中国科学: 地球科学 2012 年 第 42 卷 第 3 期: 359 ~ 368
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

北阿尔金地区早古生代有限洋盆开启时限: 来自斜长花岗岩的证据

高晓峰*, 校培喜, 过磊, 董增产, 奚仁刚

西安地质矿产研究所, 西安 710054
* E-mail: xfgao2000@163.com

收稿日期: 2011-04-21; 接收日期: 2011-08-23
国家自然科学青年基金(批准号: 41002020)和中国地质调查局项目(编号: 1212010911025)资助

摘要 红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带中的斜长花岗岩野外地质、岩相学、岩石学、地球化学和锆石组成的综合研究表明, 红柳沟斜长花岗岩为洋壳运移过程中含水条件下镁铁质岩石发生角闪岩相变质作用后部分熔融形成的; 该类花岗岩锆石年龄代表了与洋壳扩张同期或者稍晚于洋壳扩张时代的洋盆的扩展时代; 红柳沟斜长花岗岩 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(512.1±1.5) Ma, 这一结果表明红柳沟-拉配泉有限洋盆的开启时限为中寒武世.

关键词
斜长花岗岩
有限洋盆
早古生代
北阿尔金地区

阿尔金造山带是青藏高原的北部边界, 是中国西部主要大地构造单元的交接部位, 该构造带经历了多期复杂演化地质演化, 由不同构造层次、不同时期和形成不同构造环境的地质体组成的复合造山带[1~4]. 依据区内地质特征、岩石学和地球化学研究, 该构造带从北向南依次可以划分为四个构造单元: 阿北地块、红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带、米兰河-金雁山地块和阿帕-茫崖构造混杂岩带[3,5,6].

红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带作为区域上早古生代东西向一条重要的缝合带. 前人通过镁铁质岩石、花岗质岩石和高压变质岩研究取得了一系列研究成果[1~6]. 目前对红柳沟-拉配泉洋(有限洋盆)打开时限还存在认识上的分歧. 郭召杰等[7]取得的阿尔金北缘半鄂博辉长岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 829 Ma, 认为代表北阿尔金蛇绿岩的时代; 新疆维吾尔自治区地质矿产局[8]认为形成于中元古代; 孙勇等[9]在拉配泉断裂之北获得基性火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄为(1793±270) Ma; 崔军文等[2]认为索尔库里一带的变质火山岩与基性-超基性岩共同组成的蛇绿岩形成于元古宙. 总体上, 上述研究认为红柳沟-拉配泉蛇绿岩套为前寒武纪大洋残片. 刘良[10]取得米兰红柳沟基性火山岩 Sm-Nd 等时线年龄为(508±41) Ma, 认为其代表北缘蛇绿岩的年龄; 车自成等[1]根据贝克滩洋岛玄武岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 524 Ma 和沉积建造、化石等资料推断阿尔金北缘蛇绿构造混杂岩带的形成时代为晚寒武世-早奥陶世. 杨经绥等[11]获得蛇绿岩套组成部分的辉长岩的 SHRIMP U-Pb 同位素年龄为(479.4±8.5) Ma, 修业群等[12]报道米兰红柳沟枕状熔岩的单颗粒锆石同位素稀释(TIMS) U-Pb 年龄为(448.6±3.3) Ma. 近年来在红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带南北两侧发现一系列与洋盆关闭和洋壳俯冲相关花岗岩, 锆石 SHRIMP U-Pb 测年获得南带岛弧型石英闪长岩年龄为(481.6±5.6) Ma, 北带花岗闪长岩年龄为(481.5±5.3)

英文引用格式: Gao X F, Xiao P X, Guo L, et al. Opening of an early Paleozoic limited oceanic basin in the northern Altyn area: Constraints from plagiogranites in the Hongliugou-Lapeiquan ophiolitic mélange. Sci China Earth Sci, 2011, 54: 1871−1879, doi: 10.1007/s11430-011-4332-9

Ma. 另外, 在南带还获得了一些碰撞后 S 型花岗岩年龄为 437, 433, 411 和 434 Ma[13~16]. 上述的研究成果证实了红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带经历了复杂的构造演化过程, 我们通过对蛇绿构造混杂岩中斜长花岗岩年代学和地球化学的研究对区域构造演化或许能够提供了新的认识.

1 区域地质背景和岩相学特征

红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带位于阿尔金造山带北缘, 是北阿尔金近东西向构造带的重要组成部分, 北部为塔里木地块太古宙变质结晶基底, 南部为前寒武纪米兰河-金雁山地块, 其间分别以脆韧性断裂为界[13,17](图 1).

红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带走向近东西, 宽约 20 km, 主要由蛇绿岩、具复理石特征的深海、半深海碎屑岩、碳酸盐岩和变质岩组成. 蛇绿岩主要由玄武岩、枕状玄武岩、细碧岩、凝灰岩、硅质岩及基性、超基性岩脉或岩墙组成, 具有过渡型洋中脊玄武岩性质, 并与洋岛玄武岩共生[7,18~20]. 变质岩主要为

