图 2e、2f),可见这些斑岩为杂岩体中的晚期侵入体。斑岩岩墙厚度通常约为 0.1~10 m,边部发育冷凝边,石英正长斑岩岩墙边部一般发育

很好的流动构造. 对其中近 30 条斑岩岩墙的产状进行测量, 结果显示它们在平面上都呈弧形(图 1b), 且朝着杂岩体中心向内倾, 石英正长斑岩岩墙的倾角中一陡, 大约为  $38^{\circ} \sim 70^{\circ}$ (图 2e), 而花岗斑岩岩墙的倾角较陡, 多数介于  $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$  之间(图 2f).

### 3 岩相学特征

火山岩中集块岩由粗大火山岩块组成, 其成分多为基底花岗岩和先期固结的碱长粗面岩、碱流岩. 流纹质晶屑熔结凝灰岩主要由塑性岩屑、塑性玻屑和少量石英、钾长石晶屑组成, 塑性岩屑呈条带状、火焰状或枝杈状, 遇晶屑见弯曲嵌入现象, 呈假流纹构造(图 3a). 塑性玻屑呈丝纹状, 多数脱玻化为隐晶质.

斑状石英正长岩为肉红色, 块状构造(偶见晶洞构造), 似斑状结构, 基质为中细粒结构. 斑晶为正长石, 含量约  $15\% \sim 35\%$ , 具有熔蚀结构和环带结构.

斑晶核部可见不规则孔隙, 充填重结晶的基质, 具有多重环边(图 3b). 正长石斑晶有的呈独立晶体出现, 也有的聚集在一块呈聚斑产出. 基质主要由正长石、填隙状他形石英和花斑状正长石—石英交生体组成, 含少量棕褐色黑云母, 偶见钠铁闪石和霓石, 有的霓石边部被钠铁闪石交代.

斑状碱长花岗岩呈灰白色, 块状构造, 偶见小晶洞, 似斑状结构, 基质为细粒结构. 斑晶主要为正长石(约  $25\% \sim 40\%$ )和自形的石英(约  $10\% \sim 15\%$ ), 熔蚀结构发育. 同样, 正长石斑晶有的为独立晶体, 也有的以聚斑形式产出(图 3c). 基质(约  $45\% \sim 65\%$ )主要为较自形的钾长石、花斑状钾长石—石英交生颗粒和它形石英, 少量钠铁闪石(约  $2\% \sim 5\%$ )(图 3c).

晶洞碱长花岗岩为浅肉红色, 中粗粒结构, 晶洞构造发育, 晶洞直径一般为  $2 \sim 5$  cm, 其中可见自形石英和角闪石晶簇垂直洞壁生长, 有的晶洞甚至可达  $10 \sim 20$  cm. 主要矿物组成为钾长石(约  $60\% \sim 70\%$ )、石英(约  $25\% \sim 30\%$ )和暗色矿物(约  $5\% \sim$

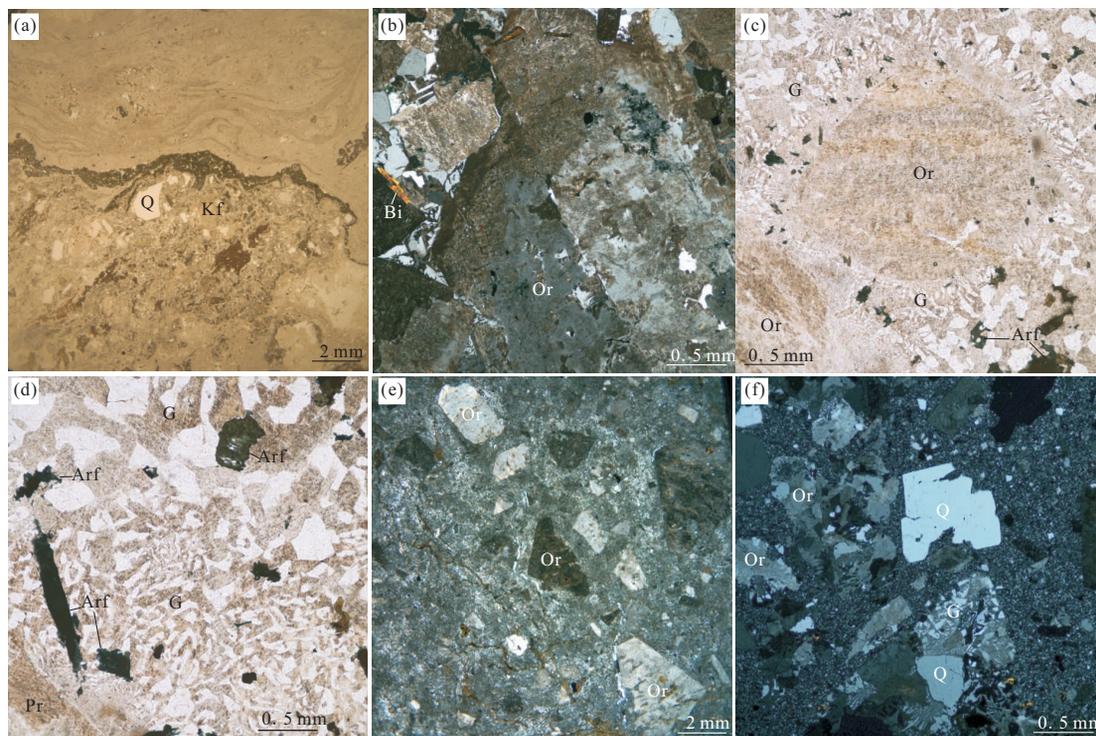


图 3 后石湖山环状杂岩体岩石的典型显微照片

Fig. 3 Photomicrographs showing typical textures of rocks from the HRC

a. 流纹质晶屑熔结凝灰岩, 塑性岩屑呈火焰状、枝杈状, 遇石英(Q)晶屑呈弯曲嵌入现象, 显示假流纹构造; b. 斑状石英正长岩, 具环边的正长石斑晶(Or)边缘呈熔蚀港湾状, 内部出现不规则空隙, 其中充填重结晶的基质; c. 斑状碱长花岗岩, 见正长石斑晶(Or)的熔蚀圆化边缘, 含少量钠铁闪石(Arf); d. 晶洞碱长花岗岩, 视域中可见钾长石—石英交生颗粒(G)、条纹正长石(Pr)和深蓝色钠铁闪石(Arf); e. 石英正长斑岩, 正长石斑晶(Or, 浅色), 有熔蚀边缘, 定向分布显示流动构造; f. 花岗斑岩, 石英(Q)、正长石(Or)斑晶熔蚀结构发育, 有的 Q 斑晶周围与 Or 组成显微微象结构(G). a, c, d. 单偏光; b, e, f. 正交偏光

15%), 钾长石和石英构成的显微文象结构发育. 镜下可见主要由花斑状钾长石—石英交生颗粒、半自形板状条纹正长石和具熔蚀结构的石英组成, 不均匀含少量长柱状钠铁闪石(图 3d).

石英正长斑岩呈暗灰色, 斑状结构、块状构造. 斑晶主要为板状正长石(约 10%~15%), 可见熔蚀边缘, 基质为隐晶质和长石、石英组成的显微晶质(图 3e).

花岗斑岩也为暗灰色, 斑状结构、块状构造, 斑晶主要由正长石(约 15%~20%)和石英(约 5%~10%)组成, 多具熔蚀结构, 有的石英与正长石组成显微文象结构, 也可见自形的石英斑晶. 基质主要为隐晶质或长石、石英构成的显微晶质(图 3f).

## 4 样品和分析方法

挑选了斑状石英正长岩、石英正长斑岩和花岗斑岩岩墙群的 3 件新鲜样品进行锆石 U-Pb 年代学分析(采样位置如图 1b 所示: 斑状石英正长岩 YS-1、石英正长斑岩 09YSH01-3 和花岗斑岩 09YSH47-2); 对石英正长斑岩、花岗斑岩、晶洞碱长花岗岩和斑状碱长花岗岩中最新鲜的样品进行主量、微量元素和 Sr-Nd 同位素分析.

锆石分选在河北廊坊诚信地质服务公司完成, 样品经过粗碎、淘洗、电磁选等分离方法分选锆石, 之后在双目镜下挑出含包裹体少、无明显裂隙且晶形完好的锆石颗粒, 并粘在双面胶上制成靶. 锆石阴极发光(CL)图像分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)的电子探针实验室完成. LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学(表 1)分析在 GPMR 采用 Agilent 7500a 的 ICP-MS 仪器与装配有 193 nm 气体激光的 GeoLas 2005 激光剥蚀系统联机进行, 激光束斑直径为 32  $\mu\text{m}$ . 实验中使用 He 作为剥蚀物质的载气. 锆石同位素定年中采用国际标准锆石 91500 作外标进行同位素分馏校正. 微量元素含量采用国际标样 NIST610 作外标,  $^{29}\text{Si}$  作内标进行校正. 数据处理通过 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2010)完成, 年龄计算和谐和图绘制均采用 Isoplot(ver 3.0)(Ludwig, 2003)完成. 详细分析步骤和数据处理方法参见 Liu *et al.* (2010).

主量元素(表 2)分析有 3 件样品(09YSH01-3、09YSH44-1 和 09YSH47-2)在湖北省地质实验研究所武汉综合岩矿测试中心完成, 4 件样品(10YSH40-3、10YSH45-1、10YSH67-2 和 10YSH67-5)

在澳实分析检测(广州)有限公司完成, FeO 含量用传统的湿化学法分析测定. 其余样品均通过 GPMR 实验室的岛津扫描型 X 射线荧光光谱仪(XRF-1800)进行 XRF 分析, 样品分析精度与准确度分别优于 4% 和 3%, 具体的分析流程见 Ma *et al.* (2012). 微量元素含量(表 2)在 GPMR 实验室通过 Agilent 7500a ICP-MS 分析完成. 详细的样品处理过程、分析精密度和准确度见 Liu *et al.* (2008). 全岩 Sr-Nd 同位素(表 3)分析也在 GPMR 实验室完成. 实验中采用 Finnigan 公司的 Triton Ti 热电离同位素质谱仪测定同位素比值, 仪器准确度分别通过标样 NBS987 和 La Jolla 进行监测. Sr、Nd 同位素质量分馏分别用  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375\ 209$  和  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\ 900$  进行校正. 分析的详细流程见 Ling *et al.* (2009).

## 5 分析结果

### 5.1 锆石 U-Pb 年代学

斑状石英正长岩(YS-1)的锆石颗粒无色透明, 有的带淡褐色, 具有自形柱状晶形, 最长可达约 100  $\mu\text{m}$ , 长宽比介于 1:1~2:1 之间. CL 图像显示, 锆石具明显岩浆振荡环带(图 4a). 锆石 Th、U 含量变化较大(Th:  $133 \times 10^{-6} \sim 6\ 689 \times 10^{-6}$ , U:  $183 \times 10^{-6} \sim 2\ 965 \times 10^{-6}$ ), Th/U 比值(0.73~2.26)较高, 与典型岩浆锆石的 Th/U 比值相当(Wu and Zheng, 2004). 12 颗锆石的 12 个分析点均落在 U-Pb 谐和线上, 它们的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值较集中, 变化于 112~125 Ma 之间, 其加权平均年龄为  $119 \pm 3$  Ma(MSWD=2.9, 图 5a), 代表斑状石英正长岩的结晶年龄.

石英正长斑岩(09YSH01-3)的锆石颗粒无色透明、有的带淡黄色, 多具较自形柱状晶形, 其长轴方向最长可达约 200  $\mu\text{m}$ , 长宽比介于 1:1~3:1 之间. CL 图像显示, 锆石具岩浆振荡环带(图 4b). 锆石 Th、U 含量较高(Th:  $60 \times 10^{-6} \sim 650 \times 10^{-6}$ , U:  $147 \times 10^{-6} \sim 489 \times 10^{-6}$ ), Th/U 比值(0.41~1.63)较大, 为岩浆锆石. 12 颗锆石的 12 个分析点均落在 U-Pb 谐和线上, 其中 10 个点对应的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值较集中(114~125 Ma), 其加权平均年龄为  $121 \pm 2$  Ma(MSWD=0.80, 图 5b、5c), 代表石英正长斑岩的侵位年龄. 另有两颗锆石给出了  $500 \pm 4$  Ma 和  $989 \pm 7$  Ma 老的年龄(表 1 中分析点 01 和

表 1 后石湖山斑状石英长岩 (YS-1)、石英正长斑岩 (09YSH01-3) 与花岗岩 (09YSH47-2) 样品的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年分析结果  
Table 1 LA-ICPMS U-Pb data for zircons of porphyritic quartz syenite, quartz syenite porphyry and granite porphyry samples from the HRC

