

doi:10.3799/dqkx.2016.003

东昆仑黑海地区加里东期过铝质花岗岩岩石学、地球化学特征及地质意义

施彬¹, 朱云海¹, 钟增球¹, 菅坤坤²

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 陕西省地质调查中心, 陕西西安 710016

摘要: 东昆仑黑海地区发育加里东期过铝质花岗岩(424.0~420.5 Ma), 其形成与地壳的发展演化密切相关, 主要通过岩相学和地球化学方法对其进行了研究。黑海过铝质花岗岩由黑云母英云闪长岩、黑云母花岗闪长岩、黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩组成。SiO₂ 变化区间为 65.32%~75.87%, K₂O/Na₂O 为 0.47~1.52, δ 为 1.09~3.00, 为钙碱性—高钾钙碱性系列; A/CNK 为 1.02~1.31, 属于过铝质—强过铝质花岗岩。稀土元素具有轻稀土相对富集和重稀土相对亏损的特征, 中等负铕异常。微量元素具有相对选择性富集大离子亲石元素而相对亏损高场强元素的特征。源区参与熔融物质由以变杂砂岩为主, 向以变泥质岩为主过渡。结合区域资料, 认为黑海过铝质花岗岩是东昆仑俯冲增生杂岩楔发生伸展减薄引起地幔物质底侵而促使富硅铝地壳物质发生不同程度部分熔融形成。

关键词: 东昆仑造山带; 黑海; 加里东期; 过铝质花岗岩; 岩石学。

中图分类号: P588.121; P595; P597.3

文章编号: 1000-2383(2016)01-0035-20

收稿日期: 2015-08-06

Petrological, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Caledonian Peraluminous Granites in Heihai Region, Eastern Kunlun

Shi Bin¹, Zhu Yunhai¹, Zhong Zengqiu¹, Jian Kunkun²

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

2. Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710016, China

Abstract: Caledonian peraluminous granites (420.5 to 424.0 Ma), is closely related with the development and evolution of the crust. In order to study their composition features and formation mechanism, petrographical and geochemical investigations were carried out. It consist of biotite tonalite, biotite granodiorite, biotite granite, two-mica granite and muscovite granite in Heihai region. The rock types are of calc-alkali series and high-K calc-alkaline series (SiO₂ = 65.32% - 75.87%, K₂O/Na₂O = 0.47 - 1.52, δ = 1.09 - 3.00), and belong to peraluminous granites or strongly peraluminous granites (A/CNK = 1.02 - 1.31). REE display relatively LREE-enriched and HREE-depleted characteristics, with moderate Eu negative abnormality. LILE are of relatively selective enrichment and HFS elements are of relatively depletion. The melting materials of source are metagreywacke and metapelite. Based on regional geology, this paper suggests that Heihai peraluminous granites were formed by partial melting of the alumina-silica crust, which was caused by mantle underplating and extension of the southern subduction accretionary complex.

Key words: eastern Kunlun orogenic belt; Heihai region; caledonian; peraluminous granite; petrology.

0 引言

(Clarke, 1981; Zen, 1986, 1988; Sylvester, 1998), 是陆壳深部物质在无水条件下由含水矿物(如黑云母、白云母、角闪石等)发生脱水反应引发部分熔融形

过铝质花岗岩广泛分布于世界上的造山带中

基金项目: 青海 1:5 万中灶火地区四幅区调项目(No.1212010918012); 青海东昆仑 1:5 万黑海地区五幅区调项目(No.1212011086001)。

作者简介: 施彬(1980-), 男, 博士, 从事岩浆岩岩石学及区域地质调查研究。E-mail: 7293026@qq.com

引用格式: 施彬, 朱云海, 钟增球, 等, 2016. 东昆仑黑海地区加里东期过铝质花岗岩岩石学、地球化学特征及地质意义. 地球科学, 41(1): 35-54.

成,可能的形成机制有陆块碰撞导致地壳增厚叠置、陆块间俯冲作用、构造减压和幔源物质的底侵或内侵等(Clemens and Wall, 1981; Le Fort, 1981; Le Fort *et al.*, 1987; 邓晋福等, 1994; Barbarin, 1996; Elburg, 1996; Villaseca *et al.*, 1998; Gerdes *et al.*, 2002; Visonà and Lombardo, 2002; 王岳军等, 2002; 林广春和马昌前, 2003; 孙涛等, 2003; 张金阳和廖群安, 2004; 张宏飞等, 2005; 钟华明等, 2006; 唐俊华等, 2008; 高利娥等, 2009; 时章亮等, 2009; Cai *et al.*, 2011; 黄静宁等, 2011; 张利云等, 2012). 由此可见, 过铝质花岗岩的形成与陆壳的发展演化息息相关, 那么通过对其研究可以反映陆壳物质发生部分熔融时的源区组成性质以及物理环境等重要的深部信息.

东昆仑造山带作为分割中国两大单元的中央造山系的一部分, 自中元古代以来发生过多期构造—岩浆作用, 以加里东期和海西—印支期为主要期的岩浆作用时期(刘成东等, 2004; 谌宏伟等, 2005; 莫宣学等, 2007; 罗文行等, 2013). 加里东期作为东昆仑造山带一个重要的地质演化时期, 构造—岩浆作用活动强烈, 前人研究主要关注东昆南蛇绿构造混杂岩带和东昆中蛇绿构造混杂岩带及以北区域(朱云海等, 1999, 2005; 拜永山等, 2001; 边千韬等, 2001; 陆济璞等, 2005; 余能等, 2005; 龙晓平等, 2006; 莫宣学等, 2007; 李王晔等, 2007; 赵振明等, 2008; 高晓峰等, 2010; 高永宝和李文渊, 2011; 刘战庆等, 2011a, 2011b; 刘彬等, 2012), 而对介于东昆中和东昆南蛇绿构造混杂岩带之间的东昆南俯冲增生杂岩楔这一构造单元内的构造—岩浆作用研究相对薄弱, 特别是对具有重要地质意义的过铝质花岗岩的报道较少, 制约了整个东昆仑造山带早古生代构造演化和岩浆作用研究的完整性.

野外地质调查发现位于东昆南俯冲增生杂岩楔内的黑海地区发育加里东期过铝质花岗岩, 主要由黑云母英云闪长岩、黑云母花岗闪长岩、黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩组成, 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法获得二云母花岗岩和白云母花岗岩的年龄, 分别为 424.0~421.5 Ma 和 420.5 Ma, 形成于晚志留世, 属加里东旋回晚期.

本文将主要研究黑海地区过铝质花岗岩的分布特征、矿物组合、岩石类型及地球化学特征, 分析其可能的源区组成和形成机制, 推断其形成的地球动力学背景, 探讨东昆南俯冲增生杂岩楔的形成与演化, 进而为东昆仑造山带早古生代构造演化和地壳演化方式研究提供相关的地质依据.

1 区域地质特征

东昆仑造山带地理位置处于青藏高原北部、青海省中部, 呈近东西向展布, 为中央造山系西段的组成部分, 与柴达木地块、巴颜喀拉—羌塘地块、阿尔金造山带和秦岭造山带相邻. 自中元古代以来, 东昆仑造山带经历了多期洋陆转换和弧—陆碰撞、陆—陆碰撞过程, 是一个典型的多旋回、复合型和增生型造山带(Yao and Kenneth, 1994; 殷鸿福和张克信, 1997; 李继亮, 2004; 杨经绥等, 2010), 具有“多岛弧盆系”的特征(李荣社等, 2008a; 潘桂棠等, 2012). 东昆仑造山带自北向南可依次划分为东昆北岩浆弧、东昆北蛇绿构造混杂岩带、东昆中复合岩浆弧、东昆中蛇绿构造混杂岩带、东昆南俯冲增生杂岩楔和东昆南蛇绿构造混杂岩带(李荣社等, 2008b)(图 1).

研究区位于格尔木市西南黑海一带, 构造单元划分主体属于东昆南俯冲增生杂岩楔(图 2), 挟持于东昆中和东昆南两个蛇绿构造混杂岩带之间, 加里东期过铝质花岗岩发育其中. 俯冲增生杂岩楔内构造活动较为强烈, 主要表现为由北向南的逆冲作用, 是加里东期—印支期南部特提斯大洋岩石圈板块由南向北长期俯冲的所留下的印记(查显锋等, 2012).

研究区内主要发育古生代及三叠纪地层, 未见基底地层出露, 区域资料表明该带基底由古—中元古代苦海杂岩组成(王国灿等, 2004). 志留系赛什腾组自下而上由大陆斜坡至陆隆和深海沉积到浅海的沉积组合组成(赵振明等, 2010), 研究区内主要由变砂岩、含堇青石变砂岩和堇青石片岩组成, 因受岩体侵入影响广泛发育接触变质. 石炭—二叠纪浩特洛哇组由滨浅海相碎屑岩—碳酸盐岩和半深海斜坡相碎屑岩沉积组合组成, 与志留纪赛什腾组为角度不整合接触. 三叠纪地层包括早三叠世洪水川组、早—中三叠世闹仓竖沟组、中三叠世希里可特组和晚三叠世八宝山组, 其中早—中三叠世地层为边缘海裂陷盆地沉积, 晚三叠世八宝山组为一套辫状河道砂砾岩沉积, 角度不整合于早中三叠世地层之上.

俯冲增生杂岩楔内岩浆活动较为强烈, 除本文所研究的晚志留世过铝质花岗岩之外, 还发育有晚三叠世辉长岩和少量辉绿岩、角闪岩、闪长玢岩组成的基性侵入体, 为挤压环境下局部拉张导致地幔物质上涌所形成, 与区域上同期形成的中酸性侵入岩共同组成印支期侵入岩组合, 侵位于志留纪赛什腾组中, 并引起赛什腾组发育广泛的热接触变质作用, 该期侵入岩组合代表了古特提斯洋俯冲、消减和碰

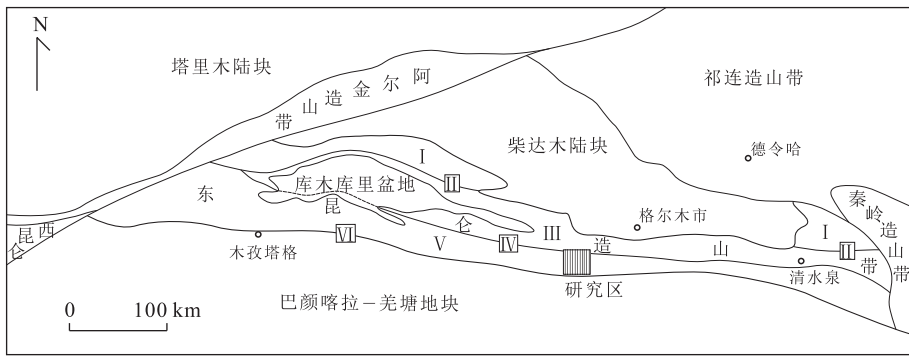


图 1 东昆仑造山带构造单元划分

Fig.1 Tectonic unit map of the eastern Kunlun orogenic belt

I. 东昆北岩浆弧; II. 东昆北蛇绿构造混杂岩带; III. 东昆中复合岩浆弧; IV. 东昆中蛇绿构造混杂岩带; V. 东昆南俯冲增生杂岩楔; VI. 东昆南蛇绿构造混杂岩带

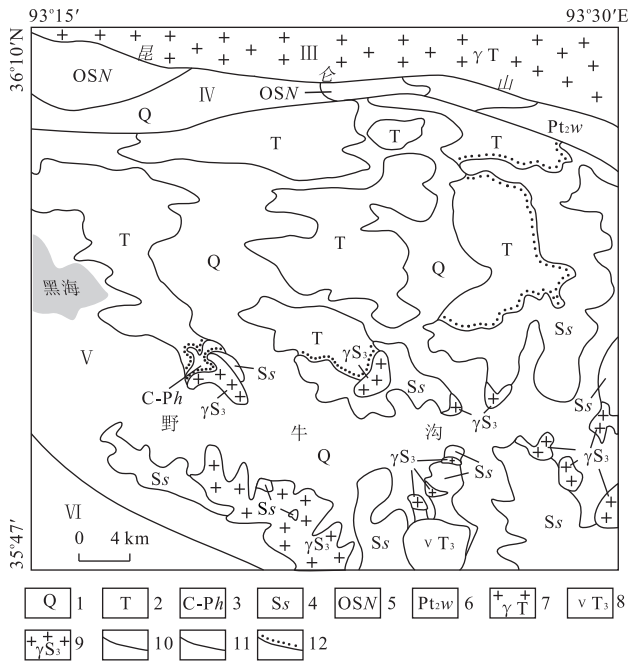


图 2 黑海地区地质简图

Fig.2 Simplified geological map of the Heihai region

1. 第四纪; 2. 三叠纪地层; 3. 石炭—二叠纪浩特洛哇组; 4. 志留纪赛什腾组; 5. 奥陶—志留纪纳赤台群; 6. 中元古代万宝沟群; 7. 三叠纪花岗岩; 8. 晚三叠世辉长岩; 9. 晚志留世过铝质花岗岩 (研究对象); 10. 区域断裂; 11. 地质界线; 12. 角度不整合界线

撞事件在研究区内的反映。

2 岩体地质及岩相学

黑海地区加里东期过铝质花岗岩以大小、规则不一的岩株方式发育, 分布于野牛沟南北两侧 (图 2)。野外露头显示过铝质花岗岩多为灰白色, 细—粗粒半自形粒状结构, 块状构造, 变质变形程度较弱,

