doi:10.3799/dqkx.2013.093

东昆仑中泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造意义

刘 彬^{1,2},马昌前^{1,2}*,郭 盼²,张金阳³,熊富浩^{1,2},黄 坚²,蒋红安²

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074
 中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

3.中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

摘要:东昆仑中泥盆世冰沟正长花岗岩具有高硅(SiO₂含量为71.85%~72.77%)和高碱(K₂O+Na₂O值为8.39~8.58)、相对富铝(A/CNK为0.93~1.03)、高FeO₁/MgO(6.24~7.86)和10⁴Ga/Al值(3.04~3.60)、富集轻稀土、明显的Eu负异常、相对原始地幔明显富集Zr、Ga、Y和Hf等高场强元素并强烈亏损Ba、Sr、P和Ti元素的特征,这些特征与A型花岗岩类的地球化学特征一致.采用锆石LA-ICP-MSU-Pb法获得²⁰⁶Pb/²³⁸U值加权平均年龄为391±3Ma(MSWD值为2.36),表明该岩体为中泥盆世岩浆活动的产物.综合全岩Sr-Nd同位素、地球化学及实验岩石学等资料,可以判断该岩石为造山后伸展阶段长英质地壳物质(变杂砂岩)在低压高温氧化条件下发生部分熔融的产物.冰沟正长花岗岩是目前东昆仑地区报道的时代最晚的古生代A型花岗岩,它的出现可能标志着中泥盆世时期东昆仑始特提斯构造演化的彻底终结和古特提斯构造演化的崭新开始. 关键词:A型;花岗岩;造山后;中泥盆世;东昆仑;构造;岩石学.

中图分类号: P581 **文章编号:** 1000-2383(2013)05-0947-16 **收稿日期:** 2012-08-14

Discovery of the Middle Devonian A-type Granite from the Eastern Kunlun Orogen and Its Tectonic Implications

LIU Bin^{1,2}, MA Chang-qian^{1,2*}, GUO Pan², ZHANG Jin-yang³, XIONG Fu-hao¹, HUANG Jian², JIANG Hong-an²

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
 Faulty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
 Faulty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Middle Devonian Binggou granites from the eastern Kunlun orogen, are characterized by relatively high silicon $(SiO_2 = 71.85\% - 72.77\%)$, total alkali $(K_2O+Na_2O=8.39-8.58)$, aluminum(A/CNK=0.93-1.03), FeO_t/MgO (6.24-7.86) and 10^4 Ga/Al values (3.04-3.60), high LREE, obvious negative Eu anomalies, and notable enrichment of HFSE (Zr, Ga, Y, Hf, etc.), strong depletion of Ba, Sr, P and Ti relative to the primitive mantle, similar to the geochemical features of A-type granites. The LA-ICP-MS Zircon U-Pb analyses yield a weighted mean 206 Pb/ 238 U age of 391 ± 3 Ma (*MSWD*=2.36), considered to be the formation age of the Binggou granites. With a comprehensive consideration on many different indexes, such as whole rock Sr-Nd isotopes, geochemistry, experimental petrology and so on, we conclude that the Binggou granites formed by partial melting of crust materials (meta-greywacke) on the conditions of low pressure and high temperature at the stage of postorogenic stretch. The Binggou granites are younger than the other Paleozoic A-type granites reported in the eastern Kunlun orogen, suggesting the ending proto-tethys and the beginning paleo-tethys.

Key words: A-type; granite; postorogenic; Middle Devonian; eastern Kunlun orogen; tectonics; petrology.

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41272079);中国地质调查局计划项目(Nos.1212011121270,1212010918002);教育部和国家外国专家局 高等学校学科创新引智计划(No.B07039).

作者简介:刘彬(1987-),男,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业.E-mail:liubincug@126.com

^{*} 通讯作者:马昌前, E-mail: cqma@cug.edu.cn

A型花岗岩这一术语,最早是由 Loiselle and Wones(1979)提出.由于该类岩石具有特殊的地球 化学特征、成因及重要的地球动力学意义,因此一直 受到国内外学者的广泛关注(Bonin,2007;周振华 等,2010;李舢等,2011;Frost *et al.*,2011).在碰撞 造山带中,A型花岗岩通常形成于造山后的伸展阶 段,因此,其可以作为判断造山事件结束的重要岩石 学标志(孙德有等,2000;王强等,2000).

位于青藏高原北缘的东昆仑造山带是横贯中国 大陆的巨型(长约 5 000 km)中央造山带的重要组成 部分(许志琴等,2006;杨经绥等,2010),同时也是青 藏高原内部可与冈底斯相媲美的另一条巨型岩浆岩 带(莫宣学等,2007).该造山带主要发育早古生代 (€2-D)和晚古--早中生代(P₃-T)2个时段的侵入岩 (图 1),分别对应始特提斯和古特提斯两期不同的构 造演化过程.其中,早古生代侵入岩的研究非常薄弱, 多数仍停留在岩体地质调查工作上.已有的研究工作 为限定始特提斯洋的打开、扩张和消减时间提供了一 些资料(Yang et al., 1996; 陈能松等, 2000, 2002; 陆松 年,2002;李怀坤等,2006;张亚峰等,2010),但对始特 提洋的最终闭合、地体的碰撞以及造山事件的结束的 认识仍缺乏明确的年代学和岩石学方面的证据.由于 缺乏造山后 A 型花岗岩的证据,多数学者倾向于将 泥盆纪牦牛山组磨拉石建造的出现作为始特提斯造 山作用结束的标志(潘裕生等,1996;莫宣学等,2007; 许志琴等,2007).然而磨拉石建造可以形成于多种构 造环境中,并且只有前陆盆地中最早的磨拉石建造才 能指示碰撞造山事件的结束(李继亮等,1999;李继 亮,2009).因此,简单地根据牦牛山组磨拉石建造来 判断始特斯造山事件的结束具有一定的局限性.本文 报道的东昆仑中泥盆世冰沟 A 型花岗岩,对于限定 东昆仑始特提斯碰撞造山事件的结束时间和认识该 区乃至整个中央造山带始特提斯的大地构造演化都 具有极其重要的意义.

1 区域地质背景及岩体地质特征

以昆中缝合带和昆南缝合带为界,可将东昆仑 造山带自北往南划分为3个主要构造单元,即昆北 地体、昆南地体和巴颜喀拉地体(许志琴等,2007). 各单元主要的地质特征为:(1)昆北地体. 以大面积 出露前寒武纪变质基底金水口群和加里东期一印支 期的侵入杂岩为特征.古元古界金水口群在区内广 泛分布,主要为一套古老的深变质岩系(主要为高角 闪岩相一麻粒岩相)组成,以发育强烈变形的变基性 火山岩(斜长角闪岩)-陆源碎屑岩(片麻岩)-镁质 碳酸盐岩组合为特征.金水口群经历了早古生代的 约 460 Ma 的麻粒岩相变质作用和随后约 402 Ma 与深熔作用有关的构造热事件,这表明东昆仑北地 体前寒武纪基底在早古生代造山过程中发生了明显 的再活化,与祁连一阿尔金地体类似(张建新等, 2003).该区分布有大量加里东期一印支期的侵入 岩,其中加里东期侵入岩主要出露泥盆纪花岗岩、少 量的闪长岩和辉长岩,印支期侵入岩主要出露晚二 叠世-三叠纪花岗岩、较多的基性岩体及基性岩墙 群;(2)昆南地体. 位于昆中缝合带(昆中断裂带)与 昆南缝合带(昆南一阿尼玛卿断裂带)之间,具有与 昆北地体不同的前寒武纪基底.该基底主要以苦海 杂岩为代表,岩石组成很复杂,包括各种类型的片麻



图 1 东昆仑造山带东段大地构造位置(a)和侵入岩地质分布(b) Fig.1 The tectonic location (a) and simplified geological map (b) of east part of the eastern Kunlun orogen



图 2 冰沟正长花岗岩岩体地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Binggou syenogranitic pluton

1.奥陶纪花岗岩;2.中泥盆世正长花岗岩;3.中三叠世花岗岩;4.古元 古代地层;5.中元古代地层;6.第四纪;7.采样位置;8.样品号

岩、石英片岩、混合岩和斜长角闪岩等,形成时间为 古元古代一中元古代,并于中元古代末期最终固结 (王国灿等,2007).该地体内大量出露中元古代的万 宝沟群和早古生代的纳赤台群,主要为一套活动型 的浅一半深海碎屑岩一基性火山岩一镁质碳酸盐岩 组合,并经历了绿片岩相的变质作用.另外,该地体 同样也存在加里东期和印支期岩浆事件;(3)巴颜喀 拉地体.位于昆南断裂以南,位于可可西里一巴颜 喀拉活动性三叠纪沉积盆地的北缘.该地体缺失二 叠系以前的地层,主要出露二叠系下统布青山群和 三叠系巴颜喀拉山群,以巨厚的三叠纪浅海一半深 海泥砂质复理石沉积为特征,是南北大陆碰撞和北 特提斯洋完全退出后的记录(刘成东,2008).岩浆活 动主要以印支期花岗闪长岩和正长花岗岩、二叠 纪一三叠纪火山岩及新第三纪陆相火山岩为特征.