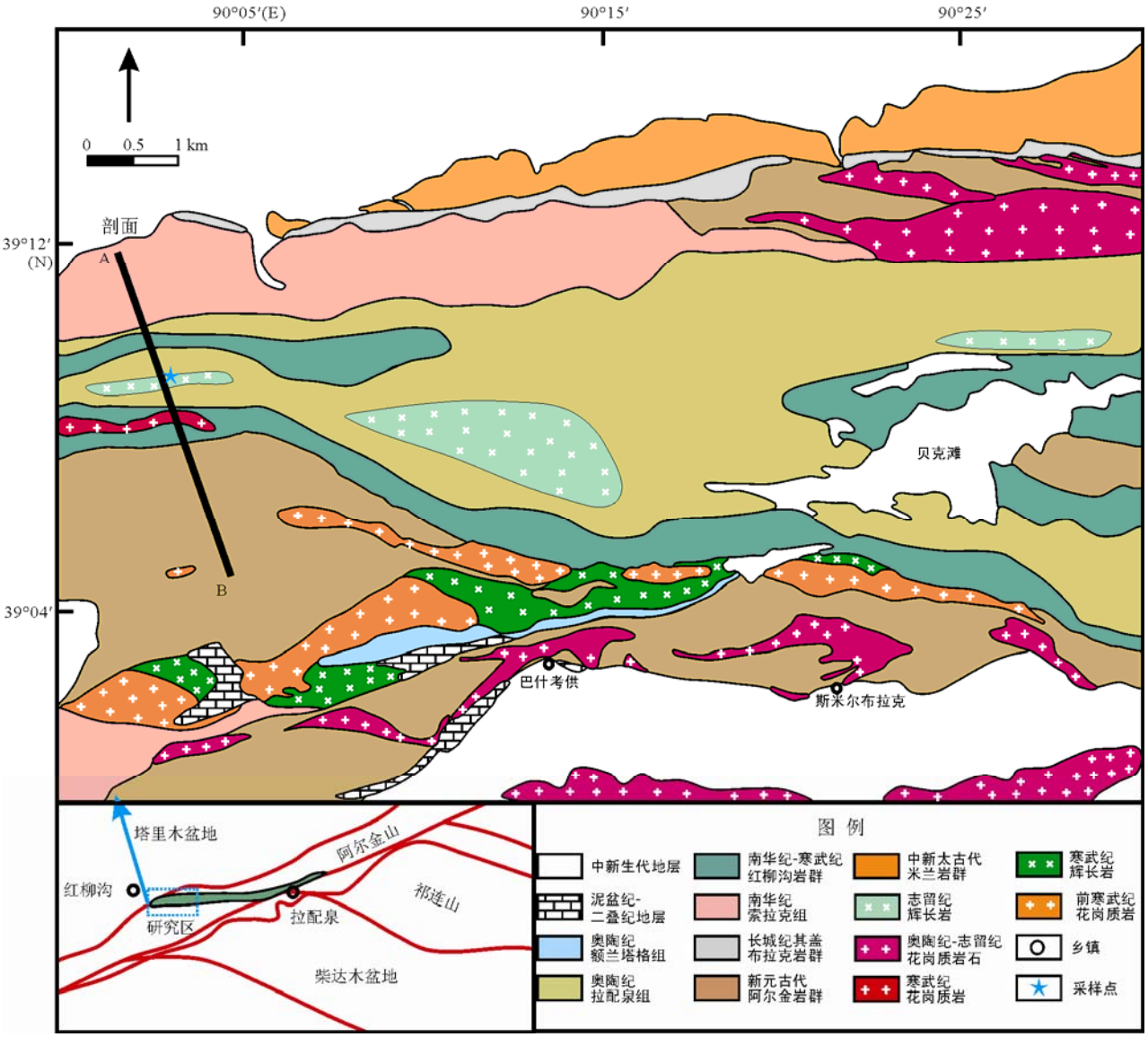


图 1 红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带地质略图

据文献[2]修改

高压变质泥岩(蓝片岩), 出露于俯冲增生楔杂岩中部贝克滩东侧, 呈透镜状产出, 走向近东西, 南北宽 1~5 km, 东西长约 40 km, 与围岩呈断层接触, 主要矿物都发生不同程度的塑性变形, 如石英呈缎带状亚颗粒定向分布, 与多硅白云母、蓝晶石等片柱状矿物一起构成走向近东西, 向南陡倾的糜棱面理, 是陆壳物质俯冲到约 80 km 深处形成的一套高压变质岩系[20,21]. 碳酸盐岩呈团块状或薄层状产出.

红柳沟斜长花岗岩呈岩脉产出红柳沟岩群中, 与围岩为构造断层接触, 具有一定程度的糜棱岩化, 最大宽度达数米级, 整体呈网脉状产出于斜长角闪岩(原岩为辉长岩)围岩中(图 2, 3), 采样点坐标为 39°8′5.4″N, 90°4′42.2″E. 斜长花岗岩呈浅灰白色, 中细粒结构, 块状构造, 主要由斜长石(75%~80%)、石英(15%~20%)、角闪石(5%左右)及少量副矿物(如锆石等)组成, 斜长石成分为更-中长石, 呈不规则粒状, 粒径大小约在 0.5~1 mm, 斜长石局部发生绿帘石化和绢云母化, 石英为不规则粒状, 粒径大小为 0.2~0.5 mm, 并出现波状消光、细粒化等现象, 角闪石也为不规则粒状, 粒径大小为 0.1~0.2 mm, 整体上为变晶斜长花岗岩(图 4(a), (b)).