局部露头见有后期构造作用所形成的碎裂岩化和糜棱岩化, 面理产状与区域构造线方向一致, 为近东西向。岩体围岩为志留纪赛什腾组, 两者为明显的侵入接触关系 (图 3a), 接触处发育强烈的角岩化; 石炭—二叠纪浩特洛哇组与早三叠世洪水川组角度不整合接触覆盖于岩体之上。过铝质花岗岩侵入体主要由黑云母英云闪长岩、黑云母花岗闪长岩、黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩 (图 3b) 组成。据野外观察, 白云母花岗岩为最晚期形成的侵入体, 呈宽窄不一的脉状侵入至黑云母花岗岩、二云母花岗岩和英云闪长岩中 (图 3c)。岩体中包体不太发育, 仅在黑云母花岗闪长岩中见有 20~70 cm 的似斑状英云闪长岩包体 (图 3d), 呈椭球状, 局部较为密集 (4~5 个/m²); 此外, 在黑云母花岗岩中发育有约 70 cm 宽的黑云石英片岩包体, 显微镜下可见毫米级极细粒花岗岩脉穿插其中。

黑云母英云闪长岩为灰白色, 细粒花岗结构, 主要由斜长石 (50%)、钾长石 (5%)、石英 (30%) 和黑云母 (15%) 组成, 副矿物主要为磷灰石和锆石。斜长石为自形板状, 可见白云母包裹体, 聚片双晶发育; 钾长石为他形粒状, 充填其他矿物颗粒空隙中, 格子双晶发育; 石英裂纹发育, 局部呈集合体; 黑云母绿泥石化蚀变较强, 晶形保存较好, 见有次生针状金红石晶体构成的三角形状集合体, 边缘还见有白云母。

黑云母英云闪长岩为灰白色, 细粒花岗结构, 主要由斜长石 (50%)、钾长石 (5%)、石英 (30%) 和黑云母 (15%) 组成, 副矿物主要为磷灰石和锆石。斜长石为自形板状, 可见白云母包裹体, 聚片双晶发育; 钾长石为他形粒状, 充填其他矿物颗粒空隙中, 格子双晶发育; 石英裂纹发育, 局部呈集合体; 黑云母绿

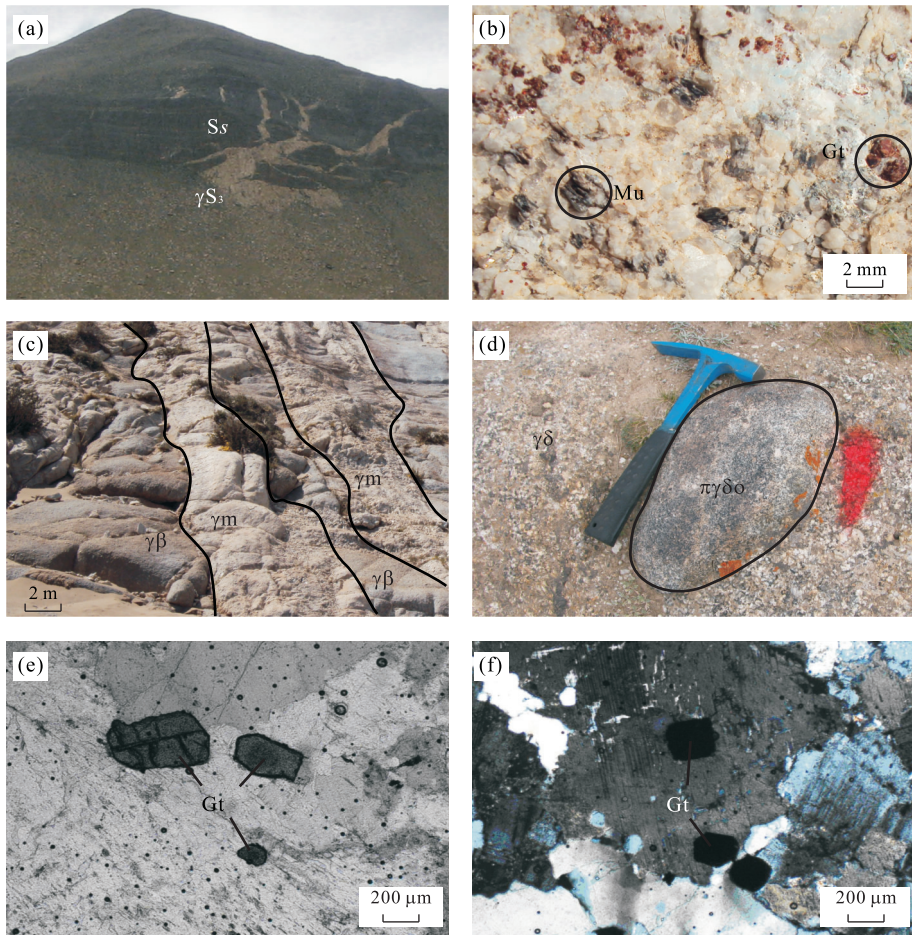


图 3 黑海地区加里东期过铝质花岗岩野外露头及显微镜下特征

Fig.3 Macroscopic and microcosmic characteristics of the caledonian peraluminous granites in Heihai region

a.晚志留世过铝质花岗岩(γS_3)与赛什腾组(S_3)侵入接触;b.含石榴子白云母花岗岩(Mu,白云母,Gt,石榴子石);c.白云母花岗岩(γm)与黑云母花岗岩($\gamma \beta$)侵入接触;d.花岗闪长岩($\gamma \delta$)中的似斑状英云闪长岩($\pi \gamma \delta o$)包体;e.石榴子石(Gt)显微镜下特征(单偏光);f.石榴子石(Gt)显微镜下特征(正交光)

泥石化蚀变较强,晶形保存较好,见有次生针状金红石晶体构成的三角形状集合体,边缘还见有白云母。

黑云母花岗闪长岩为灰白色,似斑状结构,基质为中粒花岗结构。斑晶主要为大小约 1 cm 的斜长石,基质由斜长石(55%~50%)、钾长石(5%~10%)、石英(30%)和黑云母(10%)组成,含极少量细小鳞片状白云母,副矿物主要为磷灰石和锆石。斜长石为半自形—自形板状,具有较强的绢云母化和高岭土化蚀变,可见黑云母包裹体,聚片双晶和卡纳复合双晶发育;钾长石多为他形粒状,呈填隙状充填于斜长石和云母之间,可见斜长石、石英和黑云母等包裹体,发育格子双晶和条纹结构;石英多呈粒状集合体,发育裂纹;黑云母为深褐色,多色性和吸收性显著,颗粒上可见三组方向生长的次生矿物金红石,绿泥石化蚀变较强而显示“墨水蓝”异常干涉色。

黑云母花岗岩为灰白色,细—中粒花岗结构,主

要由钾长石(30%~50%)、斜长石(30%~10%)、石英(30%)和黑云母(9%)组成,含少量的白云母(约 1%),副矿物主要为磷灰石和锆石。钾长石为粒状一半自形板状,发育斜长石、石英和黑云母包裹体,格子双晶和条纹结构发育;斜长石自形程度较高,发育绢云母化和高岭土化蚀变,可见黑云母、白云母包裹体,聚片双晶发育;石英发育裂纹,常呈集合体并包裹有长石等矿物;黑云母多色性及吸收性显著,发育绿泥石化显“墨水蓝”异常干涉色;白云母为无色,细小鳞片状,具特征的闪突起,常呈包裹体发育于其他矿物中。

二云母花岗岩为灰白色,中—细粒花岗结构,主要由斜长石(30%~20%)、钾长石(30%~40%)、石英(30%)、黑云母(5%)和白云母(5%)组成,副矿物主要为磷灰石和锆石。斜长石为半自形板状,矿物表面因绢云母化和高岭土化蚀变而显得混浊,可见粒

度较小的白云母包裹体,聚片双晶发育;钾长石多为半自形板状,矿物表面较为干净,发育黑云母、白云母、斜长石包裹体,格子双晶和条纹结构均较发育;石英多呈不规则状,局部呈集合体;黑云母多色性及吸收性明显,因自身颜色影响而干涉色不显;白云母为无色,具特征的闪突起,最高干涉色可达Ⅱ级橙红。

白云母花岗岩为灰白色,细一中粒花岗结构,主要由钾长石(30%)、斜长石(25%~30%)、石英(35%~30%)和白云母(8%)组成,黑云母(1%)极少,含石榴子石(1%),副矿物主要为磷灰石和锆石。钾长石自形程度差,多为粒状,可见白云母包裹体,发育格子双晶和条纹结构;斜长石为半自形板状,表面因蚀变而显得浑浊,可见云母包裹体,聚片双晶发育;石英为他形粒状分布于长石颗粒之间;白云母为无色,为自形片状,具特征的闪突起;石榴子石为浅褐色(图 3e),半自形—他形粒状,个别颗粒具“六边形”,包裹于其他矿物中,正高突起,表面发育裂纹,不含其他矿物包裹体,为均质体,正交镜下全消光(图 3f)。

3 地球化学

3.1 测试方法

黑海地区过铝质花岗岩主量元素、稀土元素和微量元素的测试委托国土资源部武汉矿产资源监督检查中心完成。主量元素测试采用四硼酸锂溶片 X 射线荧光光谱分析法在帕那科 Magix_pro2440 型 X 射线荧光光谱仪上完成,分析精度优于 1%;稀土元素和微量元素测试采用四酸溶矿-ICP-MS 分析方法在 X7 电感耦合等离子质谱仪上完成,分析精度优于 5%。

3.2 主量元素

黑海地区过铝质花岗岩主量元素测试结果及特征值如表 1。

黑云母英云闪长岩 SiO_2 含量为 65.32%, MgO (1.62%)、 TFeO (4.31%) 和 TiO_2 (0.71%) 含量较高; $\text{ALK}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 6.57%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.47, 里特曼指数 δ 为 1.93, 碱度率 AR 为 2.06, 显示钙碱性岩特征(图 4a, 4b); Al_2O_3 含量为 16.44%, 铝饱和指数 A/CNK 为 1.18, 属强过铝质花岗岩(图 4c)。

黑云母花岗闪长岩的 SiO_2 含量介于 64.88%~68.95% 之间, MgO (1.62%~2.07%)、 TFeO

(4.10%~5.84%) 和 TiO_2 (0.67%~0.94%) 含量较高; $\text{ALK}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 5.12%~6.93%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.04~1.52, 里特曼指数 δ 为 1.09~2.01, 碱度率 AR 为 1.82~2.61, 显示高钾钙碱性岩特征(图 4a, 4b); Al_2O_3 含量为 13.85%~14.85%, 铝饱和指数 A/CNK 为 1.15~1.26, 属强过铝质花岗岩(图 4c)。

黑云母花岗岩和二云母花岗岩之间属相互过渡性质, 主量元素组成特征相近, SiO_2 含量区间为 70.10%~75.03%, MgO (0.31%~1.25%)、 TFeO (0.99%~2.59%) 和 TiO_2 (0.10%~0.57%) 含量明显低于黑云母花岗闪长岩和英云闪长岩; $\text{ALK}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 含量为 6.60%~9.39%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.84~3.03, 里特曼指数 δ 为 1.52~3.00, 在 SiO_2 - K_2O 图解(图 4b)上, 除一个样品落入钙碱性系列, 其他样品均属高钾钙碱性系列; 碱度率值区间较大, 为 2.14~3.05, 显示钙碱性—碱性过渡的特征(图 4a); Al_2O_3 含量在 13.52%~15.34% 之间, 铝饱和指数 A/CNK 为 1.02~1.31, 绝大多数大于 1.1, 属过铝质—强过铝质花岗岩(图 4c)。

白云母花岗岩 SiO_2 含量在 4 个岩类中最高, 为 73.22%~75.87% 之间, MgO 、 TFeO 和 TiO_2 含量最低, 分别为 0.08%~0.27%、0.40%~1.05% 和 0.03%~0.14%; $\text{ALK}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 含量为 7.21%~8.38%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 在 0.99~1.42 之间, 里特曼指数 δ 为 1.62~2.18, 为高钾钙碱性系列(图 4b), 碱度率 AR (2.60~3.54) 较高, 显示一定的碱性岩特征(图 4a); Al_2O_3 含量在 13.58%~15.01% 之间, 铝饱和指数 A/CNK 为 1.10~1.25, 属强过铝质花岗岩(图 4c), 而且矿物组成上镁铁质矿物含量极少, 可将其归为淡色花岗岩。

通过以上主量元素分析可以得出, 黑海地区过铝质花岗岩的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 ALK 含量相对较高, TFeO 、 MgO 、 TiO_2 含量相对较低, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值多数大于 1, 而且绝大多数样品 A/CNK 大于 1.1, 计算标准矿物刚玉(C)含量大于 1%, 属于 S 型花岗岩类(Chappell and White, 2001); 其中, 英云闪长岩和黑云母花岗闪长岩的 TFeO 、 MgO 和 TiO_2 明显高于云母类花岗岩, 而 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 等则明显偏低, 这一差异可能是由于源区性质不同所造成。在 Frost(2001)花岗岩地球化学分类中, 黑海地区过铝质花岗岩属于镁质花岗岩(图 4d), 为镁质碱性过铝质花岗岩, 与 Cordilleran 岩基的内侧岩体特征类似, 可能与加厚地壳拆沉作用机制有关。

表 1 黑海地区过铝质花岗岩主量元素测试结果及特征值
Table 1 Analysis results and eigenvalues of major elements of the peraluminous granites in Heihai region

