

doi:10.3799/dqkx.2015.009

柴北缘西端盐场北山二长花岗岩年代学、地球化学及其 Hf 同位素特征

董增产^{1,2}, 辜平阳^{1,2}, 陈锐明^{1,2}, 查显锋^{1,2}, 张海迪^{1,2}

1. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安 710054

2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 西安地质调查中心, 西安 700054

摘要: 盐场北山二长花岗岩位于柴北缘西端青海冷湖地区。岩体高硅(74.98%~76.92%), 富钾(4.44%~5.93%), 贫镁(0.04%~0.07%)和钙(0.43%~0.69%)。里特曼指数介于2.43~2.79, 属于高钾钙碱性岩石系列, 铝饱和指数平均为1.01, 属弱过铝质花岗岩。岩体富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba、Pb), 亏损高场强元素(Nb、Ta), 具岛弧花岗岩地球化学特征。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明: 岩体形成于 252 ± 3 Ma; 锆石 Hf 同位素初始比值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分布于 0.282 958~0.283 032 之间, 并具有极高的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(8.75~14.50), 其平均两阶段模式年龄 $T_{\text{DM}_2}(\text{Hf})$ 为 385 Ma, 反映岩体源区可能为玄武质下地壳。另外, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 基本位于亏损地幔演化线附近, 指示该玄武质下地壳来源于亏损地幔。结合区域地质背景和岩石地球化学特征, 认为盐场北山二长花岗岩与泥盆纪镁铁-超镁铁岩有关, 由于宗务隆裂谷小洋盆的向南俯冲, 引发其上覆玄武质新生地壳发生熔融形成, 进而揭示晚二叠世末柴北缘处于火山弧或活动陆缘的构造环境。

关键词: 二长花岗岩; 年代学; Hf 同位素; 地球化学; 柴北缘西端。

中图分类号: P959

文章编号: 1000-2383(2015)01-0130-15

收稿日期: 2014-03-14

Geochronology, Geochemistry, and Hf Isotope of Yanchangbeishan Adamellite of Lenghu Area in Qinghai

Dong Zengchan^{1,2}, Gu Pingyang^{1,2}, Chen Ruiming^{1,2}, Zha Xianfeng^{1,2}, Zhang Haidi^{1,2}

1. MLR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Xi'an 710054, China

2. Research Center for Orogenic Geology, Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

Abstract: The adamellite develops in Yanchangbeishan of Lenghu area in Qinghai, which is located in the west segment of the north margin of Qaidam. The samples have higher SiO_2 (74.98%–76.92%) and K_2O (4.44%–5.93%) contents, but lower MgO (0.04%–0.07%) and CaO (0.43%–0.69%) contents. The Rittmann indices of the rock range in 2.43–2.79, which shows that it belongs to high potassium calc-alkaline series. The alumina saturation average index is 1.01, which indicates that the adamellite belongs to peraluminous granites. Moreover, the samples are intensively depleted in HFSEs (Nb, Ta), with enriched LILEs (K, Rb, Ba, Pb), reflecting the characteristics of island-arc magma. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that the formation age of the rock is 252 ± 3 Ma. The zircon Hf isotope analysis reveals that $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios, varying in 0.282 958 to 0.283 032, have high positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (8.75–14.50) and two-stage Hf model ages (averaged at 385 Ma). In the $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ discrimination diagrams, these zircons are plotted nearly on the depleted mantle evolution line. It can be concluded that the rock chiefly derived from the new basaltic lower crust which is originated from depleted mantle. Based on the regional geological background and the geochemical characteristics of the masses, we consider that Yanchangbeishan adamellite bears similar characteristics of its primary magma with mafic-ultramafic rocks of Devonian, which were supposed to be originated from partial melting of the young basaltic lower crust related to subduction of Zongwulong small oceanic basin from south. Thereby, it reveals that the north margin of Qaidam was in volcanic arc or active continen-

基金项目: 青海阿尔金 1:5 万打柴沟等 6 幅区调(No.1212011121193); 国家青年基金项目(Nos.41002063,41102073)。

作者简介: 董增产(1981-), 男, 硕士, 构造地质学专业。E-mail: dzc1981@126.com

引用格式: 董增产, 辜平阳, 陈锐明, 等, 2015. 柴北缘西端盐场北山二长花岗岩年代学、地球化学及其 Hf 同位素特征. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1):130–144.

tal margin tectonic environment during Permian epoch.

Key words: adamellite; geochronology; Hf isotope; geochemistry; west segment of north margin of Qaidam.

柴北缘古生代岩浆岩广泛分布,尤其是早古生代岩浆岩最为发育,断续出露于塞什腾山、大柴旦、绿梁山以及锡铁山等地.其可分为 3 阶段,对应于 3 种类型:第一阶段为晚寒武—早中奥陶世俯冲型(吴才来等,2001a,2008;袁桂邦等,2002; Wu *et al.*, 2009);第二阶段为晚奥陶世碰撞型(吴才来等,2001c);第三阶段为晚志留世—早泥盆世碰撞后拉张型(Song *et al.*,2004;吴才来等,2004;孟繁聪等,2005;卢欣祥等,2007).由此可见,柴北缘早古生代岩浆岩可能保存了一个较为完整的岩浆构造旋回记录.然而,较之早古生代,柴北缘晚古生代岩浆岩分布面积相对较小,且较为零散,研究程度相对较低.目前,地表出露主要为晚泥盆世和二叠纪花岗岩.其中,晚泥盆世岩体被认为是造山后隆起阶段的产物(吴才来等,2007),如噶喇河石英闪长岩(372 Ma;吴才来等,2008)、巴嘎柴达木湖岩体(374 ± 4 Ma)和大头羊沟岩体(374 ± 4 Ma).学者们一致认为,区域上泥盆系牦牛山组磨拉石的沉积岩系标志着加里东造山运动的结束.而且,宗务隆带内晚古生代海相沉积建造、镁铁—超镁铁质岩的一系列发现,论证了

石炭—二叠纪柴北缘构造带与南祁连构造带之间存在洋盆(王毅智等,2001;孙延贵等,2004;郭安林等,2007;寇晓虎等,2007;张克信等,2007;王绘清等,2009,2010).

宗务隆构造带夹持于柴北缘构造带和南祁连造山带之间,其构造归属一直存在争议(王培俭和王增寿,1980;张以第,1982;李平安和聂树人,1982;青海省区域地质志,1991;青海省地层岩石,1997;潘桂棠等,2002;郝国杰等,2004;陆松年等,2006).然而,出露于宗务隆构造带以南,位于柴北缘构造带北部的晚二叠世至早三叠世的岛弧型火山岩和花岗岩,不但约束了该宗务隆洋盆的俯冲时限,而且认为其俯冲极性具有从北往南的特征.尤其是二郎洞 A 型花岗岩的发现,标志着晚三叠世碰撞作用的结束(郭安林等,2007).由此看来,加里东造山运动结束之后,晚古生代柴北缘与祁连造山带之间经历了由陆内裂隙、洋盆发育和俯冲—碰撞造山的演化过程,是在柴北缘和南祁连造山带共同构建的加里东陆块上发育起来并且具有完整板块构造旋回的印支期造山带(郭安林等,2007).因此,在经历了加里东造山