点号	全 Pb( $10^{-6}$ )	$^{238}\text{U}$ ( $10^{-6}$ )	$^{232}\text{Th}$ ( $10^{-6}$ )	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值			同位素年龄(Ma)						
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$		
斑状石英正长岩(YS-1)														
01	4.2	207	156	0.76	0.0505	0.0042	0.119	0.0094	0.0175	0.0005	112	3	115	9
02	5.0	232	198	0.85	0.0484	0.0051	0.123	0.0123	0.0186	0.0005	119	3	118	11
03	15.0	579	891	1.54	0.0519	0.0027	0.139	0.0075	0.0193	0.0004	123	2	132	7
04	17.1	621	1334	2.15	0.0474	0.0046	0.119	0.0113	0.0181	0.0004	116	2	114	10
05	7.0	327	320	0.98	0.0495	0.0041	0.123	0.0107	0.0179	0.0004	114	3	118	10
06	11.7	509	534	1.05	0.0505	0.0033	0.130	0.0084	0.0187	0.0004	119	3	124	8
07	6.7	285	296	1.04	0.0499	0.0052	0.129	0.0137	0.0185	0.0004	118	3	123	12
08	22.2	749	1446	1.93	0.0485	0.0028	0.132	0.0074	0.0196	0.0003	125	2	126	7
09	90.8	2965	6689	2.26	0.0470	0.0011	0.124	0.0035	0.0190	0.0003	121	2	119	3
10	4.1	184	141	0.77	0.0496	0.0079	0.127	0.0198	0.0187	0.0005	119	3	121	18
11	14.6	557	856	1.54	0.0492	0.0026	0.121	0.0065	0.0180	0.0003	115	2	116	6
12	4.3	183	133	0.73	0.0503	0.0055	0.133	0.0142	0.0192	0.0007	123	5	127	13
石英正长斑岩(09YSH01-3)														
01	42.7	338	550	1.63	0.0573	0.0014	0.639	0.0150	0.0806	0.0006	500	4	502	9
02	13.5	489	650	1.33	0.0491	0.0051	0.124	0.0115	0.0187	0.0005	120	3	118	10
03	6.9	274	217	0.79	0.0481	0.0051	0.124	0.0122	0.0187	0.0005	120	3	119	11
04	3.5	153	67	0.44	0.0491	0.0062	0.128	0.0163	0.0191	0.0005	122	3	122	15
05	3.4	147	60	0.41	0.0498	0.0089	0.133	0.0224	0.0196	0.0007	125	4	127	20
06	81.7	444	71	0.16	0.0723	0.0013	1.658	0.0320	0.1658	0.0013	989	7	993	12
07	4.3	181	87	0.48	0.0484	0.0081	0.136	0.0234	0.0201	0.0007	128	4	130	21
08	3.1	129	111	0.87	0.0502	0.0116	0.120	0.0275	0.0179	0.0009	114	6	115	25
09	3.3	152	74	0.49	0.0484	0.0061	0.122	0.0160	0.0182	0.0007	116	4	117	15
10	4.3	192	100	0.52	0.0544	0.0095	0.132	0.0198	0.0189	0.0008	121	5	125	18
11	5.8	231	211	0.91	0.0493	0.0042	0.129	0.0111	0.0190	0.0004	121	2	123	10
12	6.3	251	246	0.98	0.0489	0.0033	0.126	0.0084	0.0188	0.0003	120	2	120	8
花岗岩(09YSH47-2)														
01	6.6	267	178	0.67	0.0520	0.0072	0.139	0.0191	0.0195	0.0005	124	3	132	17
02	5.3	225	127	0.56	0.0506	0.0040	0.134	0.0096	0.0195	0.0004	124	2	128	9
03	4.4	191	95	0.50	0.0512	0.0061	0.129	0.0133	0.0193	0.0005	123	3	123	12
04	5.5	226	127	0.56	0.0480	0.0043	0.129	0.0113	0.0195	0.0003	125	2	123	10
05	5.4	232	129	0.56	0.0500	0.0034	0.130	0.0086	0.0190	0.0003	121	2	124	8
06	4.5	190	98	0.51	0.0494	0.0044	0.131	0.0107	0.0195	0.0004	124	2	125	10
07	5.2	216	115	0.53	0.0524	0.0050	0.136	0.0120	0.0195	0.0004	124	3	130	11
08	5.5	236	142	0.60	0.0492	0.0032	0.127	0.0079	0.0189	0.0003	121	2	122	7
09	5.2	220	125	0.57	0.0479	0.0037	0.127	0.0099	0.0193	0.0003	123	2	121	9
10	4.6	197	111	0.56	0.0499	0.0055	0.127	0.0129	0.0191	0.0005	122	3	121	12
11	6.5	281	183	0.65	0.0489	0.0023	0.123	0.0056	0.0184	0.0002	118	1	118	5
12	5.0	208	117	0.56	0.0474	0.0045	0.130	0.0125	0.0195	0.0004	125	3	124	11
13	5.7	249	138	0.56	0.0473	0.0045	0.123	0.0125	0.0185	0.0003	118	2	118	11
14	4.6	204	108	0.53	0.0481	0.0043	0.124	0.0115	0.0188	0.0003	120	2	119	10
15	5.7	254	161	0.64	0.0486	0.0038	0.124	0.0097	0.0183	0.0003	117	2	118	9
16	5.1	229	121	0.53	0.0494	0.0030	0.121	0.0072	0.0180	0.0003	115	2	116	7

表 2 后石湖山代表性样品的元素地球化学成分

Table 2 Element compositions of representative samples from the HRC

样号	09YSH01-3	10YSH45-1	10YSH67-2	10YSH40-3	10YSH67-5	09YSH47-2	09YSH35-2	09YSH11-1
主量元素(%)								
SiO <sub>2</sub>	75.37	73.49	75.64	74.52	75.41	75.85	76.09	76.59
TiO <sub>2</sub>	0.17	0.18	0.12	0.12	0.14	0.14	0.18	0.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.47	13.72	12.14	12.3	12.53	11.58	12.52	12.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.36	2.02	1.86	1.91	1.96	2.18	—	—
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.19	2.44	2.49	2.33	2.80	2.55	2.35	2.1
FeO	0.75	0.38	0.57	0.38	0.76	0.33	—	—
MnO	0.11	0.01	0.03	0.06	0.07	0.07	0.02	0.08
MgO	0.11	0.11	0.08	0.11	0.12	0.1	0.09	0.08
CaO	0.38	0.04	0.15	0.14	0.29	0.35	0.12	0.16
Na <sub>2</sub> O	4.58	5.44	4.5	3.53	4.49	2.81	4.03	4.26
K <sub>2</sub> O	4.16	3.75	3.85	5.57	4.31	6.12	4.65	4.62
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.024	0.012	0.03	0.019	0.01	0.02	0.01
Lost	0.34	0.43	0.3	0.57	0.4	0.24	0.32	0.31
Total	99.81	99.59	99.25	99.24	100.5	99.78	100.39	100.64
A/CNK	0.98	1.05	1.03	1.02	1	0.97	1.05	1.00
微量元素(10 <sup>-6</sup> )								
V	1.95	3.09	3.48	1.19	1.66	2.44	1.84	0.69
Cr	1.84	1.13	0.21	0.73	1.15	2.69	0.35	0.23
Co	0.44	48.4	24.3	57.1	73.9	0.63	57.5	68.2
Ni	1.05	1.44	0.49	1.36	1.6	1.48	1.03	1.08
Zn	68.6	23.5	25.6	64.1	97.5	107	59.7	90.6
Ga	24.7	22.9	23.4	22.4	23.9	24.5	24.7	26.0
Rb	139	97	148	180	170	252	139	188
Sr	11.1	52.6	29.3	8.45	14.5	15.1	15.4	5.50
Y	62.9	41.7	64.9	57.8	61.4	85	58.9	66.1
Zr	510	429	464	451	426	537	527	544
Nb	71	42.1	57.4	57.6	61.5	76.1	53.1	57.6
Cs	1.62	0.58	0.59	0.97	0.85	2.82	0.62	0.98
Ba	66.4	105	42.1	59.9	34.1	24.9	90.7	8.71
La	109	66.3	80.5	68.6	82.4	83.3	77.4	8.67
Ce	189	113	152	137	148	157	147	87.4
Pr	21.9	14.2	17.9	15.2	16.9	17.8	17.2	180
Nd	78.1	49.2	63.6	54.1	59.2	63.3	59.7	19.8
Sm	13.7	8.72	11.9	10.3	11.3	12.8	11.6	68.2
Eu	0.074	0.22	0.045	0.098	0.11	0.094	0.12	13.0
Gd	10.9	7.12	10.7	9.08	9.51	11.9	9.04	0.060
Tb	1.74	1.2	1.76	1.59	1.61	2.12	1.57	11.1
Dy	10.1	7.23	10.6	9.71	9.5	13.1	9.86	1.81
Ho	1.98	1.41	2.06	1.93	1.91	2.7	2.06	10.8
Er	6.08	4.46	6.26	5.78	5.67	8.06	6.07	2.20
Tm	0.93	0.67	0.95	0.88	0.88	1.28	0.93	6.40
Yb	6.12	4.36	6.08	5.85	6.01	8.44	5.99	0.98
Lu	0.9	0.67	0.91	0.83	0.84	1.17	0.96	6.39
Hf	14.4	11.8	13.7	13.6	12.8	17.2	14.2	1.01
Ta	3.75	2.84	3.48	3.59	3.51	4.69	3.37	15.2
Pb	199	11.3	11.1	9.44	48.3	327	10.5	3.71
Th	17.6	14.2	16.7	16.5	16.8	25.7	16.0	17.7
U	4.65	3.71	4.82	3.9	4.27	6.48	3.59	4.27
(La/Yb) <sub>N</sub>	12.76	10.92	9.51	8.41	9.83	7.08	9.27	9.81
Eu/Eu*	0.02	0.08	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01

续表 2

样号	09YSH39-1	09YSH52-1	09YSH12-1	09YSH38-1	09YSH44-1	YS-1	09YSH24-1	10YSH40-1
主量元素(%)								
SiO <sub>2</sub>	76.68	76.61	76.35	76.81	75.18	65.29	63.47	62.83
TiO <sub>2</sub>	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.73	0.92	0.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.39	12.3	12.03	11.81	12.29	16.05	16.52	16.41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	1.04	—	—	—
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.78	1.87	2.23	2.00	2.21	4.18	4.71	5.73
FeO	—	—	—	—	1.05	—	—	—
MnO	0.07	0.06	0.07	0.05	0.05	0.09	0.07	0.17
MgO	0.06	0.09	0.08	0.07	0.08	0.88	1.07	0.92
CaO	0.28	0.27	0.28	0.25	0.37	1.75	2.01	2.04
Na <sub>2</sub> O	4.07	4.09	4.42	4.26	4.53	4.62	5.29	5.11
K <sub>2</sub> O	4.59	4.7	4.44	4.47	4.75	5.42	5.21	5.31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.21	0.3	0.25
Lost	0.4	0.31	0.35	0.47	0.28	1.17	0.39	0.5
Total	100.47	100.45	100.41	100.35	99.79	100.39	99.96	100.14
A/CNK	1.02	1.00	0.96	0.96	0.93	0.96	0.92	0.92
微量元素(10 <sup>-6</sup> )								
V	1.22	0.96	0.52	1.44	1.48	25.8	31.7	25.7
Cr	0.35	0.35	0.19	0.44	1.87	1.43	1.26	1.08
Co	68.3	62.4	60.7	146	0.38	25.3	30.1	25.4
Ni	1.14	0.96	0.75	1.86	0.92	1.31	1.18	1.34
Zn	64.2	79.5	96.5	102	84.3	67.7	40.3	90.0
Ga	25.3	24.8	25.7	25.0	26.1	20.9	20.8	22.8
Rb	181	199	188	203	184	101	96.9	66.9
Sr	10.1	8.07	3.63	7.34	5.75	202	212	191
Y	65.2	55.7	67.8	53.6	79.4	28.8	28.3	28.1
Zr	484	371	561	423	723	240	224	215
Nb	60.4	56.2	63.0	43.0	80.1	20.9	17.6	18.8
Cs	0.77	0.90	1.57	1.84	1.38	1.34	0.64	0.96
Ba	27.8	22.7	3.45	2.73	30.1	1483	1699	1021
La	27.9	22.8	83.9	77.1	92.1	1482	1716	1023
Ce	68.9	76.8	175	153	189	46.1	43.6	39.6
Pr	144	157	19.7	17.5	18.8	93.8	88.8	83.0
Nd	16.0	17.3	69.7	60.8	64.8	10.6	10.4	9.93
Sm	55.6	59.7	13.7	11.5	11.7	40.1	41.6	38.9
Eu	11.3	11.7	0.049	0.034	0.098	7.42	7.73	7.57
Gd	0.10	0.098	11.9	9.14	10	2.40	3.31	2.72
Tb	9.63	9.86	1.91	1.48	1.82	6.25	6.39	6.27
Dy	1.69	1.62	11.8	8.54	11.8	0.91	0.92	0.92
Ho	10.4	9.51	2.49	1.70	2.52	5.14	5.23	5.17
Er	2.13	1.90	7.23	5.01	7.94	0.99	0.99	0.98
Tm	6.24	5.35	1.14	0.79	1.24	2.77	2.62	2.65
Yb	0.97	0.79	7.46	5.25	8.56	0.40	0.38	0.38
Lu	6.19	5.23	1.19	0.84	1.24	2.53	2.39	2.34
Hf	0.94	0.78	14.8	11.6	20.9	0.38	0.36	0.38
Ta	14.4	11.3	3.84	2.08	4.42	5.88	5.24	5.00
Pb	3.78	3.67	36.3	20.0	75.3	1.33	1.08	1.10
Th	17.3	15.9	20.2	14.7	23.3	7.71	5.55	4.18
U	4.66	3.78	4.52	3.62	5.59	2.33	1.34	1.28
(La/Yb) <sub>N</sub>	7.99	10.52	8.07	7.72	10.53	13.05	13.11	12.14
Eu/Eu*	0.03	0.03	0.01	0.03	0.01	1.05	1.40	1.17

注:Eu/Eu\* = 2Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub>+Gd<sub>N</sub>);(La/Yb)<sub>N</sub>=球粒陨石标准化的La/Yb值。

表 3 后石湖山的石英正长斑岩、花岗斑岩及斑状碱长花岗岩 Sr-Nd 同位素成分

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of quartz syenite porphyry, granite porphyry and porphyritic alkaline granite from the HRC

样号	09YSH01-3	10YSH45-1	10YSH67-2	10YSH40-3	10YSH67-5	09YSH47-2	09YSH44-1
岩石类型	石英正长斑岩	石英正长斑岩	石英正长斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	斑状碱长花岗岩
Rb( $10^{-6}$ )	139	97	148	180	170	252	184
Sr( $10^{-6}$ )	11.1	52.6	29.3	8.45	14.5	15.1	5.75
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	36.435 913	5.341 855	14.696 61	62.117 136	34.164 308	48.624 295	93.751 904
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.762 033	0.724 184	0.758 597	0.796 899	0.794 169	0.773 361	0.839 609
$2\sigma(10^{-6})$	4	6	8	10	19	4	10
Sm( $10^{-6}$ )	13.7	8.72	11.9	10.3	11.3	12.8	11.7
Nd( $10^{-6}$ )	78.1	49.2	63.6	54.1	59.2	63.3	64.8
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.106 4326	0.107 2965	0.113 206	0.115 1581	0.115 4472	0.122 3666	0.109 2797
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.511 901	0.511 856	0.511 915	0.511 948	0.511 926	0.511 946	0.511 928
$2\sigma$	6	5	4	2	3	5	5
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.699 9	0.715 1	0.733 5	0.691 0	0.735 9	0.690 4	0.679 7
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-13	-13.9	-12.8	-12.2	-12.7	-12.4	-12.5
$T_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	1 972	2 044	1 958	1 909	1 944	1 921	1 933
$f(\text{Sm}/\text{Nd})$	-0.46	-0.45	-0.42	-0.41	-0.41	-0.38	-0.44

注:  $\epsilon_{\text{Nd}} = [({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_s(t) / ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(t) - 1] \times 10\ 000$ ;  $({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(t) = ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(e^{\lambda t} - 1)$ ;  $T_{\text{DM2}} = \frac{1}{\lambda} \ln \left\{ 1 + \frac{({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_s - ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} - [({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_s - ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}](e^{\lambda t} - 1)}{({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_c - ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}} \right\}$ , 式中: 下标 s、c 和 DM 分别代表现今测定值、大陆壳平均值和亏损地幔值;  $({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512\ 638$ ,  $({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.196\ 7$ ,  $({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513\ 15$ ,  $({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.213\ 7$ ,  $({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_c = 0.118$ ;  $\lambda = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$ ;  $t$  代表样品结晶年龄, 均取 120 Ma; 所有样品的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值均由  $t = 120 \text{ Ma}$  推算而得。

