阿尔金南缘鱼目泉岩浆混合花岗岩LA-ICP-MS测年与构造意义

孙吉明,马中平,唐卓,李向民

中国地质调查局西安地质调查中心(西安地质矿产研究所),西安,710054

内容提要:阿尔金南缘鱼目泉花岗质岩体中含有大量暗色闪长质包体,岩相学及地球化学特征研究表明该岩体是由同期的幔源基性岩浆和酸性岩浆在近于液相(或"晶粥状")状态下发生不均匀混合作用的产物。LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测年结果显示其形成年龄(496.9±1.9 Ma)与南阿尔金山大陆深俯冲超高压变质岩的峰期变质年龄(504~487 Ma)相一致,且在地球化学特征上具有高Al_2O_3(平均15.88%)、较高的K_2O/Na_2O值(平均1.26),高Sr(平均446×10^{-6}),高$(La/Yb)_N$值(平均24.04)和Sr/Y值(平均40),极低的Y(平均14.0×10^{-6})及Yb含量(平均1.5×10^{-6}),类似于加厚地壳背景下形成的高Sr、低Y及Yb型花岗岩,反映出约500 Ma时的南阿尔金造山带总体上处于地壳相互叠覆增厚的陆-陆碰撞造山作用阶段。分析认为,约500 Ma时,南阿尔金山地区伴随着增厚地壳发生熔融作用产生大规模酸性岩浆活动的同时,还存在幔源基性岩浆的底侵,其原因可能与同时期大陆深俯冲作用所诱发的深部热地幔上升有关。

关键词:地球化学特征;岩浆混合花岗岩;LA-ICP-MS锆石定年;鱼目泉;阿尔金南缘

阿尔金造山带是由早古生代古板块(或地块)之间相互俯冲-碰撞、中新生代走滑断裂系所改造的复杂构造带。南阿尔金山(江尕勒萨依—巴什瓦克)地区近年来由于不同类型的超高压变质岩的陆续发现(刘良等,2007),使其成为国内外地学界瞩目的超高压变质作用研究及其相关的大陆深俯冲用研究新的热点地区(张建新等,2007)。由于大规模深俯冲作用的存在将会导致大陆地壳的增厚并可能引发深部地幔热流的上涌,从而引起大陆地壳的重熔,形成各类花岗岩体。因此,对南阿尔金地区可能与深俯冲作用相关联的花岗岩体的精确定年并对其地球化学特征进行研究,对于深入理解该地区大陆深俯冲、壳-幔相互作用、造山带及大陆地壳演化等地球动力学过程无疑具有重要的科学意义。然而,就阿尔金山古生代花岗岩而言,近年来的少量研究主要集中在北阿尔金地区(如,陈宣华等,2003;戚学祥等,2005;吴才来等,2005,2007),而南阿尔金地区花岗岩的研究则更少,仅在南缘西段的吐拉花岗岩(吴锁平等,2007)和东段的玉苏普阿勒克塔格花岗岩(王超等,2008)开展过年代学及地球化学研究。本文拟结合上述有关该地区大陆深俯冲、以及花岗岩、镁铁-超镁铁质岩研究(马中平等,2009;李向民等,2009)的新进展,聚焦于阿尔金山南缘中段具有显著壳-幔源岩浆混合特征的鱼目泉花岗岩体(图1),对其形成时代及地球化学属性进行研究,以期对该地区(早)古生代构造演化过程的理解提供新的约束。

1 区域地质及岩体特征

鱼目泉花岗岩体出露于阿尔金南缘主断裂"阿帕-崖构造混杂岩"带内(图1)。主断裂以北地区地层为新太古界—古元古界米兰岩群高级变质岩系和青白口系索尔库里群变质沉积岩系,断裂以南主要为形成于1827±13 Ma(唐卓等,2011)的古元古界条带状斜长角闪片岩。主断裂带内部及边缘出露有大量的早古生代镁铁-超镁铁质杂岩体(李向民等,2009;马中平等,2009,2011)及早古生代酸性侵入体,两类岩体在空间上紧密相连,但多被断裂隔开(图1),它们北距南阿尔金山代表大陆深俯冲作用

注:本文为国家"十一五"科技支撑计划新疆"305"项目(编号2006BAB07B03-02)、中国地质调查局综合研究项目(编号1212010818090、1212010780006)、国家自然科学基金项目(编号40902022)、陕西省自然科学基础研究计划项目(编号2010JM5007)资助成果。