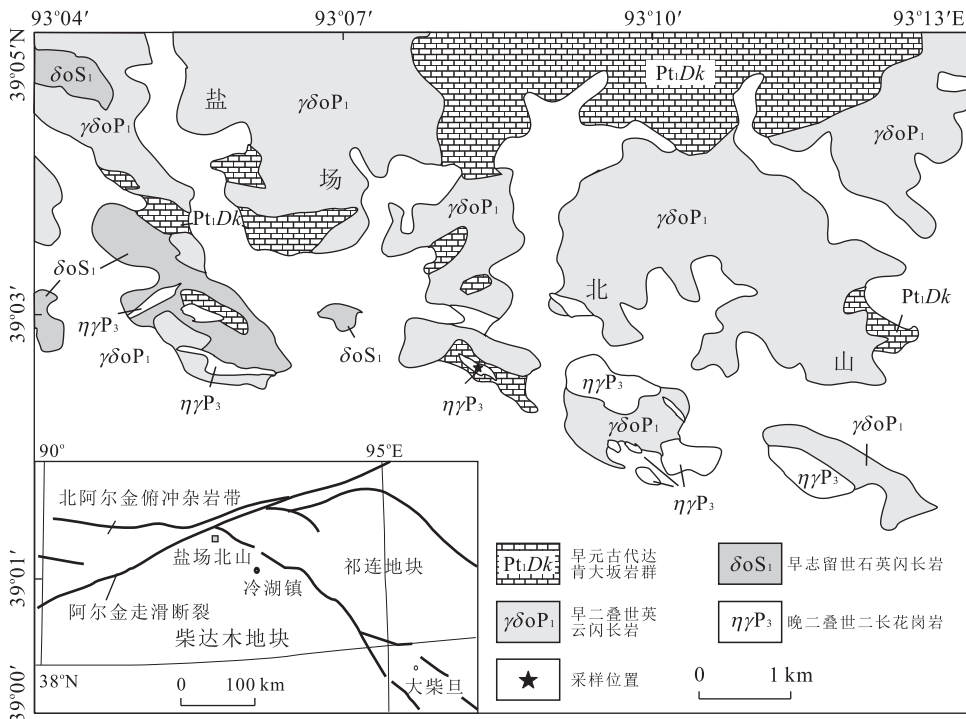


图 1 青海冷湖地区盐场北山地质简图

Fig.1 The Geological sketch map of Yanchangbeishan in the Lenghu area of Qinghai

作用之后,柴北缘岩石圈构造演化机制及其如何由板块构造体制转化为陆内造山体制的机制成为研究的热点。

近年来,笔者通过野外地质调查发现,在柴北缘西端发育大量二叠纪侵入岩,包括基性和中酸性岩体。其中,中酸性岩体分布面积相对较广,主要表现为石英闪长岩—花岗岩闪长岩—英云闪长岩—黑云母二长花岗岩—二长花岗岩等岩石组合。其构造位置位于柴北缘与阿尔金造山带的结合部位,达肯大坂岩群是其围岩。众所周知,达肯大坂岩群是柴北缘构造带出露最古老的变质地层,被认为是该构造带的结晶基底,因此盐场北山花岗岩应归属于柴北缘构造带,只是后期阿尔金左行走滑作用将其位置改变而已,现呈向北弯曲的弧形。结合前述在其东南部(天俊南山、青海湖南山、二郎洞、同仁等地)已经发现的一系列岛弧型岩浆岩,进而推测盐场北山花岗岩应为该岩浆弧北段的一部分。本文选择二长花岗岩为研究对象,试图通过分析其年代学、岩石地球化学等特征,确定岩体形成时代及成因类型,结合区域地质背景讨论岩体形成的构造环境,为进一步研究柴北缘晚古生代地质构造演化提供依据。

1 地质背景

柴北缘构造带位于青藏高原东北缘,是连接祁连、昆仑、阿尔金、柴达木等构造单元的重要衔接部位。由南至北包括沙柳河—鱼卡超高压带、早古生代滩间山群代表的火山岩系以及前寒武纪欧龙布鲁克陆块(郝国杰等,2004)。研究区位于柴北缘西端,地层仅出露古元古代达肯大坂岩群,主要为一套片岩、片麻岩组合(图 1)。在片麻岩中发育大量的花岗岩脉

和长英质脉岩。经野外地质调查,脉体为后期岩浆侵入产物或变质分异脉。本文研究的二长花岗岩局部以脉体的形式沿片理或构造面理灌入片麻岩之中,而且在岩体之中发育片麻岩透镜体,与达肯大坂岩群为明显的侵入接触关系(图 2a)。除此之外,盐场北山还发育不同时期的志留纪石英闪长岩、早二叠世花岗闪长岩、晚二叠世黑云母二长花岗岩、少量闪长岩及基性—超基性岩等。然而,二长花岗岩在区内分布面积相对较小,仅见于盐场北山东南部,地表最大露头也仅有 1 km²,多呈细脉见于达肯大坂岩群及各类岩体之中。

2 岩石学特征

二长花岗岩样品采集于冷湖镇北西约 60 km 盐场北山地区(图 1),地理坐标为 93°08′09″E; 39°02′42″N。岩体风化面呈灰褐色,新鲜面为浅肉红色,粒状和块状构造(图 2a),主要矿物包括钾长石(25%~30%)、斜长石(30%~35%)和石英(30%~35%),黑云母<2%,白云母少量。钾长石晶体形态多呈板状,少数呈细小粒状,粒径大小一般在 2~3 mm 之间,其种属为微斜长石。斜长石晶体多呈不规则粒状,粒径一般<2 mm。石英晶体多呈粒状,粒径大小介于 1.0~5.5 mm 之间(图 2b),经计算 Q(石英含量)介于 27~32,Or 为 26~35,Ab 变化于 32~41,An 为 2.0~2.6。在 QAP 分类图上,位于二长花岗岩区(图略)。

3 分析测试方法

对采集的 6 件花岗岩地化样品利用 X 射线荧

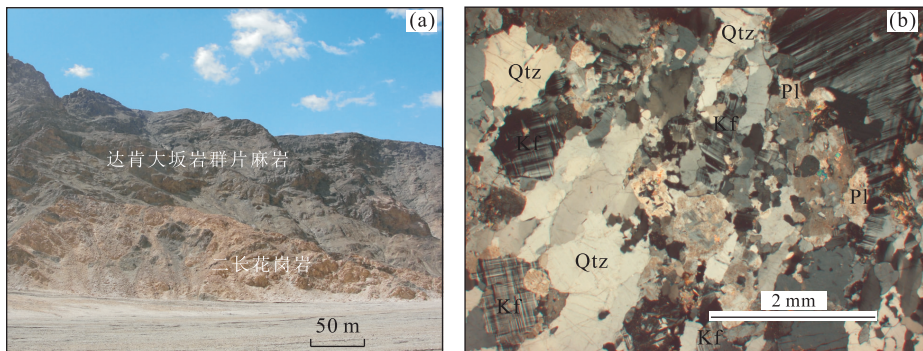


图 2 二长花岗岩岩石学特征

Fig.2 Petrologic feature of Yanchangbeishan adamellite

a.二长花岗岩野外露头;b.岩体显微特征,正交偏光;Qtz.石英;Kf.钾长石;Pl.斜长石

光法(XRF)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)法进行主量、微量及稀土元素测试分析,该项测试在西安地质矿产研究所实验室完成,锆石 CL 照相、测年工作于在西北大学扫描电镜实验室和大陆动力学国家重点实验室的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成.首先将挑选锆石的样品在实验室粉碎至 80~100 目,经常规浮选和磁选方法分选后,在双目镜下先根据锆石的颜色、自形程度、形态等特征初步分类,挑选出具有代表性的锆石作为测定对象.将分选出的锆石分组置于 DEVCON 环氧树脂中,待固结后将其抛磨至粒径的大约二分之一,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石显微(反射光和透射光)照相、阴极发光(CL)显微图像研究及锆石微区 U-Pb 同位素年龄测定.详细分析步骤和数据处理方法参考有关文献(Gao *et al.*, 2002; 柳小明等, 2002; 袁洪林等, 2003).

4 地球化学

4.1 主量元素特征

岩石主量元素(表 1)SiO₂ 含量变化于 74.98%~76.92%, 平均含量为 74.85%; Al₂O₃ 含量为 12.91%~

14.25%, 铝饱和指数 A/CNK 为 0.99~1.02, 平均为 1.01, 具弱过铝质花岗岩特征(图 3a); 里特曼指数 $\sigma = 2.43 \sim 2.79$, 属于钙碱性岩系. Na₂O 含量为 3.45%~4.94%, K₂O 含量为 4.44%~5.93%, Na₂O+K₂O 含量分布于 7.89%~10.87%, 在 K₂O-SiO₂ 图解上, 样品显示由高钾钙碱性向钾玄岩系列演化的趋势(图 3b). CaO 含量为 0.43%~0.69%, CaO/Na₂O=0.09~0.20.

4.2 微量元素特征

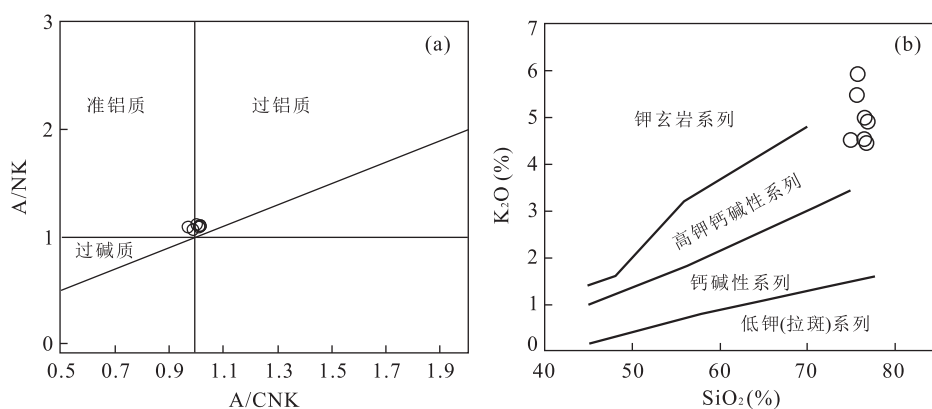
分析结果显示(表 2)盐场北山稀土含量低, 变化范围较大, $\Sigma \text{REE} = (1.88 \sim 34.59) \times 10^{-6}$, 平均为 13.96×10^{-6} , LREE 含量介于 $(1.47 \sim 32.60) \times 10^{-6}$, 平均为 12.09×10^{-6} , 重稀土 HREE = $(0.41 \sim 3.05) \times 10^{-6}$. 球粒陨石标准化稀土元素呈铈正异常的右倾型曲线特征(图 4a), $\delta \text{Eu} = 1.49 \sim 5.77$, 可能与熔体中斜长石的富集有关. 轻重稀土分馏较明显, LREE/HREE = 3.59~7.08, La_N/Yb_N = 3.30~109.88, La_N/Sm_N = 2.88~3.26, 原始地幔标准化微量元素模式图(图 4b)显示岩体富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba、Pb), 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、La、Ce 和 P, 具有弧型花岗岩特征.