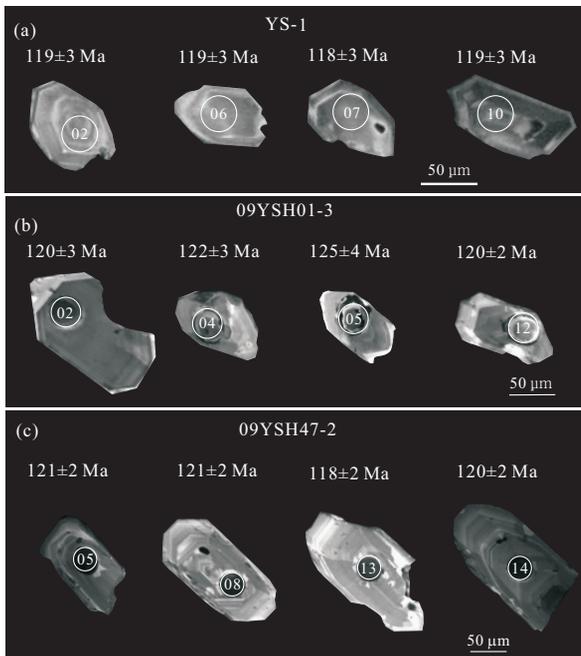


图 4 后石湖山斑状石英正长岩(YS-1)(a)、石英正长斑岩(09YSH01-3)(b)与花岗斑岩(09YSH47-2)(c)代表性锆石的 CL 图像

Fig. 4 (a), (b) and (c)-Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from samples YS-1 (porphyritic quartz syenite), 09YSH01-3 (quartz syenite porphyry) and 09YSH47-2 (granite porphyry)

06), 可能为捕获锆石。

花岗斑岩(09YSH47-2)中的锆石带淡黄色, 为自形的透明柱形晶体, 其长轴方向最长可达约  $250 \mu\text{m}$ , 长宽比介于  $1:1 \sim 2.5:1$  之间, 锆石内部可见明显的振荡环带(图 4c). 锆石的 Th/U 比值较高, 为  $0.50 \sim 0.67$ , 也为岩浆锆石. 16 颗锆石的 16 个有效分析点也都分布于谐和线上, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $121 \pm 2 \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD} = 2.3$ , 图 5d), 代表了花岗斑岩的结晶年龄。

## 5.2 元素地球化学特征

### 5.2.1 斑状石英正长岩

斑状石英正长岩的  $\text{SiO}_2$  含量为  $62.8\% \sim 65.3\%$ 、富碱 ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 10.0\% \sim 10.5\%$ ), 在 TAS 图解中集中于正长岩和石英二长岩区域、碱性系列(图 6a). 这些岩石具有较高的  $\text{K}_2\text{O}$  含量 ( $5.21\% \sim 5.42\%$ ),  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值介于  $0.98 \sim 1.17$ , 属钾玄岩系列(图 6b). 它们的铝饱和指数 A/CNK 值为  $0.92 \sim 0.96$ , A/NK 比值为  $1.15 \sim 1.19$ , 显示准铝质特征(图 6c). 在 Frost *et al.* (2001) 的  $\text{Fe}^*$  ( $\text{Fe}^* = \text{FeO}^{\text{tot}} / (\text{FeO}^{\text{tot}} + \text{MgO})$ )- $\text{SiO}_2$  (图 7a) 及  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO})$ - $\text{SiO}_2$  分类图(图 7b)中, 属铁质和碱性岩石。

在稀土元素球粒陨石标准化配分图中(图 8a), 这些斑状石英正长岩呈轻稀土富集的右倾型, 其  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  与  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  值分别介于  $12.14 \sim 13.11$

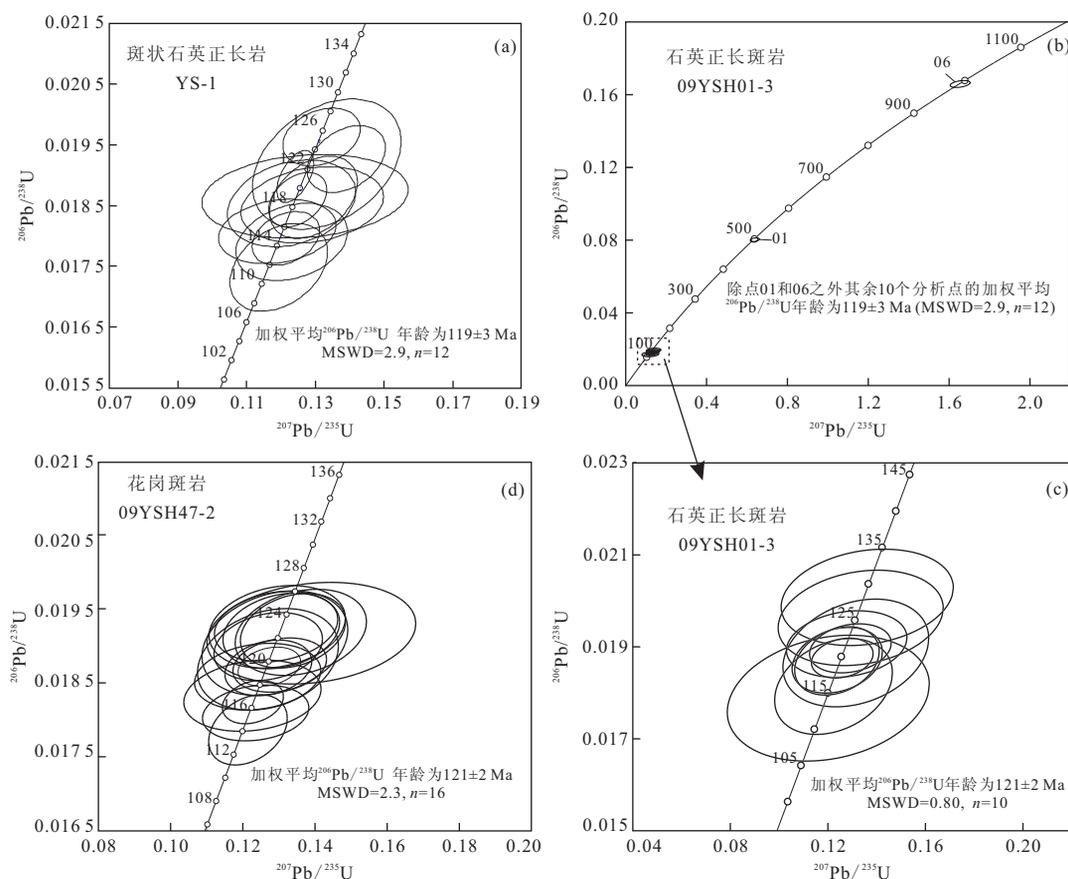


图5 后石湖山环状杂岩体斑状石英正长岩(YS-1)(a)、石英正长斑岩(09YSH01-3)(b)、(c)与花岗斑岩(09YSH47-2)(d)的锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Concordia diagrams showing zircon U-Pb ages for sample (a) YS-1 (porphyritic quartz syenite), (b), (c) 09YSH01-3 (quartz syenite porphyry) and (d) 09YSH47-2 (granite porphyry) from the HRC

和 2.04~2.22; 具有正的 Eu 异常,  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  值为 1.05~1.40. 在原始地幔微量元素标准化蛛网图中(图 8b), 它们具富集某些大离子亲石元素(LILEs, 如 Rb、Ba 和 K)、轻稀土元素(LREEs, 如 La、Ce、Nd 和 Sm)、及 Zr 和 Hf, 亏损高场强元素(HFSEs, 如 Nb、Ta、Ti 和 P), Th、U 相对亏损等特征.

**5.2.2 碱长花岗岩** 具高硅、富碱的特征( $\text{SiO}_2 = 75.2\% \sim 76.8\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.66\% \sim 9.28\%$ ), 在 TAS 分类图中落于亚碱性系列范围(图 6a). 这些岩石的  $\text{K}_2\text{O}$  含量(4.44%~4.75%)较高, 属高钾钙碱性系列(图 6b). 它们的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 11.8%~12.4%, 斑状碱长花岗岩的 A/CNK 值为 0.93~0.96, 为弱过碱性; 晶洞碱长花岗岩的 A/CNK 值为 1.00~1.02, 为弱过铝质(图 6c). 它们都具低的  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  (1.78%~2.23%),  $\text{CaO}$  (0.16%~0.37%),  $\text{MnO}$  (0.05%~0.08%),  $\text{MgO}$  (0.06%~0.09%),  $\text{TiO}_2$  (0.14%~0.16%) 及  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量(0.01%), 及高的  $\text{Fe}^*$  值( $\text{Fe}^* = \text{FeO}^{\text{tot}} / (\text{FeO}^{\text{tot}} +$

$\text{MgO}) = 0.96 \sim 0.97$ ). 按照 Frost *et al.* (2001) 的分类(图 7a 和 7b), 属铁质和碱钙性岩石, 且落在由全球 486 个典型 A 型花岗岩圈定的范围内. 在稀土元素球粒陨石标准化分配模式图中(图 8c), 这些碱长花岗岩表现轻稀土元素富集, 重稀土元素相对亏损( $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 7.72 \sim 10.53$ ), 具强烈的负 Eu 异常( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.01 \sim 0.03$ ). 在原始地幔微量元素标准化蛛网图中(图 8d), 显示某些 LILEs(如 Rb、Th 和 U)、LREEs(如 La、Ce、Nd 和 Sm)、及 Zr 和 Hf 的富集, 元素 Ba、Sr、P、Ti 强烈亏损, 部分 HFSEs(Nb 和 Ta)弱负异常的特点.

**5.2.3 石英正长斑岩和花岗斑岩** 同样具有高硅、富碱的特征( $\text{SiO}_2 = 73.5\% \sim 76.1\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.35\% \sim 9.19\%$ ). 在 TAS 分类图中集中于花岗岩区域、亚碱性系列(图 6a). 岩石的  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 3.75%~6.12%, 主要属高钾钙碱性系, 仅有两个花岗斑岩属钾玄岩系(图 6b). 它们的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 11.6%~13.7%, A/CNK 值介于 0.97~1.05 之

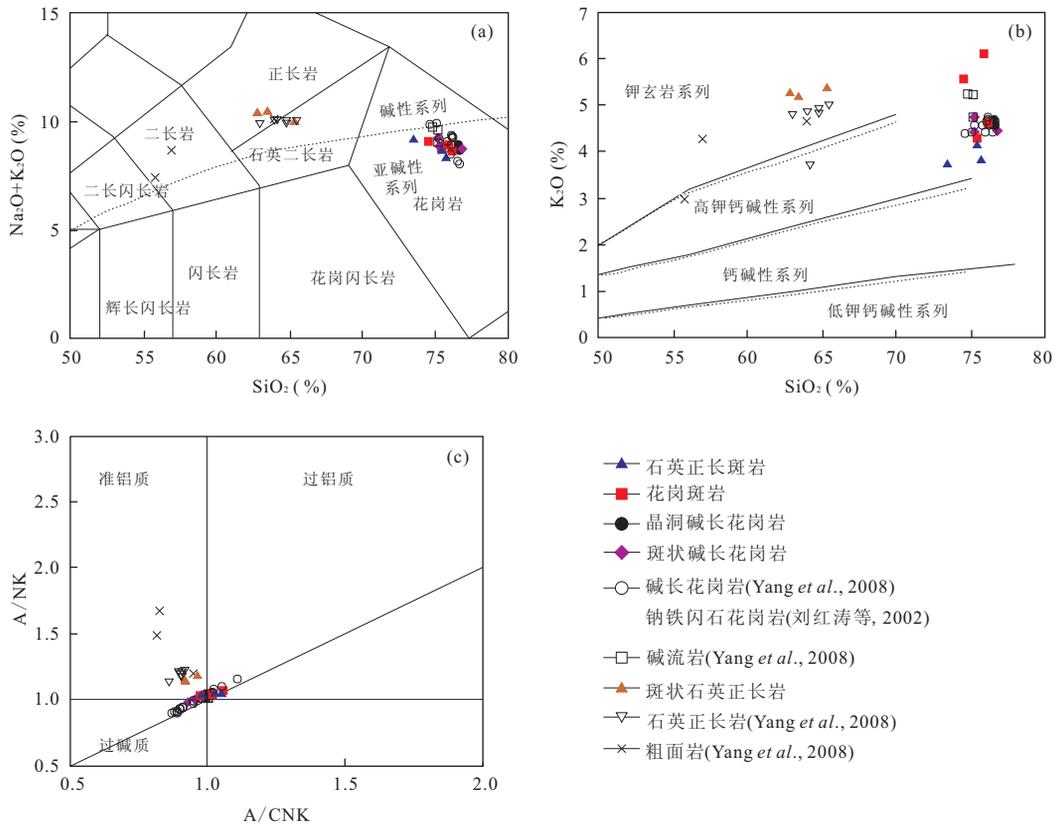


图 6 后石湖山岩石的地球化学分类

Fig. 6 Geochemical classification diagrams of rocks from the HRC

a. 在全碱—硅(TAS)图( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )(%)— $\text{SiO}_2$ (%)中岩石的命名(Middlemost, 1994), 图中碱性及亚碱性系的分界线(虚线)据 Miyashiro (1978). b.  $\text{K}_2\text{O}$ (%)— $\text{SiO}_2$ (%)图, 分界线据 Peccerillo and Taylor(1976). c. A/NK—A/CNK 图(Maniar and Piccoli, 1989), 反映铝饱和程度.  $\text{A}=\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{N}=\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}=\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{C}=\text{CaO}$ (摩尔数). 数据来源: 碱长花岗岩、碱流岩、石英正长岩和粗面岩据 Yang *et al.* (2008); 钠铁闪石花岗岩据刘红涛等(2002)

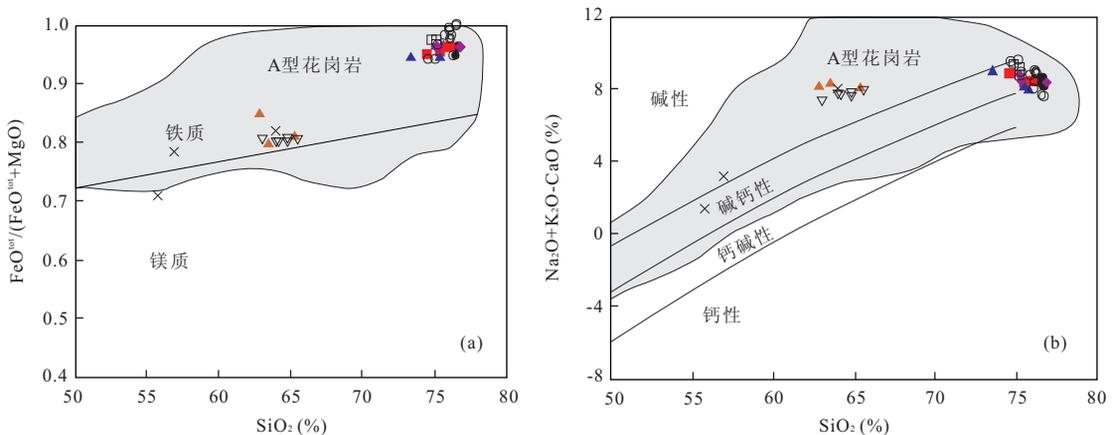


图 7 (a)  $\text{FeO}^{\text{tot}}/(\text{FeO}^{\text{tot}}+\text{MgO})$ — $\text{SiO}_2$ (%); (b)  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}$ (%)— $\text{SiO}_2$ (%) 分类图解(据 Frost *et al.*, 2001)

