

东天山黄山—镜儿泉过铝花岗岩矿物学、地球化学及年代学研究^{*}

唐俊华^{1,2,3} 顾连兴^{1,3**} 张遵忠^{1,3} 吴昌志¹ 三金柱⁴ 汪传胜¹ 刘四海¹ 黎广荣¹

TANG JunHua^{1,2}, GU LianXing^{1,3**}, ZHANG ZunZhong^{1,3}, WU ChangZhi¹, SAN JinZhu⁴, WANG ChuanSheng¹, LIU SiHai¹ and LI GuangRong¹

1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室(南京大学), 南京大学地球科学系, 南京 210093

2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

3. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 南京 210007

4. 新疆维吾尔自治区有色金属地质勘查局 704 队, 哈密 839000

1. State Key Laboratory of Mineral Deposit Research (Nanjing University), Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Eastern China Geological & Mining Organization for Non-ferrous Metals in Jiangsu Province, Nanjing 210007, China

4. Ge exploration Bureau for non-ferrous metals, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Hami 839000, China

2007-11-07 收稿, 2008-04-29 改回。

Tang JH, Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, San JZ, Wang CS, Liu SH and Li GR. 2008. Peraluminous granite in Huangshan-Jingerquan area of eastern Tianshan: Geochemistry, mineralogy and geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (5): 921–946

Abstract Petrography, mineralogy, geochemistry, Sr-Nd isotopes and U-Pb geochronology of three peraluminous granites at Huangshannan, Jing'erquan and Tula'ergengou in the Huangshan-Jing'erquan belt of eastern Tianshan have been studied. Zircon U-Pb LA-ICP-MS in situ dating yields crystallisation ages of 259.9 ± 1.4 Ma (MSWD = 0.86) for the Huangshannan pluton and 275.4 ± 8.3 Ma (MSWD = 29) for Tula'ergengou pluton, indicating that both of them were intruded in accompany with Permian post-collisional tectonic extension. All these peraluminous granites are characterized by low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios ($I_{\text{Sr}} = 0.6969 \sim 0.70396$), high $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+5.5 ~ +7.2) values and juvenile depleted single-stage Nd model ages ($t_{\text{DM}} = 0.48 \sim 0.56$ Ga), suggesting that their magmas were originated from depleted mantle-derived juvenile crustal rocks. The juvenile crustal rocks might be acidic or mildly acidic volcanites. Mineralogy and geochemistry of these three plutons fall into two categories: one is represented by the Huangshannan muscovite granite which is strongly peraluminous ($A/\text{CNK} > 1.1$, molecular ratio), remarkably depleted in Ba, Sr and Ti, and enriched in Cs, Rb and K with high Rb/Sr (2.03 ~ 14.5) and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (110 ~ 1592) and low Nb/Ta (3.24 ~ 6.76) ratios. The chondrite-normalised REE patterns are characterized by "V" shape with strong negative Eu anomalies ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.04 \sim 0.55$), indicating that this rock was derived from a pelite-dominated source. The other is represented by the Tula'ergengou two mica granite. It is weakly peraluminous ($1 < A/\text{CNK} < 1.1$), depleted in Nb, Ta and Ti, and enriched in Rb, Ba and K with lower Rb/Sr (0.44 ~ 0.69) and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (135 ~ 205), and higher Nb/Ta (12.8 ~ 18.4) ratios compared to the Huangshannan muscovite granite. The REE chondrite-normalised patterns of the Tula'ergengou pluton are steeply right tilted with weakly negative Eu anomalies ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.65 \sim 0.96$), suggesting a psammite-dominated source. Variable geochemistry of the Jing'erquan pluton implies that magma portions for this pluton came from both pelitic and psammitic sources, and that these portions from different sources had not mixed sufficiently when they consolidated. The older inherited zircon ages of Silurian, Devonian and Carboniferous of the Huangshannan and Tula'ergengou plutons indicate their pelitic and psammitic source rocks might have been produced through weathering-sedimentation of the Silurian to Carboniferous depleted mantle-derived juvenile materials (most probably acidic volcanic rocks) in these areas.

^{*} 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411301), 国家自然科学基金项目(40472042, 40672040, 40603008)和中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金(GPMR200629)成果。

第一作者简介: 唐俊华, 男, 1965 年生, 博士, 高级工程师, 矿物学岩石学矿床学专业, E-mail: junhuat@gmail.com

^{**} 通讯作者: 顾连兴, 男, 1944 年生, 教授, 博士生导师, 矿物学岩石学矿床学专业, E-mail: lxgu@nju.edu.cn

Mantle magma intraplating is likely to have occurred in the Huangshan-Jing'erquan belt during the Permian post-collisional stage, the intraplated magma induced melting of the juvenile depleted mantle-derived source rocks in the middle to upper crust, and thus generated the peraluminous granites.

Key words Peraluminous granite; Juvenile crustal rock; Intraplating; Partial melting; Zircon U-Pb dating; Eastern Tianshan

摘 要 对东天山黄山—镜儿泉一带黄山南、镜儿泉、图拉尔根沟三个过铝花岗岩作了岩相学、矿物学、地球化学、Sr-Nd 同位素和锆石 U-Pb 年代学研究。锆石 U-Pb LA-ICP-MS 原位定年测得黄山南岩体结晶年龄为 259.9 ± 1.4 Ma (MSWD = 0.86), 图拉尔根沟岩体结晶年龄为 275.4 ± 8.3 Ma (MSWD = 29), 均侵位于二叠纪碰撞后伸展环境。三个过铝花岗岩均具有低铽同位素初始比值 ($I_{\text{Sr}} = 0.6969 \sim 0.70396$)、高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($+5.5 \sim +7.2$) 以及年轻的亏损地幔单阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}} = 0.48 \sim 0.56$ Ga), 表明其岩浆源区均为来源于亏损地幔的新生地壳岩石。这种新生地壳岩石可能为偏酸性的火山岩。三个岩体的矿物学和地球化学可分为两类: 一类以黄山南白云母花岗岩为代表, 为强过铝花岗岩 ($A/\text{CNK} > 1.1$), 强烈亏损 Ba、Sr 和 Ti 而富集 Cs、Rb 和 K, 具有高的 Rb/Sr (2.03 ~ 14.5) 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (110 ~ 1592), 低的 Nb/Ta (3.24 ~ 6.76) 比值, 其稀土元素配分曲线呈“V”字形, 显示强烈铕亏损 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.04 \sim 0.55$), 表明这类岩体的直接源岩以泥质岩为主。另一类以图拉尔根沟二云母花岗岩为代表, 为弱过铝 ($1 < A/\text{CNK} < 1.1$) 花岗岩, 亏损 Nb、Ta 和 Ti 而富集 Rb、Ba 和 K, 具低的 Rb/Sr (0.44 ~ 0.69)、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (135 ~ 205) 和较高的 Nb/Ta (12.8 ~ 18.4), 其稀土元素配分曲线向右陡倾斜, 铕负异常不显著 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.65 \sim 0.96$), 表明其直接源岩以碎屑岩为主。镜儿泉岩体的岩石化学多变性表明, 该岩体不同地段的岩浆分别来自以泥质岩为主和以碎屑岩为主的源区, 来自两种源区的岩浆在岩体结晶之前未能充分混匀。黄山南岩体和图拉尔根沟岩体中继承性锆石的志留、泥盆和石炭纪年龄表明, 作为这两个岩体直接源区的泥质岩和碎屑岩可能是志留、泥盆和石炭纪新生亏损慢源岩石经历风化—沉积旋回的产物。在碰撞后的二叠纪伸展阶段, 黄山—镜儿泉一带发生过慢源岩浆的内侵, 内侵岩浆热量造成了位于中-上部地壳新生慢源物质部分熔融, 形成了这一带的过铝花岗岩。

关键词 过铝花岗岩; 新生地壳岩石; 内侵; 部分熔融; 锆石 U-Pb 定年; 东天山

中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

过铝花岗岩是指铝饱和指数 [$\text{ASI} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 或 A/CNK (摩尔比)] 大于 1 的岩石, 含有特征的富铝矿物, 如白云母、堇青石、石榴石和铝硅酸盐等 (Clarke, 1981; 葛文春等, 2001; 廖忠礼等, 2004)。前人研究认为, 大部分的过铝花岗岩是由陆壳部分熔融而成, 属 Xu *et al.* (1984) 等所称的改造型花岗岩, 其形成主要取决于地壳深部源区的温度、压力等物理条件以及源岩的性质 (Barbarin, 1996)。东天山黄山—镜儿泉一带沿康古尔—黄山深断裂分布着许多碰撞后的过铝花岗岩, 岩石中普遍含有白云母和石榴石等富铝矿物。Gu *et al.* (1996) 测得镜儿泉白云母花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄 260.2 ± 6.2 Ma, 与车自成等① (1989) 所获年龄 (260 ± 6 Ma) 在误差范围内完全一致。Gu *et al.* (1996) 还根据该岩体低的铽同位素初始比值 ($I_{\text{Sr}} = 0.7052 \sim 0.7067$), 认为黄山—镜儿泉一带过铝花岗岩可能源自于酸性火山岩或低成熟度沉积物的部分熔融。但是迄今为止, 在这条长达 200 km (Gu *et al.*, 1996) 的过铝花岗岩带上, 仅镜儿泉岩体有年龄数据, 而且对于特征各异的不同岩体缺乏对比研究。所以, 本文拟对该带三个典型的过铝花岗岩 (黄山南、镜儿泉及图拉尔根沟岩体) 作岩相学、矿物学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学等方面的对比研究, 在此基础上进一步阐明该区过铝花岗岩的特征和成因。

2 区域地质背景

东天山是指东经 88° 以东的天山造山带, 位于中亚造山带 (Sengör *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2004) 南缘, 该造山带自北到南包括博格达及哈尔里克造山带、吐哈地块、觉罗塔格造山带和中天山地块 (图 1)。有关这些地质单元的构造属性及成因, 仍存在着诸多争论。如, 博格达有晚古生代岛弧 (成守德等, 1986; Coleman, 1989; 马瑞士等, 1993)、裂谷 (吴庆福, 1986; 何国琦等, 1994; 顾连兴等, 2000, 2001b) 及裂陷槽 (肖序常等, 1992) 之争; 哈尔里克造山带虽被一致地认为是古亚洲洋向南俯冲形成的泥盆—石炭纪岛弧 (马瑞士等, 1997; Xiao *et al.*, 2004), 但其板块归属仍有异议, 有些学者认为属塔里木板块 (马瑞士等, 1993), 而多数人则认为属准噶尔—哈萨克斯坦板块 (肖序常等, 1992; 姬金生等, 1994); 关于吐哈盆地的构造属性, 除少数学者 (方国庆, 1994) 认为该盆地存在洋壳基底外, 大部分研究者认为有一个前寒武纪结晶基底 (杨浩和顾连兴, 1989; 李锦铁和肖序常, 1999)。从现有资料来看, 觉罗塔格造山带是吐哈地块南缘的晚古生代活动大陆边缘 (陈哲夫和梁云海, 1985; 王作勋等, 1986; 顾连兴等, 2001a; Xiao *et al.*, 2004), 而中天山地块属于从塔里木大陆裂离出来的加里东岛弧的一部分 (胡受奚等,

① 车自成等. 1989. 新疆巴伦台多金属成矿带地物化综合研究及找矿靶区优选. 新疆人民政府国家 305 项目办公室, 52 ~ 61

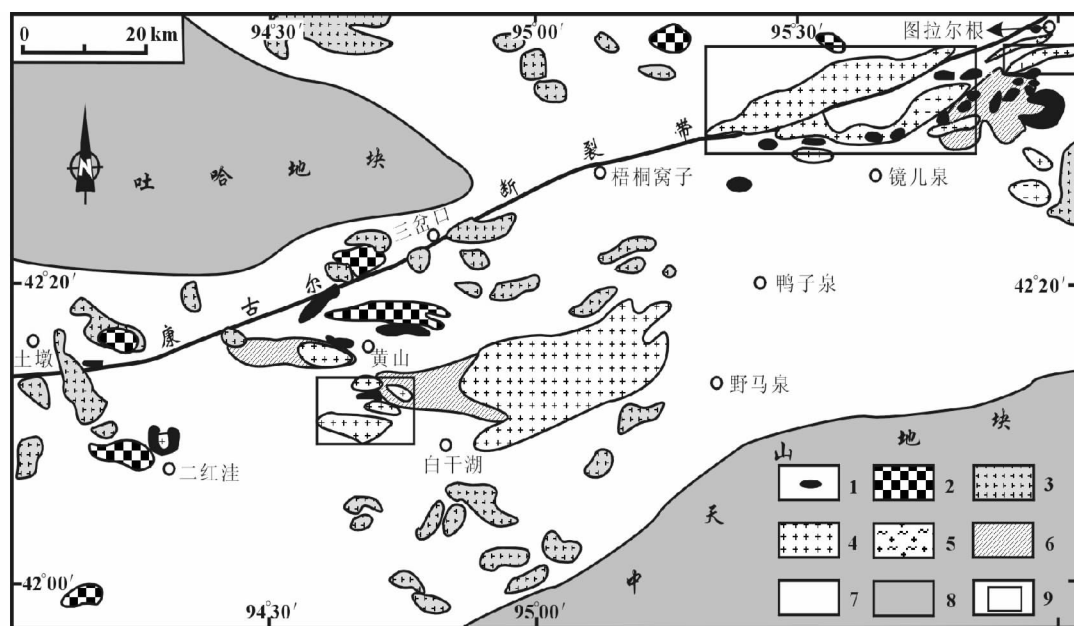


图1 东天山黄山—镜儿泉一带地质略图(据顾连兴等,2006)

1-镁铁-超镁铁岩; 2-闪长岩; 3-钙碱性-高钾钙碱性花岗岩; 4-过铝质花岗岩; 5-片麻状花岗岩; 6-混合岩; 7-泥盆-石炭纪地层; 8-前寒武纪地块; 9-典型岩体

Fig. 1 Simplified geological map of the Huangshan-Jing'erquan area in eastern Tianshan (after Gu *et al.*, 2006)

1-mafic-ultramafic intrusion; 2-diorite; 3-calc-alkaline and high-K calc-alkaline granite; 4-peraluminous granite; 5-gneissose granite; 6-migmatite; 7-Devonian and Carboniferous strata; 8-Precambrian block; 9-typical intrusions

1990; 郭召杰和张志诚,1993; 舒良树等,2001)。黄山—镜儿泉地区位于觉罗塔格岛弧与吐哈地块之间康古尔弧后盆地闭合带的东段(图1)。著名的康古尔断裂带是一条强烈的韧性剪切变形带,呈NEE走向穿越本区。康古尔断裂带以南主要出露早石炭世苦水组和中-晚石炭世梧桐窝子组与干墩组地层。苦水组是一套陆源碎屑岩夹泥质岩;梧桐窝子组主要为一套海相基性熔岩(细碧岩),少量中酸性火山碎屑岩和熔岩,并夹碎屑岩、碳酸盐和硅质岩;干墩组为火山碎屑岩和含炭硅质岩、硅质凝灰岩、砂岩、粉砂岩和石灰岩(阎文元,1985; 郭召杰和马瑞士,1990; 竺国强和马润则,1992)。在康古尔断裂带以北可能还存在一部分属于大南湖—头苏岩岩浆弧的泥盆纪火山—沉积岩。本区石炭纪地层的变质程度普遍为绿片岩相,在双岔沟和镜儿泉一带变质较深,达角闪岩相(王赐银等,1992; 顾连兴等,2006),混合岩化普遍。从二红洼到镜儿泉长达200km的范围内,沿康古尔韧性剪切带分布着一条由镁铁-超镁铁岩及过铝花岗岩组成的岩浆带(Gu *et al.*, 1995, 1996)。前人用不同方法测得该带镁铁-超镁铁岩的年龄分布于288~269Ma(毛景文等,2002; 秦克章等,2002; Li *et al.*, 2003; Han *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2004; 顾连兴等,2006),而已有的过铝花岗岩年龄则在260Ma左右(Gu *et al.*, 1996),稍晚于镁铁-超镁铁岩体的侵入。另外该带还发育有钙碱性-高钾钙碱性岩石,如三岔口斜长花岗斑岩(278Ma,李华芹等,2004)。

3 岩体地质、岩相学及矿物学特征

黄山—镜儿泉一带过铝花岗岩体均呈走向近东西的长条状中、小型岩株,分布范围与镁铁-超镁铁岩带基本一致,二红洼岩体和镜儿泉岩体分别侵入和切割镁铁-超镁铁岩体。岩体与围岩的接触界线清晰,二红洼和黄山南岩体围岩为干墩组,镜儿泉岩体和图拉尔根沟岩体围岩为梧桐窝子组。岩体内花岗岩伟晶岩脉和石英脉常见。黄山南岩体和镜儿泉岩体均为变形微弱、致密块状的白云母花岗岩。黄山南岩体为灰白略带肉红色细粒岩石,颜色指数(CI)为1.1%~3.1%,由数个小岩体组成,其中最大者面积达31km²,最小者仅1km²(图1),镜儿泉岩体主要由两个近东西向延伸的大岩体组成,长度均在30km以上,但宽却仅有2km~4km。岩石为细粒—中粒结构,呈灰白色,CI=1.4%~4.9%。白云母花岗岩的主要造岩矿物有石英(25%~35%)、钾长石(35%~50%)和斜长石(10%~20%),并含白云母(4%~8%)和石榴石(2%~5%)。图拉尔根沟岩体为二云母花岗岩,颜色呈灰白色,CI=4.1%~5.8%,岩体长约8km,宽约2km,块状构造,中粒花岗结构,岩体中可见围岩残留体(图2d)。图拉尔根沟二云母花岗岩主要造岩矿物有钾长石(35%~50%)、石英(25%~30%)、斜长石(10%~25%)、黑云母(3%~10%),并含石榴石(2%~5%)和少量白云母(<2%)。

