第 91 卷 第 6 期
2017年6月 1192～1207

地 质 学 报 ACTA GEOLOGICA SINICA

Vol. 91 No. 6 2017
Jun. 1192～1207

西昆仑甜水海地块南屏雪山早古生代花岗岩地球化学、Hf 同位素特征及其壳幔岩浆作用

胡军[1)]，王核[2)]，慕生禄[2)]，王敏[2)]，侯学文[3)]

1) 中国地质调查局武汉地质调查中心，武汉，430205；2) 中国科学院广州地球化学研究所，广州，510640；3) 核工业二八〇研究所，四川广汉，618300

内容提要：南屏雪山早古生代花岗岩体位于西昆仑甜水海地块东段，主要岩性为中粒含斑黑云母二长花岗岩(485Ma)和中细粒黑云母二长花岗岩(528Ma)。化学组成上，两者均具有高硅、富碱，贫 TFe_2O_3、MgO 和 CaO 的特征，属高钾钙碱性弱过铝质系列；微量和稀土元素组成上，两者均富 Rb、Th、U、K、Pb 和轻稀土，贫 Ba、Sr、Nb、Ta、Ti 和 P，Rb/Sr、Rb/Ba、Nb/Ta 和 Y/Yb 比值高，具有明显的 Eu 负异常，其 Zr、Nb、Ce、Y 等高场强元素均较之典型 A 型花岗岩偏低，综合地质地球化学特征的判别表明南屏雪山花岗岩应属高分异的 I 型花岗岩。中粒含斑黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩均具有较均一的正 $\varepsilon_{Hf}(t)$值(0.9 ～ 5.3 和 1.4 ～ 5.6)和中元古代的二阶段模式年龄 T_{DM2}(1118 ～ 1398Ma 和 1136 ～ 1396Ma)，相似的地球化学特征和锆石 Hf 同位素组分暗示两者可能是同源岩浆演化的产物。结合区域构造演化历史，推测在早古生代原特提斯洋存在双向俯冲，南屏雪山早古生代花岗岩则是在早寒武世－早奥陶世(528 ～ 485 Ma)原特提斯洋持续向南的俯冲消减－碰撞造山过程中，诱导幔源岩浆上涌底侵下地壳，诱发区内中元古代新生地壳物质至少两次部分熔融(早寒武世和早奥陶世)，并经历一定程度的分离结晶作用而形成的。

关键词：早古生代花岗岩；地球化学；Hf 同位素；原特提斯洋；南屏雪山；甜水海地块

西昆仑－喀喇昆仑造山带早古生代构造格局与原特提斯洋演化过程密切相关(Mattern et al.，2000；Pan Yusheng et al.，2000；Xiao W J et al.，2002，2003；Pan Guitang et al.，2004；Zhang Chuanlin et al.，2007)，在原特提斯洋开合过程中伴随着强烈的岩浆活动，其中以南昆仑地块库地蛇绿岩及两侧的早古生代花岗岩最为著名，也是诸多学者研究的热点，但由于对其形成时代和形成环境的认识差异，存在原特提斯洋向北或向南发生俯冲作用(Mattern et al.，2000；Pan Yusheng et al.，2000；Xiao W J et al.，2002，2005；Yuan Chao et al.，2003)和该地区不存在“原特提斯洋盆”(Xiao Xuchang et al.，2003，2004)的不同观点。

近年来在甜水海地块塔什库尔干和麻扎一带部分学者陆续报道了早古生代岩浆及变质事件，提出甜水海地块北缘存在一条早古生代岩浆弧带，与原特提斯洋的俯冲消减－碰撞造山过程密切相关，并推测原特提斯洋存在双向俯冲(Xu Zhiqin et al.，2004；Cui Jiangtang et al.，2006；Qu Junfeng et al.，2007；Zhang Chuanlin et al.，2007；Huang Chaoyang，2014；Lin Shangkang et al.，2015；Zhang Huishan et al.，2016)。

目前而言，对于早古生代原特提斯演化过程还缺乏统一的认识，俯冲消减－碰撞造山的时限也不明确，制约了我们区域构造格架和地质事实的认识，因此需要更多的证据来推断原特提斯洋的构造演化过程。

笔者在甜水海地块东段考察大红柳滩铁矿时，对 1∶25 万岔路口幅地质调查工作中原归属侏罗纪的南屏雪山花岗岩体开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究，识别出形成时代为 485Ma 的中粒含斑黑云母二长花岗岩和 528Ma 的中细粒黑云母二长花岗岩(Hu Jun et al.，2016)，但由于自然环境恶劣，交通条件差，前人开展的研究工作较为薄

注：本文为“十二五”国家科技支撑计划项目(编号：2011BAB06B05-01、2015BAB05B03)和国家自然科学基金青年基金项目(批准号：41602063)联合资助的成果。

收稿日期：2016-10-08；改回日期：2016-12-10；责任编辑：黄敏。

作者简介：胡军，男，1988 年生。博士，助理研究员。矿物、岩石、矿床学专业。Email：aa226039@126.com。通讯作者：王核，男，1966 年生。研究员。矿床学专业。Email：wagh@gig.ac.cn。

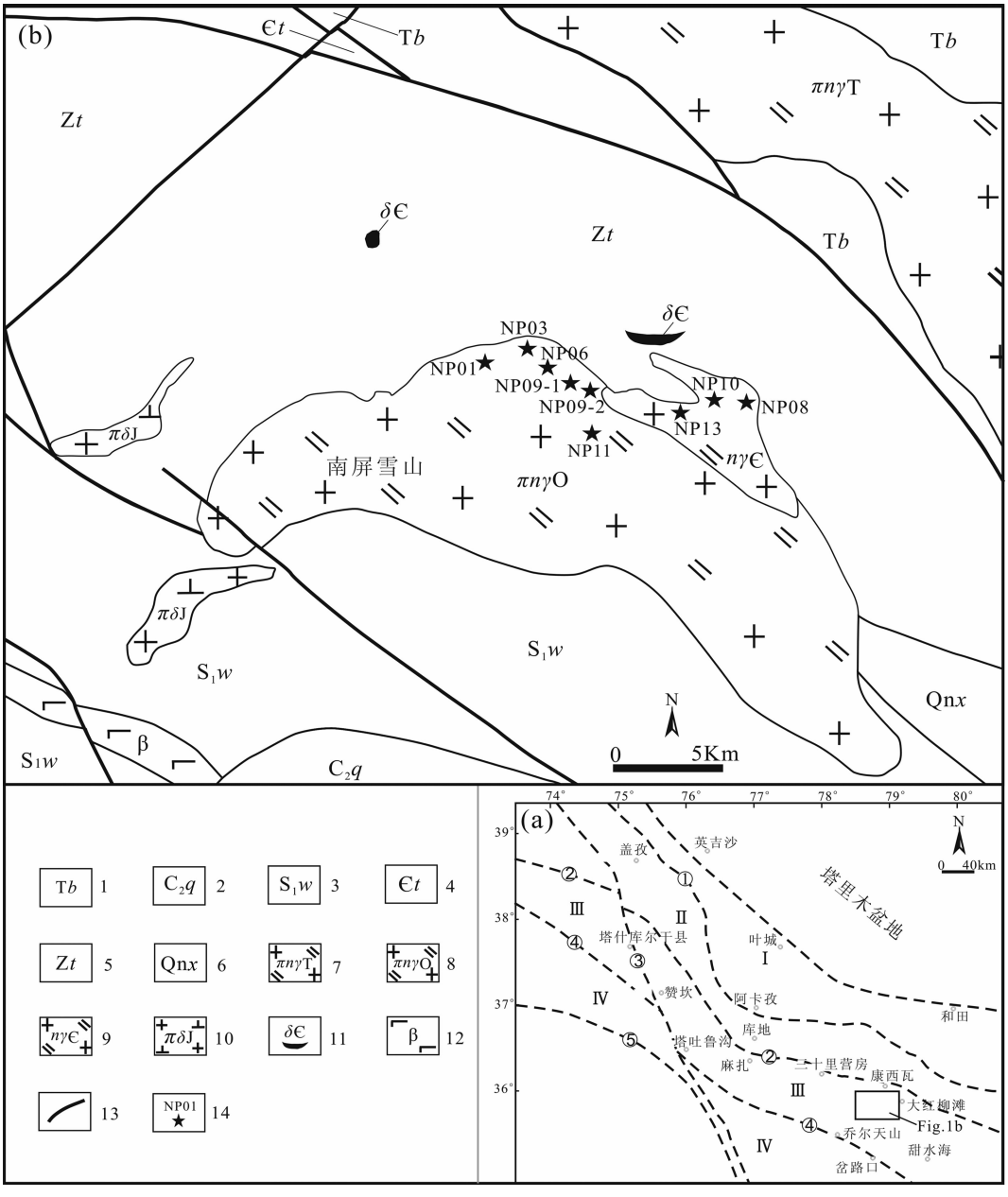


图 1　西昆仑地区大地构造位置(a)(据 Hu Jun et al., 2016)和甜水海地块南屏雪山早古生代花岗岩分布图(b)(据陕西省地质调查院修改,2006❶)

Fig. 1　Simplified geological map of the West Kunlun (a) (revised from Hu Jun et al., 2016) and distribution of Early Palaeozoic granite in Nanpingxueshan from the Tianshuihai terrene in West Kunlun (b) (modified after Shaanxi Geological Survey, 2006❶)

Ⅰ—北昆仑地块; Ⅱ—南昆仑地块; Ⅲ—甜水海地块; Ⅳ—喀喇昆仑地块; ①—奥依塔格-库地缝合带; ②—麻扎-康西瓦缝合带; ③—喀喇昆仑断裂; ④—乔尔天山-红山湖缝合带; ⑤—班公湖-怒江缝合带;1—三叠纪巴颜喀拉山群;2—石炭纪恰提尔群;3—志留纪温泉沟组;4—寒武纪甜水湖组;5—震旦纪甜水海群; 6—青白口肖尔谷地岩组;7—三叠纪中粒含斑黑云母二长花岗岩;8—奥陶纪中粒含斑黑云母二长花岗岩;9—寒武纪中细粒黑云母二长花岗岩;10—侏罗纪花岗闪长岩;11—寒武纪变辉长岩;12—玄武岩;13—断裂;14—样品位置及编号

Ⅰ—North Kunlun terrane; Ⅱ—South Kunlun terrane; Ⅲ—Tianshuihai terrane; Ⅳ—Karakorum terrane; ①—Oytage-Kudi suture; ②—Mazha-Kangxiwa suture; ③—Karakorum fault; ④—Qiaoertianshan-Hongshanhu suture; ⑤—Bangonghu-Nujiang suture;1—Triassic Bayan Har Mountain group; 2—Carboniferous Qiatier group; 3—Silurian Wenquangou group; 4—Cambrian Tianshuihu group; 5—Sinian Tianshuihai group; 6—Qingbaikou Xiaoer-gudi rock group; 7—Triassic medium-grained porphyritic biotite-quartz monzonite; 8—Ordivician medium-grained porphyritic biotite-quartz monzonite; 9—Cambrian medium to fine-grained biotite-quartz monzonite; 10—Jurassic granodiorite; 11—Cambrian metagabbro; 12—basalt; 13—fault; 14—sample locations

