

新疆东天山旱草湖环状岩体锆石U-Pb年龄、地球化学特征及成因

王伟^{1,2}, 孟勇², 王凯², 宿晓虹², 余吉远², 吕舜², 郭周平², 全守村²
WANG Wei^{1,2}, MENG Yong², WANG Kai², SU Xiaohong², YU Jiyuan², LÜ Shun²,
GUO Zhouping², QUAN Shoucun²

1. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室/中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
2. 长安大学, 陕西 西安 710064

1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant ore Deposits, MNR/Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China

摘要:以新疆东天山旱草湖地区中酸性环状岩体为研究对象,进行LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄和全岩地球化学研究,探讨其成因和地质意义。结果表明,侵入英云闪长岩的最老年龄为 275.0 ± 2.9 Ma (MSWD=4.8),侵位时代为二叠纪。岩体 Al_2O_3 含量为14.46%~17.05%,A/CNK为0.93~1.09,属准铝质和弱过铝质系列,较富集 K_2O ,MgO含量较低,为0.71%~2.84%, $Mg^\#$ 值为33.3~48.6。微量元素高Sr、低Y,Sr含量为 217×10^{-6} ~ 740×10^{-6} ,Y含量为 4.26×10^{-6} ~ 21.4×10^{-6} ,Sr/Y值为16.87~145.07,富集大离子亲石元素Rb、Sr、Ba,亏损高场强元素Nb、Ta、Ti。稀土元素配分模式图呈现平坦右倾的轻稀土元素富集、重稀土元素亏损,表明岩体来源于石榴子石和金红石较稳定而斜长石不稳定的区域,属于角闪岩相向榴辉岩相过渡阶段,可能是同时期底侵的产物。地球化学特征表明岩体不是一期岩浆事件结晶分离演化的结果,不同岩性的岩体之间没有发生结晶分离。部分熔融程度和新生幔源组分的不同导致了旱草湖环状花岗质岩体的形成,二叠纪旱草湖地区存在较强烈的中酸性岩浆活动,是东天山二叠纪构造-岩浆演化的响应。

关键词:新疆;东天山;旱草湖;中酸性环状岩体;锆石U-Pb年龄;地球化学

中图分类号:P597+.3;P588.12 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2019)05-0777-13

Wang W, Meng Y, Wang K, Su X H, Yu J Y, Lü S, Guo Z P, Quan S C. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and petrogenesis of ringed pluton in the Hancaohu area, eastern Tianshan Mountains of Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(5):777-789

Abstract: Choosing the Hancaohu intermediate-acid annular pluton distributed in East Tianshan Mountains of Xinjiang as the study object, the authors used LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope chronology and geochemical characteristics to study the petrogenesis and geological significance of the pluton. The results indicate that the age of the earliest intrusive tonalite pluton is 275.0 ± 2.9 Ma (MSWD=4.8), suggesting that its emplacement epoch is Permian. The Al_2O_3 of the ringed pluton is 14.46%~17.05%, and A/CNK is 0.93~1.09, suggesting metaluminous and weak peraluminous series. The rocks are enriched in K_2O , and their MgO content is 0.71%~2.84% and $Mg^\#$ value is 33.3~48.6. Their trace elements are high in Sr and low in Y, the content of Sr is 217×10^{-6} ~ 740×10^{-6} , that of Y is 4.26×10^{-6} ~ 21.4×10^{-6} , and Sr/Y ratio is 16.87~145.07. They are enriched in LILEs (Rb, Sr, Ba) and depleted in HFSEs (Nb, Ta,

收稿日期:2017-06-05;修订日期:2017-07-18

资助项目:中国地质调查局项目《中国大地构造演化和国际亚洲大地构造图编制》(编号:DD20190364)和《新疆东天山1:25万沁城幅区调(修测)》(编号:1212011120473)

作者简介:王伟(1979-),男,博士,高级工程师,从事地质调查与区域成矿研究。E-mail:26064166@qq.com

通讯作者:孟勇(1979-),男,硕士,高级工程师,从事区域地质调查工作。E-mail:16392800@qq.com

Ti). They are characterized by LREE enrichment and HREE depletion, implying that they were formed in an area with stable garnet, rutile and unstable plagioclase, belonging to the transitional stage from amphibolite facies to eclogite facies; they were probably formed by underplating in the same period. The variation of main elements and trace elements content and discontinuous LREE/HREE show that the pluton was not formed by crystallization evolution of one magmatic event, and the plutons of different lithologies are not separately crystallized from each other. Comprehensive analyses show that the lithospheric extension after Permian collision in Huangshan–Jingerquan area caused asthenosphere mantle upwelling and lithosphere delamination. The lithosphere vertical accretion at the boundary of the underplating crust and mantle induced the partial melting and produced high K calc–alkaline magma. With the instant intrusion of the magma, the difference of partial melting and newly formed mantle source components led to the formation of Hancaohu granitic pluton. It is shown that there was violent intermediate–acid magmatism in the Hancaohu area in Permian, and it was the response to tectonic–magmatism evolution in Permian in East Tianshan Mountains.

Key words: Xinjiang; East Tianshan Mountains; Hancaohu; intermediate–acid annular pluton; zircon U–Pb ages; geochemistry

新疆东天山造山带处于塔里木陆壳板块与准噶尔洋壳板块聚合部位,东西延长约560km,南北宽约110km^[1-4],其上发育大规模石炭纪—二叠纪花岗岩类及少量泥盆纪与三叠纪花岗岩类^[5-10]。花岗岩是大陆地壳的主要组成部分,是板块俯冲碰撞及陆壳垂向增生的重要产物,对于研究壳幔演化过程,探讨板块相互作用及形成构造背景具有重要的意义^[11]。众多研究者对东天山广泛发育的晚古生代岩浆作用开展了年代学、岩石学、地球化学等方面的研究^[12-14],并取得了重要进展。但对旱草湖地区特殊形态(环状中酸性岩体)侵入体的研究较少。而这种特殊形态的岩体,其岩石地球化学特征、形成机制及构造背景可能具有特殊的构造意义。因此,笔者在参与“新疆东天山1:25万沁城幅区调(修测)”项目过程中,对旱草湖环状中酸性岩体进行了详细的野外地质调查,采集了大量样品开展分析测试,通过对锆石U–Pb年龄、岩石地球化学数据处理,研究环状中酸性岩体的成因、形成的构造环境等,为完善东天山古生代岩浆格架、构造–岩浆演化与成矿作用关系提供新的依据。

1 地质背景与样品特征

1.1 区域地质背景

新疆天山构造带传统上被划分为北天山、中天山和南天山三部分^[15]。研究区位于北天山构造带,康古尔塔格–红石山韧性剪切带以南地区(图1)。北天山地区广泛发育石炭纪—二叠纪中酸性侵入岩体,以康古尔塔格断裂为界分为南、北两带,石炭纪中酸性侵入岩(334~319Ma)以南带西段岩浆活动最强烈,花岗岩体数量多、规模大。二叠纪中酸性侵入岩(293~236Ma)以北带中西段岩浆活动较强,南带西段与东段次之^[16]。