本文报道的冰沟 A 型花岗岩位于昆北地体内, 主要出露在青海省海西州都兰县诺木洪乡西南冰沟 地区,面积约为 58 km²,主要侵入古元古界金水口群 和中元古界冰沟群中,少量侵入丘吉东沟奥陶纪花岗 岩(444±2 Ma,据马昌前等未刊资料)中(图 2).

另外,在岩体的西部,可见部分中三叠世花岗闪 长岩(235±4 Ma,据马昌前等,未刊资料)侵入其中 (图 2).冰沟 A 型花岗岩岩性比较均一,主要为浅肉 红色粗粒正长花岗岩,不具分带现象.岩石主要矿物 组成为碱性长石(40%~50%)、斜长石(15%~ 25%)、石英(25%~30%)和黑云母(5%~10%),副 矿物主要为锆石、磷灰石和不透明矿物等.其中,碱 性长石以条纹长石为主(图 3a),多为他形,条纹主 要为正条纹,卡斯巴双晶发育(图 3a),镜下可见部 分条纹长石包裹斜长石和石英,反映其结晶作用较 晚;斜长石多为半自形一自形板状,具明显的聚片双 晶和卡钠复合双晶,显微镜下测定 An 约为 43~60, 属于中长石一拉长石的范围;石英主要为他形,少量 为半自形,表面光滑,镜下可见细小不规则状的石英 穿插于碱性长石构成蠕虫结构(图 3b);黑云母为深 褐色,部分因绿泥石化而呈淡绿色,多色性明显,多 充填在长石和石英的空隙间,镜下可见黑云母呈细 脉状穿过长英质矿物,反映其应形成于岩浆结晶的 晚期.



图 3 冰沟正长花岗岩显微镜下照片 Fig.3 Photomicrographs of the typical textures of the Binggou syeno-granite a.条纹结构;b.蠕虫结构;Bt.黑云母;Kfs.碱性长石;Pl.斜长石;Qtz.石英

2 测试方法

用于锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年样品采自新 鲜的岩石(09NM14-1),采样位置如图1所示(地理 坐标为: 36°07.420′N, 98°28.272′E). 锆石样品的分 选按照标准程序进行,经过机械粉碎、重磁和电磁分 析后,在双目镜下随机选择晶形完好并且纯净透明 的锆石来制靶.锆石样品靶制成后,对锆石进行透射 光、反射光和阴极发光照相,以供测试选点用.锆石 多呈浅棕色、半透明、多为柱状晶形,长宽比为 1:1~4:1,部分锆石局部含包裹体和裂隙.锆石 U-Pb 同位素年龄测定在南京大学内生金属矿床成 矿机制研究国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 同时 分析完成.激光剥蚀系统为 New Wave 213 nm, ICP-MS为 Agilent 7500a. 工作时激光束斑直径为 32 μm.锆石 U-Pb 同位素分馏根据锆石标样 GE-MOC GJ-1 来校正,并采用锆石标样 Mund Tank 为 内标来控制其分析精度.锆石样品同位素比值及相 关元素含量的计算采用 Glitter(ver 4.4.1)软件,并 使用 Andersen(2002)编制的软件进行普通铅校正. 锆石 U-Pb 谐和图的绘制和加权平均年龄的计算采 用 ISOPLOT(ver 3.23)软件.

主量元素分析在湖北省地质实验研究所武汉综 合岩矿测试中心完成,氧化物测定采用 X 荧光光谱 a系数测定法, H₂O 的测定采用重量法, CO₂ 的测 定采用非水滴定法,分析精度均为1%(H₂O 除外). 稀土和微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过 程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 Agilent 7500a ICP-MS分析完成.用于 ICP-MS分析的 样品处理如下:(1)称取粉碎至大约200目的岩石粉 末 50 mg 置于 Teflon 溶样器中;(2)采用 Teflon 溶 样弹将样品用 HF+HNO₃ 在 195 ℃条件下消解 48 h;(3)在120 ℃条件下蒸干除 Si 后的样品用 2% 的 HNO3 稀释 2 000 倍, 定容于干净的聚酯瓶. 详细 的样品消解处理过程、分析精密度和准确度同 Liu et al.(2008).全岩 Sr-Nd 同位素分析在中国地质大 学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室,采 用 Finnigan 公司的 MAT-261 热电离同位素质谱仪 进行比值测定,仪器的准确度通过标样 NBS987 和 La Jolla 进行监测. Sr 同位素的质量分馏用 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr= 8.375 209 校正,标样 NBS987 和 NBS607的87Sr/86Sr 的测定结果分别为0.710300± 4 和 1.198 898 ± 4. Nd 同位素的质量分馏用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 900 校正,标样 La Jolla 和 BCR-2 的¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd 的测定结果分别为 0.511 837±0.6 和 0.512 619±2,详细流程可见 Gao *et al.*(2004).

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

锆石样品共测定 17 颗锆石 18 个数据点,包括 16 个边部和 2 个核部测点,其具体的测试结果见表 1.两个核部测点(点 13 和 16)给出年龄为 409 Ma 和 405 Ma,但在锆石 U-Pb 谐和图(图 4b)上均偏离谐 和线,可能与放射性成因铅丢失有关.16 个边部测 点的锆石,多数具有明显的岩浆震荡环带(图 4a), 其 Th/U 比值(0.52~1.14)均大于 0.4,与典型的岩 浆锆石特征类似(Belousova *et al.*,2002).在锆石谐 和图(图 4b)上,除 1 个测点(点 1)因 Pb 丢失,明显 偏离谐和线外,其余 15 个测点均投影在谐和线上或 附近,其²⁰⁶ Pb/²³⁸U 值加权平均年龄为391±3 Ma, *MSWD* 值为 2.36.该年龄应代表了冰沟岩体的结晶 年龄,即该岩体为中泥盆世岩浆活动的产物.

3.2 地球化学

冰沟正长花岗岩典型样品的主量、稀土和微量 及全岩 Sr-Nd 同位素测定及相关参数的计算结果 列于表 2,其具体地球化学特征如下:

(1)岩石在主量元素组成上具有以下特征:①富 硅,SiO₂含量分布较为集中,为71.85%~72.77%, 略低于 Whalen et al.(1987)总结的世界典型 A 型 花岗岩 SiO₂ 含量的平均值(73.81%);②富铁贫镁, FeO_t含量为2.59%~3.34%, MgO含量为0.33%~ 0. 44%, FeO_t/MgO 值为 6. 24 ~ 7. 86, FeO_t/ (FeO_t+MgO)值为 0.86~0.89,在 FeO_t/(FeO_t+ MgO)-SiO2 图解(图 5a)中投影,均落在铁质(ferroan)区域内,同时其成分点完全分布在由 486 个世 界典型的 A 型花岗岩样品所勾勒的成分区内.另外 在 Dall'Agnol and de Oliveira(2007)提出的氧化型 A型(oxidized A-type)和还原型 A型(reduced A-type)花岗岩的判别图解(图 5c,5d)中投影,多数 落在氧化型 A 型的区域内,少量落在氧化型 A 型与 还原型 A 型或钙碱性的交界处,表明其形成环境较 复杂;③富碱,并且相对富钾,K₂O+Na₂O 值为 8.39~ 8.58, K₂O/Na₂O 值为 1.63~ 2.30, 在 (Na₂O+K₂O-CaO)-SiO₂ 图解(图 5b)中投影,除 1个点落在碱钙性和钙碱性的分界线上,其余多数

