中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 8 期: 1299 ~ 1311
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

阿拉善地块北缘古大洋闭合的时间制约: 来自乌力吉花岗岩体的证据

张文, 吴泰然*, 冯继承, 郑荣国, 贺元凯

造山带和地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871
* 联系人, E-mail: twu@pku.edu.cn

收稿日期: 2012-08-17; 接受日期: 2012-12-05; 网络版发表日期: 2013-07-22
国家自然科学基金(批准号: 41040017)资助

摘要 乌力吉花岗岩位于阿拉善地块北缘, 构成沙拉扎山的主体, 处在华北板块西北缘宗乃山-沙拉扎山火山弧构造带, 其北侧为恩格尔乌苏蛇绿岩带, 南侧为查干础鲁蛇绿岩带. 岩体侵入于上石炭统-下二叠统阿木山组. 根据研究区原石炭系阿木山组的沉积建造分析, 中下岩段为火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩建造, 反映了火山弧及弧后盆地沉积组合的基本特征; 上岩段由粉砂质页岩-砂岩-含砾砂岩-砾岩组成, 为一套陆相磨拉石建造. 乌力吉花岗岩以黑云母二长花岗岩、含角闪石黑云母二长花岗岩、二长花岗岩为主. SiO_2 平均大于 70%, Al_2O_3 的含量多大于 14%, 偏铝质-过铝质; Na_2O+K_2O 含量高, 平均 8.51%, 大部分富钠, 部分富钾, 属钙碱性系列; 球粒陨石标准化分配模式图上, 富集轻稀土元素, 重稀土元素分馏不明显且相对亏损, Eu 具有弱负异常, δ_{Eu} =0.27~1.00. 在微量元素原始地幔标准化蛛网图上, 亏损 Nb, Ta, Ti, P, Sr 和 Ba, 富集 Rb, Th 和 K. 乌力吉花岗岩体离子探针锆石 U-Pb 年龄为(250.8±2.0) Ma, $\varepsilon_{Nd}(t)$=–0.1~1.3, 指示了壳幔混合来源. 根据岩体的地球化学特征, 乌力吉花岗岩为具有火山弧地球化学特征的后碰撞花岗岩, 岩浆来源于具有弧性质的新生陆壳部分熔融与幔源物质的混合. 根据最新的国际地层划分标准, 现已将阿木山组的上岩段划归下二叠统, 表明该区弧后盆地在早二叠世已经闭合. 结合区域地质背景可以认为, 晚石炭世以恩格尔乌苏蛇绿岩带为代表的古亚洲洋向南俯冲, 在阿拉善地块北缘形成了沟弧盆体系, 并于早二叠世最终闭合, 晚二叠世已经进入后碰撞阶段.

关键词
阿拉善
恩格尔乌苏
查干础鲁
离子探针
壳幔混合
火山弧
后碰撞

中亚造山带是当前国际造山带研究热点之一. 中亚造山带的形成与古亚洲洋及其陆缘的演化密切相关, 其最终闭合时间目前仍存在较大的争议, 有些学者认为在早古生代古亚洲洋已经闭合[1~3], 有些学者认为在泥盆纪-早石炭世[4~10], 还有学者认为在二叠纪至早中三叠世[11~17]. 阿拉善地区位于内蒙古西部中亚造山带中段, 是华北板块、塔里木板块和哈萨克斯坦板块及其陆缘的结合部, 古生代的构造演化极为复杂, 各构造单元的归属也一直存在争议. 阿拉善地区由南向北分布有 3 条主要的蛇绿岩带及断裂带: 查干础鲁蛇绿岩带、恩格尔乌苏蛇绿岩带以及雅干断裂带, 其中恩格尔乌苏蛇绿岩带被认为是华北

中文引用格式: 张文, 吴泰然, 冯继承, 等. 阿拉善地块北缘古大洋闭合的时间制约: 来自乌力吉花岗岩体的证据. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1299–1311
英文引用格式: Zhang W, Wu T R, Feng J C, et al. Time constraints for the closing of the Paleo-Asian Ocean in the Northern Alxa Region: Evidence from Wuliji granites. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 153–164, doi: 10.1007/s11430-012-4435-y

板块与塔里木板块的缝合线[11,18~23]. 但由于尚未确定恩格尔乌苏蛇绿岩与查干础鲁蛇绿岩带形成的精确时间, 其所代表的洋壳最终闭合时间也存在着较大的争议[11,12,18,19,24]. 沙拉扎山构造带位于恩格乌苏蛇绿岩带与查干础鲁蛇绿岩带之间, 该带花岗岩东西延长达 200 km, 出露面积在 3000 km^2 以上, 其形成的构造环境显然与古亚洲洋南部陆缘的演化相关, 确定其形成构造环境及年代等问题, 不仅对研究阿拉善的大地构造归属有重要的意义, 而且对古亚洲洋闭合的时间、查干础鲁蛇绿岩带的形成环境、沙拉扎山构造带的演化及东西构造带的对比等问题都极为重要. 乌力吉花岗岩体是位于沙拉扎山构造带中具有代表性的岩体, 通过离子探针锆石 U-Pb 定年和地球化学分析研究, 对该岩体的形成年代、成因机制及构造意义进行探讨, 可以为乌力吉地区古生代末期的构造演化研究提供一些新的证据.

1 区域地质背景和岩体地质特征

阿拉善北缘(图 1(a))从北向南以雅干断裂带、恩格尔乌苏蛇绿岩带以及查干础鲁蛇绿岩带分成了雅干隆起、珠斯楞早古生代被动陆缘、拐子湖晚古生代洋盆、宗乃山-沙拉扎山岛弧、乌力吉弧后盆地及雅布赖-巴音诺尔公古陆块, 在阿拉善地块北缘构成了完整的晚古生代沟弧盆体系. 宗乃山-沙拉扎山为这一体系中的成熟弧, 类似于今天的日本岛弧[18,25]. 查干础鲁蛇绿岩带被认为则是晚古生代残留的弧后盆地闭合所形成[11,12,22,23], 恩格尔乌苏蛇绿岩带所代表的洋壳为主洋盆的位置[11,12,18,22,23].

阿拉善地块北缘出露有各个时期的岩浆岩, 其中绝大部分为花岗岩[11,18]. 尽管前人对本区花岗岩类进行了大量研究, 积累了丰富的资料[11,18,26~31], 但具有精确定年的花岗岩体却很少, 目前在阿拉善地区未见有二叠-三叠纪的花岗岩精确定年报道, 制约了该区古生代的构造演化研究.

沙拉扎山构造带出露的古生代地层主要为阿木山组, 原定为上石炭统的阿木山组在研究区内分布零碎, 但各岩性段出露齐全, 其下部为浅海相中酸性火山碎屑岩、长石砂岩、板岩为代表的火山岩-碎屑岩建造, 中部为浅海相碳酸盐建造, 上部则为砾岩及长石石英砂岩为代表的粗碎屑岩建造. 据近来研究[32~35], 原定为上石炭统的阿木山组的上岩段, 即粗碎屑岩岩段应为下二叠统紫松阶地层. 从查干础鲁剖面(图 1(c), 2)可以看出, 阿木山组出现典型的砂岩-含砾砂岩-砾岩磨拉石建造, 表明查干础鲁所代表的弧后盆地在早二叠世已经闭合.

乌力吉花岗岩(图 1(b))位于内蒙古阿拉善左旗乌力吉以北 8 km 处, 构成沙拉扎山的主体. 该岩体呈岩基产出, 出露面积约达 1500 km^2, 侵入于上石炭统-下二叠统阿木山组, 白垩纪地层不整合覆盖其上, 未见与其他时代地层的接触关系. 岩体相带不发育, 以中粒结构的过渡相为主, 岩体的两侧发育有细粒结构的花岗岩及混染岩等少量边缘相. 边缘相主要岩石类型为黑云斜长花岗岩、混染花岗闪长岩, 过渡相岩石以二长花岗岩为主. 本文研究的乌力吉花岗岩岩性主要为黑云母二长花岗岩、含角闪石黑云母二长花岗岩、二长花岗岩, 均为块状构造, 未变形. 主要矿物组成为石英(25%~45%), 碱性长石(20%~35%)以条纹长石为主(少量钾长石), 斜长石(20%~45%), 暗色矿物(3%~15%)以黑云母为主, 部分含角闪石; 副矿物有榍石、锆石、磷灰石及磁铁矿.