收稿日期:2011-05-06;改回日期:2011-09-03;责任编辑:周健。

作者简介:孙吉明,男,1981生。硕士研究生,主要从事岩石地球化学研究。Email:sjiming@163.com。

DOI:CNKI:11-1951/P.20120113.0853.001 网络出版时间:2012-1-13 8:53

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20120113.0853.001.html

地质学报 http://www.geojournals.cn/dzxb/ch

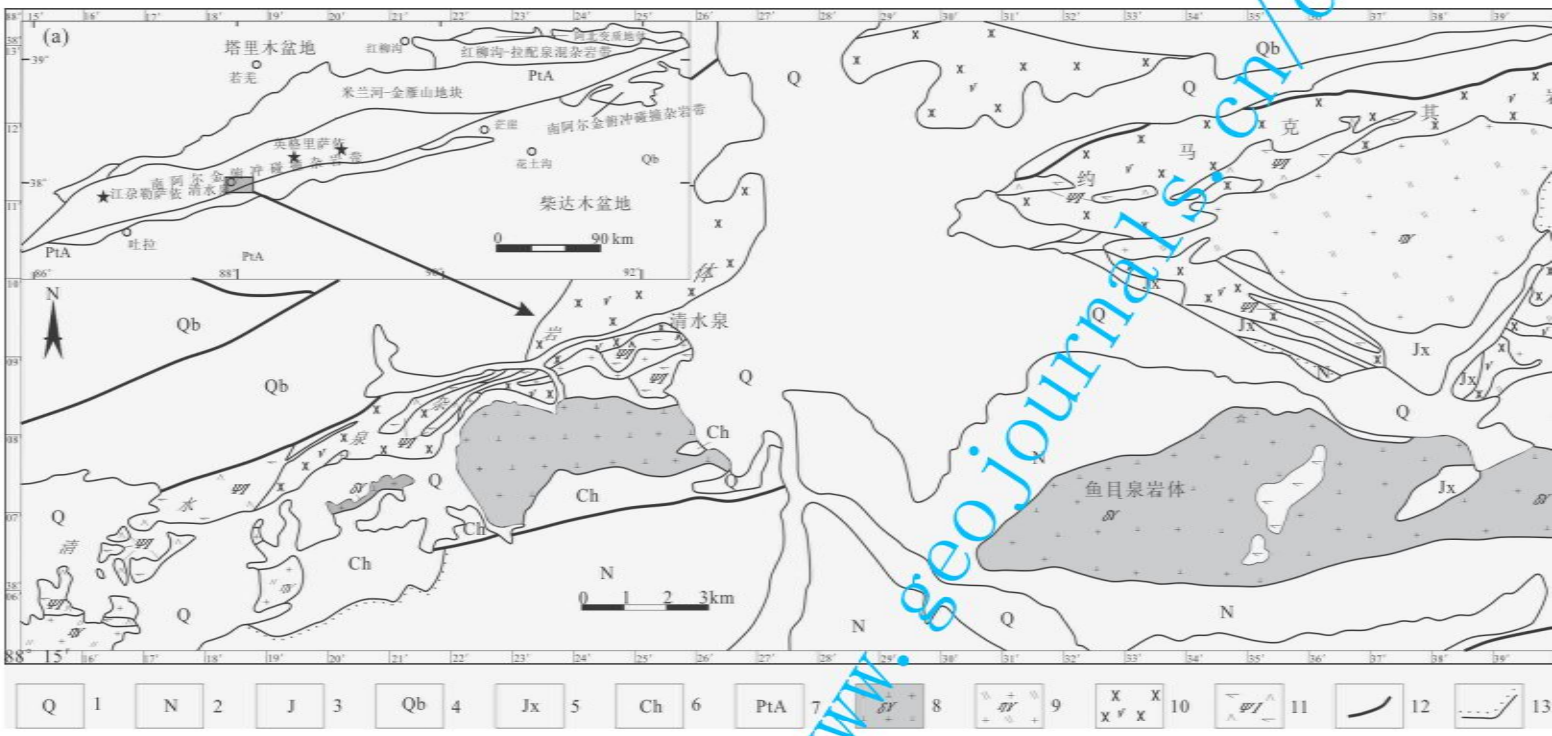


图 1　鱼目泉岩体及周围岩体地质简图(左上小图引自 Liu et al.,2009 略作修改)

Fig. 1　Geological map of the Yumuquan rocks and other rocks around it (the small Fig. is from Liu et al.,2009, it has a bit cha

1—第四系;2—第三系;3—侏罗系;4—青白口系;5—蓟县系;6—长城系;7—阿尔金岩群;8—花岗闪长岩;9—二长花岗岩;10—辉长辉绿岩;11—辉橄岩;12—断
14—锆石采集地点;15—榴辉岩

1—Quaternary;2—Neogene;3—Jurassic;4—Qingbaikouan System;5—Jixian System;6—Changcheng System;7—Altgn Tagh rock group;8—granodiorite;9—m
10—gabbro-diabase;11—augite peridotite;12—fault;13—unconformity line;14—the location of zircon;15—eclogite

http://www.geojournals.cn/dzxb 学报

(刘良等,2007;Liu,et al.,2007;张建新等,2007)的超高压变质岩带(江尕勒萨依—巴什瓦克)不足 20 km。鱼目泉岩体是其中的最大的一个酸性侵入体,出露面积约 65 km^2,呈长轴近东西向的透镜状展布,岩体周边多被古近纪—新近纪陆相粗碎屑沉积物覆盖(图 1)。岩体岩石类型主要有中粒黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩、细粒闪长岩。其最显著的特征是岩体相对浅色的花岗岩中含有大量暗色闪长质-辉长闪长质岩浆包体(图 2),具有明显的壳-幔源岩浆混合花岗岩的特征。

2　岩浆混合作用的岩相学特征

岩相学显示鱼目泉岩体具有壳-幔混合源花岗岩特点:①岩体中含有大量闪长质-辉长闪长质暗色包体(图 2e、f、g、h)。包体主要矿物组成与寄主岩石基本相同,但有很高的暗色矿物(黑含母、角闪石)含量(高达 40%),色率较深。这些包体既有与寄主岩石呈截然关系的椭圆状及水滴状,也常见与寄主岩石呈过渡和弥散状接触关系(图 2e、f、g、h),使得岩石总体呈斑杂状。上述特征表明暗色包体和寄主岩石是两类不同来源的岩浆在近于液相状态下(或液相与早期结晶的晶体所构成的"晶粥")发生不均匀的混合所形成,暗色包体并不是酸性岩浆中的捕虏体。②暗色细粒闪长质包体中含有源自于寄主岩石的碱性长石和石英"斑晶"(或捕虏晶)。其中石英呈"眼斑"状分布,长石"斑晶"在组成上既有斜长石,也有具明显格子双晶的微斜长石(碱性长石),"斑晶"外围呈港湾状—溶蚀状,被角闪石等暗色半自形晶体环绕(图 2a、b),代表了酸性岩浆(温度较低)中早期结晶的斜长石和碱性长石在岩浆混合发生时,呈固态晶体状运移到基性岩浆(温度较高)中而受到基性岩浆的熔蚀交代(Vernon,1991)的结果。③暗色包体中发育针状磷灰石(图 2d)。实验岩石学研究表明长柱状—针状磷灰石为岩浆快速冷却的产物(Wyllie et al.,1962)。这种现象在许多具岩浆混合特征的花岗岩暗色包体中都有发育,通常被认为是岩浆混合过程中基性岩浆注入到温度较低的酸性岩浆房中导致基性岩浆温度迅速下降的结果(Hibbard,1991)。鱼目泉岩体上述岩相学特征表明,该岩体是由同期但不同源的岩浆在近于液相(或"晶粥状")状态下发生不均匀混合作用的产物。

3　形成时代

本文选择鱼目泉混合花岗岩的寄主岩石(黑云母花岗闪长岩,样品号 07b-83),首次对该岩体进行锆石 U-Pb 同位素测年。测年样品采样点坐标:北纬 38°7.232′,东经 88°38.402′,高程 4351 m(图 1)。

3.1　测年方法

样品经过常规的粉碎至 30 目,经过磁选和重选,再在双目镜下挑选。将挑选好的锆石,在双目镜下固定在环氧树脂上抛光。锆石阴极发光(图 3)在西北大学大陆动力实验室完成,U-Pb 同位素测试在同一实验室的激光剥蚀电感偶合等离子体质谱(LA-ICP-MS)上进行,其激光剥蚀斑束直径为 30 μm,剥蚀样品的深度为 20～40 μm。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化,采样方式为单点剥蚀。数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成 4～5 个测点后,插入测标样一次。在所测锆石样品 15～20 个点前后各测 2 次 NIST SRM 610。锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外部标准物质。元素含量采用 NIST SRNI610 作为外标。由于 SiO_2 在锆石中的含量较恒定,选择 ^{29}Si 作为内标来消除激光能量在点分析过程中以及分析点之间的漂移,对于大多数元素单点分析的相对标准偏差为 5%～15%。采用 Glitter(ver4.4.1,Macquarie University)程序对锆石的同位素比值及元素含量进行计算。用 LA-ICP-MS Common Lead Correction(ver3.15)对其进行了普通铅校正。年龄计算及谐和图采用 Isoplot(ver2.49)程序完成。