弱，本文在前期年代学研究基础上，进一步开展岩石学、地球化学和锆石 Hf 同位素特征研究，探讨其岩石成因和构造环境，试图为原特提斯洋构造演化提供新的线索。

1 地质背景和样品特征

西昆仑—喀喇昆仑造山带总体呈现 NW-SE 走向的巨型反“S”状展布，自北向南由奥依塔格-库地缝合带、麻扎-康西瓦缝合带和乔尔天山-红山湖缝合带将其分为北昆仑地块、南昆仑地块、甜水海地块和喀喇昆仑地块(图 1a)。

南屏雪山早古生代花岗岩体位于甜水海地块东段，麻扎-康西瓦缝合带以南，乔尔天山-红山湖缝合带以北(图 1a)。岩体呈近椭圆状，长轴方向为 NW-SE 向，与区域构造线一致。其中灰白色中粒含斑黑云母二长花岗岩体规模较大，呈岩基状展布，浅肉红色中细粒黑云母二长花岗岩体规模较小，呈岩株状，两者之间为脉动侵入关系(图 1b 和图 2a)。

岩体北部和东部侵入到震旦纪甜水海岩群(Zt)，围岩有较为明显的接触变质作用，发育 3 ～ 10m 的角岩带，南部主要与志留纪温泉沟组(S_1w)接触，接触关系不明确(图 1b)。

本次研究对象为中粒含斑黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩，岩性特征如下：

中粒含斑黑云母二长花岗岩，岩石呈灰白色，似斑状结构(图 2b)、基质中粗粒半自形粒状结构，块状构造。斑晶为半自形钾长石(图 2b)，大小为 5mm×7mm ～ 1cm×2cm，含量小于 10%；基质矿物粒径 2～5mm，主要矿物组分有石英(25%～30%)、斜长石(25%～30%)、钾长石(30%～35%)、黑云母(3%左右)及副矿物(锆石、磷灰石和磁铁矿等)。岩石蚀变极微弱，仅见少量斜长石有绢云母化。

中细粒黑云母二长花岗岩，岩石呈灰白色、浅肉红色，中细粒半自形粒状结构(图 2c)，块状构造。矿物粒径介于 0.2～2mm 之间。主要矿物成分有石英(32%～38%)、斜长石(28%～33%)、钾长石(32% ～ 38%)、黑云母(3%左右)及副矿物(锆石、磷灰石和磁铁矿等)。岩石基本未见蚀变现象。

2 分析方法

元素地球化学分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成，样品经破碎后，岩屑用去离子水清洗后烘干，磨至 200 目，在 Rigaku RIX2000 型荧光光谱仪(XRF)上测定主量元素，分析精度优于 2% ～ 5%。在 Per-Ekmer Sciex Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上完成微量元素测定，稀土元素的分析精度可达 3%，其余微量元素的分析精度可达 5%。

锆石 Hf 同位素分析与 U-Pb 年龄分析点号和位置一致(Hu Jun et al.，2016)，在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。采用 Neptune Plus 多接受质谱与 RESOlution M-50 激光器连机。激光束斑直径为

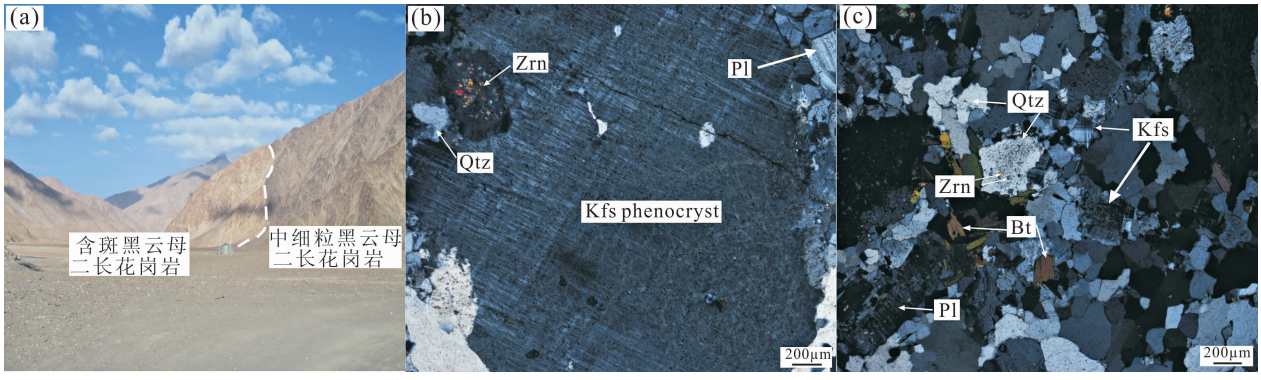


图 2 西昆仑甜水海地块南屏雪山花岗岩的野外露头和显微镜下照片

Fig. 2 Field photographs and microphotographs of Nanpingxueshan granite pluton from the Tianshuihai terrane in West Kunlun

(a)—中粒含斑黑云母二长花岗岩与中细粒黑云母二长花岗岩接触关系；(b)—中粒含斑黑云母二长花岗岩半自形钾长石斑晶；(c)—中细粒黑云母二长花岗岩半自形粒状结构；Qtz—石英；Zrn—锆石；Kfs—钾长石；Pl—斜长石；Bt—黑云母

(a)—the contact relationship of the medium-grained porphyritic biotite-quartz monzonite and medium to fine grained biotite-quartz monzonite; (b)—hypautomorphic K-feldspar for medium-grained porphyritic biotite-quartz monzonite; (c)—hypautomorphic granular texture for medium to fine grained biotite-quartz monzonite; Qtz—quartz; Zrn—zircon; Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Bt—biotite

45μm,剥蚀频率为 8Hz,具体分析过程参见(Wu F Y et al., 2006)。$\varepsilon_{Hf}(t)$ 的计算采用的^{176}Lu 衰变常数为 1.867×10^{-11} a^{-1},球粒陨石现今的$^{176}Hf/^{177}Hf=0.282772$ 和$^{176}Lu/^{177}Hf=0.0332$(Blichert-Toft et al., 1997),Hf 亏损地幔模式年龄 T_{DM1} 的计算采用现今亏损地幔的$^{176}Hf/^{177}Hf=0.28325$ 和$^{176}Lu/^{177}Hf=0.0384$(Griffin et al., 2002),Hf 同位素两阶段地壳模式年龄 T_{DM2} 计算时假设大陆平均的$^{176}Lu/^{177}Hf=0.015$(Griffin et al., 2004)。

3　结果

6 件中粒含斑黑云母二长花岗岩和 3 件中细粒黑云母二长花岗岩样品的主量元素、微量元素和稀土元素组成列于表 1。

3.1　主量元素特征

中粒含斑黑云母二长花岗岩具较高的 SiO_2 含量(75.77% ~ 76.97%),中等的 Al_2O_3 含量(12.28% ~ 13.05%),低的 TiO_2(0.06% ~ 0.14%)、TFe_2O_3(0.88% ~ 1.69%)、MgO(0.07% ~ 0.17%)、CaO(0.36% ~ 0.52%)和 P_2O_5(0.01% ~ 0.02%),全碱含量较高(Na_2O+K_2O = 8.17% ~ 8.65%),相对富钾(K_2O/Na_2O = 1.15 ~ 1.33),里特曼指数 δ 分布在 1.97 ~ 2.28,平均值为 2.13(<3.3)。

中细粒黑云母二长花岗岩在主量元素组成上同样具有高硅、富碱,低 TiO_2、TFe_2O_3、MgO、CaO 和 P_2O_5 的特征,SiO_2 含量变化为 75.05% ~ 76.30%,Al_2O_3 含量变化为 12.33% ~ 13.11%,TiO_2 含量变化为 0.11% ~ 0.18%,TFe_2O_3 含量变化为 1.00% ~ 1.85%,MgO 含量变化为 0.10% ~ 0.24 %,CaO 含量变化为 0.30% ~ 0.60%,P_2O_5 含量变化为 0.01% ~ 0.02%,Na_2O+K_2O 含量变化为 8.31% ~ 8.65%,K_2O/Na_2O 比值变化为 1.04 ~ 1.46,里特曼指数 δ 分布在 2.08 ~ 2.33,平均值为 2.19(<3.3)。

在 TAS 图解上(图略)两类花岗岩样品全部落入亚碱性花岗岩区域;在 SiO_2-K_2O 图解(图 3a)中,样品投影点全部位于高钾钙碱性系列区域;中粒含斑黑云母二长花岗岩的铝饱和指数 A/CNK 比值为 1.02 ~ 1.10,CIPW 标准矿物中刚玉(C)含量主要集中在 0.28 ~1.12,除 1 个样品外,其余均小于 1,中细粒黑云母二长花岗岩的 A/CNK 比值为 1.02 ~1.07,CIPW 标准矿物中刚玉(C)含量分布在 0.28 ~ 0.77,均小于 1,在 A/CNK-A/NK 图解(图 3b)两类花岗岩落在过铝质和弱过铝质分界线附近;中粒含斑黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩分异指数 DI 分别为 93.26 ~ 94.96 和 92.88 ~ 93.83;在 SiO_2 一氧化物的哈克图解中(图 4a ~ 4e),两类花岗岩显示出较为一致的演化趋势,主量元素 Al_2O_3、TiO_2、MgO、CaO 和 P_2O_5 随 SiO_2 含量的增加有降低的趋势。

3.2　稀土元素和微量元素特征

中粒含斑黑云母二长花岗岩稀土元素总量中等,$\sum REE=141.06\times10^{-6}\sim177.13\times10^{-6}$;LREE/HREE = 4.30 ~ 6.25,$(La/Yb)_N$ = 3.82 ~ 6.68,Eu 负异常明显,δEu = 0.02~ 0.08,总体呈现出轻稀土(LREE)富集,重稀土(HREE)相对亏损的右倾 V 字形(图 5a);$(La/Sm)_N$ = 2.90 ~ 4.25,$(Gd/Yb)_N$ = 0.98 ~ 1.18,表明轻稀土元素之间的分异程度略大于重稀土元素。中细粒黑云母二长花岗岩与中粒含斑黑云母二长花岗岩的稀土配分曲线具有相同的趋势(图 5a),其中 $\sum REE=128.45\times10^{-6}\sim163.72\times10^{-6}$;LREE/HREE = 4.84 ~ 7.82,$(La/Yb)_N$ = 4.62 ~ 8.77,Eu 负异常明显,δEu = 0.05 ~ 0.18,$(La/Sm)_N$ = 3.16 ~ 5.46,$(Gd/Yb)_N$ = 1.04 ~ 1.16。