2 离子探针锆石 U-Pb 年代学

用常规的重液和磁选技术分选出 W08-30 样品中的锆石, 将包裹体少、无明显裂隙且晶形完好的锆石颗粒和标准锆石 TEMORA 一起粘贴在环氧树脂表面制成样品靶, 然后对其抛光直至锆石露出一半晶面, 在光学显微镜下对待测锆石进行透射光和反射光显微拍照, 并在扫描电镜下进行锆石阴极发光(CL)拍摄, 以揭示其内部结构、帮助选定最佳的待测锆石部位, 样品靶在真空下镀金以备分析. 锆石 U-Pb 年龄采用中国科学院地质与地球物理研究所离子探针中心 Cameca IMS-1280-SIMS 仪器测定, 详细分析流程和原理见 Li 等[36]. 锆石标样与锆石样品以 1:3 比例交替测定. U-Th-Pb 同位素比值用标准锆石 TEMORA (417 Ma)[37]校正获得, U 含量采用标准锆石 91500 (81×10^{-6})[38]校正获得, 以长期监测标准样品获得的标准偏差(1SD = 1.5%)[39]和单点测试内部精度共同传递得到样品单点误差. 普通 Pb 校正采用实测 ^{204}Pb 值. 由于测得的普通 Pb 含量非常低, 假定普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染, 以现代地壳的平均 Pb 同位素组成[40]作为普通 Pb 组成进行校正. 数据处理采用 Isoplot 3.0 程序[41], 结果列于表 1,

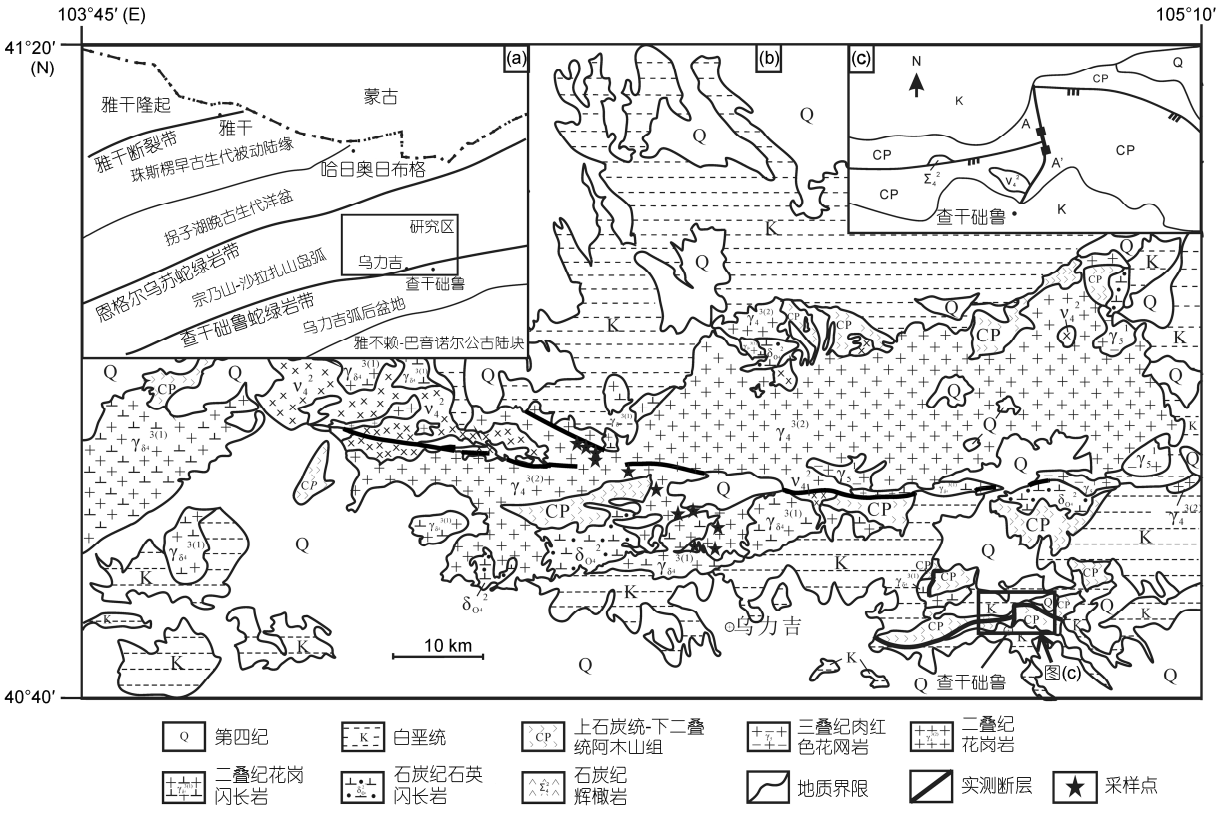


图 1　阿拉善北缘区域构造简图(a)、阿拉善地区乌力吉地区地质简图(b) 和查干础鲁剖面位置图(c)

据 1∶20 万乌力吉幅 [1)]、沙拉套尔汗幅 [2)]和银根幅地质图 [3)]修改

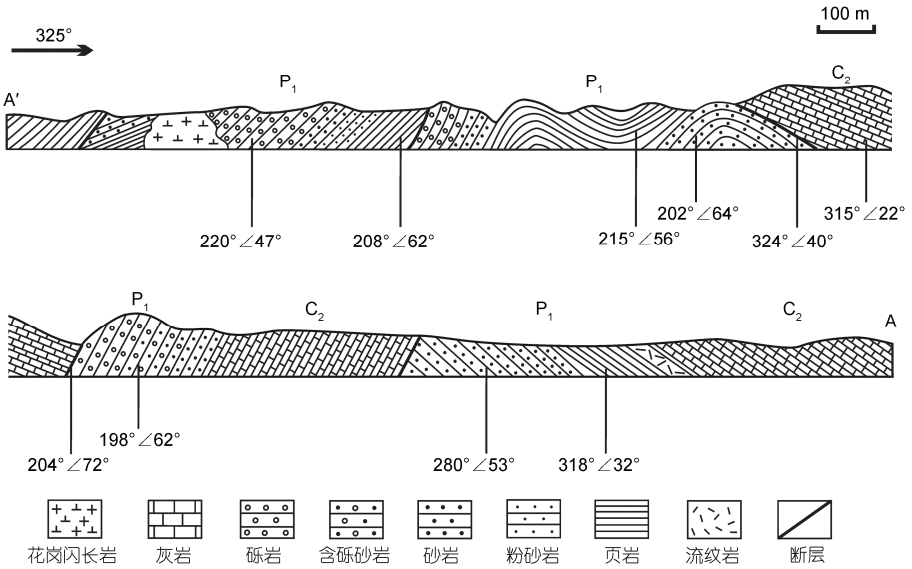


图 2　查干础鲁信手剖面

1) 宁夏地质局区域地质调查队. 乌力吉幅地质图及报告(1∶20 万). 1980

2) 宁夏回族自治区地质局. 沙拉套尔汗幅地质图及报告(1∶20 万). 1982

3) 宁夏回族自治区地质局. 银根幅地质图及报告(1∶20 万). 1980

其中同位素比值及年龄误差均为 1σ.