序号	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	CO ₂	Σ	ALK	K ₂ O/Na ₂ O	σ	AR	A/CNK	Norm.C
1	02-1-1	70.26	0.39	14.84	0.32	2.08	0.05	0.86	2.25	3.41	4.00	0.14	1.06	0.06	99.72	7.41	1.17	2.01	2.39	1.07	1.28
2	02-3-1	71.35	0.37	14.29	0.99	1.17	0.04	0.77	2.10	3.31	4.30	0.13	0.83	0.10	99.75	7.61	1.30	2.04	2.46	1.04	0.92
3	02-4-1	73.75	0.27	13.49	0.49	1.07	0.03	0.59	1.66	3.15	4.26	0.10	0.81	0.10	99.77	7.41	1.35	1.79	2.55	1.06	1.15
4	02-7-1	71.59	0.38	14.30	0.62	1.67	0.05	0.80	2.30	3.52	3.38	0.15	0.81	0.16	99.73	6.90	0.96	1.67	2.42	1.06	1.40
5	02-8-1	72.98	0.28	14.21	0.44	1.27	0.04	0.58	1.70	3.93	3.51	0.09	0.71	0.04	99.78	7.44	0.89	1.85	2.76	1.07	1.16
6	02-9-1	72.32	0.30	14.28	0.24	1.53	0.04	0.61	1.84	3.58	4.02	0.11	0.82	0.04	99.73	7.60	1.12	1.97	2.65	1.06	1.05
7	02-10-1	72.03	0.28	14.25	0.33	1.37	0.04	0.55	1.96	3.38	4.51	0.10	0.82	0.12	99.74	7.89	1.33	2.14	2.55	1.03	0.76
8	02-11-1	71.87	0.36	14.00	0.51	1.67	0.04	0.81	2.15	3.42	3.65	0.14	1.00	0.12	99.74	7.07	1.07	1.73	2.49	1.05	1.13
9	02-13-1	71.86	0.39	14.23	0.40	1.80	0.05	0.84	2.00	3.52	3.50	0.15	0.96	0.06	99.76	7.02	0.99	1.71	2.52	1.09	1.51
10	02-15-1	71.13	0.42	14.76	0.95	1.63	0.07	0.89	2.09	4.27	2.31	0.18	0.94	0.10	99.74	6.58	0.54	1.54	2.28	1.13	2.10
11	02-17-1	71.10	0.38	14.71	0.68	1.60	0.04	0.83	1.97	3.37	3.87	0.13	0.98	0.10	99.76	7.24	1.15	1.87	2.41	1.12	1.94
12	02-18-1	70.03	0.42	15.20	0.46	1.87	0.04	0.92	2.46	3.61	3.49	0.14	1.01	0.08	99.73	7.10	0.97	1.86	2.34	1.08	1.53
13	13-6-1	72.43	0.29	14.28	0.55	1.32	0.04	0.69	2.17	3.61	3.24	0.12	0.86	0.13	99.73	6.85	0.90	1.59	2.43	1.08	1.48
14	13-7-1	72.44	0.30	14.36	0.39	1.45	0.04	0.67	1.97	3.54	3.42	0.11	0.72	0.09	99.50	6.96	0.97	1.65	2.49	1.11	1.72
15	13-8-1	72.24	0.28	14.58	0.61	1.13	0.04	0.63	1.89	3.58	3.59	0.10	0.82	0.11	99.60	7.17	1.00	1.76	2.54	1.11	1.86
16	13-9-1	72.64	0.26	14.53	0.38	1.30	0.04	0.62	1.72	3.61	3.46	0.10	0.89	0.06	99.61	7.07	0.96	1.69	2.54	1.14	2.10
17	13-10-1	73.56	0.28	13.81	0.49	1.23	0.04	0.61	2.04	3.31	3.52	0.11	0.73	0.09	99.82	6.83	1.06	1.53	2.46	1.08	1.32
18	13-11-1	72.03	0.30	14.68	0.61	1.27	0.04	0.70	2.10	3.45	3.62	0.11	0.88	0.04	99.83	7.07	1.05	1.72	2.41	1.11	1.62
19	13-12-1	72.03	0.28	14.56	0.67	1.13	0.04	0.66	2.51	3.68	3.25	0.11	0.76	0.13	99.81	6.93	0.88	1.65	2.37	1.04	0.99
20	02-20-1	71.01	0.41	14.74	0.57	1.77	0.04	0.89	2.48	3.63	3.26	0.15	0.66	0.12	99.73	6.89	0.90	1.69	2.33	1.07	1.37
21	02-21-1	70.51	0.42	14.42	0.60	1.73	0.05	1.03	1.38	3.67	4.52	0.14	1.16	0.08	99.71	8.19	1.23	2.44	2.84	1.09	1.50
22	09-3-1	72.37	0.21	14.02	0.26	1.13	0.02	0.55	0.80	2.33	7.06	0.22	0.78	0.04	99.79	9.39	3.03	3.00	2.38	1.11	1.71
23	09-4-1	72.42	0.30	14.60	0.39	1.52	0.04	0.80	0.82	3.22	4.20	0.19	1.30	0.04	99.84	7.42	1.30	1.87	2.54	1.31	3.81
24	09-6-1	71.76	0.24	15.28	0.42	1.17	0.04	0.58	0.82	4.07	4.08	0.18	1.10	0.13	99.87	8.15	1.00	2.31	3.05	1.23	3.41
25	09-7-1	71.83	0.33	14.83	0.51	1.60	0.04	0.78	1.37	3.27	3.65	0.18	1.37	0.06	99.82	6.92	1.12	1.66	2.39	1.28	3.58
26	09-9-1	70.10	0.57	14.11	0.86	2.67	0.06	1.25	1.35	2.43	4.81	0.27	1.31	0.04	99.83	7.24	1.98	1.93	2.14	1.24	3.19
27	09-10-1	73.09	0.22	14.25	0.36	1.22	0.04	0.56	1.27	3.09	4.37	0.22	1.03	0.11	99.83	7.46	1.41	1.85	2.46	1.20	2.91
28	12-2-1	74.84	0.11	13.77	0.39	0.75	0.04	0.36	0.52	3.38	4.52	0.15	0.82	0.21	99.86	7.90	1.34	1.96	2.95	1.23	3.22
29	12-3-1	74.61	0.12	13.89	0.40	0.80	0.05	0.44	0.61	3.44	4.56	0.17	0.67	0.08	99.84	8.00	1.33	2.02	2.95	1.21	2.78
30	12-4-1	73.93	0.18	13.98	0.47	1.03	0.03	0.55	0.68	3.09	4.86	0.19	0.82	0.02	99.83	7.95	1.57	2.04	2.67	1.23	2.90
31	12-5-1	73.00	0.23	14.07	0.60	1.12	0.04	0.63	1.04	2.89	4.99	0.26	0.92	0.06	99.85	7.88	1.73	2.07	2.46	1.20	2.78
32	12-6-1	73.24	0.22	14.20	0.43	1.15	0.03	0.55	0.69	2.92	4.83	0.27	1.17	0.17	99.87	7.75	1.65	1.99	2.50	1.30	3.95
33	12-7-1	74.93	0.10	14.11	0.49	0.50	0.04	0.31	0.48	3.57	4.36	0.17	0.75	0.06	99.87	7.93	1.22	1.97	3.02	1.25	3.19
34	12-8-1	74.60	0.16	13.72	0.46	0.92	0.03	0.46	0.78	3.08	4.36	0.18	0.88	0.19	99.82	7.44	1.42	1.75	2.63	1.25	3.39
35	12-9-1	73.04	0.23	14.35	0.31	1.30	0.03	0.63	0.84	2.86	4.97	0.28	0.85	0.15	99.84	7.83	1.74	2.04	2.43	1.27	3.76
36	12-10-1	72.46	0.20	13.50	0.24	1.27	0.05	1.04	1.55	2.83	4.49	0.23	1.18	0.81	99.85	7.32	1.59	1.82	2.38	1.12	3.59

续表 1

序号	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	CO ₂	Σ	ALK	K ₂ O/Na ₂ O	σ	AR	A/CNK	Norm.C
37	12-11-1	73.16	0.23	14.28	0.38	1.25	0.03	0.66	0.72	2.86	4.92	0.27	1.00	0.09	99.85	7.78	1.72	2.01	2.45	1.30	3.80
38	12-13-1	72.57	0.23	14.32	0.54	1.30	0.04	0.77	0.67	2.25	5.58	0.32	1.18	0.06	99.83	7.83	2.48	2.07	2.18	1.35	4.27
39	12-14-1	70.24	0.31	15.32	0.64	1.73	0.05	1.00	2.42	3.67	3.09	0.27	1.02	0.11	99.87	6.76	0.84	1.68	2.23	1.14	2.44
40	13-1-1	73.66	0.22	13.84	0.09	1.12	0.02	0.43	0.80	3.03	5.35	0.25	1.01	0.04	99.86	8.38	1.77	2.29	2.68	1.16	2.30
41	13-2-1	72.96	0.23	14.44	0.26	1.20	0.03	0.46	1.11	2.94	4.91	0.24	1.02	0.04	99.84	7.85	1.67	2.06	2.42	1.22	2.94
42	13-3-1	73.61	0.22	13.82	0.41	1.07	0.03	0.45	1.09	2.82	4.96	0.25	0.85	0.11	99.69	7.78	1.76	1.98	2.45	1.18	2.68
43	13-4-1	73.38	0.21	14.07	0.60	0.82	0.03	0.46	1.06	2.92	5.03	0.23	0.88	0.06	99.75	7.95	1.72	2.08	2.48	1.18	2.58
44	13-13-1	72.25	0.29	14.51	0.52	1.30	0.05	0.65	1.85	3.61	3.52	0.12	1.04	0.09	99.80	7.13	0.98	1.74	2.54	1.12	1.89
45	13-15-1	72.56	0.22	14.70	0.23	1.17	0.04	0.42	1.39	3.74	4.15	0.17	0.85	0.11	99.75	7.89	1.11	2.11	2.79	1.13	2.19
46	13-16-1	72.82	0.20	14.49	0.40	0.98	0.04	0.42	1.11	3.72	4.09	0.17	1.06	0.09	99.59	7.81	1.10	2.05	2.87	1.17	2.54
47	02-12-1	75.90	0.05	13.59	0.03	0.48	0.02	0.10	0.46	3.47	4.92	0.16	0.64	0.10	99.92	8.39	1.42	2.14	3.16	1.16	2.54
48	02-19-1	75.70	0.03	13.69	0.08	0.32	0.03	0.08	0.79	4.08	4.02	0.22	0.64	0.14	99.82	8.10	0.99	2.01	3.54	1.12	2.04
49	13-5-1	73.99	0.14	14.59	0.52	0.53	0.02	0.18	0.85	3.46	4.29	0.21	0.96	0.13	99.87	7.75	1.24	1.94	2.72	1.25	3.51
50	13-14-1	73.09	0.13	14.98	0.38	0.63	0.04	0.27	1.20	3.92	4.18	0.17	0.72	0.15	99.86	8.10	1.07	2.18	2.91	1.16	2.58
51	13-17-1	74.94	0.10	14.16	0.20	0.67	0.04	0.22	0.96	3.26	3.94	0.28	0.95	0.09	99.81	7.20	1.21	1.62	2.60	1.28	3.67
52	09-1-1	67.00	0.91	13.85	1.28	4.38	0.11	2.07	2.54	2.28	2.84	0.34	2.19	0.04	99.83	5.12	1.25	1.09	1.82	1.26	3.31
53	09-3-2	66.87	0.87	14.20	1.35	4.12	0.07	2.02	2.24	2.50	3.38	0.32	1.83	0.04	99.81	5.88	1.35	1.45	1.95	1.24	3.21
54	09-5-1	64.88	0.94	14.85	1.27	4.57	0.10	2.06	2.59	2.63	4.00	0.35	1.46	0.08	99.78	6.63	1.52	2.01	1.98	1.15	2.51
55	09-8-1	68.95	0.67	14.08	1.02	3.08	0.07	1.62	1.25	3.40	3.53	0.34	1.74	0.08	99.83	6.93	1.04	1.85	2.61	1.25	3.39
56	02-5-1	65.32	0.71	16.44	0.89	3.42	0.12	1.62	2.55	4.46	2.11	0.24	1.79	0.10	99.77	6.57	0.47	1.93	2.06	1.18	2.99

注:含量单位为%; 1~19 样品为黑云母花岗岩; 20~46 样品为二云母花岗岩; 47~51 样品为白云母花岗岩; 52~55 样品为黑云母花岗岩闪长岩; 56 样品为黑云母英云闪长岩。

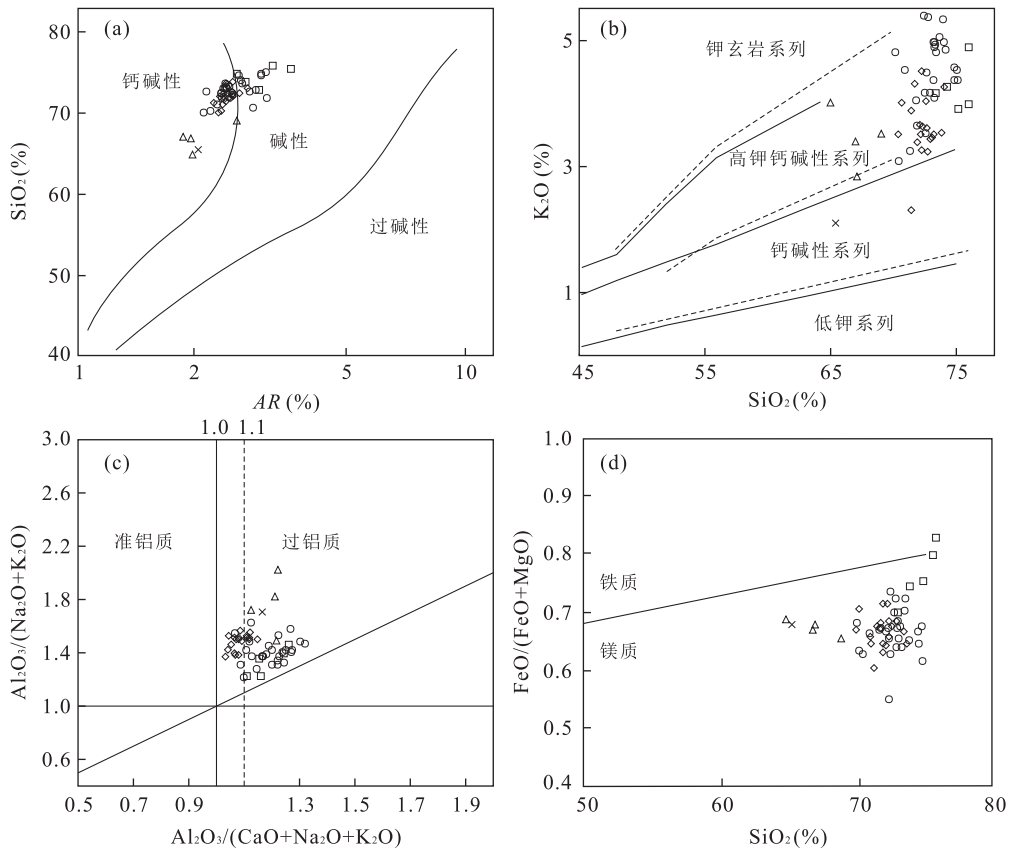


图 4 主量元素图解

Fig.4 Major elements diagrams

a. AR-SiO₂ 图解, 据邓晋福等(2004); b. SiO₂-K₂O 图解, 据 Rickwood(1989); c. A/(CNK-A/NK) 图解, 据 Maniar and Piccoli(1989); d. SiO₂-FeO/(FeO+MgO) 图解, 据 Frost *et al.*(2001); 图中叉形代表英云闪长岩, 三角形代表花岗岩闪长岩, 菱形代表黑云母花岗岩, 圆形代表二云母花岗岩, 正方形代表白云母花岗岩, 后续图相同