3.2　测年结果

共进行了 29 颗锆石 30 个点的 U-Pb 同位素测试。所测锆石大部分呈短柱状自形晶,具有明显的岩浆震荡生长环带,粒度在 0.10×0.20～0.15×0.35 mm 之间(图 3),显示出岩浆锆石的特征。测试数据经普通铅校正后,剔除铅丢失严重的 4 个数据点,而其余 26 个数据点的 $^{232}Th/^{238}U$ 比值在 0.5～0.8 之间(表 1),且剥蚀点位处具有明显的岩浆振荡生长环带(图 3),在 U-Pb 协和图上,这些数据点都集中在谐和线上及其附近的很小区域内(图 3),因此,测年结果应代表了岩浆的结晶年龄。将此 26 个分析点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄进行加权平均,结果为 496.9±1.9 Ma(MSWD=0.68),表明鱼目泉混合花岗岩的形成时代应为晚寒武世。

4　地球化学特征

鱼目泉花岗岩主元素、微量及稀土元素的测试

地质学报 http://www.geojournals.cn/dzxb/ch

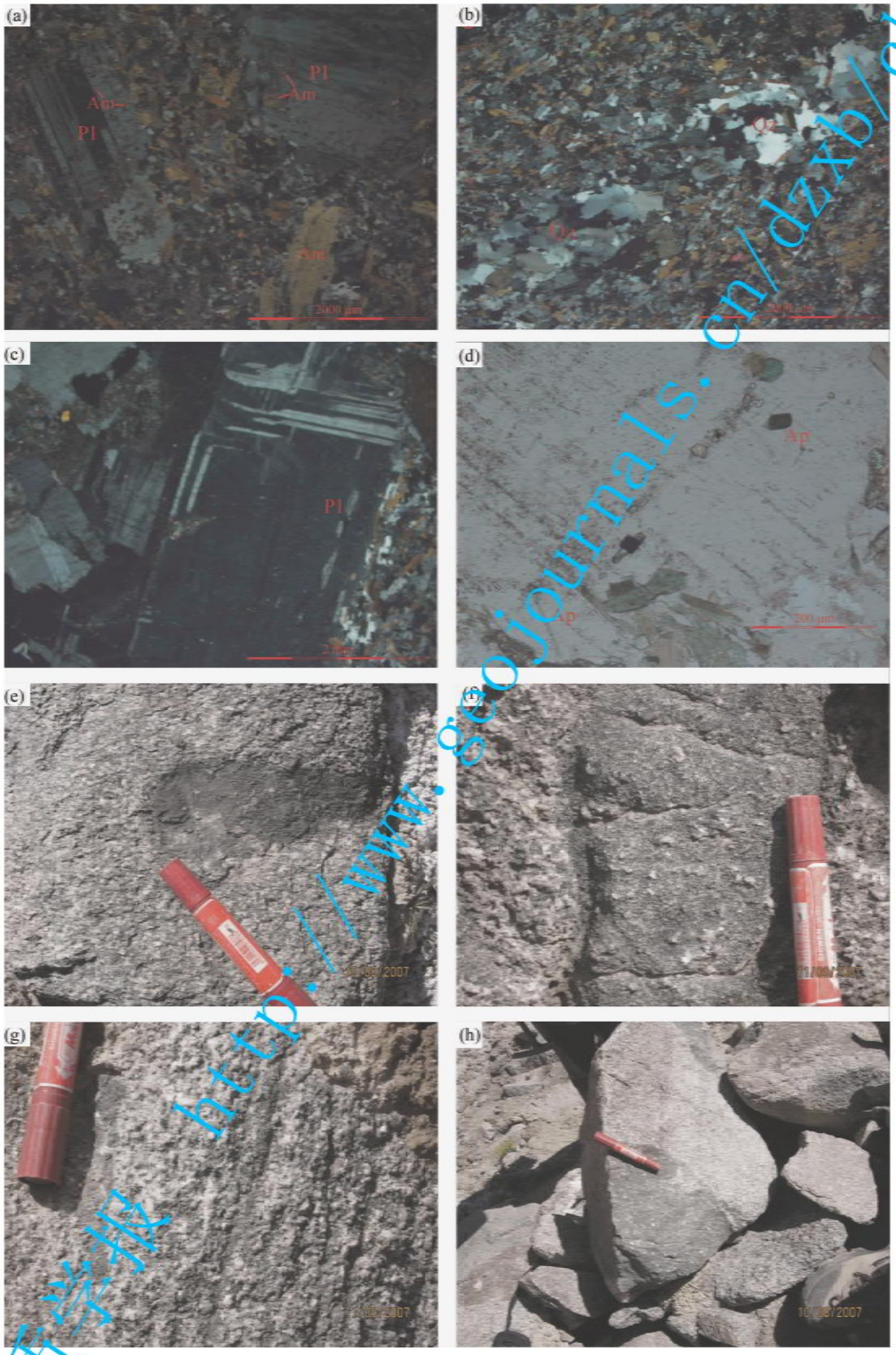


图 2 鱼目泉岩体样品的显微照片和宏观照片

Fig. 2 Micro-photos and macro-photos of the Yumuquan granite

Pl—斜长石；Qz—石英；Am—角闪石；Ap—磷灰石

Pl—Plagioclase; Qz—quartz; Am—amphibole; Ap—apatite

地质学报 http://www.geojournals.cn/dzxb/ch

表 1　鱼目泉岩体锆石 U-Pb 定年测试数据和结果(Ma)