本次实验共选取 15 个锆石, 共有 15 个测点(图 3). 锆石 7 和 9 的核部可见明显的残留锆石, 锆石 7 所测部位为边部的震荡环带, 锆石 9 所测部位选在核部. 除锆石 7 和 9 外, 其余 13 颗锆石都是透明的、柱状的, 晶形较好, 发育良好的岩浆型韵律环带结构, 为典型的岩浆成因锆石, 打点位置边部和核部均有分布, 测试过程中未发现较老的锆石颗粒或核部的残留锆石. 分析结果见表 1. 15 个测点的 Th/U 比值均较高, 在 0.41~1.20 之间, 平均为 0.73, 具有典型的岩

表 1　乌力吉花岗岩 W08-30 中的离子探针锆石 U-Pb 分析数据

样品及点号	$^{232}Th/^{238}U$	同位素比值				年龄 (Ma)				谐和度
		$^{207}Pb/^{235}U$	1σ (%)	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ (%)	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	
W08-30@1	0.63	0.2857	3.4	0.0390	1.5	255.1	7.7	246.4	3.7	103.5
W08-30@2	0.54	0.2813	2.5	0.0399	1.5	251.7	5.5	252.3	3.7	99.8
W08-30@3	0.60	0.2792	2.7	0.0392	1.5	250.0	5.9	247.7	3.7	100.9
W08-30@4	0.41	0.2813	2.3	0.0404	1.7	251.7	5.1	255.1	4.3	98.7
W08-30@5	1.02	0.2825	2.6	0.0407	1.5	252.7	5.7	257.1	3.9	98.3
W08-30@6	0.61	0.2611	3.6	0.0399	1.5	235.6	7.5	252.4	3.8	93.3
W08-30@7	0.91	0.2747	2.6	0.0396	1.5	246.5	5.6	250.3	3.7	98.5
W08-30@8	0.60	0.2629	5.8	0.0401	1.5	237.0	12.2	253.5	3.8	93.5
W08-30@9	0.49	0.3233	2.8	0.0457	1.5	284.4	7.0	288.3	4.2	98.6
W08-30@10	0.88	0.2769	2.6	0.0391	1.5	248.2	5.7	247.2	3.6	100.4
W08-30@11	0.85	0.2787	2.6	0.0396	1.5	249.6	5.7	250.2	3.7	99.8
W08-30@12	0.64	0.2777	2.8	0.0393	1.5	248.8	6.1	248.5	3.7	100.1
W08-30@13	0.76	0.2674	3.5	0.0393	1.5	240.6	7.5	248.5	3.7	96.8
W08-30@14	0.79	0.2753	2.2	0.0393	1.5	247.0	4.9	248.4	3.7	99.4
W08-30@15	1.20	0.2829	2.0	0.0405	1.5	252.9	4.6	255.7	3.8	98.9

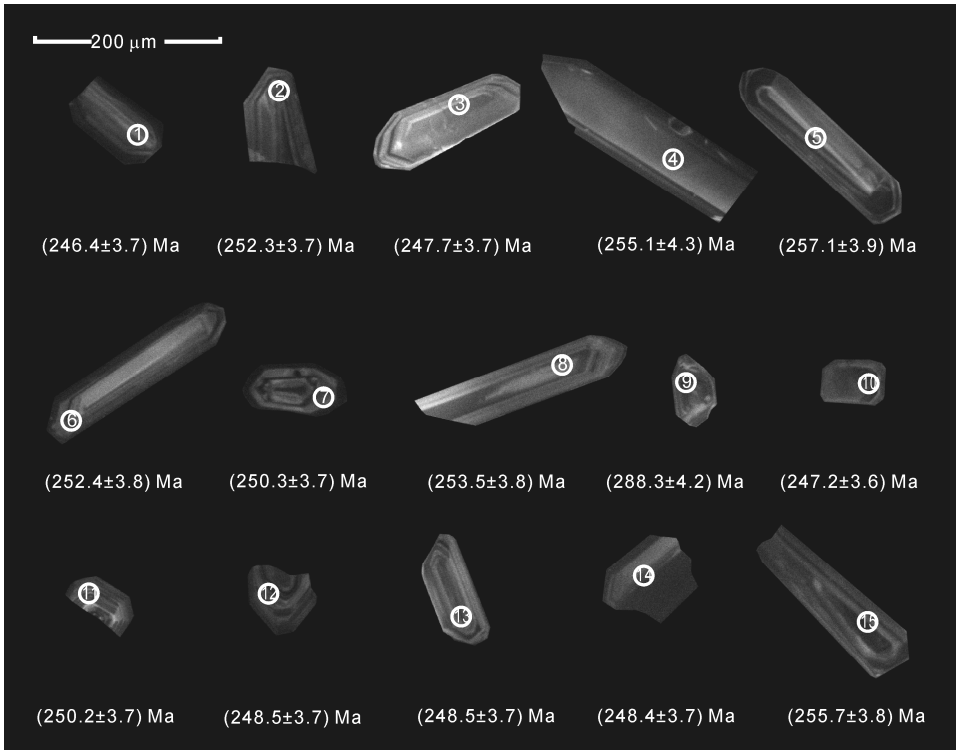


图 3　乌力吉花岗岩体锆石特征和离子探针测点位置

浆锆石的特征[42,43]. 从锆石的晶形、结构特征以及较高的 Th/U 比值可以判断除锆石 7 和 9 外, 其他锆石均为岩浆成因, 而锆石 7 边部的震荡环带也为岩浆成因.

对所获年龄的谐和度(100×^{207}Pb/^{235}U 年龄/^{206}Pb/^{238}U 年龄)在 93.3~103.5, 均属于谐和年龄. 除去锆石 9 残留锆石核所测得的一个较老年龄数据((288.6±4.3) Ma)外, 其他 14 颗锆石的测年结果集中在(247.1±3.7)~(257.4±3.9) Ma之间, 这 14 个数据均为谐和年龄, 且分布集中, 故以它们的加权平均年龄作为岩体的结晶年龄. ^{206}Pb/^{238}U 加权平均年龄为(250.8±2.0) Ma, MSWD=0.81 (图 4). 而(288.6±4.3) Ma 的年龄数据可能是岩浆运移过程中捕获的锆石, 或是岩浆源区残留的锆石.

3　地球化学特征

3.1　主量元素特征

乌力吉花岗岩体的主量元素分析结果列于表 2. SiO_2%含量在 68.83%~74.44%; Al_2O_3 含量在 13.14%~15.10%, A/NCK=0.82~1.02, 在铝饱和指数判别图解上落在偏铝质-过铝质区域(图 5); Na_2O+K_2O 含量高, 平均 8.51%, 大部分富钠, 部分富钾(Na_2O=4.16%~6.69%, K_2O=2.67%~5.22%); NK/A=0.70~0.94. 在(Na_2O+K_2O)-SiO_2图解(图 6)上, 样品均落入亚碱性系列区域; 在 K_2O-SiO_2 图解(图 7)上, 样品均落入了高钾-中钾钙碱性区域; 样品的里特曼指数 σ(σ=(Na_2O+K_2O)^2/(SiO_2－43))为 2.02~3.18, 为钙碱性花岗岩; 另外, P_2O_5(0.010%~0.13%), TiO_2(0.09%~

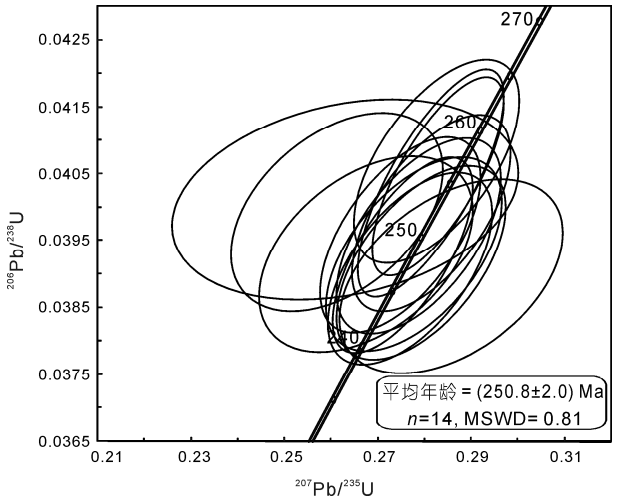


图 4　乌力吉花岗岩体离子探针锆石 U-Pb 同位素谐和图

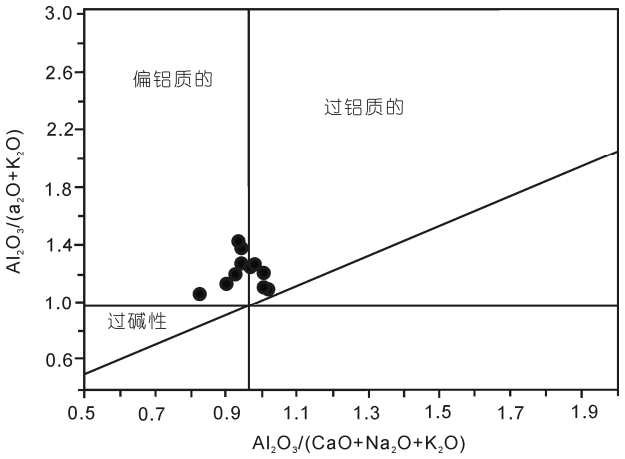


图 5　乌力吉花岗岩体的 shand 指数图解[44]