2　主、微量元素地球化学特征

主、微量元素的分析结果见表 1. 主、微量元素在西安地质矿产研究所实验测试中心 X 荧光光谱

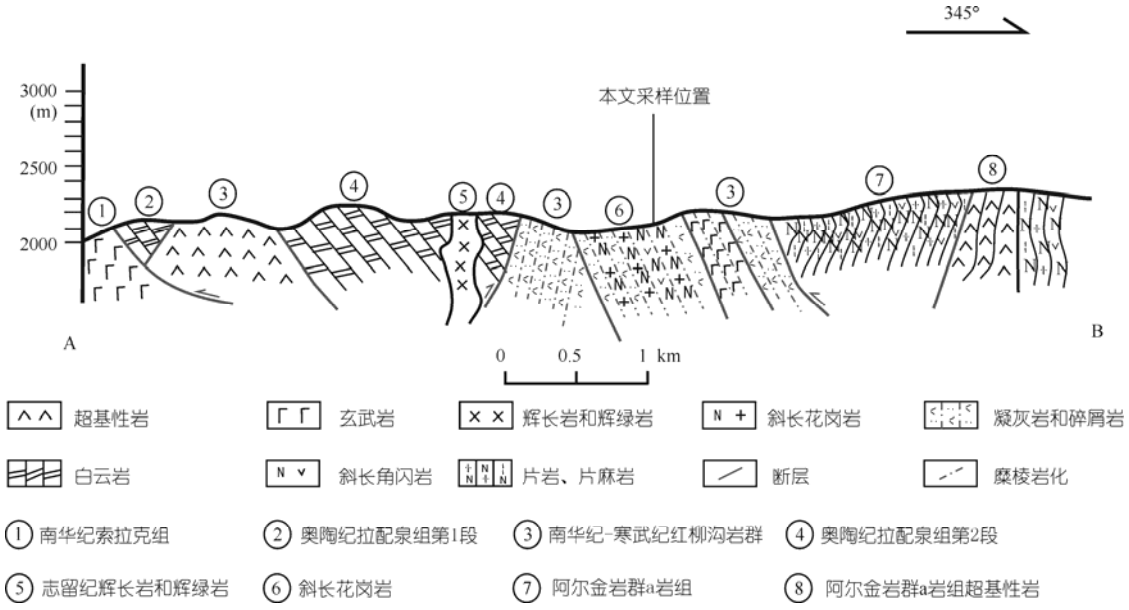


图 2　红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带剖面图

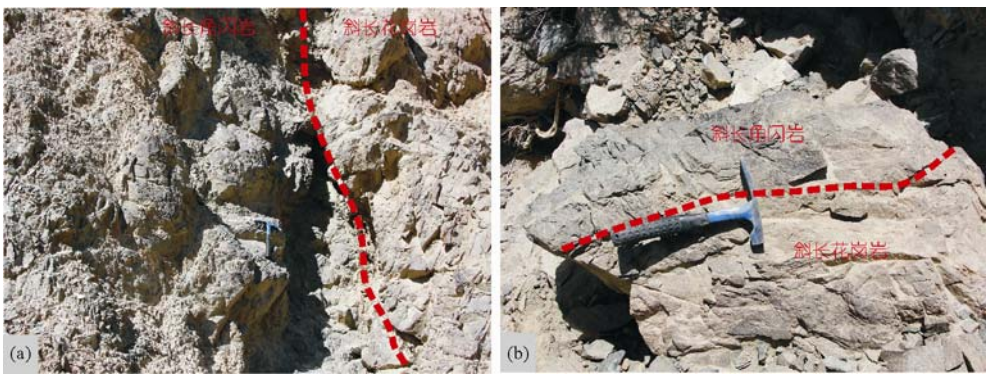


图 3　红柳沟斜长花岗岩野外地质产状

(a) 斜长角闪岩中的斜长花岗岩; (b) 斜长角闪岩和斜长花岗岩共生

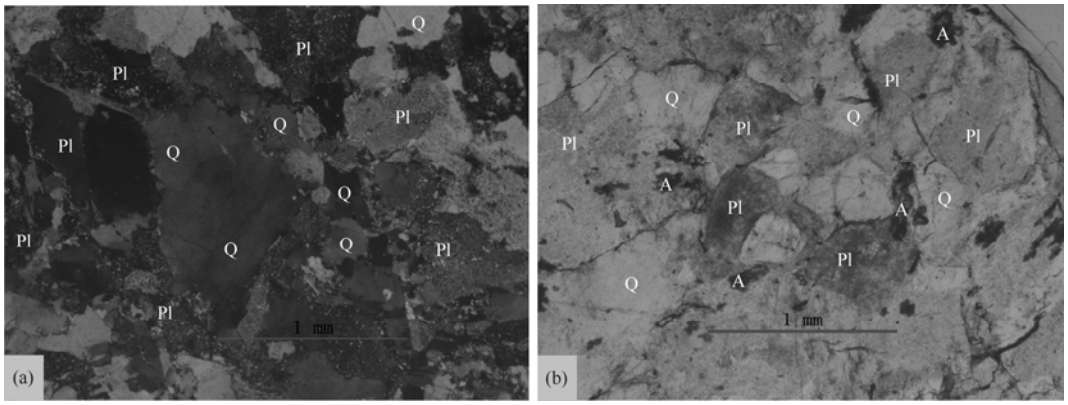


图 4　红柳沟斜长花岗岩显微特征

(a) 斜长花岗岩中的斜长石(Pl)和石英(Q), 正交偏光; (b)斜长花岗岩中的斜长石(Pl), 石英(Q)和角闪石(A), 单偏光

表 1　红柳沟斜长花岗岩主量元素(wt%)和微量元素(μg g^{-1})分析结果

样品号	09HLG-01	09HLG-02	09HLG-03	09HLG-04	09HLG-05	09HLG-06	09HLG-07
SiO_2	73.63	74.36	73.1	73.52	72.88	73.22	73.06
TiO_2	0.22	0.20	0.22	0.25	0.24	0.24	0.21
Al_2O_3	13.59	12.71	13.91	13.76	14.08	14.34	13.97
Fe_2O_3	0.53	0.91	0.87	0.87	0.87	0.81	0.93
FeO	0.58	0.58	0.7	0.6	0.6	0.72	0.76
CaO	2.98	3.99	3.07	3.13	3.2	2.5	3.32
MgO	0.65	0.5	0.87	0.76	0.73	0.8	0.61
K_2O	0.79	0.4	0.8	1.01	1.18	1.14	0.7
Na_2O	5.12	4.8	4.83	4.46	4.48	4.64	4.88
P_2O_5	0.054	0.049	0.053	0.061	0.059	0.058	0.051
MnO	0.04	0.043	0.04	0.056	0.054	0.046	0.052
LOI	2.12	1.81	2.01	2.07	2.11	1.82	1.78
总量	100.30	100.35	100.47	100.55	100.48	100.33	100.32
FeO_T	1.08	1.42	1.51	1.40	1.41	1.47	1.62
$Mg^{\#}$	0.46	0.33	0.45	0.43	0.42	0.44	0.35
Pb	8.61	8.18	7.39	10.9	11	12.1	5.75
Cr	6.15	5.52	3.41	4.95	167	6	4.01
Ni	2.38	2.87	6.3	3.86	11.6	3.92	1.89
Co	2.43	2.48	2.93	3.59	7.3	5.9	2.23
Rb	34.8	16.9	33.4	48	54.6	54.6	9.49
Sr	205	278	276	261	224	258	170
Ba	402	363	391	562	580	681	205
Nb	9.55	10.1	11.7	10.2	10.9	9.93	8.84
Ta	0.73	0.79	0.96	0.79	0.82	0.72	0.7
Zr	114	100	105	121	114	124	105
Hf	2.95	2.75	3	3.22	3.04	3.22	2.7
U	2.47	2.92	3.19	2.92	3.14	2.68	2.66
Th	12.10	12.10	14.00	11.90	12.20	11.90	9.58
La	29.6	26.7	28.7	24.5	24	22.6	22
Ce	54.7	50.2	53.9	46.5	44.5	43.9	37.6
Pr	5.58	4.99	5.61	4.78	4.65	4.61	4.45
Nd	18.4	16.2	18.5	15.9	15.5	15.2	14.5
Sm	3.04	2.61	3.2	2.85	2.81	2.74	2.48

表 1(续)