Table 1　The data and results (Ma) of zircon U-Pb dating of the Yumuquan granite

分析点	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		$^{232}Th/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$	
	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ		年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
07B-83-001	0.05484	0.00070	0.60209	0.00747	0.07960	0.00079	0.02585	0.00029	0.67114	406	13	479	5	494	5
07B-83-004	0.05744	0.00074	0.62916	0.00786	0.07942	0.00078	0.02564	0.00029	0.68493	508	13	496	5	493	5
07B-83-005	0.05655	0.00075	0.61116	0.00786	0.07837	0.00078	0.02514	0.00029	0.62112	474	13	484	5	486	5
07B-83-006	0.05751	0.00075	0.65005	0.00823	0.08197	0.00081	0.02583	0.00029	0.65789	511	13	509	5	508	5
07B-83-007	0.05776	0.00177	0.64879	0.01869	0.08146	0.00085	0.02527	0.00023	0.66667	521	69	508	12	505	5
07B-83-008	0.05707	0.00076	0.63353	0.00811	0.08050	0.00080	0.02498	0.00028	0.67568	494	13	498	5	499	5
07B-83-009	0.05621	0.00076	0.62683	0.00819	0.08086	0.00080	0.02531	0.00029	0.59880	461	14	494	5	501	5
07B-83-010	0.05882	0.00079	0.64990	0.00835	0.08012	0.00079	0.02481	0.00028	0.72993	560	13	508	5	497	5
07B-83-011	0.05544	0.00077	0.61069	0.00813	0.07989	0.00079	0.02400	0.00028	0.53763	430	14	484	5	495	5
07B-83-012	0.05499	0.00076	0.60517	0.00808	0.07981	0.00079	0.02379	0.00028	0.59172	412	14	481	5	495	5
07B-83-014	0.05542	0.00076	0.61360	0.00809	0.08029	0.00080	0.02337	0.00027	0.63694	429	14	486	5	498	5
07B-83-015	0.05501	0.00079	0.61236	0.00844	0.08072	0.00080	0.02355	0.00029	0.55866	413	15	485	5	500	5
07B-83-016	0.06013	0.00085	0.66277	0.00903	0.07993	0.00080	0.02085	0.00025	0.76923	608	14	516	6	496	5
07B-83-017	0.05548	0.00079	0.60955	0.00839	0.07967	0.00079	0.02255	0.00027	0.62500	432	15	483	5	494	5
07B-83-018	0.05808	0.00085	0.64169	0.00898	0.08012	0.00080	0.02376	0.00029	0.60606	533	15	503	6	497	5
07B-83-019	0.05559	0.00081	0.61615	0.00862	0.08039	0.00080	0.02259	0.00028	0.70922	436	15	487	5	498	5
07B-83-020	0.05628	0.00081	0.62433	0.00865	0.08045	0.00080	0.02311	0.00028	0.75188	463	15	493	5	499	5
07B-83-021	0.05505	0.00084	0.61068	0.00898	0.08044	0.00081	0.02222	0.00028	0.62500	414	16	484	6	499	5
07B-83-022	0.05470	0.00085	0.60426	0.00896	0.08011	0.00081	0.02169	0.00028	0.59880	400	17	480	6	497	5
07B-83-023	0.05495	0.00087	0.60495	0.00919	0.07984	0.00081	0.02293	0.00029	0.56818	410	17	480	6	495	5
07B-83-024	0.05495	0.00088	0.60952	0.00934	0.08045	0.00081	0.02224	0.00030	0.52632	410	18	483	6	499	5
07B-83-026	0.05471	0.00089	0.60250	0.00942	0.07987	0.00081	0.02190	0.00030	0.55249	400	18	479	6	495	5
07B-83-027	0.05450	0.00091	0.59971	0.00954	0.07980	0.00081	0.02159	0.00030	0.55866	392	19	477	6	495	5
07B-83-028	0.06003	0.00098	0.65750	0.01026	0.07944	0.00081	0.02204	0.00030	0.70423	605	17	513	6	493	5
07B-83-029	0.05474	0.00092	0.60268	0.00967	0.07986	0.00082	0.02105	0.00029	0.63291	402	19	479	6	495	5
07B-83-030	0.05474	0.00091	0.60368	0.00962	0.07999	0.00082	0.02173	0.00030	0.74627	402	18	480	6	496	5

学报 http://www.geojournals.cn/dzxb

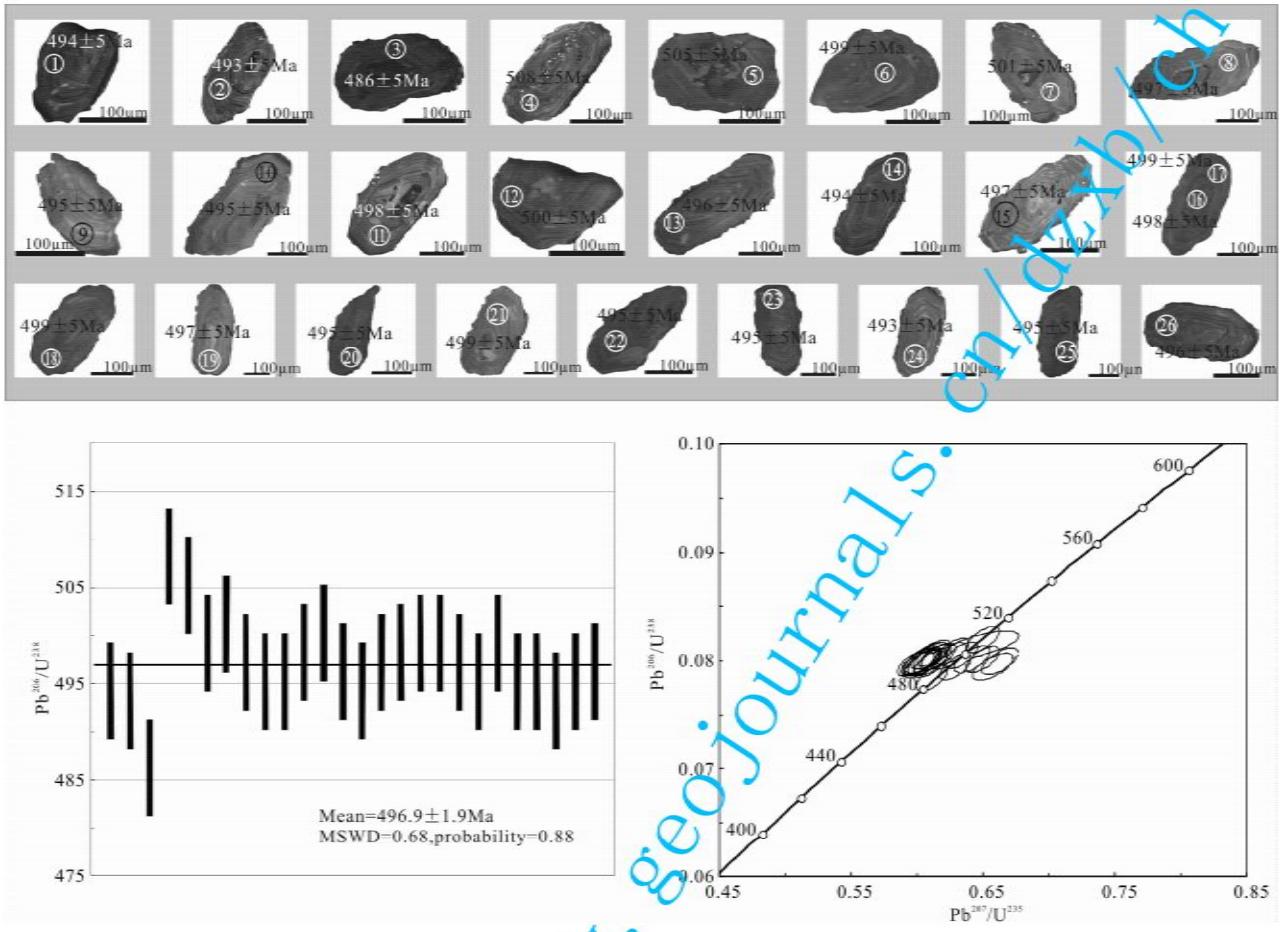


图 3 鱼目泉岩体样品锆石阴极发光图像和锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 的加权平均年龄和 $^{206}Pb/^{238}U$ 与 $^{207}Pb/^{235}U$ 协和比值图

Fig. 3 The CL images of zircon and the average ages about the $^{206}Pb/^{238}U$ of zircon and the diagram of $^{206}Pb/^{238}U$ and $^{207}Pb/^{235}U$ from the Yumuquan granite

