内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞复式花岗岩体时代、成因及地质意义

何付兵[1)]，徐吉祥[1)]，谷晓丹[2)]，程新彬[1)]，魏波[1)]，李昭[1)]，梁亚南[1)]，王泽龙[1)]，黄淇[1)]
1)北京市地质调查研究院，北京，100195；2)中国石油大学(北京)，北京，102200

内容提要：阿木古楞岩体位于内蒙古东乌珠穆沁旗旗行政中心正北。路线地质调查可分解为两期岩石单元：灰黄色中细粒、粗中粒含巨斑二长花岗岩和灰白色细粒二长花岗岩。前者锆石U-Pb加权平均年龄为314.2±2.2Ma，为晚石炭世岩浆活动的产物，后者锆石U-Pb加权平均年龄为167.1±1.3Ma，为中—晚侏罗世岩浆活动的产物。这两期花岗岩副矿物均富含磁铁矿、独居石、磷灰石和榍石，中—晚侏罗世花岗岩还发育萤石矿物。在地球化学特征上，两期花岗岩也表现出相似性：主量元素表现为总体富Si，且有较高的分异指数(DI)及碱/铝(NK/A)、Fe_2O/FeO比值，较低的总Fe、Ti、Mg、Ca和P含量；微量元素蛛网图则表现为富集大离子亲石元素Rb、Th、U、Pb，弱富集轻稀土元素La、Ce，明显亏损高场强元素Nb、Ba和Sr、Ti；而稀土元素配分图表现出相对富集轻稀土元素、亏损重稀土元素，轻重稀土元素分异较大、重稀土曲线却较为平坦的右倾型特征。综合分析认为：两期花岗岩单元均属于高分异准铝质—弱过铝质高钾钙碱性系列的I型花岗岩，其源区物质均可能为来自亏损地幔物质经过改造形成的年轻的陆壳高K、正常水含量的长英质陆壳岩石物质，且晚石炭世花岗岩单元长英质陆壳岩石物质来源中还混合有幔源的玄武质组分。而其中—晚侏罗世花岗岩单元岩浆来源更有可能源于早期的晚石炭世花岗岩的重熔或部分重熔，至少具有类似的岩浆源区。阿木古楞岩体中晚石炭世花岗岩单元形成于中亚造山挤压造山大地构造背景下的同碰撞晚期构造—岩浆事件，中—晚侏罗世花岗岩单元形成于蒙古—鄂霍次克洋和古太平洋构造域转换、大地构造背景以伸展拉张为主的后碰撞造山构造—岩浆事件。

关键词：阿木古楞；花岗岩；锆石U-Pb年龄；岩石地球化学；构造背景；东乌珠穆沁旗

内蒙古东乌珠穆沁旗北部一带构造位置位于西伯利亚板块南缘的查干敖包—奥尤特—朝不楞早古生代构造岩浆带、大兴安岭成矿带西侧(张万益，2008)。从20世纪80年代对这一地区开展区域地质调查工作开始，前人对其相继开展了大量的研究。特别是近些年来，对这一地区花岗岩做了大量的研究。通过对带内的众多岩体研究基本建立了岩浆岩带内的花岗岩演化的年代学格架，查明了岩浆成因演化特征。

相比而言，位于内蒙古东乌珠穆沁旗北部的阿木古楞花岗岩体研究较弱。在1∶20万区域地质调查东乌珠穆沁旗幅❶和宝力格幅❷中，前人根据岩性粒度变化对其进行了相带划分，将其划分为过渡相和边缘相，并参考岩体的岩性特征与相互关系，结合同邻区岩性对比和邻近地区少数同位素年龄资料推测其侵位时代为燕山期晚期。而1∶25万区域地质调查翁图乌兰幅(修测)❸和东乌珠穆沁旗幅(修测)❹根据附近其它岩体进行的U-Pb同位素年龄测试，对比岩体岩性、接触关系修测为华力西期岩体。除了这两次基础地质调查研究外，关于阿木古楞岩体前人未有研究。特别是对于其年代学、地球化学特征、岩石成因及形成的构造背景更是没有做过相关研究。本文基于1∶5区域地质调查野外路线调查，借助当前高精度分析测试手段，对该岩体开展岩石学、岩相学及锆石U-Pb年代学、地球化学研究，深入分析该岩体的岩浆成因、演化及构造背景，为完善查干敖包—奥尤特—朝不楞构造岩浆带岩浆作用和构造意义提供新的资料。