样品号	09HLG-01	09HLG-02	09HLG-03	09HLG-04	09HLG-05	09HLG-06	09HLG-07
Eu	0.62	0.6	0.66	0.71	0.72	0.72	0.56
Gd	2.5	2.35	2.86	2.5	2.61	2.48	2.15
Tb	0.37	0.36	0.42	0.37	0.4	0.37	0.32
Dy	2.1	2.19	2.56	2.38	2.51	2.28	1.91
Ho	0.48	0.52	0.59	0.54	0.56	0.52	0.43
Er	1.49	1.48	1.76	1.62	1.64	1.54	1.25
Tm	0.23	0.22	0.27	0.25	0.25	0.24	0.21
Yb	1.56	1.63	1.87	1.81	1.84	1.72	1.42
Lu	0.25	0.25	0.31	0.29	0.3	0.28	0.24
Y	14.1	14.7	16.8	16	16.4	14.9	11.8
ΣREE	120.92	110.3	121.21	105	102.29	99.2	89.52
Sr/Y	15	19	16	16	14	17	14
La/Yb_N	12.82	11.07	10.37	9.15	8.81	8.88	10.47
La/Sm_N	6.13	6.44	5.65	5.41	5.38	5.19	5.58
Dy/Yb_N	0.88	0.87	0.89	0.86	0.89	0.86	0.88

(XRF)和等离子光谱质谱法(ICP-MS)测定, 主量元素的分析测试误差小于 1%, 其中 FeO 含量通过湿化学方法测定, 微量元素的分析测试误差在 5%左右. 在主量元素无水化处理后, 红柳沟斜长花岗岩 SiO_2= 74.09 wt%~75.46 wt%, Al_2O_3 = 12.90 wt%~14.56 wt%, FeO_T = 1.08 wt%~1.62 wt%, CaO = 2.54 wt%~4.05 wt%, MgO = 0.51wt%~0.88 wt%, K_2O = 0.41 wt%~1.20 wt%, Na_2O = 4.53 wt%~5.21 wt%, TiO_2 = 0.20 wt%~0.25 wt%, P_2O_5 = 0.05 wt%~0.06 wt%, Na_2O/K_2O=3.8~12. 在 SiO_2-(K_2O+Na_2O)和 A/CNK-A/NK 比值图上(图略), 斜长花岗岩属于低钾准铝质岩石系列.

在稀土元素的配分模式图上, 所有样品均表现出 LREE 略富集右倾配分模式(图 5(a)), 斜长花岗岩的ΣREE=89.52~121.21 μg g^{-1}, $(La/Yb)_N$=8.81~12.82, $(La/Sm)_N$=5.19~6.44, $(Dy/Yb)_N$=0.86~0.89, HREE 内部基本不分馏, 铕负异常(δEu_N = 0.65~0.80). 在微量元素蛛网图上(图 5(b)), 不相容元素呈现 LILEs (Th = 9.58~14.00 μg g^{-1}, Ba = 205~681 μg g^{-1})相对 HFSEs (Nb = 8.84~11.70 μg g^{-1}, Ta = 0.70~0.96 μg g^{-1})富集, 并表现 Sr, P, Ti 亏损. 总体上, 红柳沟斜长花岗岩表现出与加拿大阿巴拉契亚富尔尼耶蛇绿岩由镁铁质岩石发生角闪岩相变质后部分熔融形成斜长花岗岩微量元素特征[24], 而区别于挪威西部卡姆岛蛇绿岩中的东卡姆岛由辉长岩直接深熔作用形成的斜长花岗岩[25], 暗示着其源岩很可能为发生角闪岩相变质作用的洋壳物质.

3 锆石特征及 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年结果

锆石 CL 图像和 U-Pb 同位素年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行, 详细的分析测试步骤见文献[26, 27]. 斜长花岗岩(09HLG-07)的锆石粒度较小, 粒径在 100 μm 以下, 阴极发光图像(CL)显示大部分锆石具有良好的晶形, 呈现岩浆结晶环带或条带结构, 内部无残留核, 外部无变质边, 具有岩浆锆石的特征(图 6). 一般认为岩浆锆石的 Th/U 比值>0.4, 接近 1, 且 Th 和 U 具有良好的正相关关系[28]. 从表 2 可以看出, 23 个测点的 Th 含量在 56~347 μg g^{-1}, U 的含量在 89~336 μg g^{-1}之间, Th/U 比值变化较小, 并接近于 1 (Th/U = 0.63~1.04), Th 和 U 具有良好的正相关关系, 显示了岩浆锆石的特征, 与阴极发光图像的分析结果是一致的(S18 点具有较高的 Th 和 U 含量, 分别为 826 和 602 μg g^{-1}, 且 Th/U = 1.37).

LA-ICP-MS U-Pb 测年结果显示, 24 个测点 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄在 506~519 Ma 之间(表 2), 22 个点给出了(512.1±1.5) Ma (n=22, MSWD=0.71)的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄(图 7(a)), 22 个点均接近于谐和线, 说明测试结果是可靠的, 代表了斜长花岗岩的结晶年龄(除 S14 点和 S18 点). 另外, 除 S18 点外, 23 点均具有典型岩浆锆石的稀土元素配分模式也证实了加权平均年龄代表了斜长花岗岩形成年龄[29](图 7(b), 表 3), S18 点虽然偏离的谐和线和相对平缓的锆石稀土元

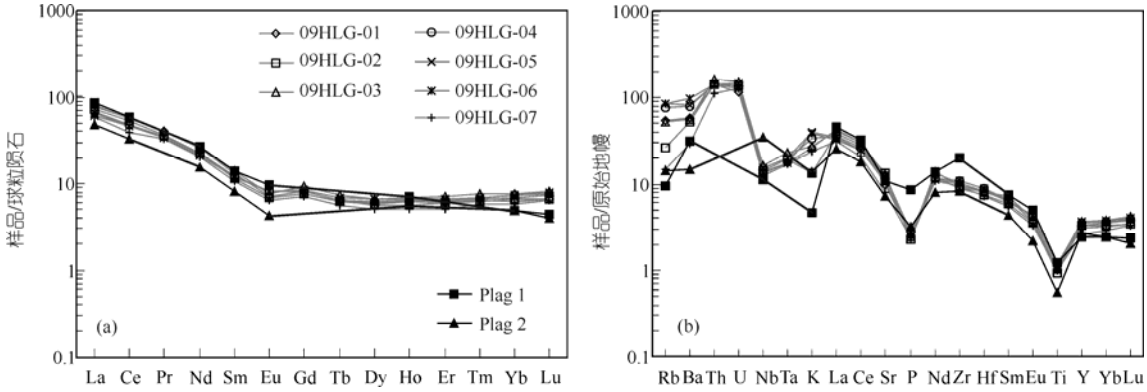


图 5　红柳沟斜长花岗岩的球粒陨石标准化 REE 配分模式(a)和原始地幔标准化不相容元素蛛网图(b)