中粒含斑黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩微量元素总体变化特征基本一致,表现为选择性的富集和亏损,在微量元素原始地幔标准化图解上(图 5b),均表现为富集 Rb、Th、Zr、Hf、Pb,明显亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、Ti;Sr、Ba 含量随着 SiO_2 含量的增加有降低的趋势(图 4f,g);中粒含斑黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩 Rb/Sr 比值分别为 4.21 ~ 11.36 和 2.60 ~ 7.90,Rb/Ba 比值分别为 1.13 ~ 11.21 和 0.46 ~ 1.66,Nb/Ta 比值分别为 6.11 ~ 8.00 和 7.43 ~ 8.99。

3.3　锆石 Hf 同位素

Hf 同位素分析结果(表 2)显示两类花岗岩大部分锆石的$^{176}Lu/^{177}Hf$ 值小于 0.002,表明锆石形成后具有较低的放射性成因 Hf 积累,因而可以用初始$^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值代表锆石形成时的$^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值(Wu Fuyuan et al., 2007a)。考虑到中粒含斑黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩的 $f_{Lu/Hf}$ 值介于−0.9 ~ −1.0 和−0.8 ~ −1.0,明显小于镁铁质地壳的 $f_{Lu/Hf}$ 值(−0.34,Amelin et al., 2000)和硅铝质地壳的 $f_{Lu/Hf}$ 值(−0.72,Vervoort et al., 1996),故二阶段模式年龄更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间(或其源区物质在地壳

表 1 西昆仑甜水海地块南屏雪山花岗岩主量元素(%)和微量元素($\times10^{-6}$)分析结果

Table 1 Analytical results of major (%) and trace elements ($\times10^{-6}$) of the Napingxueshan granite from the Tianshuihai terrane in West Kunlun

岩性	中粒含斑黑云母二长花岗岩						中细粒黑云母二长花岗岩		
样品编号	DHLT NP-01	DHLT NP-03	DHLT NP-06	DHLT NP-09-1	DHLT NP-09-2	DHLT NP-11	DHLT NP-08	DHLT NP-10	DHLT NP-13
SiO_2	75.84	76.02	76.58	76.97	76.06	75.77	75.96	75.05	76.30
TiO_2	0.14	0.12	0.10	0.06	0.08	0.14	0.11	0.18	0.13
Al_2O_3	13.05	12.28	12.76	12.39	12.40	12.88	12.33	13.11	12.35
TFe_2O_3	0.88	1.69	0.91	1.18	1.47	0.91	1.70	1.00	1.85
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06
MgO	0.16	0.13	0.13	0.07	0.10	0.17	0.10	0.24	0.19
CaO	0.36	0.45	0.41	0.37	0.49	0.52	0.30	0.60	0.38
Na_2O	3.89	3.63	3.54	3.80	3.72	3.84	3.42	4.24	3.70
K_2O	4.76	4.71	4.70	4.37	4.73	4.75	4.99	4.41	4.61
P_2O_5	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
L.O.I	0.40	0.47	0.39	0.31	0.44	0.51	0.58	0.66	0.24
Total	99.51	99.51	99.52	99.52	99.51	99.51	99.51	99.52	99.83
K_2O+Na_2O	8.65	8.34	8.24	8.17	8.45	8.59	8.41	8.65	8.31
K_2O/Na_2O	1.22	1.30	1.33	1.15	1.27	1.24	1.46	1.04	1.25
δ	2.28	2.11	2.02	1.97	2.16	2.25	2.15	2.33	2.08
A/CNK	1.07	1.03	1.10	1.06	1.02	1.04	1.07	1.02	1.05
A/NK	1.13	1.11	1.17	1.13	1.10	1.12	1.12	1.12	1.12
CIPW 标准矿物计算									
石英(Qz)	33.78	34.89	36.62	36.66	34.43	33.69	35.38	31.65	34.89
钙长石(An)	1.71	2.2	2	1.85	2.39	2.51	1.45	2.96	1.79
钠长石(Ab)	32.99	30.62	30	32.12	31.42	32.59	28.88	36.02	31.01
正长石(Or)	28.19	27.75	27.82	25.8	27.9	28.16	29.43	26.16	26.98
刚玉(C)	0.88	0.4	1.12	0.73	0.28	0.51	0.77	0.28	0.61
紫苏辉石(Hy)	1.07	1.89	1.13	1.33	1.64	1.13	1.83	1.33	2.27
钛铁矿(Il)	0.27	0.23	0.19	0.11	0.15	0.27	0.21	0.34	0.24
磁铁矿(Mt)	1.06	1.99	1.07	1.38	1.75	1.09	2.01	1.2	2.16
磷灰石(Ap)	0.05	0.02	0.02	0.00	0.02	0.05	0.02	0.05	0.05
锆石(Zr)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
合计	100.02	100.01	99.99	100	100.01	100.02	100.01	100	100.02
DI	94.96	93.26	94.44	94.58	93.75	94.44	93.69	93.83	92.88
Sc	3.78	3.21	4.16	3.82	3.16	4.29	3.30	3.54	4.10
V	5.67	4.98	3.80	2.64	3.40	7.07	4.03	8.53	5.00
Cr	6.27	5.77	7.01	6.48	5.45	9.08	3.58	4.71	10.0
Co	0.611	0.587	0.426	0.233	0.390	0.613	0.586	0.612	1.00
Ni	0.423	0.362	0.256	0.113	0.159	0.533	0.319	0.670	1.70
Cu	1.41	1.08	0.972	0.779	0.723	1.97	1.68	1.31	3.70
Zn	5.03	4.82	5.17	5.68	4.95	10.7	8.04	5.69	32.0
Ga	18.4	17.0	18.8	18.7	17.6	18.6	17.3	17.3	16.2
Ge	1.66	1.46	1.87	1.74	1.68	1.37	1.45	1.43	0.190
Rb	211	205	249	251	234	203	214	180	233
Sr	39.1	36.9	46.5	22.1	55.6	48.1	27.1	69.1	45.1
Y	40.8	40.4	47.3	53.0	44.5	44.2	44.2	24.0	41.2
Zr	118	97.8	121	117	113	116	113	117	136
Nb	9.96	10.8	11.7	15.1	10.7	12.1	9.88	8.27	9.70
Cs	4.00	3.62	4.16	4.04	2.51	2.99	3.65	1.98	4.40
Ba	175	145	64.2	22.4	72.0	179	129	388	184
La	37.7	29.0	28.3	30.5	26.2	35.7	29.6	30.2	36.8
Ce	74.1	58.0	57.9	67.3	54.7	71.4	62.3	55.3	64.7
Pr	8.13	6.51	6.66	8.19	6.39	8.05	7.24	5.91	7.14
Nd	26.9	22.0	22.8	28.0	21.7	26.7	25.0	18.7	25.2

续表 1

岩性	中粒含斑黑云母二长花岗岩						中细粒黑云母二长花岗岩		
样品编号	DHLT NP-01	DHLT NP-03	DHLT NP-06	DHLT NP-09-1	DHLT NP-09-2	DHLT NP-11	DHLT NP-08	DHLT NP-10	DHLT NP-13
Sm	5.73	4.97	5.58	6.79	5.48	5.80	6.05	3.57	5.64
Eu	0.144	0.118	0.069	0.040	0.063	0.124	0.106	0.213	0.170
Gd	5.80	5.22	6.09	6.79	6.01	5.65	6.18	3.47	5.43
Tb	1.07	1.00	1.18	1.30	1.14	1.09	1.18	0.625	0.990
Dy	6.77	6.48	7.76	8.35	7.42	6.92	7.44	3.97	6.69
Ho	1.40	1.40	1.64	1.78	1.56	1.50	1.56	0.82	1.44
Er	4.07	4.05	4.74	5.49	4.57	4.35	4.55	2.43	3.92
Tm	0.659	0.626	0.747	0.870	0.728	0.689	0.718	0.388	0.680
Yb	4.05	4.09	4.67	5.72	4.49	4.39	4.60	2.47	4.33
Lu	0.608	0.593	0.700	0.869	0.693	0.648	0.689	0.388	0.590
Hf	4.27	3.58	4.50	5.19	4.33	4.10	4.38	3.68	5.10
Ta	1.41	1.35	1.58	2.47	1.48	1.53	1.33	0.92	1.20
Pb	5.64	6.56	9.58	9.17	10.4	9.83	9.51	5.10	56.1
Th	27.8	24.5	33.6	47.6	40.7	28.5	33.5	19.0	28.9
U	2.56	2.38	3.05	4.06	3.64	2.50	3.39	2.70	2.63
∑REE	177.13	144.06	148.84	171.99	141.14	173.01	157.21	128.45	163.72
HREE/LREE	6.25	5.14	4.41	4.52	4.30	5.86	4.84	7.82	5.80
$(La/Yb)_N$	6.68	5.09	4.35	3.82	4.19	5.83	4.62	8.77	6.10
$(La/Sm)_N$	4.25	3.77	3.27	2.90	3.09	3.97	3.16	5.46	4.21
$(Gd/Yb)_N$	1.18	1.06	1.08	0.98	1.11	1.06	1.11	1.16	1.04
δEu	0.08	0.07	0.04	0.02	0.03	0.07	0.05	0.18	0.09

注:A/CNK = $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ (mol); A/NK = $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$ (mol); 分异指数(DI)= Qz + Or + Ab

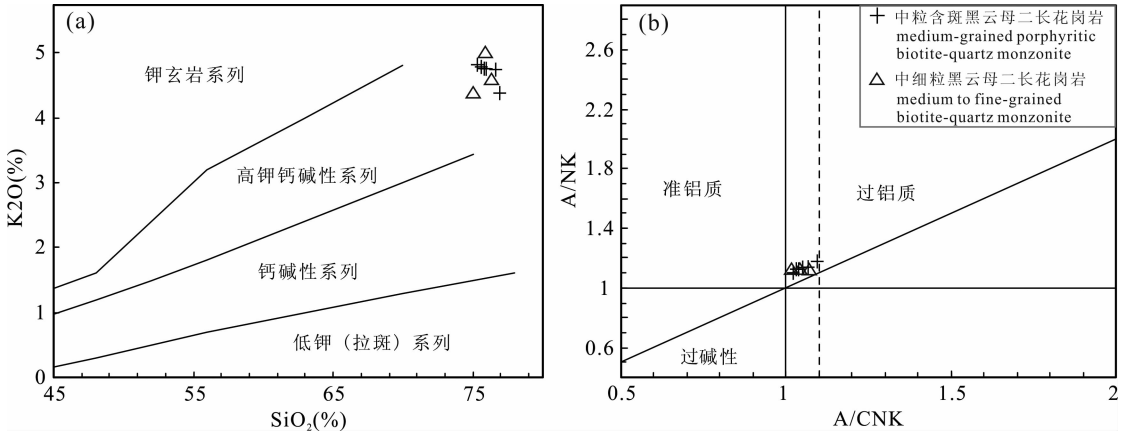


图 3　西昆仑甜水海地块南屏雪山花岗岩 SiO_2-K_2O 图解(a)(据 Rickwood, 1989)和 A/CNK-A/NK 图解(b)(据 Maniar et al., 1989)