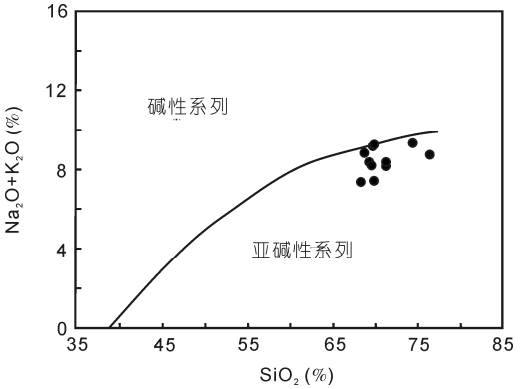


图 6　乌力吉花岗岩的(Na_2O+K_2O)-SiO_2 图解[45]

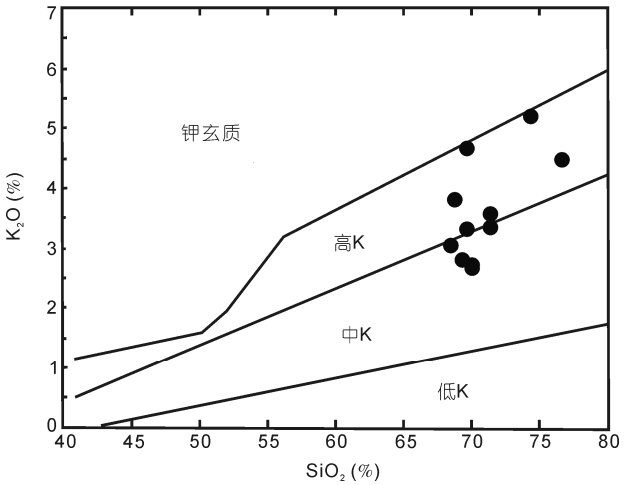


图 7　乌力吉花岗岩的 SiO_2-K_2O 图解[46]

表 2　乌力吉花岗岩体的主量元素(%)和微量元素(ppm)分析结果 [a)]

样品号	W08-29	W08-41	W08-52	W08-65	W08-70	W08-30	W08-22	W08-34	W08-45	W08-63	W08-69
SiO_2	74.44	68.83	69.35	69.66	69.73	76.51	69.92	68.35	71.27	69.90	71.28
TiO_2	0.09	0.30	0.24	0.28	0.27	0.11	0.53	0.63	0.35	0.33	0.34
Al_2O_3	13.76	15.10	14.85	15.00	14.28	13.14	14.67	14.85	14.56	14.84	14.65
TFe_2O_3	0.28	1.83	1.70	1.58	1.66	0.34	2.62	3.14	1.89	1.52	1.76
MnO	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0.02	0.03
MgO	0.84	2.10	1.78	1.95	1.69	0.01	1.31	1.80	0.91	0.72	0.76
CaO	0.56	1.40	2.03	2.29	1.81	0.67	2.75	3.06	1.87	2.27	1.93
Na_2O	4.16	5.05	5.65	4.93	4.54	4.28	4.71	4.32	4.81	6.69	4.77
K_2O	5.22	3.83	2.81	3.34	4.68	4.46	2.67	3.04	3.34	2.70	3.57
P_2O_5	0.01	0.10	0.07	0.08	0.08	0.01	0.11	0.13	0.09	0.09	0.08
LOI	0.55	1.31	1.41	0.77	1.12	0.39	0.58	0.51	0.76	0.81	0.74
总量	99.96	99.90	99.91	99.91	99.91	99.96	99.90	99.90	99.89	99.88	99.90
σ	2.80	3.06	2.72	2.56	3.18	2.28	2.02	2.14	2.35	3.28	2.46
AR	3.78	3.33	3.01	2.83	3.59	4.26	2.47	2.40	2.97	3.43	3.02
NK/A	0.91	0.82	0.83	0.78	0.88	0.90	0.73	0.70	0.79	0.94	0.80
A/NCK	1.02	1.01	0.93	0.94	0.90	1.00	0.94	0.93	0.97	0.82	0.96
Rb	249.0	117.5	64.8	109.0	162.3						
Ba	171.4	510.2	408.5	381.9	434.5						
Th	20.67	13.95	5.59	14.17	13.24						
U	3.74	2.60	1.20	2.17	1.88						
Nb	12.19	8.25	4.62	5.59	6.66						
Ta	1.27	0.97	0.44	0.51	0.71						
Pb	38.35	23.92	14.84	22.40	33.11						
Sr	128.5	339.7	375.2	386.2	253.9						
Zr	79.6	170.4	96.5	161.5	137.0						
Hf	4.12	6.20	3.50	5.75	5.13						
Li	55.34	29.86	53.27	31.01	36.46						
Be	3.70	2.95	1.36	2.10	2.52						
Sc	3.28	3.77	3.77	4.39	3.71						
V	9.34	34.86	23.15	36.60	30.83						
Co	5.16	8.18	5.77	7.84	5.98						
Ga	17.57	18.77	17.16	20.21	18.73						
Cs	171.4	5.9	3.7	5.1	7.5						
La	12.82	21.24	11.08	12.03	17.95						
Ce	28.00	44.18	22.96	30.60	38.54						
Pr	3.30	4.62	2.83	2.89	3.98						
Nd	12.32	17.13	10.73	10.86	14.51						
Sm	2.76	3.21	2.01	1.97	2.50						
Eu	0.25	0.86	0.65	0.60	0.60						
Gd	2.90	3.14	2.03	1.88	2.37						
Tb	0.49	0.44	0.28	0.23	0.29						
Dy	3.05	2.39	1.59	1.24	1.53						
Ho	0.62	0.46	0.31	0.23	0.28						
Er	1.96	1.33	0.94	0.67	0.83						
Tm	0.32	0.20	0.14	0.10	0.13						
Yb	2.28	1.36	1.02	0.72	0.90						
Lu	0.34	0.20	0.16	0.11	0.14						
Y	19.56	12.93	8.48	6.16	7.95						
REE	71.4	100.8	56.7	64.1	84.6						
LREE	59.5	91.2	50.3	59.0	78.1						
HREE	12.0	9.5	6.5	5.2	6.5						
LREE/HREE	5.0	9.6	7.8	11.4	12.1						
$(La/Yb)_N$	3.64	10.11	7.02	10.78	12.90						
δ_{Eu}	0.27	0.83	1.00	0.97	0.75						
10000*Ga/Al	2.41	2.35	2.18	2.55	2.48						

a) 所有数据测试由北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成, 主量元素和微量元素的测试仪器分别为美国 Thermo Electron 公司的 ARL ADVANT`XP+ 扫描型波长色散 X 射线荧光光谱仪和 Agilent 7500Ce ICP-MS. $AR=(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O)/(Al_2O_3+CaO-Na_2O-K_2O)$, $\delta_{Eu}=Eu_N/\sqrt{Sm_N \times Gd_N}$

0.63%), TFe_2O_3(0.28%~3.14%), CaO (0.56%~3.06%), MgO(0.01%~2.10%)含量变化均较大. 在 Harker 图解上(图 8), 随 SiO_2 含量增加, Al_2O_3, CaO, TiO_2, TFe_2O_3 和 MgO 含量均下降, K_2O+Na_2O 则无明显的趋势. 从主量元素的特征看, 乌力吉花岗岩具有钙碱系列岩石的属性.

3.2　稀土与微量元素特征

乌力吉花岗岩体的稀土元素总量相对较低, 为 56.7~100.8 ppm, 在球粒陨石标准化分配模式图上(图 9), 富集轻稀土元素(LREE), 重稀土元素(HREE)分馏不明显且相对亏损, 具有相对较低的$(La/Yb)_N$ 比值(3.64~12.90), Eu 具有弱负异常, δ_{Eu} =0.27~1.00, 与其他样品相比, W08-29 的 Eu 负异常更加明显, 由于该样品的 SiO_2 含量较高, 缺少钙长石, 可能是局部因素的影响造成的.

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 10), 显示了同源演化的特征, Nb, Ta, Ti, P, Sr 和 Ba 亏损, Rb, Th 和 K 具有明显的正异常. 在花岗岩 Sr-Yb 类型判别图解[48,49]上投入低 Sr 低 Y 区(图略). 在 Pearce 图解(图 11)上, 样品大部分落入了火山弧花岗岩范围. 从稀土和微量元素的特征看, 乌力吉花岗岩也具有火山弧的特点.