球粒陨石和原始地幔标准化值分别引自文献[22, 23], 样品 Plag 1 和 2 数据引自文献[24]

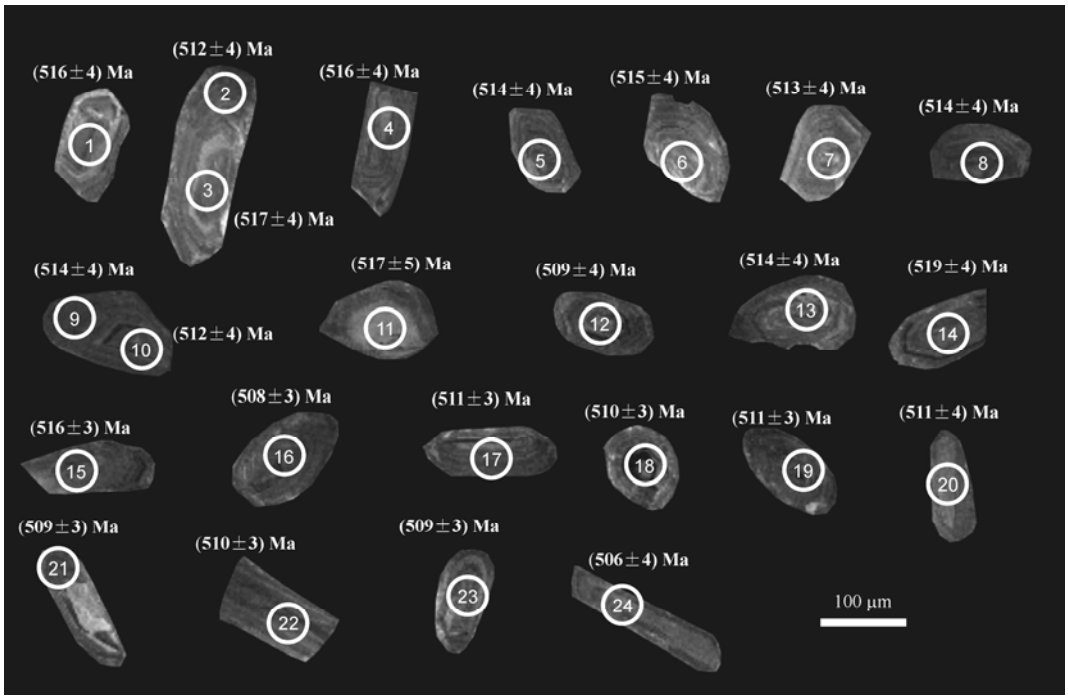


图 6　红柳沟斜长花岗岩样品(09HLG-07)锆石 CL 图像

素配分模式, 但是其年龄点在一致线上, 偏离的原因很可能与其较高的 Th 和 U 含量有关.

4　岩石成因及构造意义

与蛇绿岩相关的花岗岩的成因主要有以下 4 种类型[30,31]: (1) 大洋洋壳形成或海底扩张过程中由基性岩浆直接结晶分异形成, 一般以岩脉形式产出, 规模较小, 代表了洋壳形成时代[32,33]; (2) 洋壳运移剪切带形成的斜长花岗岩, 由角闪岩相原岩熔融形成的, 反映了洋内变质-变形事件, 其形成年龄相当于洋壳形成时代或略晚[24,25]; (3) 洋壳俯冲过程中洋壳脱水部分熔融形成埃达克岩质侵入岩或埃达克岩, 这种类型的花岗岩代表了洋壳开始俯冲闭合[34,35]; (4) 蛇绿岩仰冲就位过程时, 推覆断层下面的岩石, 由于剪切热和仰冲到其上的的大洋岩石圈地幔本身热的共同作用下, 大陆边缘盆地沉积物和以及少了火成岩在含水部分熔融形成的花岗岩, 代表了大洋岩石

表 2　红柳沟斜长花岗岩(09HLG-07)锆石 U-Pb 定年结果

样品点	Th ($\mu g\ g^{-1}$)	U ($\mu g\ g^{-1}$)	Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ
09HLG07-1	186	179	1.04	0.0614	0.0014	0.0833	0.0006	0.7055	0.0149	0.0260	0.0003	516	4	542	9	519	5
09HLG07-2	186	243	0.77	0.0601	0.0012	0.0826	0.0006	0.6843	0.0126	0.0259	0.0003	512	4	529	8	517	5
09HLG07-3	143	142	1.01	0.0682	0.0017	0.0835	0.0007	0.7852	0.0184	0.0276	0.0003	517	4	588	10	551	6
09HLG07-4	203	202	1.00	0.0581	0.0014	0.0833	0.0006	0.6667	0.0144	0.0247	0.0003	516	4	519	9	493	5
09HLG07-5	209	225	0.93	0.0605	0.0013	0.0830	0.0006	0.6921	0.0131	0.0261	0.0002	514	4	534	8	521	5
09HLG07-6	141	160	0.88	0.0583	0.0016	0.0831	0.0007	0.6680	0.0168	0.0275	0.0003	515	4	520	10	548	7
09HLG07-7	223	246	0.91	0.0624	0.0013	0.0828	0.0006	0.7127	0.0128	0.0272	0.0002	513	4	546	8	542	5
09HLG07-8	170	200	0.85	0.0612	0.0014	0.0830	0.0006	0.7009	0.0143	0.0269	0.0003	514	4	539	9	536	6
09HLG07-9	207	212	0.98	0.0580	0.0013	0.0830	0.0006	0.6641	0.0139	0.0251	0.0003	514	4	517	8	500	5
09HLG07-10	199	235	0.85	0.0589	0.0013	0.0827	0.0006	0.6716	0.0132	0.0264	0.0003	512	4	522	8	526	5
09HLG07-11	56	89	0.63	0.0586	0.0020	0.0835	0.0008	0.6747	0.0220	0.0258	0.0005	517	5	524	13	514	9
09HLG07-12	282	271	1.04	0.0585	0.0012	0.0821	0.0006	0.6623	0.0126	0.0217	0.0002	509	4	516	8	435	4
09HLG07-13	156	171	0.91	0.0566	0.0015	0.0830	0.0007	0.6473	0.0157	0.0248	0.0003	514	4	507	10	495	6
09HLG07-14	176	189	0.93	0.0943	0.0020	0.0838	0.0007	1.0899	0.0212	0.0367	0.0004	519	4	748	10	729	8
09HLG07-15	347	336	1.03	0.0583	0.0010	0.0833	0.0006	0.6698	0.0105	0.0251	0.0002	516	3	521	6	501	4
09HLG07-16	283	288	0.98	0.0585	0.0011	0.0820	0.0006	0.6621	0.0115	0.0227	0.0002	508	3	516	7	453	4
09HLG07-17	236	274	0.86	0.0587	0.0012	0.0825	0.0006	0.6679	0.0119	0.0227	0.0002	511	3	519	7	453	4
09HLG07-18	826	602	1.37	0.1332	0.0016	0.0824	0.0005	1.5128	0.0135	0.0339	0.0002	510	3	936	5	674	3
09HLG07-19	199	236	0.84	0.0589	0.0012	0.0825	0.0006	0.6696	0.0118	0.0231	0.0002	511	3	521	7	461	4
09HLG07-20	150	206	0.73	0.0560	0.0012	0.0825	0.0006	0.6373	0.0126	0.0227	0.0003	511	4	501	8	454	5
09HLG07-21	220	253	0.87	0.0626	0.0012	0.0822	0.0006	0.7095	0.0116	0.0241	0.0002	509	3	545	7	481	4
09HLG07-22	216	228	0.95	0.0577	0.0012	0.0822	0.0006	0.6546	0.0120	0.0220	0.0002	510	3	511	7	439	4
09HLG07-23	226	264	0.86	0.0590	0.0011	0.0822	0.0006	0.6684	0.0115	0.0231	0.0002	509	3	520	7	461	4
09HLG07-24	149	233	0.64	0.0630	0.0013	0.0816	0.0006	0.7091	0.0136	0.0237	0.0003	506	4	544	8	473	6