表 1 盐场北山二长花岗岩主量元素丰度(%)

Table 1 Abundances of major elements of the Yanchangbeishan adamellite

元素	样品编号						
	D1207-1-1	D1207-1-2	D1207-1-3	D1207-1-4	D1207-1-5	D1207-1-6	D1207-1-7
SiO ₂	74.98	76.05	75.78	76.92	76.76	76.57	76.72
TiO ₂	0.05	0.03	0.02	0.04	0.04	0.02	0.03
Al ₂ O ₃	14.25	13.16	13.41	12.91	13.35	13.52	13.26
Fe ₂ O ₃ ^T	0.56	0.26	0.21	0.32	0.37	0.21	0.20
MnO	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	0.05	0.08	0.05	0.07	0.04	0.04	0.06
CaO	0.55	0.72	0.69	0.48	0.47	0.43	0.44
Na ₂ O	4.94	3.84	3.45	4.16	4.52	4.63	4.13
K ₂ O	4.51	5.47	5.93	4.92	4.44	4.54	4.98
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
LOI	0.35	0.59	0.51	0.43	0.31	0.32	0.47
TOTAL	100.29	100.23	100.07	100.29	100.34	100.32	100.33
Na ₂ O+K ₂ O	9.45	9.31	9.38	9.08	8.96	9.17	9.11
FeO _t	0.50	0.23	0.19	0.29	0.33	0.19	0.18
A/CNK	1.02	0.97	1.00	0.99	1.02	1.02	1.02
10 000×4Ga	2.08	1.61	1.55	1.86	1.90	2.00	1.89
σ	2.79	2.62	2.68	2.43	2.38	2.50	2.46
nC	0.002	0.004	0.001	0.001	0.003	0.002	0.003
R ₁	2 169.14	2 414.63	2 429.16	2 485.65	2 458.07	2 387.53	2 472.23
R ₂	340.85	339.14	339.35	308.07	314.14	313.19	310.16
Q	27.57	31.40	31.56	32.81	32.33	31.28	32.66
Or	26.71	32.47	35.23	29.15	26.26	26.86	29.50
Ab	41.80	32.57	29.29	35.22	38.21	39.14	34.96
An	2.56	2.48	3.32	1.99	2.16	1.96	2.01

注: A/CNK = $n(\text{Al}_2\text{O}_3) / n(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; $R_1 = 4\text{Si} - 11(\text{Na} + \text{K}) - 2(\text{Fe} + \text{Ti})$; $R_2 = 6\text{Ca} + 2\text{Mg} + \text{Al}$.

图 3 二长花岗岩 A/NK-A/CNK 及 K_2O-Na_2O Fig.3 A/NK-A/CNK and K_2O-Na_2O diagrams of the Yanchangbeishan adamellite表 2 盐场北山二长花岗岩微量、稀土元素丰度 (10^{-6})Table 2 Trace elements and rare earth elements abundances of the Yanchangbeishan adamellite (10^{-6})

元素	样品编号						
	D1207-1-1	D1207-1-2	D1207-1-3	D1207-1-4	D1207-1-5	D1207-1-6	D1207-1-7
Cu	11.30	1.72	2.35	0.21	0.88	0.29	1.61
Pb	19.60	17.20	17.80	17.30	16.10	18.90	18.00
Zn	50.90	9.59	9.34	18.50	20.50	11.80	14.30
Cr	8.13	3.10	1.93	1.60	3.69	2.95	3.90
Ni	4.43	1.22	1.50	0.97	2.02	1.91	2.55
Co	31.90	55.20	33.60	63.50	47.20	42.50	73.40
Li	1.20	1.30	0.90	0.90	1.10	1.00	0.90
Rb	87.00	60.00	78.00	96.00	78.00	85.00	95.00
Cs	0.71	0.30	0.34	0.77	0.65	0.69	0.85
Sr	16.10	22.80	36.40	24.30	11.80	9.00	17.10
Ba	74.20	277.00	300.00	111.00	64.30	70.50	113.00
V	0.70	1.04	1.82	0.62	0.94	0.62	0.37
Sc	4.26	3.58	3.61	2.78	0.98	4.08	0.32
Nb	1.59	0.39	0.34	0.87	1.14	0.80	0.72
Zr	32.00	21.00	15.00	18.00	19.00	16.00	18.00
Ta	0.20	0.16	0.15	0.16	0.11	0.15	0.07
Hf	1.46	0.72	0.51	0.84	0.93	0.75	0.85
Be	0.77	0.32	0.33	0.69	0.57	0.67	0.73
Ga	15.70	11.20	11.00	12.70	13.40	14.30	13.30
Ge	1.05	0.71	0.72	0.97	0.93	1.00	0.99
U	0.22	0.16	0.16	0.19	0.18	0.15	0.22
Th	0.74	3.98	2.98	0.55	0.39	0.25	0.07
La	3.40	9.30	3.60	3.70	2.10	1.60	0.20
Ce	6.00	14.70	3.60	5.10	3.40	2.80	0.70
Pr	0.75	1.77	0.54	0.68	0.48	0.36	0.09
Nd	2.30	5.80	2.60	2.00	1.40	1.10	0.30
Sm	0.44	0.81	0.36	0.42	0.28	0.21	0.08
Eu	0.18	0.21	0.62	0.24	0.13	0.11	0.06
Gd	0.31	0.59	0.30	0.33	0.22	0.17	0.07
Tb	0.05	0.06	0.04	0.06	0.04	0.03	0.01
Dy	0.27	0.25	0.18	0.32	0.22	0.15	0.08
Ho	0.06	0.04	0.03	0.07	0.05	0.04	0.02
Er	0.15	0.09	0.09	0.18	0.13	0.10	0.06
Tm	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01
Yb	0.15	0.06	0.08	0.16	0.14	0.09	0.05
Lu	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
Y	1.54	0.88	0.85	1.88	1.16	0.89	0.10
Rb/Ba	1.17	0.22	0.26	0.86	1.21	1.21	0.84
Rb/Sr	5.40	2.62	2.13	3.95	6.61	9.44	5.56
Σ REE	15.62	34.59	12.86	15.22	9.85	7.69	1.88
LREE/HREE	5.06	16.39	7.08	4.00	3.93	4.16	3.59
δ Eu	1.49	0.93	5.77	1.97	1.60	1.78	2.40
La_N/Yb_N	15.15	109.88	32.36	15.51	10.02	12.06	3.30
La_N/Sm_N	4.82	7.21	6.29	5.51	4.67	4.82	1.80

注： δ Eu = $Eu/\sqrt{Sm \times Gd}$ ； La_N/Yb_N 为球粒陨石标准化后之比。

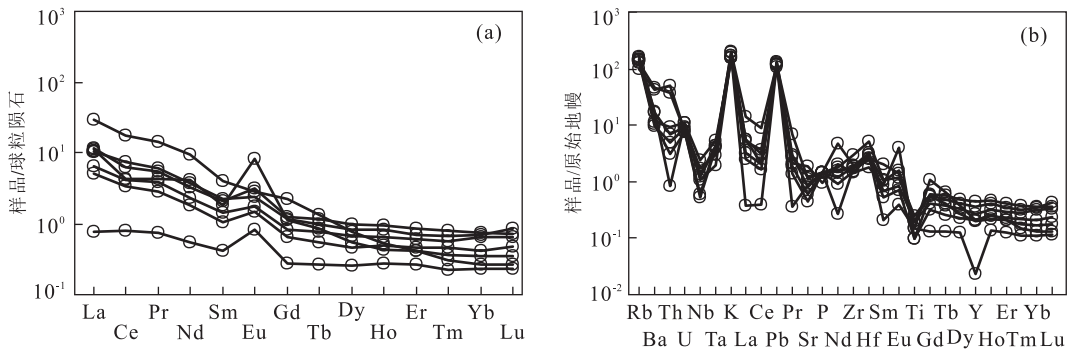


图 4 盐场北山二长花岗岩球粒陨石标准化模式和原始地幔标准化模式

Fig.4 Chondrite normalized REE and primitive mantle normalized patterns of the Yangchangbeishan adamellite
球粒陨石数据引自 Boynton *et al.*, 1984; 原始地幔数据引自 McDonough and Sun, 1995

5 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素特征

5.1 锆石特征

在显微镜下可见锆石无色透明干净无杂质, 晶体呈自形或半自形, 长短轴之比介于 4:1~2:1 之间, 粒径介于 50~170 μm , CL 图像呈灰—深灰色, 大部分锆石核部发育明显的岩浆震荡环带. 然而, 边部可能受到后期热扰动影响, 环带不是很清楚, 整体来说具有岩浆锆石特征.

5.2 分析结果

根据前述锆石测年方法, 对 30 粒锆石进行了分析测试, 获得总测点数 36 个, 其中谐和年龄测点 22 个. 分析结果显示 (表 3) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0.0382 \sim 0.0423$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 267~242 Ma. 在谐和曲线上形成了一个较大的年龄集中区 (图 5), 加权平均年龄为 $252 \pm 3 \text{ Ma}$ (MSWD=1.02, $n=22$, 误差=1 σ). 锆石 Th/U=0.4~1.4, 结合锆石发育岩浆震荡环带, 笔者认为测年锆石应为岩浆成因, 而 $252 \pm 3 \text{ Ma}$ 代表了岩体形成年龄.