3.3 稀土元素

黑海地区过铝质花岗岩稀土元素测试结果及特征值如表 2。黑海地区过铝质花岗岩中黑云母英云闪长岩 $\sum \text{REE}$ (564.78×10^{-6}) 最高, 黑云母花岗岩闪长岩 $\sum \text{REE}$ ($195.60 \times 10^{-6} \sim 292.80 \times 10^{-6}$) 次之, 黑云母花岗岩 $\sum \text{REE}$ ($114.41 \times 10^{-6} \sim 264.07 \times 10^{-6}$) 和二云母花岗岩 $\sum \text{REE}$ ($74.65 \times 10^{-6} \sim 223.04 \times 10^{-6}$) 较低, 白云母花岗岩 $\sum \text{REE}$ ($28.64 \times 10^{-6} \sim 85.92 \times 10^{-6}$) 最低, 总体呈现 $\sum \text{REE}$ 逐渐减少的趋势。黑云母英云闪长岩、黑云母花岗岩闪长岩、黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分别为 39.13、6.63~15.89、11.08~40.64、5.39~40.94 和 3.60~11.03, 均为 LREE 相对富集型; δEu 值分别为 0.30、0.50~0.60、0.46~0.75、0.35~0.72 和 0.46~0.53, 均呈现中等负 Eu 异常, 其中有两块不含石榴子石白云母花岗岩的 δEu 值为 1.02 和 1.21, 显示一定的正 Eu 异常, 可能与部分熔融过程中长石参与有关(大量钾长石的熔融也可导致形成

的岩浆中富 Eu)。稀土元素球粒陨石标准化曲线(图 5)均表现为 LREE 相对富集、HREE 相对亏损的右倾曲线特征, LREE 分馏较为明显, 而且 LREE 富集程度随酸性程度的增加而减弱, 白云母花岗岩呈现较缓的右倾曲线。图 5 中可以清晰的看出绝大多数样品均呈现一定的 Eu 谷, 为负 Eu 异常, 两块不含石榴子石白云母花岗岩样品呈现 Eu 峰。

3.4 微量元素

黑海地区过铝质花岗岩微量元素比值蛛网图如图 6, 具有右倾曲线特征。黑海地区过铝质花岗岩微量元素测试结果及特征值如表 3。在 LILE 上, 黑海地区过铝质花岗岩相对富集 Cs、Rb、Th 和 K, 相对亏损 Ba 和 Sr; 在 HFS 上具有相对亏损的特征, 尤其亏损 Nb 和 Ti。相对富集 LILE 而亏损 HFS 的特征与岛弧性质花岗岩类似(Pearce, 1984), 而且这种富 LILE 的特征与云母的分解有关(Icenhower and London, 1996)。很低的 Ti 含量表明其形成可能直接与地壳物质的部分熔融有关, 且参与熔融的矿物

表 2 黑海地区过铝质花岗岩稀土元素测试结果及特征值
Table 2 Analysis results and eigenvalues of the peraluminous granites in Heihai region

序号	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	总量	L _{AN} /Y _{BN}	δEu
1	02-1-1	45.73	86.43	9.47	31.23	5.12	1.00	4.22	0.61	2.91	0.51	1.38	0.21	1.20	0.18	14.89	205.10	0.63	0.16
2	02-3-1	47.13	88.95	9.92	32.99	5.28	0.96	4.29	0.60	2.79	0.48	1.19	0.19	0.98	0.16	13.37	209.27	0.92	0.16
3	02-4-1	39.18	73.74	8.37	27.80	5.07	0.81	4.02	0.55	2.41	0.39	0.97	0.16	0.75	0.13	10.97	175.30	0.94	0.14
4	02-7-1	55.86	103.50	11.33	36.31	5.62	1.04	4.29	0.58	2.57	0.43	1.23	0.20	1.20	0.19	12.64	237.00	0.87	0.26
5	02-8-1	39.26	74.69	8.35	28.15	5.24	0.78	4.87	0.78	4.38	0.82	2.39	0.37	2.39	0.34	25.55	198.36	1.47	0.20
6	02-9-1	43.74	80.84	8.77	28.70	4.39	0.89	3.58	0.49	2.11	0.36	0.98	0.16	0.82	0.14	10.83	186.80	1.07	0.15
7	02-10-1	36.19	65.93	7.37	23.87	3.80	0.85	2.91	0.42	1.73	0.29	0.72	0.13	0.65	0.11	8.18	153.14	1.38	0.19
8	02-11-1	41.54	78.10	8.86	29.81	5.10	0.93	4.18	0.59	2.78	0.49	1.32	0.21	1.17	0.19	14.39	189.66	0.78	0.21
9	02-13-1	41.15	77.95	8.59	27.86	4.57	0.92	3.64	0.53	2.41	0.40	1.08	0.17	0.94	0.15	11.50	181.86	0.72	0.19
10	02-15-1	61.84	113.20	12.40	41.03	6.57	1.03	5.37	0.75	3.36	0.55	1.37	0.21	1.07	0.17	15.17	264.07	0.90	0.16
11	02-17-1	45.41	86.25	9.52	31.43	5.27	0.96	4.38	0.58	2.65	0.46	1.16	0.19	1.04	0.16	12.96	202.41	0.79	0.17
12	02-18-1	52.47	97.44	10.78	35.38	5.44	1.20	4.06	0.55	2.54	0.42	1.15	0.17	0.87	0.15	12.18	224.80	0.68	0.15
13	13-6-1	32.27	59.63	6.57	23.19	4.19	0.81	3.32	0.49	2.52	0.43	1.15	0.17	1.09	0.16	11.85	147.84	0.71	0.21
14	13-7-1	33.15	61.77	6.84	23.70	4.23	0.81	3.44	0.51	2.49	0.42	1.10	0.17	0.96	0.15	11.64	151.38	0.76	0.17
15	13-8-1	31.59	59.07	6.60	23.36	4.16	0.81	3.43	0.51	2.68	0.47	1.21	0.18	1.12	0.16	12.62	147.97	0.87	0.20
16	13-9-1	30.92	58.47	6.55	23.27	4.24	0.80	3.48	0.53	2.71	0.48	1.27	0.19	1.26	0.18	12.98	147.32	0.74	0.17
17	13-10-1	23.17	43.35	4.89	17.41	3.30	0.74	2.90	0.44	2.43	0.45	1.24	0.19	1.20	0.18	12.53	114.41	0.93	0.19
18	13-11-1	33.26	62.06	6.92	24.13	4.38	0.79	3.51	0.54	2.87	0.50	1.32	0.19	1.20	0.17	12.65	154.49	0.80	0.18
19	13-12-1	38.70	72.82	8.10	28.33	5.03	0.84	3.95	0.60	3.14	0.55	1.49	0.23	1.52	0.21	15.49	181.01	0.83	0.19
20	02-20-1	50.63	96.71	10.43	34.46	5.51	0.99	4.33	0.57	2.62	0.42	1.18	0.17	0.93	0.15	12.31	221.41	0.65	0.18
21	02-21-1	49.62	98.46	11.14	35.76	5.35	1.10	3.82	0.51	2.11	0.35	0.96	0.15	0.82	0.14	10.25	220.55	0.90	0.14
22	09-3-1	25.30	51.05	6.39	23.05	5.46	1.23	4.84	0.76	4.21	0.73	2.29	0.31	2.06	0.30	34.52	162.51	1.26	0.17
23	09-4-1	24.62	49.03	5.99	21.78	4.60	0.74	3.66	0.58	3.05	0.55	1.68	0.23	1.48	0.22	25.01	143.22	1.18	0.22
24	09-6-1	22.98	42.94	5.26	19.15	3.90	0.76	3.32	0.54	2.92	0.57	1.76	0.24	1.45	0.21	26.61	132.60	0.97	0.25
25	09-7-1	27.21	51.96	6.44	23.24	4.91	0.87	3.94	0.62	3.32	0.60	1.64	0.25	1.54	0.23	18.34	145.11	1.27	0.20
26	09-9-1	37.65	76.13	9.53	36.22	7.87	1.15	6.67	1.09	6.38	1.20	3.39	0.48	3.04	0.41	31.83	223.04	1.15	0.14
27	09-10-1	20.99	41.33	5.11	18.60	4.12	0.62	3.48	0.54	2.96	0.52	1.63	0.22	1.37	0.19	24.84	126.51	1.84	0.26
28	12-2-1	12.36	25.19	3.25	11.72	2.95	0.40	2.55	0.47	2.61	0.49	1.35	0.19	1.26	0.18	18.98	83.94	3.08	0.25
29	12-3-1	15.57	32.05	4.17	15.12	3.61	0.54	3.11	0.53	2.96	0.54	1.63	0.23	1.45	0.21	23.29	104.99	2.93	0.31
30	12-4-1	23.51	48.61	6.28	22.88	5.23	0.67	4.18	0.67	3.54	0.63	1.81	0.23	1.45	0.21	16.37	136.26	1.84	0.18
31	12-5-1	26.78	54.62	7.19	26.37	6.05	0.72	5.04	0.78	3.78	0.64	1.73	0.22	1.34	0.19	23.10	158.53	1.74	0.17
32	12-6-1	25.60	52.62	6.59	24.38	5.37	0.64	4.60	0.69	3.52	0.59	1.59	0.21	1.26	0.17	24.73	152.56	1.66	0.18
33	12-7-1	10.07	20.07	2.63	9.39	2.23	0.37	1.99	0.35	2.08	0.38	1.28	0.19	1.26	0.18	22.18	74.65	2.53	0.45
34	12-8-1	19.09	38.48	5.10	18.71	4.26	0.60	3.46	0.56	2.91	0.51	1.61	0.20	1.26	0.17	25.11	122.04	1.66	0.22
35	12-9-1	27.58	56.57	7.34	27.09	5.99	0.74	4.89	0.77	3.88	0.63	1.63	0.21	1.28	0.17	22.16	160.93	1.76	0.15
36	12-10-1	24.18	49.07	6.39	23.73	5.42	0.64	4.44	0.70	3.53	0.61	1.72	0.21	1.33	0.18	25.49	147.64	1.33	0.16

续表 2

序号	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	总量	L _{AN} /Y _{bN}	δEu
37	12-11-1	26.25	53.56	6.91	25.27	5.67	0.70	4.60	0.71	3.33	0.53	1.50	0.18	1.08	0.16	20.80	151.26	1.68	0.18
38	12-13-1	21.29	52.42	5.61	21.61	5.08	0.65	4.10	0.62	2.91	0.47	1.41	0.17	0.93	0.13	24.86	142.26	1.57	0.15
39	12-14-1	17.92	35.99	4.80	17.58	3.86	0.74	3.29	0.49	2.28	0.39	1.01	0.14	0.90	0.13	10.95	100.46	1.59	0.24
40	13-1-1	26.94	55.94	6.67	25.11	5.30	0.63	4.24	0.61	2.73	0.40	0.96	0.14	0.82	0.11	10.50	141.10	2.00	0.17
41	13-2-1	29.75	60.92	7.24	26.96	5.71	0.65	4.51	0.68	3.10	0.46	1.13	0.18	1.00	0.13	11.73	154.15	1.91	0.16
42	13-3-1	28.42	57.34	6.95	25.75	5.79	0.61	4.59	0.77	3.69	0.57	1.37	0.20	1.29	0.16	12.84	150.34	1.87	0.16
43	13-4-1	25.47	52.20	6.10	22.40	4.79	0.60	3.92	0.60	2.63	0.42	1.01	0.14	0.86	0.11	11.17	132.41	1.68	0.17
44	13-13-1	31.54	58.90	6.59	23.18	4.16	0.79	3.31	0.49	2.45	0.42	1.07	0.16	0.98	0.14	11.01	145.18	1.12	0.19
45	13-15-1	24.19	45.90	5.35	19.22	3.91	0.68	3.28	0.59	3.29	0.56	1.54	0.25	1.58	0.21	15.86	126.42	2.05	0.23
46	13-16-1	22.48	43.56	4.94	17.56	3.45	0.66	2.75	0.46	2.38	0.41	1.06	0.16	1.03	0.15	11.45	112.51	1.37	0.29
47	02-12-1	4.08	7.34	0.89	3.04	0.77	0.33	0.89	0.23	1.20	0.24	0.68	0.14	0.76	0.13	7.92	28.64	9.40	0.23
48	02-19-1	5.65	10.85	1.21	3.97	1.04	0.36	1.13	0.28	1.35	0.23	0.58	0.11	0.54	0.10	7.24	34.64	5.15	0.43
49	13-5-1	14.86	31.25	3.57	13.36	2.87	0.45	2.73	0.46	2.38	0.40	1.02	0.16	0.91	0.13	11.36	85.92	2.54	0.28
50	13-14-1	14.18	26.70	3.20	11.54	2.71	0.39	2.39	0.48	2.60	0.44	1.19	0.21	1.31	0.17	11.38	78.90	3.03	0.23
51	13-17-1	10.08	19.78	2.25	8.04	1.89	0.32	1.76	0.36	2.08	0.37	1.06	0.18	1.09	0.15	11.00	60.39	3.72	0.44
52	09-1-1	48.61	97.96	12.55	47.98	10.18	1.60	9.16	1.54	8.88	1.62	4.25	0.56	3.29	0.46	44.17	292.80	0.48	0.17
53	09-3-2	47.37	95.00	11.95	46.32	9.32	1.52	7.87	1.23	6.42	1.11	2.76	0.42	2.72	0.40	32.20	266.59	0.67	0.15
54	09-5-1	43.13	85.45	10.56	40.46	8.92	1.60	7.88	1.37	8.26	1.63	4.63	0.69	4.39	0.60	45.31	264.89	0.83	0.14
55	09-8-1	33.95	68.92	8.56	32.29	6.93	1.30	5.89	0.94	4.86	0.84	2.06	0.24	1.44	0.22	27.16	195.60	0.61	0.21
56	02-5-1	134.60	244.10	26.63	85.16	13.49	1.20	10.42	1.46	7.03	1.16	2.99	0.40	2.32	0.32	33.49	564.78	0.45	0.16
	09-1-2	46.54	96.23	12.05	46.45	10.07	1.50	9.18	1.44	8.30	1.45	3.36	0.39	1.97	0.25	41.78	280.95	0.61	0.15