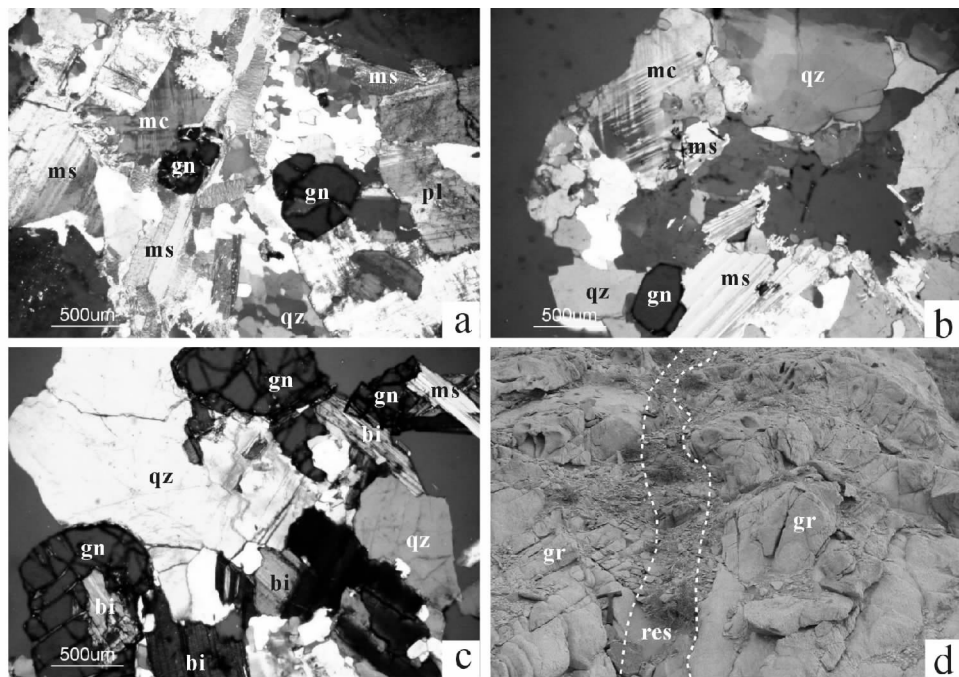


图2 黄山—镜儿泉地区过铝花岗岩显微照片及野外照片

a-黄山南白云母花岗岩矿物成分和结构, X-271-5, 正交偏光; b-镜儿泉白云母花岗岩矿物成分和结构, 注意石榴石裂纹不发育, 石英具亚颗粒结构, 微斜长石具格子双晶, X-492-9, 正交偏光; c-图拉尔根沟二云母花岗岩矿物成分和结构, 注意石榴石裂纹发育, 有一个颗粒内包有黑云母, X-530-1, 正交偏光; d-图拉尔根沟二云母花岗岩中片麻岩残留体(野外露头)。bi-黑云母, gn-石榴石, mc-微斜长石, ms-白云母, pl-斜长石, qz-石英, gr-花岗岩, res-残留体

Fig. 2 Photomicrographs and outcrop photograph of peraluminous granites in the Huangshan-Jing'erquan area

a-The component and structure of Huangshannan muscovite granite for thin slice X-271-5 under crossed polarizers; b-The component and structure of Jing'erquan muscovite granite, notice garnet grains underdeveloped cracks, quartz has subgrains structure and microcline developed cross-hatched twins for the thin slice X-492-9 under crossed polarizers; c-The component and structure of Tula'ergengou two mica granite, notice garnet grains well developed cracks with one included biotite flake for thin slice X-530-1 under crossed polarizers; and d-Gneissose residue in Tula'ergengou two mica granite (outcrop). bi-biotite, gn-garnet, mc-microcline, ms-muscovite, pl-plagioclase, gr-granite, res-residue.

这些过铝花岗岩中的副矿物含量均甚低, 镜儿泉白云母花岗岩人工重砂分析(顾连兴等, 1993)表明, 其副矿物以磁铁矿为主, 仅含少量绿帘石、石榴石和磷灰石等。这些特征与华南典型的改造型花岗岩有所不同, 而与北美西部弧后岩浆带的S型花岗岩(Miller and Bradfish, 1980; Todd and Shaw, 1985)相似。在CIPW标准矿物QAP图解(图3a)中, 黄山南岩体主要投影在碱长花岗岩区域, 图拉尔根沟岩体投影于花岗岩区域中, 而镜儿泉岩体则跨投上述两个区域。从上述岩体CI值小于或略大于5%可以看出, 这些花岗岩均属淡色花岗岩范围(Barbarin, 1999; 廖仲礼等, 2004)。现将各主要造岩矿物特征描述如下:

钾长石: 主要为微斜长石, 发育格子双晶(图2a), 其中常见斜长石、石英和云母等包体。镜儿泉岩体钾长石的三斜度及有序度均很高, 分别达到0.94~0.95和0.98~0.99(顾连兴等, 1993), 显示了典型的改造型花岗岩的特征。

斜长石: 斜长石均为富钠族, 其中黄山南岩体为钠长石, 图拉尔根沟岩体为更长石(X-530的2nd点除外), 而镜儿

泉岩体则既有钠长石也有更长石(图3b, 表2)。斜长石普遍绢云母化, 见有斜长石自形晶包于钾长石中。

石英: 以他形粒状为主, 粒度0.1mm~2.0mm不等, 波状消光普遍出现, 气液包体大量存在, 部分石英具亚颗粒(如图2b)。

石榴石: 黄山南及镜儿泉岩体的石榴石均呈圆粒状, 标本上显蔷薇红色, 粒径较小(0.2mm~0.6mm)(图2a,b), 裂纹少, 而图拉尔根沟岩体石榴石大多呈椭圆状, 多呈暗褐色, 粒径较大, 大者可达0.5mm×1mm, 裂纹较多(图2c); 在化学成分上, 三个岩体中的石榴石均属铁铝石榴石-锰铝石榴石系列, 但以铁铝石榴石为主(见表3)。黄山南和镜儿泉岩体石榴石的锰铝石榴石($Spess = 25.3\% \sim 32.1\%$)含量较高, 而图拉尔根沟岩体中锰铝石榴石(4.69%~6.94%)并不重要, 以铁铝石榴石($Alm = 86.74\% \sim 88.09\%$)为主。

白云母: 黄山南岩体白云母含量最多(图2a), 粒径0.2mm×(1.5mm~2.0mm), 纵切面呈长条状或羽毛状; 图拉尔根沟岩体白云母含量甚低, 其粒径也较小(<0.2mm),

表1 黄山—镜儿泉岩带过铝花岗岩主量元素、微量元素及 Sr-Sm-Nd 同位素分析结果

Table 1 The analysis results of major and trace elements and Sr-Nd isotopes of peraluminous granites in the Huangshan-Jing'erquan belt

地 点		镜儿泉										图拉尔根沟		
样品编号	361*	362*	364*	368*	369*	X-489	X-490	X-492	X-493	X-494	X-495	X-496	X-528	X-529
主量元素(wt%)														
SiO ₂	74.75	76.36	75.13	73.10	76.33	73.99	73.38	74.42	73.66	76.77	73.71	77.69	72.94	73.52
TiO ₂	0.05	0	0	0.05	0.05	0.08	0.14	0.06	0.1	0.07	0.1	0.08	0.07	0.09
Al ₂ O ₃	14.29	14.40	14.05	15.86	13.54	13.32	13.46	13.69	13.73	11.69	13.83	11.88	14.32	13.30
Fe ₂ O ₃	0.36	0.30	0.36	0.37	0.24	0.74	0.96	0.71	0.91	0.88	0.58	0.52	0.42	0.61
FeO	0.36	0.59	0.37	0.40	0.38	1.39	1.14	1.30	1.12	1.94	0.98	0.93	1.79	2.01
MnO	0.19	0.20	0.16	0.14	0.03	0.05	0.05	0.21	0.05	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05
MgO	0.08	0.12	0.12	0.04	0.24	0.47	0.67	0.17	0.26	0.26	0.18	0.53	0.17	0.38
CaO	0.57	0.39	0.29	0.33	1.3	1.2	1.5	0.53	0.93	0.93	0.88	1.1	1.3	0.98
Na ₂ O	5.07	4.05	3.82	4.46	3.95	4.49	4.31	3.94	3.93	3.74	4.01	4.78	4.17	3.67
K ₂ O	3.50	3.85	4.15	4.42	3.73	3.06	3.10	4.41	4.19	2.96	4.17	1.61	4.36	4.73
P ₂ O ₅	0.2	0.2	0.08	0.1	0.08	0.06	0.05	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
LOI	0.54	0.42	0.49	0.91	0.42	0.96	0.95	0.70	1.0	0.43	0.95	0.61	0.58	0.77
Total	99.92	100.8	99.02	100.2	100.3	99.82	99.73	100.2	99.93	99.75	99.47	99.77	100.2	100.2
K ₂ O/Na ₂ O	0.69	0.95	1.1	0.99	0.94	0.68	0.72	1.1	1.1	0.79	1.0	0.34	1.1	1.3
A/CNK	1.08	1.25	1.24	1.25	1.04	1.03	1.02	1.12	1.08	1.06	1.09	1.03	1.03	1.04
CIPW 标准矿物(%)														
Q	30.9	36.8	36.7	29.8	35.9	32.6	32.2	32.7	32.3	40.4	32.3	40.6	28.0	30.3
C	1.5	3.2	3.0	3.4	0.73	0.54	0.35	1.6	1.1	0.72	1.2	0.41	0.56	0.46
Or	20.8	22.7	24.9	26.3	22.1	18.3	18.6	26.2	25.1	17.6	25.0	9.60	25.9	28.2
Ab	43.1	34.1	32.8	38.0	33.4	38.4	36.9	33.5	33.6	31.8	34.4	40.7	35.4	31.2
An	1.90	1.05	0.980	0.940	6.19	5.72	7.34	2.23	4.37	4.41	4.20	5.12	5.94	4.60
A	60.4	55.3	56.4	63.0	48.1	47.6	45.0	57.1	53.6	43.1	54.5	36.2	54.7	55.0
P	5.50	2.56	2.22	2.25	13.5	14.9	17.8	4.85	9.36	10.8	9.14	19.3	12.5	8.98
Hy	0.84	1.5	0.99	0.71	1.1	3.1	2.9	2.5	1.9	3.5	1.7	2.6	3.4	4.1
Mt	0.53	0.43	0.53	0.54	0.35	1.1	1.4	1.03	1.3	1.3	0.85	0.76	0.61	0.89
Il	0.1	0	0	0.1	0.1	0.15	0.27	0.11	0.19	0.13	0.19	0.15	0.13	0.17
Ap	0.35	0.33	0.18	0.26	0.17	0.13	0.11	0.15	0.11	0.090	0.090	0.090	0.11	0.11
Cl	1.5	1.9	1.5	1.4	1.5	4.4	4.6	3.7	3.4	4.9	2.8	3.5	4.1	5.2
D I	94.8	93.5	94.4	94.0	91.4	89.3	87.7	92.3	91.0	89.9	91.8	90.9	89.3	89.7
微量元素(×10 ⁻⁶)														
Ba	22	18	171	16	911	177.3	702.0	46.98	169.5	623.9	212.3	629.7	410.8	1322
Rb	142	126	125	160	72	49.9	56.5	107	87.2	63.2	93.1	26.2	79.3	98.3
Sr	15	4	29	7	130	72.6	186	23.6	61.3	129	71.3	200	127	173
Zr	18.1	25.5	36.2	31	39.9	44.6	38.2	24.0	32.3	81.2	36.4	50.1	25.8	55.9
Nb	17.8	15.4	18.7	22.7	5.10	13.3	5.91	5.43	8.06	3.28	7.96	1.8.0	3.68	5.15
Th	1.5	1.5	1.5	2.6	2	3.59	5.86	2.42	4.29	3.79	3.38	2.32	8.36	9.76
Pb	18	9	20	19	21	19.2	15.2	19.4	20.1	16.9	19.6	11.5	23.2	24.6

续表 1

Continoued Table 1

地 点		镜儿泉										图拉尔根沟			
样品编号	361 *	362 *	364 *	368 *	369 *	X-489	X-490	X-492	X-493	X-494	X-495	X-496	X-528	X-529	X-530
Ga	20	20			11	16.8	15.5	18.7	16.0	12.9	17.0	10.8	16.8	15.6	15.5
Zn	34	36	27	79	25	20.8	47.7	18.2	33.6	33.3	26.0	44.8	32.9	60.2	77.2
Ni	3	3	2	2	1	32.3	36.6	16.8	12.9	51.5	10.6	35.4	6.96	16.4	13.2
V	2	1	3	2	5	5.12	9.59	3.01	4.14	4.48	3.49	4.08	1.77	2.84	2.54
Cr	1	1	1	3	4	49.3	53.4	17.5	15.3	42.7	13.7	54.4	18.0	38.3	27.8
Hf	1.1	1.4	2.1	1.9	0.7	1.97	1.63	1.53	1.7	3.75	1.99	2.17	1.62	2.53	3.88
Cs	5	3	4	6	4	1.19	2.16	1.95	1.66	0.870	1.19	0.46	0.800	1.01	1.69
Sc						2.77	2.66	1.18	2.76	0.88	3.67	0.880	2.43	1.57	2.36
Ta	1.8	1.5	1	1.5	0.42	2.3	0.56	0.37	0.72	0.38	0.56	0.19	0.20	0.30	0.28
Co	1	6	2	9	4	3.49	4.20	1.52	1.53	3.24	1.46	3.72	1.11	2.79	1.84
Li	9	21	23	63	7	9.57	16.3	7.2	6.26	6.74	10.3	2.16	8.11	9.48	18.1
Be						1.7	0.73	0.85	0.47	0.81	0.48	0.58	0.44	0.68	0.31
U	4.6	3	3.7	3	3.5	1.26	0.66	0.58	0.9	0.75	0.59	0.48	0.97	1.41	2.08
W	0.4	0.5	1.4	0.5	0.6	7.17	4.81	5.33	2.76	9.75	1.88	15.4	2.11	2.09	3.90
Sn	7.2	2.8	2	2.1	2.5	1.85	2.01	2.33	5.1	1.84	3.05	1.49	2.03	2.85	3.13
Mo	0.8	0.4	0.1	0.4	0.5	6.32	2.95	1.89	2.84	1.77	2.53	2.94	2.61	4.12	2.20
Ti						223	717	78.6	420	183	361	164	111	299	387
Bi						0.32	0.33	0.15	0.19	0.31	0.13	0.43	0.060	0.10	0.13
Rb/Sr	9.5	32	4.3	23	0.55	0.69	0.30	4.5	1.4	0.49	1.3	0.13	0.62	0.57	0.69
Nb/Ta	9.89	10.3	18.7	15.1	12.1	5.70	10.6	14.7	11.2	8.63	14.2	9.47	18.4	17.2	18.2
稀土元素(×10 ⁻⁶)															
La	2.26	2.27	2.66	3.30		6.05	20.2	5.77	8.84	10.4	8.48	5.78	12.3	17.7	18.2
Ce	6.14	6.10	7.07	8.92		10.6	35.5	12.8	16.5	19.0	15.0	10.0	21.0	30.6	31.9
Pr	0.650	0.720	0.790	1.02		1.38	3.87	1.67	1.98	2.07	1.69	1.14	2.66	3.64	3.95
Nd	2.73	2.75	3.31	4.15		5.21	14.9	6.46	7.04	7.18	6.41	4.16	11.4	15.3	16.0
Sm	1.12	1.31	1.33	1.62		1.51	2.98	2.18	1.68	1.49	1.41	0.85	2.76	3.21	3.00
Eu	0.03	0.04	0.09	0.03		0.31	0.6	0.1	0.27	0.44	0.31	0.42	0.58	0.93	0.76
Gd	1.22	1.48	1.69	1.88		1.71	2.24	2.80	1.31	1.17	1.17	0.680	2.30	2.38	2.41
Tb	0.30	0.40	0.35	0.41		0.37	0.30	0.79	0.22	0.17	0.20	0.11	0.35	0.32	0.34
Dy	1.53	1.86	1.8	2.12		2.48	1.54	5.1	1.11	0.96	1.05	0.62	1.75	1.45	1.79
Ho	0.33	0.40	0.39	0.47		0.51	0.25	0.76	0.19	0.18	0.19	0.12	0.26	0.21	0.31
Er	0.74	0.93	0.93	1.07		1.7	0.71	1.9	0.54	0.58	0.59	0.41	0.61	0.62	0.90
Tm	0.12	0.18	0.15	0.17		0.31	0.1	0.28	0.08	0.1	0.09	0.07	0.08	0.07	0.13
Yb	0.96	1.1	0.99	1.4		2.4	0.75	1.92	0.54	0.75	0.64	0.53	0.48	0.59	0.96
Lu	0.11	0.13	0.13	0.15		0.37	0.12	0.25	0.08	0.12	0.09	0.09	0.07	0.09	0.14
Y						16.2	8.02	26.0	5.99	5.84	5.97	4.29	7.92	7.15	9.82
Σ REE	18.2	19.6	21.7	26.7		61.8	180	73.9	87.8	94.4	79.5	54.7	124	169	167
1REE/HREE	2.4	2.1	2.4	2.5		2.5	13	2.1	8.9	10.1	8.3	8.5	9	12	11