	中令半生	(~ 10-6)	元素比值			目代表	きい估					同位考定款	(Ma)		
- 中 中	儿孫百里					비꼬종	s tulia.					时卫系十败	(PIAT)		
	$^{232}\mathrm{Th}$	²³⁸ U	Th/U	$^{207}{ m Pb}/^{206}{ m Pb}$	$\pm 1_{\sigma}$	$^{207}{ m Pb}/^{235}{ m U}$	$\pm 1_{\sigma}$	$^{206}\mathrm{Pb}/^{238}\mathrm{U}$	$\pm 1_{\sigma}$	$^{207}\mathrm{Pb}/^{206}\mathrm{Pb}$	$\pm 1_{\sigma}$	$^{207}{ m Pb}/^{235}{ m U}$	$\pm 1_{\sigma}$	$^{206}{ m Pb}/^{238}{ m U}$	$\pm 1_{\sigma}$
1	379	507	0.75	0.073 15	0.001 44	0.597 29	0.013 18	0.059 22	0.000 99	1 018	41	476	~	371	9
2	68	102	0.66	0.056 75	0.002 47	0.480 53	0.020 57	0.061 42	0.001 14	482	66	398	14	384	7
ŝ	720	923	0.78	0.057 17	0.000 91	0.493 84	0.009 18	0.062 65	0.000 94	498	36	408	9	392	9
4	398	350	1.14	0.059 34	0.001 66	0.519 75	0.014 86	0.063 53	0.001 06	580	62	425	10	397	9
Ω	773	1 110	0.70	0.054 93	0.001 21	0.475 63	0.01145	0.062 80	0.001 05	409	50	395	∞	393	9
9	65	104	0.62	0.054 71	0.001 81	0.469 96	0.015 79	0.062 30	0.001 06	400	76	391	11	390	9
7	66	73	0.91	0.055 23	0.003 20	0.473 33	0.02679	0.062 16	0.001 32	422	133	393	18	389	8
∞	80	102	0.78	0.059 09	0.002 05	0.512 99	0.017 79	0.062 97	0.001 07	570	77	420	12	394	9
6	65	70	0.92	0.055 34	0.003 06	0.473 55	0.025 64	0.062 05	0.001 28	426	127	394	18	388	8
10	400	580	0.69	0.060 98	0.001 45	0.525 49	0.013 16	0.062 50	0.001 02	639	52	429	6	391	9
11	309	457	0.68	0.059 08	0.001 08	0.507 23	0.010 43	0.062 27	0.000 96	570	41	417	7	389	9
12	276	302	0.91	0.048 64	0.005 88	0.418 56	0.050 03	0.062 41	0.001 10	131	256	355	36	390	7
13	304	452	0.67	0.059 40	0.001 38	0.535 89	0.013 03	0.065 49	0.001 02	582	52	436	6	409	9
14	281	362	0.78	0.055 01	0.001 19	0.467 25	0.010 90	0.061 61	0.000 97	413	49	389	∞	385	9
15	74	143	0.52	0.054 04	0.001 66	0.462 11	0.014 44	0.062 06	0.001 04	373	71	386	10	388	9
16	430	707	0.61	0.061 84	0.001 35	0.553 05	0.012 83	0.064 90	0.001 01	669	48	447	×	405	9
17	127	140	0.91	0.054 82	0.002 49	0.474 46	0.021 38	0.062 78	0.001 27	405	104	394	15	393	∞
18	139	183	0.76	0.052 98	0.001 53	0.463 21	0.013 74	0.063 47	0.001 06	328	67	386	10	397	9



图 4 冰沟正长花岗岩样品(09NM14-1)典型锆石阴极发光图像(a)和 U-Pb 谐和图(b)

Fig.4 CL images of representative zircons from the Binggou syeno-granite (a) and the U-Pb zircon concordia diagram (b)



图 5 冰沟正长花岗岩 FeO_t/(FeO_t+MgO)-SiO₂(a),(Na₂O+K₂O-CaO)-SiO₂(b),FeO_t/(FeO_t+MgO)-Al₂O₃(c)和 FeO_t/(FeO_t+MgO)-Al₂O₃/(K₂O/Na₂O)(d)图解(其中图 a 和 b 底图据 Frost *et al.*,2001,图 c 和图 d 底图据 Dall'Agnol and de Oliveira,2007)

$$\label{eq:Fig.5} \begin{split} FeO_t/(FeO_t+MgO) \ vs.SiO_2(a), \ (Na_2O+K_2O-CaO) \ vs.SiO_2(b), \ FeO_t/(FeO_t+MgO) \ vs.Al_2O_3(c) \ and \ FeO_t/(FeO_t+MgO) \ and \ FeO_t/(F$$

落在碱钙性的范围内,并且其成分点同样完全分布 在由 486 个世界典型的 A 型花岗岩样品所勾勒的 成分区内;④ 富铝,Al₂O₃ 含量为 12.73% ~ 13.22%,铝饱和指数(A/CNK = Al₂O₃/(CaO + Na₂O+K₂O))为 0.93~1.03,在 A/NK-A/CNK 图 解中投影,均落在准铝质一弱过铝质的区域内.

(2)岩石稀土元素总量(ΣREE)较高,为
 282.24×10⁻⁶~415.09×10⁻⁶.稀土元素球粒陨石标



图 6 冰沟正长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式(a)(球粒陨石标准化值据 Talyor and Mclennan, 1985)和微量元素原始 地幔标准化蛛网图(b)(原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Chondrite normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b) of the Binggou syeno-granite

准化分布型式图(图 6a)显示,岩石轻重稀土分异明 显,轻稀土富集,重稀土相对亏损,并具有明显的 Eu 负异常.其中,La_N/Yb_N为 6.11~10.75,LREE/HREE 为 6.08~9.08, δEu 为 0.19~0.29. 岩石明显的 Eu 负 异常,可能与源区中斜长石的残留有关.在微量元素 组成上,岩石相对于原始地幔(图 6b)明显富集 Rb、 Th,La,Ce,Nd,Zr,Hf 和 Y 等元素,强烈亏损 Ba,Sr, P和 Ti 元素,相对亏损 Nb 和 Ta 元素.岩石 Zr 的含 量为 $353 \times 10^{-6} \sim 453 \times 10^{-6}$,低于 Whalen et al. (1987)总结的世界典型 A 型花岗岩 Zr 含量的平均值 (528×10⁻⁶),但明显高于 King et al.(1997)研究的澳 大利亚 Lachlen 褶皱带铝质 A 型花岗岩和分异的 I 型 花岗岩 Zr 含量的平均值(分别为 301×10⁻⁶和 116× 10⁻⁶).岩石富 Ga,10⁴ Ga/Al 值为 3.04~3.60,均高于 A 型花岗岩 10⁴ Ga/Al 的下限值(2.6),在 Whalen 提 出的以 104 Ga/Al 比值为基础的多种判别图中投影, 岩石成分点均落在 A 型花岗岩的区域内.

(3)岩石⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 初始比值(以 I_{sr} 表示)变化较 大(表 2),多变化在 0.712~0.724 之间,显示出地壳 物质的特征.岩石样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 变化相对稳定,变化 在-4.06~-4.87 之间, T_{2DM} 变化在 1.48~1.52 Ga 之间,与东昆仑东段早泥盆世过铝质花岗岩($\epsilon_{Nd}(t)$ 为-5.80~-3.71, T_{2DM} 为 1.43~1.62 Ga,据刘彬等 (2012))类似.