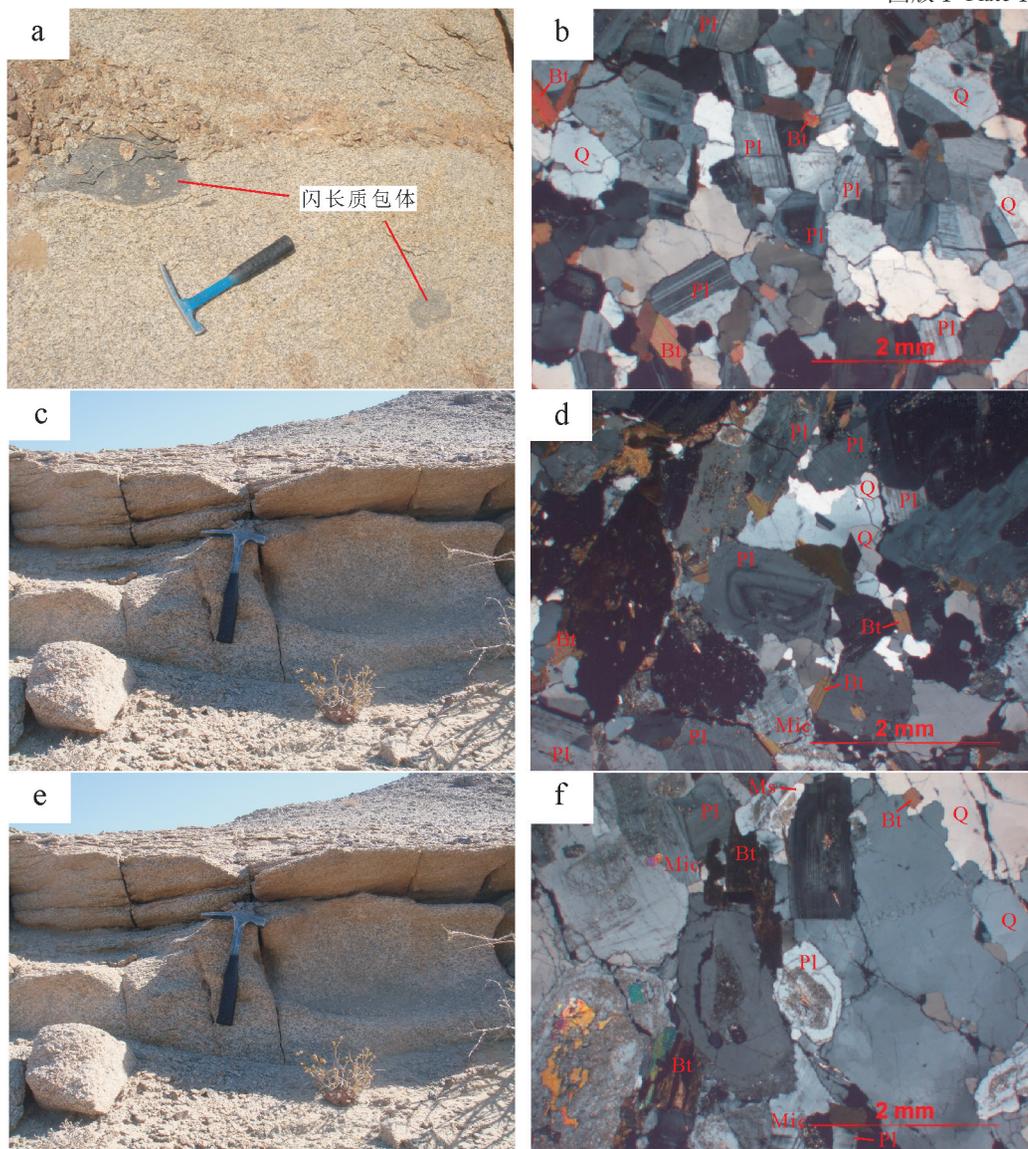
旱草湖中酸性岩体侵入下石炭统干墩组灰色—深灰色长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩中(图1),长轴方向呈NE–SW向展布,与区域构造线方向近于一致,其北部、西部出露同时代的黄山、黄山东等大型超基性岩体。旱草湖中酸性岩体与干墩组是旱草湖穹窿背斜的组成部分。该岩体呈环形出露,由中心至边部岩性依次为二长花岗岩、花岗闪长岩、正长花岗岩、石英闪长岩和英云闪长岩。从野外侵入关系判断,侵入顺序为英云闪长岩–花岗闪长岩–二长花岗岩–正长花岗岩–石英闪长岩。

1.2 岩体地质特征

英云闪长岩分布在环状岩体的最外围,西部与花岗闪长岩相间出露,东部与二长花岗岩相间分布,它们之间呈侵入接触,其与外围早石炭世地层干墩组大多为侵入接触。岩体中心被花岗闪长岩和二长花岗岩侵入。岩体呈灰色–浅灰色,粒径主要为细粒,块状构造,花岗结构,镜下为半自形–他形结构,粒径0.4~2mm,岩石主要由斜长石(65%)、石英(25%)、黑云母(10%)及金红石、锆石、磷灰石等组成。斜长石呈他形–半自形粒状,常见增生环带。石英为他形粒状,单晶或聚晶呈现。黑云母呈叶片状半自形,具红褐色–浅褐多色性(图版I–a,b)。

花岗闪长岩主要分布在环状岩体中部和西部,出露零散,面积较大的岩体位于环状岩体核部地区,西部侵入英云闪长岩中,而岩体中部被二长花岗岩侵入。岩体呈浅褐灰色,粒径主要为中粒,块状构造,花岗结构,镜下为不等粒半自形–他形结构,粒径0.2~5mm,主要成分为斜长石(55%)、石英(20%)、微斜长石(10%)、黑云母(10%)、角闪石(5%)、榍石、磁铁矿、磷灰石、锆石等。斜长石多呈半自形,少量他形,粒径中–大(1~5mm)。内部常具环带构造,残留少量帘石化、绢云母化。而石英、黑

图版 I Plate I



a. 英云闪长岩与闪长质包体; b. 英云闪长岩镜下特征;
 c. 花岗闪长岩; d. 花岗闪长岩镜下特征; e. 二长闪长岩; f. 二长花岗岩镜下特征。Pl—斜长石;
 Mic—微斜长石; Q—石英; Ms—白云母; Bt—黑云母

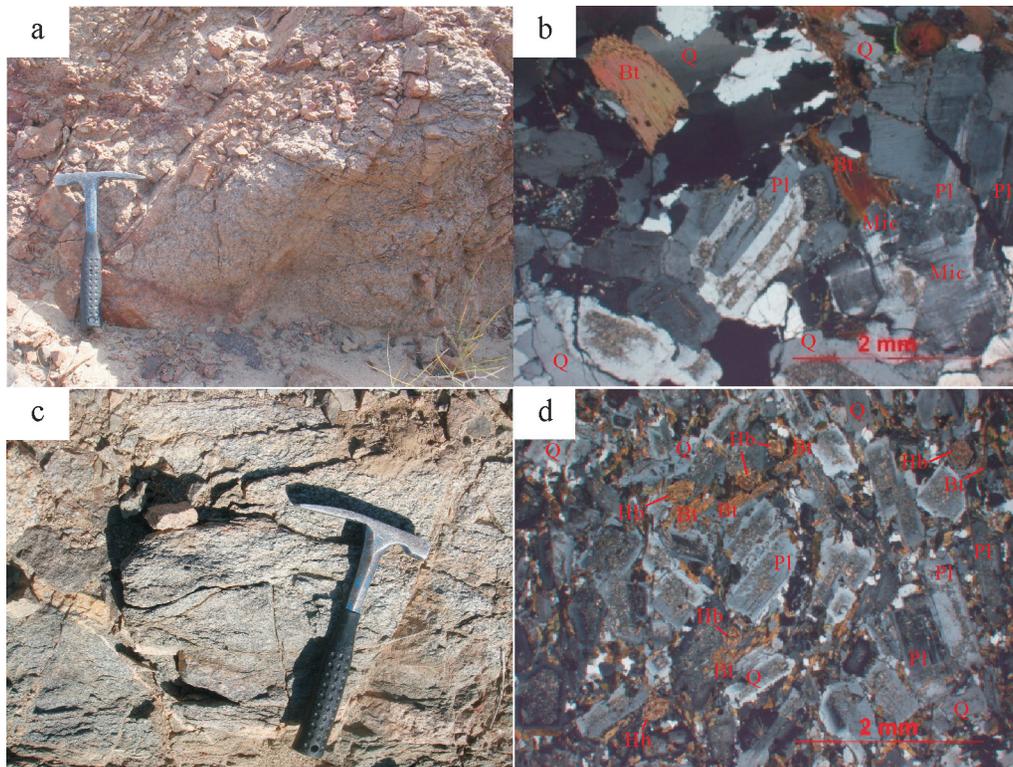
结构,内核局部绢云母化、帘石化,黑云母和角闪石分布在长石粒间,大致定向,黑云母交代角闪石。石英呈他形粒状,粒度最小,似有塑变特征,与角闪石、黑云母一样分布于斜长石粒间(图版II—c、d)。

2 旱草湖岩体锆石U-Pb测年

为确定环状中酸性岩体的形成年代,选择最早期侵入外围早石炭世干墩组的英云闪长岩进行锆石U-Pb年龄测定。

锆石U-Pb年龄样品碎样及挑选由河北省区域地质矿产调查研究所完成。在显微镜下挑选晶形完好的锆石,将其制备成样品靶。在西北大学扫描电镜实验室对所选取的锆石进行透射光、反射(BSE)和阴极发光(CL)显微照相。依据尽量避开裂隙、包裹体及不同时代混合区域的原则,选取锆石测点位置。最后,在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行锆石LA-ICP-MS测年。使用仪器为Agilent 7500a ICPMS和GeoLas 200M(波长193nm)