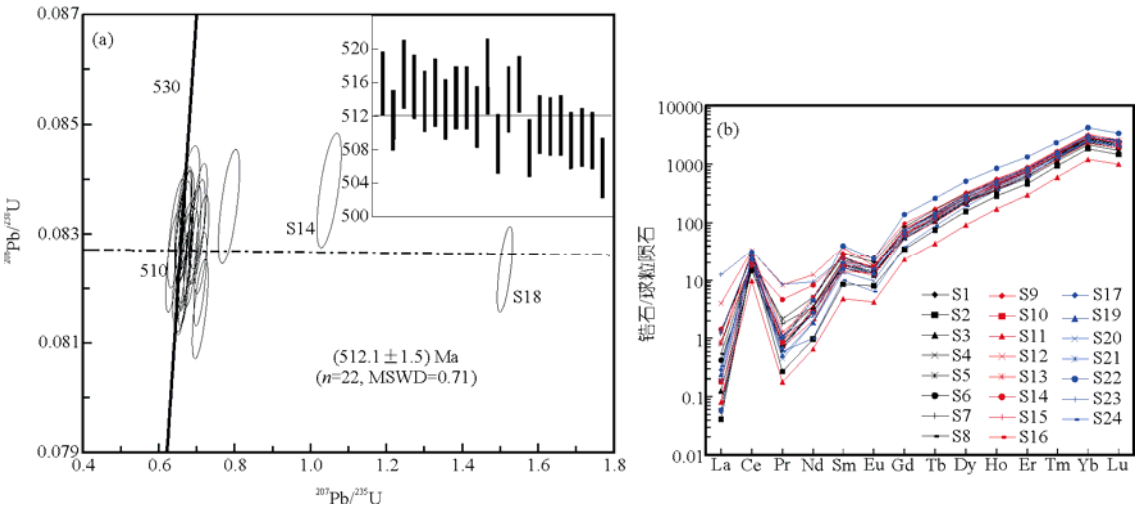


图 7　红柳沟斜长花岗岩样品(09HLG-07)锆石 U-Pb 年龄和 REE 配分模式

圈岩片的仰冲和就位[36].

红柳沟斜长花岗岩表现出低 Al_2O_3 (12.90 wt%~14.56 wt%), K_2O (0.41 wt%~1.20 wt%)和富钠 Na_2O (4.53 wt%~5.21 wt%)等与传统的大洋斜长花岗岩相似的地球化学特征, 但是其较高 MgO ($Mg^{\#}$ = 0.33~0.46) 和 LREE 富集的稀土元素分布模式说明其不可能由大洋玄武质岩浆直接结晶分异形成的. 代表洋壳俯冲作用形成的花岗岩具有类似 adakite 岩地球化学特征(Al_2O_3>15wt%, $Mg^{\#}$>0.47, Sr 的含量>400 $\mu g\ g^{-1}$ 以及 Sr/Y≥20~40), 红柳沟斜长花岗岩表现出与 adakite

表 3　红柳沟斜长花岗岩(09HLG-07)锆石稀土元素分析结果(μg g^{-1})