结果见表 2。

4.1 主元素特征

整体上由于岩浆混合作用的不均匀性，使得鱼目泉混合花岗岩各类岩石的主元素含量有较大的变化范围。其中，偏酸性的寄主岩石黑云母花岗闪长岩、二长花岗岩的 SiO_2 含量(64.71%～72.42%)明显高于偏基性的细粒闪长质包体 SiO_2 含量(56.74%)，而 FeO_T(2.09%～3.94%)、MgO(1.07%～2.71%)、CaO(1.89%～4.21%)含量明显低于细粒闪长质包体的相应含量(分别为5.44%、3.75%、6.99%)，与后者(细粒闪长岩包体)含有更多的暗色矿物(角闪石、黑云母)及基性斜长石相一致；寄主岩及细粒闪长质包体都具有较高的 Al_2O_3 含量，除一件样品的 Al_2O_3 含量(14.44%)稍低于15%外，其余样品的 Al_2O_3 含量均大于或等于15%(介于15.00%～18.36%之间)；但寄主岩的 Na_2O+K_2O 较高但变化范围较大，介于4.42%～7.81%之间，平均6.20%，K_2O/Na_2O 变化也较大，介于0.28～3.09之间，平均1.26。暗色细粒闪长质包体的 K_2O/Na_2O 比值为0.53。所有样品的 $Mg^{\#}$ 都比较高(介于0.46～0.56之间)，A/CNK 变化较大(介于0.87～1.64)，多属于准铝质—弱过铝质(细粒闪长质包体为强过铝质)；里特曼指数 σ 介于0.66～2.93之间，均小于3.3，属钙碱性系列，在 SiO_2-K_2O 图上(图4)各类样品分布于中钾—高钾钙碱性系列区域内(图4)。在 Hark 图解上，偏基性的暗色细粒闪长质包体与酸性寄主岩的各种主元素之间多呈良好的线性关系(图4)，反映出二元岩浆混合特征。

4.2 稀土及微量元素特征

鱼目泉混合花岗岩的各类岩石在球粒陨石标准化分配图上均呈 LREE 强烈富集的右倾模式(图5)，具有极高的 $(La/Yb)_N$ 值(15.6～37.4，平均24.1)。其中 LREE 分异强烈($(La/Sm)_N$ = 4.9～8.4)，而 MREE 与 HREE 之间分异不明显($(Ho/Yb)_N$=1.0～1.8，平均1.2，接近于1.0)，具有弱的

地质学报 http://www.geojournals.cn/dzxb/ch

表 2　鱼目泉花岗岩主量元素(%)、微量元素($\times10^{-6}$)和稀土元素($\times10^{-6}$)含量

Table 2　Major (%), trace element ($\times10^{-6}$) and REE ($\times10^{-6}$) results for the Yumuquan granite

样号	07b-83	6327(1)	3152(2)	3154(2)	1125(1)	3155(1)
SiO_2	64.71	69.61	72.42	63.84	64.27	56.74
TiO_2	0.50	0.23	0.23	0.75	0.45	0.62
Al_2O_3	16.02	15.47	14.44	15.00	16.01	18.36
Fe_2O_3	1.71	1.41	0.65	1.75	1.07	1.55
FeO	2.40	0.82	1.6	2.65	2.78	4.05
FeO_T	3.94	2.09	2.18	4.22	3.74	5.44
MnO	0.08	0.06	0.09	0.09	0.07	0.11
MgO	2.71	1.3	1.07	1.99	2.71	3.75
CaO	4.21	3.38	1.89	3.65	3.85	6.99
Na_2O	3.21	4.90	1.08	3.71	3.38	3.61
K_2O	2.68	1.36	3.34	4.10	3.25	1.90
P_2O_5	0.19	0.09	0.07	0.34	0.17	0.26
LOI	1.90	1.47	0.42	1.57	1.32	1.38
Total	100.30	100.02	100.3	99.44	99.33	99.32
Ba	1006.00	580.00	500.00	1350.00	820.00	1400.00
Rb	104.00	29.00	100.00	149.00	139.00	33.00
Sr	522.80	680.00	185.00	260.00	500.00	530.00
Y	13.69	6.57	12.70	23.40	12.50	15.20
Zr	162.30	92.00	135.00	100.00	135.00	190.00
Nb	20.96	19.50	19.00	37.00	23.00	17.00
Th	23.11	/	/	/	/	/
V	56.71	65.00	14.00	91.00	94.00	145.00
Cr	55.10	24.00	4.00	14.00	42.00	70.00
Hf	52.70	/	/	/	/	/
Cs	3.45	/	/	/	/	/
Sc	9.71	6.50	4.20	9.20	12.50	16.50
Ta	3.17	0.82	0.36	2.10	1.30	0.74
Co	12.12	7.80	2.90	10.50	8.10	15.50
U	2.53	/	/	/	/	/
Ti	2991.01	1378.62	1378.62	4495.5	2697.3	3716.28
K	22255.79	11289.77	27726.34	34035.33	26979.25	15772.47
P	807.40	392.79	305.50	1483.86	741.93	1134.72
La	67.25	19.10	37.50	62.10	52.00	60.00
Ce	104.70	30.50	78.00	113.00	82.40	95.80
Pr	10.69	3.31	5.56	10.1	6.84	7.91
Nd	33.30	17.60	20.90	43.60	29.10	33.20
Sm	5.16	2.52	4.08	6.97	5.47	5.36
Eu	1.19	0.68	0.59	1.32	0.97	1.59
Gd	4.39	2.04	3.37	6.40	4.08	4.89
Tb	0.51	0.34	0.45	1.03	0.45	0.63
Dy	2.56	1.59	2.49	5.27	2.72	3.58
Ho	0.49	0.26	0.80	1.01	0.53	0.65
Er	1.42	0.87	1.39	2.76	1.89	1.73
Tm	0.21	0.10	0.22	0.45	0.23	0.26
Yb	1.29	0.79	1.31	2.86	1.36	1.64
Lu	0.20	0.11	0.24	0.45	0.28	0.27
σ	1.60	1.47	0.66	2.93	2.07	2.21
$(La/Yb)_N$	37.39	17.13	20.53	15.57	27.43	26.24
$(La/Sm)_N$	8.42	4.79	5.93	5.75	6.14	7.23
$(Ho/Yb)_N$	1.15	0.98	1.83	1.06	1.17	1.19
K_2O/Na_2O	0.84	0.28	3.09	1.11	0.96	0.53
A/CNK	1.01	0.99	1.64	0.87	1.00	0.89
$Mg^{\#}$	55	53	47	46	56	55
Sr/Y	38.19	103.50	14.57	11.11	40.00	34.87
Rb/Sr	0.20	0.04	0.54	0.57	0.28	0.06
δEu	0.76	0.92	0.49	0.70	0.63	0.95

注：07b-83(花岗岩)为本次分析样品，其余数据引自 1∶25 万苏吾什杰区域地质调查报告。

铕负异常或铕异常不明显($\delta Eu_N=0.49\sim0.95$，平均 0.74)。在原始地幔标准化蛛网图上(图 5)，所有样品的强不相容的 LILE(如 Rb、Ba、Th、U、K)及 LREE 均明显富集，总体上随元素不相容性的降低，在蛛网图上渐次向标准化值 1 靠近(但出现有一定程度的 Nb-Ta-Ti 及弱的 Sr 负异常)，同时，除暗色细粒闪长质包体具有最高的相容元素 Ni(28×10^{-6})、Cr(70×10^{-6})含量外，寄主花岗岩类的 Ni($13\times10^{-6}\sim25\times10^{-6}$，平均 19×10^{-6})、Cr($4\times10^{-6}\sim55\times10^{-6}$，平均 25×10^{-6})含量也普遍较高且具有较大的变化范围，显示出混合花岗岩的幔源物质不均匀加入迹象。