续表 1

Continoured Table 1														
地 点		镜儿泉												
样品编号	361 *	362 *	364 *	368 *	369 *	X-489	X-490	X-492	X-493	X-494	X-495	X-496	X-528	图拉尔根沟
TE _{1,3}	1.1	1.2	1.1	1.1		1.0	0.96	1.3	1.0	0.98	1.0	0.98	0.98	0.95
Eu/Eu*	0.07	0.08	0.17	0.05		0.54	0.65	0.11	0.51	0.94	0.68	1.6	0.65	0.79
(La/Yb) _{CN}	1.59	1.46	1.81	1.64		1.68	18.1	2.03	11.0	9.34	8.93	7.35	17.3	12.8
同位元素														
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr											4.65			
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr											0.719560			
2σ											12			
I _{Sr}											0.702360			
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd											0.119525			
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd											0.512841			
2σ											11			
ε _{Nd} (<i>t</i>)											6.5			
<i>t</i> _{DM} (Ga)											0.50			
温度计														
<i>T</i> _{REE} (℃)	612	643	654	664		623	683	669	662	666	659	621	665	699
<i>T_{Zr}</i> (℃)	630	663	687	673	681	686	673	650	667	737	676	698	647	742
地点	图拉尔根沟					黄山南								
样品编号	X-531	X-532	X-268	X-270	X-271	X-272	X-273	X-274	X-275	3600 *	3603 *	3605 *		
主量元素(wt%)														
SiO ₂	73.29	74.99	73.5	72.78	72.72	72.51	73.30	73.49	73.42	75.12	73.36		74.24	
TiO ₂	0.1	0.08	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.04	0.1		0.1	
Al ₂ O ₃	13.55	13.07	15.63	15.78	15.92	15.68	15.48	15.5	15.42	14.31	14.59		13.22	
Fe ₂ O ₃	0.59	0.59	0.28	0.21	0.35	0.29	0.21	0.020	0.34	0.42	0.080		0.29	
FeO	1.9	1.8	0.51	0.51	0.49	0.53	0.59	0.73	0.42	0.29	1.2		1.2	
MnO	0.05	0.05	0.2	0.09	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.09		0.06	
MgO	0.45	0.18	0.15	0.14	0.13	0.32	0.18	0.10	0.16	0	0.20		0.20	
CaO	1.1	0.96	0.50	0.40	0.48	0.68	0.59	0.48	0.58	0.50	1.2		1.6	
Na ₂ O	3.79	3.62	4.36	3.97	4.45	4.38	4.42	4.49	4.31	4.10	4.08		3.58	
K ₂ O	4.61	4.41	4.21	4.75	4.15	4.07	3.90	4.1	4.06	3.58	3.10		4.03	
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.08	0.07	0.07	0.1	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06		0.03	
LOI	0.59	0.59	0.61	0.85	0.76	0.86	0.85	0.69	0.86	0.90	0.96		0.84	
Total	100.1	100.4	100.0	99.56	99.68	99.57	99.79	99.84	99.78	99.45	99.02		99.43	
K ₂ O/Na ₂ O	1.2	1.2	0.97	1.2	0.93	0.93	0.88	0.91	0.94					
A/CNK	1.02	1.05	1.24	1.27	1.25	1.22	1.23	1.22	1.23					
CIPW 标准矿物(%)														
Q	29.6	33.7	30.7	30.6	29.9	29.8	31.2	30.2	31.6	37.1	34.9		34.0	
C	0.42	0.67	3.2	3.6	3.4	3.1	3.1	3.0	3.1	2.9	2.6		0.11	
Or	27.4	26.2	25.1	28.5	24.8	24.4	23.3	24.5	24.3	21.5	18.7		24.2	

续表 1

Continoued Table 1

地点		图拉尔根沟					黄山南					
样品编号	X-531	X-532	X-268	X-270	X-271	X-272	X-273	X-274	X-275	3600 *	3603 *	3605 *
Ab	32.2	30.7	37.07	34.0	38.0	37.5	37.8	38.3	36.8	35.2	35.2	30.7
An	5.20	4.54	2.02	1.60	1.99	2.82	2.49	1.99	2.50	2.16	5.46	7.88
A	54.5	52.3	59.4	60.6	60.0	58.0	57.4	59.9	57.7	53.4	45.9	47.3
P	10.3	9.08	4.79	3.41	4.81	6.71	6.13	4.87	5.94	5.37	13.4	15.4
Hy	4.1	3.2	1.4	1.28	1.21	1.80	1.62	1.87	1.13	0.370	2.68	2.45
Mt	0.86	0.86	0.41	0.31	0.51	0.43	0.31	0.03	0.50	0.62	0.12	0.43
Il	0.19	0.15	0.04	0.02	0.02	0.02	0.06	0.02	0.02	0.08	0.25	0.23
Ap	0.09	0.09	0.18	0.15	0.15	0.22	0.18	0.15	0.15	0.13	0.13	0.07
C I	5.1	4.2	1.8	1.6	1.7	2.2	2.0	1.9	1.6	1.1	3.1	3.1
D I	89.2	90.5	92.8	93.1	92.7	91.6	92.2	93.0	92.7	93.7	88.8	88.8
微量元素(×10 ⁻⁶)												
Ba	1919	1238	28.04	35.06	33.49	21.92	17.86	18.65	19.51			
Rb	80.7	96.9	150	180	159	155	146	148	149			
Sr	185	162	13.6	88.7	17.5	18.1	16.7	10.2	13.0			
Zr	63.4	54.7	42.9	45.4	49.5	38.1	54.2	45.5	43.3			
Nb	4.12	4.99	9.80	11.6	10.6	12.3	10.1	9.39	9.15			
Th	10.6	8.92	1.72	2.66	2.85	1.57	1.83	3.52	1.61			
Pb	19.5	22.0	15.4	16.7	13.7	15.3	11.5	13.8	11.9			
Ga	13.7	14.9	16.5	18.2	18.3	18.4	19.3	14.5	14.0			
Zn	70.0	69.7	18.4	14.9	23.8	33.9	14.6	14.4	14.7			
Ni	20.0	7.44										
V	4.2	2.81	2.31	2.27	4.94	3.43	3.30	3.43	4.86			
Cr	40.1	19.3										
Hf	2.92	2.17	2.45	2.74	2.79	2.27	3.01	3.36	3.28			
Cs	1.00	1.64	5.77	7.80	6.67	7.37	5.56	5.53	5.34			
Sc	1.45	1.22	0.718	0.791	0.952	1.04	0.958	0.14	0.194			
Ta	0.26	0.39	1.90	3.52	3.27	3.20	2.42	1.48	1.35			
Co	2.25	1.26	0.376	0.225	0.23	0.789	0.394	0.434	0.292			
Li	15.33	18.53	19.96	16.30	12.81	10.16	11.46	11.34	9.680			
Be	0.51	0.58	2.16	3.74	3.13	3.08	2.12	1.91	1.64			
U	1.26	1.97	2.38	1.71	1.53	1.25	1.91	1.60	1.35			
W	4.04	3.46	3.16	1.77	2.79	1.94	1.81	1.67	1.65			
Sn	1.27	2.29	5.35	11.43	6.21	5.58	3.92	5.36	5.14			
Mo	4.02	2.95	1.23	0.73	0.815	1.44	0.42	2.90	1.00			
Ti	340	244	105	31.8	29.8	32.8	107.5	43.8	38.4			
Bi	0.34	0.08										
Rb/Sr	0.44	0.60	11.0	2.03	9.12	8.57	8.79	14.5	11.5			
Nb/Ta	15.8	12.8	5.16	3.31	3.24	3.85	4.16	6.34	6.76			

续表 1

地点		图拉尔根沟										黄 山 南				
样品编号		X-531	X-532	X-268	X-270	X-271	X-272	X-273	X-274	X-275	3600 *	3603 *				3605 *
稀土元素($\times 10^{-6}$)																
La		27.0	16.8	4.92	9.49	9.76	5.26	6.67	9.46	4.37		18.4				
Ce		44.15	28.07	11.49	20.10	22.96	11.58	16.24	25.13	12.52		38.23				
Pr		5.1	3.43	1.32	2.40	2.66	1.44	1.97	2.75	1.35		3.63				
Nd		20.5	14.7	4.94	8.81	9.89	5.45	7.40	10.3	5.23		14.6				
Sm		3.64	2.84	1.82	2.46	3.08	2.16	2.78	2.68	1.66		3.03				
Eu		0.96	0.81	0.046	0.056	0.065	0.037	0.051	0.046	0.026		0.55				
Gd		2.43	2.21	2.37	2.62	3.78	2.66	3.24	2.63	1.89		2.61				
Tb		0.31	0.29	0.43	0.435	0.673	0.446	0.564	0.43	0.372						
Dy		1.41	1.49	2.93	2.87	4.58	3.06	3.78	2.20	2.03						
Ho		0.21	0.21	0.51	0.59	0.89	0.61	0.69	0.34	0.30		0.69				
Er		0.56	0.58	1.35	1.63	2.50	1.70	1.89	0.811	0.732		1.58				
Tm		0.08	0.08	0.20	0.25	0.37	0.27	0.27	0.12	0.096		0.19				
Yb		0.64	0.57	1.25	1.67	2.37	1.81	1.70	0.696	0.616		1.41				
Lu		0.09	0.08	0.156	0.232	0.323	0.254	0.229	0.084	0.075		0.21				
Y		6.31	6.82	16.7	17.8	28.0	19.5	23.3	9.78	9.39						
Σ REE		237	159	60.9	101	115	64.6	85.2	117	61.2						
LREE/HREE		17.7	12.1	2.7	4.2	3.1	2.4	2.8	6.9	4.1						
TE _{1,3}		0.95	0.96	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.2						
Eu/Eu *		0.91	0.91	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04		0.55				
La _N /Yb _{CN}		28.4	19.8	2.65	3.83	2.78	1.96	2.64	9.16	4.78		8.78				
同位位素																
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr			2.01				24.5									
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr			0.711606				0.788307									
2σ			28				15									
I _{Sr}			0.70396				0.69768									
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd			0.128579				0.136157									
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd			0.512906				0.512906									
2σ			12				11									
ε _{Nd} (<i>t</i>)			6.2				7.2									
<i>t</i> _{DM} (Ga)			0.56				0.48									
温度计																
<i>T</i> _{REE} (°C)		714	696	676	722	726	672	698	723	674		733				
<i>T_z</i> (°C)		710	703	696	702	707	686	713	700	697						688

注：* 数据引自顾连兴等(1993)；A = or × (or + ab + an)/(or + an)，P = an × (or + ab + an)/(or + an)，据 Le Maitre (1976)；A/CNK = Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O)(摩尔值之比)；TE_{1,3} 四分组效应因子计算依据 Iber(1999)的方法；Eu/Eu* = Eu_{CN}/(Sm_{CN} × Gd_{CN})^{1/2}；下标 CN 代表该数据为球粒陨石数据，球粒陨石数据取自 Boynton (1984)；稀土温度计(*T*_{REE})据 Montel(1993)，锆石饱和温度计(*T_z*)据 Watson and Harrison(1983)。模式年龄为一阶段模式年龄：*t*_{DM} = (1/λ_{Sm}) × ln(1 + ((¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_s - 0.51315)/((¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_s - 0.2137))，其中 λ_{147Sm} = 6.54 × 10⁻¹² a⁻¹。

表2 黄山—镜儿泉岩带过铝花岗岩斜长石电子探针分析结果(wt%)
Table 2 Electron microprobe analyses of plagioclase from peraluminous granites in the Huangshan-Jing'erquan belt(wt%)

岩体	黄山南白云母花岗岩					镜儿泉白云母花岗岩					图拉尔根沟二云母花岗岩										
	X-415			X-492		X-494			X-495		X-528			X-530		X-531					
样品编号	5	6	9	1	2	4	1	5	6	3	4	7	2	5	6	4	2	4	6	7	8
SiO ₂	66.88	67.23	68.01	68.42	67.37	68.56	67.56	66.06	65.92	66.36	67.64	66.76	66.73	66.52	65.62	66.19	65.83	65.40	65.43	65.27	
TiO ₂	0	0	0	0	0	0	0.005	0	0	0	0.047	0.011	0	0	0.003	0.005	0.013	0.004	0.016	0.01	
Al ₂ O ₃	20.82	20.69	20.38	20.81	20.82	20.48	21.83	21.56	21.93	21.07	20.53	21.28	21.13	22.09	21.49	23.07	22.80	23.29	23.20	22.97	
FeO	0	0	0.063	0.043	0	0.026	0.043	0.003	0.063	0	0.026	0	0.014	0	0	0	0	0	0.014	0	
MnO	0	0.006	0	0.001	0.01	0.009	0	0.003	0	0.022	0.01	0	0.048	0	0	0.023	0	0.034	0.003		
MgO	0	0.001	0.005	0.016	0	0	0	0.006	0	0	0	0.005	0.003	0	0.002	0.002	0	0	0	0	
BaO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CaO	1.76	1.52	1.08	1.83	2.11	1.55	3.01	3.22	3.20	2.58	1.75	2.80	2.59	3.16	2.94	0.00	2.82	3.13	3.01	2.81	
Na ₂ O	11.3	11.3	11.1	8.27	9.06	9.57	8.12	8.78	8.62	8.59	9.32	8.62	8.83	8.48	10.3	10.7	8.60	8.53	8.63	8.56	
K ₂ O	0.19	0.12	0.16	0.12	0.10	0.08	0.23	0.17	0.42	0.27	0.12	0.22	0.17	0.14	0.29	0.00	0.27	0.14	0.27	0.19	
Total	101.0	100.8	100.8	99.51	99.47	100.3	100.8	99.80	100.2	98.89	99.43	99.7	99.51	100.4	100.6	99.96	100.4	100.5	100.6	99.81	
以32个氧为基础的阳离子数																					
Si	11.66	11.71	11.82	11.92	11.8	11.9	11.69	11.59	11.54	11.72	11.85	11.7	11.71	11.58	11.5	11.54	11.48	11.39	11.4	11.44	
Al	4.274	4.245	4.172	4.268	4.295	4.186	4.447	4.456	4.523	4.38	4.235	4.39	4.368	4.53	4.436	4.737	4.681	4.778	4.759	4.74	
Ti	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0.006	0.001	0	0	0	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	
Fe ²	0	0	0.009	0.006	0	0.004	0.006	0	0.009	0	0.004	0	0.002	0	0	0	0	0	0.002	0	
Mn	0	0.001	0	0	0.001	0.001	0	0	0	0.003	0.001	0	0.007	0	0	0	0.003	0	0.005	0	
Mg	0	0	0.001	0.004	0	0	0	0.002	0	0	0	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0	0	0	0	
Ba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ca	0.329	0.283	0.201	0.342	0.397	0.288	0.558	0.606	0.6	0.489	0.328	0.526	0.487	0.589	0.552	0	0.527	0.584	0.561	0.527	
Na	3.836	3.803	3.726	2.792	3.077	3.221	2.722	2.987	2.926	2.941	3.166	2.928	3.005	2.863	3.501	3.613	2.906	2.882	2.914	2.908	
K	0.043	0.028	0.036	0.026	0.023	0.018	0.051	0.039	0.095	0.06	0.026	0.049	0.037	0.03	0.065	0	0.061	0.032	0.06	0.043	
Cations	20.14	20.07	19.97	19.35	19.6	19.62	19.47	19.68	19.7	19.59	19.62	19.59	19.62	19.59	20.06	19.89	19.66	19.67	19.7	19.66	
Ab	91.2	92.4	94	88.4	88	91.3	81.7	82.2	80.8	84.3	89.9	83.6	85.2	82.2	85	100	83.2	82.4	82.4	83.6	
An	7.8	6.9	5.1	10.8	11.4	8.2	16.8	16.7	16.6	14	9.3	15	13.8	16.9	13.4	0	15.1	16.7	15.9	15.2	
Or	1	0.7	0.9	0.8	0.7	0.5	1.5	1.1	2.6	1.7	0.7	1.4	1	0.9	1.6	0	1.7	0.9	1.7	1.2	

表 3 黄山—镜儿泉岩带过铝花岗岩石榴子电子探针分析结果 (wt%)

Table 3 Electron microprobe analyses of garnet from peraluminous granites in the Huangshan-Jing'erquan belt (wt%)