样品点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
09HLG07-1	0.02	16.61	0.13	3.34	6.66	1.83	26.37	9.59	119.94	44.45	202.40	55.54	711.91	85.26
09HLG07-2	0.01	19.66	0.04	0.70	1.99	0.69	10.71	4.38	59.64	24.07	117.32	34.29	462.25	55.79
09HLG07-3	0.05	14.67	0.09	2.38	3.73	1.05	17.46	6.17	81.98	30.93	146.28	40.80	540.93	64.97
09HLG07-4	0.02	17.71	0.14	2.56	5.11	1.48	22.21	7.99	103.68	38.46	181.64	50.68	667.29	79.43
09HLG07-5	0.29	19.50	0.30	3.59	5.79	1.40	22.09	8.08	102.98	39.46	187.74	53.22	699.96	85.60
09HLG07-6	0.15	13.97	0.10	2.01	4.37	1.23	18.31	6.54	84.69	33.08	157.22	44.67	590.39	71.35
09HLG07-7	0.45	24.75	0.24	2.44	4.21	1.11	18.87	7.12	91.80	36.68	179.18	51.17	695.17	83.53
09HLG07-8	0.20	18.77	0.11	2.05	4.13	1.16	18.32	6.68	88.15	34.97	169.09	48.24	641.92	77.75
09HLG07-9	0.07	18.40	0.14	3.62	6.77	2.12	29.48	10.00	125.72	47.47	217.99	60.28	784.62	91.47
09HLG07-10	0.07	19.62	0.12	1.97	4.15	1.44	19.63	7.75	99.30	38.61	187.48	52.94	708.23	86.00
09HLG07-11	0.03	9.16	0.02	0.47	1.12	0.37	7.08	2.52	34.63	14.54	74.85	21.65	297.58	38.43
09HLG07-12	1.46	31.33	1.11	8.84	8.56	1.55	24.51	8.38	108.32	42.35	203.48	57.80	769.51	96.01
09HLG07-13	0.33	16.38	0.13	2.03	3.32	1.14	16.24	6.07	81.11	31.86	155.30	43.60	573.52	71.44
09HLG07-14	0.52	17.61	0.63	5.94	5.58	1.46	20.09	6.81	91.98	35.65	167.91	47.98	616.02	77.66
09HLG07-15	0.29	31.54	0.18	2.50	4.77	1.49	23.18	8.85	117.15	46.88	222.81	61.66	798.31	100.03
09HLG07-16	0.03	26.20	0.10	1.46	3.85	1.07	18.69	7.27	97.89	39.89	194.62	55.13	714.34	91.65
09HLG07-17	0.11	23.47	0.09	2.00	4.74	1.35	22.46	8.37	110.72	43.79	209.19	58.45	761.28	93.36
09HLG07-18	23.42	143.51	18.69	126.40	66.38	6.80	95.87	24.63	248.89	85.57	372.25	98.22	1256.59	146.23
09HLG07-19	0.09	22.85	0.07	1.35	3.76	1.17	20.56	7.47	101.04	40.89	201.21	56.99	732.86	99.24
09HLG07-20	0.07	18.08	0.06	1.29	3.22	0.85	16.23	6.39	84.12	34.29	168.86	47.57	634.04	80.54
09HLG07-21	0.49	25.87	0.15	1.72	4.05	1.24	17.87	7.11	92.50	36.47	178.46	50.16	657.07	84.16
09HLG07-22	0.02	29.00	0.14	3.22	9.00	2.06	42.06	15.31	193.92	72.26	327.07	86.70	1054.10	126.68
09HLG07-23	4.61	31.45	1.18	6.65	5.72	1.30	22.31	8.45	112.45	44.66	213.65	58.90	750.44	96.62
09HLG07-24	0.12	20.54	0.08	0.72	2.30	0.56	11.82	5.11	73.00	30.99	154.93	45.86	615.24	76.28

岩明显差异的地球化学特征暗示其也不可能由大洋俯冲过程中由板片和大洋沉积物在高压角闪岩相-榴辉岩相条件下部分熔融形成(表1). 蛇绿岩就位过程中陆壳物质参与熔融形成的花岗岩是过铝质、富钾的, 并显示出陆壳物质的明显印记, 而不是红柳沟斜长花岗岩所表现出低钾准铝质的.

来自镁铁质岩石的部分熔融实验岩石学资料显示[38~40], 镁铁质岩石在压力大于 1.5 GPa 条件下部分熔融, 由于源岩中的斜长石不稳定向石榴石转变, 它们的HREE和Y进入到石榴石等残留相中, 其熔融形成的中酸性岩浆具有高 Sr 并低 HREE 和 Y 的类似于现代俯冲带 adakite 岩或太古代 TTG 岩石的特征[41,42]; 镁铁质岩石在低压条件下(如 P=1.0 GPa)条件下熔融出的中酸性熔体主要为富钠特征. 红柳沟斜长花岗岩不具有 adakite 岩地球化学特征, 因此其很可能为镁铁质岩石在相对低压条件下熔融的产物, 由于板块运动使得洋壳下部岩浆房中仍然是热的、塑性的辉长岩发生低角度的剪切变形, 同时水的加入降低镁铁质岩石的熔点, 在剪切热和镁铁质岩石本身热的共同作用下, 镁铁质岩石先发生角闪岩相的变质作用, 继而部分熔融形成斜长花岗岩[30,31]. 红柳沟斜长花岗岩表现出平缓右倾的稀土元素的配分模式, 并具有一定程度的 Eu 的负异常及 Sr, P 和 Ti 亏损, 说明角闪岩在含水低压条件下部分熔融, 熔融的残留矿物为角闪石和斜长石不含石榴石, 部分熔融反应为: 角闪石+斜长石(An53)+富铁副矿物→角闪石+斜长石(An75)+贫铁副矿物+熔体, 因此该类花岗岩通常富硅、贫铝、$Na_2O>K_2O$ 和 $Mg^{\#}<0.5$, 以及 LREE 略富集稀土元素的配分模式[24]. 上述特征是和红柳沟斜长花岗岩(矿物组成中斜长石为更-中斜长石)地球化学特征是一致的. 总之, 红柳沟斜长花岗岩具有与韧性剪切带共生野外地质特征, 矿物组成上以更-中斜长石为主, 与镁铁质岩石低压部分熔融产生的熔体相似的地球化学特征说明红柳沟斜长花岗岩为洋壳运移剪切带中由角闪岩相物质部分熔融形成的, 其形成年龄代表了洋壳形成时代或略晚.

目前, 北阿尔金蛇绿构造混杂岩为早古生代产物已基本取得共识[1,10,11], 修业群等[12]报道米兰红柳沟枕状熔岩的单颗粒锆石同位素稀释(TIMS) U-Pb 年龄为(448.6±3.3) Ma 与区域上发育大量碰撞后 S 型花

岗岩[13~16]是矛盾的. 杨经绥等[11]取得了蛇绿岩组成部分的堆晶辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 479 Ma, 很可能代表了后期新洋壳形成的时代, 我们这套由洋壳运移过程剪切带中镁铁质岩石部分熔融形成的斜长花岗岩, 其形成的年龄代表了红柳沟-拉配泉有限洋的开启时限. 结合前人对红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带沉积建造、化石等资料的系统研究, 我们认为阿尔金北缘有限洋盆的开启时限为中寒武世, 并经历了相对较长洋壳发展过程. 中国西部在南华纪普遍经历了相当于扬子板块晚南华世南沱期的冰碛岩, 如塔里木北缘库鲁克塔格的库鲁克塔格群, 随后开始了早古生代大陆裂解, 形成多岛弧-有限洋盆大地构造格局[43], 因此我们认为红柳沟-拉配泉有限洋的开启时限应该为早古生代, 和区域上整体的大地构造演化格局是一致的.

5 结论

通过对红柳沟斜长花岗岩野外地质特征、岩相学、岩石地球化学和同位素年代学的研究, 本文获得以下主要认识:

(1) 红柳沟斜长花岗岩形成年龄(512±1.5) Ma 代表了红柳沟-拉配泉有限洋的开启时限, 时代为中寒武世.