5.3 锆石 Hf 同位素特征

对已获得 U-Pb 年龄的 10 粒锆石进行原位 LA-MC-ICPMS 锆石 Hf 同位素分析, 样品分析点与 U-Pb 年龄编号一致 (表 4). $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围分别为 0.015 713~0.047 697 和 0.000 607~0.001 792 之间, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 表明锆石在形成以后有极少的放射成因 Hf 的积累, 因而可以用初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (吴福元等, 2007). 用锆石 U-Pb 年龄计算的 Hf 同位素初始比值 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别介于 0.282 877~0.283 089 和 8.75~14.50 之间. 单阶段模式年龄

$T_{\text{DM1}}(\text{Hf})$ 介于 544~314 Ma, $T_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ 两阶段模式年龄变化于 712~351 Ma, 由于所测锆石的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}} = -0.95 \sim -0.98$. 因此, 两阶段模式年龄应更真实的代表其源区物质有亏损地幔抽取后在地壳的平均存留年龄 (吴福元等, 2007).

6 讨论

6.1 岩体成因类型分析

花岗岩成因类型通常包括 I、S、A 和 M 型. 前人在研究澳大利亚东部拉克兰褶皱带中古生代花岗岩时, 根据花岗岩成岩物质来源将花岗岩划分为 I 型和 S 型 (Chappell and White, 1992). S 型花岗岩主要是壳源物质的直接熔融产物; I 型花岗岩是指由地幔熔融形成的岩石 (玄武岩) 发生再次熔融形成 (张旗等, 2008b). A 型花岗岩与 I、S 型花岗岩不同, 其物源具有多样性 (Frost and Frost, 1997; 王德滋等, 2002; 吴锁平等, 2007; 刘彬等, 2013; 秦亚等, 2013); 而 M 型花岗岩则多指与蛇绿岩有关的斜长花岗岩 (张旗等, 2008b). A 型花岗岩物源具有多样性 (Frost and Frost, 1997; 王德滋等, 2002; 吴锁平等, 2007; 刘彬等, 2013; 秦亚等, 2013); M 型花岗岩则来自幔源. A 型花岗岩可通过 Ga/Al 比值进行判别 (Collins *et al.*, 1982), 一般 A 型花岗岩 ($10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$) > 2.6 (Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987), 而且在 Rb-Yb+Nb 判别图上多位于板内花岗岩区域 (Pearce *et al.*, 1984). 另外, Whalen *et al.* (1987) 在总结了 A 花岗岩特征后, 提出了一系列 A 型花岗岩判别图解. 盐场北山二长花岗岩 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 介于 1.55~2.06, 平均为 1.84, 明显低于 2.60. 所有样品在 Whalen *et al.* (1987) 给出的 A 型花岗

表 3 盐场北山二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据
Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb age dates of the Yangchangbeishan adamellite

样品	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谐和度	Th/U
	比值	误差	比值	误差	比值	误差			年龄	误差	年龄	误差	年龄	误差		
D1207-1-01	0.055 8	0.004 8	0.289 7	0.024 6	0.037 7	0.000 7	366.01	443.63	445	199	258	19	238	4	1.08	0.83
D1207-1-03	0.051 7	0.001 6	0.301 3	0.007 4	0.042 3	0.000 5	187.07	346.25	271	34	267	6	267	3	1.00	0.54
D1207-1-04	0.052 1	0.003 1	0.300 8	0.016 9	0.041 9	0.000 7	53.68	86.36	288	97	267	13	265	4	1.01	0.62
D1207-1-06	0.052 7	0.002 3	0.291 6	0.011 6	0.040 1	0.000 6	268.58	317.83	315	64	260	9	254	4	1.02	0.85
D1207-1-07	0.052 5	0.002 1	0.304 6	0.010 8	0.042 0	0.000 6	130.19	242.34	309	56	270	8	265	4	1.02	0.54
D1207-1-09	0.054 5	0.002 3	0.298 4	0.011 2	0.039 7	0.000 6	178.11	203.90	391	59	265	9	251	3	1.06	0.87
D1207-1-10	0.051 1	0.001 4	0.279 7	0.006 3	0.039 7	0.000 5	272.53	385.80	247	30	250	5	251	3	1.00	0.71
D1207-1-11	0.054 3	0.001 7	0.296 2	0.007 8	0.039 5	0.000 5	923.28	702.29	385	37	263	6	250	3	1.05	1.31
D1207-1-12	0.052 5	0.001 6	0.290 2	0.007 5	0.040 1	0.000 5	146.20	355.91	305	36	259	6	254	3	1.02	0.41
D1207-1-14	0.053 1	0.001 6	0.301 8	0.007 7	0.041 2	0.000 5	167.88	304.15	333	35	268	6	260	3	1.03	0.55
D1207-1-15	0.052 5	0.001 8	0.303 6	0.008 7	0.041 9	0.000 5	167.17	212.61	307	42	269	7	265	3	1.02	0.79
D1207-1-17	0.051 3	0.003 2	0.275 6	0.016 7	0.039 0	0.000 6	130.94	209.69	254	144	247	13	246	4	1.00	0.62
D1207-1-19	0.054 6	0.002 6	0.283 7	0.013 1	0.037 7	0.000 5	214.84	268.99	395	110	254	10	239	3	1.06	0.80
D1207-1-20	0.051 6	0.003 3	0.273 6	0.016 5	0.038 4	0.000 7	505.23	641.20	269	105	246	13	243	4	1.01	0.79
D1207-1-23	0.052 3	0.002 7	0.263 6	0.013 2	0.036 6	0.000 5	360.14	890.77	297	121	238	11	232	3	1.03	0.40
D1207-1-24	0.054 4	0.002 1	0.306 9	0.010 4	0.040 9	0.000 6	322.12	340.32	389	51	272	8	258	3	1.05	0.95
D1207-1-25	0.055 3	0.002 5	0.313 2	0.013 0	0.041 1	0.000 6	391.45	571.58	425	66	277	10	259	4	1.07	0.68
D1207-1-26	0.057 3	0.002 4	0.305 2	0.012 1	0.038 6	0.000 5	230.89	616.65	503	94	270	9	244	3	1.11	0.37
D1207-1-28	0.054 2	0.004 0	0.299 2	0.021 7	0.040 1	0.000 6	544.44	493.71	377	171	266	17	253	4	1.05	1.10
D1207-1-29	0.055 5	0.001 7	0.312 5	0.007 7	0.040 9	0.000 5	307.63	314.68	431	33	276	6	258	3	1.07	0.98
D1207-1-30	0.052 5	0.001 5	0.288 9	0.006 4	0.039 9	0.000 5	160.13	359.02	309	29	258	5	252	3	1.02	0.45
D1207-1-32	0.051 7	0.001 7	0.290 5	0.008 1	0.040 7	0.000 5	209.82	315.18	273	41	259	6	257	3	1.01	0.67
D1207-1-33	0.056 3	0.002 6	0.298 4	0.013 2	0.038 5	0.000 5	243.52	374.28	464	105	265	10	243	3	1.09	0.65
D1207-1-36	0.052 7	0.002 9	0.277 6	0.014 5	0.038 2	0.000 5	130.86	277.13	317	127	249	12	242	3	1.03	0.47