注:含量单位为 10⁻⁶; 1~19 样品为黑云母花岗岩; 20~46 样品为二云母花岗岩; 47~51 样品为白云母花岗岩; 52~55 样品为黑云母花岗岩闪长岩; 56 样品为黑云母英闪长岩。

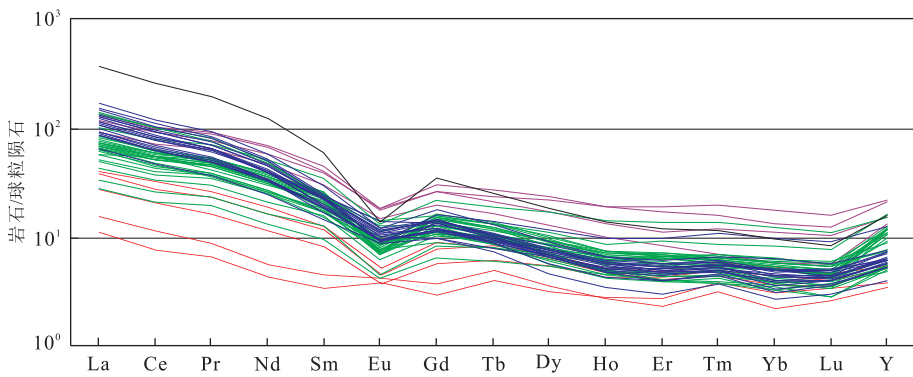


图 5 黑海地区过铝质花岗岩稀土元素球粒陨石标准化曲线

Fig.5 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the peraluminous granites in Heihai region

黑色代表英云闪长岩,紫色代表花岗闪长岩,蓝色代表黑云母花岗岩,绿色代表二云母花岗岩,红色代表白云母花岗岩;球粒陨石标准化值据 Taylor and McLennan(1985)

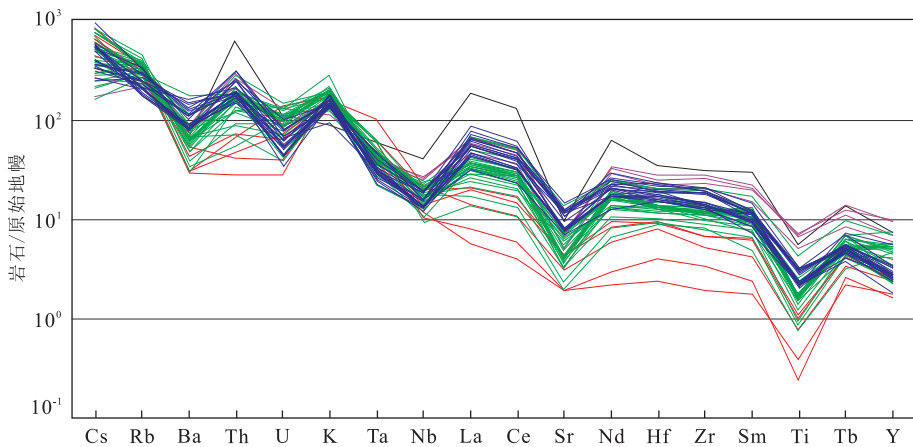


图 6 黑海地区过铝质花岗岩微量元素原始地幔标准化曲线

Fig.6 Primitive mantle-normalized patterns of the peraluminous granites in Heihai region

黑色代表英云闪长岩,紫色代表花岗闪长岩,蓝色代表黑云母花岗岩,绿色代表二云母花岗岩,红色代表白云母花岗岩;原始地幔标准化值据 McDonough *et al.*(1992)

中 Ti 元素含量较低或者受熔融温度的控制。

Rb/Sr 比值的差异特征可能是源区部分熔融程度的一种体现,部分熔融的发生向着富 Rb、亏损 Sr 的方向发展。黑海地区过铝质花岗岩中,黑云母英云闪长岩、黑云母花岗闪长岩与黑云母花岗岩 Rb/Sr 比值分别为 0.78、1.08~1.35 和 0.51~1.29,相对较低,而二云母花岗岩 Rb/Sr 比值(0.48~5.83)和白云母花岗岩 Rb/Sr 比值(2.10~4.72)相对较高,说明前三者部分熔融程度高于后两者。

4 讨论

4.1 温压条件

Watson and Harrison(1983)依据 Zr 在岩石的

特性,建立了 Zr 溶解度、温度和岩浆主要元素组成之间的关系:

$$\ln D_{Zr, zircon/melt} = \{-3.8 - [0.85(M - 1)]\} + 12900/T \quad (1)$$

Miller *et al.*(2003)认为公式(1)可以作为锆饱和和温度计来估算初始源区岩浆的温度,并重新建立了锆饱和和地质温度计的计算方程:

$$T_{Zr} = 12900/[2.95 + 0.85M + \ln(496000/Zr_{melt})] \quad (2)$$

其中: $M = (Na + K + 2Ca)/(Si \times Al)$,数值为全岩 Si、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K、P 元素阳离子数归一化后各元素的阳离子数数值。

依据 Miller *et al.*(2003)的温度计算公式,估算所得的黑海地区过铝质花岗岩 T_{Zr} 如表 1。黑云母英云闪长岩和黑云母花岗闪长岩 T_{Zr} 分别为 827~

表 3 黑海地区过铝质花岗岩微量元素测试结果及特征值

Table 3 Analysis results and eigenvalues of trace elements of the peraluminous granites in Heihai region

序号	样品号	Cs	Rb	Ba	Th	U	Ta	Nb	Sr	Hf	Zr	Rb/Sr	Rb/Ba	T_{Zr}
1	02-1-1	8.43	137.55	1 145.00	18.47	1.68	1.46	13.83	261.60	7.31	219.40	0.53	0.12	788.64
2	02-3-1	8.66	186.28	969.20	21.82	1.13	1.40	13.06	231.80	6.07	202.20	0.80	0.19	790.92
3	02-4-1	6.32	134.11	602.00	21.30	1.33	1.09	10.84	199.60	4.77	143.00	0.67	0.22	789.94
4	02-7-1	14.18	189.63	900.80	15.19	0.97	1.93	11.60	264.30	6.88	218.00	0.72	0.21	792.45
5	02-8-1	12.77	218.27	543.20	21.22	2.18	1.70	13.66	168.90	4.96	148.90	1.29	0.40	783.33
6	02-9-1	5.80	174.28	1 056.00	16.46	0.91	1.17	11.48	260.10	5.36	162.70	0.67	0.17	788.14
7	02-10-1	8.53	195.39	929.60	16.04	0.94	1.35	9.69	243.20	4.71	141.20	0.80	0.21	788.42
8	02-11-1	7.97	161.54	811.20	27.35	1.72	1.86	13.70	261.10	6.15	206.30	0.62	0.20	812.95
9	02-13-1	7.48	152.06	799.50	17.06	1.23	1.22	9.50	248.90	5.97	211.50	0.61	0.19	803.90
10	02-15-1	22.61	213.90	728.10	26.86	1.40	1.28	13.28	224.90	7.27	237.50	0.95	0.29	779.66
11	02-17-1	9.31	163.22	796.10	22.65	1.74	1.25	11.21	261.10	5.68	207.40	0.63	0.21	813.55
12	02-18-1	13.53	160.89	1 014.00	16.10	0.72	0.95	9.54	314.70	6.68	236.20	0.51	0.16	782.39
13	13-6-1	11.87	114.31	576.10	14.44	1.19	1.36	9.84	161.30	5.37	159.90	0.71	0.20	788.24
14	13-7-1	12.84	120.14	606.10	16.04	1.15	1.06	9.38	161.10	4.93	159.00	0.75	0.20	772.39
15	13-8-1	13.73	135.80	647.90	14.56	1.08	1.31	9.67	170.90	5.63	156.60	0.79	0.21	807.98
16	13-9-1	14.03	115.65	642.20	15.65	1.45	1.01	8.60	164.80	5.22	155.40	0.70	0.18	813.96
17	13-10-1	9.86	137.81	606.00	13.31	1.39	1.24	9.63	146.20	4.76	147.90	0.94	0.23	826.33
18	13-11-1	13.40	124.72	629.75	12.91	1.11	1.17	9.54	169.00	5.97	155.60	0.74	0.20	813.79
19	13-12-1	13.38	138.76	578.65	16.51	1.46	1.25	9.74	174.20	5.49	167.90	0.80	0.24	820.60
20	02-20-1	12.68	144.62	822.80	19.57	0.98	1.16	9.94	299.90	6.53	224.10	0.48	0.18	775.60
21	02-21-1	5.07	193.53	1 295.00	16.08	0.97	0.92	9.14	252.70	5.88	215.30	0.77	0.15	785.29
22	09-3-1	5.18	191.50	839.40	16.83	2.80	1.25	7.71	161.30	4.47	152.20	1.19	0.23	781.97
23	09-4-1	5.88	201.80	546.60	13.90	2.88	1.70	11.13	121.30	4.79	170.30	1.66	0.37	777.40
24	09-6-1	9.60	141.20	485.70	6.20	0.86	1.82	10.67	71.07	4.10	145.00	1.99	0.29	786.66
25	09-7-1	6.72	194.20	567.10	15.68	2.51	1.46	11.12	148.50	4.40	152.40	1.31	0.34	761.53
26	09-9-1	13.77	269.70	643.30	24.79	3.17	1.59	17.16	110.60	6.58	235.20	2.44	0.42	770.42
27	09-10-1	18.51	251.20	437.50	13.00	1.84	2.16	11.97	94.20	3.92	136.80	2.67	0.57	755.01
28	12-2-1	18.57	280.10	276.80	8.09	2.03	2.22	13.31	51.29	2.90	90.90	5.46	1.01	764.04
29	12-3-1	19.99	304.70	342.70	10.81	3.03	2.67	12.89	71.40	3.20	103.90	4.27	0.89	786.77
30	12-4-1	12.73	246.80	482.40	14.79	2.40	1.58	12.46	91.37	4.11	134.10	2.70	0.51	786.13
31	12-5-1	11.86	242.20	463.60	14.68	2.14	1.71	14.67	78.13	4.37	139.10	3.10	0.52	790.25
32	12-6-1	7.09	223.20	447.50	15.14	2.16	1.85	15.53	69.65	4.00	134.40	3.20	0.50	760.78
33	12-7-1	18.26	243.30	251.50	4.78	2.24	2.51	6.84	41.73	2.80	95.99	5.83	0.97	783.71
34	12-8-1	9.22	209.50	446.10	11.14	2.30	1.83	11.89	80.32	3.75	126.00	2.61	0.47	791.38
35	12-9-1	8.63	245.10	483.80	18.58	1.96	1.63	16.20	91.21	4.28	139.40	2.69	0.51	777.41
36	12-10-1	3.94	179.50	444.50	14.15	0.94	1.52	14.22	84.57	4.10	134.60	2.12	0.40	793.18
37	12-11-1	10.40	233.60	481.10	15.73	2.33	1.81	15.07	83.42	4.21	139.30	2.80	0.49	806.94
38	12-13-1	9.49	246.90	451.90	14.09	2.22	1.69	17.44	104.90	4.78	157.30	2.35	0.55	769.45
39	12-14-1	14.75	201.40	216.60	11.78	1.92	2.04	13.68	133.40	3.67	126.60	1.51	0.93	785.87
40	13-1-1	7.24	252.41	402.90	16.71	2.73	1.72	15.18	83.80	4.30	126.30	3.01	0.63	812.37
41	13-2-1	13.34	259.19	419.80	18.64	2.11	1.52	14.11	90.00	4.37	135.60	2.88	0.62	790.88
42	13-3-1	8.97	248.01	378.95	16.17	2.37	1.67	15.75	87.80	4.34	132.90	2.82	0.65	799.49
43	13-4-1	12.00	212.87	352.90	13.30	2.50	1.69	14.58	86.60	4.21	126.40	2.46	0.60	834.54
44	13-13-1	17.08	168.75	638.90	16.21	1.38	1.28	10.05	156.00	5.43	150.30	1.08	0.26	785.46
45	13-15-1	20.63	226.72	579.25	10.32	1.69	1.86	12.34	137.40	4.01	110.80	1.65	0.39	815.12
46	13-16-1	13.28	161.87	492.30	7.54	1.55	2.18	11.10	139.70	4.40	117.90	1.16	0.33	813.01
47	02-12-1	15.64	204.88	209.20	2.42	0.60	1.55	8.40	39.86	0.73	21.80	5.14	0.98	741.44
48	02-19-1	15.66	190.65	378.70	3.45	0.86	2.49	7.58	40.40	1.23	37.00	4.72	0.50	733.75
49	13-5-1	10.35	194.06	217.25	5.59	2.99	2.65	14.54	92.60	2.89	76.50	2.10	0.89	723.95
50	13-14-1	16.82	231.78	307.10	6.14	1.38	1.68	10.29	91.70	2.91	76.60	2.53	0.75	646.93
51	13-17-1	19.90	221.18	212.65	3.96	1.55	4.32	15.55	64.10	2.54	59.50	3.45	1.04	679.32
52	09-1-1	6.42	153.90	536.10	23.20	2.87	1.80	18.69	142.70	8.74	318.40	1.08	0.29	861.31
53	09-3-2	8.68	195.60	645.40	25.58	1.93	1.59	17.94	157.00	7.87	292.60	1.25	0.30	860.00
54	09-5-1	14.56	217.30	830.00	18.27	1.84	1.69	19.45	160.80	6.96	260.40	1.35	0.26	827.29
55	09-8-1	4.09	142.90	585.00	16.94	2.37	2.01	15.64	107.10	6.40	233.70	1.33	0.24	831.80
56	02-5-1	7.68	157.36	470.80	51.82	2.35	2.52	29.15	202.00	10.90	346.20	0.78	0.33	835.80
	09-1-2	11.49	168.50	336.30	31.51	2.35	1.49	17.49	142.50	7.34	274.70	1.18	0.50	857.10