图版 II Plate II



a. 正长闪长岩; b. 正长花岗岩镜下特征; c. 花岗闪长岩; d. 花岗闪长岩镜下特征。
Pl—斜长石; Q—石英; Mic—微斜长石; Hb—角闪石; Bt—黑云母

ArF 准分子激光器系统。激光剥蚀斑束直径为 $30\mu\text{m}$, 剥蚀样品深度为 $20\sim 40\mu\text{m}$ 。以氦气为激光剥蚀物质的载气, 并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 实现仪器最佳化调试。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, 每测定 4~5 个样品点, 插入测 1 次标准样, 每测定 15~20 个点前后各测 2 次 NIST SRM610。锆石年龄的计算采用标准锆石 91500 为外部标准物质, 成分标样用 NIST SRM610, 其中 ^{29}Si 为内标元素。样品的同位素比值及元素含量计算采用 Glitter_ver4.0 (Macquarie University) 程序, 用 Anderson^[17] 软件对测试数据进行普通铅校正后, 用 Isoplot(ver3.0) 程序制作锆石 U-Pb 谐和图^[18]。测定结果见表 1。

本次在英云闪长岩的 18 个测点中选取了 13 个有效测点, 测试所选锆石主要呈粒状或短柱状, 半透明—透明, 只有少部分形态不是非常完整, 裂隙及包裹体少见。锆石阴极发光图像(图 2)显示, 绝大

部分锆石具有典型的岩浆振荡环带结构, 且 Th/U 值为 $0.16\sim 0.41$, 进一步指示岩浆锆石的特点^[19-21]。在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}-^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图(图 3-a)上, 所有测点都位于谐和线上或其附近, 具有很好的一致性。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $275.0\pm 2.9\text{Ma}$ (MSWD=4.8)(图 3-b)。年龄真实可靠, 可以作为英云闪长岩的结晶年龄。前已述及, 本样品采于环状岩体最外环, 因此认为早二叠世为早草湖环状岩体的最早侵位时代, 并在随后发生了数次侵位。

3 岩石地球化学特征

样品在西北大学碎样室粉碎。主量、微量与稀土元素的测试分析均在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。主量元素采用 Xios4.0kwX-荧光光谱仪测试分析, 分析偏差优于 1%。微量和稀土元素利用酸溶法制备样品后采用等离子体质谱仪 ICP-MS 测试分析, 分析偏差优于 5%~10%。主量、微量和稀土元素分析测试结果列于表 2。

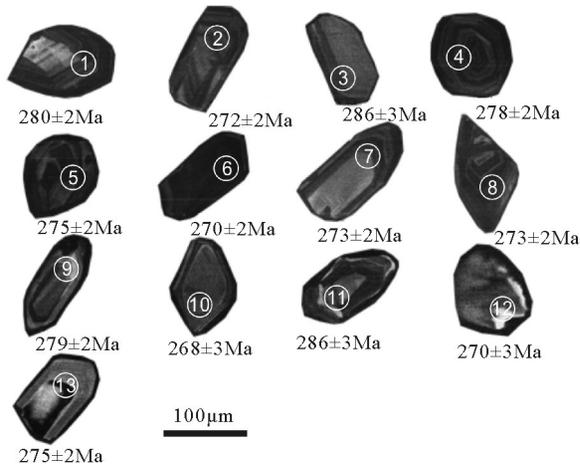


图2 早草湖环状岩体英云闪长岩锆石阴极发光图像
Fig. 2 Cathodoluminescence images of zircons from tonalite in Hancuohu ringed pluton

3.1 主量元素

早草湖环状岩体自外而内的 SiO_2 含量变化较大(60.03%~71.92%),最先侵位的英云闪长岩酸性程度较高,花岗闪长岩居中,二长花岗岩和正长花岗岩酸性程度最高,最后侵位的石英闪长岩酸性程度最低。所有岩性 Al_2O_3 和 Na_2O 含量都较高, Al_2O_3 为14.46%~17.05%, Na_2O 为3.52%~4.60%。而 K_2O 和 CaO 含量差别较大, K_2O 含量在1.07%~4.28%之间,英云闪长岩和石英闪长岩 K_2O 含量较低,分别为1.07%~1.38%、1.30%~1.76%;二长花岗岩和正长花岗岩 K_2O 含量较高,分别为3.07%~3.30%、4.04%~

4.28%; CaO 含量变化于1.95%~4.73%之间,二长花岗岩和正长花岗岩 CaO 含量较低,分别为2.09%~2.17%、1.95%~2.09%,而石英闪长岩和花岗闪长岩 CaO 含量较高,分别为4.61%~4.73%、4.33%~4.53%。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值变化同样较大,正长花岗岩 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}>1$,而其他岩类的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}<1$ 。所有岩性的里特曼指数 σ 均小于3.3,属于钙碱性系列。 SiO_2 - K_2O 图解(图4)显示,所有岩体都属于高钾钙碱性-钙碱性系列。

不同岩性岩体的Al饱和指数 A/CNK 也有变化,英云闪长岩、二长花岗岩和正长花岗岩: $1<A/\text{CNK}<1.1$;花岗闪长岩和石英闪长岩: $A/\text{CNK}<1$ 。在 A/NK - A/CNK 图解(图5)上,英云闪长岩属于过铝质系列,且 A/NK 含量较高,与其标准刚玉分子(C) $>1\%$ 相符。二长花岗岩和正长花岗岩同样属于过铝质系列,但其 A/NK 含量较低。花岗闪长岩和石英闪长岩则属于准铝质系列。

在 Na_2O - K_2O 成因图解(图6)上,正长花岗岩位于I型与S型交汇处,其他不同岩性的岩体位于I型花岗岩内部。

主量元素特征表明,早草湖环状岩体并非一次岩浆事件结晶分离演化的结果。

3.2 微量元素

早草湖环状中酸性岩体中,不同岩性的岩体Sr含量都较高,为 217.00×10^{-6} ~ 740.00×10^{-6} ,但英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和石英闪长岩的Rb含量不高,为 44.60×10^{-6} ~ 95.4×10^{-6} ,仅正长花岗岩

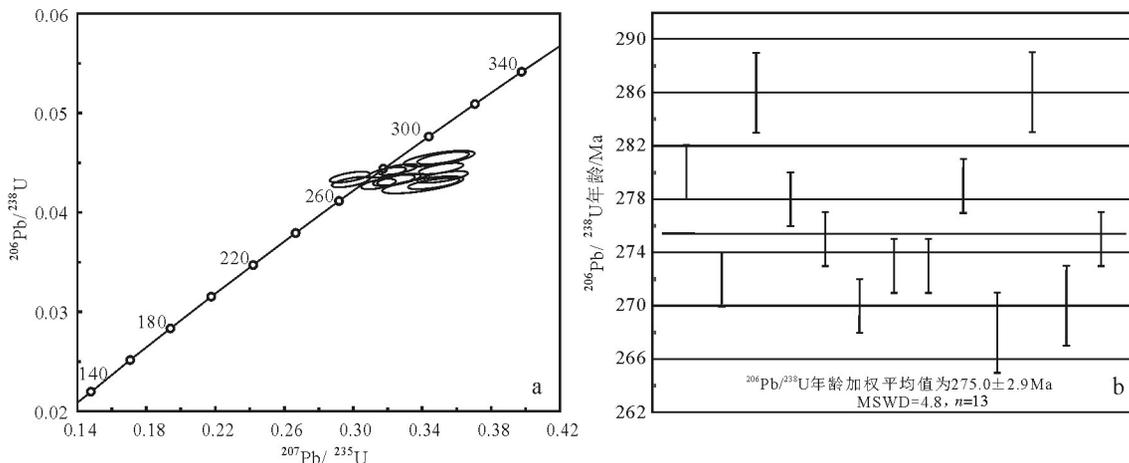


图3 英云闪长岩锆石U-Pb谐和图(a)与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值(b)

Fig. 3 U-Pb concordia diagram (a) and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages (b) of the zircons from the tonalite