Fig. 3　The SiO_2-K_2O diagram (a) (after Rickwood, 1989) and the A/CNK-A/NK diagram (b) (after Maniar et al., 1989) of the Nanpingxueshan granite from the Tianshuihai terrane in West Kunlun

的平均存留年龄)。

中粒含斑黑云母二长花岗岩 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值介于 0.282522 ~ 0.282634 之间,$\varepsilon_{Hf}(t)$值为 0.9 ~ 5.3,平均值为 2.7,二阶段模式年龄(T_{DM2})为 1118 ~ 1398Ma,平均值为 1286Ma(表 2)。中细粒黑云母二长花岗岩 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值范围为 0.282537 ~ 0.282614,$\varepsilon_{Hf}(t)$为 1.4 ~ 5.6,平均值为 3.9,二阶段模式年龄(T_{DM2})为 1136 ~ 1396Ma,平均值为 1239Ma(表 2)。

4　讨论

4.1　岩石成因类型

花岗岩成因类型的判定是花岗岩研究最重要的基础问题。目前花岗岩成因类型最为常用的分类包括 I 型、S 型、M 型和 A 型 4 种(Wu Fuyuan et al., 2007b),但是当岩石经历高度结晶分异作用后还可

表 2 西昆仑甜水海地块南屏雪山花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 Hf isotopic data of zircon from the Nanpingxueshan granite from the Tianshuihai terrane in West Kunlun

点号	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$	$(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR}$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	年龄(Ma)	T_{DM} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{Lu/Hf}$
Sample DHLTNP-7:中粒含斑黑云母二长花岗岩										
DHLTNP-7-1	0.002923	0.282522	0.000021	0.282495	0.282470	0.9	485	1089	1398	−0.9
DHLTNP-7-2	0.001373	0.282570	0.000016	0.282558	0.282470	3.1	485	975	1258	−1.0
DHLTNP-7-3	0.001789	0.282568	0.000016	0.282552	0.282470	2.9	485	989	1271	-0.9
DHLTNP-7-5	0.002085	0.282584	0.000017	0.282565	0.282470	3.4	485	975	1242	−0.9
DHLTNP-7-6	0.002519	0.282531	0.000015	0.282508	0.282470	1.4	485	1064	1369	−0.9
DHLTNP-7-7	0.001561	0.282572	0.000015	0.282558	0.282470	3.1	485	977	1257	−1.0
DHLTNP-7-8	0.002506	0.282559	0.000015	0.282536	0.282470	2.3	485	1022	1306	−0.9
DHLTNP-7-9	0.002488	0.282545	0.000015	0.282522	0.282470	1.9	485	1042	1337	−0.9
DHLTNP-7-10	0.001567	0.282634	0.000016	0.282620	0.282470	5.3	485	889	1118	−1.0
DHLTNP-7-11	0.001193	0.282562	0.000017	0.282552	0.282470	2.9	485	982	1272	−1.0
DHLTNP-7-12	0.002056	0.282540	0.000019	0.282521	0.282470	1.8	485	1037	1339	−0.9
DHLTNP-7-13	0.002295	0.282546	0.000020	0.282525	0.282470	1.9	485	1036	1331	−0.9
DHLTNP-7-14	0.001965	0.282576	0.000014	0.282558	0.282470	3.1	485	983	1258	−0.9
DHLTNP-7-15	0.002190	0.282569	0.000015	0.282549	0.282470	2.8	485	998	1276	−0.9
DHLTNP-7-16	0.001696	0.282555	0.000014	0.282539	0.282470	2.5	485	1006	1299	−0.9
DHLTNP-7-17	0.002649	0.282587	0.000016	0.282563	0.282470	3.3	485	985	1245	−0.9
点号	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$	$(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR}$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	Age(Ma)	T_{DM} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{Lu/Hf}$
Sample DHLTNP：中细粒黑云母二长花岗岩										
DHLTNP-2	0.004120	0.282566	0.000020	0.282525	0.282443	2.9	528	1059	1303	−0.9
DHLTNP-3	0.001581	0.282589	0.000017	0.282573	0.282443	4.6	528	954	1196	−1.0
DHLTNP-4	0.002733	0.282588	0.000017	0.282561	0.282443	4.2	528	987	1224	−0.9
DHLTNP-5	0.001339	0.282613	0.000021	0.282600	0.282443	5.6	528	913	1136	−1.0
DHLTNP-6	0.001540	0.282582	0.000019	0.282567	0.282443	4.4	528	963	1211	−1.0
DHLTNP-7	0.001535	0.282585	0.000020	0.282570	0.282443	4.5	528	958	1203	−1.0
DHLTNP-8	0.001373	0.282595	0.000018	0.282581	0.282443	4.9	528	941	1178	−1.0
DHLTNP-9	0.001382	0.282537	0.000021	0.282523	0.282443	2.8	528	1023	1308	−1.0
DHLTNP-10	0.001298	0.282562	0.000021	0.282549	0.282443	3.8	528	985	1249	−1.0
DHLTNP-11	0.002017	0.282614	0.000020	0.282594	0.282443	5.4	528	929	1148	−0.9
DHLTNP-12	0.002598	0.282595	0.000021	0.282569	0.282443	4.5	528	973	1205	−0.9
DHLTNP-13	0.002255	0.282549	0.000020	0.282526	0.282443	2.9	528	1030	1301	−0.9
DHLTNP-14	0.005562	0.282539	0.000022	0.282484	0.282443	1.4	528	1149	1396	−0.8
DHLTNP-15	0.001753	0.282565	0.000018	0.282548	0.282443	3.7	528	992	1252	−0.9
DHLTNP-16	0.001562	0.282578	0.000020	0.282562	0.282443	4.2	528	970	1221	−1.0
DHLTNP-17	0.002808	0.282548	0.000019	0.282520	0.282443	2.7	528	1047	1314	−0.9
DHLTNP-18	0.001768	0.282600	0.000018	0.282583	0.282443	4.9	528	943	1175	−0.9
DHLTNP-19	0.001862	0.282597	0.000020	0.282578	0.282443	4.8	528	950	1184	−0.9
DHLTNP-20	0.001975	0.282565	0.000020	0.282545	0.282443	3.6	528	999	1258	−0.9
DHLTNP-21	0.002292	0.282541	0.000020	0.282519	0.282443	2.7	528	1042	1318	−0.9

划分出高分异 I 型和高分异 S 型(Whalen et al.，1987)。对于经历高程度分异的花岗岩，由于其矿物组成和化学组成趋近于低共结花岗岩，导致高分异的 I 型、S 型和 A 型花岗岩在化学组成上部分重叠，使得鉴定出现困难，需要综合岩石学、矿物学和地球化学等多种证据进行判别(King et al.，1997；Jia Xiaohui et al.，2009；Fu Yu et al.，2015)。

本文两类花岗岩高的分异系数 DI、Rb/Sr、Rb/Ba 和 Nb/Ta 比值指示南屏雪山花岗岩体经历了高程度的分异演化，中粒含斑黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩 Zr+Nb+Ce+Y 含量分别为 $207\times10^{-6}\sim252\times10^{-6}$ 和 $204\times10^{-6}\sim252\times10^{-6}$，低于 A 型花岗岩的下限值($350\times10^{-6}$，Whalen et al.，1987)，在(Zr+Nb+Ce+Y)-((K_2O

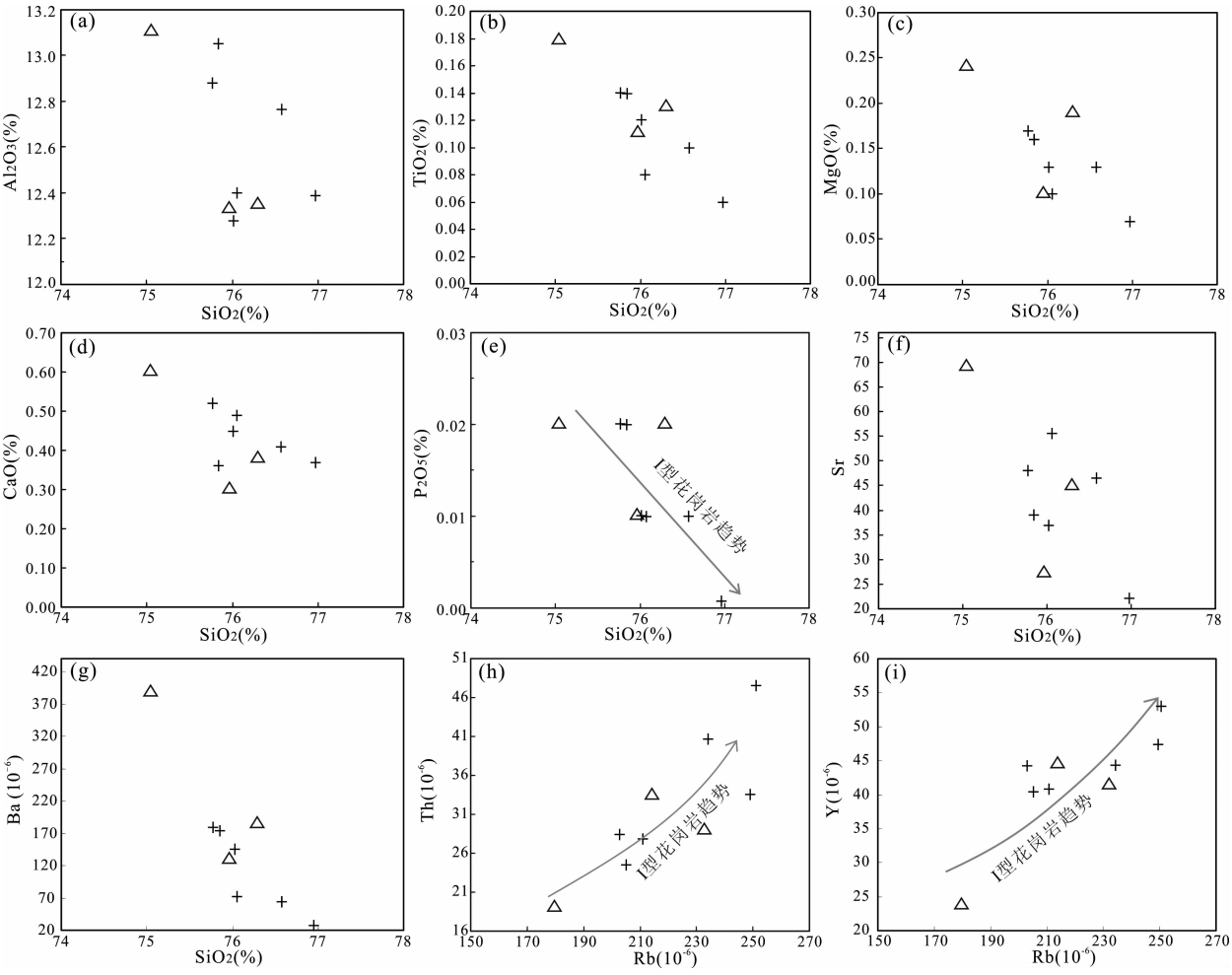


图 4　西昆仑甜水海地块南屏雪山花岗岩 Harker 图解（图例同图 3）

Fig. 4　Harker diagrams of the Nanpingxueshan granite from the Tianshuihai terrane in West Kunlun (Symbols are the same as in Fig. 3)