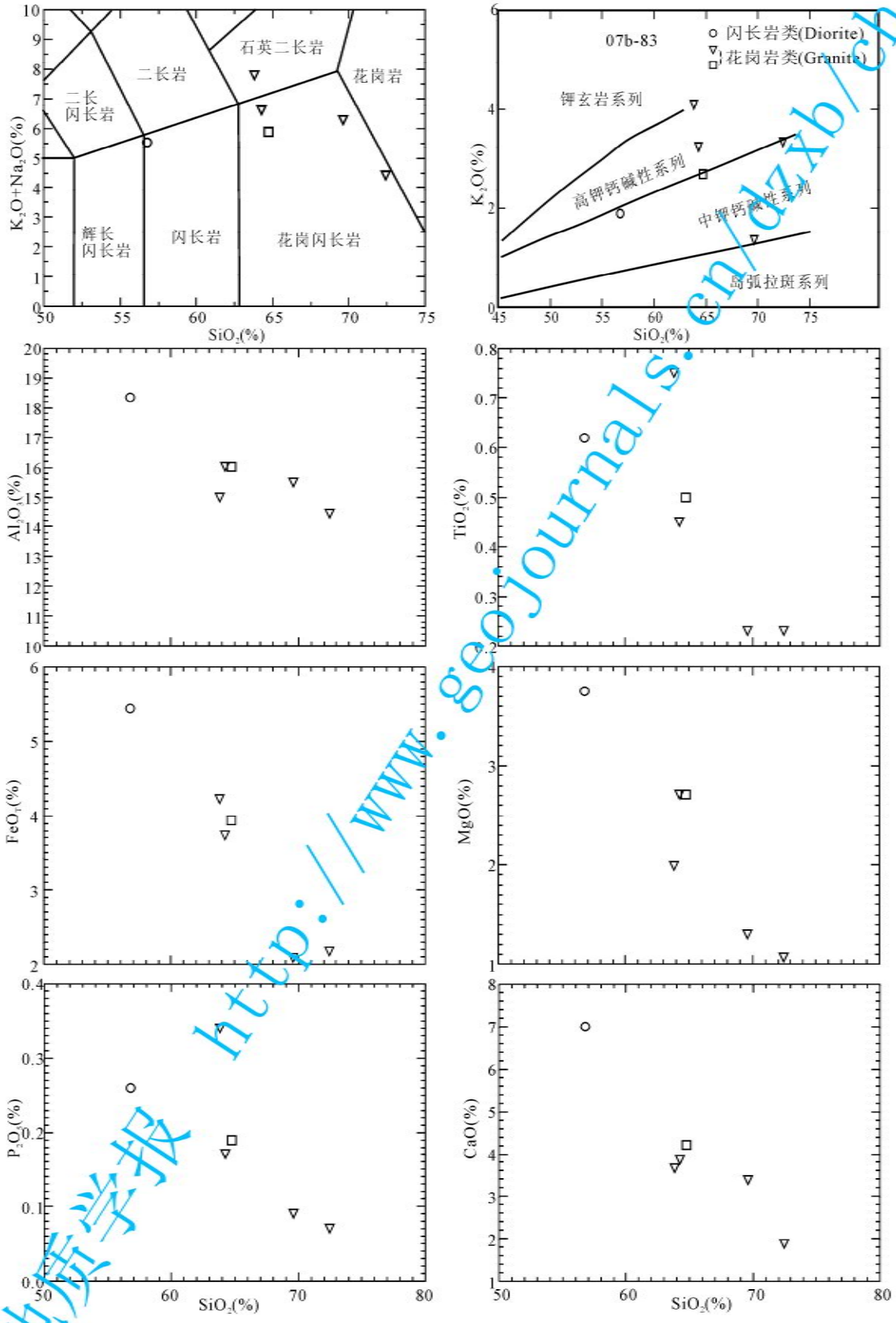
值得注意的是，鱼目泉岩体无论是酸性的花岗岩类还是暗色细粒闪长岩质包体，都具有极低的 Y($6.6\times10^{-6}\sim23.4\times10^{-6}$，平均 14.0×10^{-6})及 Yb 含量($0.8\times10^{-6}\sim2.8\times10^{-6}$，平均 1.5×10^{-6})，同时它们具有高 Sr($185\times10^{-6}\sim680\times10^{-6}$，平均 446×10^{-6})和高的 Sr/Y 值(11～104，平均 40)和高 Al_2O_3(14.44%～18.36%，平均 15.88%)含量，而且岩石属于中钾—高钾系列，上述特征与加厚地壳背景下形成的高 Sr、低 Yb 及 Y 型花岗岩的地球化学特征相类似(张旗等，2002，2003，2006)，应为加厚的下地壳部分熔融的产物。

5　讨论：成因机制及其对南阿尔金山构造演化的制约

已有的研究表明，南阿尔金山地区出露的超高压(UPH)变质岩的形成是由于 550 Ma 前存在于冈瓦纳大陆和西伯利亚陆块间的“原特提斯洋”洋壳深俯冲、随后的陆壳深俯冲以及继后的折返作用的产物(杨经绥等，2009；许志琴等，2010)。此外，结合已有报道的南阿尔金地区有限的古生代(约 465～385 Ma)花岗岩(吴锁平等，2007；王超等，2008 及其未发表资料；曹玉亭等，2010)及该地区新发现的镁铁-超镁铁质侵入岩(467.4±1.4 Ma，马中平等，2009，2011)等的年代学及地球化学研究资料，马中平等(2011)认为自中奥陶世(约 465 Ma)起，南阿尔金地区进入到了后碰撞裂谷-伸展阶段。

本文对阿尔金南缘地区鱼目泉花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果表明，其形成年龄为 496.9±1.9 Ma，与南阿尔金山地区代表陆壳深俯冲 UPH 变质岩的峰期变质年龄(504～487 Ma，张安达等，2004；刘良等，2005，2007；张建新等，2007，2010，2011；Liu et al.，2009)相一致，且该岩