4 讨论

4.1 A型花岗岩的厘定

Loiselle and Wones(1979)最初将 A 型花岗岩 定义为碱性(alkaline)、贫水(anhydrous)和非造山 (anorogenic)的花岗岩,在化学成分上具有高 Fe/ (Fe+Mg)、高 K₂O 和 K₂O/Na₂O, 富含 REE、Zr、 Nb和Ta等不相容元素,并且在镁铁质硅酸盐和长 石中相容元素的含量低等特征.但经过国内外学者 30 多年来的研究与讨论, A 型花岗岩的定义已发生 了很大的变化(吴福元等,2007),如A型花岗岩有 时并不贫水,可以是过铝质,其形成环境不局限于板 内裂谷的非造山环境,可以形成于多种构造环境.因 此,不少学者建议取消 A 型花岗岩的概念,如 Creaser et al.(1991)建议将 A 型花岗岩作为 I 型花 岗岩的亚类,袁忠信(2001)建议用"碱性花岗岩类" 来代替传统的 A 型花岗岩, Frost and Frost(2011) 明确指出用铁质(ferroan)花岗岩来代替传统的 A 型花岗岩.考虑到 A 型花岗岩术语使用的广泛性和 其特殊的动力学意义,本文仍使用A型花岗岩这一 概念.目前定义的 A 型花岗岩的主要特征(吴锁平 等,2007;贾小辉等,2009)为:①在岩石类型上,不仅 包含了碱性岩类,还包括一些碱钙性、弱碱一准铝、 弱过铝甚至强过铝质岩石;②在矿物组合上以石英、 (富Fe)铁镁质暗色矿物和碱性长石为主,斜长石缺 失或无,碱性花岗岩中常见霓石、霓辉石、钠闪石等 特征矿物;③在化学成分上,具有富硅、碱,贫钙、镁、 铝,高 FeO_t/MgO 和 Ga/Al 比值,富集 HFSE 和 Y (Ce),强烈亏损 Ba、Sr、Eu、P、Ti,具有典型的右倾 "海鸥型"稀土元素配分模式,在常用的判别图解中 多数能落入 A 型区域内.本文研究的冰沟正长花岗 岩为碱钙性准铝质岩石,矿物组合上以石英、黑云母 和条纹长石为主,化学成分与上述特征基本一致,在 Whalen et al. (1987)提出的以 Ga/Al 比值为基础 的多种判别图解中均落入A型花岗岩的范围内,符

表 2 冰沟正长花岗岩主量(%)、微量(10⁻⁶)和 Sr-Nd 同位素测定结果

Table 2 Major and trace elements and Sr-Nd isotopic compositions of selected samples from the Binggou the Binggou syeno-granite

样品号	09NM14-1	10NM17-1	10NM18-1	10NM21-11	10NM24-4	10NM25-2
SiO ₂	71.85	72.37	71.77	72.12	72.77	72.20
${ m TiO_2}$	0.46	0.33	0.39	0.41	0.34	0.35
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	13.08	13.09	13.21	12.77	12.73	13.22
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	0.38	0.55	0.63	1.05	0.53	0.38
FeO	3.00	2.10	2.42	1.80	2.07	2.35
$\rm FeO_t$	3.34	2.59	2.99	2.74	2.55	2.69
MnO	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04
MgO	0.44	0.33	0.38	0.44	0.39	0.41
CaO	1.29	1.04	1.34	1.78	1.30	1.35
Na ₂ O	3.14	2.69	3.16	2.54	3.06	3.20
$ m K_2O$	5.32	5.87	5.26	5.85	5.45	5.22
P_2O_5	0.09	0.06	0.07	0.07	0.06	0.08
$\rm CO_2$	0.10	0.32	0.34	0.04	0.20	0.26
H_2O^+	0.59	1.05	0.83	0.91	0.89	0.78
LOi	0.39	1.11	0.83	0.66	0.77	0.77
Total	100.19	100.95	100.67	100.48	100.61	100.61
A/CNK	0.99	1.03	0.99	0.93	0.96	0.99
A/NK	1.20	1.21	1.21	1.21	1.16	1.21
$\rm FeO_t/MgO$	7.60	7.86	7.86	6.24	6.53	6.57
$FeO_t/(FeO_t+MgO)$	0.88	0.89	0.89	0.86	0.87	0.87
$T_{\rm zr}$ (°C)	874	862	865	862	851	851
Rb	365	329	335	342	240	376
Sr	80	53	69	134	78	73
Ba	572	506	483	437	492	468
U	4.56	4.26	5.08	5.72	4.63	5.13
Th	26.33	29.41	30.23	32.87	23.31	25.53
Nb	25.2	21.0	24.1	21.6	17.6	27.4
Ta	2.10	2.39	2.06	1.55	1.55	2.64
Zr	447	356	406	453	362	353
Hf	11.73	9.33	10.32	11.85	9.44	9.84
Ga	21.1	23.0	23.7	20.7	22.2	25.2
Υ	79.4	69.0	67.9	69.8	57.3	94.1
Zn	77.2	44.3	66.2	24.8	39.4	80.4
La	60.4	81.5	85.9	88.4	60.0	78.5
Ce	120.0	163.6	170.0	172.5	115.9	149.3
Pr	14.68	19.54	20.29	20.56	13.31	17.02
Nd	58.5	75.0	76.7	77.5	50.4	62.9
Sm	12.85	13.94	14.28	14.06	9.70	13.09
Eu	0.95	0.90	0.90	0.84	0.90	0.87
Gd	11.74	12.97	13.37	12.93	9.17	13.03
Tb	1.98	1.98	2.07	1.95	1.44	2.18
Dy	12.14	11.78	11.95	10.84	8.64	14.08
Ho	2.41	2.22	2.29	2.24	1.74	2.87
Er	7.03	6.20	6.02	6.00	4.89	8.03
Tm	1.03	0.91	0.91	0.87	0.71	1.25
Yb	6.69	5.91	5.41	5.55	4.65	8.19
Lu	0.99	0.87	0.77	0.81	0.74	1.26
SREE	311.42	397.32	410.87	415.09	282.24	372.53
LREE/HREE	6.08	8.28	8.60	9.08	7.83	6.32
La_N/Yb_N	6.11	9.32	10.72	10.75	8.73	6.48
δEu	0.23	0.20	0.20	0.19	0.29	0.20
10 ⁴ Ga/Al	3.04	3.32	3.39	3.06	3.30	3.60
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	13.308 7		14.181.6	7.442.6	8.9910	15.036 8
°' Sr/ ⁸⁰ Sr	0.787 700		0.729 221	0.766 885	0.772 067	0.798 207
$\pm 2\sigma$	7		6	30	11	32
$(^{\circ} Sr/^{\circ} Sr)_{i}$	0.712		0.648	0.724	0.721	0.713
147 Sm/ 144 Nd	0.1323		0.112.6	0.1097	0.116 3	0.125 8
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512 220		0.512 208	0.512 202	0.512 193	0.512 216
$\pm 2\sigma$	5		3	1	Z	Z 4. C1
$\varepsilon_{\rm Nd}(t)$	-4.87		-4.09	-4.06	-4.58	-4.61
I 2DM (Ga)	1.04		1.48	1.48	1.5Z	1.5Z

注:表中氧化物含量的单位为%;稀土和微量元素单位为×10⁻⁶;全铁 FeO_t=0.89981×Fe₂O₃+FeO;空白处表示未做测试.

合上述定义的 A 型花岗岩的特征.

高分异的 I 型、S 型花岗岩与 A 型花岗岩在地 球化学组成和矿物组成上有着相似的特点,因此常 常很难区分.对于 A 型花岗岩与高分异的 S 型花岗 岩的区分相对比较容易,S型花岗岩具有更高的 P_2O_5 含量(均值为 0.14%),低的 Na₂O 含量(均值 为 2.81%),并且 P_2O_5 的含量随着分异程度的增加 而增加(Chappell and White, 1992), 而 A 型花岗岩 相反.另外,长英质 S 型花岗岩通常是过铝质的,并 且随着分异程度的增加而更加强烈,因此仅根据特 征矿物组合就可以区分 S 型与 A 型(King et al., 1997).然而对于 A 型花岗岩与高分异的 I 型花岗岩 的区分至今仍是个难题,国内外学者围绕这一问题 开展了不少研究,例如 Whalen et al.(1987)提出以 Zr+Nb+Ce+Y 对主元素比值(如 FeO_t/MgO 和 (K₂O+Na₂O)/CaO)作图来区分未被分异的M-I-S 花岗岩、分异花岗岩和 A 型花岗岩; 王强等(2000) 对桐柏-大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的研究, 发现 A 型花岗岩的全铁(FeOt)含量高,一般大于 1.00%,而高分异的 I 型花岗岩一般小于1.00%; King et al.(1997)对澳大利亚 Lachlen 褶皱带的 A 型花岗岩研究发现 Zr 含量可以作为判别该带中准 铝质未分异 A 型花岗岩的有效标志,其中 A 型花 岗岩的 Zr 含量为 301×10⁻⁶,远高于该带内分异或 者未分异的 I 型花岗岩(分别为 151×10⁻⁶和 116× 10⁻⁶).本文研究的冰沟正长花岗岩样品具有相对低 P_2O_5 (0.06% ~ 0.09%), $\exists Na_2O(2.54\% ~$ 3.20%)、ACNK(为 0.93~1.03)小于1.1,不具备 S 型花岗岩的特征矿物组成,故其不可能为高分异的 S型花岗岩.同时该岩石样品在 Whalen et al.