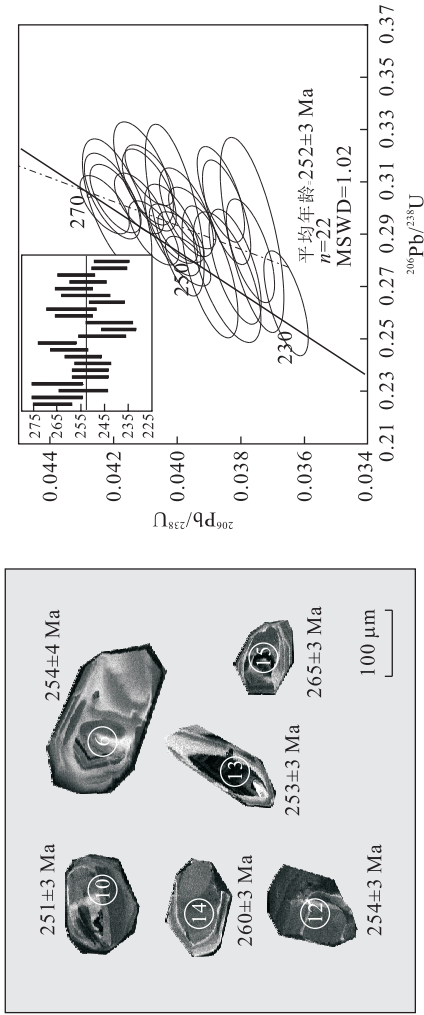


图 5 盐场北山二长花岗岩测年锆石 CL 图像及 U-Pb 年龄谱和图

表 4 盐场北山二长花岗岩锆石 Hf 同位素组成

Table 4 Hf isotope composition of zircon for the Yangchangbeishan adamellite

测点号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
DI207TW-6	254	0.026 145	0.000 155 2	0.000 991	0.000 066 1	0.283 015	0.283 010	0.000 009	8.43	13.85	0.32	342	395	-0.97
DI207TW-9	251	0.030 320	0.000 021 4	0.001 219	0.000 000 5	0.283 037	0.283 032	0.000 007	9.18	14.50	0.24	314	351	-0.96
DI207TW-10	251	0.046 005	0.000 165 4	0.001 645	0.000 005 2	0.282 989	0.282 981	0.000 007	7.39	12.65	0.23	391	470	-0.95
DI207TW-11	250	0.015 713	0.000 023 9	0.000 607	0.000 000 9	0.282 958	0.282 956	0.000 007	6.49	11.93	0.26	416	516	-0.98
DI207TW-12	254	0.030 378	0.000 127 2	0.001 137	0.000 004 1	0.283 029	0.283 023	0.000 005	8.89	14.28	0.19	325	367	-0.97
DI207TW-17	246	0.029 100	0.000 252 8	0.001 116	0.000 010 6	0.283 019	0.283 014	0.000 005	8.56	13.78	0.19	338	392	-0.97
DI207TW-19	239	0.017 906	0.000 036 9	0.000 692	0.000 001 4	0.283 003	0.283 000	0.000 008	8.07	13.21	0.28	354	424	-0.98
DI207TW-28	253	0.022 953	0.000 199 3	0.000 817	0.000 005 6	0.283 020	0.283 016	0.000 006	8.63	14.08	0.20	333	380	-0.98
DI207TW-30	252	0.020 379	0.000 163 4	0.000 781	0.000 005 7	0.282 974	0.282 970	0.000 006	7.02	12.42	0.21	397	484	-0.98
DI207TW-33	243	0.047 697	0.000 292 3	0.001 792	0.000 011 8	0.282 885	0.282 877	0.000 007	3.70	8.75	0.24	544	712	-0.95

注: $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 10\,000 \times \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$; $T_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] \}$; $T_{\text{DM2}} = T_{\text{DM1}} - (T_{\text{DM1}} - t) [f_{\text{ec}} - f_s] / [f_{\text{ec}} - f_{\text{DM}}]$; $f_{\text{Lu/Hf}} = ((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1) / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}]$; 其中 $((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s)$ 和 $((^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}})$ 为样品测定值, $((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}) = 0.033\,2$, $((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}) = 0.038\,4$, $((^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}) = 0.283\,25$, f_{ec} , f_s 和 f_{DM} 分别为大陆地壳、样品和亏损地幔的 $f_{\text{Lu/Hf}}$; t 为每个锆石样品测试所得的 U-Pb 年龄, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} / \text{a}$.

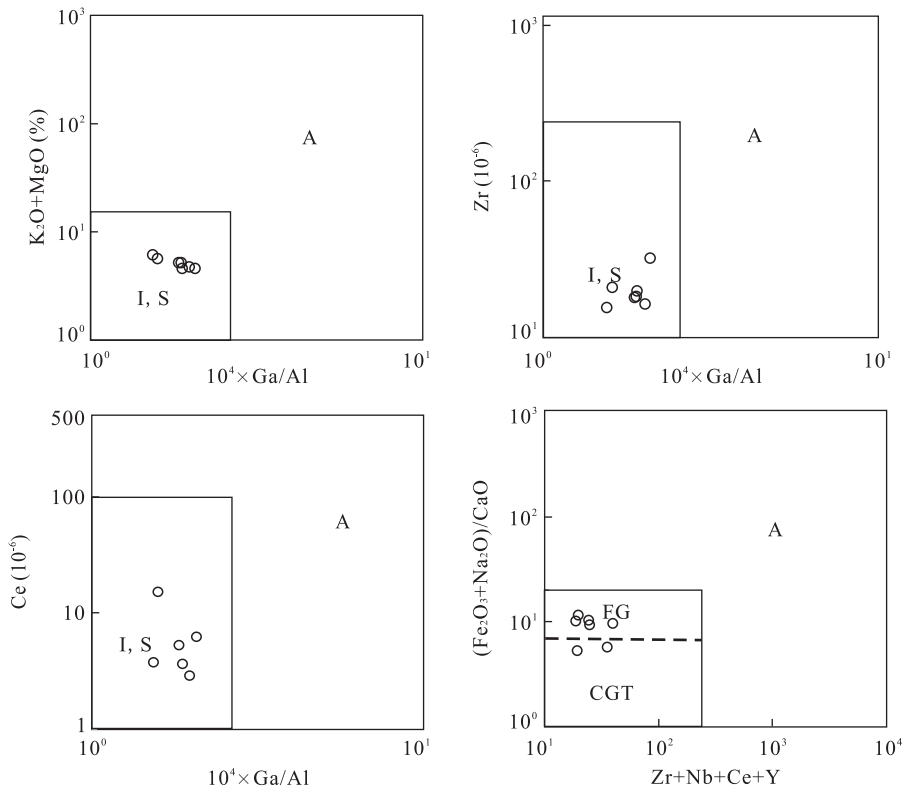


图 6 二长花岗岩 K_2O+MgO 、 Zr 、 Ce 和 $(Fe_2O_3+Na_2O)/CaO-10^4 \times Ga/Al$ 成因分类

Fig.6 K_2O+MgO , Zr -, Ce - and $(Fe_2O_3+Na_2O)/CaO-10^4 \times Ga/Al$ discrimination diagrams of the adamellite

底图据 Whalen *et al.*, 1987

岩判别图上,均落在 I、S 型区域(图 6)。然而, I 型和 S 型两类花岗岩不仅岩石化学存在很大差异,而且形成的源区、深度和组成均不同。如 S 型花岗岩不含角闪石,富含黑云母及堇青石、矽线石、红柱石和石榴子石等富铝矿物(Sylvester, 1998),铝饱和指数大于 1.1,具有强过铝质,刚玉标准分子一般大于 1%。而 I 型花岗岩是弱过铝质的,一般含有角闪石和磁铁矿等副矿物。岩相学表明,盐场北山二长花岗岩含少量黑云母,不含富铝矿物,而且铝饱和指数 A/CNK 平均为 1.01,为弱过铝质,刚玉标准分子(nC)平均为 0.1%,不含角闪石矿物等,与 S 型花岗岩不同,可能为 I 型花岗岩。

6.2 岩体源区性质

近年来,锆石 Hf 同位素示踪在地学方面的应用广泛,就岩浆岩而言, Hf 同位素可为鉴别岩浆源区和具体的岩浆岩提供证据(吴福元等, 2007; 刘绍峰等, 2013)。特别是通过与锆石 U-Pb 定年相结合,使锆石原位 Hf 同位素分析成为揭示地壳演化和示踪岩浆源区的重要手段(Scherer *et al.*, 2000; Griffin *et al.*, 2002)。对岩浆岩锆石 Hf 同位素的研究表明,低 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的岩石往往指示其源

区为地壳或是经过地壳的混染;而较高者指示其直接来自地幔或有幔源物质分异的新生壳源物质,如现代大洋玄武岩 ϵ_{Hf} 值高达 23(Corfu and Stott, 1993; Peter and Roland, 2003; 李广伟等, 2009)。

盐场北山二长花岗岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为正值,变化于 $+8.75 \sim +14.50$,平均为 $+12.94$,在锆石年龄-Hf 同位素相关性图解中,样品接近于亏损地幔源区(图 7)。图 7 表明岩体可能为新生玄武质地壳物质或者是亏损地幔物质来源。两阶段模式年龄 T_{DM2} 为 $351 \sim 712$ Ma,其中 351 Ma 和 712 Ma 分别对应于 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的最大值 $+14.50$ 和最小值 $+8.75$ 。而且 T_{DM2} 集中分布于 $351 \sim 424$ Ma 之间,平均为 385 Ma,说明晚泥盆世新生地壳是盐场北山二长花岗岩主要的物源区。除此之外,由 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 $+12.65 \sim +8.75$ 四个测点可知,其对应的 T_{DM2} 为 $470 \sim 712$ Ma,揭示早古生代一新元古代较早地壳物质也参与了花岗岩的形成。

众所周知,区域上泥盆系牦牛山组磨拉石的沉积岩系标志着加里东造山运动的结束,盐场北山二长花岗岩位于柴北缘构造带西端,锆石 U-Pb 年龄为晚二叠世(252 ± 3 Ma),两阶段模式年龄 T_{DM2} 平