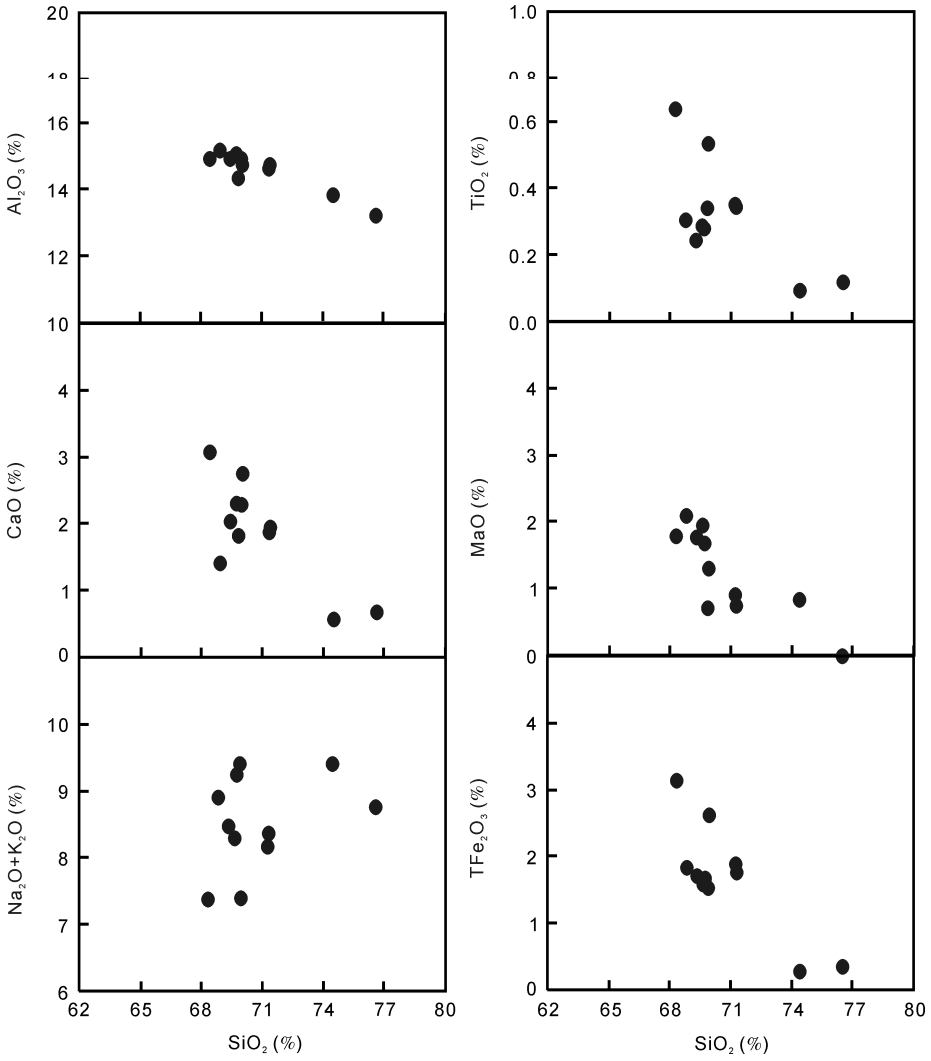


图 8　Harker 图解

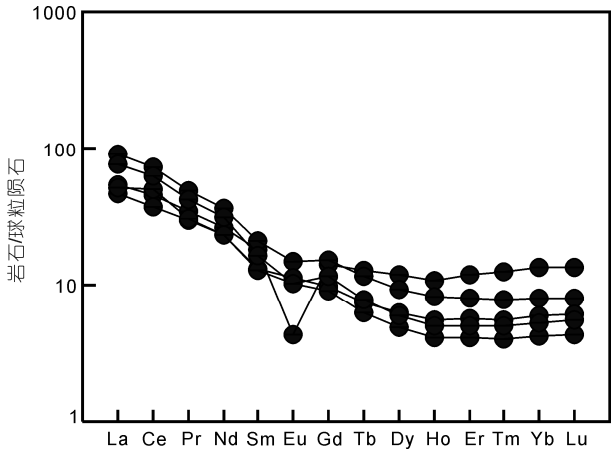


图 9　稀土元素球粒陨石标准化图解

标准化值据文献[47]

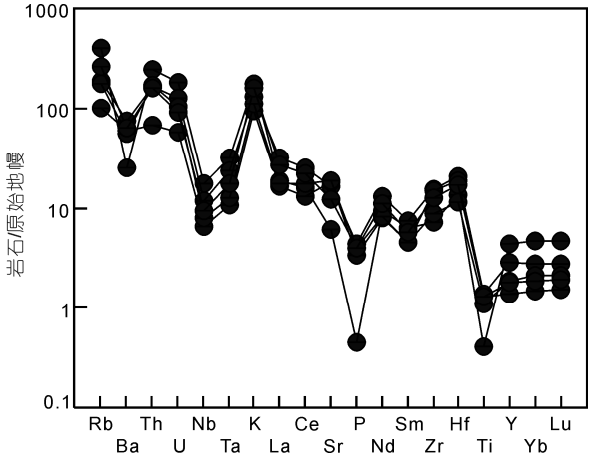


图 10　微量元素原始地幔标准化图解

标准化值据文献[47]

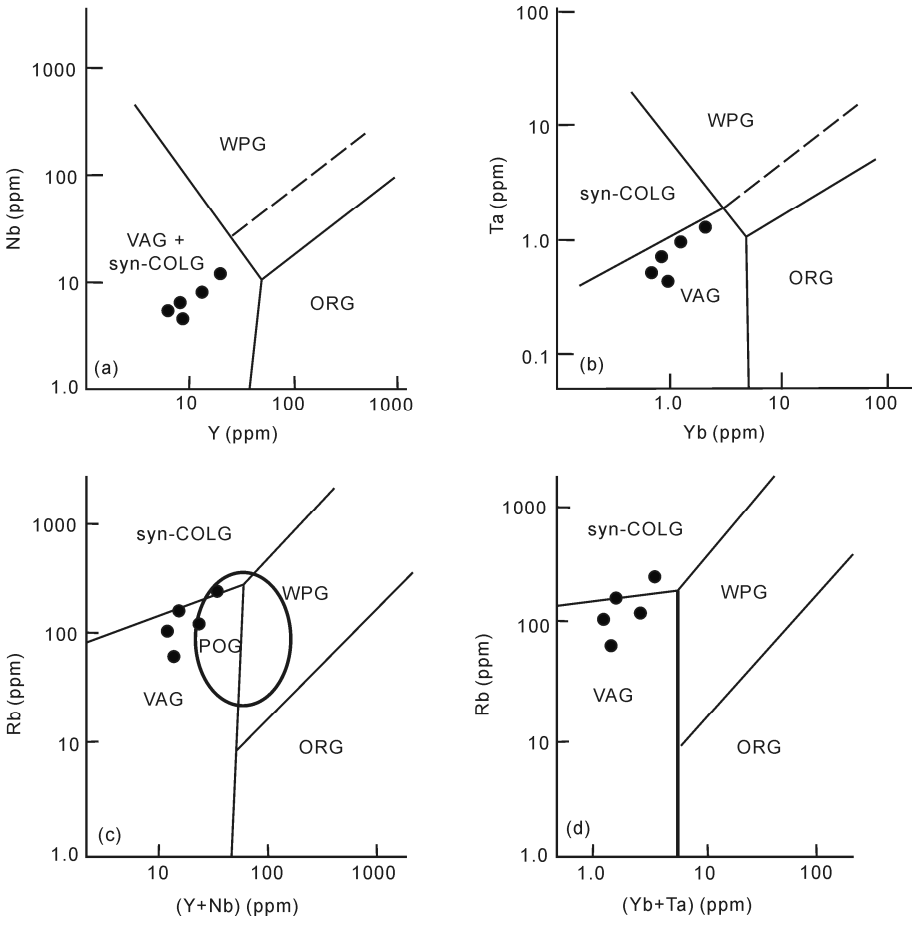


图 11　花岗岩的微量元素构造判别图解[50,51]

WPG 代表板内花岗岩; syn-COLG 代表同碰撞花岗岩; VAG 代表火山弧花岗岩; ORG 代表大洋中脊花岗岩; POG 代表后碰撞花岗岩

4 Nd 和 Sr 同位素测试

Sr 和 Nd 同位素组成及 Sm, Nd, Rb 和 Sr 含量在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成, 测量仪器为德国 Finnigan 公司 MAT-262 型热电离质谱计, 分析流程已有文献叙述[52]. 测试时采用的标样测定结果及误差为: Sr 同位素国际标样 NBS-987 测定值 $^{87}Sr/^{86}Sr=0.710274\pm11(2\sigma)$; Nd 同位素标样 JMC 的测定值 $^{143}Nd/^{144}Nd=0.512096\pm12(2\sigma)$. 用 $^{86}Sr/^{88}Sr=0.1194$ 和 $^{146}Nd/^{144}Nd=0.7219$ 进行 Sr 和 Nd 同位素质量歧视校正. Rb-Sr 和 Sm-Nd 的全流程本底分别为 100~300 和 50~100 pg. 测试结果列于表 3.