表 1 旱草湖环状岩体英云闪长岩锆石 U-Th-Pb 定年分析数据

Table 1 Zircon U-Th-Pb analytic results of tonalite in Hancaohu ringed pluton

测定 点号	含量/ 10^{-6}		同位素比值						同位素年龄/Ma						$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$				
	Pb	Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ
1	28.19	7.51	0.05337	0.00132	0.3260	0.0075	0.04432	0.00035	0.01451	0.00025	345	38	287	6	280	2	291	5	0.31
2	25.62	335.37	0.05027	0.00129	0.2983	0.0072	0.04306	0.00034	0.01447	0.00024	207	41	265	6	272	2	290	5	0.37
3	54.73	242.8	0.05589	0.00228	0.3497	0.0137	0.04542	0.00052	0.0162	0.00043	448	67	305	10	286	3	325	9	0.36
4	21.01	149.6	0.05273	0.00127	0.3199	0.0071	0.04405	0.00034	0.01428	0.00027	317	36	282	5	278	2	287	5	0.16
5	24.64	215.82	0.0497	0.00135	0.2980	0.0076	0.04355	0.00036	0.01399	0.00024	181	44	265	6	275	2	281	5	0.33
6	21.98	107.43	0.05332	0.00123	0.3146	0.0067	0.04285	0.00032	0.01342	0.00016	342	34	278	5	270	2	269	3	0.29
7	21.12	141.68	0.05457	0.00163	0.3253	0.0091	0.0433	0.00039	0.01403	0.00028	395	47	286	7	273	2	282	6	0.41
8	14.38	90.15	0.05455	0.00131	0.3248	0.0072	0.04324	0.00034	0.01233	0.00019	394	36	286	6	273	2	248	4	0.38
9	409.11	451.27	0.05504	0.00174	0.3361	0.0102	0.04428	0.00037	0.01382	0.00009	414	72	294	8	279	2	277	2	0.35
10	15.33	25.29	0.05326	0.00282	0.3118	0.0161	0.04246	0.00052	0.0133	0.00012	340	123	276	12	268	3	267	2	0.24
11	28.29	7.76	0.05339	0.00198	0.3335	0.0120	0.04531	0.00041	0.01419	0.0001	345	86	292	9	286	3	285	2	0.39
12	14.75	103.07	0.05595	0.00217	0.3303	0.0124	0.04281	0.00041	0.01333	0.0001	451	88	290	9	270	3	268	2	0.35
13	20.19	149.86	0.05866	0.00174	0.3520	0.0098	0.04357	0.00039	0.00795	0.00024	555	45	306	7	275	2	160	5	0.20

Rb 含量较高($174.00 \times 10^{-6} \sim 184.00 \times 10^{-6}$), Rb/Sr 值都很低(0.06~0.6)。由表 2 所示,二长花岗岩和正长花岗岩 Ba 的含量均大于花岗闪长岩,二长花岗岩 Sr 的含量大于花岗闪长岩, Rb/Sr 值小于花岗闪长岩。前人研究提出,若一个侵入体能按照由基性到酸性演化,则会产生斜长石的分离结晶^[24],而斜长石的分离结晶会导致 Al_2O_3 、CaO、Sr 和 Ba 含量降低, Rb/Sr 值升高。环状岩体所有岩体的 Ba 含量都很高($191.00 \times 10^{-6} \sim 912.00 \times 10^{-6}$), Rb/Sr 值都很低,这与斜长石的分离结晶不符。因此,根据微量元素特

征判断,花岗闪长岩与二长花岗岩、正长花岗岩不是同一个岩浆事件结晶分离的结果。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7)上,岩体整体富集大离子亲石元素(LILE),如 Rb、Sr、Ba 等,不同岩性岩体有一定的变化范围,其中二长花岗岩和石英闪长岩 Sr 富集较明显,岩体整体亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta 和 Ti,亏损程度略有不同,但 Zr、Th 相对富集,显示可能有幔源组分的代入,环状中酸性岩体形成过程中以壳源物质占主导,同时可能有一定的幔源组分参与。Y 含量较低,为 $4.26 \times 10^{-6} \sim$

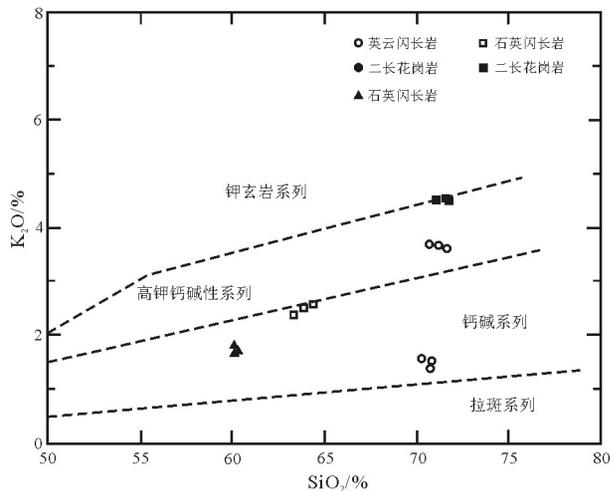


图 4 旱草湖环状岩体 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解^[22]

Fig. 4 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram of Hancaohu ringed pluton

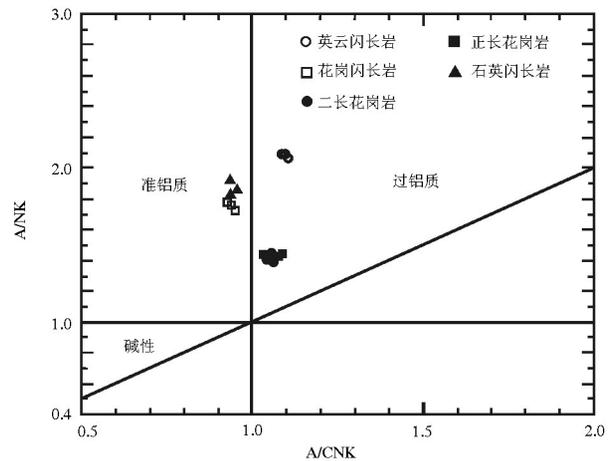


图 5 旱草湖环状岩体 A/CNK-A/NK 图解^[23]

Fig. 5 A/CNK-A/NK diagram of Hancaohu ringed pluton

表2 旱草湖环状岩体主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace elements and REE analytic data of Hancaohu ringed pluton