(1987)提出的 FeO_t/MgO、(K₂O+Na₂O)/CaO 和 Zr+Nb+Ce+Y 图解中均投影在 A 型花岗岩的区 域内(图 7),全铁(FeO_t)含量(为 2.55%~3.34%) 较高,均大于 1.00%, Zr 含量为 353×10⁻⁶~453× 10⁻⁶,比 King *et al*.(1997)研究的 A 型花岗岩还要 高,这些特征均不同于高分异的 I 型花岗岩.综上所 述,可以确定冰沟正长花岗岩应归属于 A 型花岗岩 的范畴.

4.2 岩石成因

A型花岗岩的成因一直是个争论较多的问题, 至今仍未形成统一的认识,目前国内外学者提出的 成因模式至少有 9 种(贾小辉等,2009).最近,Frost and Frost(2011)通过对前人的研究成果(包括实验 岩石学资料)的系统总结,认为 A 型花岗岩应主要 存在 3 种不同的成因:①长英质地壳的部分熔融 (partial melting of quartzofeldspathic crust);②玄 武质岩浆分异(differentiatiation of basaltic magma);③玄武质岩浆同化地壳物质并发生分异(a combination of the first two models, in which differentiating basaltic magmas assimilate crusta rocks).

本文研究的冰沟正长花岗岩样品均明显富钾 (K₂O含量为 5.22%~5.87%),相对富集大离子亲 石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),而明显亏损 高场强元素(HFSE),与陆壳岩石的特征类似.岩石 的 Nb/Ta 值为 8.78~13.97,平均为 11.37,明显不 同于幔源岩石 Nb/Ta 值(约为 17.5,Hofmann, 1988;Green,1995),而与陆壳岩石 Nb/Ta 值(约为 11,Taylor *et al.*,1985;Green,1995)非常接近.Sr-Nd 同位素测试结果显示,岩石具有高的 I_{sr} 值



图 7 FeO_t/MgO_s(K₂O+Na₂O)/CaO 和 Zr+Nb+Ce+Y 图解(底图据 Whalen *et al.*,1987) Fig.7 FeO_t/MgO_s(K₂O+Na₂O)/CaO 和 Zr+Nb+Ce+Y diagrams for the Binggou syeno-granite A.A 型花岗岩;FG.分异长英质花岗岩;OGT.未分异的 M-I-S 型花岗岩

(0.712~0.724),低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-4.06~-4.87).以 上这些特征均表明冰沟正长花岗岩的源岩应为地壳 物质.岩石样品在 A/MF-C/MF 图解和 $nK_2O/nNa_2O-nCaO/(nMgO+nFeO_t)$ 图解中投影,均落 在变杂砂岩部分熔融的区域内(图 8),明显不同于 变玄岩部分熔融的产物.此外,样品在 La/Sm-La 协 变图解中投点结果基本符合部分熔融的趋势,因此, 基本可以排除玄武质岩浆分异的成因,从而判断该 套岩石应源自长英质地壳的部分熔融.

Patino Douce(1997)对长英质地壳物质(富镁的英云闪长岩和花岗闪长岩)进行的熔融实验结果表明,熔融过程中压力与源区物质同等重要,同一源岩组分更容易在相对低压的情况下产生A型花岗岩,并且在相对低压条件(如0.4 Gpa)下形成的熔体通常为准铝质一弱过铝质铁质组分,在相对高压的条件(如0.8 Gpa)下形成的熔体通常为更强的过铝质组分(Frost and Frost,2011).冰沟正长花岗岩样品具有准铝质一弱过铝质(ACNK为0.93~1.03,表2)和铁质(FeO_t/(FeO_t+MgO)值为0.86~0.89,图5a)特征,说明其形成环境的压力较低,可能形成于地壳的浅部,这与Dall'Agnol and de Oliveira (2007)提出判别图解中多数落入氧化型A型区域内(图5c,5d)的特点一致.

在 700~1 300 °C 的高温条件下的实验岩石学 研究结果表明(Waston, 1979; Watson and Harrison, 1983), Zr 的分配系数(D_{Zr} , 锆石/熔体)为全岩 成分参数 M=(Na+K+2Ca)/(Si×Al)和熔体温 度的函数,其公式为:

 $\ln D_{Zr}(锆石 / 熔体) = \{-3.80 - [0.85(M - 1)]\} + 12 900/T,$

式中:*T* 为绝对温度,将其转换成摄氏温度(℃),并 进行公式转换,可表示为:

 $T_{Zr}(C) = \{12 \ 900/[\ln D_{Zr}(\ddagger \Pi / \ \Bar{K} \ + 0.85M + 2.95]\} - 273.$

将锆石寄主岩石主量元素 Si、Al、Fe、Mg、Ca、 Na、K、P原子数归一化后计算成分参数 M,不做 Zr、Hf 校正时纯锆石中的 Zr 含量为 0.496,并假设 全岩中的 Zr 含量近似代表熔体中 Zr 含量,根据上 述公式可以计算锆石饱和温度.但该计算结果不适 用于过碱质岩石,因为在其形成过程中,不同过程控 制 Zr 的饱和(Waston, 1979).本文研究的正长花岗 岩样品均为准铝质一弱过铝质,因此采用上述方法 计算冰沟正长花岗岩锆石饱和温度为 851~874 ℃ (表 2), 高于 King et al. (1997) 计算 澳大利亚 Lachlen 褶皱带 A 型花岗岩锆石饱和的平均温度 (839℃).研究表明,利用全岩成分计算的锆石饱和 温度实际上明显低估了源区熔体形成时的初始温度 (Miller et al., 2003; Harrison et al., 2007).因此,本 文研究的冰沟正长花岗岩的形成温度应比计算值更 高.在这种情况下,浅部的长英质地壳发生高温熔 融,暗示其深部应存在高的热异常(吴福元等, 2007),应与幔源镁铁质岩浆的底侵有关(Whalen et al., 1987).

综上所述,可以判断冰沟正长花岗岩主要为低 压高温氧化条件下长英质地壳(变杂砂岩)部分熔融 的产物.

4.3 构造意义

A型花岗岩形成的构造环境最初被 Loiselle and Wones(1979)认为是板内裂谷的非造山环境, 然而随后大量的研究表明,其形成环境并不局限于



图 8 A/MF-C/MF 图解和 nK₂O/nNa₂O-nCaO/(nMgO+nFeO_t)图解(底图分别据 Altherr et al.,2000;Kaygusuz et al.,2008) Fig.8 A/MF vs.C/MF and nK₂O/nNa₂O vs.nCaO/(nMgO+nFeO_t) diagrams for the Binggou syeno-granite A.Al₂O₃;M.MgO;F.FeO_t;C.CaO

非造山环境,可以形成在多种构造环境中,例如, King et al.(1997)认为澳大利亚 Lachalen 褶皱带 A 型花岗岩可以形成于造山期的各个环境,而不局限 于非造山的环境;Bonin (2007)明确指出,A型花岗 岩与造山事件在空间上并无联系,仅在时间上关系 密切,同时指出 A型花岗岩并非形成于传统认为的 板内环境,可以是板块汇聚的活动边缘背景.因此, A型花岗岩可以产出于全球构造的不同位置,然而, 其形成无不与拉张构造背景有关(Whalen et al., 1987;吴锁平等,2007;贾小辉等,2009),因此,A型 花岗岩是判断伸展背景的重要岩石学标志(吴福元 等,2007).