注:含量单位为 10^{-6} ; 1~19 样品为黑云母花岗岩; 20~46 样品为二云母花岗岩; 47~51 样品为白云母花岗岩; 52~55 样品为黑云母花岗岩闪长岩; 56 样品为黑云母英云闪长岩。

861 °C 和 836 °C, 略高于黑云母花岗岩 T_{Zr} (772 ~ 826 °C) 和二云母花岗岩 T_{Zr} (755 ~ 835 °C), 白云母花岗岩 T_{Zr} 最低, 为 647 ~ 724 °C, 在形成温度上呈现温度逐渐降低的特征(图 7a), 这可能与源区热源的提供程度有关。

此外, Sylvester(1998) 认为在深熔作用发生的过程中, 源区岩浆温度的不同对 Al_2O_3 和 TiO_2 的产生浓度的影响也不同, 由于铝耐熔相的存在使得 Al_2O_3 浓度随温度的变化的影响不大, 而含 Ti 矿物随着温度的升高而逐渐发生分解, 从而使得 TiO_2 浓度会随着温度的升高而平稳上升; 那么 Al_2O_3/TiO_2 会随着源区岩浆温度的升高而降低; 反之, 则升高。黑海地区过铝质花岗岩的 Al_2O_3/TiO_2 值所反映的温度变化与 T_{Zr} 变化特征是相符的。

张旗等(2006) 认为中酸性岩浆岩的 Sr 和 Yb 的含量与岩浆形成的压力(深度)有密切的关系, 并按照 $Sr=400 \times 10^{-6}$ 和 $Yb=2 \times 10^{-6}$ 的标志将花岗岩划分为 5 类。按此分类(图 7b), 黑海地区过铝质花岗岩中英云闪长岩与黑云母花岗闪长岩属低 Sr 高

Yb 型, 形成于低压环境; 而黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩则绝大多数属于低 Sr、低 Yb 型, 形成于中等压力环境。按照 Sr 和 Yb 含量的变化, 黑海地区过铝质花岗岩所处的地壳可能属于较厚地壳 ($Sr < 400 \times 10^{-6}$, $Yb < 2 \times 10^{-6}$) 或正常厚度地壳 ($Sr < 400 \times 10^{-6}$, $Yb > 1.5 \times 10^{-6}$), 具有向减薄地壳 ($Sr < 100 \times 10^{-6}$, $Yb > 1.5 \times 10^{-6}$) 演化的趋势(张旗等, 2011)。

4.2 源岩性质

过铝质花岗岩主要由地壳物质的部分熔融所形成(Kapp *et al.*, 2002), 与地壳物质的深熔作用有关(Le Fort *et al.*, 1987), 地壳物质(主要为变碎屑岩)的深熔作用的诱发机制主要来源于缺乏流体条件下含水矿物的脱水熔融反应, 如黑云母 + 硅线石 + 石英 + 斜长石 = 石榴子石 + 钾长石 + 熔浆(Vielzeuf and Holloway, 1988)、白云母 + 石英 + 斜长石 = 钾长石 + 硅线石 + 熔浆(Douce and Harris, 1998)。

Sylvester(1998) 研究了全球具有代表性的 5 个褶皱带的强过铝质花岗岩, 并结合实验成果, 得出了

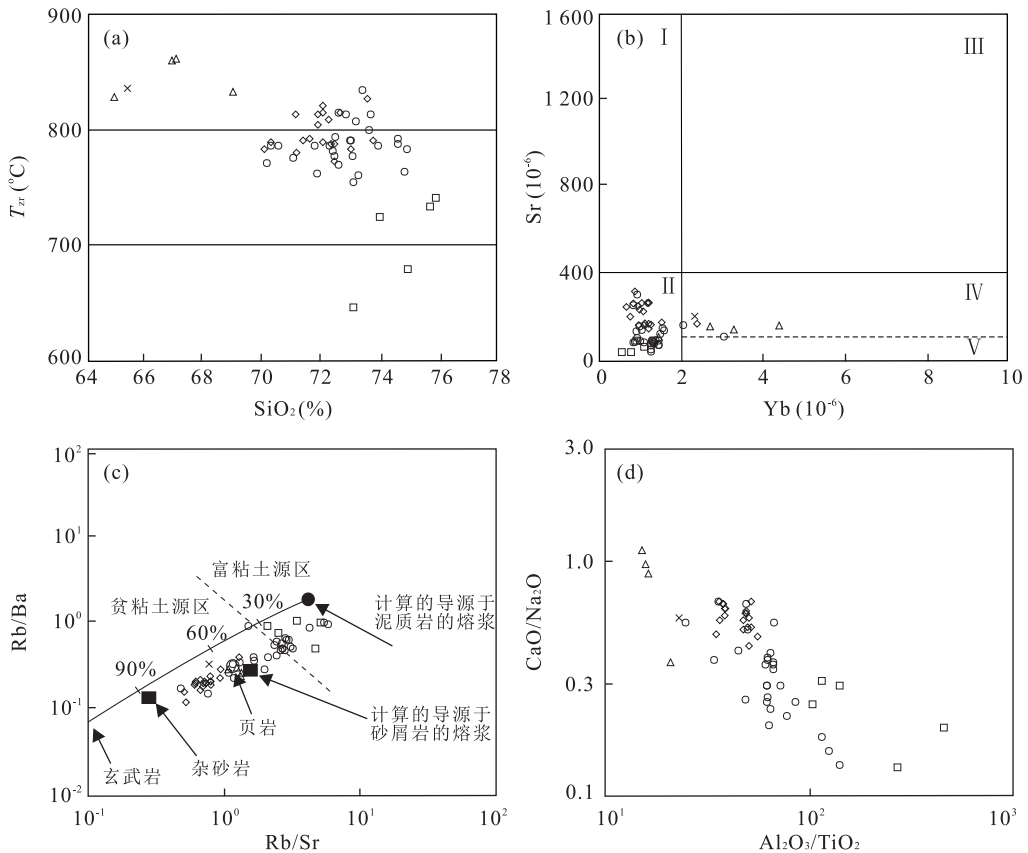


图 7 黑海地区过铝质花岗岩源区特征图解

Fig.7 Source characteristics of the peraluminous granites in Heihai region

a. SiO_2-T_{Zr} 图解; b. Yb-Sr 图解(据张旗等, 2006); c. Rb/Sr-Rb/Ba 关系图解, 据 Sylvester(1998); d. $Al_2O_3/TiO_2-CaO/Na_2O$, 据 Sylvester(1998); I. 高 Sr 低 Yb 型, II. 低 Sr 低 Yb 型, III. 高 Sr 高 Yb 型, IV. 低 Sr 高 Yb 型, V. 非常低 Sr 高 Yb 型

强过铝质花岗岩具有杂砂岩和泥质岩两类源岩的重要结论,提出了使用 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(这一比值取决于源岩中斜长石和粘土含量,杂砂岩中富斜长石而泥质岩中富粘土)和 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 关系图解(图 7c)来区分源岩性质.黑海地区过铝质花岗岩中英云闪长岩、黑云母花岗闪长岩和黑云母花岗岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值分别为 0.57、0.37~1.11 和 0.43~0.68,二云母花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.13~0.68,白云母花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.13~0.31, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 逐渐降低,源岩从以杂砂岩为主向以泥质岩过渡;在图 7c 中,黑海地区过铝质花岗岩中英云闪长岩、黑云母花岗闪长岩和黑云母花岗岩落入贫粘土源区,二云母花岗岩落入贫粘土和富粘土源区,呈过渡趋势,白云母花岗岩落入富粘土源区.

综合上述分析,黑海地区过铝质花岗岩源区可能是一个由变杂砂岩和变泥质岩组成的混合源区,不同花岗岩的形成是两者不同比例参与熔融的结果.结合 T_z 估算,这一源岩性质的变化可能与源区距热源的远近或温度降低有关,使得参与熔融的源岩从以杂砂岩为主向以泥质岩为主转变,这一变化趋势在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 关系图解得到了很好的反映(图 7d).

4.3 形成环境

花岗岩的形成环境一直是争论的热点.Pearce *et al.*(1984)根据花岗岩的侵入环境将花岗岩分为大洋中脊花岗岩(ORG)、火山弧花岗岩(VAG)、板内花岗岩(WPG)和碰撞花岗岩(COLG),并提出了相关微量元素判别图解;Maniar and Piccoli(1989)根据构造环境将花岗岩分为造山花岗岩类(Orogenic Granitoids)和非造山花岗岩类(Anorogenic Granitoids);Barbarin(1999)认为在不同的地球动力学环境下,不同的物质来源形成的花岗岩具有不同矿物组合和地球化学特征,其中认为过铝质花岗岩类是在大陆碰撞的动力学背景下壳源物质形成.这些理论成果无疑为花岗岩的研究提供了很好的思路和方法,但也有学者对此提出了质疑.张旗(2012)认为碰撞是地壳浅部的构造事件,而不是构造环境,多数判别图解所反映的是花岗岩源区的性质,花岗岩形成的热源来自地幔物质的上涌,使下地壳物质发生熔融形成.Kapp *et al.*(2002)在研究 Cordillera 造山带 Iretaba 岩体之后认为,大陆碰撞并未牵涉于 Cordillera 内部花岗岩的形成;Collins(2002)和 Collins *et al.*(2008)提出了 Lachlan 造山带由内侧 S 型花岗岩、外侧洋内弧和介于之间的浊积岩充填盆地

的三重关联单元所组成,而 S 型花岗岩的形成主要是在构造转换机制下由于板退(Slab retreat)引起热的玄武质岩浆侵入增厚地壳而诱发地壳物质发生熔融,与 Cordillera 花岗岩的形成类似.这些研究表明花岗岩的形成主要依赖于源区物质的组成和所处的物理化学环境,不同的动力学背景只是诱发机制.笔者认为探讨花岗岩的形成环境需结合区域地质演化的特征,这样才能得出合理的研究结论.

前人研究表明东昆仑地区在早古生代经历了完整的洋陆转换过程(潘裕生等,1996;李继亮,2004;李荣社等,2007;潘裕生和方爱民,2010;姜高磊等,2014).以下将根据研究区及区域地质资料反演东昆仑造山带早古生代构造演化,并探讨黑海地区过铝质花岗岩可能的形成机制.寒武纪时期,研究区内小洋盆沿东昆中一带开始打开,形成以沙松乌拉组为代表的裂解海盆初期的浅海相变质碎屑岩—碳酸岩建造,至晚奥陶世裂解海盆至最大限度,形成了以纳赤台群为代表的沉积、岩浆建造系统,但并未形成成熟的大洋盆地,属于大陆边缘裂谷性质;志留纪时期,东昆中一带的裂谷性质初始洋盆逐渐关闭,在其南侧形成了古海盆收缩到残留海盆阶段的沉积组合—赛什腾组,而黑海地区过铝质花岗岩在晚志留世形成并侵入于赛什腾组之中.前人研究(莫宣学等,2007;陆济璞等,2005;赵振明等,2008)认为沿东昆中一带发育的晚志留世花岗岩组合属于碰撞型,是东昆仑南北块体碰撞的证据,但从沉积和岩浆组合来分析,研究区在早古生代时期应属于被动陆缘向活动陆缘转换的环境,大洋一直发育于东昆中以南区域,在空间上形成了沙松乌拉组、纳赤台群和赛什腾组沉积—岩浆组合分布特征,增生楔物质的形成是不断向南推移的,而且在研究区东昆中蛇绿构造混杂岩中发育具有岛弧特征的花岗岩类,也说明洋壳位置应该位于东昆中以南区域,东昆仑在早古生代由南向北具有典型的“海沟与增生楔—火山弧—弧后盆地”的构造格局特征(李荣社等,2007),与 Cordillera 和 Lachlan 造山带早古生代构造格局相似(Collins, 2002; Kapp *et al.*, 2002; Collins *et al.*, 2008),在这种构造格局的演化下并不会发育真正意义上的块体碰撞,而与其有关的花岗岩的形成和洋壳的俯冲和消退有关,黑海地区过铝质花岗岩发育的位置位于东昆南俯冲增生杂岩楔,为弧前环境.在晚志留世时期,南部洋盆向北的俯冲消减作用减弱,洋壳开始向南消退,洋壳向南的消退引起东昆南俯冲增生楔由挤压机制逐渐向伸展机制转变,