样号	YY-01	YY-02	YY-03	HG-01	HG-02	HG-03	EC-01	EC-02	EC-03	ZC-01	ZC-02	ZC-03	SY-01	SY-02	SY-03
岩性	英云闪长岩			花岗闪长岩			二长花岗岩			正长花岗岩			石英闪长岩		
SiO ₂	70.58	71.36	71.59	63.07	64.32	64.06	71.54	70.95	71.80	71.19	71.92	71.54	60.03	60.24	60.17
Al ₂ O ₃	15.59	15.36	15.28	16.45	16.57	16.48	14.98	15.33	14.87	14.79	14.53	14.46	16.88	16.97	17.05
Fe ₂ O ₃	0.31	0.38	0.33	1.62	1.46	1.47	0.78	0.81	0.74	0.82	0.85	0.86	2.30	2.17	2.26
FeO	2.60	2.30	2.34	3.00	2.52	2.54	1.00	0.98	0.92	1.00	0.92	1.02	3.34	3.43	3.37
CaO	3.68	3.78	3.66	4.53	4.33	4.36	2.09	2.14	2.17	1.95	2.01	2.09	4.61	4.73	4.72
MgO	0.88	0.75	0.76	2.47	2.10	2.14	0.72	0.71	0.71	0.73	0.72	0.77	2.77	2.80	2.84
K ₂ O	1.38	1.07	1.13	2.26	2.40	2.47	3.30	3.21	3.07	4.28	4.12	4.04	1.76	1.39	1.30
Na ₂ O	3.71	3.79	3.74	4.21	4.16	4.13	4.28	4.51	4.34	3.52	3.54	3.62	4.56	4.60	4.59
TiO ₂	0.40	0.37	0.36	0.73	0.61	0.62	0.29	0.28	0.27	0.26	0.26	0.27	0.91	0.92	0.93
P ₂ O ₅	0.11	0.10	0.11	0.24	0.20	0.21	0.096	0.098	0.095	0.08	0.084	0.088	0.38	0.37	0.37
MnO	0.06	0.06	0.06	0.077	0.066	0.067	0.037	0.037	0.037	0.042	0.042	0.045	0.082	0.084	0.084
烧失量	0.70	0.69	0.65	1.22	1.12	1.33	0.84	0.86	0.90	0.96	0.90	1.11	2.24	2.20	2.20
总计	100.00	100.01	100.01	99.877	99.856	99.877	99.953	99.915	99.922	99.622	99.896	99.913	99.862	99.904	99.884
σ	0.93	0.83	0.82	2.08	2.01	2.06	2.01	2.13	1.90	2.15	2.02	2.05	2.34	2.08	2.02
K ₂ O/Na ₂ O	0.37	0.28	0.30	0.54	0.58	0.59	0.77	0.71	0.71	1.21	1.16	1.12	0.39	0.31	0.28
TFeO/MgO	3.27	3.52	3.46	1.80	1.82	1.80	2.36	2.40	2.23	2.38	2.34	2.32	1.95	1.92	1.90
A/CNK	1.09	1.07	1.08	0.93	0.95	0.94	1.03	1.03	1.03	1.05	1.04	1.02	0.94	0.96	0.97
A/NK	2.05	2.07	2.07	1.75	1.75	1.74	1.41	1.40	1.42	1.41	1.410	1.40	1.79	1.87	1.90
Cu	3.57	3.42	5.34	25.10	21.8	21.70	7.87	7.62	7.51	8.72	9.59	8.88	39.70	37.70	33.80
Pb	8.59	6.96	6.41	16.40	17.80	19.50	44.10	28.30	25.20	117.00	36.00	93.40	16.70	9.29	13.10
Zn	52.10	47.30	46.70	73.40	69.60	63.60	50.40	49.20	47.80	40.50	48.10	42.60	99.20	98.70	98.00
Cr	1.65	2.58	1.63	47.90	38.80	40.80	8.53	9.48	7.49	23.50	12.80	10.70	58.80	56.40	60.60
Ni	0.76	1.19	0.89	28.70	24.20	25.70	3.38	3.82	3.34	6.90	6.09	4.40	26.30	26.10	28.20
Co	4.73	4.01	4.15	14.20	14.00	13.70	3.48	3.41	3.96	3.60	4.18	3.41	16.90	21.40	16.40
Li	45.40	37.20	39.90	32.20	26.20	25.90	48.60	45.90	43.60	45.70	45.80	44.20	34.00	36.60	38.90
Rb	70.70	69.50	69.30	90.60	87.20	90.70	95.40	79.40	84.80	184.00	175.00	174.00	55.00	47.20	44.60
Cs	2.96	2.15	2.17	4.31	3.67	3.44	3.79	3.57	3.36	3.86	3.91	4.02	3.19	2.70	2.59
Sr	226.00	223.00	217.00	422.00	468.00	453.00	619.00	615.00	618.00	305.00	290.00	289.00	737.00	724.00	740.00
Ba	260.00	191.00	194.00	348.00	414.00	425.00	912.00	865.00	823.00	597.00	575.00	573.00	356.00	282.00	294.00
V	31.20	27.40	26.30	81.00	66.60	68.20	28.10	28.50	25.30	27.50	27.00	26.30	96.60	97.60	104.00
Sc	7.56	7.53	5.76	10.00	8.48	9.16	3.80	3.17	3.07	3.64	3.36	3.42	11.00	9.70	10.60
Nb	4.49	3.96	3.96	10.10	7.84	7.86	4.48	4.47	4.22	8.49	7.61	7.82	8.07	8.01	8.66
Ta	0.60	0.40	0.42	1.14	0.86	0.87	0.46	0.48	0.43	1.16	0.98	1.04	0.61	0.55	0.59
Zr	220.00	193.00	208.00	220.00	192.00	173.00	128.00	126.00	115.00	126.00	131.00	139.00	118.00	195.00	181.00
Hf	4.72	4.06	4.46	5.41	4.73	4.28	3.56	3.56	3.13	3.92	3.82	4.34	3.35	4.72	4.46
Be	1.51	1.30	1.25	2.20	2.06	2.10	1.51	1.68	1.61	2.63	2.52	2.59	1.48	1.52	1.48
Ga	16.40	15.60	15.70	19.50	19.30	18.70	17.90	18.40	17.60	17.40	16.50	16.60	20.60	20.10	20.80
U	0.98	1.26	1.21	1.86	1.40	1.48	1.41	1.49	1.49	2.56	2.49	2.55	0.70	0.72	0.77
Th	5.30	4.65	4.79	7.68	4.91	5.53	5.06	5.60	4.00	12.00	9.87	12.20	1.83	1.74	1.93
Rb/Sr	0.31	0.31	0.32	0.21	0.19	0.20	0.15	0.13	0.14	0.60	0.60	0.60	0.07	0.07	0.06
Nb/Ta	7.48	9.90	9.43	8.86	9.12	9.03	9.74	9.31	9.81	7.32	7.77	7.52	13.23	14.56	14.68
Sr/Y	16.87	22.97	19.91	19.72	28.54	27.62	138.48	142.36	145.07	28.77	31.45	31.24	49.80	49.25	47.44
La	19.60	18.60	19.00	28.60	20.20	22.30	18.20	16.20	14.00	16.60	19.00	17.20	18.30	17.50	18.30
Ce	39.00	37.50	38.00	61.40	45.80	48.10	36.20	31.90	27.70	35.90	39.20	36.90	44.60	43.60	44.90
Pr	4.60	4.34	4.47	7.30	5.46	5.56	3.90	3.48	3.03	4.36	4.60	4.32	5.89	5.69	5.90
Nd	17.60	16.10	17.10	27.60	21.80	21.30	13.40	12.10	11.00	16.20	16.80	16.10	24.70	23.70	24.20
Sm	2.92	2.72	2.88	5.06	4.04	3.93	1.98	1.84	1.80	3.17	2.90	2.86	4.73	4.67	4.67
Eu	0.87	0.84	0.83	1.24	1.08	1.06	0.62	0.61	0.62	0.70	0.66	0.67	1.34.00	1.37.00	1.40
Gd	2.53	2.20	2.53	4.68	3.62	3.73	1.39	1.41	1.22	2.65	2.29	2.29	4.30	4.02	4.17
Tb	0.37	0.32	0.34	0.69	0.53	0.56	0.17	0.18	0.15	0.36	0.31	0.32	0.57	0.55	0.57
Dy	2.26	1.70	1.94	3.75	2.96	2.91	0.85	0.84	0.8	1.89	1.62	1.61	2.91	2.77	3.06
Ho	0.47	0.34	0.40	0.78	0.62	0.6	0.17	0.16	0.16	0.40	0.34	0.33	0.54	0.55	0.58
Er	1.52	1.03	1.18	2.21	1.74	1.74	0.48	0.44	0.42	1.12	0.96	0.97	1.52	1.51	1.57
Tm	0.23	0.14	0.17	0.34	0.26	0.26	0.072	0.068	0.065	0.17	0.15	0.15	0.21	0.22	0.23
Yb	1.78	1.07	1.30	2.18	1.70	1.68	0.48	0.45	0.43	1.10	0.98	1.00	1.33	1.41	1.47
Lu	0.27	0.16	0.21	0.33	0.26	0.24	0.078	0.07	0.064	0.17	0.15	0.16	0.18	0.20	0.22
Y	13.40	9.71	10.90	21.40	16.40	16.40	4.47	4.32	4.26	10.60	9.22	9.25	14.80	14.70	15.60
ΣREE	94.02	87.06	90.35	146.16	110.07	113.97	77.99	69.748	61.459	84.79	89.96	84.88	111.12	107.76	111.24
LREE/HREE	8.97	11.51	10.20	8.76	8.42	8.73	20.13	18.26	17.58	9.78	12.24	11.43	8.62	8.59	8.37
δEu	0.98	1.05	0.94	0.78	0.86	0.85	1.14	1.16	1.28	0.74	0.78	0.80	0.91	0.97	0.97
Eu/Eu*	0.96	1.02	0.92	0.77	0.85	0.83	1.09	1.12	1.21	0.72	0.76	0.78	0.89	0.94	0.95
(La/Yb) _N	7.42	11.72	9.85	8.84	8.01	8.95	25.56	24.27	21.95	10.17	13.07	11.60	9.28	8.37	8.39

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

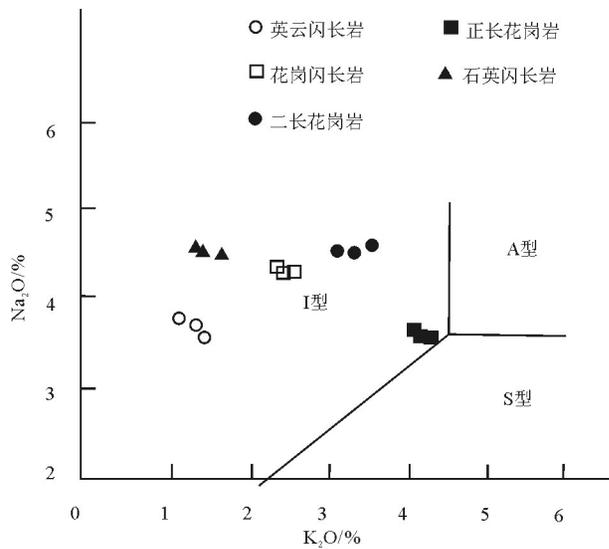


图6 早草湖环状岩体K₂O-Na₂O成因图解^[25]