岩体	黄山南白云母花岗岩						镜儿泉白云母花岗岩						图拉尔根沟二云母花岗岩					
	X-415		X-416		X-417		X-492		X-495		X-528		X-530		X-531			
	3	4	4	7	7	3	5	8	1	5	1	3	4	1	3	5	5	10
样品编号																		
SiO ₂	37.04	36.97	36.32	36.97	36.52	36.97	36.52	37.23	36.90	36.22	37.39	36.78	36.90	37.18	37.38	37.40	37.05	37.07
TiO ₂	0.02	0.03	0.00	0.00	0.10	0.00	0.10	0.01	0.08	0.12	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01
Al ₂ O ₃	20.48	20.62	20.74	20.77	20.69	20.77	20.69	20.35	20.38	20.62	22.16	20.79	20.64	20.44	20.33	20.46	20.15	20.33
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FeO	29.06	27.82	26.81	29.21	28.65	29.21	28.65	29.68	21.97	22.33	36.43	39.08	38.74	39.51	36.40	39.10	38.92	38.96
MnO	12.57	13.70	14.62	11.68	11.96	11.68	11.96	10.66	19.59	19.58	2.06	2.95	2.04	2.36	2.86	2.27	2.60	2.62
MgO	0.60	0.48	0.36	0.95	1.03	0.95	1.03	1.04	0.81	0.77	0.97	0.63	1.11	0.53	0.46	0.51	0.86	1.04
CaO	0.59	0.48	0.71	0.39	0.31	0.39	0.31	0.29	0.45	0.55	0.94	0.99	0.93	0.78	1.29	0.81	0.98	1.07
Na ₂ O	0.05	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.05	0.19	0.07	0.02	0.00	0.07	0.01	0.05	0.02	0.04
F	0.17	0.18	0.15	0.10	0.16	0.10	0.16	0.18	0.02	0.06	0.27	0.23	0.15	0.20	0.22	0.22	0.15	0.20
Total	100.6	100.3	99.73	100.1	99.4	100.1	99.4	99.44	100.2	100.4	100.3	101.5	100.5	101.1	98.95	100.8	100.8	101.3
以 12 个氧为基础的阳离子数																		
Si	3.032	3.037	2.999	3.03	3.015	3.03	3.015	3.073	3.021	2.957	3.043	2.987	3.013	3.033	3.106	3.058	3.027	3.008
Al	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0.043	0	0.013	0	0	0	0	0	0
Sum T	3.032	3.037	3	3.03	3.015	3.03	3.015	3.073	3.021	3	3.043	3	3.013	3.033	3.106	3.058	3.027	3.008
Al ^{VI}	1.974	1.995	2.016	2.005	2.011	2.005	2.011	1.978	1.965	1.941	2.124	1.976	1.984	1.964	1.99	1.97	1.938	1.943
Ti	0.001	0.002	0	0	0.006	0	0.006	0.001	0.005	0.008	0.001	0	0.001	0.001	0	0	0.001	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum A	1.975	1.997	2.016	2.005	2.017	2.005	2.017	1.979	1.97	1.948	2.125	1.976	1.985	1.965	1.99	1.97	1.94	1.943
Fe ²⁺	1.989	1.912	1.852	2.002	1.978	2.002	1.978	2.049	1.504	1.525	2.48	2.655	2.645	2.695	2.53	2.673	2.659	2.644
Mg	0.073	0.058	0.044	0.116	0.126	0.116	0.126	0.128	0.098	0.094	0.117	0.077	0.135	0.065	0.056	0.062	0.105	0.126
Mn	0.871	0.953	1.023	0.811	0.836	0.811	0.836	0.745	1.358	1.354	0.142	0.203	0.141	0.163	0.202	0.157	0.18	0.18
Ca	0.052	0.042	0.063	0.034	0.027	0.034	0.027	0.026	0.04	0.048	0.082	0.086	0.082	0.068	0.115	0.071	0.086	0.093
Na	0.008	0	0.003	0.002	0	0	0	0	0.009	0.03	0.011	0.004	0	0.011	0.001	0.009	0.003	0.006
Sum B	2.993	2.966	2.984	2.965	2.968	2.965	2.968	2.948	3.009	3.052	2.831	3.024	3.002	3.002	2.904	2.972	3.034	3.048
Sum cat	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Alm	0	64.45	62.05	67.52	66.65	67.52	66.65	69.48	0.00	0.00	0.00	87.79	88.09	0.00	87.13	0.00	87.65	86.74
Gross	0	1.43	2.10	1.15	0.92	1.15	0.92	0.88	0.00	0.00	0.00	2.85	2.72	0.00	3.95	0.00	2.83	3.05
Pyrope	0	1.97	1.48	3.91	4.25	3.91	4.25	4.35	0.00	0.00	0.00	2.54	4.50	0.00	1.94	0.00	3.47	4.12
Spess	0	32.1	34.3	27.3	28.2	27.3	28.2	25.3	0.00	0.00	0.00	6.71	4.69	0.00	6.94	0.00	5.94	5.90

注：Alm：铁铝榴石；Gross：钙铝榴石；Pyrope：镁铝榴石；Spess：锰铝榴石。

表4 黄山—镜儿泉岩带过铝花岗岩白云母电子探针分析结果

Table 4 Electron microprobe analyses of muscovite from peraluminous gneisses in the Huangshan-Jing'erquan belt

岩体		黄山南白云母花岗岩								镜儿泉白云母花岗岩								图拉尔根湾二云母花岗岩							
样品编号		X-415				X-492				X-494				X-495				X-528		X-530		X-531			
		1	2	8		6	7	9	2	3	4	2	6	8	7	9	4	7	9	4					
SiO ₂		47.05	47.56	47.14		46.79	47.12	46.95	46.85	47.73	47.26	47.51	47.80	47.93	48.52	47.49		48.52	47.49	48.42					
TiO ₂		0.04	0.05	0.04		0.15	0.06	0.02	0.30	0.44	0.43	0.60	0.62	0.54	0.29	0.21		0.29	0.21	0.46					
Al ₂ O ₃		35.33	35.37	35.70		34.89	35.08	35.20	33.50	33.89	33.67	33.39	33.38	34.08	34.87	34.51		34.87	34.51	34.82					
Cr ₂ O ₃		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0					
FeO		2.07	1.96	2.14		3.09	3.04	2.66	3.66	3.63	3.62	3.84	3.82	3.70	2.05	2.82		2.05	2.82	1.95					
MnO		0.02	0.03	0.09		0.00	0.03	0.02	0.09	0.04	0.10	0.04	0.05	0.01	0.02	0.01		0.02	0.01	0.00					
MgO		0.23	0.34	0.21		0.29	0.21	0.23	0.35	0.37	0.38	0.45	0.47	0.39	0.01	0.00		0.01	0.00	0.00					
CaO		0.007	0.017	0.002		0.110	0.046	0.000	0.063	0.024	0.018	0.145	0.053	0.000	0.278	0.230		0.278	0.230	0.478					
Na ₂ O		0.43	0.43	0.72		0.49	0.32	0.58	0.65	0.80	0.76	0.44	0.50	0.59	0.43	0.56		0.43	0.56	0.51					
K ₂ O		10.42	10.67	10.31		10.05	10.57	10.60	9.48	10.16	10.23	10.03	10.30	10.05	10.54	10.30		10.54	10.30	10.31					
F		0.18	0.21	0.14		0.22	0.12	0.20	0.13	0.08	0.14	0.05	0.07	0.09	0.03	0.08		0.03	0.08	0.06					
Cl		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0					
Total		95.78	96.63	96.47		96.07	96.58	96.46	95.08	97.17	96.59	96.49	97.07	97.37	97.03	96.19		97.03	96.19	97.01					
-O = F + Cl		0.08	0.09	0.06		0.09	0.05	0.08	0.05	0.04	0.06	0.02	0.03	0.04	0.01	0.03		0.01	0.03	0.02					
CTotal		95.7	96.54	96.41		95.98	96.53	96.38	95.03	97.13	96.53	96.47	97.04	97.33	97.02	96.16		97.02	96.16	96.99					
以 22 个氧为基础的阳离子数																									
Si		5.96	5.975	5.931		5.937	5.949	5.937	6.006	6.004	5.992	6.015	6.025	6.006	6.054	6.007		6.054	6.007	6.041					
Al ^{IV}		2.04	2.025	2.069		2.063	2.051	2.063	1.994	1.996	2.008	1.985	1.975	1.994	1.946	1.993		1.946	1.993	1.959					
Sum T		8	8	8		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8		8	8	8					
Al ^{VI}		3.229	3.208	3.221		3.15	3.165	3.178	3.064	3.025	3.018	2.993	2.98	3.034	3.177	3.147		3.177	3.147	3.157					
Ti		0.004	0.004	0.003		0.015	0.006	0.002	0.029	0.041	0.041	0.057	0.059	0.051	0.027	0.02		0.027	0.02	0.043					
Fe ²⁺		0.219	0.206	0.225		0.327	0.32	0.281	0.393	0.382	0.384	0.407	0.403	0.388	0.214	0.298		0.214	0.298	0.204					
Cr		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0					
Mn		0.002	0.003	0.009		0	0.003	0.002	0.01	0.005	0.01	0.004	0.005	0.001	0.002	0.001		0.002	0.001	0					
Mg		0.044	0.064	0.04		0.054	0.039	0.043	0.067	0.069	0.072	0.086	0.089	0.073	0.002	0		0.002	0	0.064					
Ca		0.001	0.002	0		0.015	0.006	0	0.009	0.003	0.002	0.02	0.007	0	0.037	0.031		0.037	0.031	0.064					
Na		0.106	0.105	0.175		0.121	0.077	0.142	0.162	0.195	0.187	0.108	0.122	0.144	0.105	0.138		0.105	0.138	0.124					
K		1.683	1.711	1.655		1.626	1.702	1.71	1.55	1.63	1.654	1.62	1.656	1.606	1.677	1.661		1.677	1.661	1.641					
Cations		13.288	13.303	13.328		13.308	13.318	13.358	13.284	13.350	13.368	13.295	13.321	13.297	13.241	13.296		13.241	13.296	13.233					
Fe ²⁺ / (Fe ²⁺ + Mg)		0.83	0.76	0.85		0.86	0.89	0.87	0.85	0.85	0.84	0.83	0.82	0.84	0.99	1		0.99	1	1					
Mg/(Fe ²⁺ + Mg)		0.17	0.24	0.15		0.14	0.11	0.13	0.15	0.15	0.16	0.17	0.18	0.16	0.01	0		0.01	0	0					

注：FeO 为全铁，分子结构式计算按 Richard (1995)，以下表 4 ~ 6 均同。

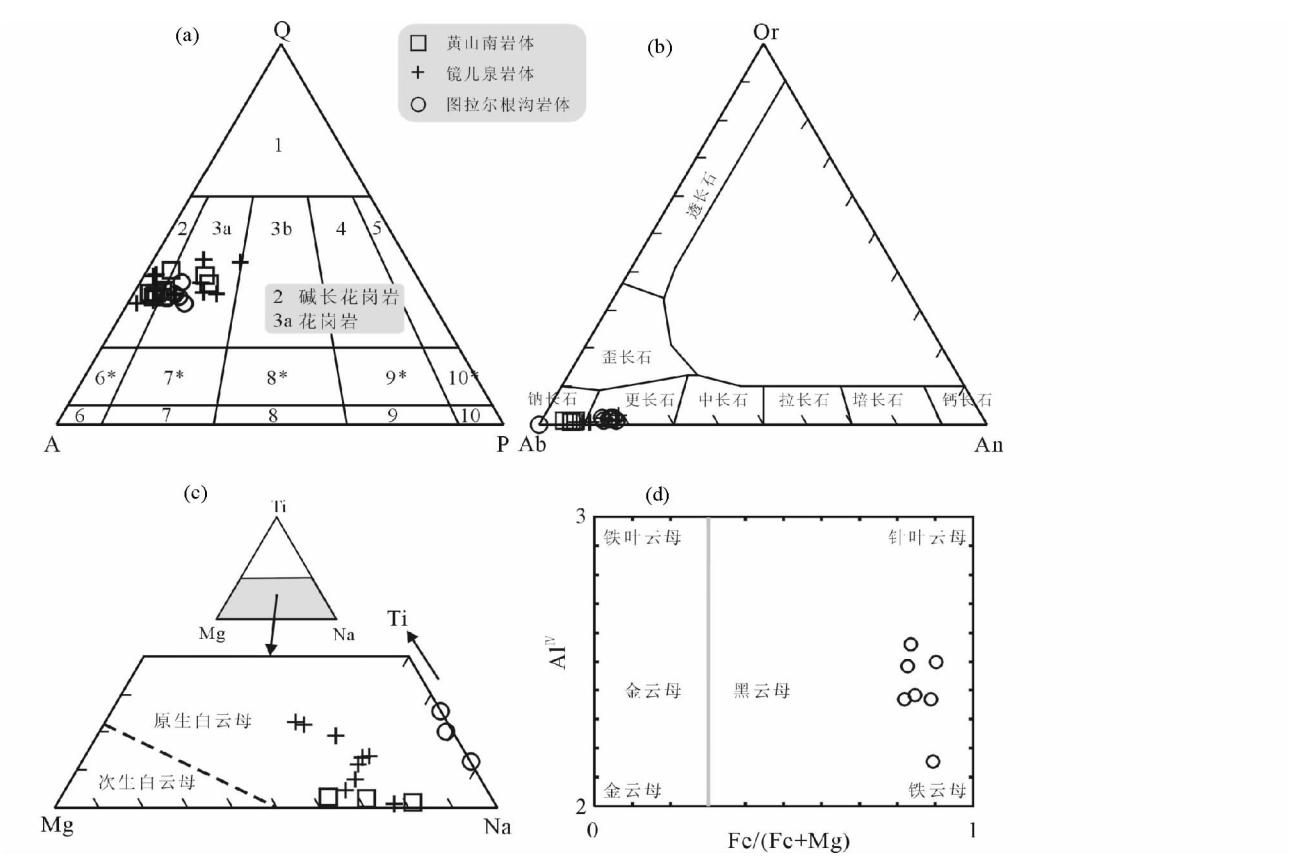


图3 黄山—镜儿泉地区过铝花岗岩岩石及矿物分类图解
a-侵入岩 CIPW 标准矿物 QAP 分类图解 (仿 Streckeisen and Le Maitre, 1979) ; b-An-Ab-Or 长石分类图解 (仿 Smith, 1974) ; c-白云母 Mg-Ti-Na 三角分类图解 (仿 Miller *et al.* , 1981) ; d-黑云母分类图解 (仿 Deer *et al.* , 1966)
Fig. 3 Classification diagrams of rock and mineral for peraluminous granites in the Huangshan-Jing'erquan area
a-CIPW normative mineral QAP classification diagram for intrusions (after Streckeisen and Le Maitre, 1979) ; b-Classification diagram for feldspars (after Smith, 1974) ; c-Projection of white micas in triangular Mg-Ti-Na diagram with boundary between secondary and primary micas according to Miller *et al.* (1981) ; and d-Classification diagram for black micas (Deer *et al.* , 1966)

常呈他形(图 2c),但图拉尔根岩体含有黑云母。镜儿泉岩体白云母呈短板状半自形(图 2b)。在 Miller *et al.* (1981) 的 Mg-Ti-Na 三角投影图(图 3c)上,上述三个花岗岩中的白云母均投影于原生白云母区域,其中图拉尔根岩体中的白云母 Ti 的含量明显较黄山南的高,但几乎不含镁(表 4)。

黑云母: 黄山南岩体及镜儿泉岩体中黑云母缺失或少见,而在图拉尔根岩体中常见,粒径大者可达 0.5mm × 1.0mm,其 Fe/(Fe + Mg) 值为 0.82 ~ 0.90,介于铁叶云母与铁云母之间(图 3d,表 5)。

4 岩石地球化学特征

4.1 测试技术

锆石样品靶由北京离子探针中心制备,其直径 25mm,厚 5mm。阴极发光图像在中国科学院广州地球化学研究所同位素年龄学和地球化学重点实验室(JXA-8100)拍摄,分析电压 15Kv,电流 15nA。U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学

国家重点实验室由美国 Perkin Elmer/SCIEX 生产的四极杆 ICP-MS Elan6100DRC 与德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M ArF 准分子激光剥蚀系统联机完成。激光束斑直径于 4 μ m ~ 120 μ m 之间可调,本次实验采用 30 μ m。采用 He 作为剥蚀物质载气,并用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 实现仪器最佳化,以便达到最高的灵敏度、最小的氧化物产率、最低的背景值和稳定的信号。采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式(peak jumping)。每隔 5 个样品分析点测一次标准样,以便保证标准和样品的仪器条件完全一致。每 20 个样测两次 NIST SRM610。以 Si 作为内标测定锆石中的 U,Th 和 Pb 含量,以国际标准 91500 锆石作为外标,其详细分析方法参见 Yuan *et al.* (2004)。样品的同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER (ver4.0, Macquarie University) 程序; 年龄及谐和图的绘制采用 Isoplot ver2.49 (Ludwig,1991) 程序。详细的数据处理方法参见 Yuan *et al.* (2003)。

表5 东天山图拉尔根沟二云母花岗岩黑云母电子探针分析结果(wt%)

Table 5 Electron microprobe analyses of biotite from the Tula' ergengou monzogranite in eastern Tianshan(wt%)