1 岩体特征及样品概况

1.1 岩体特征

阿木古楞岩体位于达斯海各脱—哈沙图一带，

注：本文为内蒙古1∶5万巴彦敖包等四幅区域地质调查项目(基[2010]矿评01-09-04)的成果。
收稿日期：2012-10-29；改回日期：2013-08-23；责任编辑：章雨旭。
作者简介：何付兵，男，1980年生。博士，工程师，构造地质学专业。Email：hefubing14@126.com。

严格受构造线控制,北东近椭圆状产出,出露面积约 120km^2。岩体北西部侵入到晚泥盆世安格尔音乌拉组碎屑岩中,南东部被新近系宝格达乌拉组不整合覆盖。岩体总体岩性较为单一,岩相变化不明显,根据岩性特征、接触关系及地质体宏观展布特征,将其划分为两大单元:灰黄色中细粒含巨斑二长花岗岩单元和灰白色细粒二长花岗岩单元。

灰黄色中细粒含巨斑二长花岗岩单元岩性包括灰黄色中细粒、细粒斑状含黑云母二长花岗岩和灰黄色细中粒二长花岗岩,岩性基本无变化,相互区别主要表现为岩石结构的变化,局部地区可见黑色闪长质包体(图 2a、2b)。该岩性单元分布面积较大,