Fig. 6 K₂O-Na₂O origin diagram of Hancaohu ringed pluton

21.4×10⁻⁶, Sr/Y 值为 16.87~145.07, 其曲线总体呈右倾多峰谱型, 亏损 Nb、Ta 和 Ti, 富 Sr, 与东天山埃达克岩较相似^[27-28]。

3.3 稀土元素

早草湖环状中酸性岩体中, 花岗闪长岩的稀土元素总量最高, 为 113.97×10⁻⁶~146.16×10⁻⁶, 二长花岗岩和正长花岗岩的稀土元素总量最低, 分别为 61.459×10⁻⁶~77.99×10⁻⁶ 和 84.79×10⁻⁶~89.96×10⁻⁶。其中, 二长花岗岩的 LREE/HREE 值最高, 为 17.58~20.13, 其 (La/Yb)_N 值也最高, 为 22.0~25.6, 表明轻、重稀土元素分馏显著, 而其他岩体的 LREE/HREE 值略低, 总体为 8.37~12.24, (La/Yb)_N 值也较二长花岗岩更低, 为 7.4~13.1, 轻、重稀土元素分馏程度不如二长花岗岩。从这个角度可以推断, 按照英云闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩-石英闪长岩侵位顺序, 环状中酸性岩体应该不是同一个岩浆演化序列(即岩浆分离结晶)的产物。因为按轻、重稀土元素分馏的特点, 若岩体是一个完整的演化序列, 轻稀土元素(LREE)较重稀土元素(HREE)碱性更强, 更应该在岩浆作用晚期富集。而从野外地质特征和 U-Pb 年龄看, 轻、重稀土元素分馏程度最高的二长花岗岩并不是最晚期的侵入体, 在二长花岗岩之后侵位的正长花岗岩的轻、重稀土元素分馏远不及前者。结合前述分析, 环状中酸

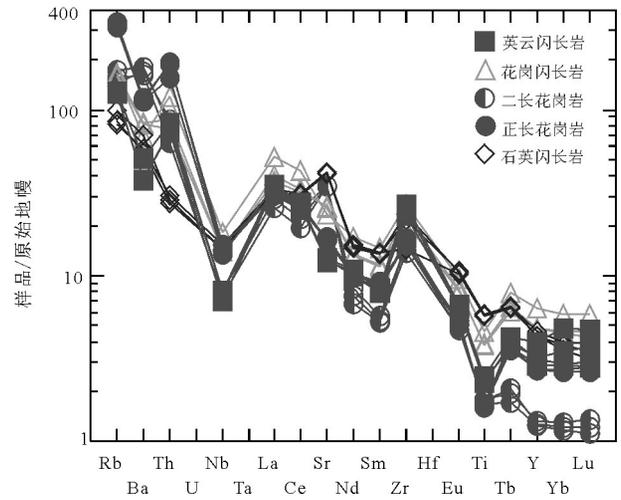


图7 早草湖环状岩体微量元素蛛网图

(标准化值据参考文献[26])

Fig. 7 Trace element spidergrams of Hancaohu ringed pluton

性岩体的形成不是一个岩浆事件分离结晶的结果, 而是不同期次的独立侵入体。在所有的岩体中, (La/Sm)_{CN} 值都大于 1, 为 2.4~5.8, 反映不同岩性岩体 LREE 都较富集。球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 8)显示 LREE 富集右倾, 与张旗等^[29]总结出的埃达克岩的配分曲线极类似。δEu 值均在 1 左右, 二长花岗岩为 1.14~1.28, Eu 呈轻微正异常, 而其他岩体的 δEu 值略小于 1, Eu 呈轻微负异常。

3.4 早草湖岩体源岩性质

花岗岩的形成过程极其复杂, 其主要性质的区别在于源岩的差异。许多学者认为, 对于花岗岩的研究, 源岩性质是最重要的^[11,30-31]。花岗岩在形成过程中, 会对其源岩的性质具有相当大程度的继承性, 通过一些地球化学特征可从一定程度上判定花岗岩的源岩性质。

在 C/MF-A/MF 图解(图 9)上, 可见英云闪长岩、花岗闪长岩和石英闪长岩的源岩基本位于基性岩和变质砂岩重叠区, 而二长花岗岩和正长花岗岩位于变质砂岩部分熔融区。这种特征显示, 环状中酸性岩体的形成既继承了基性岩的特点, 又继承了碎屑岩的特点, 岩体的形成可能与壳幔相互作用有关。

4 讨论

早草湖环状中酸性岩体不同岩性间具有极相

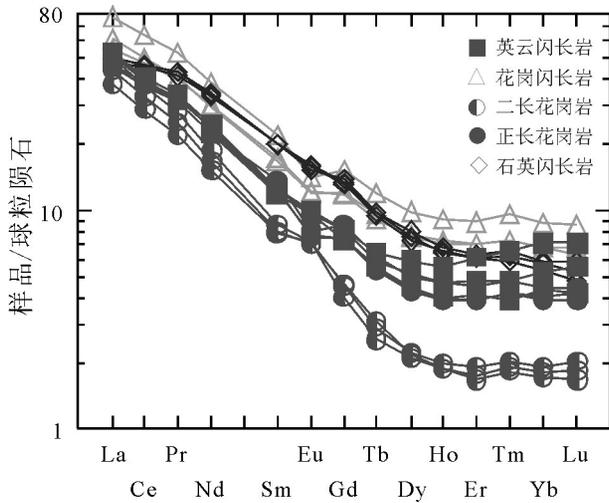


图8 早草湖环状岩体球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(标准化值据参考文献[26])

Fig. 8 Normalized REE patterns of Hancaohu ringed pluton

似的微量元素原始地幔标准化曲线(图7)和稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图8)特征,由于微量和稀土元素的地球化学性质较稳定,相似的构成说明环状中酸性岩体的源岩及成因过程较类似。

在判断源岩的 K_2O-Na_2O 图解(图6)上,环状中酸性岩体集中位于I型花岗岩内, Na_2O/K_2O 值较高,在判断碱性-钙碱性的 SiO_2-K_2O 图解(图4)上,环状中酸性岩体集中位于高钾钙碱性-钙碱性系列,故将其概括为I型高钾钙碱性-钙碱性系列。通常情况下,源区为火成岩熔融的I型花岗岩 K_2O 含量都较低,而高钾的I型花岗岩要求其源区K含量较高。地壳岩石部分熔融实验证明,高钾的I型花岗岩只能起源于地壳中含水的钙碱性-高钾钙碱性、镁铁质或中性变质岩^[32]。通过Pitcher等^[33]的研究,主要有2种构造背景可以产生高钾钙碱性岩浆,一种为大陆岛弧背景,通过地幔楔与下沉板块流体相互作用而形成;另一种为后碰撞背景,通过地壳加厚拉伸引发镁铁质岩浆底侵形成。

张旗等^[34]根据花岗岩中微量元素Sr、Yb的含量,提出一种花岗岩形成与压力关系的模式,即具有高Sr、低Yb特征的中酸性岩浆岩可能与榴辉岩处于平衡,形成深度较大;而具有低Sr、高Yb特征的岛弧安山岩-英安岩-流纹岩与斜长角闪岩处于平衡,形成深度较浅。依据该模式,本次研究中采集的中