地质学报 http://www.geojournals.cn/dzxb/ch



地质学报 http://www.geojournals.cn/dzxb/ch

图 4 鱼目泉花岗岩 Hark 图解

Fig. 4 Hark diagram of the Yumuquan granite

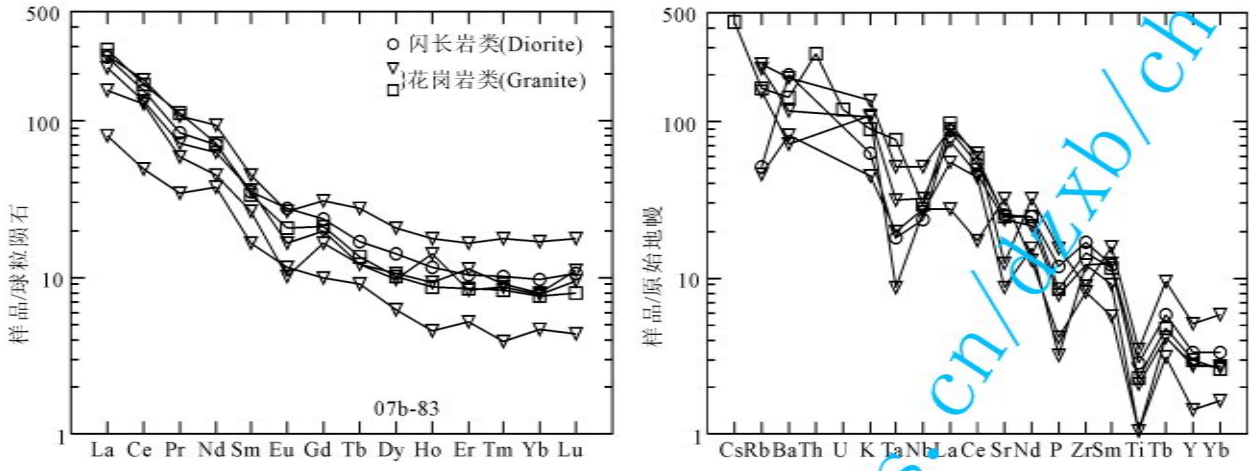


图 5　鱼目泉花岗岩 REE 球粒陨石标准化配分型式和微量元素原始地幔标准化分配图
（球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun 等，1989）

Fig. 5　Chondrite-normalized REE diagram and primitive mantle-normalized trace elements diagram of Yumuquan granite (chondrite-normalized and primitive mantle-normalized according to Sun et al., 1989

体具有高 Sr、低 Yb 及 Y、高 K_2O/Na_2O 值等，类似于加厚（大于 40 km）地壳背景下形成的 C 型埃达克岩的地球化学特征（张旗等，2002，2003，2006），暗示着约 500 Ma 时的南阿尔金地区应存在陆壳相互叠覆增厚的构造作用过程，从而表明早前寒武纪时（大于 550 Ma）存在于南阿尔金山地区的“原特提斯洋”（杨经绥等，2009；许志琴等，2010）在晚寒武世（496.9±1.9 Ma）已经闭合，总体上处于地壳相互叠覆增厚的陆-陆碰撞造山作用阶段。

另外，花岗岩中暗色包体的发育被认为是岩浆混合作用的主要标志或特征（王涛，2000；莫宣学等，2002；张旗等，2007，2008）。鱼目泉岩体岩相学特征充分表明，该岩体是由同期的幔源基性岩浆（暗色包体的母岩浆）和源自于增厚地壳的酸性岩浆（寄主花岗岩的母岩浆）在近于液相（或“晶粥状”）状态下发生不均匀混合作用的产物。因此，阿尔金南缘地区 496.9±1.9 Ma 的鱼目泉岩浆混合型花岗岩的存在，表明在约 500 Ma 时，伴随着大规模加厚地壳熔融作用发生的同时，还存在幔源基性岩浆的底侵事件，而鱼目泉岩体内大量暗色包体，以及同一构造带内与该岩体紧邻的具有相同形成年龄（501 Ma）的约马克其镁铁-超镁铁岩体（李向民等，2009）是此次幔源基性岩浆事件的反映。

此外，由于地幔中冷板片的下沉（深俯冲作用）往往伴随着深部地幔热流的上升（Maruyama et al.，2007；许志琴等，2008），同时，加厚地壳的熔融也需要更高的温度以使其产生较大规模的酸性岩浆，因此，对于鱼目泉岩浆混合型花岗岩的成因机制以及南阿尔金地区构造－岩浆演化序列而言，我们推测，约 500 Ma 时，南阿尔金地区由于大陆深俯冲（可达 350 km，Liu et al.，2007）作用的发生，诱发深部热的地幔物质上涌并发生减压熔融而产生基性岩浆（如鱼目泉混合花岗岩中暗色包体的母岩浆），同时上涌的热地幔也使得阿尔金南缘地区地温梯度增大，使得由于陆-陆碰撞而加厚的地壳发生部分熔融而产生高 Sr、低 Yb 及 Y 型酸性岩浆（鱼目泉混合花岗岩的主体），此两种同期但不同源的岩浆在上升过程中发生不均匀的混合，并最终在阿尔金南缘构造带中侵位、固结，形成鱼目泉岩浆混合型花岗岩。

6　结论

（1）LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果显示，阿尔金山南缘鱼目泉岩浆混合型花岗岩的形成年龄为 496.9±1.9 Ma，其形成时代与南阿尔金山地区大陆深俯冲 UPH 变质岩的峰期变质时代相一致，且在地球化学上具有类似于加厚地壳背景下形成的高 K_2O/Na_2O、高 Sr、低 Yb、Y 型花岗岩的地球化学特征，反映出约 500 Ma 时的南阿尔金造山带总体上处于地壳相互叠覆增厚的陆-陆碰撞造山作用阶段。

（2）鱼目泉岩浆混合型花岗岩寄主花岗岩体与暗色包体的岩相学及地球化学特征显示，该岩体是由同期的幔源基性岩浆和源自于增厚地壳的酸性岩浆在近于液相（或“晶粥状”）状态下发生不均匀混合作用的产物，反映出在约 500 Ma 时，伴随着大规模

地质学报 http://www.geojournals.cn/dzxb/ch

加厚地壳熔融作用发生的同时，还存在幔源基性岩浆的底侵作用。

(3)分析认为，约 500 Ma 时，南阿尔金地区由于大陆深俯冲作用的发生，诱发深部热的地幔物质上涌并减压熔融产生基性岩浆，同时，上涌的热地幔使得阿尔金南缘地区地温梯度增大，使得由于陆-陆碰撞而加厚的地壳发生熔融而产生花岗质岩浆，两种同期但不同源的岩浆在上升过程中发生不均匀混合，导致了鱼目泉岩浆混合型花岗岩的形成。

参 考 文 献

陈宣华，Gehrels G，王小凤，杨风，陈正乐. 2003. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨. 矿物岩石地球化学通报，22(4)：294～298.

曹玉亭，刘良，王超，等. 2010. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成. 岩石学报，26(11)：3259～3271.

李向民，马中平，孙吉明，等. 2009. 阿尔金断裂南缘约马克其镁铁-超镁铁岩的性质和年代学研究. 岩石学报，25(4)：862～872.

刘良，陈丹玲，张安达，孙勇，等. 2005. 阿尔金超高压(>7 GPa)片麻状(含)钾长石榴辉石岩-石榴子石出溶单斜辉石的证据. 中国科学，32(2)105～114.

刘良，张安达，陈丹玲，等. 2007. 阿尔金江尕勒萨依榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义. 地学前缘，14(1)：98～107.

马中平，李向民，孙吉明，等. 2009. 阿尔金山南缘长沙沟镁铁-超镁铁质层状杂岩体的发现与地质意义——岩石学和地球化学初步研究. 岩石学报，25(4)：793～804.