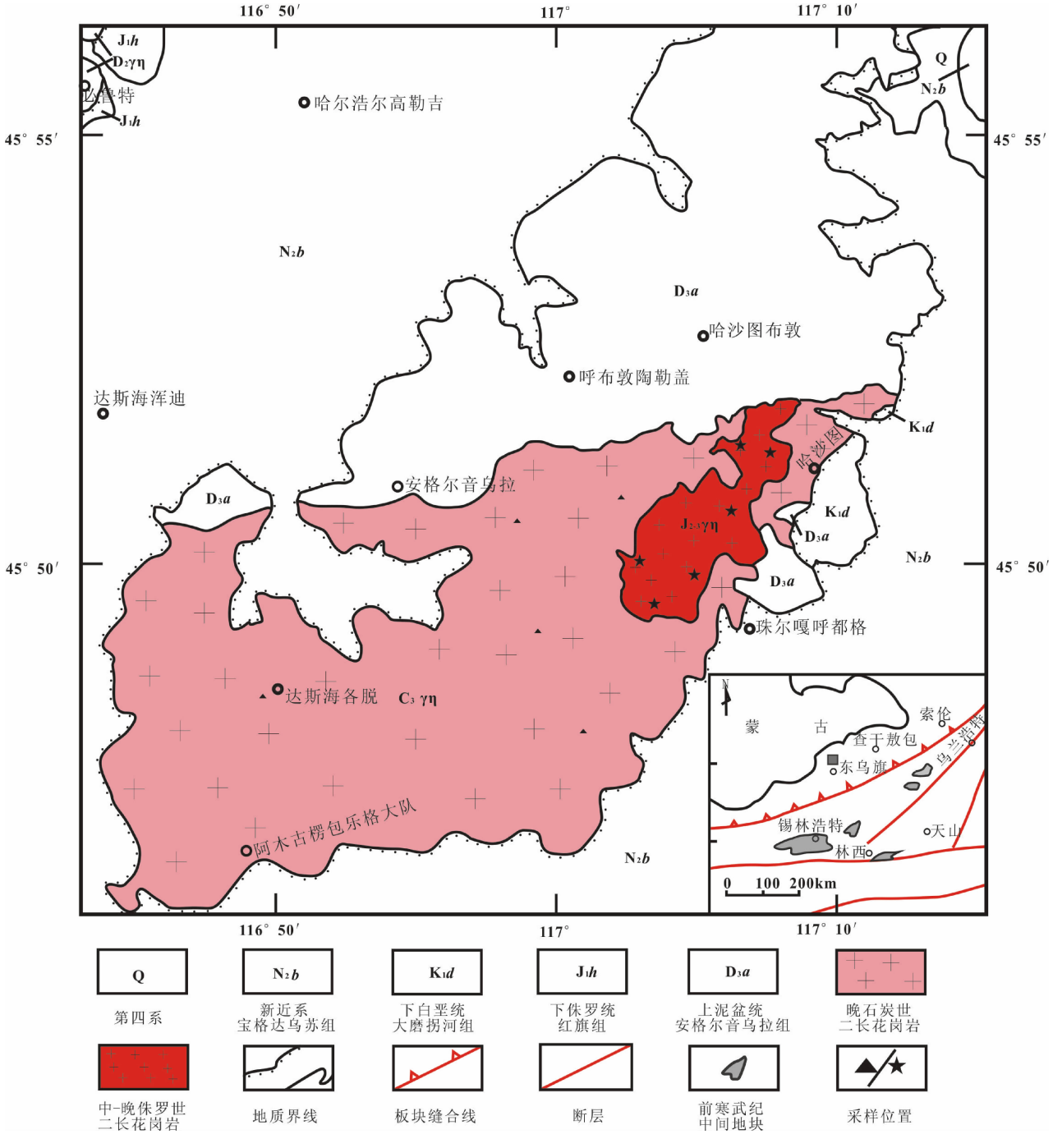

图 1 内蒙古东乌珠穆沁旗地区大地构造位置和地质简图(角图引自洪大卫,略有修改)

Fig. 1 The simplified geological map of the studied area and tectonic position of the East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

Q—Quaternary; N_2b—Neogene Baogedawula Formation; K_1d —Lower Cretaceous Damoguaihe Formation; J_1h —Lower Jurassic Hongqi Formation; D_3a —Upper Devonian Angeeryinwula Formation; $C_3\gamma\eta$—Late Carboniferous Adamellite; $J_{2-3}\gamma\eta$—Middle—Late Jurassic Adamellite

图 2 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞岩体灰黄色中细粒含巨斑二长花岗岩暗色包体及长石巨斑

Fig. 2 Inclusions and the Feldspar phenocrystals of the sallow medium—fine grained adamellite in the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

为岩体的主体构成部分。该期花岗岩单元宏观展布北东向,同岩体主体走向一致。由于岩性总体颗粒较粗,且多数发育斑晶,风化严重,地表残留大量巨型自形程度较好的长石斑晶,大者可达 3 ~ 5cm 长(图 2c)。而露头尺度上,斑晶具有堆积现象(图 2d),形成含大量斑晶层和含少量斑晶层相间分布呈"层"性产出,斑晶分布较为凌乱,无定向性,长石斑晶内部部分可见细粒暗色矿物黑云母类和石英微粒。而其中黑色包体大小不一,变化较大,形状基本为椭圆状、浑圆状,长径范围为 3 ~ 30cm,基本无定向排列,其与寄主岩基本呈现较为截然的接触关系,多数可见淬冷边(图 2a)。包体类型均为闪长质,细粒半自形粒状结构、斑状结构,块状构造,主要由斜长石、石英、黑云母和少量钾长石组成。斜长石多呈 0.3 ~ 1mm 半自形板状或半自形粒状,少数 1 ~ 1.5mm,钾长石 0.2 ~ 0.5mm 它形粒状,石英 0.3 ~ 1mm 它形粒状,少数 1 ~ 1.5mm,黑云母呈 0.3 ~ 1mm 片状,少数 1 ~ 1.5mm,部分绿泥石化,所有包体基本见有钾长石巨斑(图 2a、2b),同寄主岩巨斑特征一致,但往往呈它形—半自形,巨斑不定向,可能为寄主岩中巨斑融入所致。