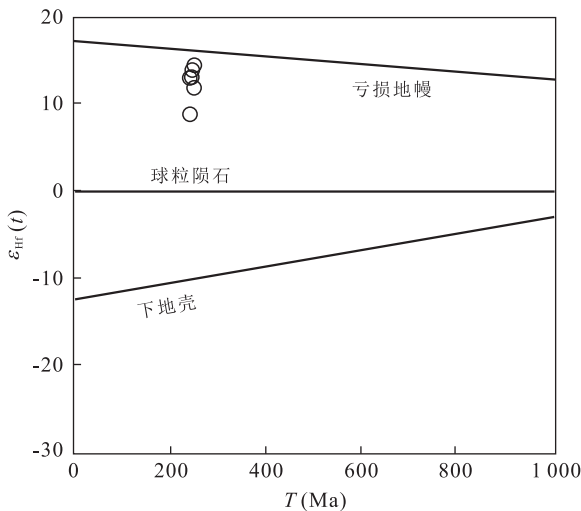


图 7 锆石年龄-Hf 同位素相关性

Fig.7 U-Pb age vs. Hf isotope of zircon

底图据李广伟等,2009

均为 385 Ma; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值, 平均为 +12.94, 推测晚泥盆世造山作用结束后, 在南祁连和柴达木地块之间前寒武纪结晶基底和早古生代加里东褶皱基底共同形成的大陆地壳基础上发生拉张裂隙, 幔源物质随之上涌, 进而形成玄武质的新生地壳, 如泥盆纪辉绿岩墙群的出现 (393.5 ± 3.0 Ma; 孙延贵等, 2004), 随后于晚石炭世出现宗务隆洋盆 (318 Ma; 王毅智等, 2001), 至二叠纪洋壳向南俯冲, 继而可能引发玄武质下地壳物质熔融产生晚二叠世二长花岗岩。结合岩体出现明显的 Nb、Ta 和 Ti 亏损, 具有岛弧岩浆岩微量元素组合的典型特征, 揭示其成因与俯冲作用关系密切。然而, Nb、Ta、Ti 的亏损被认为是与金红石和屑石保存于残留相有关 (Ringwood, 1990) 或是由富 Nb、Ta 的角闪石矿物结晶沉淀导致 (Ionov and Hofmann, 1995), 进而指示该源区残留相可能存在角闪石。另外, 地球化学分析表明岩体 Eu 明显富集 ($\delta\text{Eu} = 1.49 \sim 5.77$)。众所周知, 造成岩石中 Eu 富集或亏损主要取决于含钙造岩矿物的聚集和迁移, 而含钙的主要矿物包括了斜长石、磷灰石以及富钙辉石, 结合岩体主要矿物包括钾长石 (25%~30%)、斜长石 (30%~35%)、石英 (30%~35%) 和少量云母等, 推测盐场北山二长花岗岩中的 Eu 富集主要来自斜长石, 进而表明了源区残留矿物缺少斜长石。

6.3 构造环境及地质意义

花岗岩形成的构造环境是指形成时的地球动力学背景, 主要包括了洋脊环境、岛弧环境, 洋岛环境和裂谷环境。也有人提出了碰撞前、同碰撞、后碰撞

和陆内 4 种构造环境 (张旗等, 2008)。Maniar and Piccoli (1989) 认为花岗岩类岩石形成的构造环境总体可分为造山和非造山两类。造山花岗岩类又细划为岛弧花岗岩类 (IAG)、大陆弧花岗岩类 (CAG)、大陆碰撞花岗岩类 (CCG) 和后造山花岗岩类 (POG); 非造山花岗岩类可分为与裂谷有关的花岗岩类 (RRG)、大陆的造陆抬升花岗岩类 (CEUG) 以及大洋斜长花岗岩 (OP) 岩类 (Maniar and Piccoli, 1989)。不同构造环境的花岗岩岩石化学不同。CAG、CCG、CAG、POG 和 OP 为钙碱性, CEUG 和 RRG 为碱性。本文二长花岗岩里特曼指数平均为 2.55, 为钙碱性火成岩系列, 铝饱和指数平均为 1.01, 与 RRG 和 CEUG 具有强过铝质 ($A/\text{CNK} > 1.15$) 和碱性的特性不同, 结合岩体矿物组合特征碱性长石含量相对低而区别于大洋斜长花岗岩类 (OP), 在 Pearce *et al.* (1984) 提出的 Rb-Y+Nb 和 Nb-Y 构造环境判别图 (图 8), 样品分别落在火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩边界区; 在 Bechelor and Bowderr (1985) R_1-R_2 图解中 (图 9), 样品落在同碰撞、造山晚期边界区, 可见盐场北山二长花岗岩形成与造山作用有关, 且具有岩浆弧型和同碰撞花岗岩共同特征。

研究表明, 泥盆纪是柴北缘地质构造发展的重要转换期, 早、中泥盆世由于缺失沉积记录表明区内处于隆升状态, 而晚泥盆世地层与前泥盆纪地层均呈角度不整合关系的特征, 响应了古特提斯洋的形成演化 (郝国杰等, 2004)。吴才来等 (2001b) 通过研究冷湖海西期花岗闪长岩和二长花岗岩, 认为柴北缘晚古生代的隆升与柴达木地块向祁连地块的俯冲碰撞有关, 形成于活动板块或板块碰撞前消减到碰撞后隆起阶段, 具有岛弧花岗岩性质 (吴才来等, 2001b); 又如柴北缘西段形成于 271.2 ± 1.5 Ma 和 260.4 ± 2.3 Ma 的三岔沟两期花岗岩体, 地球化学特征也显示岛弧或活动陆缘花岗岩属性 (吴才来等, 2008)。辛后田等 (2006) 认为中石炭—早二叠世, 巴颜喀拉洋的扩张才是导致柴北缘构造应力场由拉张转为收缩的主要原因, 进而使柴达木地块中一下地壳重熔侵位 (辛后田等, 2006)。

研究区位于青海冷湖盐场北山地区, 构造位置隶属柴北缘西端, 是柴北缘构造带与南祁连造山带的衔接部位。区内侵入岩广泛发育, 由于后期阿尔金断裂影响, 现呈 NW-SE 向带状展布, 从北至南岩体具有英云闪长岩—石英闪长岩—花岗闪长岩—黑云母二长花岗岩—二长花岗岩的岩石组合和岩浆序列特征。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年结果表明, 盐场北

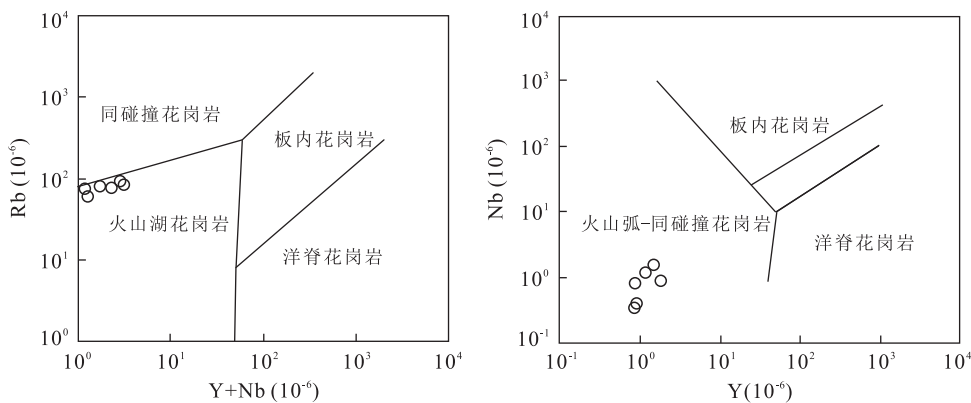
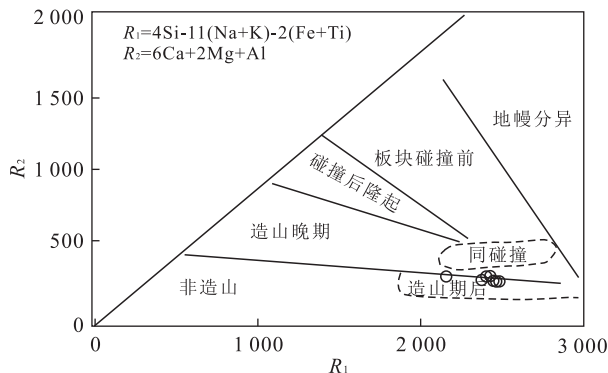


图 8 花岗岩 Rb-Y+ Nb 和 Nb-Y 构造环境判别图

Fig.8 Rb-Y+ Nb and Nb-Y tectonic discrimination diagrams

据 Pearce *et al.*, 1984图 9 R_1 - R_2 图解Fig.9 R_1 - R_2 diagram据 Bechelor *et al.*, 1985

山花岗岩形成于二叠纪,其时代分别为 273 ± 7 Ma (英云闪长岩)、 265 ± 2 Ma (花岗闪长岩)、 254 ± 4 Ma (二长花岗岩) 和 252 ± 3 Ma (二长花岗岩), 揭示柴北缘发育较大规模的晚古生代岩浆事件。

近来,宗务隆带内晚古生代海相沉积建造、镁铁-超镁铁质岩的一系列发现(孙延贵等,2004;郭安林等,2007;寇晓虎等,2007;张克信等,2007;吴才来等,2008;王绘清等,2009,2010),以及出露于宗务隆构造带以南(三岔沟、天俊南山、青海湖南山、二郎洞、同仁等地)位于柴北缘构造带北部的晚二叠世至早三叠世的岛弧型火山岩和花岗岩研究(郭安林等,2007),不但论证了石炭-二叠纪柴北缘构造带与南祁连构造带之间存在洋盆,而且约束了该宗务隆洋盆的俯冲-碰撞时限。综上所述,盐场北山花岗岩宏观特征具有由北向南的演化序列和成分变化极性,而且其形成时代亦具有从老到新的变化趋势,认为晚古生代宗务隆小洋盆俯冲极性由北向南,而盐场