致使地幔楔物质开始上涌,诱发增厚的东昆南俯冲增生杂岩楔块体下部地壳发生熔融,黑海地区晚志留世过铝质花岗岩于该时期形成并侵位于赛什腾组之中。

综上所述,黑海地区晚志留世过铝质花岗岩可能形成于与地壳伸展减薄有关的构造机制,而不是碰撞的挤压机理,是由于南部洋壳的板退引起地幔物质上涌,促使东昆南俯冲增生杂岩楔地体下部地壳物质发生不同程度的部分熔融形成,黑海地区过铝质花岗岩绝大多数为高硅、强过铝质,说明东昆南增生楔下部地壳可能为富硅、铝质,黑云母英云闪长岩和黑云母花岗闪长岩可能是伸展初始阶段的产物,而黑云母花岗岩和二云母花岗岩则可能代表了此次板退引起的伸展达到了最大限度,而白云母花岗岩作为最晚期形成的岩体可能代表此次板退趋于结束而进入下一个洋壳俯冲阶段。

5 结论

(1)黑海地区过铝质花岗岩具有相对高 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、ALK 含量和低 TFeO、MgO、 TiO_2 含量的特征,属钙碱性—高钾钙碱性系列,为强过铝质花岗岩,属 S 型花岗岩类,其中白云母花岗岩为淡色花岗岩;稀土元素配分曲线具有轻稀土相对富集而重稀土相对亏损的右倾曲线特征,轻稀土分馏明显,重稀土分馏不明显,具有中等负铕异常,黑云母英云闪长岩稀土总量最高,白云母花岗岩稀土总量最低,呈减少的趋势;微量元素组成具有相对富集 LILE 而亏损 HFS 的特征,尤其富集 Cs、Rb、Th 和 K,亏损 Nb 和 Ti。

(2)黑海地区过铝质花岗岩中,黑云母英云闪长岩和黑云母花岗闪长岩的 T_{Zr} 最高,白云母花岗岩 T_{Zr} 最低,形成温度呈降低趋势;形成压力为中等—低压环境,代表了较厚—正常地壳向伸展减薄地壳过渡的状态。

(3)黑海地区晚志留世过铝质花岗岩是在南部洋壳向南板退的环境下,地幔物质底侵东昆南俯冲增生杂岩楔地体,促使其下部富硅、铝的地壳物质发生不同程度的部分熔融所形成,熔融源区可能是由变砂岩和变泥质岩所共同组成的混合源区,随着温度的降低而发生不同程度的部分熔融,形成了黑云母英云闪长岩—白云母花岗岩系列,黑云母英云闪长岩和黑云母花岗闪长岩可能是伸展初始阶段的产物,而黑云母花岗岩和二云母花岗岩则可能代表了

此次板退引起的伸展达到了最大限度,而白云母花岗岩作为最晚期形成的岩体可能代表此次板退趋于结束而进入下一个洋壳俯冲阶段。总之,研究区在晚志留世可能处于由挤压向伸展转换的关键构造机制转换时期。

致谢:参加野外工作的同志有刘力、刘彬、喻星星、于炎炎、陈春飞等,在此对他们的帮助表示衷心的感谢。

References

- Bai, Y.S., Chang, G.H., Tan, S.X., et al., 2001. Study on the Features of Caledonian Intrusive Rocks in the Eastern Sector of East Kunlun. *Qinghai Geology*, 10(S1): 28—35 (in Chinese with English abstract).
- Barbarin, B., 1996. Genesis of the Two Main Types of Peraluminous Granitoids. *Geology*, 24(4): 295—298. doi: 10.1130/0091-7613(1996)024<0295:GOTTMT>2.3.CO;2
- Barbarin, B., 1999. A Review of the Relationships between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments. *Lithos*, 46(3): 605—626. doi: 10.1016/S0024-4937(98)00085-1
- Bian, Q.T., Luo, X.Q., Li, D.H., et al., 2001. Geochemistry and Formation Environment of the Buqingshan Ophiolite Complex, Qinghai Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 45—55 (in Chinese with English abstract).
- Cai, K., Sun, M., Yuan, C., et al., 2011. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Significance of Peraluminous Granites from the Chinese Altai, NW China. *Lithos*, 127(1): 261—281. doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.001
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 2001. Two Contrasting Granite Types: 25 Years Later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489—499. doi: 10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x
- Chen, H.W., Luo, Z.H., Mo, X.X., et al., 2005. Underplating Mechanism of Triassic Granite of Magma Mixing Origin in the East Kunlun Orogenic Belt. *Geology in China*, 32(3): 386—395 (in Chinese with English abstract).
- Clarke, D.B., 1981. The Mineralogy of Peraluminous Granites: A Review. *The Canadian Mineralogist*, 19(1): 1—17.
- Clemens, J.D., Wall, V.J., 1981. Origin and Crystallization of Some Peraluminous (S-Type) Granitic Magmas. *The Canadian Mineralogist*, 19(1): 111—131.
- Collins, W.J., 2002. Hot Orogens, Tectonic Switching, and Creation of Continental Crust. *Geology*, 30(6): 535—538. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0535:HOT-

- SAC > 2.0.CO;2
- Collins, W. J., Richards, S. W., 2008. Geodynamic Significance of S-Type Granites in Circum-Pacific Orogens. *Geology*, 36(7): 559–562. doi:10.1130/G24658A.1
- Deng, J. F., Luo, Z. H., Su, S. G., et al., 2004. Genesis of Rock, Tectonic Setting and Mineralization. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Deng, J. F., Zhao, H. L., Lai, S. C., et al., 1994. Generation of Muscovite/Two-Mica Granite and Intracontinental Subduction. *Earth Science*, 19(2): 139–147 (in Chinese with English abstract).
- Douce, A. E. P., Harris, N., 1998. Experimental Constraints on Himalayan Anatexis. *Journal of Petrology*, 39(4): 689–710. doi:10.1093/петroj/39.4.689
- Elburg, M. A., 1996. Genetic Significance of Multiple Enclave Types in a Peraluminous Ignimbrite Suite, Lachlan Fold Belt, Australia. *Journal of Petrology*, 37(6): 1385–1408. doi:10.1093/петrology/37.6.1385
- 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/петrology/42.11.2033
- Gao, L. E., Zeng, L. S., Liu, J., et al., 2009. Early Oligocene Na-Rich Peraluminous Leucogranites in the Yardoi Gneiss Dome, Southern Tibet: Formation Mechanism and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2289–2302 (in Chinese with English abstract).
- Gao, X. F., Jiao, P. X., Xie, C. R., et al., 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Geological Significance of Bashierxi Granite in the Eastern Kunlun Area. *Geological Bulletin of China*, 29(7): 1001–1008 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y. B., Li, W. Y., 2011. Petrogenesis of Granites Containing Tungsten and Tin Ores in the Baiganhu Deposit, Qimantage, NW China: Constraints from Petrology, Chronology and Geochemistry. *Geochimica*, 40(4): 324–336 (in Chinese with English abstract).
- Gerdes, A., Montero, P., Bea, F., et al., 2002. Peraluminous Granites Frequently with Mantle-Like Isotope Compositions: The Continental-Type Murzinka and Dzhabyk Batholiths of the Eastern Urals. *International Journal of Earth Sciences*, 91(1): 3–19. doi:10.1007/s005310100195
- Haapala, I., 1997. Magmatic and Postmagmatic Processes in Tin-Mineralized Granites: Topaz-Bearing Leucogranite in the Eurajoki Rapakivi Granite Stock, Finland. *Journal of Petrology*, 38(12): 1645–1659. doi:10.1093/петroj/38.12.1645
- Huang, J. N., Chen, Y. Q., Lu, Y. X., et al., 2011. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology, Geochemistry, and Petrogenesis of the Upper Eocene Shuangmaidi Peraluminous Granite in Baoshan Block, Western Yunnan Terrain, Southwestern China. *Science in (Series D)*, 41(4): 452–467 (in Chinese).
- Icenhower, J., London, D., 1996. Experimental Partitioning of Rb, Cs, Sr and Ba between Alkali Feldspar and Peraluminous Melt. *American Mineralogist*, 81(5): 719–734.
- Jiang, G. L., Zhang, S. M., Liu, K. F., et al., 2014. Evolution of Neoproterozoic-Mesozoic Sedimentary Basins in Qilian-Qaidam-East Kunlun Area. *Earth Science*, 38(6): 1214–1228 (in Chinese with English abstract).
- Kapp, J. D. A., Miller, C. F., Miller, J. S., 2002. Ireteba Pluton, Eldorado Mountains, Nevada: Late, Deep-Source, Peraluminous Magmatism in the Cordilleran Interior. *The Journal of Geology*, 110(6): 649–669. doi:10.1086/342864
- Le Fort, P., 1981. Manaslu Leucogranite: A Collision Signature of the Himalaya: A Model for Its Genesis and Emplacement. *Journal of Geophysical Research*, 86(B11): 10545–10568. doi:10.1029/JB086iB11p10545
- Le Fort, P., Cuney, M., Deniel, C., et al., 1987. Crustal Generation of the Himalayan Leucogranites. *Tectonophysics*, 134(1): 39–57. doi:10.1016/0040-1951(87)90248-4
- Li, J. L., 2004. Basic Characteristics of Accretion-Type Orogens. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 947–951 (in Chinese with English abstract).
- Li, R. S., Xu, X. Y., Ji, W. H., 2008a. Some Problems of Geological Study in the Western China Orogenic Belt. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2020–2025 (in Chinese with English abstract).
- Li, R. S., Ji, W. H., Yang, Y. C., et al., 2008b. Geology of Kunlun Mountain and Adjacent Area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, R. S., Ji, W. H., Zhao, Z. M., et al., 2007. Progress in the Study of the Early Paleozoic Kunlun Orogenic Belt. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 373–382 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. Y., Li, S. G., Guo, A. L., et al., 2007. Zircon SHRIMP U-Pb Age and Trace Element Geochemistry of Kuhai Gabbro and Deerni Diorite, Southern Tectonic Belt, Eastern Kunlun, Qinghai-Constraints on the South Boundary of Late Neoproterozoic-Early Ordovician Archaipelagic Ocean. *Science in China (Series D)*, 37(S1): 288–294 (in Chinese).
- Lin, G. C., Ma, C. Q., 2003. Genesis of Peraluminous Granitoids and Their Tectonic Settings. *Geology and Mineral*

- Resources of South China*, (1): 65—70 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Ma, C. Q., Zhang, J. Y., et al., 2012. Petrogenesis of Early Devonian Intrusive Rocks in the East Part of Eastern Kunlun Orogen and Implication for Early Palaeozoic Orogenic Processes. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1785—1807 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. D., Mo, X. X., Luo, Z. H., et al., 2004. Crust Mantle Magma Mixing of Eastern Kunlun: Evidence from Zircon SHRIMP Dating. *Science Bulletin*, 49(6): 596—602 (in Chinese).
- Liu, Z. Q., Li, R. B., Pei, X. Z., et al., 2011b. Early Paleozoic Intermediate-Acid Magmatic Activity in Bairiqiete Area along the Buqingshan Tectonic Melange Belt on the Southern Margin of East Kunlun: Constrains from Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. *Geology in China*, 38(5): 1150—1167 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Q., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2011a. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of the Two Suites of Ophiolites at the Buqingshan Area of the Anyemaqen Orogenic Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Its Tectonic Implication. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 185—194 (in Chinese with English abstract).
- Long, X. P., Jin, W., Ge, W. C., et al., 2006. Zircon U-Pb Geochronology and Geological Implications of Granitoids in Jinshuikou, Eastern Kunlun, NW China. *Geochimica*, 35(4): 367—376 (in Chinese with English abstract).
- Lu, J. P., Li, J., Qin, X. F., et al., 2005. The Yiniekeagan Granite Mass in Qimantag, Eastern Kunlun and Its Tectonic Significance. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 25(4): 46—54 (in Chinese with English abstract).
- Luo, W. X., Qian, L. L., Li, D. W., et al., 2013. Petrogenesis of the Zhongzaohuo Ultramafic Pyroxenite Pluton, East Kunlun: Constraints from Petrology, Geochemistry and Genetic Mineralogy. *Earth Science*, 38(6): 1214—1228 (in Chinese with English abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. doi: 10.1130/0016—7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2
- McDonough, W. F., Sun, S. S., Ringwood, A. E., et al., 1992. Potassium, Rubidium and Cesium in the Earth and Moon and the Evolution of the Mantle of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1001—1012. doi: 10.1016/0016—7037(92)90043—1
- Miller, C. F., McDowell, S. M., Mapes, R. W., 2003. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31(6): 529—532. doi: 10.1130/0091—7613(2003)031<0529:HACGIO>2.0.CO;2
- Mo, X. X., Luo, Z. H., Deng, J. F., et al., 2007. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403—414 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Li, R. S., et al., 2012. Tectonic Model of Archipelagic Arc-Basin Systems: The Key to the Continental Geology. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(3): 1—20 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Y. S., Fang, A. M., 2010. Formation and Evolution of the Tethys in the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geology*, 45(1): 92—101 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Y. S., Zhou, W. M., Xu, R. H., et al., 1996. Early Paleozoic Geological Characteristic and Evolution of Kunlun Mountain. *Science in China (Series D)*, 26(4): 302—307 (in Chinese).
- Pearce, J. A., Harris, N. B., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. doi: 10.1093/petrology/25.4.956
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22(4): 247—263. doi: 10.1016/0024—4397(89)90028—5
- Shi, Z. L., Zhang, H. F. and Cai, H. M., 2009. Petrogenesis of Strongly Peraluminous Granites in Markan Area, Songpan Fold Belt and Its Tectonic Implication. *Earth Science*, 34(4): 569—584 (in Chinese with English abstract).
- Sun, T., Zhou, X. M., Chen, P. R., et al., 2003. Genesis and Implication of the East Nanling Mesozoic Peraluminous Granites. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1209—1218 (in Chinese).
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1): 29—44. doi: 10.1016/S0024—4937(98)00024—3
- Tang, J. H., Gu, L. X., Zhang, Z. Z., et al., 2008. Peraluminous Granite in Huangshan-Jingerquan Area of Eastern Tianshan: Geochemistry, Mineralogy and Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 921—946 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford.
- Vielzeuf, D., Holloway, J. R., 1988. Experimental Determination of the Fluid-Absent Melting Relations in the Pelitic System. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(3): 257—276. doi: 10.1007/BF00375178