样品编号	X-528		X-530		X-531		
	8	6	7	8	2	6	9
SiO ₂	33.72	34.75	33.91	33.38	32.95	34.58	33.02
TiO ₂	1.72	1.16	0.96	1.45	2.21	1.60	1.64
Al ₂ O ₃	19.32	21.69	20.94	20.65	20.00	19.95	20.57
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
FeO	28.16	28.82	27.88	30.02	26.68	27.63	29.04
MnO	0.14	0.12	0.10	0.09	0.16	0.22	0.20
MgO	2.88	1.94	1.98	1.83	3.15	3.47	3.21
BaO	0	0	0	0	0	0	0
CaO	0	0	0.015	0	0.177	0.134	0.188
Na ₂ O	0.08	0.07	0.08	0.12	0.13	0.09	0.14
K ₂ O	9.26	0.00	9.00	9.44	8.39	8.99	8.08
F	0.42	0.44	0.52	0.48	0.51	0.48	0.49
Cl	0	0	0	0	0	0	0
Total	95.69	88.99	95.39	97.47	94.35	97.14	96.58
-O = F + Cl	0.18	0.19	0.22	0.2	0.22	0.2	0.21
CTotal	95.51	88.8	95.17	97.27	94.13	96.94	96.37
以22个氧为基础的阳离子数							
Si	5.615	5.844	5.632	5.502	5.515	5.630	5.440
Al ^{IV}	2.385	2.156	2.368	2.498	2.485	2.370	2.560
Al ^{VI}	1.404	2.140	1.728	1.512	1.459	1.456	1.430
Ti	0.215	0.147	0.12	0.18	0.278	0.196	0.203
Fe ²⁺	3.922	4.054	3.872	4.138	3.734	3.762	4.001
Cr	0	0	0	0	0	0	0
Mn	0.02	0.017	0.014	0.013	0.022	0.03	0.028
Mg	0.714	0.486	0.489	0.451	0.787	0.841	0.788
Ba	0	0	0	0	0	0	0
Ca	0	0	0.003	0	0.032	0.023	0.033
Na	0.025	0.023	0.025	0.038	0.042	0.029	0.044
K	1.967	0	1.908	1.986	1.792	1.867	1.699
Cations	16.267	14.867	16.159	16.318	16.146	16.204	16.226
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ + Mg)	0.85	0.89	0.89	0.9	0.83	0.82	0.84
Mg/(Fe ²⁺ + Mg)	0.15	0.11	0.11	0.1	0.17	0.18	0.16

地球化学测试除矿物的探针分析将岩石直接制成薄片喷碳待用外,其它的分析均采用粉样,即将新鲜岩石样品 1kg ~ 2kg 经颧式破碎机粉碎至 <200 目待用。

主量元素(除 FeO 外)在南京大学现代分析中心用日本岛津公司生产的 VF-320 型单道 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定。首先称取 0.6g 样品,然后加入适量硼酸高温熔融成玻璃片,最后在 XRF 上采用外标法测定氧化物含量,分析精度优于 5%,详细实验步骤见 Franzini *et al.* (1972)。FeO 由南京大学地球科学系实验室采用湿法测定,分析精度优于 0.5% ~ 1%。

微量元素及稀土元素在南京大学内生金属矿床成矿作用研究国家重点实验室用 Finigan MAT 公司生产的 Element II 型 HR-ICP-MS 仪器测试,首先称取 50mg 样品和国家标准(GRS1、GRS2、GRS3)用酸制成溶液,然后在上述 Element II ICP-MS 上进行测定。分析精度总体优于 10%。详细的样品

准备及测试方法见高剑峰等(2003)。

Sr-Nd 同位素比值测试在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成,测量仪器为德国 Finnigan 公司 MAT262 热电离子质谱仪。分析前的样品处理程序为:先称取大约 100mg 的全岩粉样,加入适量的⁸⁷Rb-⁸⁴Sr 和¹⁴⁹Sm-¹⁵⁰Nd 混合稀释剂和纯化的 HF-HClO₄ 酸混合试剂后,在高温下完全溶解。Rb-Sr 和 REE 的分离和纯化在装有 2ml AG 50W-X12 交换树脂(200 ~ 400 目)的石英交换柱进行,而 Sm 和 Nd 的分离和纯化在石英交换柱中用 1ml Teflon[®] 粉末为交换介质完成。

Sr 同位素比值测定采用 Ta 金属带和 Ta-HF 发射剂,而 Rb, Sm 和 Nd 同位素比值采用双 Re 金属带测试。用标准化值⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 对所测 Sr, Nd 同位素比值进行校正。Rb-Sr, Sm-Nd 的全流程本底分别为 100pg 和 50pg 左右。标样分析结果 NBS987 Sr 比值为

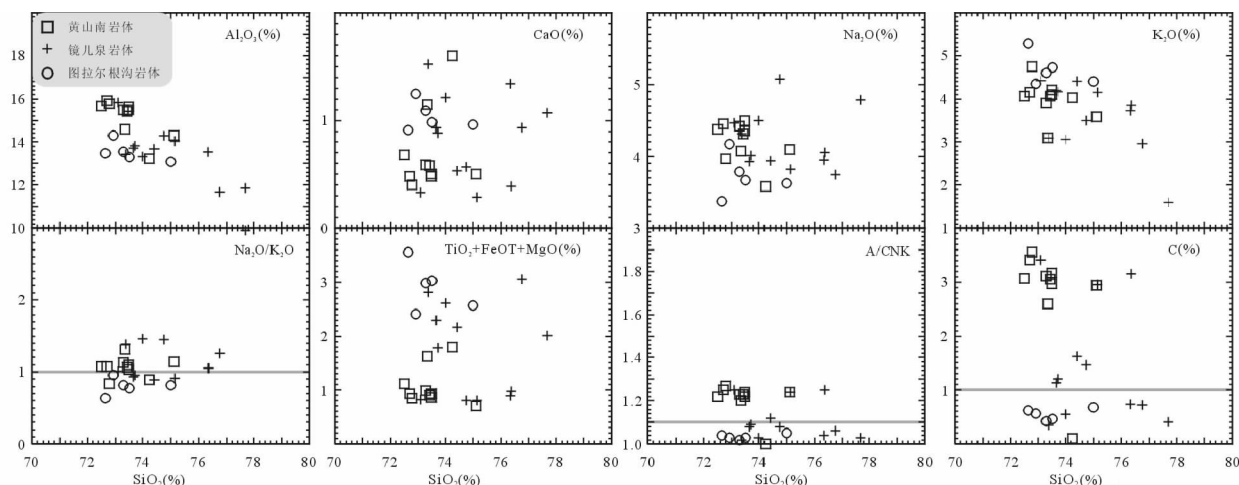


图4 黄山—镜儿泉地区过铝花岗岩主要元素 Harker 图解

Fig.4 Harker variation diagram of major elements of peraluminous granites in the Huangshan-Jing'erquan area

0.710236 ± 12 ; JMC Nd 比值为 0.511908 ± 12 。实验室空白对 Sr 为 $0.2 \sim 0.5\text{ng}$, 对 Nd 约为 50ng 。详细实验流程参见 Chen *et al.* (2000b)。

矿物成分分析是在南京大学内生金属矿床成矿作用研究国家重点实验室用 JEOL JXA-8800M 电子探针仪测定。电子探针束斑直径 $< 1\mu\text{m}$, 加速电压 15kV , 电流 10nA ; 使用的标样均为美国国家标准局的矿物标样, 各元素使用的具体标样见吴昌志等(2004)。

4.2 主量元素

本次研究选取黄山南、镜儿泉及图拉尔根沟等三个岩体共 19 个新鲜岩石样品作了主量及微量元素分析, 每个岩体各选取一个新鲜样品进行 Sr-Nd 同位素分析, 分析结果见表 1。结果表明, 三个岩体 SiO_2 含量变化于 $72.51\% \sim 77.69\%$ 之间(图 4), 镜儿泉岩体的 SiO_2 含量变化幅度较大且含量也较高。从图 4 及表 1 看出, 黄山南岩体具有较高的 Al_2O_3 、 Na_2O 含量和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值($110 \sim 1592$), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$, 而 $\text{TiO}_2 + \text{FeOT} + \text{MgO} (< 2\%)$ 和 CaO 含量较低, 铝饱和指数 $\text{A/CNK} > 1.1$, 标准刚玉分子(C)值除样品 3605* 为 0.11% 外, 其余均大于 1% ($2.6\% \sim 3.56\%$), 在 AFC 图解中落入斜长石-堇青石-红柱石区域内, 在 A/NK - A/CNK 图解中落入强过铝质花岗岩区域内(图 5)。与黄山南岩体不同的是, 图拉尔根沟岩体 Al_2O_3 、 Na_2O 含量及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值($135 \sim 205$)较低, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 1$, 而 $\text{TiO}_2 + \text{FeOT} + \text{MgO} (> 2\%)$ 和 CaO 含量则较高; $\text{A/CNK} = 1.02 \sim 1.04$, $\text{C} < 1\%$ ($0.41\% \sim 0.62\%$), 在 AFC 图解中落入斜长石-堇青石-紫苏辉石区域, 表现为弱过铝质(表 1 及图 5)。镜儿泉岩体化学成分变化较大(图 4), 其主要氧化物含量覆盖了黄山南岩体及图拉尔根沟岩体的范围, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值既有小于 1 的也有大于 1 的, A/CNK 值既有大于 1.1 也有在 $1 \sim 1.1$ 之间的, 同样, C 值也有大于和小于 1% 的(图 4), 表现出既有过铝质岩性

又有弱过铝质岩性。

4.3 微量和稀土元素

在微量元素及稀土元素特征上, 黄山南与图拉尔根沟岩体完全不同, 而镜儿泉岩体则兼具两个岩体的特征。从表 1 及图 6 可以看出, 黄山南岩体具有较高的 Rb ($146.4 \times 10^{-6} \sim 179.8 \times 10^{-6}$)、Y ($9.39 \times 10^{-6} \sim 28.0 \times 10^{-6}$) 值及 Rb/Sr 比值($8.57 \sim 14.5$, 只有一个为 2.03), 低的 Sr ($10.17 \times 10^{-6} \sim 88.67 \times 10^{-6}$)、Ba ($17.86 \times 10^{-6} \sim 35.06 \times 10^{-6}$) 值和 Nb/Ta 比值($3.24 \sim 6.76$)。相反, 图拉尔根沟岩体则具有较低的 Rb ($79.32 \times 10^{-6} \sim 108.3 \times 10^{-6}$)、Y ($6.31 \times 10^{-6} \sim 9.82 \times 10^{-6}$) 值及 Rb/Sr 比值($0.44 \sim 0.69$), 以及甚高的 Ba ($410.8 \times 10^{-6} \sim 1919 \times 10^{-6}$)、较高的 Sr ($127.0 \times 10^{-6} \sim 185.2 \times 10^{-6}$) 值和 Nb/Ta 比值($12.8 \sim 18.4$)。在多元素原始地幔标准化图解上(图 7b), 黄山南岩体强烈亏损 Ba、Sr 和 Ti, 而图拉尔根沟岩体则亏损 Ta、Nb 和 Ti; 在稀土元素方面, 黄山南岩体具有低的 $(\text{La}/\text{Y})_{\text{CN}}$ ($1.96 \sim 9.16$) 和 LREE/HREE ($2.4 \sim 6.9$) 比值, 表明其轻/重稀土分馏不明显, 在稀土元素球粒陨石标准化曲线上表现为强烈亏损 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.04 \sim 0.06$, 样品 3603* 为 0.55 , 见表 1 及图 7a), 配分曲线呈“V”字形向右缓倾斜, $\text{TE}_{1,3} = 1.02 \sim 1.22$, 显示其具四分组效应(表 1 及图 6, 7a); 图拉尔根沟岩体与黄山南岩体相反, 具高的 $(\text{La}/\text{Y})_{\text{CN}}$ ($12.8 \sim 28.4$) 和 LREE/HREE ($8.6 \sim 17.7$) 比值(表 1 及图 6), 表明轻/重稀土分馏显著, 铕负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.65 \sim 0.96$) 不明显, 其稀土球粒陨石标准化曲线表现为平滑且陡倾斜的曲线(重稀土曲线平坦, 标准化值极低, 仅为球粒陨石值的 $2 \sim 5$ 倍, 图 7a)。镜儿泉岩体无论在微量元素还是在稀土元素方面, 其不同标本的特征分别具有黄山南及图拉尔根沟两个岩体的特征或过渡于两者之间(图 7)。

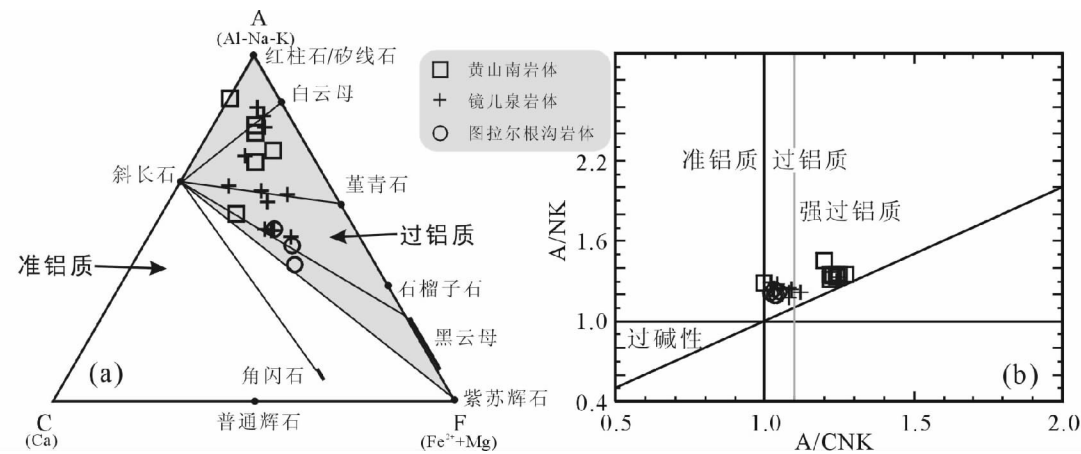


图5 黄山—镜儿泉地区过铝花岗岩判别图解
a-花岗岩 ACF 图解(据 White and Chappell, 1977); b-A/NK-A/CNK 图解。其中: $[A/NK = Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$, 摩尔比], 仿 Maniar and Piccoli (1989)
Fig. 5 Discrimination diagrams of peraluminous granites in the Huangshan-Jing'erquan area
a-ACF of for the peraluminous granites (after White and Chappell, 1977); b-A/NK-A/CNK plot of the peraluminous granites, A/NK is molecular ratio of $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$ and A/CNK is molecular ratio of $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ (after Maniar and Piccoli, 1989)

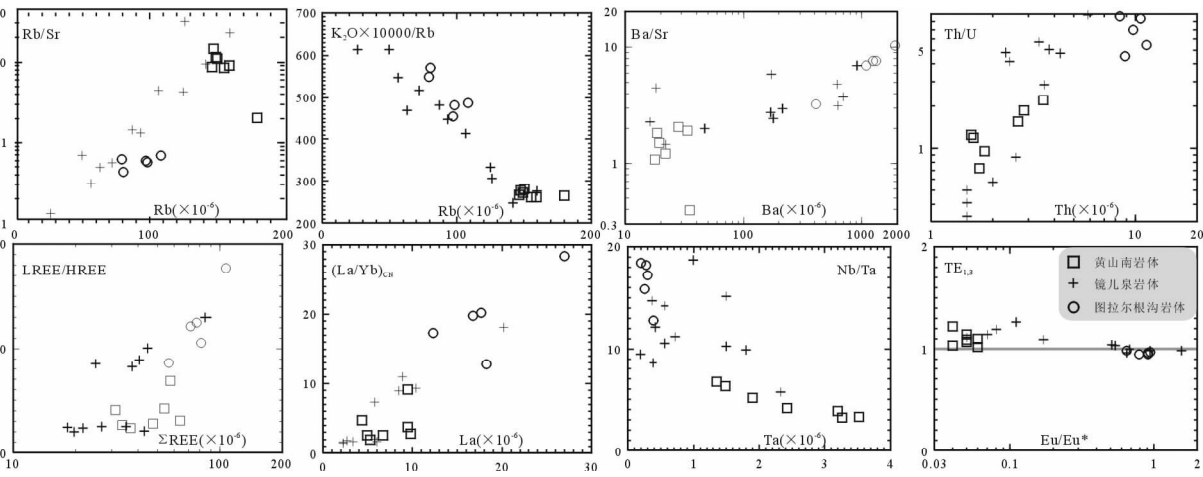


图6 黄山—镜儿泉地区过铝花岗岩微量元素 Harker 图解
Fig. 6 Harker variation diagram of trace element of peraluminous granite in the Huangshan-Jing'erquan area

4.4 同位素

Sr-Nd 同位素: 黄山南、镜儿泉和图拉尔根沟三个岩体的 Sr-Nd 同位素分析结果见表 1 及图 8。结果表明,它们均具有低的锶同位素初始比值($I_{Sr} = 0.6969 \sim 0.7040$)、高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 ($+5.5 \sim +7.2$)以及年轻的亏损地幔单阶段模式年龄值($t_{DM} = 0.48 \sim 0.56Ga$),在 $\epsilon_{Nd}(t)-t_{DM}$ 关系图解中(图 8),这三个过铝花岗岩与 t_{DM} 年龄较老以及 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较低的欧洲海西期过铝花岗岩以及喜马拉雅淡色花岗岩明显不同,而与蒙古造山带及中亚造山带其它地区的花岗岩相似(Jahn *et al.*, 2004)。