不同的伸展背景、伸展规模和深度的差异往往 伴有不同特征的 A 型花岗岩的出现.因此,国内外 学者提出了多种与构造环境对应的 A 型花岗岩分 类方案(Eby, 1992;洪大卫等, 1995),其中以 Eby (1992)的分类方案最具影响力.Eby(1992)主要是根 据 A 型花岗岩产出的构造环境和化学成分,将 A 型 花岗岩划分为A1和A2两类,其中,A1样品选自裂 谷环境,与洋岛玄武岩(OIB)具有一定的相似性,代 表了大陆裂谷和板块内部环境下的岩浆作用;A2样 品选自后碰撞或后造山的环境,与地壳平均值和岛 弧玄武岩(IAB)有一定的相似性,代表了经历过 陆一陆碰撞或岛弧岩浆作用之后的地壳物质的部分 熔融(李小伟等,2010).本文研究的冰沟正长花岗岩 在 Eby(1992)提出的 A 型花岗岩亚类的判别图(图 9)中主要落入 A2 区,结合其岩石成因特点和区域 地质资料,可以综合判断其为造山后伸展阶段长英 质地壳物质部分熔融的产物.

已有的研究为限定东昆仑地区始特提斯洋盆的 打开、扩张和消减时限提供了重要限定资料.清水泉 蛇绿岩残片中辉长岩的锆石 TIMS U-Pb 年龄为 518~522 Ma(Yang et al., 1996;陆松年等, 2002), 表明早寒武世时期昆中洋盆的存在.早寒武世末期 开始,伴随着始特提斯洋的俯冲消减,东昆仑地区开 始出现一系列与俯冲作用有关的岩浆事件与变质事 件.例如,515 Ma 左右的具有俯冲性质的可可沙石 英闪长岩(张亚峰等,2010);507 Ma 左右的与洋壳 深俯冲有关的清水泉麻粒岩(李怀坤等,2006); 480 Ma左右的东昆仑祁漫塔格山鸭子泉岛弧闪长 岩(崔美慧等,2011);448 Ma 左右的位于昆中断裂 附近与岛弧有关的玄武质-英安质熔岩(陈能松等, 2002);447 Ma 左右的与岛弧构造有关的香日德南 部变质变形闪长岩(陈能松等,2000).位于昆中缝合 带内的具有岛弧玄武岩特征的早志留世清水泉 (436 Ma, 据任军虎等(2009))和胡晓钦镁铁质岩石 (438 Ma)的出现,可能代表了东昆仑始特体斯洋壳 俯冲最晚的岩浆记录(另文发表).430 Ma 左右的 A 型花岗岩(高晓峰等,2010;Li et al.,2013)与昆中高 压榴辉岩相变质年龄(428 Ma, 据 Meng et al. (2013)和中压(绿帘)角闪岩相变质峰期年龄 (427 Ma,据陈能松等(2002))基本一致,可能反映 了该时期强烈的陆陆碰撞已结束,开始进入后碰撞 的伸展阶段.早泥盆世时期,东昆仑西段和东段地区 均出现了大量与伸展作用有关的岩浆事件.这些岩 浆事件主要以出露大量的过铝质 I-S 花岗岩(花岗 闪长岩和二长花岗岩)、闪长岩(英云闪长岩和石英 闪长岩)和少量的辉长岩为特征(张建新等,2003;谌 宏伟等,2006;赵振明等,2008;刘彬等,2012),该组 合和 Bonin(2004)总结的后碰撞岩石组合(过铝质 酸性岩石与准铝质镁铁质-长英质岩石共生)类似, 表明早泥盆世时期东昆仑地区已由碰撞挤压环境转



图 9 冰沟正长花岗岩 Ce/Nb-Y/Nb 图解和 Nb-Y-3Ga 三角图解(底图据 Eby,1992) Fig.9 Ce/Nb vs.Y/Nb and Nb-Y-3Ga diagrams for the Binggou syeno-granite

向伸展环境.此外,该岩石组合中,过铝质花岗岩均 具有较高的锆石饱和温度(多数大于800℃),部分 花岗质岩石具有高的 ε_{Hf}(t)值(如东昆仑东段跃进 山花岗闪长岩的 ε_{HI}(t) 值为-2.19~1.05), 准铝质 的闪长岩具有高的 Mg[#]值(46.3~68.7)(刘彬等, 2012),这些暗示该时期幔源岩浆活动频繁,而幔源 岩浆的作用可能表现在2个方面:(1)提供热源引发 地壳物质发生部分熔融产生过铝质花岗岩;(2)提供 物源与壳源熔体发生混合.本文研究的冰沟正长花 岗岩为浅部长英质地壳物质在高温条件下(851~ 874℃)发生部分熔融的产物,其形成同样与幔源岩 浆作用关系密切.该花岗岩 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 为 391±3 Ma,是目前东昆仑地区报道的时代最晚 的古生代 A 型花岗岩,其年龄甚至比该区牦牛山组 伸展型磨拉石建造的形成时限((423±2)~(406± 3) Ma,据张耀玲等(2010)和陆露等(2010)还要晚, 表明中泥盆世时期,东昆仑的始特提斯构造演化已 宣告终结,下一轮的古特提斯构造演化已经开启.

5 结论

本文通过对冰沟正长花岗岩锆石 U-Pb 年代学 和地球化学研究,可以得出以下结论:

(1)冰沟正长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果为 391±3 Ma,代表岩体的结晶年龄;(2) 冰沟正长花岗岩具有高硅(71.85%~72.77%)和高 碱(K₂O+Na₂O 值为 8.39~8.58)、相对富铝(AC-NK 为 0.93~1.03)、高 FeO_t/MgO(6.24~7.86)和 Ga/Al 值(3.04~3.60)、富集轻稀土、具明显的 Eu 负异常、相对原始地幔明显富集 Zr、Ga、Y 和 Hf 等 高场强元素并强烈亏损 Ba、Sr、P 和 Ti 等特征,与A 型花岗岩类的地球化学特征一致;(3)冰沟 A 型花 岗岩为造山后伸展阶段长英质地壳物质在低压高温 氧化条件下发生部分熔融的产物;(4)冰沟 A 型花 岗岩是目前东昆仑地区报道的时代最晚的古生代 A 型花岗岩,它的出现标志着中泥盆世时期东昆仑始 特提斯构造演化的彻底终结和古特提斯构造演化的 崭新开始.

致谢:野外和室内工作得到了斯提瓦力地、刘园 园和李良林等的帮助,实验测试中得到了南京大学 徐夕生老师、中国地质大学(武汉)刘勇胜、胡兆初、 陈海红和周炼等老师的帮助与指导,在此一并表示 感谢.

References

- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., et al., 2000. High-Potassium, Calc-Alkaline I-Type Plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50 (1-3): 51-73. doi:10.1016/S0024-4937(99)00052-3
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report ²⁰⁴ Pb. *Chemical Geology*, 192(1-2):59-79.doi:10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Belousova, E.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy* and Petrology, 143 (5): 602-622. doi: 10.1007/s0041 0-002-0364-7
- Bonin, B., 2004. Do Coeval Mafic and Felsic Magmas in Post-Collisional to Within-Plate Regimes Necessarily Imply Two Contrasting, Mantle and Crustal, Source? A review. Lithos, 78 (1-2): 1-24. doi: 10.1016/j. lithos. 2004.04.042
- Bonin, B., 2007. A-type Granites and Related Rocks: Evolution of a Concept, Problems and Prospects. *Lithos*, 97 (1-2):1-29.doi:10.1016/j.lithos.2006.12.007
- Chapell, 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
- Chen, H. W., Luo, Z. H., Mo, X. X., et al., 2006. SHRIMP Ages of Kayakedengtage Complex in the East Kunlun Mountains and Their Geological Implications. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(1): 25 - 32 (in Chinese with English abstract).
- Chen, N. S., He, L., Sun, M., et al., 2002. Precise Timing of the Early Paleozoic Metamorphism and Thrust Deformation in the Eastern Kunlun Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 47(8):628-631(in Chinese).
- Chen, N.S., Sun, M., Zhang, K.X., et al., 2000.⁴⁰ Ar-³⁹ Ar and U-Pb Ages of Metadiorite from the East Kunlun Orogenic Belt: Evidence for Early Paleozoic Magmatic Zone and Excess Argon in Amphibole Minerals. *Chinese Science Bulletin*, 45(21):2337-2342(in Chinese).
- Creaser, R. A., Price, R. C., Wormald, R. J., 1991. A-Type Granites Revisited: Assessment of a Residual-Source Model.*Geology*, 19(2): 163-166. doi: 10.1130/0091-7613(1991)019<0163: ATGRAO>2.3.CO;2
- Cui, M. H., Meng, F. C., Wu, X. K., 2011. Early Ordovician Island Arc of Qimantag Mountain, Eastern Kunlun: Evidences from Geochemistry, Sm-Nd Isotope and Geochronology of Intermediate-Basic Igneous Rocks. Acta

Petrologica Sinica, 27 (11): 3365 - 3379 (in Chinese with English abstract).