马中平，李向民，徐学义，孙吉明，唐卓，杜涛. 2011. 阿尔金南缘清水泉镁铁-超镁铁质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义. 中国地质，中国地质，38(4)：1071～1078.

莫宣学，罗照华，肖庆辉，等. 2002. 花岗岩中岩浆混合作用的识别与研究方法. 见：肖庆辉等著. 花岗岩研究思维与方法. 北京：地质出版社，53～70.

戚学祥，吴才来，李海兵. 2005. 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，21(3)：859～866.

齐有强，胡瑞忠，刘燊，田建吉. 2008. 岩浆混合作用研究综述. 矿物岩石地球化学通报，27(4)：409～416.

唐卓，马中平，李向民，等. 2011. 阿尔金山南缘清水泉地区斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年及其地质意义. 地质通报，30(1)：51～57.

吴才来，杨经绥，姚尚志，曾令森，陈松永，李海兵，戚学祥，Wooden J L，Mazdab F K. 2005. 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，21(3)：846～858.

吴才来，姚尚志，曾令森，杨经绥，Wooden J L，陈松永，Mazdab F K. 2007. 北阿尔金巴什考供—斯米尔布拉克花岗杂岩特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 中国科学(D 辑)，37(1)：10～26.

吴锁平，吴才来，陈其龙. 2007. 阿尔金断裂南侧吐拉铝质 A 型花岗岩的特征及构造环境. 地质通报，26(10)：1385～1392.

王超，刘良，张安达，杨文强，曹玉亭. 2008. 阿尔金造山带南缘岩浆混合作用：玉苏普阿勒克塔格岩体岩石学和地球化学证据. 岩石学报，24(12)：2809～2819.

王涛. 2000. 花岗岩混合成因研究及大陆动力学意义. 岩石学报，16(2)：161～168.

许志琴，李廷栋，杨经绥，嵇少丞，王宗起，张泽明，. 2008. 大陆动力学的过去、现在和未来——理论与应用. 岩石学报，24(7)：1433～1444.

许志琴，杨经绥，嵇少丞，等. 2010. 中国大陆构造及动力学若干问题的认识. 地质学报，84(1)：1～29.

杨经绥，许志琴，张建新，等. 2009. 中国主要高压—超高压变质带的大地构造背景及俯冲/折返机制的探讨. 岩石学报，25(7)：1529～1560.

张安达，刘良，孙勇，等. 2004. 阿尔金超高压花岗质片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报，49(22)：2335～2341.

张建新，孟繁聪，Mattinson C G. 2007. 南阿尔金-柴北缘高压—超高压变质带研究进展、问题及挑战. 高校地质学报，13(3)：526～545.

张建新，孟繁聪，于胜尧. 2010. 两条不同类型的 HP/LT 和 UHP 变质带对祁连-阿尔金早古生代造山作用的制约. 岩石学报，26(7)：1967～1992.

张建新，李怀坤，孟繁聪，等. 2011. 塔里木盆地东南缘(阿尔金山)“变质基底”记录的多期构造热事件：锆石 U-Pb 年代学的制约. 岩石学报，27(1)：23～46.

张旗，王焰，刘伟，王元龙. 2002. 埃达克岩的特征及其意义. 地质通报，21(7)：431～435.

张旗，王焰，刘红涛，王元龙，李之彤. 2003. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景. 地学前缘，10(4)：385～400.

张旗，王焰，李承东，王元龙，金惟俊，贾秀琴. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报，22(9)：2249～2269.

张旗，潘国强，李承东，金惟俊，贾秀琴. 2007. 花岗岩混合问题：与玄武岩对比的启示——关于花岗岩研究的思考之一. 岩石学报，23(5)：1141～1152.

Hibbard M J. 1991. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems. In：Didier J，Barbarin B，eds. Enclaves amd Granite Petrology. Developments in Petrology，13. Amsterdam：Elsevier，431～444.

Liu L，Zhang J F，Green II H W，et al. 2007. Evidence of former stishovite in metamorphosed sediments，implying subduction to >350 km. Earth. Planet. Sci. Lett.，doi：10.1016/j.epsl.，08.010.

Liu Liang，Wang Chao，Chen Danling，Zhang Anda，Liou J G. 2009. Petrology and geochronology of HP-UHP rocks from the South Altyn Tagh，northwestern China. Journal of Asian Earth Sciences，35：232～244.

Maruyama S，Santosh M，Zhao D. 2007. Superplume，supercontinet，and post-perovskite：mantle dynamics and antiplate tectonics on the Core-Mantle Boundary. Gondwana Research，11：7～37.

Sun S S，McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts：for implications for mantle composition and

地质学报 http://www.geojournals.cn/dzxb/ch

processes. In: Saunders A, Norry M, eds. Magmatism in the Ocean Basin. Geological Society Special Publication, 42: 313～345.

Vernon R H. 1991. Interpretation of microstructures of microgranitoid enclaves. In: Didier J, Barbarin B, eds. Enclaves and Granite Petrology. Developments in Petrology. Amsterdam: Elsevier, 277～291.

Wyllie P J, Cox K G, Biggar G M. 1962. The habit of apatite in synthetic systems and igneous. Journal of Petrology, 3: 238～243.

LA-ICP-MS Zircon Dating of the Yumuquan Magma Mixing Granite in the Southern Altyn Tagh and Its Tectonic Significance

SUN Jiming, MA Zhongping, TANG Zhuo, LI Xiangmin

Xi'an Center of Geological Survey (Xi'an Institute of Geology and Mineral Resource, CGS), Xi'an, 710054

Abstract

The Yumuquan granitoid complex, located in the south margin of Altyn Tagh, northwestern China, contain a large number of melanocratic magmatic enclaves (MME). Petrographic and geochemical study indicates that MME is the product of heterogenetic mixing of contemporaneous mantle-derived basic magma and felsic magma under the liquid phase or crystal mesh. The LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating show that the age (496.9±1.9 Ma (MSWD=0.68)) of Yumuquan granite is in agreement with the age (509～487 Ma) of ultrahigh-pressure metamorphic rocks exposed at south Altyn Tagh. The granitoid rock is characterized by high Al_2O_3 (ave. 15.88%), high K_2O/Na_2O ratios (ave. 1.26), high Sr (ave. 446×10^{-6}), and high $(La/Yb)_N$ ratios (24.04) and Sr/Y ratios (avg. 40), and extremely low Y (ave. 14.0×10^{-6}) and Yb (avg. 1.5×10^{-6}). These characteristics are similar to those of high Sr and low Y(Yb) type potash granite derived from thickened lower crust, reflecting that the southern Altyn orogen was generally in the period of continental-continental collision orogeny resulting from crust superimposition at during ～500 Ma. Our research suggests that large-scale acid magmatic activity took place at at ～500 Ma as a result of melting of thickening crust in southern Altyn Tagh area, accompanied by underplating of mantle-derived mafic magma. The explanation for that is likely related to rising of deep hot mantle, which was triggered by contemporaneous continent subduction.

Key words: geochemical characteristics; magma mixing granite; LA-ICP-MS zircon dating; Yumuquan; southern Altyn fault

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch
地质学报