由表 3 可以看出, W08-29 和 W08-30 的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 明显的小于亏损地幔的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值 0.7023, 这对花岗岩来说显然是不可接受的, 因此本文将不讨论 Sr 同位素特征. 乌力吉花岗岩的 $f_{Sm/Nd}$ 在–0.2~–0.6 之间, 说明其模式年龄是有效的[53]. $\varepsilon_{Nd}(t)$对侵入年龄图解上(图 11), 乌力吉花岗岩落入球粒陨石与早、中元古代地壳之间的范围, 反映源区有壳幔的混合. 在 $\varepsilon_{Nd}(t)$对 Nd 亏损地幔模式年龄图解上(图 12), 乌力吉花岗岩投入了 230~300 Ma 的中亚造山带其他地区的花岗岩的区域内, 其 $\varepsilon_{Nd}(t)$接近于 0, 又说明了地幔组分含量相对较高.

5 乌力吉花岗岩体的成因及其形成的构造背景

乌力吉花岗岩的地球化学特征明显的具有火山弧的性质, 但其 SiO_2 含量明显较高, 平均已经大于 70%, Al_2O_3 的含量大部分大于 14%, 且 A/NCK 值说明岩体为偏-过铝质; Eu 的弱负异常可能与斜长石在源区的残余有关, Nb 元素亏损反映花岗岩源岩为大陆壳性质[72], 张旗等[48,49,73]认为具有低 Sr 低 Yb 型花岗岩可能是在中等压力下形成的; 在 R1-R2 图解(图 13)中, 多数样品投在造山晚期; 微量元素大洋中脊标准化图解中与典型的后碰撞花岗岩对比, 显示了与后碰撞花岗岩更加类似的趋势(图 14), 也说明乌力吉花岗岩可能并不是火山弧花岗岩, 而是具有火山弧

表 3 乌力吉花岗岩 Sr 和 Nd 同位素组成 a)

样品	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr(\pm2\sigma)$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$ $(\pm2\sigma)$	$\varepsilon_{Nd}(0)$	$\varepsilon_{Nd}(t)$	$f_{Sm/Nd}$	t_{DM} (Ga)
W08-29	13.50	0.749624±13	0.70151	0.1344	0.512602±10	–0.70	+1.3	–0.32	1.05
W08-30	15.72	0.755908±15	0.69987	0.1185	0.512541±11	–1.89	+0.6	–0.40	0.97
W08-41	1.074	0.709081±14	0.70525	0.1151	0.512498±9	–2.72	–0.1	–0.42	1.01

a) $\varepsilon_{Nd}=((^{143}Nd/^{144}Nd)_s/(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}-1)\times10000$, $f_{Sm/Nd}=(^{147}Sm/^{144}Nd)_s/(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR}-1$, 其中 s=sample, $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}=0.512638$, $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR}=0.1967$, 模式年龄 $t_{DM}=1/\lambda\cdot\ln[1+((^{143}Nd/^{144}Nd)_s-0.51315)/((^{147}Sm/^{144}Nd)-0.2137)]$

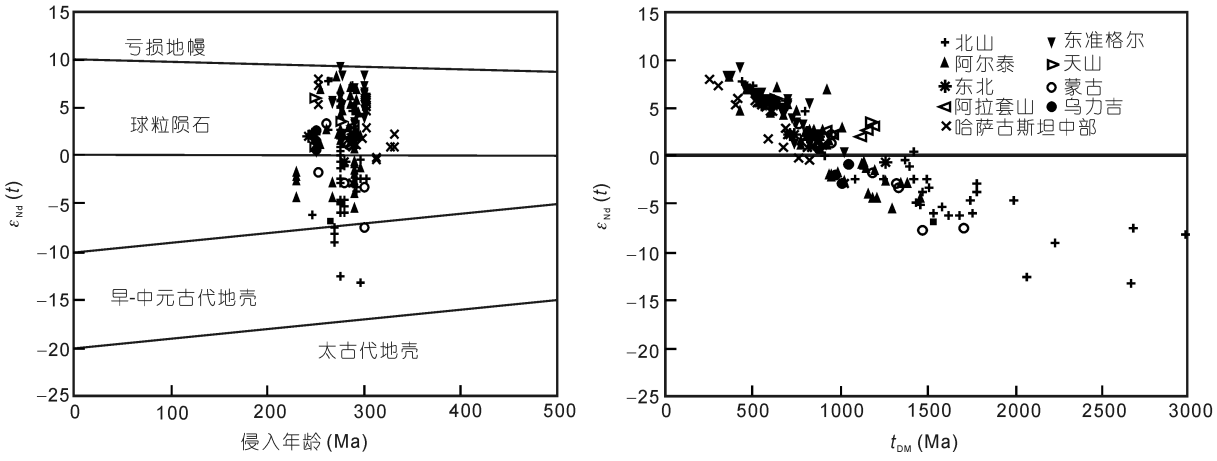


图 12 $\varepsilon_{Nd}(t)$对侵入年龄和 Nd 亏损地幔模式年龄图解

数据来源: 北山[54~56], 东准格尔[57~60], 阿尔泰[57,61~64], 天山[65], 东北[66,67], 阿拉套山[68], 蒙古[69~70],哈萨克斯坦中部[71], 乌力吉来自本文. 两幅图的图例一致

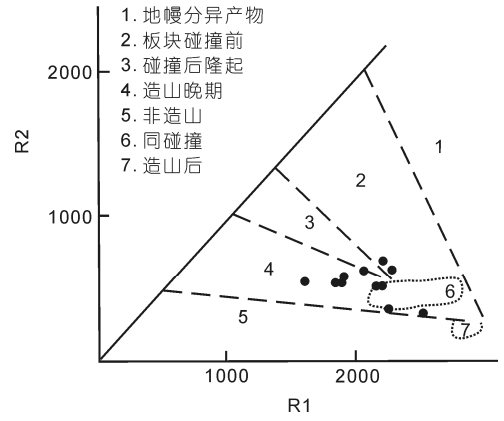


图 13　R1-R2 图解[74]

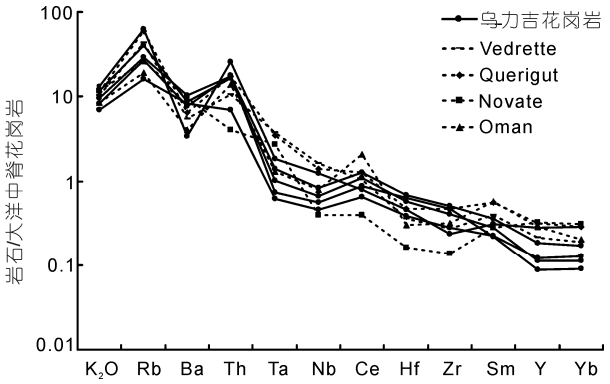


图 14　样品与典型的后碰撞花岗岩大洋中脊标准化图解

Vedrette, Querigut, Novate, Oman 为典型的后碰撞花岗岩, 花岗岩数据和标准化值据 Pearce[50]

地球化学特征的后碰撞花岗岩.

根据研究区原石炭系阿木山组的沉积建造分析, 中、下岩段为火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩建造, 反映了火山弧及弧后盆地沉积组合的基本特征, 这与乌力吉岩体具有火山弧特征是相吻合的. 这一结果表明, 以恩格尔乌苏为代表的古亚洲洋晚石炭世的向南俯冲在阿拉善地块北缘形成了沟弧盆体系. 由查干础鲁剖面(图 2)可以看出, 阿木山组上岩段由粉砂质页岩-砂岩-含砾砂岩-砾岩组成, 为一套陆相磨拉石建造, 根据最新的国际地层划分标准, 现已划归下二叠统, 表明该区弧后盆地在早二叠世已经闭合, 即宗乃山-沙拉扎山岛弧在早二叠世已经和雅布赖-巴音诺尔公古陆块拼合在一起, 结束了弧后盆地的演化, 成为具有岛弧特征的新增生陆壳.