灰白色细粒二长花岗岩单元仅发育于该岩体的东部,岩体出露面积不大,同前者为侵入接触,侵入前者。其宏观分布上具有弱的岩相变化,边部同前者接触之地粒度稍细,岩性为灰白色细粒二长花岗岩。而中心地带粒度稍粗,并发育个别的长石斑晶,岩性为灰白色细粒含斑二长花岗岩,斑晶数量及大小较第一套少且小得多,其中心地带局部还发生云英岩化现象,而外接触带的安格尔音乌拉组地层中发育弱褐铁矿化和铜矿化现象。该期花岗岩北北东向产出,并发育两组北东和北西走向相互垂直的节理,切割岩体呈棋盘状产出。

1.2 样品概况

在野外路线调查认识的基础上,把阿木古楞岩体解体为灰黄色中细粒含巨斑二长花岗岩单元和灰白色细粒二长花岗岩单元。在考虑岩相变化情况下,选择天然露头新鲜的花岗质岩石分别对其进行取样分析。各采集一个同位素年龄样品(样品号分别为 D7103 和 D6021,对应坐标为 N45°50′57″E117°10′34″和 N45°43′02″E117°02′24″和 11 个地球化学样(含巨斑花岗岩单元 5 个,细粒花岗岩单元 6 个)(见图 1)。

灰黄色中细粒含巨斑二长花岗岩单元所取样品岩性为分布最典型的灰黄色中细粒斑状含黑云母二长花岗岩,岩石斑状结构,块状构造,由斑晶和基质构成。斑晶由浅红色钾长石构成,自形短柱状,大小约 20 ~ 50mm,内部包裹黑云母微粒,约占 8% ±。基质似斑状结构,矿物组成为黑云母 2% ±、斜长石 40% ±、钾长石 28% ± 和石英 30% ±。黑云母:片状,黄褐色,多色性明显,一组解理发育,干涉色为二级红绿,个别表面有铁质,粒径 0.1 ~ 0.8mm,局部见白云母;斜长石:半自形粒状,聚片双晶发育,为更长石,双晶笔直细密,偶见卡纳双晶发育,晶面星散绢云母化,在粒径大的斜长石中包裹石英微粒和长石微晶,粒径 0.3 ~ 10mm,达到粗粒;钾长石:他形粒状,平行消光,晶面泥化,个别包裹斜长石微晶和石英微粒,粒径 0.2 ~ 4mm;石英:它形粒状,晶面干净,波状消光,干涉色一级灰白,粒径 0.1 ~ 3.2mm。除主要造岩矿物外,该花岗岩单元中副矿物较丰富,常见的主要副矿物以磁铁矿为主,还包括锆石、黄铁矿、磷灰石、独居石、赤褐铁矿和钛铁矿。

灰白色细粒二长花岗岩单元所取样品岩性为分布最典型的灰白色细粒二长花岗岩,岩石等粒结构,块状构造,由钾长石 40% ±、斜长石 35% ± 和石英 25% ± 组成。粒径较均匀,大小 0.1 ~ 0.5mm,矿物含量相当。

斜长石:可见半自形粒状,聚片双晶发育,双晶笔直细密,为更长石。钾长石:可见晶形独立的它形粒状,平行消光,晶面泥化。偶见微斜长石,具有格子状双晶。石英:它形,波状消光,干涉色一级灰白。