北山花岗岩可能是板块俯冲机制下靠陆一侧火山弧环境的产物。结合其形成年龄为 252 ± 3 Ma, 晚于柴北缘三岔沟与俯冲-碰撞作用相关的两期岩体年龄 ($270 \sim 260$ Ma), 其与区内辉长岩 (254 ± 3 Ma) (董增产, 2014) 和黑云母二长花岗岩 (254 ± 4 Ma) 形成时代在误差范围内一致(董增产等, 2015), 应为同期岩浆活动产物。地球化学特征表明, 辉长岩为俯冲板片脱水交代地幔楔部分熔融形成, 而黑云母二长花岗岩又是该基性岩浆上升底侵导致地壳物质熔融的产物, 具岛弧或活动大陆边缘岩浆岩特征。因此, 笔者认为区内二长花岗岩应该形成于火山弧构造环境, 进而揭示晚二叠世末柴北缘具有活动大陆边缘性质。

7 结论

(1) 盐场北山二长花岗岩形成于 252 ± 3 Ma, 为晚二叠世岩浆活动产物。(2) 锆石 Hf 两阶段模式年龄 T_{DM2} 为 $351 \sim 712$ Ma, 绝大部分集中于泥盆纪, 平均为 385 Ma, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为正值, 变化于 $+8.75 \sim +14.50$, 平均为 $+12.94$, 显示其新生地壳应为亏损地幔物质来源。(3) 盐场北山花岗岩与晚泥盆世玄武质地壳物质的部分熔融有关, 是板块俯冲机制下靠陆一侧火山弧环境的产物, 是揭示晚二叠世末柴北缘具有活动大陆边缘性质。

致谢: 本文实验测试部分得到了西北大学张瑞英博士、张宇昆硕士的帮助, 在此表示感谢, 同时衷心感谢本单位陈奋宁工程师及匿名审稿人等在本文撰写过程中给予的建议和帮助。

References

- Batchelor, R. A., Bowderr, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multication Parameters. *Chem. Geol.*, 48(1-4): 43-55. doi: 10.1016/0009-2541(85)90034-8
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 1992. I- and S-Type Granites in the Lachlan Fold Belt Transactions of the Royal Society of Edinburgh. *Earth Sciences*, 83(1-2): 1-26. doi: 10.1017/S0263593300007720
- Collins, W. J., Beans, S. D., White, A. J. R., 1982. Nature and Origin of A Type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189-200. doi 10.1007/BF00374895
- Corfu, F., Stott, G. M., 1993. Age and Petrogenes of Two Late Archean Magmatic Suites, Northwestern Superior Province, Canada; Zircon U-Pb and Lu-Hf Isotopic Relations. *Journal of Petrology*, 34: 817-838. doi: 10.1093/ptrology/34.4.817
- Dong, Z. C., Gu, P. Y., Jiao, H., et al., 2014. Geochemistry and Chronology of Yanchangbeishan Gabrro in Lenghu Area at the West Segment of the North Margin of Qaidam. *Chinese Journal of Geology*, 49(4): 1132-1149. doi: 10.3969/j. issn. 0563-5020. 2014. 04. 007 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Z. C., Yang, C., Gu, P. Y., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of Yanchangbeishan Biotite Adamelite of Lenghu Area in Qinghai and Their Geological Significance. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese with English abstract)(in press).
- Frost, C. D., Frost, B. R., 1997. Reduced Rapakivi-Type Granites: The Tholeiite Connection. *Geology*, 25(7): 647-650. doi: 10.1130/0091-7613(1997)025<0647:RRT-GTT>2.3.CO;2
- Gao, S., Liu, X. M., Yuan, H. L., et al., 2002. Determination of Forty-Two Major and Trace Elements in USGS and NIST SRM Glasses by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandard Newsletters*, 26(2): 181-196. doi: 10.1111/j.1751-908X.2002.tb00886.x
- Griffn, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Genesis, SE China; In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3): 237-269. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00082-8
- Guo, A. L., Zhang, G. W., Qiang, J., et al., 2009. Indosinian Zongwulong Orogenic Belt on the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Hao, G. J., Lu, S. N., Wang, H. C., et al., 2004. The Pre-Devonian Tectonic Framework in the Northern Margin of Qaidam Basin and Geological Evolution of Olongbuluk Palaeo-block. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 115-122 (in Chinese with English abstract).
- Ionov, D. A., Hofmann, A. W., 1995. Nb-Ta Rich Mantle Amphiboles and Micas: Implications for Subduction Related Metasomatic Trace Element Fractionations. *Earth Planet Sci. Lett.*, 131(3-4): 341-356. doi: 10.1016/0012-821X(95)00037-D
- Kou, X. H., Zhang, K. X., Lin, Q. X., et al., 2007. The Distribution of Permian Sedimentary Sequences in the Adjacent Area of Qingling-Qilian-Kunlun. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 681-690 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. W., Fang, A. M., Wu, F. Y., et al., 2009. Studies on the U-Pb Ages and Hf Isotopes of Zircons in the Aoyitake Plagioclase Granite, West Tarim. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 166-172 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. A., Nie, S. R., 1985. The Structural Characteristics of Zongwulong Rift Trough. *Qinghai Geology*, 2: 65-76 (in Chinese).
- Liu, B., Ma, C. Q., Guo, P., et al., 2013. Discovery of the Middle Devonian A-Type Granite from the Eastern Kunlun Orogen and Its Tectonic Implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(5): 947-962 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2013.093
- Liu, S. F., Du, Y. S., Fu, S. X., et al., 2013. U-Pb Age and Hf Isotopic Characteristics of Zircons from Granodiorite Porphyry in the Yaojialing Zn-Au-Polymetallic Mine, Anhui Province and Their Geological Significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(Suppl. 1): 91-102 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2013.SI.010
- Liu, X. M., Gao, S., Yuan, H. L., et al., 2002. Analysis of 42 Major and Trace Elements in Glass Standard Reference Materials by 193 nm LA-ICP-MS. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 408-418 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. N., Yu, H. F., Li, H. K., et al., 2006. Precambrian Key Issues in China: Precambrian Important Geological Events in West China and Their Global Tectonic Significance. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Lu, X. X., Sun, Y. G., Zhang, X. T., et al., 2007. The SHRIMP Age of Tatalin Rapakivi Granite at the North Margin of

- Qaidam Basin, *Acta Geologica Sinica*, 81(5): 626—634 (in Chinese with English abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101(5): 635—643. doi: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2
- Meng, F. C., Zhang, J. X., Yang, J. S., 2005. Tectono-thermal Event of Post-HP/UHP Metamorphism in the Xitieshan Area of the North Qaidam Mountains, Western China: Isotopic and Geochemical Evidence of Granite and Gneiss. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 45—56 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Li, X. Z., Wang, L. Q., et al., 2002. Preliminary Division of Tectonic Units of the Qinghai-Taibet Plateau and Its Adjacent Regions. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 701—707 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., 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
- Peter, D. K., Roland, M., 2003. Lu-Hf and Sm-Nd Isotope Systems in Zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 327—341. doi: 10.2113/0530327v.53 no.1 p.327—341
- Qi, Y., Liang, Y. H., Hu, Z. C., et al., 2013. Confirmation of Aluminous A-Type Granite Emplacement and Its Tectonic Significance during Early Cretaceous in the Laoling Area, South of Jilin Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(4): 677—688 (in Chinese with English abstract).
- Ringwood, A. E., Kato, T., Hibberson, W., et al., 1990. High-Pressure Geochemistry of Cr, V and Mn and Implications for the Origin of the Moon. *Nature*, 347: 174—176. doi: 10.1038/347174a0
- Scherer, E. E., Cameron, K. L., Blicheri-Toft, J., 2000. Lu-Hf Garnet Geochronology: Closure Temperature Relative to the Sm-Nd System and the Effects of Trace Mineral Inclusions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64(19): 3413—3432. doi: 0016-7037/0000440-3
- Song, S. G., Zhang, L. F., Niu, Y. L., 2004. Ultra-Deep Origin of Garnet Peridotite from the North Qaidam Ultrahigh-Pressure Belt, Northern Tibetan Plateau, NW China. *American Mineralogist*, 89: 1330—1336.
- Sun, Y. G., Zhang, G. W., Wang, J., et al., 2004.⁴⁰Ar/³⁹Ar Age of the Basic Sill Swarms of Two Periods in the Junction Area of Qinling and Kunlun and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 65—71 (in Chinese with English abstract).
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(14): 29—44. doi: 10.1016/S0024-4937(98)00024-3
- Wang, D. Z., Zhou, X. M., 2002. Crustal Evolution and Petrogenesis of Late Mesozoic Granitic Volcanic-Intrusive Complexes in Southeastern China. Science Press, Beijing, 160—188 (in Chinese).
- Wang, H. Q., Zhu, Y. H., Lin, Q. X., et al., 2009. Mineral Characteristics and Tectonic Environment of Longwuxia Gorge Ophiolite in Tongren, West Qinling Area. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(4): 316—328.
- Wang, H. Q., Zhu, Y. H., Lin, Q. X., et al., 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Gabbro from Longwu Gorge Ophiolite, Jianzha-Tongren Area, Qinghai, China and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 86—92 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. J., Wang, Z. S., 1980. Discussion of Several Problems of Zhongwulongshan Group in Qinghai. *Qinghai Geology*, 3: 1—15 (in Chinese).
- Wang, Y. Z., Bai, Y. S., Lu, H. L., 2001. Geological Characteristics of Tianjunnanshan Ophiolite in Qinghai and Its Forming Environment. *Qinghai Geology*, 21(1): 29—35 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407—419. doi: 10.1007/BF00402202
- Wu, C. L., Gao, Y. H., Wu, S. P., et al., 2007. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Granites from the Da Qaidam Area in the North Margin of Qaidam Basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1861—1875 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Gao, Y. H., Wu, S. P., et al., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb Dating and Geochemical Characteristics of Granites from the Western of the North Margin of Qaidam. *Sci. China (Ser. D)*, 38(8): 930—949 (in Chinese).
- Wu, C. L., Wooden, J. L., Robinson, P. T., 2009. Geochemistry and Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Granitoids from the West Segment of North Qaidam. *Sci. China (Ser. D)*, 52(11): 1771—1790. doi: 10.1007/s11430-009-0147-3
- Wu, C. L., Yang, J. S., Trewor, R., et al., 2001a. Zircon SHRIMP Ages of Aolaoshan Granite from the South Margin of Qilianshan and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 215—221 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Yang, J. S., Wang, Z. H., et al., 2001b. The Lenghu