- Villaseca, C., Barbero, L., Rogers, G., 1998. Crustal Origin of Hercynian Peraluminous Granitic Batholiths of Central Spain; Petrological, Geochemical and Isotopic (Sr, Nd) Constraints. *Lithos*, 43 (2): 55–79. doi: 10.1016/S0024-4937(98)00002-4
- Visonà, D., Lombardo, B., 2002. Two-Mica and Tourmaline Leucogranites from the Everest-Makalu Region (Nepal-Tibet). Himalayan Leucogranite Genesis by Isobaric Heating? *Lithos*, 62 (3): 125–150. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00112-3
- Wang, D.Z., Liu, C.S., Shen, W.Z., et al., 1990. Characteristics and Genesis of Cenozoic Peraluminous Granitoids of the Okinoshima Island, SW Japan. *Acta Petrologica Sinica*, 6(3): 24–32 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G.C., Wang, Q.H., Jian, P., 2004. Zircon SHRIMP Ages of Precambrian Metamorphic Basement Rocks and Their Tectonic Significance in the Eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province, China. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 481–490 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Xi, X.W., et al., 2002. Formation of Indosinian Peraluminous Granites, Hunan: Numerical Simulation of Magma Underplating and Crustal Thickening Heat Effect. *Science in China (Series D)*, 32(6): 491–499 (in Chinese).
- 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
- Yang, J.S., Xu, Z.Q., Ma, C.Q., et al., 2010. Compound Orogeny and Scientific Problems Concerning the Central Orogenic Belt of China. *Geology in China*, 37(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y. G., Kenneth, J. H., 1994. Origin of the Kunlun Mountains by Arc-Arc and Arc-Continent Collisions. *Island Arc*, 3 (2): 75–89. doi: 10.1111/j.1440-1738.1994.tb00096.x
- Yin, H.F., Zhang, K. X., 1997. Characteristics of the Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science*, 22(4): 339–342 (in Chinese with English abstract).
- Yu, N., Jin, W., Ge, W.C., et al., 2005. Geochemical Study on Peraluminous Granite from Jinshuikou in East Kunlun. *Global Geology*, 24(2): 123–128 (in Chinese with English abstract).
- Za, X.F., Ji, W.H., Zhang, H.D., et al., 2012. A Discussion on the Deformation Phases and Tectonic Process of the Southern Kunlun Accretionary Complex Belt, in Central Qinghai. *Geological Bulletin of China*, 31(12): 2015–2024 (in Chinese with English abstract).
- Zen, E. A., 1986. Aluminum Enrichment in Silicate Melts by Fractional Crystallization; Some Mineralogic and Petrographic Constraints. *Journal of Petrology*, 27 (5): 1095–1117. doi: 10.1093/petrology/27.5.1095
- Zen, E. A., 1988. Phase Relations of Peraluminous Granitic Rocks and Their Petrogenetic Implications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 16: 21. doi: 10.1146/annurev.earth.16.050188.000321
- Zhang, H.F., Harris, N., Parrish, R., et al., 2005. Geochemistry of North Himalayan Leucogranites; Regional Comparison, Petrogenesis and Tectonic Implications. *Earth Science*, 30 (3): 275–288 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Y., Liao, Q. A., 2004. Leucogranites-Geological Proof of Uplifting, Decompressing and Melting of the Basement, Dingjie, South Tibet. *Northwestern Geology*, 37 (2): 7–12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. Y., Ding, L., Yang, D., et al., 2012. Origin of Middle Miocene Leucogranites and Rhyolites on the Tibetan Plateau; Constraints on the Timing of Crustal Thickening and Uplift of Its Northern Boundary. *China Sci. Bull.*, 57(2–3): 153–168 (in Chinese).
- Zhang, Q., 2012. Collision and Granite; Collision is a Tectonic Event, not a Tectonic Environment. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(5): 745–749 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Jin, W.J., Li, C.D., et al., 2011. Granitic Rocks and Their Formation Depth in the Crust. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(2): 259–269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Li, C.D., et al., 2006. A Granite Classification Based on Pressures. *Geological Bulletin of China*, 25 (11): 1274–1278 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.M., Li, R.S., Ji, W.H., et al., 2010. Silurian Tectonic-Paleogeographic Environment in Kunlun Mountain Area and Its Metallogenic Significance. *Geology in China*, 37 (5): 1284–1304 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.M., Ma, H.D., Wang, B.Z., et al., 2008. The Evidence of Intrusive Rocks about Collision-Orogeny during Early Devonian in Eastern Kunlun Area. *Geological Review*, 54(1): 47–56 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, H.M., Tong, J.S., Lu, R.K., et al., 2006. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Peraluminous Granite in the Songxi Area, Rutog County, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 25(1): 183–188 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y.H., Lin, Q.X., Jia, C.X., et al., 2005. Zircon SHRIMP Ages of Early Paleozoic Volcanic Rocks in Eastern

Kunlun Orogenic Belt and their Geological Implications. *Science in China (Series D)*, 35(12): 1112—1119 (in Chinese).

Zhu, Y.H., Zhang, K.X., Pan, Y.M., et al., 1999. Determination of Different Ophiolitic Belts in Eastern Kunlun Orogenic Zone and Their Tectonic Significance. *Earth Science*, 24(2): 134—138 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

拜永山, 常革红, 谈生祥, 等, 2001. 东昆仑东段加里东造山旋回侵入岩特征研究. *青海地质*, 10(S1): 28—35.

边千韬, 罗小全, 李涤徽, 等, 2001. 青海省阿尼玛卿布青山蛇绿混杂岩的地球化学性质及形成环境. *地质学报*, 75(1): 45—55.

谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等, 2005. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制. *中国地质*, 32(3): 386—395.

邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等, 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京: 地质出版社.

邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪, 等, 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.

高利娥, 曾令森, 刘静, 等, 2009. 藏南也拉香波早渐新世富钠过铝质淡色花岗岩的成因机制及其构造动力学意义. *岩石学报*, 25(9): 2289—2302.

高晓峰, 校培喜, 谢从瑞, 等, 2010. 东昆仑阿牙克库木湖北巴什尔希花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. *地质通报*, 29(7): 1001—1008.

高永宝, 李文渊, 2011. 东昆仑造山带祁漫塔格地区白干湖含钨锡矿花岗岩: 岩石学、年代学、地球化学及岩石成因. *地球化学*, 40(4): 324—336.

黄静宇, 陈永清, 卢映祥, 等, 2011. 滇西保山地块双脉地晚始新世过铝质花岗岩: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 地球化学和成因. *中国科学(D辑)*, 41(4): 452—467.

姜高磊, 张思敏, 柳坤峰, 等, 2014. 祁连—柴达木—东昆仑新元古—中生代沉积盆地演化. *地球科学*, 39(8): 1000—1015.

李继亮, 2004. 增生型造山带的基本特征. *地质通报*, 23(9): 947—951.

李荣社, 徐学义, 计文化, 2008a. 对中国西部造山带地质研究若干问题的思考. *地质通报*, 27(12): 2020—2025.

李荣社, 计文化, 杨永成, 等, 2008b. 昆仑山及邻区地质. 北京: 地质出版社.

李荣社, 计文化, 赵振明, 等, 2007. 昆仑早古生代造山带研究进展. *地质通报*, 26(4): 373—382.

李王晔, 李曙光, 郭安林, 等, 2007. 青海东昆仑构造带苦海辉长岩和德尔尼闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及痕量元素地球化学——对“祁—柴—昆”晚新元古代—早奥陶世多岛洋南界的制约. *中国科学(D辑)*, 37(S1):

288—294.

林广春, 马昌前, 2003. 过铝花岗岩的成因类型与构造环境研究综述. *华南地质与矿产*, (1): 65—70.

刘彬, 马昌前, 张金阳, 等, 2012. 东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示. *岩石学报*, 28(6): 1785—1807.

刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等, 2004. 东昆仑壳—幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据. *科学通报*, 49(6): 596—602.

刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等, 2011a. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义. *地质学报*, 85(2): 185—194.

刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等, 2011b. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代白日切特中酸性岩浆活动: 来自锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学证据. *中国地质*, 38(5): 1150—1167.

龙晓平, 金巍, 葛文春, 等, 2006. 东昆仑金水口花岗岩体锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *地球化学*, 35(4): 367—376.

陆济璞, 李江, 覃小锋, 等, 2005. 东昆仑祁漫塔格伊涅克阿干花岗岩特征及构造意义. *沉积与特提斯地质*, 25(4): 46—54.

罗文行, 钱莉莉, 李德威, 等, 2013. 东昆仑中灶火地区超镁铁质辉石岩的成因. *地球科学*, 38(6): 1214—1228.

莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等, 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. *高校地质学报*, 13(3): 403—414.

潘桂棠, 王立全, 李荣社, 等, 2012. 多岛弧盆系构造模式: 认识大陆地质的关键. *沉积与特提斯地质*, 32(3): 1—20.

潘裕生, 方爱民, 2010. 中国青藏高原特提斯的形成与演化. *地质科学*, 45(1): 92—101.

潘裕生, 周伟明, 许荣华, 等, 1996. 昆仑山早古生代地质特征与演化. *中国科学(D辑)*, 26(4): 302—307.

时章亮, 张宏飞, 蔡宏明, 2009. 松潘造山带马尔康强过铝质花岗岩的成因及其构造意义. *地球科学*, 34(4): 569—584.

孙涛, 周新民, 陈培荣, 等, 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义. *中国科学(D辑)*, 33(12): 1209—1218.

唐俊华, 顾连兴, 张遵忠, 等, 2008. 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. *岩石学报*, 24(5): 921—946.

王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等, 1990. 日本西南冲岛新生代过铝质花岗岩类的特征和成因. *岩石学报*, 6(3): 24—32.

王国灿, 王青海, 简平, 2004. 东昆仑前寒武纪基底变质岩系的锆石 SHRIMP 年龄及其构造意义. *地学前缘*, 11(4): 481—490.

王岳军, 范蔚茗, 席先武, 等, 2002. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成: 岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟. *中国*

- 科学(D 辑),32(6):491—499.
- 杨经绥,许志琴,马昌前,等,2010.复合造山作用和中国中央造山带的科学问题.中国地质,37(1):1—11.
- 殷鸿福,张克信,1997.东昆仑造山带的一些特点.地球科学,22(4):339—342.
- 余能,金巍,葛文春,等,2005.东昆仑金水口过铝花岗岩的地球化学研究.世界地质,24(2):123—128.
- 查显锋,计文化,张海迪,等,2012.青海中部昆南增生杂岩带变形分期及构造过程.地质通报,31(12):2015—2024.
- 张宏飞,Harris,N.,Parrish,R.,等,2005.北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学:区域对比,岩石成因及其构造意义.地球科学,30(3):275—288.
- 张金阳,廖群安,2004.藏南定结淡色花岗岩——基底隆升降压熔融成因的地质证据.西北地质,37(2):7—12.
- 张利云,丁林,杨迪,等,2012.藏北中中新世淡色花岗岩及流纹岩的成因:对高原北部边界地壳加厚过程和隆升时代的制约.科学通报,57(2—3):153—168.
- 张旗,2012.碰撞与花岗岩——碰撞是构造事件,不是构造环境.岩石矿物学杂志,31(5):745—749.
- 张旗,金惟俊,李承东,等,2011.花岗岩与地壳厚度关系探讨.大地构造与成矿学,35(2):259—269.
- 张旗,王焰,李承东,等,2006.花岗岩按照压力的分类.地质通报,25(11):1274—1278.
- 赵振明,李荣社,计文化,等,2010.志留纪昆仑山地区构造古地理环境及其成矿意义.中国地质,37(5):1284—1304.
- 赵振明,马华东,王秉璋,等,2008.东昆仑早泥盆世碰撞造山的侵入岩证据.地质论评,54(1):47—56.
- 钟华明,童劲松,鲁如魁,等,2006.西藏日土县松西地区过铝质花岗岩的地球化学特征及构造背景.地质通报,25(1):183—188.
- 朱云海,林启祥,贾春兴,等,2005.东昆仑造山带早古生代火山岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义.中国科学(D 辑),35(12):1112—1119.
- 朱云海,张克信,Pan,Y.M.,等,1999.东昆仑造山带不同蛇绿岩带的厘定及其构造意义.地球科学,24(2):134—138.

* * * * *

《地球科学——中国地质大学学报》更名为《地球科学》的启事

为了避免刊名被误用和适应专业化的办刊要求,经研究并报请国家新闻出版广电总局批准(新广出审[2015]849号),《地球科学——中国地质大学学报》将自2016年1月起更名为《地球科学》,新编国内统一连续出版物号为CN42-1874/P,原刊号CN42-1233/P作废;出版单位由中国地质大学学报编辑部变更为《地球科学》编辑部.办刊宗旨为:刊载地球科学领域研究新进展、新理论和新发现,促进该领域的国内外学术交流,提高我国在该领域的学术研究水平,服务我国地质教育、地质科技与地质找矿事业繁荣发展.

更名后的《地球科学》继续为北大核心、CSCD核心和中国科技核心刊物,持续被美国《EI》、《CA》、俄罗斯《AJ》、日本《JSTD》等世界著名国际检索系统所收录.该刊已荣获国家期刊奖、首届湖北出版政府奖、全国百强科技期刊奖、高校精品科技期刊奖、湖北十大名刊成就奖等20多项国家和省部级奖励,2014年入选“中国最具国际影响力学术期刊”.

竭诚欢迎地球科学领域的读者、作者朋友踊跃向《地球科学》投稿!

期刊网址为 www.earth-science.net

投稿网址为 <http://mc03.manuscriptcentral.com/es>

《地球科学》编辑部