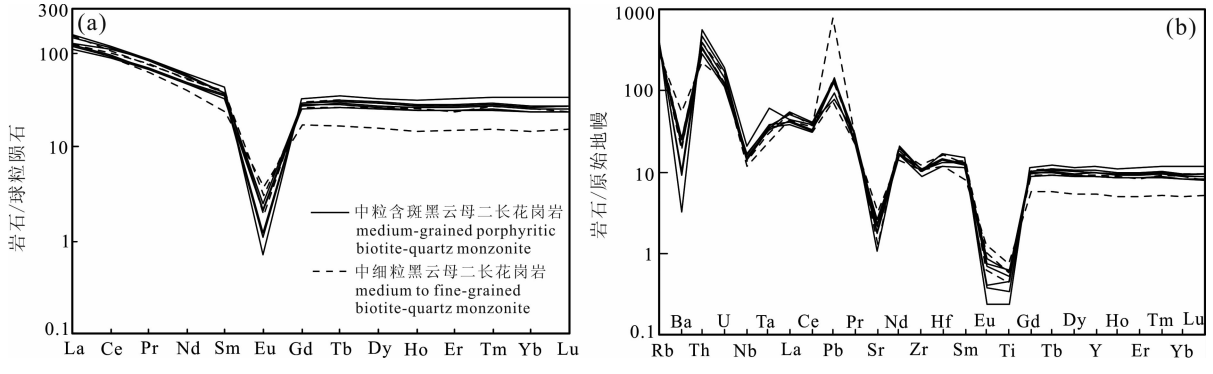


图 5　西昆仑甜水海地块南屏雪山花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和原始地幔标准化图解(b)（标准化值据 Sun S S et al., 1989）

Fig. 5　Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of the Nanpingxueshan granite from the Tianshuihai terrane in West Kunlun (normalizing values after Sun S S et al., 1989)

+Na_2O)/CaO) 图解(图 6a)和(Zr+Nb+Ce+Y-10000Ga/Al) 图解(图 6b)中样品均落在高分异花岗岩范围内。南屏雪山花岗岩具弱过铝质,A/CNK 均小于 1,CIPW 标准矿物计算结果中刚玉分子含量基本都在 1%以下,岩石矿物组合中未见白云母、堇青石和石榴石等富铝矿物出现,不同于 S 型花岗

岩的强过铝特征。实验研究表明,在准铝质到弱过铝质岩浆中,磷灰石的溶解度很低,并在岩浆分异过程中随 SiO_2 的增高而降低;而在强过铝质岩浆中,磷灰石溶解度变化趋势与此相反,随 SiO_2 的增加而增高或基本保持不变(Wolf et al.,1994),磷灰石在I型和S型花岗岩浆中这种不同行为已被成功地用于区分I型和S型花岗岩类(Wu F Y et al.,2003;Li X H et al.,2006)。本文数据表明,中粒含斑黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩的 P_2O_5 含量均明显低于0.10%,明显不同于S型花岗岩常具较高 P_2O_5 含量(>0.20%,Chappell,1999)的特征,且具有随分异作用增强而降低的变异趋势,在 SiO_2-P_2O_5 图解中,南屏雪山花岗岩显示出I型花岗岩演化的趋势(图4e),在Zr-TiO_2(图6c)图解中样品也均落入I型花岗岩区域。此外,由于富集Th和Y的矿物在过铝质岩浆演化早期优先结晶,但在准铝质岩浆演化早期不会优先结晶,这导致I型花岗岩较S型花岗岩含更高的Th和Y,且Th和Y均与Rb显示正相关关系(Li Xianhua et al.,2007)。在Th-Rb(图4h)、Y-Rb(图4i)图解中所表现出的正消长演化关系也可以支持I型花岗岩这一判断。事实上,南屏雪山花岗岩具有高的 SiO_2、Na_2O+K_2O,低Ti、Mn、Mg、Ca、P且高的Rb/Sr及Nb/Ta比值,同时强烈富集Rb、Th、U而亏损Ba、Sr、Eu,这些特征也与前人定义的高分异I型花岗岩也是一致的(Chappell,1999;Wu F Y et al.,2003;Li Xianhua et al.,2007;Zhu R Z et al.,2015)。

综上所述,我们认为南屏雪山早古生代花岗岩属于高分异的I型花岗岩。

4.2 岩浆源区及演化特征

南屏雪山花岗岩主量元素 Al_2O_3、TiO_2、MgO、CaO和 P_2O_5 与 SiO_2 之间的负相关性、高的Rb/Sr比值、明显亏损Ba、Sr、Eu、Nb、Ti、P等,暗示了母岩浆经历了显著的分离结晶作用。Ba、Sr、Eu可能是与斜长石的残留或分离结晶有关,而Ti、Nb、Ta、P的亏损,则可能与铁-钛氧化物和磷灰石分离结晶有关(Foley et al.,2000;Li Xianhua et al.,2007)。

La-La/Sm(图7a)和La-La/Yb(图7b)判别图解显示,南屏雪山花岗岩在形成过程中部分熔融与结晶分异作用均起重要作用。岩体的Rb/Sr比值分布在2.60~11.36之间,远大于陆壳比值(0.15)(Rudnick et al.,2003),Nb/Ta和Zr/Nb比值分别介于6.11~8.99和7.75~14.15,接近大陆地壳平均组成(Rudnick et al.,2003),Sm/Nd比值(0.19~0.25)与大陆地壳(0.17~0.25)(Rudnick et al.,2003)相近,说明地壳物质对其熔融源区具有重要贡献,岩石组分多源于地壳。Rapp et al.(1991)认为由下地壳岩石部分熔融成的熔体,其 $Mg^{\#}$ 小50,而地幔橄榄岩部分熔融的熔体具有较高的 $Mg^{\#}$,南屏雪山岩体 $Mg^{\#}$ 值(12~36)均小于50,同样指示形成南屏雪山岩体的岩浆含壳源成分。

Sisson(1994)研究表明,当石榴子石为源区主

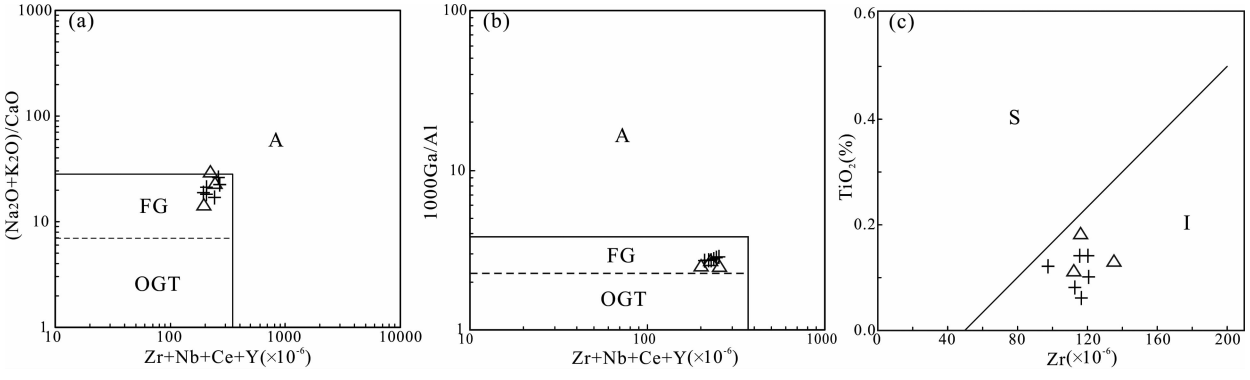


图6 西昆仑甜水海地块南屏雪山花岗岩成因类型判别图(图例同图3)

Fig. 6 Discrimination diagrams of granite genetic types for the Nanpingxueshan granite from the Tianshuihai terrane in West Kunlun (Symbols are the same as in Fig. 3)

(a)—(Zr+Nb+Ce+Y)-((K₂O+Na₂O)/CaO)图解(据Whalen et al.,1987);(b)—(Zr+Nb+Ce+Y)-10000Ga/Al图解(据Eby,1990);(c)—Zr-TiO_2图解;FG—高分异的M,S,I花岗岩;OGT—未分异的M,S,I花岗岩

(a)—the (Zr+Nb+Ce+Y)-((K₂O+Na₂O)/CaO) diagram (after Whalen et al.,1987); (b)—the (Zr+Nb+Ce+Y)-10000Ga/Al diagram (after Eby,1990); (c)—the Zr vs TiO_2 diagram; FG—fractionated M-type, I-type, S-type granites; OGT—unfractionated M-type, I-type, S-type granites

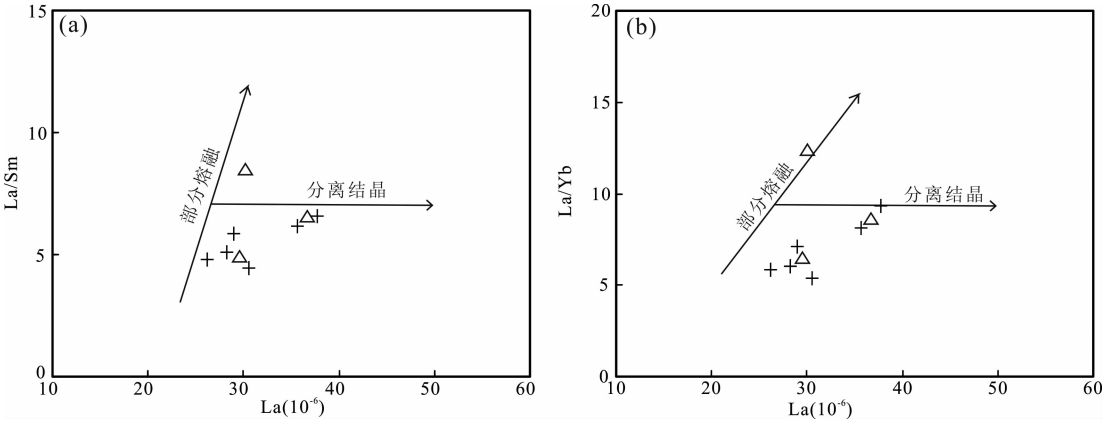


图 7　西昆仑甜水海地块南屏雪山花岗岩 La-La/Sm 图解(a)(据 Chung S L et al., 2009)和 La-La/Yb 图解(b)(据 Qiao Gengbiao et al., 2015)(图例同图 3)