Fig. 7 (a) and (b)— $\text{Fe}^*$  ( $\text{FeO}^{\text{tot}}/(\text{FeO}^{\text{tot}}+\text{MgO})$ ) and modified alkali-lime index (MALI= $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}$ (%)) of rocks from the HRC plotted against %  $\text{SiO}_2$

图中样品代号同图 6; 全世界 486 个典型 A 型花岗岩成分点圈定的范围用阴影区表示

间, 为准铝质—弱过铝质(图 6c). 在 Frost *et al.* (2001) 分类图中(图 7a 和 7b), 属铁质及钙碱性—

碱钙性岩石, 同样落在由全球 486 个典型 A 型花岗岩圈定的范围内. 这些岩石也具有低的 CaO

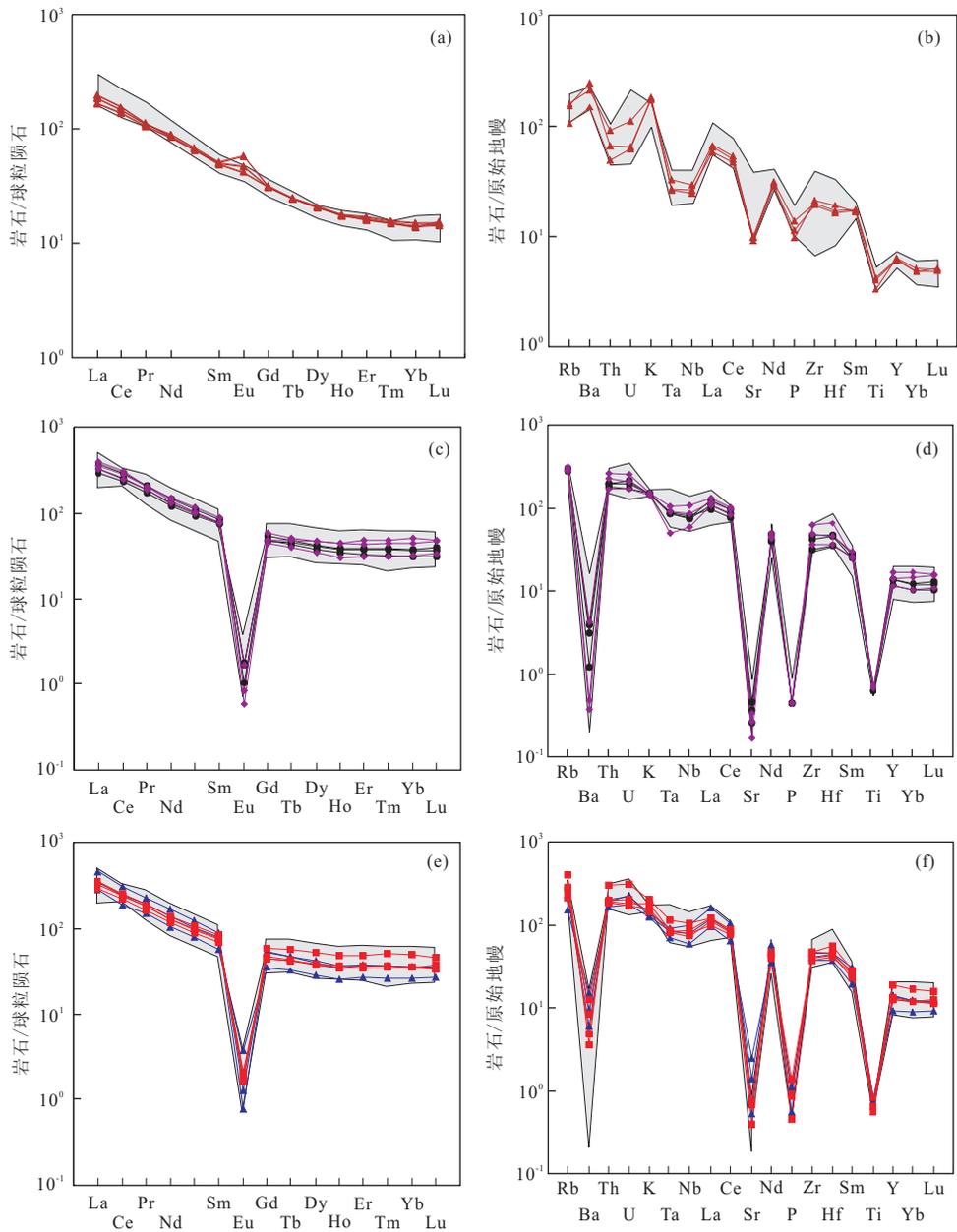


图 8 后石湖山岩石的稀土元素球粒陨石标准化分配图和微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 8 Chondrite-normalized REE distribution patterns and primitive mantle-normalized spidergrams

a, b. 斑状石英正长岩;c, d. 晶洞碱长花岗岩和斑状碱长花岗岩;e, f. 石英正长斑岩和花岗岩. a, b 中阴影区代表的石英正长岩和粗面岩, c~f 中阴影区代表碱长花岗岩和碱流岩的成分. 球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989), 样品代号同图 6, 数据来源据 Yang *et al.* (2008)

(0.04%~0.38%)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.36%~2.18%)、FeO (0.33%~0.76%)、MnO(0.01%~0.11%)、MgO (0.08%~0.12%)、TiO<sub>2</sub> (0.12%~0.18%) 及 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量(0.01%~0.03%). 它们的 FeO<sup>tot</sup>/MgO 比值介于 17.94~29.02 之间, 平均为 22.57, 明显高于 I 型(991 个样品, 平均值为 2.27)、S 型(578 个样品, 平均值为 2.38)和 M 型花岗岩(17 个样品, 平均值为 2.37)的 FeO<sup>tot</sup>/MgO 平均值 (Whalen

*et al.*, 1987).

从稀土元素球粒陨石标准化分配模式图(图 8e)来看, 石英正长斑岩、花岗斑岩的轻重稀土分馏中等, 轻稀土元素富集, 重稀土元素相对亏损((La/Yb)<sub>N</sub>=7.08~12.76); 具强烈的负 Eu 异常(Eu/Eu\* =0.01~0.08). 它们的原始地幔微量元素标准化蛛网图(图 8f)也都呈现某些 LILEs(如 Rb、Th 和 U)、LREEs(如 La、Ce、Nd 和 Sm)、及 Zr 和 Hf 的富

集,而元素 Ba、Sr、P、Ti 强烈亏损,部分 HFSEs(Nb 和 Ta)弱负异常的特点。

### 5.3 Sr-Nd 同位素特征

表 3 中所有岩石的初始 Sr 和 Nd 同位素比值经由结晶年龄  $t=120$  Ma 推算而得。石英正长斑岩、花岗斑岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值变化都很大,分别为  $0.699\ 9\sim 0.733\ 5$  和  $0.690\ 4\sim 0.735\ 9$ ,斑状碱长花岗岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值为  $0.679\ 7$ 。据年龄推算而得的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  异常值 ( $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i < 0.702$  或  $> 0.715$ ) 可能与样品极高的  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  比值有关。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值只是作为参考,而不用用于岩石成因的讨论(Wu *et al.*, 2002; Jahn, 2004; Jahn *et al.*, 2009)。

石英正长斑岩和花岗斑岩具有较富集的 Nd 同位素组成,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值分别介于  $-13.9\sim -12.8$  和  $-12.7\sim -12.2$  之间,斑状碱长花岗岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-12.5$ 。

## 6 讨论

### 6.1 后石湖山环状杂岩体的厘定

环状杂岩体一般表示包含环状岩墙和/或锥状岩席的侵入杂岩体(Johnson *et al.*, 2002)。环状岩墙通常发育于次火山层位,是岩浆沿着陡立而外倾的环状断层或裂隙上升侵位而形成的圆柱形席状侵入体,它与破火山口中心块体的垮塌有关(O'Driscoll *et al.*, 2006);锥状岩席常表现为同心、内倾的板状岩浆侵入体,它是中心火山以下的岩浆在上地壳中的运移通道(Tibaldi *et al.*, 2011)。根据前人对锥状岩席与环状岩墙的定义与系统描述(Johnson *et al.*, 2002; Walker, 2008),这两种侵入体的区别主要表现在它们的几何形态与成因上(如表 4)。

绝大多数研究者认为后石湖山杂岩体是与破火山口相关的环状杂岩体,其整体呈环状构造,包括空间形态上为圆—椭圆形较规则的地质体,不同岩石类型也呈环状分布,在卫片、航片上均显示出较明显的环形构造影像。此外,地质填图也发现了环状断裂的存在(图 1b)。据 Lipman(2000)的定义,“破火山口”是一个大致为圆形的、大规模的火山塌陷,其直径为包含的火山出口的数倍,通过顶板向下伏岩浆房的塌陷而形成。厘定破火山口最关键的证据主要包括两方面:一是火山岩组成上应为爆炸性喷发物的近火山口堆积;二是火山岩系边缘与外围先成基

岩之间的环状断层接触(Lipman, 2000)。本研究野外地质调查发现的杂岩体火山岩大量出露的火山爆炸性喷发产物集块岩、火山角砾岩和熔结凝灰岩等,表明它们为一套近火山口堆积的火山岩,并且火山岩与外围的新太古代秦皇岛花岗岩呈断层接触关系,断层产状陡立,平面上环绕杂岩体中心呈环状。这些都说明杂岩体火山岩组成了一个巨大的破火山口塌陷块体。塌陷同时的环状侵入体(环状岩墙)及随后的侵入相(中心岩株和锥状岩席)的侵入使塌陷块体复杂化。由于后期的隆升和侵蚀将破火山口周边火山沉积的大部分都剥蚀掉了,使得这些火山岩主要局限在后石湖山周边围绕杂岩体中心呈环状分布(图 1b)。

杂岩体的斑状石英正长岩平面上整体成环状侵入体沿着破火山口塌陷断裂分布,具陡立接触面的岩墙状产状(图 2b),厚度变化较大,其岩石类型为长英质的,不表现典型的淬火结构,这些特征与前人定义的环状岩墙相一致。中心岩株为稍早期的斑状碱长花岗岩和稍晚期的晶洞碱长花岗岩组成的嵌套复式岩株(图 1b)。正如美国南部加利福尼亚州及墨西哥 Baja California Norte 的半岛山脉岩基(PRB)中出现的某些环状杂岩体,它们的中心岩株也是嵌套的复式岩株(Johnson *et al.*, 2002)。侵入杂岩体火山岩、外环的斑状石英正长岩、中心的碱长花岗岩岩株或外围的秦皇岛花岗岩围岩中的石英正长斑岩和花岗斑岩岩墙厚度变化于  $0.1\sim 10.0$  m 之间,边部常发育冷凝边,野外地质调查中所测量的近 30 条石英正长斑岩和花岗斑岩岩墙的产状显示它们在平面上都呈弧形(图 1b),且朝着杂岩体中心向内倾,石英正长斑岩岩墙的倾角中—陡,而花岗斑岩岩墙倾角较陡。可见,石英正长斑岩、花岗斑岩岩墙群特征与锥状岩席的特征相吻合。因此,我们认为斑状石英正长岩侵入体是与破火山口塌陷有关的环状岩墙,而石英正长斑岩和花岗斑岩岩墙群则可能是与中心复式岩株上侵相关的锥状岩席。整个环状杂岩体组成于受环状断层控制的垮塌破火山口的火山岩以及不同侵入单元(斑状石英正长岩环状岩墙、中心嵌套的碱长花岗岩复式岩株、石英正长斑岩和花岗斑岩锥状岩席)(如图 1b 和图 9 所示),因而也构成一个典型的火山—侵入杂岩体。杂岩体的侵入岩石中出现的晶洞构造、花斑结构和熔蚀结构,锥状岩席边缘的冷凝边和流动构造等特征都可作为它们浅成—超浅成侵位条件的佐证。

表 4 锥状岩席与环状岩墙的对比

Table 4 Comparison between cone sheets and ring dyke

侵入体类型	几何形态				成因	成分
	倾角	走向	宽度	数目		
锥状岩席	内倾、缓一陡的	主要为环形或椭圆形	可变,多为厘米一米级,少见超过几十米的	数目多,往往组成席状岩墙群	过压岩浆房引起、主动侵入的岩墙侵入体	可为基性、中性或长英质的各种类型,通常表现淬冷结构
环状岩墙	外倾、垂直一陡的	环形、椭圆形、多边形或拱形	可变,为米一公里级	往往为单个侵入体	也可能被动地侵入环状断层	一般为长英质的,不表现典型的淬冷结构

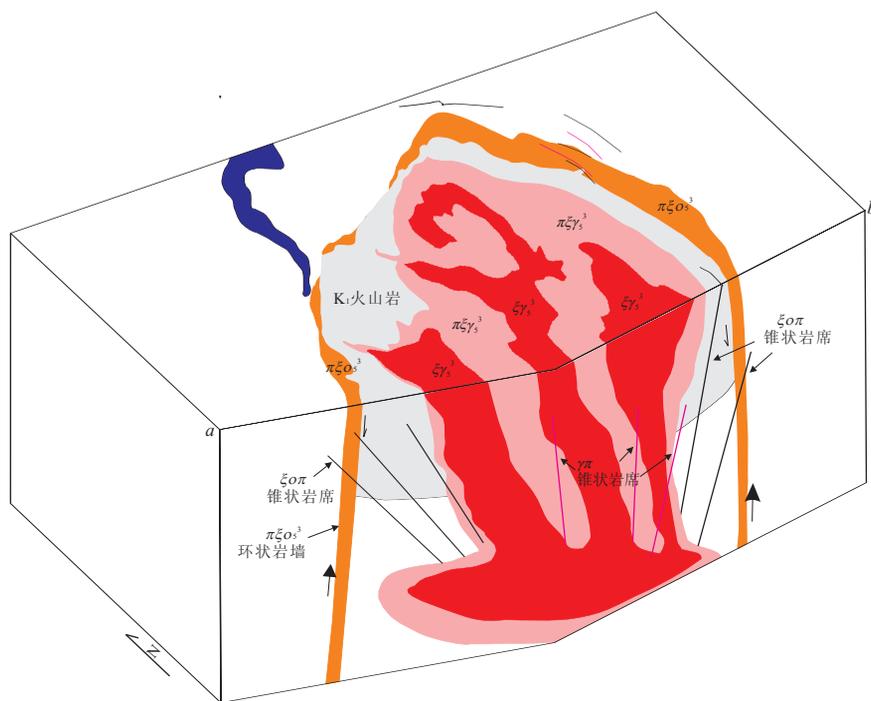


图 9 后石湖山环状杂岩体沿图 1b 中剖面线(ab)的柱状剖面示意

Fig. 9 Schematic block-diagram of the HRC. (ab) is the line (ab) shown in Fig. 1b

### 6.2 形成年代

关于后石湖山环状杂岩体的形成年代,前人已取得不少成果.许保良等(1999)利用全岩 K-Ar 定年法测得其碱长粗面岩和碱性流纹质熔结凝灰岩年龄分别为 125 Ma 和 117 Ma.近年来, Yang *et al.* (2008)对其中的石英正长岩、碱长花岗岩和碱流岩进行了 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年,获得了它们的结晶年龄分别为  $120 \pm 1$  Ma、 $118 \pm 1$  Ma 和  $120 \pm 1$  Ma.而本研究同样通过 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年获得斑状石英正长岩环状岩墙、石英正长斑岩和花岗斑岩锥状岩席的侵位年龄分别为  $119 \pm 3$  Ma、 $121 \pm 2$  Ma 和  $121 \pm 2$  Ma,与 Yang *et al.* (2008)报道的年龄在误差范围内保持一致.因此,结合前人的资料表明,后石湖山环状杂岩体形成于早白垩世时期(125~118 Ma),且其火山岩与侵入岩的形成年

龄相近,这也体现了该环状杂岩体作为火山—侵入杂岩体的特征.此外,通过野外穿插关系和侵入体冷凝边特征等的观察可得:石英正长斑岩锥状岩席晚于斑状石英正长岩环状岩墙,也晚于中心的斑状碱长花岗岩岩株,花岗斑岩锥状岩席晚于中心碱长花岗岩复式岩株,而中心复式岩株的晶洞碱长花岗岩单元稍晚于斑状碱长花岗岩单元.