从乌力吉花岗岩与阿木山组的侵入接触关系可以知道岩体的形成时代晚于早二叠世, 由于缺少精确的年龄, 前人认为宗乃山-沙拉扎山为形成于海西期或海西晚期的岛弧花岗岩. 但本文获得的乌力吉花岗岩离子探针锆石 U-Pb 年龄为(250.8±2.0) Ma, 即形成于二叠纪末至三叠纪初. 对于恩格尔乌苏蛇绿岩带所代表的洋壳最终闭合时间, 王廷印等[18,19,24]认为在晚二叠世末期或稍晚, 吴泰然等[11,12]认为是在二叠纪之后, 晚三叠世之前. 如果乌力吉岩体是火山弧花岗岩, 则说明研究区在二叠纪末期仍为岛弧环境, 恩格尔乌苏蛇绿岩所代表的洋盆尚未闭合闭合, 沟弧盆体系及相应的建造组合也应存在, 但这与查干础鲁剖面的观测结果不相符合. 显然在二叠纪末期沙拉扎山构造带仍为岛弧环境的证据不足. 更多的证据显示乌力吉花岗岩为后碰撞花岗岩, 其具有的火山弧花岗岩性质是因为源区之前经历过岛弧的演化阶段, $\varepsilon_{Nd}(t)$值同时也指示了源区有幔源物质的加入. 结合区域地质资料可以认为, 晚石炭世阿拉善地块北缘确实存在有沟弧盆体系, 恩格尔乌苏蛇绿岩所代表的洋盆和查干础鲁蛇绿岩所代表的弧后盆地在早二叠世已经闭合, (250.8±2.0) Ma 已经进入了后碰撞演化阶段. 研究表明, 晚石炭世到三叠纪, 华北板块北缘普遍发生了幔源物质的底侵作用[66,75~84], 这与乌力吉岩体形成的地质背景是相一致的.

由于宗乃山-沙拉扎山岛弧带中未获得代表岛弧花岗岩的样品, 其时代尚难确定. 根据查干础鲁蛇绿岩带研究的初步结果(由于机时限制, 仅获得 3 个数据), 辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 362 Ma. 根据蒙古的研究结果, 恩格尔乌苏古洋北侧同样存在弧-盆体系, 325.5~332.2 Ma 的花岗岩表现为岛弧的特征, 292.3 Ma 的花岗岩表现为后造山的特征[85,86], 结合本区阿木山组中下岩段为火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩建造的弧后盆地特征看, 基本可以认定宗乃山-沙拉扎山构造带为石炭纪岛弧, 而石炭纪末期古洋两侧都发生了俯冲作用, 导致了大洋的快速闭合.

综上所述, 结合岩体的地球化学特征和区域地质背景, 乌力吉花岗岩为具有火山弧地球化学特征的后碰撞花岗岩, 其形成可能是由于幔源物质底侵, 使新增生的陆壳——早先存在的岛弧发生部分熔融, 最终具有壳幔混合特性的岩浆形成. 阿木山组的上岩段, 即粗碎屑岩岩段为下二叠统紫松阶, 限定了恩格尔乌苏蛇绿岩所代表的洋壳的闭合时间为早二叠世, 在此之后至(250.8±2.0) Ma 之前为碰撞造山阶段,

(250.8±2.0) Ma 已经进入了后碰撞演化阶段.

6 结论

(1) 乌力吉花岗岩体 $\varepsilon_{Nd}(t)$在–0.1~1.3, 为具有火山弧地球化学特征的后碰撞花岗岩, 其源区为幔源岩浆与新增生的陆壳—早先存在的岛弧发生部分熔融形成的岩浆的混合.

(2) 早二叠世查干础鲁蛇绿岩所代表的弧后洋盆闭合, 即宗乃山-沙拉扎山岛弧在早二叠世已经和雅布赖-巴音诺尔公古陆块拼合在一起, 成为具有岛弧特征的新增生陆壳.

(3) 晚石炭世以恩格尔乌苏蛇绿岩带为代表的古亚洲洋向南俯冲, 在阿拉善地块北缘形成了沟弧盆体系, 并于早二叠世最终闭合, 到晚二叠世已经进入后碰撞阶段.

致谢 在研究和成文过程中, 中国科学院地质与地球物理研究所离子探针中心李献华研究员、固体同位素实验室李潮峰工程师给予大力支持, 审稿人的认真审稿并提出许多建设性的修改意见使作者收获良多, 在此表示衷心的感谢.

参考文献

1 Tang K. Tectonic development of Paleozoic fold belts at the north margin of the Sino-Korean craton. Tectonics, 1990, 9: 249–260
2 Tang K, Yan Z. Regional metamorphism and tectonic evolution of the Inner Mongolian suture zone. J Metamor Geol, 1993, 11: 511–522
3 Kheraskova T N, Didenko A N, Bush V A, et al. The Vendian-Early Paleozoic history of the continental margin of Eastern Paleogondwana, Paleoasian Ocean, and Central Asian Fold belt. Russ J Earth Sci, 2003, 5: 165–184
4 Yue Y, Liou J G, Graham S A. Tectonic correlation of Beishan and Inner Mongolia orogens and its implications for the palinspastic reconstruction of north China. In: Hendrix M S, Davis G A, eds. Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central and Eastern Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation. Geol Soc Am Mem, 2001, 194: 101–116
5 何国琦, 李茂松, 刘德全, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社; 香港: 香港文化教育出版社, 1994. 1–437
6 Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. Chemi Geol, 1997, 138: 135–159
7 Wang B, Chen Y, Zhan S, et al. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from Yili Block and their geodynamic implications on evolution of Chinese Tianshan Belt. Earth Planet Sci Lett, 2007, 263: 288–308
8 Hendrix M S, Graham S A, Amory J Y, et al. Noyon Uul Syncline, southern Mongolia; lower Mesozoic sedimentary record of the tectonic amalgamation of Central Asia. Geol Soc Am Bull, 1996, 108: 1256–1274
9 Solomovich L I, Trifonov B A. Post-collisional granites in the South Tien Shan Variscan collisional belt, Kyrgyzstan. J Asian Earth Sci, 2002, 21: 7–21
10 Charvet J, Shu L, Laurent-Charvet S. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China): Welding of the Tarim and Junggar plates. Episodes, 2007, 30: 162–185
11 吴泰然. 阿拉善地块北缘古生代岩石圈的物质组成和构造演化. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 1990. 1–132
12 Wu T R, He G Q. Tectonic Units and Their Fundamental Chatacteristics on the Northern Margin of the Alxa Block. Acta Geol Sin, 1993, 6: 373–385
13 Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. J Asian Earth Sci, 2006, 26: 207–224
14 Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian orogenic belt. Tectonics, 2003, 22: 1069
15 Xiao W J, Windley B F, Huang B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. Int J Earth Sci, 2009, 98: 1189–1217
16 Dobretsov N L, Berzin N A, Buslov M M. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean. Int Geol Rev. 1995, 37: 335–360
17 Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. J Geol Soc London, 2007, 164: 31–47