Fig. 7　La-La/Sm diagram (a) (after Chung S L et al., 2009) and La-La/Yb diagram (b) (after Qiao Gengbiao et al., 2015) for the Nanpingxueshan granite from the Tianshuihai terrane in West Kunlun (Symbols are the same as in Fig. 3)

要残留相时,形成的熔体具有倾斜的 HREE 配分模式,Y/Yb 比值一般明显大于 10;而当角闪石为源区主要残留相时,形成的熔体具有较为平坦的 HREE 配分模式,Y/Yb 比值也接近于 10(Xiong X L et al., 2005),本文研究样品的 Y/Yb 比值在 9.27 ~ 10.13 之间,具有平坦的 HREE 配分模式,表明其源区残留相中不含石榴子石,可能是斜长石±角闪石稳定域的地壳物质部分熔融并经高程度演化形成(Xiong X L et al., 2005)。

在∑REE-Y/∑REE 关系图(图 8a)中,可以看出除 1 件中细粒黑云母二长花岗岩样品投入壳幔源花岗岩区外,其余样品均落在壳源花岗岩区域中,在 δEu-$(La/Yb)_N$ 图解(图 8b)中,所有样品的投点都落在了壳源花岗岩区域。锆石 Hf 同位素分析是花岗岩源区判别的重要手段(Wu Fuyuan et al., 2007a),本文测得的中粒含斑黑云母二长花岗岩 $\varepsilon_{Hf}(t)$值为 0.9 ~ 5.3,T_{DM2}为 1118 ~ 1398Ma。中细粒黑云母二长花岗岩 $\varepsilon_{Hf}(t)$为 1.4 ~ 5.6,T_{DM2}为 1136 ~ 1396Ma。在 $\varepsilon_{Hf}(t)$-t 图解(图 9)中,二者均落在球粒陨石演化线附近,亏损地幔演化线以下,表明成岩过程应有年轻组分的参与,年轻组分参与花岗岩成岩过程的方式可能有两种情形,其一为幔源

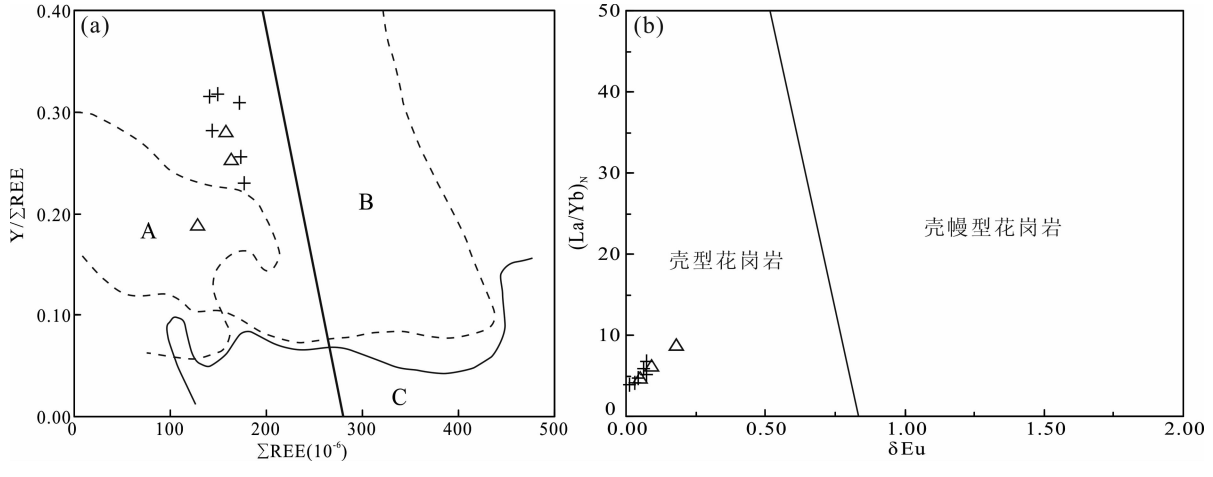


图 8　西昆仑甜水海地块南屏雪山花岗岩∑REE- Y/∑REE 图解(a)(据 Zhang Huishan et al., 2016)和 δEu-$(La/Yb)_N$图解(b)(据 Zhang Shizhen et al., 2014)(图例同图 3)

Fig. 8　∑REE-Y/∑REE diagram (a) (after Zhang Huishan et al., 2016) and δEu-$(La/Yb)_N$ diagram (b) (after Zhang Shizhen et al., 2014) for the Nanpingxueshan granite from the Tianshuihai terrane in West Kunlun (Symbols are the same as in Fig. 3)

A—壳幔型花岗岩; B—壳型花岗岩; C—幔型花岗岩

A—granite of crust and mantle type; B—granite of crust type; C—granite of mantle type

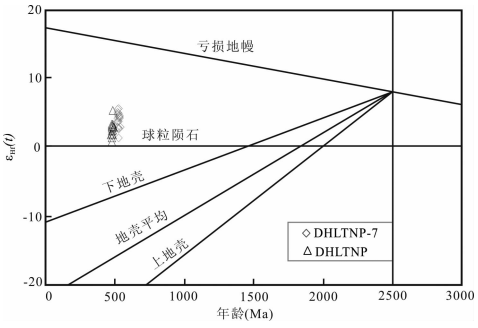


图 9 西昆仑甜水海地块南屏雪山花岗岩 Hf 同位素组成特征

Fig. 9 Hf isotopic characteristics of the Nanpingxueshan granite from the Tianshuihai terrane in West Kunlun

岩浆与其诱发的地壳物质部分熔融形成的长英质岩浆在地壳深部混合形成壳幔混源岩浆(Griffin et al., 2002; Belousova et al., 2006; Kemp et al., 2007);另一种是幔源岩浆的底侵作用致使新生地壳发生部分熔融 (Jahn et al., 2000; Wu F Y et al., 2006; Zheng Y F et al., 2007)。南屏雪山中粒含斑黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$均为正值,且变化范围不超过 6 个 ε 单位,Hf 同位素值较为均一,可能暗示了花岗岩来源于新生地壳的部分熔融,与前述的岩石壳源地球化学特征一致。锆石 Hf 同位素模式年龄代表了原岩物质从亏损地幔抽取的时间(Wu Fuyuan et al., 2007a),根据本文花岗岩二阶段模式年龄推测南屏雪山花岗岩是由中元古代新生地壳物质部分熔融所形成,Hu Jun et al. (2016) 在甜水海岩群中获得了 1142Ma 的碎屑锆石年龄峰,其对应 $\varepsilon_{Hf}(t)$多数为集中分布的正值,对应的 T_{DM2} 为 1068 ~ 1806Ma, Zhang Chuanlin et al. (2007) 在北昆仑地块变质双峰式火山岩中变质矿物角闪石和黑云母中获得了 1050.85 ± 0.93 Ma 和 1021 ± 1.08 Ma 的 Ar-Ar 年龄,在前寒武纪副变质岩中获得了 0.9 ~ 1.0Ga 的变质年龄,认为该中元古代晚期－新元古代变质事件是西昆仑地区 Rodinia 超大陆聚合的响应,上述研究成果支持甜水海地块存在中元古代新生地壳。

综上所述,中粒含斑黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩地球化学特征和锆石 Hf 同位素组分的相似性,暗示它们可能是同源岩浆演化的产物,是中元古代新生地壳物质部分熔融形成的产物。

4.3 构造意义

南屏雪山早古生代花岗岩在微量和稀土元素组成上,均相对富集 LILE 和 LREE,亏损 HFSE,具有正的 Pb 异常和 Nb、Ta、Ti、P 负异常(图 5),反映岩体形成过程与大陆地壳物质有很大的亲缘性,与岛弧或者大陆边缘弧环境密切相关(Pearce et al., 1984; Marjorie, 1989; Sun S S et al., 1989)。在 Pearce et al. (1984) 的花岗岩的微量元素 Y-Nb 图解(图 10a)中,中细粒黑云母二长花岗岩所有样品全部落于火山弧花岗岩＋同碰撞花岗岩区,中粒含斑黑云母二长花岗岩落入到火山弧花岗岩＋同碰撞花岗岩＋板内花岗岩区;在 Y＋Nb-Rb 图解(图 10b)中,中细粒黑云母二长花岗岩落于火山弧花岗岩区域,中粒含斑黑云母二长花岗岩落入到火山弧花岗岩＋板内花岗岩区域内。由于构造判别图解存在一定的多解性,而花岗岩类研究的许多理论和判别图解思路来源于玄武岩的研究成果,亦存在较多的问题,能否用来判别花岗岩形成的构造环境也一

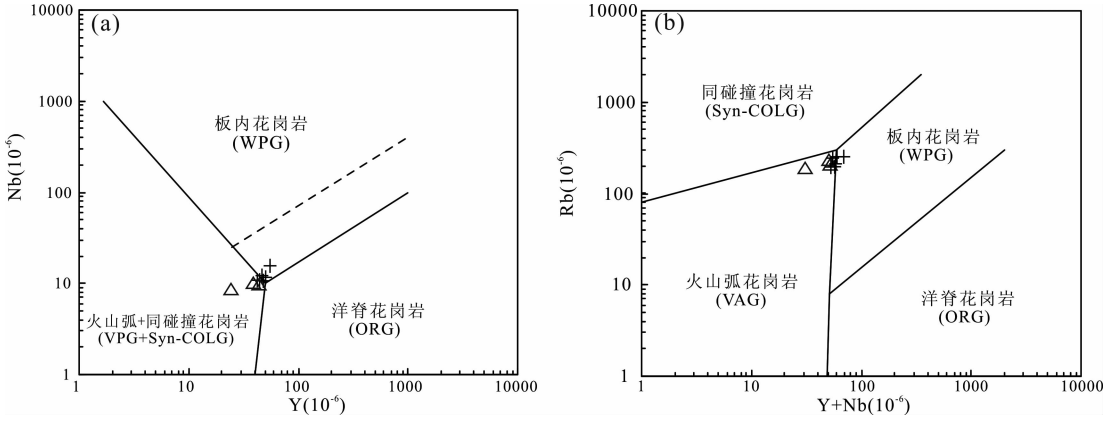


图 10 西昆仑甜水海地块南屏雪山花岗岩 Y-Nb(a)和 Y＋Nb-Rb 图解(据 Pearce et al., 1984)(图例同图 3)

Fig. 10 Y vs Nb (a) and Y＋Nb vs Rb (b) diagrams (after Pearce et al., 1984) of the Nanpingxueshan granite from the Tianshuihai terrane in West Kunlun (Symbols are the same as in Fig. 3)