值得注意的是:在整个华北克拉通东部广泛发育着一期早白垩世 A 型花岗岩及相伴生的碱性岩.除后石湖山 A 型花岗岩和碱性正长岩(本研究; Yang *et al.*, 2008)之外,还包括燕山造山带其他的碱性岩,如:雾灵山正长岩( $129 \pm 1$  Ma, LA-ICPMS 锆石 U-Pb; Yang *et al.*, 2008)、响山( $117 \pm 1$  Ma, LA-ICPMS 锆石 U-Pb; Yang *et al.*, 2008)、千层背( $129 \pm 1$  Ma, LA-ICPMS 锆石 U-Pb, Yang *et al.*,

2008)、窟窿山( $127 \pm 1$  Ma, LA-ICPMS 锆石 U-Pb; 孙金凤和杨进辉, 2009)、甲山( $113 \pm 2$  Ma, 锆石 U-Pb; Davis *et al.*, 2001)、邓孔子( $140 \pm 2$  Ma, SHRIMP 锆石 U-Pb; Niu *et al.*, 2011)、白查( $127.03 \pm 0.69$  Ma, SHRIMP 锆石 U-Pb; Deng *et al.*, 2004)、黑熊山( $123.7 \pm 1.1$  Ma, SHRIMP 锆石 U-Pb; Su *et al.*, 2007)等 A 型花岗岩体; 辽东半岛的千山( $126 \pm 1$  Ma, LA-ICPMS 锆石 U-Pb; Wu *et al.*, 2005)、四平街( $130.0 \pm 0.9$  Ma, 单颗粒锆石 U-Pb; Wu *et al.*, 2005)、凤凰山 A 型花岗岩( $130 \pm 2$  Ma, 单颗粒锆石 U-Pb; Wu *et al.*, 2005); 胶东地区的崂山 A 型花岗岩体( $115 \pm 2$  Ma, SHRIMP 锆石 U-Pb; Gross *et al.*, 2010); 太行山的洪山正长岩( $132 \pm 2$  Ma, SHRIMP 锆石 U-Pb; Chen *et al.*, 2008)等。近几年详细的锆石 U-Pb 年代学资料表明, 华北东部中生代 A 型花岗岩的主要形成时代为早白垩世( $130 \sim 110$  Ma)时期。

### 6.3 岩石成因

**6.3.1 斑状石英正长岩** 斑状石英正长岩与 Yang *et al.* (2008) 报道的石英正长岩地球化学特征基本吻合, 明显区别于碱长花岗岩及石英正长斑岩、花岗斑岩的地球化学特征。石英正长岩与研究区下地壳麻粒岩和片麻岩及同时代源自下地壳岩石部分熔融的钙碱性花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成特征相似, 且这些石英正长岩具有古老的 Nd 亏损地幔模式年龄和 Hf 亏损地幔模式年龄、平均地壳模式年龄, 暗示石英正长岩岩浆的物源有古老下地壳物质的参与 (Yang *et al.*, 2008)。研究区的下地壳主要组成于中基性麻粒岩和片麻岩 (Gao *et al.*, 1998; Liu *et al.*, 2001)。这些岩石在高压条件下熔融将产生单斜辉石和石榴石的残留, 从而导致部分熔体富硅、亏损 HREE 和 Eu, 使之成花岗岩而非正长岩 (Litvinovsky *et al.*, 2000), 可见石英正长岩岩浆的物源不完全是古老下地壳。Yang *et al.* (2008) 通过石英正长岩中岩浆锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  ( $-19.5 \sim -11.1$ ) 值的明显变化, 结合其地球化学特征, 并与幔源碱性玄武岩及下地壳麻粒岩、片麻岩的特征进行对比, 提出石英正长岩岩浆起源于下地壳岩石的部分熔融产生的熔体, 并与富集地幔源的玄武质岩浆发生了混合作用。

(斑状) 石英正长岩的 MgO、CaO 和 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 随 SiO<sub>2</sub> 含量的增加而减少反映岩浆可能经历了单斜辉石和/或斜长石的分离结晶作用。在石英正长岩的 V-Cr (图 10a) 和 Ni-Cr 的变异图 (图略) 中

也可见单斜辉石的分离结晶趋势。但斑状石英正长岩不具 Eu 的负异常 (图 8a), 可能排除长石的强烈分离结晶作用。石英正长岩的 Dy/Yb 随 SiO<sub>2</sub> 含量增加而基本不变, 且在稀土元素球粒陨石标准化配分图中未出现中稀土相对重稀土元素的亏损, 可见角闪石的分离结晶作用不明显 (如 Davidson and Turner, 2007)。结合 Yang *et al.* (2008) 的研究, 斑状石英正长岩是下地壳中一基性麻粒岩和片麻岩部分熔融产生的熔体与幔源玄武质岩浆混合, 后又发生单斜辉石分离结晶的产物。

**6.3.2 碱长花岗岩** 中心岩株的晶洞碱长花岗岩和斑状碱长花岗岩富碱 (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)、高 FeO<sup>tot</sup>/MgO、Ga/Al、Zr 与稀土元素含量 (Eu 除外), 低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、Ba、Sr 和 Eu 含量, 显示了它们的 A 型花岗岩特征 (Loiselle and Wones, 1979; Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Bonin, 2007)。按照 Whalen *et al.* (1987) 的分类 (图略), 均落在 A 型花岗岩区域。并且在碱长花岗岩中可见钠铁闪石的存在, 这反映其过碱性本质。因此, 这些碱长花岗岩属于过碱质 A 型花岗岩 (King *et al.*, 1997)。

前述元素和 Sr-Nd 同位素分析 (表 2, 表 3) 表明, 这些碱长花岗岩与前人研究的该环状杂岩体的碱长花岗岩和碱流岩 (Yang *et al.*, 2008) 的特征完全一致, 暗示它们具有相同的岩浆源区和成岩过程。据 Yang *et al.* (2008) 指出, 该环状杂岩体的碱长花岗岩来源于浅部地壳钙碱性花岗岩类的部分熔融产生的熔体与富集岩石圈地幔源的碱性玄武质岩浆混合, 随后经历了长石的分离结晶作用而成。

**6.3.3 石英正长斑岩和花岗斑岩** 石英正长斑岩和花岗斑岩同样具有富碱 (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)、高 FeO<sup>tot</sup>/MgO、Ga/Al、Zr 与 REE 含量 (Eu 除外), 以及低的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、Ba、Sr 和 Eu 含量等特征。它们的  $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  值为  $3.16 \sim 3.99$ , 平均值为  $3.61$ , 与全球 A 型花岗岩的  $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  平均值 ( $3.75$ ; Whalen *et al.*, 1987) 非常接近。在 Whalen *et al.* (1987) 的 A 型花岗岩判别图解中 (图略), 也都落在 A 型花岗岩区域。此外, 石英正长斑岩和花岗斑岩中可见自形石英, 但没有碱性矿物的存在。按照 King *et al.* (1997) 的分类, 石英正长斑岩和花岗斑岩可归为铝质 A 型花岗岩类。它们的 Zr 含量为  $429 \times 10^{-6} \sim 537 \times 10^{-6}$ , 通过锆饱和温度计 (TZr, Watson and Harrison, 1983) 的计算表明其源区初始岩浆温度为  $880 \sim 901$  °C, 平均为  $888$  °C,

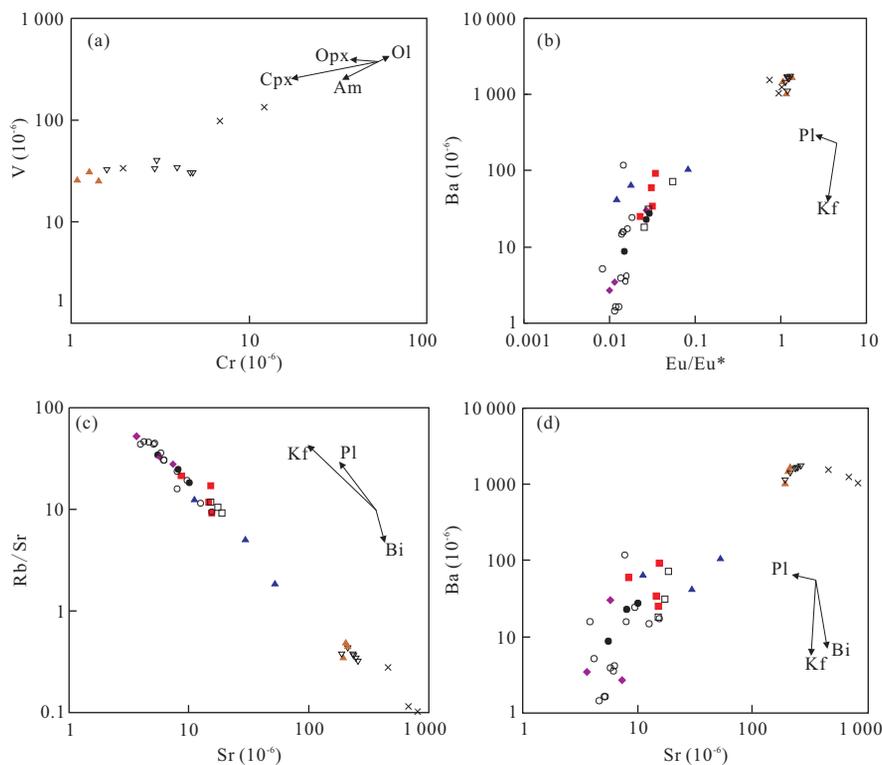


图 10 (a) V-Cr; (b) Ba-Eu/Eu\* ; (c) Rb/Sr-Sr 以及 (d) Ba-Sr 的变异图, 表明了矿物的分离结晶趋势

Fig. 10 (a) V vs. Cr, (b) Ba vs. Eu/Eu\* , (c) Rb/Sr-Sr and (d) Ba vs. Sr diagrams showing crystal fractionation trends of the rocks from the HRC

图中样品代号同图 6. 矿物缩写为: 橄榄石(Ol)、斜方辉石(Opx)、单斜辉石(Cpx)、角闪石(Am)、黑云母(Bi)、斜长石(Pl)和钾长石(Kf)

明显高于 I 型花岗质熔体的温度(通常低于 800 °C; King *et al.*, 1997; Jiang *et al.*, 2009). Clemens *et al.* (1986) 的实验学研究表明, A 型花岗质熔体的温度至少为 830 °C, 也可超过 900 °C. 可见, 这些斑岩的高初始岩浆温度也进一步体现了它们的 A 型花岗岩属性 (King *et al.*, 1997; Patiño Douce, 1997).

自 Loiselle and Wones(1979)首次提出 A 型花岗岩的定义以来, 关于它的岩石成因至今一直存在着许多争议. 许多研究者先后提出了多种成因模式, 主要包括: 幔源碱性玄武质岩浆的强烈分离结晶(如 Beyth *et al.*, 1994; Mushkin *et al.*, 2003; Namur *et al.*, 2011); 浅部地壳(深度不超过 15 km)长英质岩石的脱水部分熔融而形成, 多属铝质 A 型花岗岩(如 Skjerlie and Johnston, 1992; Patiño Douce, 1997; Du *et al.*, 2013); 壳、幔不同来源岩浆的混合、分离结晶作用的产物(如 Kerr and Fryer, 1993; Yang *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2012); 受幔源玄武质岩浆底侵的下地壳镁铁质岩石的部分熔融作用而形成(如 Wang *et al.*, 2010; Niu *et al.*, 2011; Lei *et al.*, 2013).

近年来对燕山造山带的地球化学研究已经证明: 自早侏罗世以来, 研究区基性岩浆源区呈现弱富集—富集的状态. 晚侏罗世—早白垩世起源于 EMI 型岩石圈地幔的基性岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值为  $-7.0 \sim -5.0$  (周新华等, 2001; Zhang *et al.*, 2003; 图 11). 区内同时期源于富集岩石圈地幔的 A 型花岗岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值主要介于  $-5.5 \sim -2.2$  之间 (Yang *et al.*, 2007). 而本研究的石英正长斑岩和花岗斑岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值 ( $-13.9 \sim -12.2$ ) 明显低于同期富集岩石圈地幔源的基性岩和 A 型花岗岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值, 暗示这些斑岩不可能由富集岩石圈地幔源的玄武质岩浆直接分离结晶而产生. 并且, 杂岩体内及周边均未见同时期大规模的基性岩浆活动, 这也可排除此成因模式的可能性.