18 王廷印, 王士政, 王金荣. 阿拉善地区古生代陆壳的形成和演化. 兰州: 兰州大学出版社, 1994. 1–215
19 王廷印, 王金荣, 王士政. 阿拉善北部恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带的发现及其构造意义. 兰州大学学报(自然科学版), 1992, 28: 194–196
20 王金荣, 宋春晖, 高军平, 等. 阿拉善北部恩格尔乌苏蛇绿混杂岩的形成机制. 兰州大学学报(自然科学版), 1995, 31: 140–146
21 王廷印, 张铭杰, 王金荣. 恩格尔乌苏冲断带特征及大地构造意义. 地质科学, 1998, 33: 385–394
22 吴泰然, 何国琦. 阿拉善地块北缘的蛇绿混杂岩带及其大地构造意义. 现代地质, 1992, 6: 286–296
23 Wu T R, He G Q, Zhang C. On Paleozoic Tectonics in the Alxa Region. Acta Geol Sin, 1998, 72: 256–263
24 王廷印, 刘金坤, 王士政, 等. 阿拉善北部中蒙边界地区晚古生代拉伸作用及构造岩浆演化. 中国区域地质, 1993, (4): 317–327
25 王廷印, 王金荣, 刘金坤, 等. 宗乃山-沙拉扎山陆壳基底火山弧火成岩组合及地球化学特征. 地球化学, 1994, 23(增刊): 62–172
26 王廷印, 高军平, 王金荣, 等. 内蒙古阿拉善北部地区碰撞期和后造山期岩浆作用. 地质学报, 1998, 72: 126–137
27 周良仁, 于浦生. 阿拉善地区的华力西运动. 西北地质, 1990, (2): 22–31
28 王喜宽, 张丽莉, 廖蕾, 等. 巴彦诺尔公花岗岩体与乌力吉花岗岩体的地球化学特征及成矿意义. 华南地质与矿产, 2004, (1): 24–28
29 张永清, 韩建刚, 孟二根, 等. 内蒙古阿拉善盟巴音诺日公地区赛里超单元的特征及构造意义. 华南地质与矿产, 2003, (2): 36–40
30 耿元生, 吴春明, 沈其韩, 等. 阿拉善地区新元古代晋宁期变形花岗岩的发现及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 2002, 21: 412–420
31 任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 等. 阿拉善断块富碱侵入岩岩石地球化学和 Nd, Sr, Pb 同位素特征及其意义. 地学前缘, 2005, 12: 292–301
32 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991. 1–725
33 李文国, 李庆富, 姜万德. 全国地层多重划分对比研究(15), 内蒙古自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版, 1996. 1–344
34 鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 等. 内蒙古西乌珠穆沁旗地区石炭二叠纪岩石地层. 地层学杂志, 2005, 29(增刊): 512–519
35 陈践发, 卢进才, 石正勇, 等. 内蒙古西部额济纳旗及其邻区石炭系-二叠系烃源岩的发育特征和生烃潜力评价. 地质通报, 2010, 29: 346–350
36 Li X H, Liu Y, Li Q L, et al. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. Geochem Geophys Geosyst, 2009, 10: Q04010, doi: 10.1029/2009GC002400
37 Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. Improved $^{206}Pb/^{238}U$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. Chem Geol, 2004, 205: 115–140
38 Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses. Geostand Newsl, 1995, 19: 1–23
39 Li Q L, Li X H, Liu Y, et al. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique. J Anal At Spectrom, 2010, 25: 1107–1113
40 Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. Earth Planet Sci Lett, 1975, 26: 207–221
41 Lugwig K R. Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley Geochr Center Spec Publ, 2003, 4: 1–71
42 Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contrib Mineral Petrol, 2002, 143: 602–622
43 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 2004, 49: 1589–1604
44 Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids. Geol Soc Am Bull, 1989, 101: 635–643
45 Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 1989, 22: 247–263
46 Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contrib Mineral Petrol, 1976, 58: 63–81
47 Sun S S, Mcdonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins. Geol Soc Spec Publ, 1989, 42: 313–345
48 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 2006, 22: 2249–2269
49 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩按照压力的分类. 地质通报, 2006, 25: 1274–1278
50 Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace-element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. J Petrol, 1984, 25: 956–983
51 Pearce J A. Sources and settings of granitic rocks. Episodes, 1996, 19: 120–125
52 Yang Y H, Zhang H F, Chu ZY, et al. Combined chemical separation of Lu,Hf,Rb,Sr,Sm and Nd from a single rock digest and precise and accurate isotope determinations of Lu-Hf, Rb-Sr and Sm-Nd isotope systems using Multi-collector ICP-MS and TIMS. Int J Mass Spectrom, 2010, 290: 120–126
53 Jahn B M, Wu F Y, Hong D W. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia. Proc

Indian Acad Sci (Earth Planet Sci), 2000, 109: 5–10
54 江思宏, 聂凤军. 北山地区花岗岩类成因的 Nd 同位素制约. 地质学报, 2006, 80: 826–842
55 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向. 北京: 地质出版社, 2002. 1–408
56 范洪海, 闵茂中, 陈佳, 等. 甘肃北山野马泉岩体同位素地球化学特征. 地球学报, 2005, 26(增刊): 78–83
57 Hong D W, Zhang J S, Wang T, et al. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt. J Asian Earth Sci, 2004, 23: 799–813
58 Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. Chem Geol, 1997, 138: 135–159
59 赵振华, 王中刚, 邹天人, 等. 新疆乌伦古富碱侵入岩成因探讨. 地球化学, 1996, 25: 205–220
60 韩宝福, 王式洸, 孙元林, 等. 正 $\varepsilon_{Nd}(T)$值的准铝-过铝花岗岩: 新疆也布山岩体. 科学通报, 1998, 43: 1323–1328
61 Wang T, Jahn B M, Kovach V P, et al. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt. Lithos, 2009, 110: 359–372
62 赵振华, 王中刚, 邹天人, 等. 阿尔泰花岗岩类 REE 及 O, Pb, Sr, Nd 同位素组成及成岩类型. 见: 涂光炽, 主编. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 1993. 239–266
63 Chen B, Jahn B M, Wilde S, et al. Two contrasting paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. Tectonophysics. 2000, 328: 157–182
64 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 等. 兴蒙造山带正 $\varepsilon_{Nd}t$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. 地学前缘, 2000, 7: 441–456
65 李华芹, 谢才富, 常海亮. 新疆北部主要有色贵金属矿床成矿期同位素年代学研究. 北京: 地质出版社, 1998. 1–264
66 Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, et al. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. Tectonophysics, 2000, 328: 89–113
67 Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. Lithos, 2003, 67: 191–204
68 周泰禧, 陈江峰, 李学明. 新疆阿拉套山花岗岩类高 ε_{Nd} 值的成因探讨. 地质科学, 1996, 31: 71–79
69 Helo C, Hegner E, Kroner A, et al. Geochemical signature of Paleozoic accretionary complexes of the Central Asian Orogenic Belt in South Mongolia: Constraints on arc environments and crustal growth. Chem Geol, 2006, 227: 236–257
70 Jahn B M, Capdevila R, Li D Y, et al. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: Geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. J Asian Earth Sci, 2004, 23: 629–653
71 Heinhorst J, Lehmann B, Ermolov P, et al. Paleozoic crustal growth and metallogeny of Central Asia: Evidence from magmatic-hydrothermal ore systems of Central Kazakhstan. Tectonophysics, 2000, 328: 69–87
72 李昌年. 构造岩浆判别的地球化学方法及其讨论. 地质科技情报, 1992, 11: 73–78
73 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别. 地质通报, 2008, 27: 1–18
74 Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. Chem Geol, 1985, 48: 43–55
75 Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. Episodes, 2000, 23: 82–92
76 樊祺诚, 隋建立, 刘若新, 等. 汉诺坝榴辉岩相石榴辉石岩——岩浆底侵作用新证据. 岩石学报, 2001, 17: 1–6
77 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 等. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义. 地质学报, 1994, 68: 219–230
78 邵济安, 张任祜, 韩庆军, 等. 内蒙古喀喇沁堆晶岩捕虏体和寄主闪长岩的同位素年龄. 地球化学, 2000, 29: 331–336
79 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 等. 内蒙古东部早中生代堆积岩捕虏体的发现. 科学通报, 1999, 44: 478–485
80 佘宏全, 徐贵忠, 周瑞, 等. 内蒙东部红花沟金矿田早中生代构造-岩浆活动及对金成矿的控制作用. 现代地质, 2000, 14: 408–416
81 佘宏全, 王义文, 李庆环, 等. 内蒙古赤峰柴胡栏子金矿基性麻粒岩包体特征及其成矿动力学意义. 地质学报, 2006, 80: 863–875
82 张晓晖, 张宏福, 汤艳杰, 等. 内蒙古中部锡林浩特-西乌旗早三叠世 A 型酸性火山岩的地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 2006, 22: 2769–2780
83 施光海, 苗来成, 张福勤, 等. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义. 科学通报, 2004, 49: 384–389
84 Zhang X H, Zhang H F, Zhai M G, et al. Geochemistry of Middle Triassic gabbros from northern Liaoning, North China: Origin and tectonic implications. Geol Maga, 2009, 146: 540–551
85 Batkhishig B, Noriyoshi T, Greg B. Magmatism of the Shuteen Complex and Carboniferous subduction of the Gurvansaikhan terrane, South Mongolia. J Asian Earth Sci, 2010, 37: 399–411
86 Blight J H S, Crowley Q G, Petterson M G, et al. Granites of the Southern Mongolia Carboniferous Arc: New geochronological and geochemical constraints. Lithos, 2010, 116: 35–52