- Dall'Agnol, R., de Oliveira, D.C., 2007. Oxidized, Magnetite-Series, Rapakivi-Type Granites of Carajás, Brazil: Implications for Classification and Petrogenesis of A-Type Granites. *Lithos*, 93 (3-4): 215-233. doi: 10.1016/j. lithos. 2006.03.065
- Eby, G.N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, 20(7):641-644. doi:10.1130/0091-7613(1992)020< 0641: CSOTAT>2.3.CO; 2
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., et al., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. Journal of Petrology, 42(11):2033-2048.doi:10.1093/petrology/ 42.11.2033
- Frost, C.D., Frost, B.R., 2011. On Ferroan (A-Type) Granitoids: Their Compositional Variability and Modes of Origin. Journal of Petrology, 52(1):39-53. doi:10.1093/ petrology/egq070
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432 (7019): 892 - 897. doi: 10. 1038/nature03162
- Gao, X.F., Xiao, 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, China. Geological Bulletin of China, 29(7):1001-1008(in Chinese with English abstract).
- Green, T. H., 1995. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System. *Chemical Geology*, 120(3-4):347-359.doi:10.1016/ 0009-2541(94)00145-X
- Harrison, T.M., Watson, E.B., Aikman, A.B., 2007. Temperature Spectra of Zircon Crystallization in Plutonic Rocks. *Geology*, 35 (7): 635 - 638. doi: 10. 1130/ G23505A.1
- Hofmann, A.W., 1988. Chemical Differentiation of the Earth: The Relationship between Mantle, Continental Crust, and Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297 – 314. doi: 10.1016/0012 – 821X(88) 90132 – X
- Hong, D.W., Wang, S.G., Han, B.F., et al., 1995. The Tectonic Classification and Identification Characteristics of Alkali Granites. *Science in China* (*Series B*), 25(4): 418– 426(in Chinese).
- Jia, X. H., Wang, Q., Tang, G. J., 2009. A-Type Granites: Research Progress and Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3):465-480(in Chinese).

- Kaygusuz, A., Siebel, W., Sen, C., et al., 2008. Petrochemistry and Petrology of I-Type Granitoids in an Arc Setting: The Composite Torul Pluton, Eastern Pontides, NE Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 97 (4):739-764.doi:10.1007/s00531-007-0188-9
- King, P.L., White, A., Chappell, B.W., et al., 1997. Characterization and Origin of Aluminous A-Type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal* of Petrology, 38(3): 371-391. doi:10.1093/petroj/38. 3,371
- Li, H.K., Lu, S. N., Xiang, Z. Q., et al., 2006. SHRIMP U-Pb Zircon Age of the Granulite from the Qingshuiquan Area, Central Eastern Kunlun Suture Zone. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 311-321 (in Chinese with English abstract).
- Li,J.L., 2009. Global Tectonic Facies: A Preclusive Opinion. Geological Bulletin of China, 28(10): 1375-1381(in Chinese with English abstract).
- Li, J. L., Sun, S., Hao, J., et al., 1999. Time Limit of Collision
 Event of Collision Orogens. Acta Petrologica Sinica, 15
 (2):315-320 (in Chinese with English abstract).
- Li, R. B., Pei, X. Z., Li, Z. C., et al., 2013. Regional Tectonic Transformation in East Kunlun Orogenic Belt in Early Paleozoic: Constraints from the Geochronology and Geochemistry of Helegangnaren Alkali-feldspar Granite. Acta Geologica Sinica (English Edition), 87 (2): 333-345.
- Li,S., Wang, T., Tong, Y., et al., 2011.Zircon U-Pb Age, Origin and Its Tectonic Significances of Huitongshan Devonian K-Feldspar Granites from Beishan Orogen, NW China. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 3055-3070(in Chinese with English abstract).
- Li, X.W., Mo, X.X., Zhao, Z.D., et al., 2010. A Discussion on How to Discriminate A-Type Granite, *Geological Bulle*tin of China, 29 (2-3): 278 - 285 (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., 2008. Granitoid Magma Mixing in Eastern Part of the East Kunlun Orogenic Belt. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, Y.S., Zong, K.Q., Kelemen, P.B., et al., 2008. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower

Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1-2): 133-153. doi:10.1016/j.chemgeo.2007.10.016

- Loiselle, M.C., Wones, D.R., 1979. Characteristics and Origin of Anorogenic Granites. *Geological of Society of America*, 11(7):468.
- Lu, L., Wu, Z. H., Hu, D.G., et al., 2010. Zircon U-Pb Ages for Rhyolite of the Maoniushan Formation and Its Tectonic Significance in the East Kunlun Mountains. Acta Petrologica Sinica, 26(4):1150-1158(in Chinese with English abstract).
- Lu, S. N., 2002. Precambrian Geology in Northern Tibetan Plateau.Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids.GSA Bulletin, 101(5):635-643.doi:10.1130/ 0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2
- Meng, F.C., Zhang, J.X., Cui, M.H., 2013. Discovery of Early Paleozoic Eclogite from the East Kunlun, Western China and Its Tectonic Significance. *Gondwana Research*, 23(2):825-836.
- 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 East-Kunlun Orogenic Belt. Geological Journal of China Universities, 13(3):403-414(in Chinese with English abstract).
- Pan, Y. S., Zhou, W. M., Xu, R. H., et al., 1996. Geological Characteristics and Evolution of the Kunlun Mountains Region during the Early Paleozoic. *Science in China* (*Series D*), 26(4):302-307(in Chinese).
- Patiño Douce, A. E., 1997. Generation of Metaluminous A-Type Granites by Low-Pressure Melting of Calc-Alkaline Granitoids. *Geology*, 25(8):743-746. doi:10. 1130/0091-7613(1997)025<0743: GOMATG>2.3. CO;2
- Ren, J. H., Liu, Y.Q., Feng, Q., et al., 2009.LA-ICP-MS U-Pb Zircon Dating and Geochemical Characteristics of Diabase-Dykes from the Qingshuiquan Area, Eastern Kunlun Orogenic Belt. Acta Petrologica Sinica, 25 (5): 1135-1145(in Chinese with English abstract).
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Li, H. M., et al., 2000. Emplacement Age of the Postorogenic A-Type Granites in Northwestern Lesser Xing'an Ranges, and Its Relationship to the Eastward Extension of Suolunshan-Hegenshan-Zhalaite Collisional Suture Zone. Chinese Science Bulle-

tin,45(20):2217-2222(in Chinese).

- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313 – 345. doi: 10.1144/GSL. SP.1989.042.01.19
- Taylor, S. R., Mclennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Wang, G.C., Wei, Q.R., Jia, C.X., et al., 2007. Some Ideas of Precambrian Geology in the East Kunlun, China. Geological Bulletin of China, 26(8):929-937 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Xiong, X. L., 2000. The Ascertainment of Late-Yanshanian A-Type Granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt. Acta Petrologica Sinica, 19 (4): 297 – 306 (in Chinese with English abstract).
- Watson, E. B., 1979. Zircon Saturation in Felsic Liquids: Experimental Results and Applications to Trace Element Geochemistry. Contributions to Mineralogy and Petrology, 70(4):407-419.doi:10.1007/BF00371047
- 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
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Pe*trology, 95(4):407-419.doi:10.1007/BF00402202
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussions on the Petrogenesis of Granites. Acta Petrologica Sinica, 23(6):1217-1238(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).
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Li, H.B., et al., 2006. The Early Palaeozoic Terrence Framework and the Formation of the High Pressure(HP) and Ultra-High Pressure(UHP) Metamorphic Belts at the Central Orogenic Belt(COB). *Acta Geologica Sinica*, 80(12):1793-1806(in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, H. B., et al., 2007. Orogenic Palteaux: Terrane Aamalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Robinson, P. T., Jiang, C. F., et al., 1996. Ophio-

lites of the Kunlun Mountains, China and Their Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 258(1-4): 215-231. doi:10.1016/0040-1951(95)00199-9

- 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).
- Yuan, Z. X., 2001. A Discussion on the Naming of A-Type Granite. Acta Petrologica et Mineralogica, 20 (3): 293-296(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.X., Meng, F.C., Wan, Y.S., et al., 2003. Early Paleozoic Tectono-Thermal Event of the Jinshuikou Group on the Southern Margin of Qaidam: Zircon U-Pb SHRIMP Age Evidence. *Geological Bulletin of China*, 22(6):397-404 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Pei, X. Z., Ding, S. P., et al., 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Quartz Diorite at the Kekesha Area of Dulan County, Eastern Section of the East Kunlun Orogenic Belt, China and Its Significance. *Geological Bulletin of China*, 29(1):79-85(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.L., Hu, D.G., Shi, Y.R., et al., 2010. SHRIMP Zircon U-Pb Ages and Tectonic Significance of Maoniushan Formation Volcanic Rocks in East Kunlun Orogenic Belt, China. *Geological Bulletin of China*, 29 (11): 1614–1618(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 Re*view, 54(1):47-56(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.H., Lv, L.S., Yang, Y.J., et al., 2010. Petrogenesis of the Early Cretaceous A-Type Granite in the Huanggang Sn-Fe Deposit, Inner Mongolia: Constraints from Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. Acta Petrologica Sinica, 26(12): 3521 – 3537 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 谌宏伟,罗照华,莫宣学,等,2006.东昆仑喀雅克登塔格杂岩体的 SHRIMP 年龄及其地质意义.岩石矿物学杂志,25 (1):25-32.
- 陈能松,何蕾,孙敏,等,2002.东昆仑造山带早古生代变质峰 期和逆冲构造变形年代的精确限定.科学通报,47(8): 628-631.
- 陈能松,孙敏,张克信,等,2000.东昆仑变闪长岩体的 ⁴⁰ Ar-³⁹ Ar和 U-Pb 年龄:角闪石过剩 Ar 和东昆仑早古
- 生代岩浆岩带证据.科学通报,45(21):2337-2342. 崔美慧,孟繁聪,吴祥珂,2011.东昆仑祁漫塔格早奥陶世岛

弧:中基性火成岩地球化学、Sm-Nd 同位素及年代学证 据.岩石学报,27(11):3365-3379.

- 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.
- 洪大卫,王式洸,韩宝福,等,1995.碱性花岗岩的构造环境分 类及其鉴别标志.中国科学(B辑),25(4):418-426.
- 贾小辉,王强,唐功建,2009.A型花岗岩的研究进展及意义. 大地构造与成矿学,33(3):465-480.
- 李怀坤,陆松年,相振群,等,2006.东昆仑中部缝合带清水泉 麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究.地学前缘,13 (6):311-321.
- 李继亮,孙枢,郝杰,等,1999.碰撞造山带的碰撞事件时限的 确定.岩石学报,15(2):315-320.
- 李继亮,2009.全球大地构造相刍议.地质通报,28(10): 1375-1381.
- 李舢,王涛,童英,等,2011.北山辉铜山泥盆纪钾长花岗岩锆 石 U-Pb 年龄、成因及构造意义.岩石学报,27(10): 3055-3070.
- 李小伟,莫宣学,赵志丹,等,2010.关于 A 型花岗岩判别过程 中若干问题的讨论.地质通报,29(2-3):278-285.
- 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,2008.东昆仑造山带东段花岗岩浆混合作用.北京:地 质出版社.
- 陆露,吴珍汉,胡道功,等,2010.东昆仑牦牛山组流纹岩锆石 U-Pb年龄及构造意义.岩石学报,26(4):1150-1158.
- 陆松年,2002.青藏高原北部前寒武纪地质初探.北京:地质出版社.
- 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.
- 任军虎,柳益群,冯乔,等,2009.东昆仑清水泉辉绿岩脉地球 化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年.岩石学报,25(5): 1135-1145.
- 孙德有,吴福元,李惠民,等,2000.小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山一贺根山一扎赉特碰撞拼 合带东延的关系.科学通报,45(20):2217-2222.
- 王国灿,魏启荣,贾春兴,等,2007.关于东昆仑地区前寒武纪 地质的几点认识.地质通报,26(8):929-937.
- 王强,赵振华,熊小林,2000.桐柏一大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定.岩石矿物学杂志,19(4):297-306.
- 吴福元,李献华,杨进辉,等,2007.花岗岩成因研究的若干问 题.岩石学报.23(6):1217-1238.
- 吴锁平,王梅英,戚开静,2007.A型花岗岩研究现状及其述 评.岩石矿物学杂志,26(1):57-66.

- 许志琴,杨经绥,李海兵,等,2006.中央造山带早古生代地体 构架与高压/超高压变质带的形成.地质学报,80(12): 1793-1806.
- 许志琴,杨经绥,李海兵,等,2007.造山的高原──青藏高原 地体拼合、碰撞造山及隆升机制.北京:地质出版社.
- 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.
- 袁忠信,2001.关于 A 型花岗岩命名问题的讨论.岩石矿物学 杂志,20(3):293-296.
- 张建新,孟繁聪,万渝生,等,2003.柴达木盆地南缘金水口群 的早古生代构造热事件:锆石 U-Pb SHRIMP 年龄证 据.地质通报,22(6):397-404.

- 张亚峰,裴先治,丁仨平,等,2010.东昆仑都兰县可可沙地区 加里东期石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其 意义.地质通报,29(1):79-85.
- 张耀玲,胡道功,石玉若,等,2010.东昆仑造山带牦牛山组火 山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义.地质通 报,29(11):1614-1618.
- 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.
- 周振华, 吕林素, 杨永军, 等, 2010. 内蒙古黄岗锡铁矿区早白 垩世A型花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球 化学制约. 岩石学报, 26(12): 3521-3537.

《地球科学——中国地质大学学报》入选"全国百强科技期刊"

国家新闻出版广电总局"百强报刊"推荐名单于 2013 年 8 月 27 日正式分布,《地球科学——中国地质大学学报》(以下简称《地球科学》)人选首届"全国百强科技期刊".

这次全国"百强报刊"推荐评选活动是国家新闻出版广电总局从 2013 年初开展的,目的是为深入贯彻落 实党的十八大精神,建立完善报刊评价体系和引导激励机制,重点培育和推出一批具有较强舆论引导能力、 市场竞争力和传播能力的优秀品牌报刊,促进报刊业繁荣发展.此次活动经过各省(区、市)新闻出版局、中央 报刊主管单位认真推荐,国家新闻出版广电总局组织有关专家严格评审,确定了百强报纸、百强社科期刊及 百强科技期刊推荐名单.

《地球科学》学报多年来围绕"创精品期刊"的目标,按照"瞻前顾后抓选题,通天彻地抓队伍"的办刊方略,不断提升期刊的核心竞争力,荣获国家省部级奖励20余项,连续三届荣获"国家期刊奖";2009年获得首届"湖北出版政府奖"、"新中国60年有影响力的期刊";2012年获得"湖北十大名刊成就奖";连续获得四届"中国高校精品科技期刊奖";并被国际权威检索系统《Ei Compendex》数据库收录.

站在高起点,树立新目标,《地球科学》学报编辑部将继往开来,深化改革,为将《地球科学》办成具有国际 影响的地学学术期刊而奋斗.