直存在疑问(Wu Fuyuan et al., 2007b)。对岩体形成构造背景的研究,还应将其纳入整个区域构造演化历程中来研究,才能得出正确、可信的结论。

前人研究成果显示原特提斯洋持续的北向俯冲,在南昆仑地块库地弧后盆地或岛弧环境下形成了时间和空间上同时产出的早古生代花岗岩(507 ~ 500 Ma)和蛇绿岩(525 ~ 494 Ma)、Yixieke 火山岩(494Ma)及随后的多期次(471 ~ 468 Ma、447 ~ 430Ma 和 408 ~ 440 Ma)的古生代花岗岩,最后在早古生代晚期完成了俯冲消减-碰撞造山过程(Pan Yusheng et al., 2000; Xiao Xuchang et al., 2003; Yuan Chao et al., 2003; Xiao W J et al., 2005; Cui Jiantang et al., 2006; Zhang Chuanlin et al., 2007; Wang Chao et al., 2013; Gao Xiaofeng et al., 2013)。

近年来在甜水海地块西段和中段塔什库尔干和麻扎一带陆续发现了早寒武世岛弧型火山岩(527 ~ 537 Ma, Lin Shangkang et al., 2015)、早古生代麻粒岩(456 ± 30 Ma, Qu Junfeng et al., 2007)、早古生代变质事件(530 ~ 440 Ma, Zhang Chuanlin et al., 2007; Haung Chaoyang, 2014)、早古生代高分异 I 型花岗岩(Zhang Huishan et al., 2016),在甜水海地块西段康西瓦一带发现了古生代孔兹岩(428 ~ 492 Ma, Xu Zhiqin et al., 2004)和石英闪长岩(447 ± 7 Ma, Cui Jiantang et al., 2006),学者们认为与该时期特提斯洋的南向俯冲消减-碰撞密切相关。

南昆仑地块和甜水海地块早古生代岩浆、变质事件可能暗示了原特体斯洋在早寒武世就已经开始发生了双向俯冲。南屏雪山花岗岩则是该动力学背景下的产物,其形成机制推断如下:早寒武世-早奥陶世(528 ~ 484 Ma)原特提斯洋持续的南向俯冲消减-碰撞造山过程中,诱导幔源岩浆上涌底侵下地壳,诱发区内中元古代新生地壳物质至少两次部分熔融(早寒武世和早奥陶世),并经历一定程度的分离结晶作用形成了南屏雪山早古生代花岗岩。

5　结论

(1)南屏雪山早古生代花岗岩主要岩性为中粒含斑黑云母二长花岗岩(485Ma)和中细粒黑云母二长花岗岩(528Ma),两者均具有高硅、富碱,贫 TFe_2O_3、MgO 和 CaO 的特征,属高钾钙碱性弱过铝质花岗岩类;微量和稀土元素组成上,两者均富集 Rb、Th、U、K、Pb 和轻稀土,贫 Ba、Sr、Nb、Ta、Ti 和 P,Rb/Sr、Rb/Ba 和 Nb/Ta 比值高,具有明显的 Eu 负异常,其 Zr、Nb、Ce、Y 等高场强元素均较之典型 A 型花岗岩偏低,P_2O_5 随 SiO_2 增加而降低,Th、Y 与 Rb 之间则表现出一定的正消长关系,综合地质地球化学资料指示,南屏雪山早古生代花岗岩体应属高分异的 I 型花岗岩。

(2)锆石 Hf 同位素分析结果显示,中粒含斑黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩均具有较均一的正 $\varepsilon_{Hf}(t)$值(0.9 ~ 5.3 和 1.4 ~ 5.6)及中元古代的二阶段模式年龄 T_{DM2}(1118 ~ 1398Ma 和 1136 ~ 1396Ma)。相似的地球化学特征和锆石 Hf 同位素组成暗示两者可能是同源岩浆演化的产物。

(3)综合南屏雪山早古生代花岗岩的岩石学、成因类型、岩浆源区特征及区域构造背景推断其是早寒武世-早奥陶世(528~485 Ma)原特提斯洋持续的南向俯冲消减-碰撞造山过程中,诱导幔源岩浆上涌底侵下地壳,诱发区内中元古代新生地壳物质至少两次部分熔融(早寒武世和早奥陶世),并经历一定程度的分离结晶作用而形成的。

(4)结合区域资料,推测在早古生代原特提斯洋存在双向俯冲。

致谢:野外地质工作得到国家 305 项目办公室和新疆新地地质勘查有限公司韩红卫教授级高级工程师、魏勇工程师的支持和帮助,审稿过程中得到了匿名审稿专家提出的宝贵意见和建议,使得论文讨论更充分,结论更加合理、可靠,在此表示衷心的感谢!

注　释

❶ 陕西省地质调查院. 2006. 1∶250000 岔路口幅区域地质调查成果报告

References

Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. 2000. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(24): 4205 ~ 4225.

Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y. 2006. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modelling: Examples from Eastern Australian granitoids. Journal of Petrology, 47(2): 329 ~ 353.

Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. Lithos, 46(3): 535 ~ 551.

Chung S L, Chun M F, Ji J Q. 2009. The nature and timing of crustal thickening in Southern Tibet: Geochemical and zircon Hf isotopic constraints from post-collisional adakites. Tectonophysics,477 (1～2): 36 ～ 48.

Cui Jiangtang, Wang Juchuan, Bian Xiaowei, Zhu Haiping. 2006. Geological characteristics of Early Paleozoic quartz diorite in the vicinity of Kangxiwa, West Kunlun, China and its zirconSHRIMP U-Pb dating. Geological Bulletin of China, 25 (12): 1450 ～ 1457 (in Chinese with English abstract).

Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. Lithos, 26 (1 ～ 2): 115 ～ 134.

Foley S F, Barth M G, Jenner G A. 2000. Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64 (5): 933 ～ 938.

Fu Yu, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Liao Zhenwen, Jiang Xiaofang, Ren Guangming, Zhou Bangguo, Guo Yang, Wang Zizheng. 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and petrogeochemical features of Huangguayuan granite, Yuanmou, Yunnan province and its geological implication. Geological review, 61 (2): 376 ～ 392 (in Chinese with English abstract).

Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, Kang Lei, Xi Rengang, Guo Lei, Xie Congrui, Yang Zaichao. 2013. Origin of Datongxi pluton in the West Kunlun orogen: Constraints from mineralogy, elemental geochemistry and zircon U-Pb age. Acta Petrologica Sinica, 29 (9): 3065 ～ 3079 (in Chinese with English abstract).

GriffinW L, Belousova E, Shee S. 2004. Archean crustal evolution in the northen Yilgam Craton: U-Pb and Hf-isotope Evidence from detrital zircons. Preeambrian Researeh, 131: 231～282.

Grlffin W L, Wang X, Jaekson, S E. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. Lithos, 61: 237 ～ 69.

Hu Jun, Wang He, Huang Chaoyang, Tong Laixi, Mu ShengLu, Qiu Zengwang. 2016. Geological characteristics and age of the Dahongliutan Fe-ore deposit in the Western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China. Journal of Asian Earth Sciences, 116: 1 ～ 25.

Huang Chaoyang. 2014. Geological characteristics and genesis of the iron ore deposit in the Bulunkuole Group, West Kunlun, Xinjiang. Guangzhou: Guangzhou institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, China,1 ～ 83 (in Chinese with English abstract).

Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 91(1/2): 181 ～ 193.

Jia Xiaohui, Wang Qiang, Tang Gongjian. 2009. A-type granites: Research progress and implications. Geotectonic et Metallogenia, 33 (3): 465 ～ 480 (in Chinese with English abstract).

Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G J, Paterson B A, Woodhead J D, Hergt J M, Gray C M, Whitehouse M J. 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon. Science, 315 (5814): 980 ～ 983.

King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australian. Journal of Petrology, 38 (3): 371 ～ 391.

Li X H, Li Z X, Li W X, Wang Y J. 2006. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc in the HainanIsland. Journal Geology, 114 (3): 341 ～ 353.

Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zengxiang. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China. Chinese Science Bulletin, 52 (9): 984～991(in Chinese with English abstract).

Lin Shangkang, Tang Haoshu, Ren Tao. 2015. In-suit U-Pb age and Hf isotopic and zircons from rhyodacite in Zankan, Western Kunlun area. Henan Science, 33 (6): 986 ～ 992 (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.

Marjorie W. 1989. Igneous Petrogenesis. London: Unwin Hayman Inc, 153 ～ 226.

Mattern F, Schneider, W. 2000. Suturing of the Proto- and Paleo-Tethys oceans in the western Kunlun (Xijiang, China). Journal of Asian Earth Sciences 18: 637 ～ 650.

Pan Guitang, Zhu Dicheng, Wang Liquan, Liao Zhongli, Geng Quanru, Jiang Xinsheng. 2004. Banggong Lake-Nu River suture zone-the northern boundary of Gondwanaland: evidence from geology and geophysics. Earth Science Frontiers, 11 (4): 371 ～ 382 (in Chinese with English abstract).

Pan Yusheng, Wen Shixuan, Sun Dongli. 2000. Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1 ～ 523 (in Chinese).

Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic in terpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25: 956 ～ 983.

Qiao Gengbiao, Zhang Hande, Wu Yuezhong, Jin Moushun, Du Wei, Zhao Xiaojian, Chen Denghui. 2015. Petrogenesis of the Dahongliutan Monzogranite in Western Kunlun: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics. Acta Geological Sinica, 89 (7): 1180 ～ 1194 (in Chinese with English abstract).

Qu Junfeng, Zhang Lifei, Ai Yongliang, Lv Zeng, Wang Jianping, Zhou Hui, Wang Shiyan. 2007. High-pressure granulite from Western Kunlun,NW China: Its metamorphic evolution, zircon SHRIMP U-Pb ages tectonic implication. Science China Earth

Science, 37: 429 ～ 441 (in Chinese with English abstract).

Rapp R P, Watson E B, Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities. Precambrian Research, 51 (1～ 4): 1 ～ 25.

Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22 (4): 247 ～ 263.

Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick RL(ed.). The crust treaties on geochemistry. Oxford: Elsevier Pergamon, 3: 1 ～ 64.

Sisson T W. 1994. Hornblende-melt trace-element partitioning measured by ion microprobe. Chemical Geology, 117 (1 ～ 4): 331～ 344.

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 (1): 313 ～ 345.

Vervoort J D, Pachelt P J, Gehrels GE, Nutman A P. 1996. Constraints on early Earth differentiation from hafnium andneodymium isotopes. Nature, 379 (6566): 624 ～ 627.

Wang Chao, Liu Liang, He Shiping, Yang Wenqiang, Cao Yuting, Zhu Xiaohui, Li Rongshe. 2013. Early Paleozoic magmatism in West Kunlun: Constraints from geological and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of the Bulong granite. Chinese Jounal of Geology, 48 (4): 997 ～ 1014 (in Chinese with English abstract).

Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95 (4): 407 ～ 419.

Wolf M B, London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58 (19): 4127 ～ 4245.

Wu F Y, Jahn B M, Wilder S A. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. Lithos, 66(3/4): 241 ～ 273.

Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H, Xu P. 2006. Hf isotopiccompositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. Chemical Geology, 234 (1 ～ 2): 105 ～ 126.

Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007b. Discussions on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23 (6): 1217 ～ 1238 (in Chinese with English abstract).

Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007a. Lu-Hf isotopic systematics and their application. Acta Petrologica Sinica, 23 (2): 185 ～ 220 (in Chinese with English abstract).

Xiao W J, Han F L, Windley B F, Yuan C, Zhou L, Li J L. 2003. Multiple accretionary orogenesis and episodic growth of continents: insights from the Western Kunlun Range, central Asia. International Geology Review, 45: 303 ～ 328.

Xiao W J, Windley B F, Liu D Y, Jian P, Liu C Z, Yuan C, Sun M. 2005. Accretionary tectonics of the Western Kunlun orogen, China: a Paleozoic-Early Mesozoic, long lived active continental margin with implications for the growth of southern Eurasia. Jounal of Geology,113: 687 ～ 705.

Xiao W J., Windley B F, Hao J, Li J L. 2002. Arc-ophiolite obduction in the Western Kunlun Range (China): implications for the Paleozoic evolution of central Asia. Journal of the Geological Society, 159: 517 ～ 528.

Xiao Xuchang, Wang Jun, Su Li, Song Shuguang. 2003. A further discussion of the Kudi ophiolite, Western Kunlun, and its tectonic significance. Geological Bulletin of China,22 (10): 745 ～ 750 (in Chinese with English abstract).

Xiao Xuchang, Wang Jun. 2004. Discussion on the lithospheric structure and evolution of the West Kunlun Mountains-Karakorum Mountains and their adjacent areas. Geological Review, 50 (3): 285 ～ 294 (in Chinese with English abstract).

Xiong X L, Adam J, Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. Chemical Geology, 218 (3): 339 ～ 359.

Xu Zhiqin, Qi Xuexiang, Liu Fulai, Yang Jingsui, Wu Cailai, Zeng Lingsen, Liang Fenghua. 2004. The Kangxiwa Caledonian Khondalite series in West Kunlun, China, and its geological significance. Acta Petrological Sinica, 78 (6): 733 ～ 743 (in Chinese with English abstract).

Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao, Zhou Hui, Hou Quanlin, Li Jiliang. 2003. Subduction polarity of the prototethys: Insights from the Yirba pluton of the Western Kunlun rang, NW China. Acta Petrological Sinica, 19 (3): 399 ～ 408 (in Chinese with English abstract).

Zhang Chuanlin, Lu Songnian, Yu Haifeng, Ye Haimin. 2007. Tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt in the northern margin of the Tibetan Plateau: evidence from SHRIMP and LA-ICP-MS Zircon dating. Science China Earth Science, 37 (2): 145 ～ 154 (in Chinese).

Zhang Huishan, He Shiping, Ji Wenhua, Wang Chao, Shi Junbao, Kang Kongyue, Zhang Jie, Zhu Dawei, Tang Hongwei, Li Chengdong, Xi Dehua. 2016. Implications of Late Cambrian granite in Tianshuihai Massif for the evolution of Proto-Tethy ocean: Evidences from ziron geochronology and geochemistry. Acta Geological Sinica, 90 (10): 2582 ～ 2602 (in Chinese with English abstract).

Zhang Shizhen, Li Fenqi, Li Yong, Liu Wei, Qin Yadong. 2014. Early Ordovician strongly peraluminous granite in the middle section of the Yarlung Zangbo junction zone and its geological significance. Science China: Earth Sciences, 44(7): 1388～ 1402 (in Chinese with English abstract).

Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, Wu Y B, Li X H, Li Z X, Wu F Y. 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two

episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust. Lithos, 96(1/2): 127 ～ 150.

Zhu R Z, Lai S C, Qin J F A, Zhao S W. 2015. Early-Cretaceous highly fractionated I-type granites from the northern Tengchong block, western Yunnan, SW China: Petrogenesis and tectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 100: 145 ～ 163.

参 考 文 献

崔建堂，王炬川，边小卫，朱海平. 2006. 西昆仑康西瓦一带早古生代石英闪长岩的地质特征及其锆石 SHRIMP U-Pb 测年. 地质通报，25(12)：1450 ～ 1457.

付宇，王生伟，孙晓明，廖震文，蒋小芳，任光明，周邦国，郭阳，王子正. 2015. 云南元谋县黄瓜园花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和岩石地球化学及其地质意义. 地质论评，61(2)：376 ～ 392.

高晓峰，校培喜，康磊，奚仁刚，过磊，谢从瑞，杨再朝. 2013. 西昆仑大同西岩体成因：矿物学－地球化学和锆石 U-Pb 年代学制约. 岩石学报，29(9)：3065 ～ 3079.

黄朝阳. 2014. 西昆仑布伦阔勒群铁矿床地质特征及成因研究. 广州：中国科学院广州地球化学研究所，1 ～ 83.

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.

李献华，李武显，李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. 科学通报，52(9)：981 ～ 991.

林尚康，汤好书，任涛. 2015. 西昆仑赞坎铁矿区英安班岩锆石 U-Pb 年代学研究. 河南科学，33(6)：986 ～ 992.

潘桂棠，朱弟成，王立全，廖忠礼，耿全如，江新胜. 2004. 班公湖－怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据. 地学前缘，11(4)：371 ～ 382.

潘裕生，文世宣，孙东立. 2000. 喀喇昆仑山－昆仑山地区地质演化. 北京：科学出版社，1～523.

乔耿彪，张汉德，伍跃中，金谋顺，杜玮，赵晓健，陈登辉. 2015. 西昆仑大红柳滩岩体地质和地球化学特征及对岩石成因的制约. 地质学报，89(7)：1180 ～ 1194.

曲军峰，张立飞，艾永亮，吕增，王建平，周辉，王世炎. 2007. 西昆仑塔什苦尔干高压麻粒岩 PT 轨迹、SHRIMP 锆石定年及其大地构造意义. 中国科学 D 辑，37：429 ～ 441.

王超，刘良，何世平，杨文强，曹玉亭，朱小辉，李荣社. 2013. 西昆仑早古生代岩浆作用过程：布隆花岗岩地球化学和锆石 U-Pb-Hf 同位素组成研究. 地质科学，48(4)：997 ～ 1014.

吴福元，李献华，杨进辉，郑永飞. 2007b. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报，23(6)：1217 ～ 1238.

吴福元，李献华，郑永飞，高山. 2007a. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报，23(2)：185 ～ 220.

肖序常，王军，苏犁，宋述光. 2003. 再论西昆仑苦地蛇绿岩及其构造意义. 地质通报，22(10)：745～750.

肖序常，王军. 2004. 西昆仑－喀喇昆仑及其邻区岩石圈结构、演化中几个问题的探讨. 地质论评，50(3)：285 ～ 294.

许志琴，戚学祥，刘福来，杨经绥，吴才来，曾令森，梁凤华. 2004. 西昆仑康西瓦加里东期孔兹岩系及地质意义. 地质学报，78(6)：733 ～ 743.

袁超，孙敏，肖文交，周辉，侯泉林，李继亮. 2003. 原特提斯的消减极性：西昆仑 128 公里岩体的启示. 岩石学报，19(3)：399 ～ 408.

张传林，陆松年，于海锋，叶海敏. 2007. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化：来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据. 中国科学 D 辑，37(2)：145 ～ 154.

张辉善，何世平，计文化，王超，史俊波，康孔跃，张杰，祝大伟，汤宏伟，李承栋，葸德华. 2016. 甜水海地块晚寒武世花岗岩对原特提斯洋演化的启示：来自锆石年代学和地球化学的证据. 地质学报，90(10)：2582 ～ 2602.

张士贞，李奋其，李勇，刘伟，秦雅东. 2014. 雅鲁藏布江结合带中段早奥陶世强过铝质花岗岩的厘定及其地质意义. 中国科学：地球科学，44(7)：1388 ～ 1402.

Geochemistry and Hf Isotopic Compositions of Early Paleozoic Granites in Nanpingxueshan from the Tianshuihai Terrane, West Kunlun: Crust-Mantle Magmatism

HU Jun[1), WANG He[2), MU Shenglu[2), WANG Min[2), HOU Xuewen[3)

1) *Wuhan Center of China Geological Survey*, *Wuhan*, 430205, *China*;

2) *Guangzhou Institute of Geochemistry*, *Chinese Academy of Sciences*, *Guangzhou*, 510640, *China*;

3) *Institute of CNNC*. 280, *Guanghan*, 618300, *China*

Abstract

The Early Paleozoic granite in Nanpingxueshan in the eastern part of the Tianshuihai terrane, West Kunlun, consists of medium-grained porphyritic biotite-quartz monzonite (485Ma) and medium to fine-grained biotite-quartz monzonite (528Ma). Chemically, the two rocks are enriched in Si and alkali, and depleted in TFe_2O_3, MgO and CaO, thus suggesting that they can be grouped into high-K calcalkaline and weakly peraluminous granitoids. In terms of trace elements and rare earth elements, the two granites are enriched in Rb, Th, U, K, Pb and LREE, depleted in Ba, Sr, Nb, Ta, Ti and P, with high Rb/Sr, Rb/Ba, Nb/Ta, Y/Yb ratios and strongly negative europium anomalies. They also have lower Zr, Nb, Ce and Y concentrations relative to that of the typical A-type granites. Integrated geological and geochemical discrimination suggests that the Nanpingxueshan granite should be genetically ascribed to highly fractionated I-type granites. The medium-grained porphyritic biotite-quartz monzonite and medium to fine grained biotite-quartz monzonite have narrow zircon Hf isotopic compositions, with positive $\varepsilon_{Hf}(t)$ values ranging from 0.9 ~ 5.3 and 1.4 ~ 5.6, respectively. Correspondingly, they have Mesoproterozoic two-stage Hf model ages ranging from 1118 ~ 1398Ma and 1136 ~ 1396Ma, respectively. Similar geochemical features and zircon Hf isotopic compositions indicate that they were the products of the same magma evolution. Based on evolution history of the regional structure, we can speculate the Proto-Tethys may be bidirectional subduction during early Mesozoic. The Nanpingxueshan granite was formed through a certain extent of fractional crystallization and at least two partial melting of the Mesoproterozoic young crust, which was induced by uprising of mantle magma and invaded into lower crust during the continuous southward subduction-collision of Tethys ocean during Early Cambrian to Early Ordovician.

Key words: Early Paleozoic granite; geochemistry; Hf isotopic compositions; Proto-Tethys ocean; Nanpingxueshan; Tianshuihai terrane