氧同位素: 顾连兴等(1993)测得镜儿泉白云母花岗岩

全岩 $\delta^{18}O(SMOW)$ 的平均值为 $6.8‰$,属 Taylor(1978)所划分的正常 $\delta^{18}O$ 花岗岩($\delta^{18}O = 6.0‰ \sim 10‰$)范围,结合该区过铝花岗岩均具低的 I_{Sr} 值和高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,表明其源区物质以低成熟度的地壳或幔源物质为主,而古老地壳物质较少(郑永飞和陈江峰,2000)。

5 锆石 U-Pb 年龄

黄山南白云母花岗岩(X-269)和图拉尔根沟二云母花岗岩(X-533,641)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定结果见表 6、表 7 和图 9。黄山南岩体选出的锆石无色透明,棱柱面均较

表 6 黄山南白云母花岗岩(X-269)锆石 U-Pb 分析结果

Table 6 Zircon U-Pb LA-ICP-MS analyses of the muscovite granite (X-269) at Huanshannan in eastern Tianshan

样品号	组成(× 10 ⁻⁶)				Th/U	比值										年龄/Ma			
	Pb _{rad}	²³² Th	²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	
						比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ
No 01	52.3	128.4	258.3	0.50	15	0.05130	0.00122	0.04069	0.00028	0.28781	0.00624	0.01372	0.00017	257	2	257	5	275	3
No 02	62.7	96.59	183.2	0.53	22	0.05632	0.00103	0.06878	0.00042	0.53413	0.00843	0.02074	0.00021	429	3	435	6	415	4
No 03	20.5	81.90	96.85	0.85	8	0.05480	0.00213	0.04074	0.00041	0.30779	0.0114	0.01310	0.00022	257	3	272	9	263	4
No 04	71.4	82.81	217.8	0.38	36	0.05547	0.0009	0.06733	0.00038	0.51496	0.00694	0.02138	0.00021	420	2	422	5	428	4
No 05	41.4	117.4	197.8	0.60	18	0.05234	0.00141	0.04166	0.00027	0.30064	0.00787	0.01308	0.00006	263	2	267	6	263	1
No 06	23.7	74.94	114.2	0.66	14	0.05279	0.00198	0.04130	0.00040	0.30061	0.0108	0.01372	0.00025	261	2	267	8	275	5
No 07	18.9	52.63	93.85	0.56	11	0.05267	0.00222	0.04097	0.00043	0.29749	0.0121	0.01286	0.00029	259	3	264	9	258	6
No 08	51.4	118.0	161.3	0.73	27	0.05302	0.00115	0.06353	0.00042	0.46447	0.00905	0.01960	0.0002	397	3	387	6	392	4
No 09	49.1	340.1	216.2	1.56	41	0.05339	0.00116	0.04096	0.00027	0.30153	0.00591	0.01263	0.00009	259	2	268	5	254	2
No 10	24.5	113.9	128.9	0.88	17	0.05310	0.00162	0.03735	0.00030	0.27350	0.00784	0.01162	0.00015	236	2	245	6	234	3
No 11	61.5	124.1	267.9	0.46	66	0.05327	0.00093	0.04795	0.00028	0.35222	0.00522	0.01444	0.00014	302	2	306	4	290	3
No 12	55.6	104.4	245.7	0.43	61	0.05359	0.00094	0.04758	0.00028	0.35161	0.00525	0.01432	0.00014	300	2	306	4	287	3
No 13	62.0	146.4	271.0	0.54	49	0.05154	0.0009	0.04752	0.00028	0.33772	0.00502	0.01463	0.00013	299	2	295	4	294	3
No 14	111	184.0	492.0	0.37	73	0.05348	0.00112	0.04769	0.00031	0.35175	0.00658	0.01464	0.00019	300	2	306	5	294	4
No 15	21.7	70.63	91.73	0.77	15	0.05255	0.00162	0.04784	0.00039	0.34669	0.0101	0.01519	0.0002	301	2	302	8	305	4
No 16	46.7	208.8	223.7	0.93	14	0.05476	0.00132	0.04124	0.00029	0.31139	0.00686	0.01341	0.00013	261	2	275	5	269	3
No 17	48.3	93.12	251.1	0.37	21	0.05249	0.00172	0.04099	0.00032	0.29661	0.00943	0.01286	0.00008	259	2	264	7	258	1
No 18	66.9	138.1	297.2	0.47	43	0.05193	0.00088	0.04770	0.00028	0.34166	0.00491	0.01531	0.00014	300	2	298	4	307	3
No 19	75.9	360.0	535.5	0.67	15	0.08814	0.00146	0.02848	0.00018	0.34624	0.0047	0.00855	0.00008	181	1	302	4	172	2
No 20	28.5	75.14	144.3	0.52	18	0.05340	0.00184	0.04127	0.00033	0.30389	0.0102	0.01292	0.00007	261	2	269	8	260	1

注：Pb_{rad}为放射性铅,斜体数据表示弃用的分析数据。

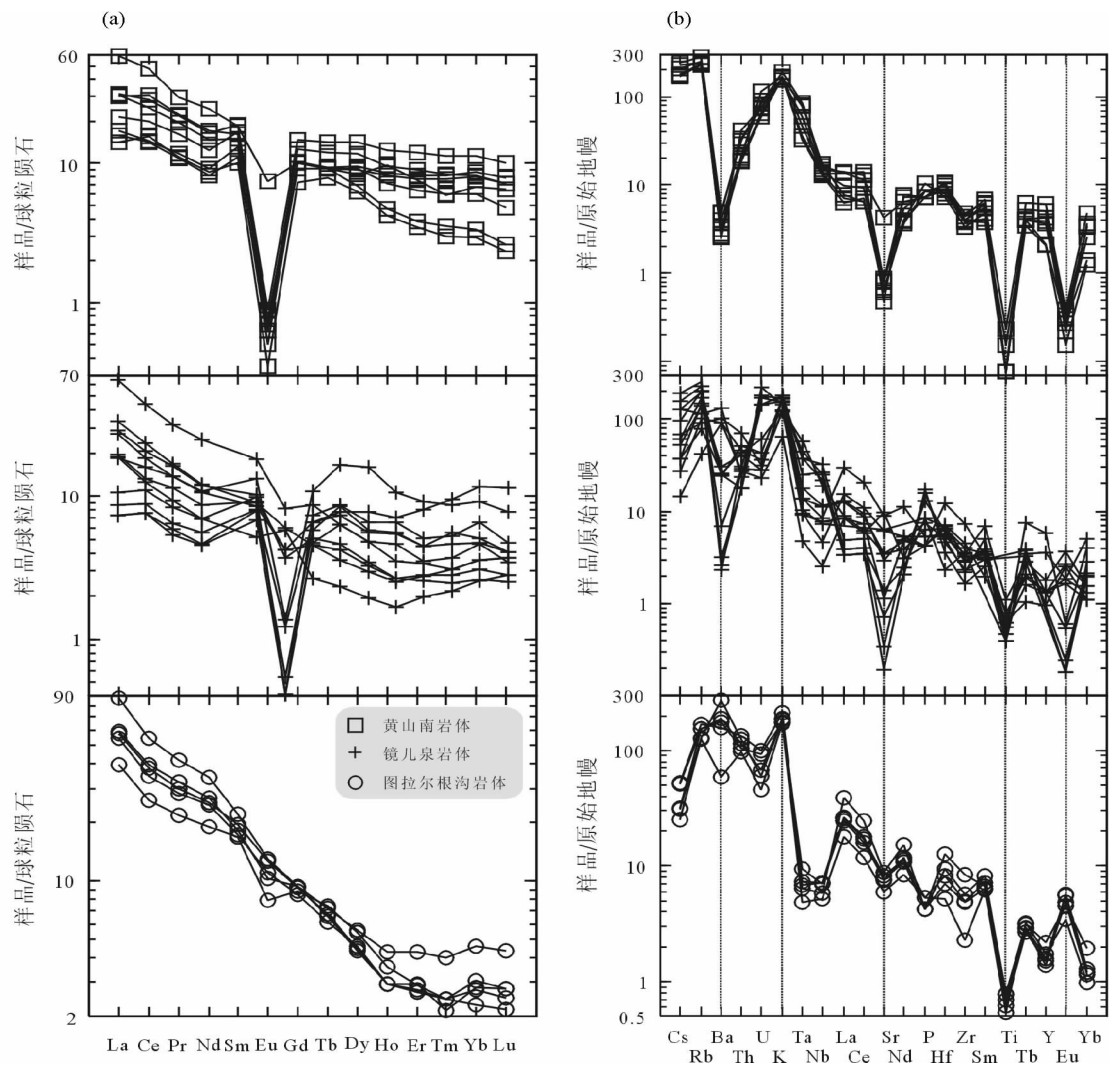


图7 (a) 黄山—镜儿泉地区过铝花岗岩稀土元素配分模式; (b) 多元素原始地幔标准化图解。(球粒陨石数据引自 Boynton, 1984, 原始地幔数据引自 Sun & McDonough, 1989)

Fig. 7 Distribution patterns of chondrite-normalized rare earth elements (REE) (a) and primitive mantle-normalized multi-elements (b) of the peraluminous granites in the Huangshan-Jing'erquan area. The values of chondrite and primitive mantle for normalization are from Boynton (1984) and Sun & McDonough (1989), respectively

发育,以短柱状居多,阴极发光图像(图 10a)显示其振荡环带清晰,为典型的岩浆型锆石。从表 6 中可以看出,黄山南岩体锆石 Th 含量为 $53 \times 10^{-6} \sim 340 \times 10^{-6}$, U 含量为 $92 \times 10^{-6} \sim 492 \times 10^{-6}$, Th/U 比值除一个较大(1.6)外其余均在 0.37~0.93 之间, Th、U 的含量及比值进一步表明黄山南岩体为岩浆结晶的产物(Da Silva *et al.*, 2000)。黄山南岩体共选出 20 颗锆石,每颗测一点,其结果除 19 号样因铅丢失而远离谐和线外,其余数据均落在谐和线上或附近,其中 9 个点(见图 9a)获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $259.9 \pm 1.4\text{Ma}$ (MSWD=0.86),这一年龄与此岩带东部镜儿泉白云母花岗岩年龄($260.2 \pm 6.2\text{Ma}$, 顾连兴等, 1993)在误差范围内一致,可以确定为该岩体的结晶年龄;另有 6 个点获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $300.3 \pm 4.8\text{Ma}$ (MSWD=0.029),可能来自

源区中石炭纪的新生地壳组份。还有三个点分别获得 429Ma、420Ma、397Ma 谐和年龄,可能代表了来自志留纪和泥盆纪新生地壳源区的继承性锆石。另有一个 236Ma 的较年轻的年龄可能反映了岩浆后期可能发生了蚀变作用或者近期内有铅丢失(Da Silva *et al.*, 2000)。

图拉尔根沟的锆石较为复杂,样品 X-641 及 X-533 的锆石大部分不显阴极发光,锆石内部蚀变强烈,未蚀变的锆石阴极发光图像大都呈亮白色(见图 10b)。该岩体锆石的 Th、U 含量显著高于黄山南岩体,分别为 $66 \times 10^{-6} \sim 2303 \times 10^{-6}$ 及 $123 \times 10^{-6} \sim 2589 \times 10^{-6}$,但 Th/U 比值除两个在 2 左右外均属典型的岩浆锆石的比值(0.32~0.87,见表 7)。两个样共选了 27 颗较为新鲜的锆石进行年龄测定,每颗测一点,其结果有四个点因铅丢失较严重,其数据不予采用,另有一个

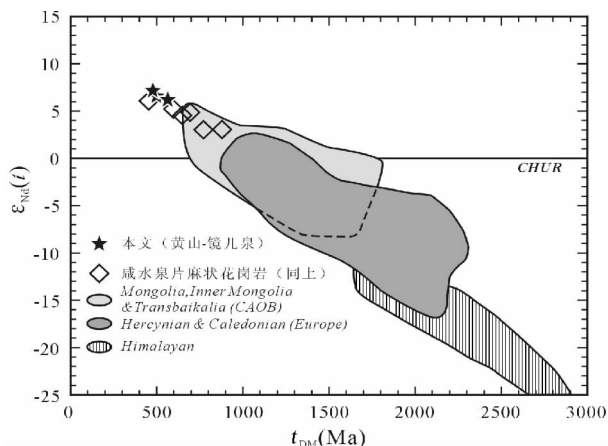


图8 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t_{DM} (单阶段)关系图解。东天山咸水泉片麻状花岗岩资料据唐俊华等(2007),其余资料据 Jahn *et al.* (2004)

Fig. 8 Plot of $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. t_{DM} (single stage). Data of gneissose granite in the Huangshan-Jing'erquan area are from Tang *et al.* (2007) and others are from Jahn *et al.* (2004)

点(X-533-8)的钍、铀含量分别达到了2.7%和0.15%,可能是打到了独居石包体,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $273 \pm 3\text{Ma}$,与该岩体主要的一组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄($275.4 \pm 8.3\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 29, n = 13$,图9b)一致,后者可能代表了图拉尔根沟二云母花岗岩岩浆结晶的时间。如图9b所示,图拉尔根沟还有一组由较少数据组成的年龄($403.7 \pm 6.4\text{Ma}$, $\text{MSWD} = 32, n = 5$)以及几个零散的较老年龄数据443Ma、437Ma、377Ma和356Ma,其中除最后一个点(X-641-07)远离谐和线外,其余均在谐和线上或附近,这些年龄可能代表了来自志留纪和泥盆纪新生地壳源区的继承性锆石,而403Ma则可能是岩体

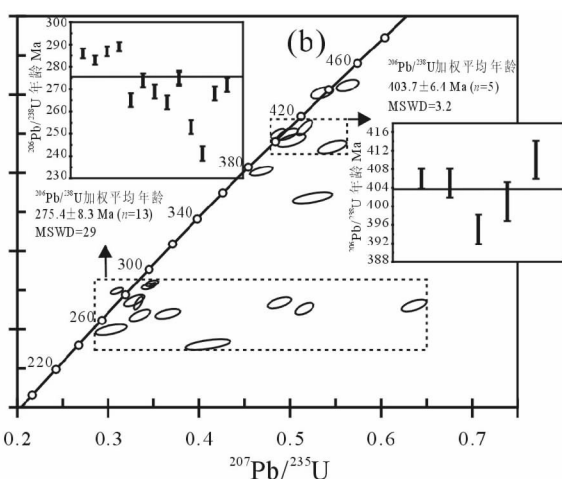
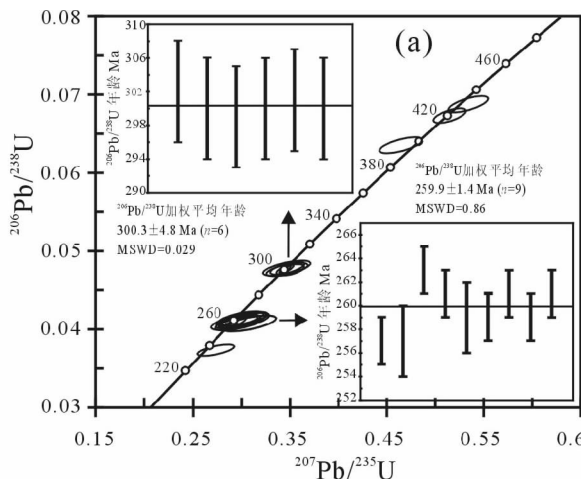


图9 东天山过铝花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

a-黄山南白云母花岗岩(X-269), b-图拉尔根沟二云母花岗岩(X-533, 641)

Fig. 9 Zircon U-Pb concordia diagrams of eastern Tianshan peraluminous granites

a-Huangshannan muscovite granite (X-269), b-Tulaergengou two mica granite (X-533, 641)

主要的新生地壳源区年龄。

6 讨论

如上所述,东天山三个过铝花岗岩均具低的 I_{Sr} 、高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值以及年轻的亏损地幔单阶段模式年龄,其特征明显不同于喜马拉雅、欧洲海西期和加里东造山带(图8)、非洲Damara和澳洲LFB以及华南造山带过铝花岗岩(Jahn *et al.*, 2004; Jung *et al.*, 2001; Healy *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2003)。这些造山带中的过铝花岗岩均具有高的 I_{Sr} 及低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,模式年龄也较老,其物质来源通常认为是古老的变质沉积物或结晶基底。与之相反,本区三个过铝花岗岩与同属中亚造山带(CAOB)的东北造山后花岗岩(Wu *et al.*, 2000)、北内蒙造山带(Chen *et al.*, 2000a)、蒙古—内蒙古—后贝加尔造山带(Jahn *et al.*, 2004)和阿尔泰造山带(Han *et al.*, 1997)过铝花岗岩特征相似,只是其单阶段模式年龄比这些造山带更低, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值更高(图8),这表明本区三个过铝花岗岩的成岩物质也主要来源于幔源新生地壳岩石,而其直接源岩形成时代可能更晚,其最终源区地幔的亏损程度可能更高。

本区三个岩体在主量、微量及稀土元素特征方面存在着显著差异,黄山南岩体属强过铝岩石(图5),稀土配分曲线表现为Eu强烈亏损,轻/重稀土分馏不明显,并具有适度的四分组效应,Rb/Sr比值高,在Sylvester(1998)的Rb/Ba-Rb/Sr图解(图11)中投影于富泥质源岩区域。这些特征酷似华南改造型花岗岩(Xu *et al.*, 1984)。与黄山南岩体不同的是,图拉尔根沟岩体属弱过铝质岩石(图5),轻/重稀土分馏明显,稀土配分曲线平滑而斜率较大,类似于华南同熔型花岗岩(Xu *et al.*, 1984),在Rb/Ba-Rb/Sr图解中投影于富