前述锆石 U-Pb 年代学指示石英正长斑岩、花岗斑岩与碱长花岗岩和碱流岩的年龄相近; 元素地球化学分析也表明了这些斑岩与碱长花岗岩和碱流岩的特征非常相似, 并且斑岩具有明显富集的 Nd 同位素特征, 它们与燕山造山带碱性杂岩体(包括后石湖山、响山和千层背)的碱长花岗岩和碱流岩 (Yang *et al.*, 2008) 及薛家石梁岩浆杂岩体的黑熊

山碱长花岗岩(王焰和张旗 2001; Su *et al.*, 2007) 的 Nd 同位素组成非常相似,暗示这些斑岩与碱长花岗岩和碱流岩可能具有相同的岩浆源区。只是它们的 Nd 同位素成分区别于下地壳及区内来源于下地壳部分熔融的 A 型花岗岩的 Nd 同位素组成。前人研究已指出后石湖山、响山和千层背碱性杂岩体的碱长花岗岩和碱流岩是由上地壳的钙碱性花岗岩类部分熔融,混合富集岩石圈地幔源的玄武质岩浆,并经历了长石的分离结晶作用而产生的,它们具有富集的 Sr、Nd 同位素组成,其全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素值都有明显的变化(Yang *et al.*, 2008);薛家石梁杂岩体的黑熊山碱长花岗岩也具有富集的 Nd 同位素组成和异常高的初始 Sr 同位素,源于上地壳物质的部分熔融产生的熔体,并经历强烈的结晶分异作用而成(王焰和张旗 2001; Su *et al.*, 2007)。

实验岩石学资料表明,长英质岩石的脱水熔融能产生铁质 A 型花岗岩,浅部英云闪长质和花岗闪长质岩石的高度熔融能产生高硅的碱钙性铁质花岗岩,并且只有在压力较低的条件(<4 kbar)才能产生准铝质—弱过铝质熔体,高压条件下只能产生强过铝质熔体(Skjerlie and Johnston, 1993; Patiño Douce, 1997; Bogaerts *et al.*, 2006)。后石湖山杂岩体的斑岩为准铝质—弱过铝质的碱钙性铁质 A 型花岗岩,与起源于深部高压环境长英质岩石部分熔融产生的熔体成分显著不同。与起源于下地壳的钙碱性花岗岩相比,后石湖山杂岩体的斑岩具有低 Al、Ca 的含量,高  $\text{FeO}^{\text{tot}}/\text{MgO}$ 、 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Ga/Al 比值,富集高场强元素 Zr、Nb 和 Y,亏损 Sr 和 Eu,与实验岩石学证明的长英质岩石在低压条件脱水熔融产生的熔体特征一致(Skjerlie and Johnston, 1993; Patiño Douce 1997)。斑岩都具有高 Rb 的含量,可能继承了源岩的特征,这种源岩最可能为高演化的上地壳钙碱性花岗岩类。而且,华北的下地壳组成是亏损 Th、U 的,其部分熔融的熔体也应相对亏损 Th、U,而后石湖山杂岩体的这些斑岩 Th、U 富集,也可反映它们不是下地壳岩石部分熔融产生的熔体。因此,后石湖山杂岩体的斑岩岩浆源于含角闪石或黑云母等含水矿物的长英质岩石在浅部地壳的脱水熔融。只是在浅部地壳长英质岩石脱水熔融形成 A 型花岗岩达到的高熔融温度条件(通常 >900 °C),需要高温镁铁质岩浆的参与(Patiño Douce, 1997),主要通过热传递或镁铁质岩浆与地壳岩石之间的化学反应两种途径来实现。

可见,石英正长斑岩和花岗斑岩的高初始岩浆温度(880~901 °C)要求上地壳长英质岩石的脱水熔融有幔源镁铁质岩浆的底侵加热或者镁铁质岩浆与上地壳岩石的熔体发生反应。由于石英正长斑岩和花岗斑岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化幅度小(-13.9~12.2),不符合于发生混合作用的两个端元应具有明显不同的同位素成分的要求。并且,在这些斑岩的锥状岩席中未发现暗色包体的存在,暗示这些斑岩的成岩过程中无明显的幔源岩浆加入。同时,这些斑岩的相对均一的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值也排除了地壳混染作用的重要影响。

在 A 型花岗质岩浆的演化中,长石的分离结晶起到重要的作用(Vallinayagam and Kochhar, 2011)。石英正长斑岩和花岗斑岩 CaO 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量随  $\text{SiO}_2$  含量的略微增加而略有降低,且它们都具有显著的 Ba、Sr 和 Eu 的负异常,暗示了在它们的母岩浆形成后经历了长石的分离结晶作用,这在 Ba-Eu/Eu\*、Rb/Sr-Sr 及 Ba-Sr 的投图(图 10b~10d)中出现了长石的分离结晶趋势也得到进一步证实。

综上所述,我们认为后石湖山石英正长斑岩和花岗斑岩可能源于上地壳长英质岩石的部分熔融,幔源岩浆为其提供了热源,但受幔源岩浆的混合作用不明显。在母岩浆形成后经历了长石的分离结晶作用。

结合前人的研究表明,后石湖山环状杂岩体的碱长粗面岩与斑状石英正长岩具有一致的成岩物质来源,碱流岩与碱长花岗岩也有相同的成岩物质来源(Yang *et al.*, 2008)。石英正长斑岩和花岗斑岩的岩浆源区也与碱长花岗岩和碱流岩相近,只是幔源岩浆的加入不明显。因此,后石湖山环状杂岩体的火山岩与所有相应的侵入岩都具有相近的物质源区,这进一步体现了该环状杂岩体作为火山—侵入杂岩体的标志性特征。

#### 6.4 后石湖山环状杂岩体的形成过程

基于以上不同单元的岩石成因讨论,并结合它们的野外地质与岩相学特征,我们对后石湖山环状杂岩体的形成过程给出解释。

早白垩世时期(~120 Ma),研究区发生火山爆炸性喷发(图 12a),形成了大量的碱长粗面岩、碱流岩及相应成分的火山碎屑岩(集块岩、火山角砾岩和熔结凝灰岩等),在后石湖山周边围绕环状杂岩体中心呈环形分布。岩浆喷发之后,地下岩浆房空虚导致压力下降,其顶板围岩沿火山口周围近直立的环状断裂垮塌,形成塌陷的破火山口。与此同时,下覆岩

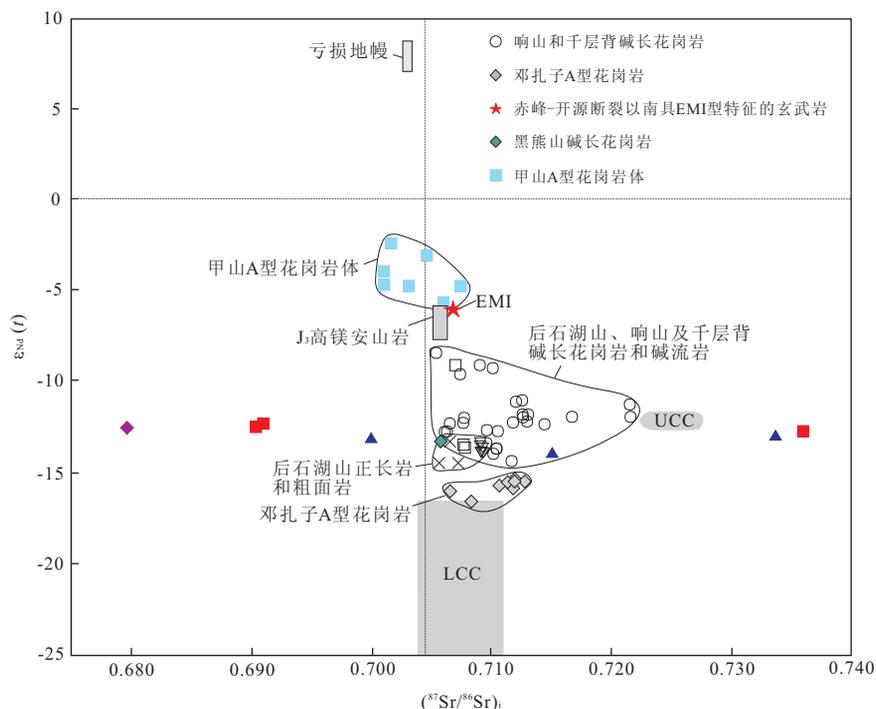


图 11 后石湖山环状杂岩体岩石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 投图,并与燕山造山带其他 A 型花岗岩对比

Fig. 11  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs.  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  diagram for rocks from the HRC and other alkaline rocks including A-type granites from Yanshan orogenic belt

数据来源:后石湖山、响山及千层背碱长花岗岩和碱流岩据 Yang *et al.* (2008);后石湖山正长岩和粗面岩据 Yang *et al.* (2008);黑熊山碱长花岗岩据王焰和张旗(2001);邓孔子 A 型花岗岩据 Niu *et al.* (2011);甲山 A 型花岗岩体据 Yang *et al.* (2007);华北克拉通北缘赤峰—开源断裂以南的南区具有明显 EMI 型特征的玄武岩据周新华等(2001);主要来源于 EMI 型地幔的晚侏罗世高镁安山岩据 Zhang *et al.* (2003). 亏损地幔据 Zindler *et al.* (1984);上地壳(UCC)、下地壳(LCC)据 Jahn *et al.* (1999).  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均由  $t=120$  Ma 推算而得. 除图中已标注样品代号外,其他的均同图 6

浆房的石英正长岩岩浆被动挤入环状断裂而形成斑状石英正长岩环状岩墙(图 12b).

环状岩墙侵位之后,由于浅部地壳的长英质岩浆房过压,促使其过碱质 A 型花岗质高温岩浆上升侵位形成了环状杂岩体中心的斑状碱长花岗岩岩株(图 12c). 中心岩株的侵位可能也与破火山口垮塌引起的静岩压力下降有关. 这些超压和过热的过碱质 A 型花岗质岩浆的上涌导致其上覆围岩产生倾角中—陡的、内倾的锥状裂隙,为石英正长斑岩锥状岩席侵位提供空间(图 12c);之后,浅部岩浆房复活,高温过碱质 A 型花岗质岩浆再度上升侵位形成同源被嵌套的晶洞碱长花岗岩岩株,与斑状碱长花岗岩构成了复式岩株(图 12d),与美国南部加利福尼亚州及墨西哥 Baja California Norte 的半岛山脉岩基(PRB)中出现的某些环状杂岩体的中心嵌套复式岩株相似(Johnson *et al.*, 2002). 同样,由于这些过碱质 A 型花岗岩浆的再度上侵导致其上覆围岩产生了倾角较陡而内倾的锥状裂隙,为花岗斑岩锥状岩席提供了侵位空间(图 12d). 石英正长斑岩和

花岗斑岩锥状岩席都分布于中心复式岩株之中,并切割环状岩墙、垮塌破火山口的火山岩和外围的新太古代花岗岩(图 12d,图 9). 当后期强烈侵蚀使得中心岩株主体暴露地表时,大部分锥状岩席也将剥蚀掉,而使得锥状岩席不易被识别出来,这也可能是前人未发现也没有意识到它们存在的原因.

由于环状杂岩体的斑状石英正长岩与所有 A 型花岗质岩石的地球化学特征都明显不同,它们具有不同的岩浆来源与成岩过程,我们推测后石湖山环状杂岩体的形成可能与花岗质和正长岩质的双岩浆房演化有关.

## 6.5 构造意义

后石湖山环状杂岩体形成于早白垩世(约 125~118 Ma),是主要组成于斑状石英正长岩、A 型花岗岩和相应成分的火山岩(碱长粗面岩和碱流岩、碱性流纹质熔结凝灰岩等)的碱性火山—侵入杂岩体. 前文也已提到,燕山造山带早白垩世时期的 A 型花岗岩体或相伴生的碱性岩还有雾灵山正长岩,以及响山、千层背、窟窿山、甲山、邓孔子、白查、黑熊山等 A

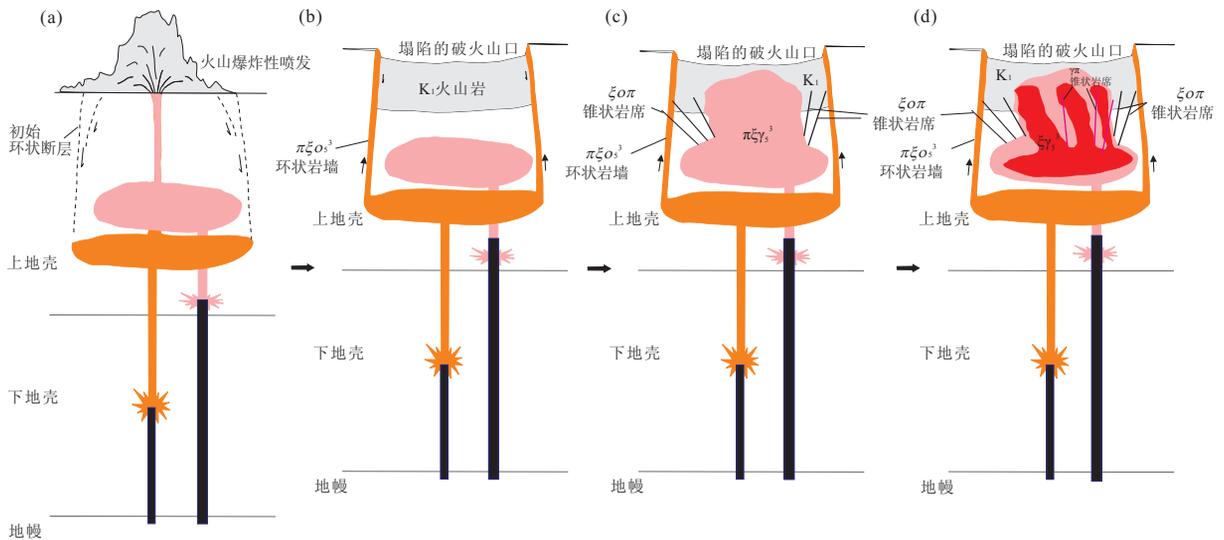


图 12 后石湖山环状杂岩体的形成模式

Fig. 12 Sketch of the intrusive and eruptive evolution of the HRC

a. 火山爆炸性喷发; b. 破火山口塌陷及斑状石英正长岩环状岩墙的侵入; c. 斑状碱长花岗岩岩株和石英正长斑岩锥状岩席的侵入; d. 晶洞碱长花岗岩岩株和花岗斑岩锥状岩席的侵入

型花岗岩体,它们与区内反映地壳伸展的双峰式岩墙群的侵入(邵济安等, 2001)、以及代表伸展构造的变质核杂岩(如 Davis *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2003; Darby *et al.*, 2004)和断陷盆地(如 Meng, 2003; Cope and Graham, 2007; Wei *et al.*, 2011)的形成都基本同时。后石湖山环状杂岩体主要受 NE 与 NW 向断层的控制,多数锥状岩席走向平行或近平行于 NE 或 NW 向断层方向(图 1b)。锥状岩席通常发育于张性断裂,与中心岩浆房上覆顶板围岩的抬升有关(Durrance, 1967; Phillips, 1974; Magee, 2011)。可见,锥状岩席也是地壳伸展的表现。Davis *et al.* (2001)指出,燕山造山带早白垩世时期发育的伸展构造(如拆离断层、断陷盆地等)的走向主要沿 NNE-NE 向,与后石湖山环状杂岩体中大多数锥状岩席的走向近于相同。因此,该环状杂岩体中锥状岩席的发育也可能与区域的伸展构造背景有关。所有这些地质证据都可反映燕山造山带在早白垩世时期处于伸展构造背景。