该花岗岩单元中副矿物同样以磁铁矿为主,还包括黄铁矿、方铅矿、萤石、钛铁矿、磁铁矿、磷灰石、独居石和白钨矿等。

2　测试方法

2.1　锆石 U-Pb 年代学

本次样品年代测试采用锆石 U-Pb 激光剥蚀同位素测年法。锆石的遴选工作在河北省区域地质矿产调查研究所完成,锆石样品的制靶、抛光、阴极发光及 U-Pb 同位素年龄测试均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。所用仪器阴极发光为配有英国 Gatan 公司的 MonoCL3 + 型阴极荧光探头的美国 FEI 公司 Quan ta 400 FEG 扫描电镜。U-Pb 测年系统中激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,ICP-MS 为 Agilent7500a。激光剥蚀过程中载气为氦气,激光频率为 10Hz,强度 80mJ,剥蚀束斑直径 30μm,每个时间分辨分析数据为 30s 的空白信号和 50s 的样品信号。

U-Pb 同位素定年中采用 NIST610 硅玻璃标准优化仪器,锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,锆石标准 GJ-1 观察仪器的状态及验证测试结果的精确度。测试分析过程中每分析 5 个样品点校正 2 次 91500 标样并测试 1 次 GJ-1 标样,每 10 个样品标准化 1 次 NIST610。最终测试数据的离线处理采用软件 ICPMASDataCal(Liu Yongsheng et al, 2009)完成,U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot3.0(Ludwing et al,2001)完成。

2.2　地球化学

本次样品主量和微量元素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行。首先选择野外采集的有代表性的新鲜样品,无污染粉碎至 200 目用于测试。主量元素使用 XRF 法测试(二价和三价铁由化学法测定),所用仪器为飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪,精度优于 5%;微量元素采用酸溶法,将制备好的样品溶液在 ICP-MS 上测试,所用仪器为德国 Finnigan-MAT 公司制造的 HR-ICP-MS (Element I),工作温度、相对湿度分别为 20℃ 和 30%,微量元素含量大于 10×10^{-6}时的相对误差小于 5%,小于 10×10^{-6}时的相对误差小于 10%。

3　测试结果

3.1　锆石年代学

3.1.1　灰黄色中细粒含巨斑二长花岗岩单元

锆石在双目镜下,颜色单一均为粉黄色,透明,金刚光泽,自形柱状、短柱状,多数为长柱状,少数短柱状,长约 150 ~ 500μm,长宽比约 2∶1 ~ 5∶1。晶体表面光滑,晶棱晶面平直完整,聚型组成包括(110)、(100)、(311)、(131)及(111),均表现为同源较早较高温度结晶的(110)型复柱岩浆锆石,可见锥柱不对称的歪晶发育,揭示锆石结晶时的介质环境不太适宜其按理想形态生长。锆石有铁染、裂纹发育,但结晶后的改造痕迹不明显,部分可见固相黑包体。锆石阴极发光(CL)图像(图 3a)中,显示出岩浆型锆石的振荡/韵律环带结构或明暗相间的条带结构,属于岩浆结晶的产物。而锆石的 U、Th 含量分别介于 259.34×10^{-6} ~ 1059.92×10^{-6} 和 157.21×10^{-6} ~ 868.45×10^{-6},Th/U 比值介于 0.30 ~ 1.38,远高于变质成因锆石(一般小于 0.1),而与典型的岩浆成因锆石一致(Williams et al,1996)。