图10 黄山—镜儿泉地区过铝花岗岩锆石阴极发光图像
a-黄山南白云母花岗岩(X-269); b-图拉尔根沟二云母花岗岩(X-533, 641, 部分)

Fig. 10 Cathodoluminescence images of zircons from peraluminous granites of the Huangshan-Jing'erquan area
a-the Huangshannan muscovite granite, X-269; b-the Tulaergengou two mica granite X-533 and 641

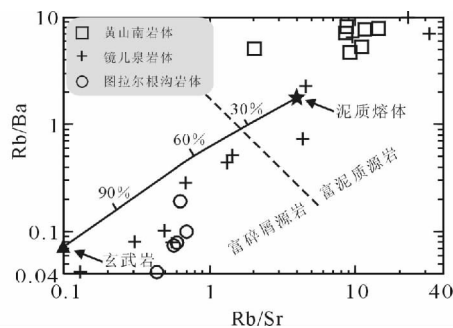


图11 黄山—镜儿泉地区过铝花岗岩 Rb/Ba ~ Rb/Sr 图解(仿 Sylvester, 1998)

Fig. 11 Rb/Ba vs. Rb/Sr diagram for protolith discrimination of peraluminous granites in the Huangshan-Jing'erquan area (after Sylvester, 1998)

碎屑源区。这些特征表明,志留纪、泥盆纪和石炭纪的新生幔源岩石成分可能为偏酸性火山岩,这些火山岩可能在形成后不久经历过风化—沉积旋回,形成了分别作为这两个岩体直接源区的沉积岩。黄山南岩体的源区沉积岩以泥质岩为主,图拉尔根沟岩体以碎屑岩为主,而镜儿泉岩体的源区则同时含有泥质岩和碎屑岩。镜儿泉岩体岩石地球化学的多变性表明,来自不同源区的岩浆在岩体结晶之前未能充分混均。

前人对东天山过铝花岗岩岩浆结晶的温度和压力目前尚未进行过详细研究。作者等利用锆石饱和温度计(Watson and Harrison, 1983)和稀土元素温度计(Montel, 1993)对上述三个岩体的成岩温度作了计算(见表1,图12a, b)。计算结果表明,三个岩体的锆石饱和温度计所获得的温度(630 ~ 742℃)较稀土温度计所获得的温度(612 ~ 733℃)要略高些,但两种计算方法所得结果相差并不大,说明两种温度计均比较可靠,两种温度计的平均温度为621 ~ 738℃。这一结果与喜马拉雅 Cho Oyu 地区的淡色花岗岩的结晶温度(642 ~ 777℃,见图12c, Visonà and Lombardo, 2002)相比略低些。在Q-Ab-Or图解(图12d)中,东天山三个过铝花岗岩投影点均落于水饱和的低共熔线及其附近,岩浆结晶压力在100 ~ 300MPa(100MPa = 1kbar)之间,与喜马拉雅二云母花岗岩的结晶压力相近,但略低于喜马拉雅电气石花岗岩结晶压力(图12d)。据上述压力推测,东天山三个过铝花岗岩的结晶深度不超过10km。但从岩体的微量及稀土元素特征来看,图拉尔根沟岩体源区熔融时可能有石榴石和辉石残留,而黄山南岩体源区熔融时可能有大量斜长石残留,或其岩浆演化过程中可能发生斜长石的分离结晶。过铝花岗岩过去一直被认为是同构造或同碰撞构造背景的产物(Le Fort, 1981; Harris *et al.*, 1986; France-Lanord and Lefort, 1988; Brown and Solar, 1999),即形成于推覆、褶皱和地壳加厚的过程中,其地壳源岩部分熔融的热量来源通常被归结于加厚(或双层)陆壳的地温梯度(Le Fort, 1981; 邓晋福等, 1994; Patino Douce and Harris, 1998; Visona and Lambardo, 2002)。然而,黄山—镜儿泉一带的晚古生代弧后盆地早在石炭纪末(300Ma前后)就已闭合,二叠纪时期(285 ~ 250Ma, 顾连兴等, 2006)该带已处于海西期碰撞后伸展阶段(胡霁琴等, 1997; Li *et al.*, 2003; 顾连兴等, 2006)。本次测得的锆石U-Pb LA-ICP-MS年龄黄山南白云母花岗岩 259.9 ± 1.4 Ma, 图拉尔根沟二云母花岗岩 275.4 ± 8.3 Ma, 以及 Gu *et al.* (1996)所报道的镜儿泉白云母花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄 260.2 ± 6.2 Ma, 表明该带的过铝花岗岩均形成于碰撞后伸展阶段,这与三个过铝花岗岩侵入于变形变质的梧桐窝子组 and 干墩组地层的野外关系相一致。

目前普遍认为,过铝花岗岩来自地壳中-上部源区(Xu *et al.*, 1984; Vincenzo *et al.*, 1996; Barbarin, 1996; Sylvester, 1998)。造成中-上部地壳熔融的热量如果只用幔源岩浆底侵和下地壳对底侵热量的长距离热传导来解释,

表 7 图拉尔根沟二云母花岗岩 (X-533,641) 锆石 U-Pb 分析结果

Table 7 Zircon U-Pb LA-ICP-MS analyses of the two-mica granite (X-533,641) at Tula’ ergengou in eastern Tianshan

样号	组成(×10 ⁻⁶)			Th/U	比值												年龄/Ma																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
					$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$				$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$				$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$				$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$				$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$				$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$				$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	Pb _{nd}	²³² Th	²³⁸ U		比值		1σ		比值		1σ		比值		1σ		比值		1σ		比值		1σ		比值		1σ		比值		1σ		年龄		1σ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

注：Pb_{nd}为放射性铅,斜体数据表示弃用的分析数据。

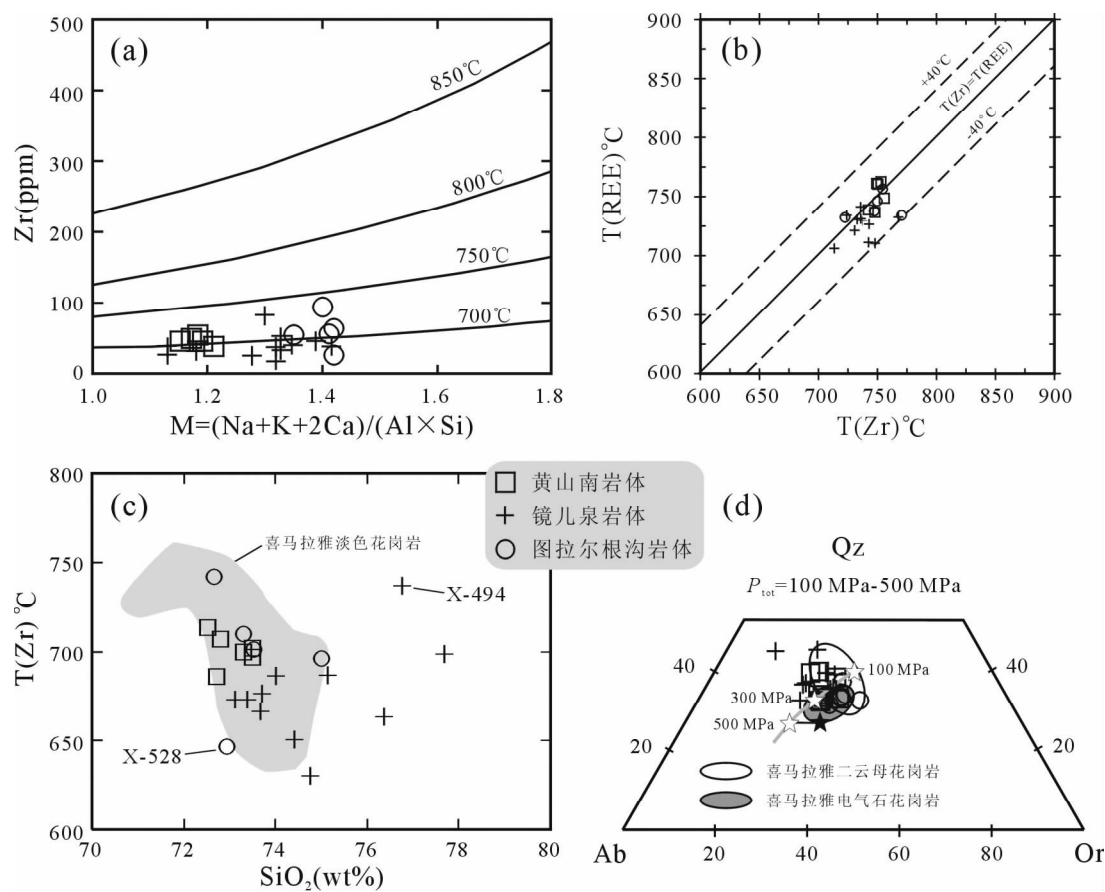


图 12 黄山—镜儿泉地区过铝花岗岩温压计算图解

a-锆石饱和温度图解 (仿 Watson and Harrison, 1983), $M = (Na + K + 2Ca) / (Al \times Si)$ (阳离子之比, 其中 $Si + Ti + Al + Fe + Mg + Ca + Na + K + P = 1$); b-锆石饱和温度与稀土温度计对比; c-锆石饱和温度与 SiO_2 图解; d-Qtz-Ab-Or 图解 ($P = 100 \sim 500 \text{ MPa}$, 实心星表示水饱和, 空心星表示水不饱和; $a_{H_2O} = 0.4$), 粗曲线为最低共熔线 (据 Johannes and Holtz, 1996), 喜马拉雅淡色花岗岩资料据 Visonà and Lombardo (2002)

Fig. 12 Plots of P - T calculation for peraluminous granites in the Huangshan-Jing'erquan area

a-Zr concentrations plotted against M , cation ratio of $(Na + K + 2Ca) / (Al \times Si)$ (calculated based on cation $Si + Ti + Al + Fe + Mg + Ca + Na + K + P = 1$, after Watson and Harrison, 1983); b-Comparison between calculated temperatures obtained by Zr thermometry and REE thermometry; c-Variation plot of Zircon saturation temperature vs. SiO_2 ; and d-Qtz-Ab-Or system at $P = 100 \sim 500 \text{ MPa}$ and H_2O -saturated conditions (filled stars) and H_2O -undersaturated conditions (open stars, $a_{H_2O} = 0.4$). Thick curve indicates evolution of the eutectic minimum (Johannes and Holtz, 1996). Data of Himalayan leucogranite are from Visonà and Lombardo (2002)

难于使人信服。因此,顾连兴等(2006,2007)认为,幔源岩浆在地壳内部侧向漫流形成的内侵,可能是造成中-上部地壳部分熔融和产生过铝花岗岩浆的重要机制。顾连兴等(2007)根据在二叠纪时期黄山—镜儿泉一带发生过镁铁-超镁铁岩侵入、低压高温变质作用、混合岩化、韧性剪切、原地改造型片麻状花岗岩形成、块状过铝花岗岩侵入和伟晶岩型锂铍矿化等一系列地质—成矿—热事件,认为这一带在当时存在一个热穹窿,该热穹窿乃由一个幔源岩浆内侵体所引起。人工地震剖面显示在康古尔断裂的北侧上部地壳中存在有一个10km厚的高速层(6.99km/s,梁月明等,2001),进

一步证实了该带内侵幔源岩浆的存在。内侵热量使地壳内部新生的地壳岩石发生超变质和部份熔融,形成了黄山—镜儿泉一带的过铝花岗岩。黄山南和图拉尔根沟岩体在地球化学上有显著差异,可能与其源岩成分和岩浆生成条件有关,而其锆石年龄除了有一个代表岩浆结晶年龄的、较年轻的峰值以外,各自均有若干较老的、并有一定离散度的继承性年龄。这样的年龄组合表明,即使对于同一个岩体,其源区可能也具有多时代特征,这种不同时代形成的新生地壳源岩可能因大陆碰撞和构造变形而混杂到了一起。

7 结论

本文对黄山—镜儿泉三个过铝花岗岩的研究得出了如下认识:

(1) 黄山南白云母花岗岩和图拉尔根沟二云母花岗岩岩浆结晶年龄分别为 259.9 ± 1.4 Ma 和 275.4 ± 8.3 Ma。这两个岩体均形成于海西期碰撞后的伸展阶段。

(2) 研究区过铝花岗岩均具有低的 I_{Sr} 比值、高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值和年轻的 Nd 模式年龄, 显示其源区为来自亏损地幔的新生地壳物质。

(3) 研究区过铝花岗岩的形成与碰撞后幔源岩浆内侵, 以及由内侵造成的新生地壳岩石的部份熔融有关。作为源区的新生地壳岩石可能具有多时代特征。

(4) 地质温度计和压力计算得三个过铝花岗岩的岩浆结晶的温度范围为 $621 \sim 738^{\circ}\text{C}$, 压力范围为 $100 \sim 300$ MPa, 其结晶深度不超过 10 km。

致谢 锆石 U-Pb 定年得到了西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明博士及第五春荣博士的具体指导; 锆石阴极发光图像由中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室资助, 并由陈林丽高工完成; 电子探针矿物成分测定得到了南京大学成矿机制研究国家重点实验室张文兰博士的悉心指导; 本文 Sr-Nd 同位素测试受到中国科学院地质与地球物理研究所同位素地球化学实验室资助, 并在陈福坤研究员指导下完成; 郝爱华教授参加了本文的部份野外工作。匿名审稿人建设性的意见对于文章的改进具有重要作用, 作者等在此一并表示衷心的感谢。

References

- Barbarin B. 1996. Genesis of the two main types of peraluminous granitoids. *Geology*, 24(4): 295–298
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605–626
- Boynton WV. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorolite studies. In: Henderson P (ed.). *Rear Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 63–114
- Brown M and Solar GS. 1999. The mechanism of ascent and emplacement of granite magma during transpression: A syntectonic granite paradigm. *Tectonophysics*, 312(1): 1–33
- Chen B, Jahn BM, Wilde S and Xu B. 2000a. Two contrasting paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328: 157–182
- Chen F, Hegner E and Todt W. 2000b. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany—evidence for a Cambrian magmatic arc. *International Journal of Earth Sciences*, 88: 791–802
- Chen ZF and Liang YH. 1985. Research on several problems of structural geology in Tianshan. *Xinjiang Geology*, 3(2): 1–13 (in Chinese with English abstract)
- Cheng SD, Wang GR, Yang SD, Jin JS and Zhu JS. 1986. The Paleoplate Tectonic of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 4(2): 1–26 (in Chinese with English abstract)
- Clarke DB. 1981. The mineralogy of peraluminous granites: A review. *Canadian Mineralogist*, 19: 3–18
- Coleman R. 1989. Continental growth of Northwest China. *Tectonics*, 8: 621–635
- Da Silva LC, Gresse PG, Scheepers R, McNaughton NJ, Hartmann LA and Fletcher I. 2000. U-Pb SHRIMP and Sm Nd age constraints on the timing and sources of the Pan African Cape Granite Suite, South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 30(4): 795–815
- Deer WA, Howie RA and Zussman J. 1966. *An Introduction to the Rock Forming Minerals*. Longman, London, 1–528
- Deng JF, Zhao HL, Lai SC, Liu HX and Luo ZH. 1994. Generation of muscovite/two-mica granite and intracontinental subduction. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 19(2): 139–147 (in Chinese with English abstract)
- Fang GQ. 1994. Paleozoic plate tectonics of eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, China. *Acta Geologica Gansu*, 3(1): 34–40 (in Chinese with English abstract)
- France-Lanord C and Lefort P. 1988. Crustal melting and granite genesis during the Himalayan collision orogenesis. *Trans. R. Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, 79: 183–195
- Franzini M, Leoni L and Saitta M. 1972. A simple method to valuate the matrix effect in X ray fluorescence analysis. *X ray Spectrom.*, 1: 151–154
- Gao JF, Lu JJ, Lai MY, Lin YP and Pu W. 2003. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICIMS. *Journal of Nanjing University (Natural sciences)*, 39(6): 844–850 (in Chinese with English abstract)
- Ge WC, Li XH, Li ZX, Zhou HW and Lee CY. 2001. Geochemical studies on two types of Neoproterozoic peraluminous granitoids in northern Guangxi. *Geochimica*, 30(1): 24–34 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Wu CZ and Yan ZF. 2001b. Initiation and evolution of the Bogda subduction torn type rift. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 585–597 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Zhao M, Wu CZ and Li HY. 2001a. Intrusive activities during compression extension tectonic conversion in the Bogda intracontinental orogen. *Acta petrologica Sinica*, 17(2): 187–198 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Li HY, Xiano XJ and Yan ZF. 2000. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan: Their tectonic implications. *Acta petrologica Sinica*, 16(3): 305–316 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Yang H, Yan ZF, Liao JJ and Wang JZ. 1993. Geological features and origin of a peraluminous granite belt in the east Tianshan area. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences)*, 5(4): 410–419 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Yang H, Yan ZF, Liao JJ and Wang JZ. 1996. Geology and genesis of peraluminous granites in east Tianshan upper Paleozoic island arc belt. *Chinese Journal of Geochemistry*, 15(1): 33–43
- Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Tang JH, San JZ, Wang CS and Zhang GH. 2007. Permian geological, metallurgical and geothermal events of the Huangshan – Jing'erquan area, eastern Tianshan: indications for mantle magma intraplating and its effect on the crust. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2869–2880 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Wang YX, Tang JH, Wang CS, Xi AH and Zheng YC. 2006. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica sinica*, 22(5): 1103–1120 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Zhu JL, Guo JC, Liao JJ, Yan ZF and Yang H. 1995. Geology and genesis of the mafic-ultramafic complexes in the Huangshan Jingerquan (HJ) Belt, east Xinjiang. *Chinese Journal of Geochemistry*, 14(2): 97–116
- Guo ZJ and Ma RS. 1990. A study on the Later Paleozoic Kangggur inter arc basin in eastern Tianshan. *Journal of Nanjing University (Earth*