据近年来华北东部中生代岩浆活动、成矿作用、构造和盆地配置等研究发现,在整个华北克拉通东部(包括燕山造山带在内)都广泛发育一期早白垩世(约 130~110 Ma) A 型花岗岩及伴生的碱性岩,它们与 I 型花岗岩的形成时代(约 135~113 Ma, 峰期为 125 Ma; Wu *et al.*, 2005)及大规模的金成矿时代(~120 Ma; Yang *et al.*, 2003)基本相同。并且除燕山造山带以外,在辽东半岛(如 Davis *et al.*,

2001; Liu *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2007)和大别—苏鲁造山带(如 Zhang *et al.*, 1997; Charles *et al.*, 2011)等也都发现了一系列的变质核杂岩,它们的形成时间也主要集中在约 130~110 Ma,与同期的大规模岩浆活动同时。此外,华北东部都广泛发育一系列 NNE 向的早白垩世伸展盆地(如 Meng, 2003; 张岳桥等, 2008)。这些研究都表明,早白垩世的伸展不仅局限于华北北缘的燕山造山带,而且遍及整个华北东部,并且中生代的岩浆活动、成矿和构造等作用最为强烈的时期都集中于早白垩世(130~110 Ma),这指示了华北克拉通东部岩石圈减薄和克拉通破坏的峰期。

研究表明,华北东部乃至整个中国东部早白垩世时期的岩浆活动、构造变形和伸展盆地广泛发育,且都沿着大陆边缘垂直于该时期古太平洋板块的俯冲方向展布(如 Ren *et al.*, 2002; 李三忠等, 2004; Wu *et al.*, 2005),暗示古太平洋板块的俯冲可能是引起该区伸展和岩石圈减薄的首要动力学因素。Zhu *et al.* (2012)通过地壳变形运动与古太平洋板块俯冲方向的对应关系指出,华北克拉通东部早白垩世时期强烈的岩石圈减薄可能发生于古太平洋板块俯冲导致的弧后伸展环境。这一解释与 NNE 走向的太行山以西的华北克拉通西部没有发生岩石圈减薄的事实吻合(Xu, 2007)。此外,近年来有关地球物理方面的证据(如 Zhao *et al.*, 2007; An *et al.*, 2009; Zhao and Ohtani, 2009)也证明了古

太平洋板块向欧亚大陆板块边缘俯冲最远可至太行山之下。

因此,我们认为后石湖山环状杂岩体是华北东部早白垩世与克拉通破坏相关的伸展构造体制下的产物,它形成于古太平洋板块俯冲有关的弧后伸展环境。在早白垩世(125~118 Ma)时期,弧后伸展和软流圈物质上涌导致富集岩石圈地幔的部分熔融产生玄武质岩浆,玄武质岩浆上升侵位至地壳深度,为下地壳的中-基性麻粒岩和片麻岩的部分熔融提供热源,这些玄武质岩浆与下地壳源的熔体混合,并经历单斜辉石的分离结晶作用最终形成了该环状杂岩体的碱长粗面岩和斑状石英正长岩;同时,由于富集地幔源玄武质岩浆的底侵作用,促使上地壳长英质岩石加热而发生部分熔融产生熔体,并且与玄武质岩浆发生程度不等的岩浆混合,经历长石的分离结晶而最终形成了环状杂岩体的碱流岩和碱长花岗岩以及石英正长斑岩和花岗斑岩,只是在两种斑岩的成岩过程中幔源岩浆的加入较不明显。

## 7 结论

(1)后石湖山杂岩体是与破火山口有关的碱性火山-侵入环状杂岩体,主要由呈环形分布的碱性火山岩、斑状石英正长岩环状岩墙、中心嵌套的碱长花岗岩复式岩株,及石英正长斑岩和花岗斑岩锥状岩席组成。

(2)斑状石英正长岩、石英正长斑岩和花岗斑岩的结晶年龄分别为  $119 \pm 3$  Ma、 $121 \pm 2$  Ma 和  $121 \pm 2$  Ma,表明后石湖山环状杂岩体形成于早白垩世时期(~120 Ma),且其火山岩与侵入岩的形成年龄相近,为典型的侵入-火山杂岩体。

(3)斑状石英正长岩是下地壳中-基性麻粒岩和片麻岩的部分熔融产生的熔体与幔源的玄武质岩浆混合后又发生单斜辉石分离结晶的产物;碱长花岗岩起源于浅部地壳钙碱性花岗岩类的部分熔融产生的熔体,并与幔源的玄武质岩浆混合,伴随长石的分离结晶作用;石英正长斑岩和花岗斑岩为铝质 A 型花岗岩,主要源于受幔源岩浆底侵加热的上地壳长英质岩石部分熔融产生的熔体,并经历了长石的分离结晶作用。

(4)后石湖山环状杂岩体的形成过程包括:①火山爆炸性喷发形成大量的碱性粗面岩、碱流岩及相应成分的火山碎屑岩;②岩浆房空虚导致压力下降,其顶板围岩沿火山口周围近直立的环状断裂垮塌,

形成塌陷的破火山口,在此同时,下覆岩浆房的石英正长岩岩浆被动挤入环状断裂而形成环状岩墙;③浅部地壳的长英质岩浆房过压,促使其过碱质 A 型花岗质高温岩浆上升侵位形成了中心的斑状碱长花岗岩岩株,这些岩浆的上涌导致上覆围岩产生倾角中-陡的、内倾的锥状裂隙,为石英正长斑岩锥状岩席侵位提供了空间;④浅部岩浆房复活阶段,该阶段高温过碱质 A 型花岗质岩浆再度上升侵位形成同源被嵌套的晶洞碱长花岗岩岩株,与斑状碱长花岗岩构成复式岩株。岩浆的再度上侵导致上覆围岩产生了倾角较陡而内倾的锥状裂隙,提供了花岗斑岩锥状岩席的侵位空间。

(5)后石湖山碱性环状杂岩体的形成是华北东部早白垩世与克拉通破坏相关的伸展构造体制下的产物,这种构造体制可能与古太平洋板块的俯冲有关。

致谢:研究中得到郑建平、吴元保、廖群安等教授的指导与帮助;钟玉芳、汤华云副教授在野外工作中给予指导,王连训、李氏、刘彬、黄坚、蒋红安、王世明、吕昭英等研究生参与了野外地质和部分室内分析工作;本文在撰写过程中与宗克清博士和博士生马强、刘圆圆进行了有益的讨论;匿名审稿专家为本人提出了宝贵的修改意见。谨致衷心感谢!

## References

- An, M. J., Feng, M., Zhao, Y., 2009. Destruction of Lithosphere within the North China Craton Inferred from Surface Wave Tomography. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10(8): 1-18. doi: 10.1029/2009GC002562
- Beyth, M., Stern, R. J., Altherr, R., et al., 1994. The Late Precambrian Timna Igneous Complex Southern Israel, Evidence for Comagmatic-Type Sanukitoid Monzodiorite and Alkali Granite Magma. *Lithos*, 31(3-4): 103-124. doi: 10.1016/0024-4937(94)90003-5
- Bogaerts, M., Scaillet, B., Auwera, J. V., 2006. Phase Equilibria of the Lyngdal Granodiorite (Norway): Implications for the Origin of Metaluminous Ferroan Granitoids. *Journal of Petrology*, 47(12): 2405-2431. doi: 10.1093/petrology/egl049
- Bonin, B., 2007. A-Type Granites and Related Rocks: Evolution of a Concept, Problems and Prospects. *Lithos*, 97(1-2): 1-29. doi: 10.1016/j.lithos.2006.12.007
- Charles, N., Gumiaux, C., Augier, R., et al., 2011. Metamorphic Core Complexes vs. Synkinematic Plutons in Continental Extension Setting: Insights from Key Structures (Shandong Province, Eastern China). *Journal of*

- Asian Earth Sciences*, 40(1):261–278. doi:10. 1016/j. jseas. 2010. 07. 006
- Chen, B., Tian, W., Jahn, B. M., et al., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb Ages and In-Situ Hf Isotopic Analysis for the Mesozoic Intrusions in South Taihang, North China Craton: Evidence for Hybridization between Mantle-Derived Magmas and Crustal Components. *Lithos*, 102(1–2): 118–137. doi:10. 1016/j. lithos. 2007. 06. 012
- Clemens, J. D., Holloway, J. R., White, A. J. R., 1986. Origin of an A-Type Granite: Experimental Constraints. *American Mineralogist*, 71(3–4): 317–324.
- Collins, W. J., Beams, S. D., White, A. J. R., et al., 1982. Nature and Origin of A-Type Granites with Particular References to Southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189–200. doi: 10. 1007/BF00374895
- Cope, T. D., Graham, S. A., 2007. Upper Crustal Response to Mesozoic Tectonism in Western Liaoning, North China, and Implications for Lithospheric Delamination. In: Zhai, M. G., Windley, B. F., Kusky, T. M., et al., eds., Mesozoic Sub-Continental Lithospheric Thinning under Eastern Asia. Geological Society of London, Special Publication, 280: 201–222. doi:10. 1144/SP280. 10
- Darby, B. J., Davis, G. A., Zhang, X. H., et al., 2004. The Newly Discovered Waziyu Metamorphic Core Complex, Yiwulü Shan, Western Liaoning Province, Northwest China. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 11(3): 145–155.
- Davidson, J., Turner, S., 2007. Amphibole “Sponge” in Arc Crust? *Geology*, 35(9): 787–790. doi: 10. 1130/G23637A. 1
- Davis, G. A., Zheng, Y., Wang, C., et al., 2001. Mesozoic Tectonic Evolution of the Yanshan Fold and Thrust Belt, with Emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, Northern China. *Geological Society of America Memoir*, 194: 171–197. doi:10. 1130/0-8137-1194-0. 171
- Deng, J. F., Su, S. G., Zhao, G. C., et al., 2004. The Sequence of Magmatic-Tectonic Events and Orogenic Processes of the Yanshan Belt, North China. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 260–266. doi:10. 1111/j. 1755-6724. 2004. tb00698. x
- Du, L. L., Yang, C. H., Wang, W., et al., 2013. Paleoproterozoic Rifting of the North China Craton: Geochemical and Zircon Hf Isotopic Evidence from the 2 137 Ma Huangjinshan A-Type Granite Porphyry in the Wutai Area. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi:10. 1016/j. jseas. 2012. 11. 040
- Durrance, E. M., 1967. Photoelastic Stress Studies and Their Application to a Mechanical Analysis of the Tertiary Ring-Complex of Ardnamurchan, Argyllshire. *Proceedings of the Geological Association*, 78(2): 289–318. doi:10. 1016/S0016-7878(67)80012-9
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., et al., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048. doi: 10. 1093/petrology/42. 11. 2033
- Gao, S., Luo, T. C., Zhang, B. R., et al., 1998. Chemical Compositions of the Continental Crust Revealed by Studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(1): 1959–1975. doi:10. 1016/S0016-7037(98)00121-5
- Goss, S. C., Wilde, S. A., Wu, F. Y., et al., 2010. The Age, Isotopic Signature and Significance of the Youngest Mesozoic Granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton. *Lithos*, 120(3–4): 309–326. doi:10. 1016/j. lithos. 2010. 08. 019
- Jahn, B. M., 2004. The Central Asian Orogenic Belt and Growth of the Continental Crust in the Phanerozoic. *Geological Society of London, Special Publications*, 226: 73–100. doi:10. 1144/GSL. SP. 2004. 226. 01. 05
- Jahn, B. M., Litvinovsky, B. A., Zhanvilevich, A. N., et al., 2009. Peralkaline Granitoid Magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt: Evolution, Petrogenesis and Tectonic Significance. *Lithos*, 113(3–4): 521–539. doi.org/10. 1016/j. lithos. 2009. 06. 015
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Lo, C. H., et al., 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. *Chemical Geology*, 157(1–2): 119–146. doi.org/10. 1016/S0009-2541(98)00197-1
- Jiang, N., Zhang, S. Q., Zhou, W. G., et al., 2009. Origin of a Mesozoic Granite with A-Type Characteristics from the North China Craton: Highly Fractionated from I-Type Magmas? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(1): 113–130. doi 10. 1007/s00410-008-0373-2
- Johnson, S. E., Paterson, S. R., Tate, M. C., 1999. Structure and Emplacement History of a Multiple-Center, Cone-Sheet-Bearing Ring Complex: The Zarza Intrusive Complex, Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 111(4): 607–619. doi:10. 1130/0016-7606(1999)
- Johnson, S. E., Schmidt, K. L., Tate, M. C., 2002. Ring

- Complexes in the Peninsular Ranges Batholith, Mexico and the USA; Magma Plumbing Systems in the Middle and Upper Crust. *Lithos*, 61(3-4): 187-208. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00079-8
- Kerr, A., Fryer, B. J., 1993. Nd Isotope Evidence for Crust-Mantle Interaction in the Generation of A-Type Granitoid Suites in Labrador, Canada. *Chemical Geology*, 104(1-4): 39-60. doi: 10.1016/0009-2541(93)90141-5
- King, P. L., White, A. J. R., Chappell, B. W. et al., 1997. Characterization and Origin of Aluminous A-Type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371-391. doi: 10.1093/ptro/38.3.371
- Lei, R. X., Wu, C. Z., Chi, G. X., et al., 2013. The Neoproterozoic Hongliujing A-Type Granite in Central Tianshan (NW China): LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry, N-Hf Isotope and Tectonic Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jseas.2013.03.025
- Li, S. Z., Liu, J. Z., Zhao, G. C., et al., 2004. Key Geochronology of Mesozoic Deformation in the Eastern Block of the North China Craton and Its Constrains on Regional Tectonics: A Case of Jiaodong and Liaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 633-646 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. P., 2013. Magma Evolution of the Late Jurassic Volcanic Rocks and Its Genesis of the Lanqi Formation, Beipiao Area, Western Liaoning Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(1): 47-56 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Duan, R. C., Xie, X. J., et al., 2009. Contrasting Geochemistry of the Cretaceous Volcanic Suites in Shandong Province and Its Implications for the Mesozoic Lower Crust Delamination in the Eastern North China Craton. *Lithos*, 113(3-4): 640-658. doi: 10.1016/j.lithos.2009.07.001
- Lipman, P. W., 1984. The Roots of Ash-Flow Calderas in Western North America; Windows into the Tops of Granitic Batholiths. *J. Geophys. Res.*, 89: 8801-8841. doi: 10.1029/JB089iB10p08801
- Lipman, P. W., 1997. Subsidence of Ash-Flow Calderas: Relation to Caldera Size and Magma-Chamber Geometry. *Bulletin of Volcanology*, 59(3): 198-218. doi 10.1007/s004450050186
- Lipman, P. W., 2000. Calderas. In: Sigurdsson, H., Houghton, B. F., McNutt, S. R., et al., eds., *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, CA, 1417.
- Litvinovsky, B. A., Steel, I. M., Wickham, S. M., 2000. Silicic Magma Formation in Overthickened Crust; Melting of Charnockite and Leucogranite at 15, 20 and 25 kbar. *Journal of Petrology*, 41(5): 717-737.
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of  $\geq 3800$  Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4): 339-342. doi: 10.1130/0091-7613(1992)
- Liu, H. T., Sun, S. H., Zhai, M. G., 2002. The Mesozoic High-Sr Granitoids in the Northern Marginal Region of North China Craton; Geochemistry and Source Region. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 257-274 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Davis, G. A., Lin, Z. Y., et al., 2005. The Liaonan Metamorphic Core Complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A Likely Contributor to Cretaceous Rotation of Eastern Liaoning, Korea and Contiguous Areas. *Tectonophysics*, 407(1-2): 65-80. doi: 10.1016/j.tecto.2005.07.001
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen; U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571. doi: 10.1093/ptrology/egp082
- Liu, Y. S., Gao, S., Jin, S. Y., et al., 2001. Geochemistry of Lower Crustal Xenoliths from Neogene Hannuoba Basalt, North China Craton; Implications for Petrogenesis and Lower Crustal Composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(15): 2589-2604. doi: 10.1016/S0016-7037(01)00609-3
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole; Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1-2): 133-153. doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.10.016
- Loiselle, M. C., Wones, D., 1979. Characteristics and Origin of Anorogenic Granites. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 11(7): 468.
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, USA.
- Ma, Q., Zheng, J., Griffin, W. L., et al., 2012. Triassic "Adakitic" Rocks in an Extensional Setting (North China): Melts from the Cratonic Lower Crust. *Lithos*, 149(15): 159-173. doi: 10.1016/j.lithos.2012.04.017
- Magée, C., 2011. Emplacement of Sub-Volcanic Cone Sheet