(2) 在岩石成因上, 红柳沟斜长花岗岩为洋壳运移过程中镁铁质岩石角闪岩相变质作用继而发生含水低压条件下部分熔融, 熔融残留矿物为角闪石和斜长石不含石榴石, 熔体为斜长花岗岩.

(3) 红柳沟斜长花岗岩的发现对于精确确定红柳沟-拉配泉有限洋开启时限提供了重要的同位素年代学依据, 为深入研究区域早古生代构造演化格局奠定了物质基础.

致谢 本文在成稿过程中得到郭锋研究员和两位匿名审稿人的建设性的意见和建议, 在此深表感谢.

参考文献

1 车自成, 刘良, 罗金海. 中国及其邻区区域大地构造学. 北京: 科学出版社, 2002. 207–369
2 崔军文, 唐哲民, 邓晋福, 等. 阿尔金断裂系. 北京: 地质出版社, 1999. 137–249
3 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪机制. 地质学报, 1999, 73: 193–205
4 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义. 科学通报, 1996, 41: 1485–1488
5 Liu L, Che Z C, Luo J H, et al. A discussion on the structure and tectonic evolution of the Altyn Tagh orogenic Zone. Earth Sci Fron, 2000, 7(Suppl): 206
6 Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and geochronology of eclogite from the western segment of the Altyn Tagh, northwern China. Lithos, 2001, 56: 187–206
7 郭召杰, 张志诚, 王建君. 阿尔金山边缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义. 科学通报, 1998, 43: 1981–1984
8 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京, 地质出版社, 1993. 1–841
9 孙勇, 刘池阳, 车自成. 阿尔金拉配泉地区元古界裂谷火山岩系及其构造意义. 地质论评, 1997, 43: 17–24
10 刘良. 阿尔金高压变质岩与蛇绿岩及其大地构造意义. 中国科学院地质与地球物理研究所博士论文, 1999. 1–70
11 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 等. 北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年. 岩石学报, 2008, 24: 1567–1584
12 修业群, 于海峰, 刘永顺, 等. 阿尔金北缘枕状玄武岩的地质特征及其锆石 U-Pb 年龄. 地质学报, 2007, 81: 787–794
13 戚学祥, 李海兵, 吴才来, 等. 北阿尔金恰什坎萨依花岗闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报, 2005, 50: 571–576
14 戚学祥, 吴才来, 李海兵. 北阿尔金喀孜萨依花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报, 2005, 21: 859–866
15 吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 等. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年. 岩石学报, 2005, 21: 849–858
16 吴才来, 姚尚志, 曾令深, 等. 北阿尔金巴什考供-斯米尔布拉克花岗杂岩体特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 10–26
17 Chen X H, Yin A, George E, et al. Two phase of Mesozoic north-south extension in the eastern Altyn Tagh range, northern Tibetan Plateau. Tectonics, 2003, 22: 1–22
18 吴峻, 兰朝利, 李继亮, 等. 阿尔金红柳沟蛇绿混杂岩中 MORB 与 OIB 组合的地球化学证据. 岩石矿物学杂志, 2002, 21: 24–30
19 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义. 岩石学报, 1999, 15: 57–64
20 Sobel E R, Arnaud N. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China. Tectonics, 1999, 18: 64–74
21 陈宣华, 王小凤, 杨风, 等. 阿尔金山北缘早古生代岩浆活动的构造环境. 地质力学学报, 2001, 7: 193–200

22 Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunder A D, Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins. Geol Soc Spe Publ London, 1989, 42: 313–345
23 McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth. Chem Geol, 1995, 120: 223–253
24 Flagler P A, Spray J G. Generation of plagiogranite by amphibolite anatexis in oceanic shear zones. Geology, 1991, 19: 70–73
25 Pedersen R B, Malpas J. The origin of oceanic plagiogranites from the Karmoy ophiolite, western Norway. Contrib Mineral Petrol, 1984, 88: 36–52
26 Gao S, Liu X M, Yuan H L, et al. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NISTSRM glasses by LA-ICP-MS. Geostand News Lett, 2002, 22: 181–195
27 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 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, 2003, 48: 1511–1520
28 Hermann J, Rubatto D, Korsakov A. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan). Contrib Mineral Petrol, 2001, 141: 66–82
29 Buick R, Thomett J R, Naughton N J, et al. Record of emergent continental crust similar to 3.5 billion years ago in the Pilbara craton of Australia. Nature, 1995, 375: 574–575
30 李武显, 李献华. 蛇绿岩中的花岗质岩石成因类型与构造意义. 地球科学进展, 2003, 18: 392–397
31 Li W X, Li X H. Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, South China: Geochemical and Nd isotopic evidence. Precambrian Res, 2003, 122: 29–44
32 David C G, William P L, Hans G A L. Petrology and geochemistry of plagiogranite in the Canyon Mountain ophiolite, Oregon. Contrib Mineral Petrol, 1981, 77: 82–89
33 Claoue-long J C, Compston W, Roberts J, et al. Two carboniferous ages: A comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and $^{40}Ar/^{39}Ar$ analysis. In: Berggren W A, Kent D V, Aubry M P, et al, eds. Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation. SEPM Spec Publ, 1995, 4: 3–31
34 刘敦一, 简平, 张旗, 等. 内蒙古图林凯蛇绿岩中的埃达克浅色岩 SHRIMP U-Pb 测年. 地质学报, 2003, 77: 317–327
35 Whitehead J, Dunning G R, Spray J G. U-Pb geochronology and origin of granitoid rocks in the Thetford Mines ophiolite, Canadian Appalachians. Geol Soc Am Bull, 2000, 112: 915–928
36 Peters T, Kamber B S. Peraluminous, potassium-rich granitoids in the Semail Ophiolite. Contrib Mineral Petrol, 1994, 118: 229–238
37 Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemite and tonalities. Precambrian Res, 1991, 51: 1–25
38 Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. J Petrol, 1995, 36: 891–931
39 Wilhelm S, Hans A S. Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar: Implications for the origin of TTG magmas. Contrib Mineral Petrol, 1997, 127: 30–45
40 Guo F, Nakamura E, Fan W M, et al. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing, Yanji area, NE China. J Petrol, 2007, 46: 661–692
41 Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 1990, 347: 662–665
42 Petford N, Atherton M P. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. J Petrol, 1996, 37: 1491–1521
43 葛肖虹, 刘俊来. 被肢解的“西域克拉通”. 岩石学报, 2000, 16: 59–66