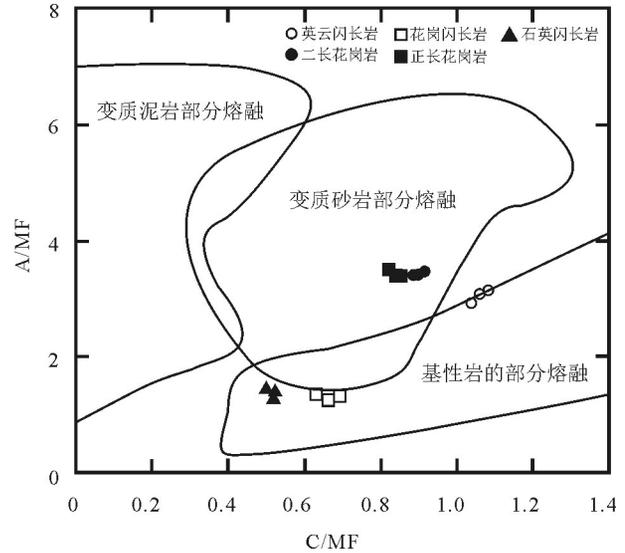


图9 早草湖环状岩体C/MF-A/MF图解

Fig. 9 C/MF-A/MF diagram of Hancaohu ringed pluton

酸性岩石样品,都具有很低的Yb含量(平均值小于 1.23×10^{-6})和较高的Sr含量(平均值大于 400×10^{-6}),故推断其应形成于加厚的下地壳环境,类似于埃达克岩。CIPW标准矿物的计算(表3)表明,只有英云闪长岩体的标准刚玉分子(C) $>1\%$ 。所有岩体的MgO含量都较低(均小于3%), $Mg^{\#}$ 值也较低(均小于48.6),说明岩体可能没有受到被消减板片交代的地幔楔物质的影响,与基性-超基性岩的地幔来源不同。

幔源岩浆底侵壳幔边界是壳幔相互作用及陆壳生长的重要机制^[35-36],早草湖环状中酸性岩体的成岩时代主要在二叠纪,而黄山-镜儿泉地区在二叠纪处于后碰撞伸展阶段已得到绝大多数学者的认同^[6,37-38]。在这一时期,岩石圈地幔拉伸减薄,软流圈地幔上涌至壳幔边界,导致陆壳出现垂向增生,地壳加厚,完全可以满足产生高Sr、低Yb花岗岩的条件。据王涛等^[39]研究,在东天山后造山阶段,的确有较多的深部幔源物质加入到地壳中。

本文研究的早草湖环状中酸性岩体 Al_2O_3 含量高(14.46%~17.05%),A/CNK值为0.93~1.09,属准铝质和弱过铝质,较富集 K_2O ,属高钾钙碱性-钙碱性系列,MgO含量较低,为0.71%~2.84%, $Mg^{\#}$ 值为33.3~48.6。微量元素具高Sr、低Y特征,Sr含量为 217×10^{-6} ~ 740×10^{-6} ,Y含量为 4.26×10^{-6} ~ 21.4×10^{-6} ,

表 3 旱草湖环状岩体 CIPW 标准矿物计算结果

Table 3 CIPW normative mineral calculation data of Hancaohu ringed pluton

岩性	样品号	Q	Or	Ab	An	C	Di wo	Di en	Di fs	Hy en	Hy fs	Mt	Il	Ap	%
英云闪长岩	YY-01	33.26	8.22	31.58	17.75	1.53				2.22	3.99	0.45	0.77	0.24	
	YY-02	34.97	6.37	32.25	18.3	1.3				1.89	3.43	0.55	0.71	0.22	
	YY-03	35.46	6.73	31.81	17.64	1.48				1.91	3.56	0.48	0.69	0.24	
花岗闪长岩	HG-01	16.37	13.55	36.07	19.54		0.76	0.48	0.24	5.78	2.9	2.38	1.41	0.53	
	HG-02	18.33	14.38	35.61	19.66		0.38	0.24	0.12	5.07	2.45	2.14	1.17	0.44	
	HG-03	17.99	14.83	35.42	19.37		0.56	0.35	0.17	5.08	2.41	2.16	1.2	0.47	
二长花岗岩	EC-01	28.63	19.69	36.5	9.9	0.76				1.82	0.79	1.14	0.56	0.21	
	EC-02	26.99	19.17	38.48	10.14	0.75				1.79	0.74	1.19	0.54	0.22	
	EC-03	29.34	18.34	37.04	10.32	0.66				1.79	0.71	1.08	0.52	0.21	
正长花岗岩	ZC-01	29.31	25.66	30.15	9.34	0.99				1.85	0.82	1.21	0.5	0.18	
	ZC-02	30.43	24.62	30.22	9.58	0.76				1.82	0.64	1.24	0.5	0.19	
	ZC-03	29.63	24.19	30.97	9.98	0.51				1.95	0.81	1.26	0.52	0.19	
石英闪长岩	SY-01	12.8	10.66	39.48	20.85		0.13	0.08	0.03	7.01	2.91	3.42	1.77	0.85	
	SY-02	13.7	8.41	39.79	21.81	0.08				7.16	3.21	3.22	1.79	0.83	
	SY-03	14.1	7.87	39.71	21.76	0.3				7.27	3.01	3.35	1.81	0.83	

注:Q—石英;Or—正长石;Ab—钠长石;An—钙长石;C—刚玉;Di Wo—透辉石中的硅辉石;Di En—透辉石中的顽火辉石;Di Fs—透辉石中的正铁辉石,Hy En—紫苏辉石中的顽火辉石;Hy Fs—紫苏辉石中的正铁辉石;Mt—磁铁矿;Il—钛铁矿;Ap—磷灰石

Sr/Y 值为 16.87~145.07,在原始地幔标准化曲线上,富集大离子亲石元素 Rb、Sr、Ba,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti。另外,环状中酸性岩体中的 MgO、Mg[#] 及 Ni 含量都偏低,显示其可能没有受到被消减板片交代的地幔楔物质的影响,与基性-超基性岩的地幔来源不同,是软流圈地幔玄武质岩浆底侵壳幔边界后,在地壳垂向增生的条件下诱发部分熔融的结果。不同岩体之间岩性的差异可能与部分熔融程度的差别和熔融时新生幔源物质组分的不同有关,最终岩体的形成可能是不同熔融程度和不同幔源组分岩浆分期侵入的结果。

5 地质意义

新疆北部晚古生代是大规模岩浆作用的爆发期,尤其是石炭纪—二叠纪,强烈的岩浆活动产生了一系列的大中小型矿床。对于东天山地区,黄山、黄山东、香山、图拉尔根等大中型铜镍硫化物矿床的形成与石炭纪—二叠纪区域地质背景紧密相连。关于东天山地区晚古生代的区域地质背景,争议较大,争议的焦点主要集中在泥盆纪—石炭纪构造背景上。前人对古洋盆闭合的时限一直争论不休。有学者认为古洋盆闭合时间为石炭纪中期^[40],

也有学者认为古洋盆闭合时间为泥盆纪末—石炭纪初期^[41-42],而后在此基础上,又再次拉张形成裂谷^[41,43]。对于黄山—镜儿泉地区,区域地质背景的认识也不统一。有学者^[44]认为,康古尔—镜儿泉构造带是一个弧间盆地,夹于北侧哈尔里克岛弧与南侧觉罗塔格岛弧之间;也有学者^[45-46]认为,康古尔断裂代表北侧哈萨克斯坦板块与南侧塔里木板块碰撞的俯冲带;还有学者^[47-48]认为,康古尔—镜儿泉构造带是一个因觉罗塔格洋向北俯冲形成的弧后盆地,而二叠纪处于后碰撞伸展阶段已得到绝大多数学者的认同^[6,38,49]。本文研究的旱草湖环状中酸性岩体就是此区域背景下的产物。有研究者^[48,50]曾将本文研究的环状中酸性岩体区域统一划分为过铝质花岗岩区,并对应幔源岩浆内侵形成的过铝质花岗岩。然而,通过本次研究,旱草湖环状中酸性岩体应对应幔源岩浆底侵,导致地壳垂向增生而诱发部分熔融形成的高钾钙碱性—钙碱性花岗岩。环状中酸性岩体的存在,说明区域内发生过幔源岩浆的底侵和地壳的垂向增生。

在二叠纪,陆-陆碰撞后岩石圈伸展,导致软流圈地幔上涌,岩石圈拆沉,上涌的软流圈地幔一方面加热产生玄武质岩浆,玄武质岩浆上升,经过结

晶分离形成了黄山东岩体;另一方面底侵壳幔边界产生地壳的垂向增生,诱发部分熔融生成高钾钙碱性岩浆,这些岩浆不断分期侵入,由于部分熔融程度和新生幔源组分的不同,形成早草湖环状中酸性岩体。在伸展环境下,形成的延伸至上地幔的区域性深大断裂(康古尔塔格断裂),为岩浆的上升提供了有利的空间通道。早草湖环状岩体的长轴方向与区域构造线方向一致,其主要成岩时代为二叠纪,表明这一时期早草湖一带存在较强烈的中酸性岩浆活动,是东天山二叠纪构造-岩浆演化的响应。

6 结 论

(1)环状中酸性岩体位于早草湖穹窿背斜内部,从野外的侵入关系判断,侵入顺序为英云闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩-石英闪长岩。