- Sciences), 2(3): 103–113 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZJ and Zhang ZC. 1993. On the Early Paleozoic island arc belt of Mid Tianshan. *Journal of Hebei College of Geology*, 16(2): 132–139 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Li ZH. 2004. SHRIMP zircon U Pb ages of Kalatongke No. 1 and Huangshandong Cu-Ni bearing mafic and ultramafic complexes, North Xinjiang, and geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2424–2429
- Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong, DW, Kagami, H and Sun YL. 1997. Depleted mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang: Geochemistry and Nd Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138: 135–159
- Harris NBW, Pearce JA and Tindle AG. 1986. Geochemical characteristics of collision zone magmatism. In: Coward MP and Ries AC (eds.). *Collision Tectonics*. Geol. Soc. Spec. Pub. no. 19, Blackwell Scientific Publications: 67–81
- He GQ, Li MS, Liu DQ, Tang YL and Zhou RH. 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Urumqi and Hongkong: Xinjiang People's Publication House and Educational and Cultural Press LTD, 1–437 (in Chinese)
- Healy B, Collins WJ and Richards SW. 2004. A hybrid origin for Lachlan S-type granites: the Murrumbidgee Batholith example. *Lithos*, 78(1–2): 197–216
- Hu AQ, Wang ZG and Tu GC. 1997. Geological Evolution, Petrogenesis and Metallogeny of North Xinjiang. Beijing: Science Press, 1–246 (in Chinese)
- Hu SX, Guo JC, Gu LX, Zhou SZ, Yan ZF, Yang H, Wang JZ and Liu YD. 1990. Geological Features of the Caledonian Orogenic Belt and Its Importance in the Tectonic Framework of the East Tianshan (E85–95) District. *Geoscience of Xinjiang*, edited by The Editorial Committee of Geoscience of Xinjiang of Project 305. Beijing: Geological Publishing House, (1): 32–46 (in Chinese with English abstract)
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3/4): 489–508
- Jahn BM, Capdevila R, Liu DY, Vernon A and Badarch G. 2004. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor Ulaan Baatar, Mongolia: Geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 629–653
- Ji JS, Tao HX, Zeng ZR and Yang XK. 1994. Geology and Metallogeny of Kanggurtag Gold Mineralization Belt, Eastern Tianshan Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1–204 (in Chinese with English abstract)
- Johannes W and Holtz F. 1996. Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks. *Minerals and Rocks*, vol. 22. Springer Verlag, 1–335
- Jung S, Mezger K and Hoernes S. 2001. Trace element and isotopic (Sr, Nd, Pb, O) arguments for a mid crustal origin of Pan African garnet bearing S-type granites from the Damara orogen (Namibia). *Precambrian Research*, 110: 325–355
- Le Fort P. 1981. Manaslu leucogranite: A collision signature of the Himalayas, A model for its genesis and emplacement. *J. Geophys. Res.*, 86: 10545–10568
- Le Maitre RW. 1976. Some problems of the projections of chemical data into mineralogical classifications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 56: 181–189
- Li HQ, Chen FW, Lu YF, Yang HM and Mei YP. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb Age and Strontium Isotopes of Mineralized Granitoids in the Sanchakou Copper Polymetallic Deposit, East Tianshan Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(2): 191–195 (in Chinese with English abstract)
- Li JY and Xiao XC. 1999. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 405–419 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, Xiao WJ, Wang KZ, Sun GH and Gao LM. 2003. Neoproterozoic Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China. In: Mao, Goldfarb, Seltmann, Wang, Xiao and Hart (eds.). *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*. Proceedings Volume of the International Symposium of the IGCP 473 Project in Urumqi and Guidebook of the Field Excursion in Xinjiang, China; August 9–21, IAGOD Guidebook Series 10: CERCAMS/NHM London, 31–74
- Li XH, Li ZX, Ge WC, Zhou HW, Li WX, Liu Y and Wingate MTD. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825Ma? *Precambrian Research*, 122: 45–83
- Liang YM, Huang XZ, Xu K, Yu XZ, Wang YS, Zhang WZ and Cai YM. 2001. Geophysical field and deep geology of the Kanggur Tag fault zone, Xinjiang. *Regional Geology of China*, 20(4): 498–403 (in Chinese with English abstract)
- Liao ZL, Mo XX, Pan GT, Zhu DC, Wang LQ, Zhao ZD and Jiang XS. 2004. Peraluminous granites: Insights from recent developments with discussions on the peraluminous granites in Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24(2): 22–29 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 1991. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic isotope data. US Geological Survey Open File Report, 39
- Ma RS, Shu LS and Sun JQ. 1997. Tectonic Evolution and Metallogeny of Eastern Tianshan Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1–202 (in Chinese with English abstract)
- Ma RS, Wang CY and Ye SF. 1993. Tectonic Framework and Crustal Evolution of Eastern Tianshan Mountains. Nanjing: Publishing House of Nanjing University, 1–225 (in Chinese)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635–643
- Mao JW, Yang JM, Qu WJ, Du AD, Wang ZL and Han CM. 2002. Re-Os Dating of Cu-Ni Sulfide Ores from Huangshandong Deposit in Xinjiang and Its Geodynamic Significance. *Mineral Deposits*, 21(4): 323–330 (in Chinese with English abstract)
- Miller CF and Bradfish LJ. 1980. An inner Cordilleran belt of muscovite bearing plutons. *Geology*, 8: 412–416
- Miller CF, Stoddard EF, Bradfish LJ and Dollase WA. 1981. Composition of plutonic muscovite: Genetic implications. *Canadian Mineralogist*, 19: 25–34
- Montel JM. 1993. A model for monazite/melt equilibrium and application to the generation of granitic magmas. *Chemical Geology*, 110: 127–146
- Patino Douce AE and Harris N. 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis. *J. Petrol.*, 39: 689–710
- Qin KZ, Fang TH, Wang SL and Zhu BQ. 2002. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in Eastern Tianshan Mountains, NW China. *Xinjiang Geology*, 20(4): 302–308 (in Chinese with English abstract)
- Richard LR. 1995. Mineralogical and petrological, data processing system for Window, V. 2.02. Minpet Geological Software-Logiciel Geologique Minpet, Que., Canada
- Sengör AMC, Natal'in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299–307
- Shu LS, Lu HF, Yin DH, Ma RS, Charvet J and Laurent-Charvet S. 2001. Late Paleozoic continental accretionary tectonics in northern Xinjiang. *Xinjiang geology*, 19(1): 59–63 (in Chinese with English abstract)
- Smith JV. 1974. Feldspar minerals. 2: Chemical and textural properties. Berlin Springer, 1–690
- Streckeisen A and Le Maitre RW. 1979. A chemical approximation to the model QAPF classification of igneous rocks. *Neues Jahrb. Mineral. Abh.*, 136: 169–206
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean*

- Basins. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 42: 313–346
- Sylvester PJ. 1998. Post collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29–44
- Tang JH, Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, San JZ, Wang CS, Liu SH and Zhang GH. 2007. Characteristics, age and origin of the Xianshuiquan gneissose granite in eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1803–1820 (in Chinese with English abstract)
- Taylor Jr. HP. 1978. Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 177–210
- Todd VR and Shaw SE. 1985. S-type granitoids and an I-S line in the Peninsular ranges batholith, southern California. *Geology*, 13: 231–233
- Visona D and Lambardo B. 2002. Two mica and tourmaline leucogranites from Everest Makalu region (Nepal Tibet). *Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating*. *Lithos*, 62(3–4): 125–150
- Vincenzo GD, Andriessen PAM and Ghezzi C. 1996. Evidence of two different compositions in a Hercynian peraluminous cordierite bearing granite: the San Basilio Intrusion (Central Sardinia, Italy). *J. Petrology*, 37(5): 1175–1206
- Wang CY, Zhu WB and Ma RS. 1992. Characteristics and origin of the Kushui Metamorphic belt in the eastern Tianshan mountains. *Journal of Nanjing University (Natural sciences edition)*, 28(4): 595–604 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZX, Wu JY, Lü XC, Zhang JG and Liu CD. 1986. An outline on the tectonic evolution of Tianshan in China. *Bulletin of the Institute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences*, 15: 81–94 (in Chinese with English abstract)
- Watson E and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth Planet Sci. Lett.*, 64: 295–304
- White AJR and Chappell BW. 1977. Ultrametamorphism and granite genesis. *Tectonophysics*, 43: 7–22
- Wu CZ, Gu LX, Ren ZW, Chen ZY, Wang YX, Zhang ZZ, Tang XQ and Zhao M. 2004. Petrogenesis and tectonic environment of Eocene trachyte porphyry in Liaohu Basin, northeastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 40(3): 267–278 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Jahn BM, Wilde S and Sun DY. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328: 89–113
- Wu QF. 1986. Structural evolution and prospects of Junggar Basin. *Xinjiang Geology*, 4(3): 1–19 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304: 370–395
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhao M. 1992. Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions. Beijing: Geological Publishing House, 1–169 (in Chinese with English abstract)
- Xu KQ, Sun N, Wang DZ, Hu SX, Liu YJ and Ji SY. 1984. Petrogenesis of the granites and their metallogenetic relations in South China. In: Xu KQ and Tu GC (eds.). *Geology of Granites and Their Metallogenetic Relations*. Proceedings of the International Symposium Held at Nanjing University, Nanjing, China. October 26–30, 1982, Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1–32
- Yan WY. 1985. Characteristics of island arc type volcanics of early middle Carboniferous and their mineral resources in the Eastern Tianshan. *Xinjiang Geology*, 3(2): 49–58 (in Chinese with English abstract)
- Yang H and Gu LX. 1989. Preliminary Discussion on the Turpan Hami Block in the East Tianshan Orogenic Belt. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences Edition)*, 1(2): 82–85 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, G nther D and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical*, 28(3): 353–370
- Yuan HL, Wu FY, Gao S, Liu XM, X P and Sun DY. 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48(22): 2411–2421
- Zheng YF and Chen JF. 2000. *Geochemistry for Stable Isotope*. Beijing: Science Press, 1–316 (in Chinese)
- Zhou MF, Leshner CM, Yang ZX, Li JW and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu (PGE) sulfide bearing mafic intrusions in the Huangshan district, eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chem. Geol.*, 209: 233–257
- Zhu GQ and Ma RZ. 1992. Characteristics of deposition of Aqishan Huangshan composite terrane, the eastern Xinjiang. *Mineralogy and Petrology*, 12(1): 36–37 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈哲夫,梁云海. 1985. 新疆天山地质构造几个问题的探讨. *新疆地质*, 3(2): 1–13
- 成守德,王广瑞,杨树德,靳金生,祝皆水. 1986. 新疆古板块构造. *新疆地质*, 4(2): 1–26
- 邓晋福,赵海玲,赖绍聪. 1994. 白云母/二云母花岗岩形成与陆内俯冲作用. *地球科学*, 19(2): 139–147
- 方国庆. 1994. 东天山古生代板块构造特点及其演化. *甘肃地质学报*, 3(1): 34–40
- 高剑峰,陆建军,赖鸣远,林雨萍,濮巍. 2003. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析. *南京大学学报(自然科学)*, 39(6): 844–850
- 葛文春,李献华,李正祥,周汉文,李奇崛. 2001. 桂北新元古代两类过铝花岗岩的地球化学研究. *地球化学*, 30(1): 24–34
- 顾连兴,胡受奚,于春水,赵明,吴昌志,李宏宇. 2001a. 东天山博格达造山带挤压-拉张构造转折期的侵入活动. *岩石学报*, 17(2): 187–198
- 顾连兴,胡受奚,于春水,李宏宇,肖新建,严正富. 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境. *岩石学报*, 16(3): 305–316
- 顾连兴,胡受奚,于春水,吴昌志,严正富. 2001b. 论博格达俯冲撕裂型裂谷的形成与演化. *岩石学报*, 17(4): 585–597
- 顾连兴,杨浩,严正富,廖静娟,王金珠. 1993. 东天山一个过铝花岗岩带的特征和成因. *南京大学学报(地球科学)*, 5(4): 410–419
- 顾连兴,张遵忠,吴昌志,王银喜,唐俊华,汪传胜,郝爱华,郑远川. 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识. *岩石学报*, 22(5): 1103–1120
- 顾连兴,张遵忠,吴昌志,唐俊华,三金柱,汪传胜,张光辉. 2007. 东天山黄山-镜儿泉地区二叠纪地质-成矿-热事件: 幔源岩浆入侵及其地壳效应. *岩石学报*, 23(11): 2869–2880
- 郭召杰,马瑞士. 1990. 东天山晚石生代康古尔弧间盆地研究. *南京大学学报(地球科学)*, 2(3): 103–113
- 郭召杰,张志诚. 1993. 中天山早古生代岛弧构造带研究. *河北地质学院学报*, 16(2): 132–139
- 何国琦,李茂松,刘德权,唐延龄,周汝洪. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 新疆人民出版社,香港文化教育出版社,1–437
- 胡霁琴,王中刚,涂光炽. 1997. 新疆北部地质演化及成岩成矿规律.

- 北京: 科学出版社, 1-246
- 胡受奚, 郭继春, 顾连兴, 周顺之, 严正富, 杨浩, 王金珠, 刘彦东. 1990. 加里东造山带在东天山($E85^{\circ} \sim 95^{\circ}$)构造格架中的重要地位及其地质特征. 新疆地质科学, 北京: 地质出版社, 第1辑: 32-45
- 姬金生, 陶洪祥, 曾章仁, 杨兴科. 1994. 东天山康古尔塔格金矿带地质与成矿. 北京: 地质出版社, 1-204
- 李华芹, 陈富文, 路远发, 杨红梅, 郭敬, 梅玉萍. 2004. 东天山三岔口铜矿区矿化岩体 SHRIMP U-Pb 年代学及锆同位素地球化学特征研究. 地球学报, 25(2): 191-195
- 李锦轶, 肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述. 地质学报, 34(4): 405-419
- 梁月明, 黄旭钊, 徐昆, 于学政, 王越胜, 张文志, 蔡玉梅. 2001. 新疆康古尔塔格断裂带地球物理场及深部地质特征. 中国区域地质, 20(4): 498-403
- 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 赵志丹, 江新胜. 2004. 过铝花岗岩的研究动向和进展——兼论西藏过铝花岗岩. 沉积与特提斯地质, 24(2): 22-29
- 马瑞士, 舒良树, 孙家齐. 1997. 东天山构造演化与成矿. 北京: 地质出版社, 1-202
- 马瑞士, 王赐银, 叶尚夫. 1993. 东天山构造格架及地壳演化. 南京: 南京大学出版社, 1-225
- 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 杜安道, 王志良, 韩春明. 2002. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义. 矿床地质, 21(4): 323-330
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清. 2002. 东天山板块构造分区, 演化与成矿地质背景研究. 新疆地质, 20(4): 302-308
- 舒良树, 卢华复, 印栋浩, 马瑞士. 2001. 新疆北部古生代大陆增生构造. 新疆地质, 19(1): 59-63
- 唐俊华, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 三金柱, 汪传胜, 刘四海, 张光辉. 2007. 东天山咸水泉片麻状花岗岩特征、年龄及成因. 岩石学报, 23(8): 1803-1820
- 王赐银, 朱文斌, 马瑞士. 1992. 东天山苦水变质地带变质作用特征及其成因研究. 南京大学学报(自然科学版), 28(4): 595-604
- 王作勋, 邬继易, 吕喜朝, 张经国, 刘成德. 1986. 中国天山大地构造演化概述. 中国地质科学院地质研究所所刊, 第15号: 81-94
- 吴庆福. 1986. 准噶尔盆地构造演化及含油气远景. 新疆地质, 4(3): 1-19
- 吴昌志, 顾连兴, 任作伟, 陈振岩, 王银喜, 张遵忠, 汤晓茜, 赵明. 2004. 辽河盆地粗面斑岩成因及其构造环境. 南京大学学报(自然科学版), 40(3): 267-278
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 地质出版社, 1-169
- 阎文元. 1985. 天山东段早中石炭世岛弧型火山岩特征及其矿产. 新疆地质, 3(2): 49-58
- 杨浩, 顾连兴. 1989. 东天山造山带中吐-哈地块的认识及意义. 南京大学学报(地球科学版), 1(2): 82-85
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社, 1-316
- 竺国强, 马润则. 1992. 东疆阿齐山-黄山复合地体的沉积特征. 矿物岩石, 12(1): 36-37