- Intrusions, PhD Thesis, The University of Birmingham, England.
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America*, 101(5): 635–643. doi:10.1130/0016-7606(1989)
- Meng, Q. R., 2003. What Drove Late Mesozoic Extension of the Northern China-Mongolia Tract? *Tectonophysics*, 369(3–4): 155–174. doi:10.1016/S0040-1951(03)00195-1
- Meng, Q. R., Zhang, G. W., 2000. Geologic Framework and Tectonic Evolution of the Qinling Orogen, Central China. *Tectonophysics*, 323(3–4): 183–196. doi:10.1016/S0040-1951(00)00106-2
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth Science Review*, 37(3–4): 215–224. doi:10.1016/0012-8252(94)90029-9
- Miyashiro, A., 1978. Nature of Alkalic Volcanic Rock Series. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66(1): 91–104. doi:10.1007/BF00376089
- Mushkin, A., Navon, O., Halicz, L., et al., 2003. The Petrogenesis of A-Type Magmas from the Amram Massif, Southern Israel. *Journal of Petrology*, 44(5): 815–832. doi:10.1093/petrology/44.5.815
- Namur, O., Charlier, B., Toplis, M. J., et al., 2011. Differentiation of Tholeiitic Basalt to A-Type Granite in the Sept Iles Layered Intrusion, Canada. *Journal of Petrology*, 52(3): 487–539. doi:10.1093/petrology/egq088
- Niu, X. L., Chen, B., Ma, X., 2011. Petrogenesis of the Dengzhazi A-Type Pluton from the Taihang-Yanshan Mesozoic Orogenic Belts, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(2): 133–146. doi:10.1016/j.jseas.2011.01.008
- O'Driscoll, B., Troll, V. R., Reavy, R. J., et al., 2006. The Great Eucrie Intrusion of Ardnamurchan, Scotland; Re-evaluating the Ring-Dike Concept. *Geology*, 34(3): 189–192. doi:10.1130/G22294.1
- Patiño Douce, A. E., 1997. Generation of Metaluminous A-Type Granites by Low-Pressure Melting of Calc-Alkaline Granitoids. *Geology*, 25(8): 743–746. doi:10.1130/0091-7613(1997)
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks of the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81. doi:10.1007/BF00384745
- Phillips, W. J., 1974. The Dynamic Emplacement of Cone Sheets. *Tectonophysics*, 24(1–2): 69–84. doi:10.1016/0040-1951(74)90130-9
- Ren, J. Y., Tamaki, K., Li, S. T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic Rifting and Its Dynamic Setting in Eastern China and Adjacent Areas. *Tectonophysics*, 344(3–4): 175–205. doi:10.1016/S0040-1951(01)00271-2
- Shao, J. A., Li, X. H., Zhang, L. Q., et al., 2001. Geochemical Condition to Genetic Mechanism of the Mesozoic Bimodal Dike Swarms in Nankou-Guyaju. *Geochimica*, 30(6): 517–524 (in Chinese with English abstract).
- Skjerlie, K. P., Johnston, A. D., 1992. Vapor-Absent Melting at 10 Kbar of a Biotite- and Amphibole-Bearing Tonalitic Gneiss: Implications for the Generation of A-Type Granites. *Geology*, 20(3): 263–266. doi:10.1130/0091-7613(1992)
- Skjerlie, K. P., Johnston, A. D., 1993. Fluid-Absent Melting Behavior of an F-Rich Tonalitic Gneiss at Mid-Crustal Pressures: Implications for the Generation of Anorogenic Granites. *Journal of Petrology*, 34(4): 785–815. doi:10.1093/petrology/34.4.785
- Song, B., Nutman, A. P., Liu, D. Y., et al., 1996. 3 800 to 2 500 Ma Crustal Evolution in the Anshan Area of Liaoning Province, Northeastern China. *Precambrian Res.*, 78(1–3): 79–94. doi:10.1016/0301-9268(95)00070-4
- Su, S. G., Niu, Y. L., Deng, J. F., et al., 2007. Petrology and Geochronology of Xuejiashiliang Igneous Complex and Their Genetic Link to the Lithospheric Thinning during the Yanshanian Orogenesis in Eastern China. *Lithos*, 96(1–2): 90–107. doi:10.1016/j.lithos.2006.09.020
- Sun, J. F., Yang, J. H., 2009. Early Cretaceous A-Type Granites in the Eastern North China Block with Relation to Destruction of the Craton. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 137–147 (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. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., Geological Society London Special Publication, 42: 313–345. doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Tibaldi, A., Pasquarè, A. F., Rust, D., 2011. New Insights into the Cone Sheet Structure of the Cuillin Complex, Isle of Skye, Scotland. *Journal of the Geological Society*, 168(3): 689–704. doi:10.1144/0016-76492009-175
- Vallinayagam, G., Kochhar, N., 2011. Petrological Evolution and Emplacement of Siwana and Jalor Ring Complexes of Malani Igneous Suite, Northwestern Peninsular India. *Topics in Igneous Petrology*, 437–448. doi:10.1007/978-90-481-9600-5\_17
- Walter, T. R., 2008. Facilitating Dike Intrusion into Ring-Faults. *Developments in Volcanology*, 10: 351–374.

- doi:10.1016/S1871-644X(07)00009-5
- Wang, Q., Wyman, D. A., Li, Z. X., et al., 2010. Petrology, Geochronology and Geochemistry of ca. 780 Ma A-Type Granites in South China: Petrogenesis and Implications for Crustal Growth during the Breakup of the Supercontinent Rodinia. *Precambrian Research*, 178(1-4): 185-208. doi:10.1016/j.precamres.2010.02.004
- Wang, Y., Zhang, Q., 2001. A Granitoid Complex from Badaling Area, North China: Composition, Geochemical Characteristics and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 533-540 (in Chinese with English abstract).
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295-304. doi:10.1016/0012-821X(83)90211-X
- Wei, C. S., Zhao, Z. F., Spicuzza, M. J., 2008. Zircon Oxygen Isotopic Constraint on the Sources of Late Mesozoic A-Type Granites in Eastern China. *Chemical Geology*, 250(1-4): 1-15. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.01.004
- Wei, H. H., Meng, Q. R., Wu, G. L., et al., 2011. Multiple Controls on Rift Basin Sedimentation in Volcanic Settings: Insights from the Anatomy of a Small Early Cretaceous Basin in the Yanshan Belt, Northern North China. *Geological Society of America Bulletin*, 124(3-4): 380-399. doi:10.1130/B30495.1
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419. doi:10.1007/BF00402202
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. A., et al., 2005. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1-2): 103-119. doi:10.1016/j.epsl.2005.02.019
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Li, H. M., et al., 2002. A-Type Granites in Northeastern China: Age and Geochemical Constraints on Their Petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1-2): 143-173. doi:10.1016/S0009-2541(02)00018-9
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554-1569. doi:10.1360/04wd0130
- Xiao, W. J., Huang, B., Han, C., et al., 2010. A Review of the Western Part of the Altaids: A key to Understanding the Architecture of Accretionary Orogens. *Gondwana Research*, 18(2-3): 253-273. doi:10.1016/j.gr.2010.01.007
- Xu, B. L., Yan, G. H., Xu, Z., et al., 1999. Geochemistry and Genetic Implications of Three Series of Yanshanian Granite in Northern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 208-216 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., 2007. Diachronous Lithospheric Thinning of the North China Craton and Formation of the Daxin'anling-Taihangshan Gravity Lineament. *Lithos*, 96(1-2): 281-298. doi:10.1016/j.lithos.2006.09.013
- Yang, J. H., Wu, F. W., Wilde, S. A., 2003. A Review of Geodynamic Setting of Large-Scale Late Mesozoic Gold Mineralization in the North China Craton: An Association with Lithospheric Thinning. *Ore Geology Reviews*, 23(3-4): 125-152. doi:10.1016/S0169-1368(03)00033-7
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2006. A Hybrid Origin for the Qianshan A-Type Granite, Northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Evidence. *Lithos*, 89(1-2): 89-106. doi:10.1016/j.lithos.2005.10.002
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2007. Rapid Exhumation and Cooling of the Liaonan Metamorphic Core Complex: Inferences from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Thermochronology and Implications for Late Mesozoic Extension in the Eastern North China Craton. *Geological Society of America Bulletin*, 119(11-12): 1405-1414. doi:10.1130/B26085.1
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2008. Petrogenesis of an Alkali Syenite-Granite-Rhyolite Suite in the Yanshan Fold and Thrust Belt, Eastern North China Craton: Geochronological, Geochemical and Nd-Sr-Hf Isotopic Evidence for Lithospheric Thinning. *Journal of Petrology*, 49(2): 315-351. doi:10.1093/ptrology/egm083
- Yang, S. Y., Jiang, S. Y., Zhao, K. D., et al., 2012. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Two Early Cretaceous A-Type Granites in the Gan-Hang Belt, Southeast China. *Lithos*, 150: 155-170. doi:10.1016/j.lithos.2012.01.028
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2003. Secular Evolution of the Lithosphere Beneath the Eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic Basalts and High-Mg Andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4373-4387. doi:10.1016/S0016-7037(03)00377-6
- Zhang, J. J., Zheng, Y. D., Shi, Q. Z., et al., 1997. The Xiao-

- qinling Detachment Fault and Metamorphic Core Complex of China; Structure, Kinematics, Strain and Evolution. Proc. 30th International Geological Congress, 14: 158–172.
- Zhang, J. Y., Ma, C. Q., Wang, R. J., et al., 2013. Mineralogical, Geochronological and Geochemical Characteristics of Zhoukoudian Intrusion and Their Magmatic Source and Evolution. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(1): 68–86 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Liu, X. C., et al., 2009. Late Paleozoic to Early Mesozoic Mafic-Ultramafic Complexes from the Northern North China Block: Constraints on the Composition and Evolution of the Lithospheric Mantle. *Lithos*, 110(1–4): 229–246. doi: 10. 1016/j. lithos. 2009. 01. 008
- Zhang, Y. Q., Li, J. L., Zhang, T., et al., 2008. Cretaceous to Paleocene Tectono-Sedimentary Evolution of the Jiaolai Basin and the Contiguous Areas of the Shandong Peninsula (North China) and Its Geodynamic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 82(9): 1229–1257 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, D. P., Maruyama, S., Omori, S., 2007. Mantle Dynamics of Western Pacific and East Asia: Insight from Seismic Tomography and Mineral Physics. *Gondwana Research*, 11(1–2): 120–131. doi: 10. 1016/j. gr. 2006. 06. 006
- Zhao, D. P., Ohtani, E., 2009. Deep Slab Subduction and Dehydration and Their Geodynamic Consequences: Evidence from Seismology and Mineral Physics. *Gondwana Research*, 16(3): 401–413. doi: 10. 1016/j. gr. 2009. 01. 005
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural and *P-T* Path Constraints. *Precambrian Research*, 107(1–2): 45–73. doi: 10. 1016/S0301–9268(00)00154–6
- Zhou, X. H., Zhang, G. H., Yang, J. H., et al., 2001. Sr-Nd-Pb Isotope Mapping of Late Mesozoic Volcanic Rocks across Northern Margin of North China Craton and Implications to Geodynamic Processes. *Geochimica*, 30(1): 10–23 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Jiang, D. Z., Zhang, B. L., et al., 2012. Destruction of the Eastern North China Craton in a Backarc Setting: Evidence from Crustal Deformation Kinematics. *Gondwana Research*, 22(1): 86–103. doi: 10. 1016/j. gr. 2011. 08. 005
- Zindler, A., Staudigel, H., Batiza, R., 1984. Isotope and Trace Element Geochemistry of Young Pacific Seamounts: Implications for the Scale of Upper Mantle Heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters*, 70(2): 175–195. doi: 10. 1016/0012–821X(84)90004–9

### 附中文参考文献

- 李三忠, 刘建忠, 赵国春, 等, 2004. 华北克拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约—以胶辽地区为例. *岩石学报*, 20(3): 633–646.
- 李武平, 2012. 辽西北票晚侏罗世蓝旗组火山岩的岩浆演化及其岩石成因. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(1): 47–56.
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 等, 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山. *岩石学报*, 18(4): 433–448.
- 邵济安, 李献华, 张履桥, 等, 2001. 南口—古崖居中生代双峰式岩墙群形成机制的地球化学制约. *地球化学*, 30(6): 517–524.
- 孙金凤, 杨进辉, 2009. 华北东部早白垩世 A 型花岗岩与克拉通破坏. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(1): 137–147.
- 王焰, 张旗, 2001. 八达岭花岗岩杂岩的组成、地球化学特征及其意义. *岩石学报*, 17(4): 533–540.
- 许保良, 阎国翰, 徐振邦, 等, 1999. 冀北燕山期三个系列花岗质岩石的地球化学特征及其成因学意义. *岩石学报*, 15(2): 208–216.
- 张金阳, 马昌前, 王人镜, 等, 2013. 周口店岩体矿物学、年代学、地球化学特征及其岩浆起源与演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(1): 68–86.
- 张岳桥, 李金良, 张田, 等, 2008. 胶莱盆地及其邻区白垩纪—古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义. *地质学报*, 82(9): 1229–1257.
- 周新华, 张国辉, 杨进辉, 等, 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义. *地球化学*, 30(1): 10–23.