- Granitoids at the Western End of the Northern Margin of the Qaidam Basin, Qinghai. *Regional Geology of China*, 20(1): 67–81 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Yang, J. S., Wooden, J. L., et al., 2001c. SHRIMP Zircon Dating of Chaidamushan Granite. *Chinese Science Bulletin*, 46(20): 1743–1747 (in Chinese).
- Wu, C. L., Yang, J. S., Wooden, J. L., et al., 2004. SHRIMP Zircon Dating of Yematan Granite of North Margin of Qaidam. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1667–1672 (in Chinese).
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. P., Wang, M. Y., Qi, K. J., 2007. Present Situation of Researches on A-Type Granites: A Review. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 57–66 (in Chinese with English abstract).
- Xin, H. T., Wang, H. C., Zhou, S. J., 2006. Geological Events and Tectonic Evolution of the North Margin of the Qaidam Basin. *Geological Survey and Research*, 29(4): 311–320 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, G. B., Wang, H. C., Li, H. M., et al., 2002. Zircon U-Pb Age of the Gabbros in Luliangshan Area on the Northern Margin of Qaidam Basin and Its Geological Implication. *Progress in Precambrian Research*, 25(1): 37–40 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2003. Zircon U-Pb Dating and REE Component Analysis of Intrusion Cainozoic in Dongbei Area. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511–1520 (in Chinese).
- Zhang, K. X., Zhu, Y. H., Lin, Q. X., et al., 2007. Discovery of a Mafic-Ultramafic Belt in the Rongwoxia Area, Tongren, Qinghai, China. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 661–667 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Xiong, X. L., et al., 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity. China Land Press, Beijing, 45–68 (in Chinese).
- Zhang, Y. B., 1982. Understanding of Some Basic Characteristics of the Geologic Structure in Qinghai. *Qinghai Geology*, 3: 10–19 (in Chinese).
- 长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义. 大地构造与成矿学(待刊).
- 郭安林, 张国伟, 强娟, 等, 2009. 青藏高原东北缘印支期宗务隆造山带. 岩石学报, 25(1): 1–12.
- 郝国杰, 陆松年, 王惠初, 等, 2004. 柴达木盆地北缘前泥盆纪构造格架及欧龙布鲁克古陆块地质演化. 地质前缘, 11(3): 115–122.
- 寇晓虎, 张克信, 林启祥, 等, 2007. 秦祁昆接合部二叠纪沉积建造时空分布. 地球科学——中国地质大学学报, 32(5): 681–690.
- 李广伟, 方爱民, 吴福元, 等, 2009. 塔里木西部奥依塔克斜长花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究. 岩石学报, 25(1): 166–172.
- 李平安, 聂树人, 1985. 宗务隆裂陷槽的构造特征. 青海地质, (2): 65–76.
- 刘彬, 马昌前, 郭盼, 等, 2013. 东昆仑中泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报, 38(5): 947–962.
- 刘绍锋, 杜杨松, 付水兴, 等, 2013. 安徽姚家岭锌金多金属矿区花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 38(1): 91–102.
- 柳小明, 高山, 袁洪林, 等, 2002. 193 nm LA-ICPMS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析. 岩石学报, 18(3): 408–418.
- 陆松年, 于海峰, 李怀坤, 等, 2006. 中国前寒武纪重大地质问题研究——中国西部前寒武纪重大地质事件群及其全球构造意义. 北京: 地质出版社.
- 卢欣祥, 孙延贵, 张雪亭, 等, 2007. 柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的 SHRIMP 年龄. 地质学报, 81(5): 626–634.
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥, 2005. 柴北缘锡铁山早古生代 HP/UHP 变质作用后的构造热事件——花岗岩和片麻岩的同位素与岩石地球化学证据. 岩石学报, 2(1): 45–56.
- 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等, 2002. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分. 地质通报, 21(11): 701–707.
- 秦亚, 梁一鸿, 胡兆初, 等, 2013. 吉南老岭地区早白垩世铝质 A 型花岗岩的厘定及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报, 38(4): 677–688.
- 青海省地质矿产局, 1991. 青海省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 青海省地质矿产局, 1997. 青海省岩石地层. 北京: 中国地质大学出版社.
- 孙延贵, 张国伟, 王瑾, 等, 2004. 秦一昆结合区两期基性岩墙群 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其构造意义. 地质学报, 78(1): 65–71.
- 王德滋, 周新民, 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山—侵

附中文参考文献

- 董增产, 辜平阳, 焦和, 等, 2014. 柴北缘西端冷湖盐场北山辉长岩地球化学及年代学研究. 地质科学, 49(4): 1132–1149.
- 董增产, 杨成, 辜平阳, 等, 2015. 青海冷湖盐场北山黑云母二

- 入杂岩成因与地壳演化.北京:科学出版社,160—188.
- 王绘清,朱云海,林启祥,等,2009.西秦岭同仁隆务峡蛇绿岩矿物成分特征及构造环境.岩石矿物学杂志,28(4):316—328.
- 王绘清,朱云海,林启祥,等,2010.青海尖扎—同仁地区隆务峡蛇绿岩的形成时代及意义——来自辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的证据.地质通报,29(1):86—92.
- 王培俭,王增寿,1980.青海“中吾农山群”及其有关几个问题的讨论.青海地质,3:1—15.
- 王毅智,拜永山,陆海莲,2001.青海天峻南山蛇绿岩的地质特征及其形成环境.青海地质,21(1):29—35.
- 吴才来,郜源红,吴锁平,等,2007.柴北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年.岩石学报,23(8):1861—1875.
- 吴才来,郜源红,吴锁平,等,2007.柴达木盆地北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年.岩石学报,23(8):1861—1875.
- 吴才来,郜源红,吴锁平,等,2008.柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征.中国科学(D辑),38(8):930—949.
- 吴才来,杨经绥,Wooden,J.L.,等,2004.柴达木北缘都兰野马滩花岗岩锆石 SHRIMP 定年.科学通报,49(16):1667—1672.
- 吴才来,杨经绥,Trewor,R.,等,2001a.祁连南缘噶喇山花岗岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义.岩石学报,17(2):215—221.
- 吴才来,杨经绥,王志红,等,2001b.柴达木盆地北缘西端冷湖花岗岩.中国区域地质,20(1):67—81.
- 吴才来,杨经绥,Wooden,J.L.,等,2001c.柴达木山花岗岩锆石 SHRIMP 定年.科学通报,46(20):1743—1747.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185—220.
- 吴锁平,王梅英,戚开静,2007.A 型花岗岩研究现状及其评述.岩石矿物学杂志,26(1):57—66.
- 辛后田,王惠初,周世军,2006.柴北缘的大地构造演化及其地质事件群.地质调查与研究,29(4):311—320.
- 袁桂邦,王惠初,李惠民,等,2002.柴北缘绿梁山地区辉长岩的锆石 U-Pb 年龄及意义.前寒武纪进展与研究,25(1):37—40.
- 袁洪林,吴福元,高山,等,2003.东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析.科学通报,48(14):1511—1520.
- 张克信,朱云海,林启祥,等,2007.青海同仁县隆务峡地区首次发现 镁铁质—超镁铁质岩带.地质通报,26(6):661—667.
- 张旗,王焰,熊小林,等,2008.埃达克岩和花岗岩:挑战与机遇.北京:中国大地出版社,45—68.
- 张以恭,1982.对青海地质构造若干基本特征的认识.青海地质,3:10—19.