(2)通过U-Pb同位素测年,获得环状中酸性岩体最早侵位的英云闪长岩的成岩年龄为 $275.0 \pm 2.9\text{Ma}$ (MSWD=4.8),表明二叠纪早草湖一带存在较强烈的中酸性岩浆活动,是东天山二叠纪构造-岩浆演化的响应。

(3)不同岩性的岩体轻、重稀土元素比值不连续,依据主量、微量元素含量的变化,岩体不是一个岩浆事件结晶分离演化的结果,彼此之间也没有发生结晶分离。不同岩性岩体间微量元素原始地幔标准化曲线和稀土元素球粒陨石标准化曲线极相似,表明不同岩性岩体的源区和成岩环境相似。

(4)岩体为高钾钙碱性-钙碱性花岗岩,富集大离子亲石元素Rb、Sr、Ba,亏损高场强元素Nb、Ta、Ti。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线上,呈现平坦右倾的轻稀土富集、重稀土元素亏损,说明黄山-镜儿泉地区二叠纪碰撞后的岩石圈伸展,导致软流圈地幔上涌,岩石圈拆沉,底侵壳幔边界产生地壳的垂向增生,诱发部分熔融生成高钾钙碱性岩浆。这些岩浆不断分期侵入,形成了早草湖环状花岗岩体。不同岩体之间岩性的差异可能与部分熔融程度的差别和新生幔源组分的不同有关。

致谢:样品测试工作得到自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室郑民奇教授级高工和韩延兵、程秀花、李艳广高级工程师的大力支持;研究过程中得到中国地质调查局西安地质调查中心陈隽璐、贾群子研究员的有益指导;审稿专家提出宝贵

的意见,在此一并致谢。

参考文献

- [1]Chen Y J, Chen H Y, Zaw K, et al. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1/4): 139-169.
- [2]Chen Y J, Pirajno F, Wu G, et al. Epithermal deposits in North Xinjiang, NW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2012, 101(4): 889-917.
- [3]Huang X W, Qi L, Gao J F, et al. First reliable Re-Os ages of pyrite and stable isotope compositions of Fe(-Cu) deposits in the Hami region, Eastern Tianshan Orogenic Belt, NW China[J]. *Resource Geology*, 2013, 63(2): 166-187.
- [4]Pirajno F. *The Geology and Tectonic Settings of China's Mineral Deposits*[M]. Berlin: Springer, 2013: 1-671.
- [5]Mao J W, Goldfarb R T, Wang Y T, et al. Late Paleozoic base and precious metal deposits, East Tianshan, Xinjiang, China: Characteristics and geodynamic setting[J]. *Episodes*, 2005, 28(1): 23-36.
- [6]顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 等. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1103-1122.
- [7]Zhang L C, Qin K Z, Xiao W J. Multiple mineralization events in the eastern Tianshan district, NW China: Isotopic geochronology and geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2/4): 236-246.
- [8]周涛发, 袁峰, 张达玉, 等. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. *岩石学报*, 2010, 26(2): 478-502.
- [9]王银宏, 薛春纪, 刘家军, 等. 新疆东天山土屋斑岩铜矿床地球化学、年代学、Lu-Hf同位素及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3383-3399.
- [10]Wang Y H, Zhao C B, Zhang F F, et al. SIMS zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology, Hf isotope, and whole-rock geochemistry of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit and granitoids in NE China and their geological significance[J]. *Gondwana Research*, 2015, 28: 1228-1245.
- [11]吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [12]张连昌, 秦克章, 英基丰, 等. 东天山土屋-延东斑岩铜矿带埃达克岩及其与成矿作用的关系[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 259-268.
- [13]Wang Y H, Xue C J, Wang J P, et al. Early Carboniferous adakitic rocks in the area of the Tuwu deposit, eastern Tianshan, NW China: Slab melting and implications for porphyry copper mineralization[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 103: 332-349.
- [14]Wang Y H, Xue C J, Wang J P, et al. Petrogenesis of magmatism in the Yandong region of Eastern Tianshan, Xinjiang: Geochemical, geochronological and Hf isotope Constraints[J]. *International Geology Review*, 2015, 57(9/10): 1130-1151.
- [15]黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. *中国大地构造及其演化*[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1-124.
- [16]王洪亮, 徐学义, 何世平, 等. *中国天山及邻区地质图及说明书*

- (1:100 万)[M]. 北京:地质出版社,2008:22-23.
- [17]Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [18]Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 2002, 184: 123-138.
- [19]Kosler J, Fonneland H, Sylvester P. U-Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies)A comparison of laser ablation LA-ICPMS and SIMS techniques[J]. *Chemical Geology*, 2002, 182: 605-618.
- [20]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[J]. *科学通报*, 2004, 16: 1589-1604.
- [21]王海然, 赵红格, 乔建新, 等. 锆石 U-Pb 同位素测年原理及应用[J]. *地质与资源*, 2013, 3: 229-242.
- [22]Le Maitre. *Igneous Rocks: A classification and Glossary of Terms* (2nd edition)[M]. Cambridge University Press, 2002: 23-86.
- [23]Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1989, 101: 635-643.
- [24]邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京:地质出版社,1985:282-287.
- [25]Collins W J. Nature and origin of A type granites with particular referen- ce to Southeast Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1982, 80:189-200.
- [26]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [27]熊小林, 蔡志勇, 牛贺才, 等. 东天山晚古生代埃达克岩成因及铜金成矿意义[J]. *岩石学报*, 2005, 3: 967-976.
- [28]赵振华, 王强, 熊小林, 等. 新疆北部的两类埃达克岩[J]. *岩石学报*, 2006, 5: 1249-1265.
- [29]张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 9: 2249-2269.
- [30]罗照华, 黄忠敏, 柯珊. 中酸性岩石的基本问题[J]. *地质评论*, 2007, 53(增刊): 180-226.
- [31]张旗, 潘国强, 李承东, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 1141-1152.
- [32]Boztu D, Arehart G B, Platevoet B, et al. High-K, calc-alkaline I-type granitoids from the composite Yozgat batholith generated in a post-collisional setting following continent-oceanic island arc collision in central Anatolia, Turkey[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2007, 91(3): 191-223.
- [33]Pitcher W S. *Granite type and tectonic environment*[C]//Hsu K J. *Mountain Building Process*, London, 1983: 19-40.
- [34]张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩按照压力的分类[J]. *地质通报*, 2006, 25(11): 1274-1278.
- [35]Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca batholith, Peru[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37: 1491-1521.
- [36]金振民, 高山. 底侵作用(underplating)及其壳-幔演化动力学意义[J]. *地质科技情报*, 1996, (2): 1-7.
- [37]韩宝福, 何国琦, 吴泰然. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义[J]. *新疆地质*, 2004, 22(1): 4-11.
- [38]王京彬, 王玉往, 周涛发. 新疆北部后碰撞与幔源岩浆有关的成矿谱系[J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 743-752.
- [39]王涛, 李伍平, 李金宝, 等. 东天山东段同造山到后造山花岗岩幔源组分的递增及陆壳垂向生长意义-Sr、Nd 同位素证据[J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 762-772.
- [40]肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及邻区大地构造[M]. 北京:地质出版社, 1992: 1-169.
- [41]夏林圻, 李向民, 夏祖春, 等. 天山石炭-二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱[J]. *西北地质*, 2006, 39(1): 1-49.
- [42]王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 461-469.
- [43]秦克章, 方同辉, 王书来, 等. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. *新疆地质*, 2002, 20(4): 302-308.
- [44]马瑞士, 王赐银, 叶尚夫. 东天山构造格架及地壳演化[M]. 南京:南京大学出版社, 1993: 16-78.
- [45]周济元, 崔炳芳, 肖惠良, 等. 新疆康古尔-黄山对接碰撞带的存在、成矿模式及成矿预测[J]. *火山地质与矿产*, 2001, 22(4): 252-262.
- [46]李锦轶, 王克卓, 孙桂华, 等. 东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片: 中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1087-1102.
- [47]顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等. 论博格达俯冲撕裂型裂谷的形成与演化[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 585-597.
- [48]唐俊华, 顾连兴, 张遵忠, 等. 东天山黄山-镜儿泉过铝花岗岩矿物学、地球化学及年代学研究[J]. *岩石学报*, 2008, 24(5): 921-946.
- [49]韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(22): 2324-2328.
- [50]顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 等. 东天山黄山-镜儿泉地区二叠纪地质-成矿-热事件: 幔源岩浆内侵及其地壳效应[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2869-2880.