通过透射光、反射光及阴极发光图像,对样品选取了无裂纹发育、无包体发育、晶形、阴极发光特征典型的20颗锆石进行了激光剥蚀年龄测定,具体测

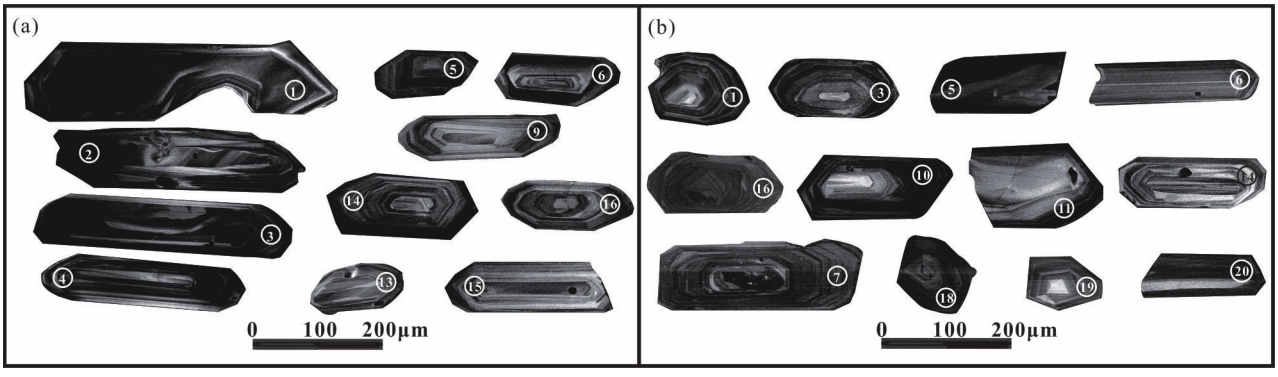

图 3 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞岩体典型锆石阴极发光(CL)图像:(a) 晚石炭世花岗岩;(b) 中—晚侏罗世花岗岩

Fig. 3 The cathodoluminescence images of the typical zircons from the the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia: (a) the Late Carboniferous granite; (b) the Meddle—Late Jurassic granite

试结果见表1。由表1及锆石U-Pb年龄协和图(图4a)可知,样品绝大多数位于谐和线及其附近区域(第6点谐和性差在谐和图上已经删除),除第6个样品点的$^{206}Pb/^{238}U$年龄为347±3Ma,可能为混合年龄(谐和性差)外,其余19个分析点年龄分布集中,范围在310±2~320±4Ma,得出其加权平均年龄为314.2±2.2Ma($n=19$,$MSWD=1.4$)。由于被测锆石为岩浆锆石,故该年龄应代表锆石的结晶年龄,是灰黄色中细粒斑状含黑云母二长花岗岩的侵位年龄,岩浆侵位时代为晚石炭世。根据该套花岗

表1 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞花岗岩锆石激光剥蚀U-Pb测年数据表

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

样品号	测点号	元素含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值			年龄±1σ(Ma)		
		U	Th	^{206}Pb		$\frac{n(^{207}Pb)}{n(^{206}Pb)}\pm1\sigma$	$\frac{n(^{207}Pb)}{n(^{235}U)}\pm1\sigma$	$\frac{n(^{206}Pb)}{n(^{238}U)}\pm1\sigma$	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$
D7103	1	259.84	176.17	52.06	0.65	0.053±0.0019	0.358±0.0119	0.0494±0.0004	332±77	311±9	311±3
	2	836.27	270.77	168.58	0.31	0.0531±0.0012	0.3627±0.0082	0.0493±0.0003	332±52	314±6	310±2
	3	1059.92	355.66	209.60	0.32	0.0528±0.001	0.3603±0.007	0.0495±0.0004	317±44	312±5	311±2
	4	591.36	216.83	119.99	0.35	0.0525±0.0011	0.3607±0.0075	0.0498±0.0003	306±48	313±6	313±2
	5	381.24	157.21	76.04	0.39	0.0516±0.0013	0.3567±0.0089	0.0501±0.0004	333±57	310±7	315±2
	6	2337.18	2178.57	521.60	0.85	0.2198±0.0023	1.681±0.0214	0.0553±0.0005	2979±17	1001±8	347±3
	7	525.58	172.16	108.16	0.31	0.0537±0.0013	0.3715±0.0079	0.0503±0.0003	367±52	321±6	317±2
	8	711.89	228.81	142.38	0.30	0.0552±0.0011	0.381±0.0072	0.0505±0.0005	420±28	328±5	318±3
	9	649.35	252.33	128.83	0.37	0.0532±0.001	0.3651±0.0067	0.0498±0.0003	339±47	316±5	313±2
	10	539.18	204.47	109.36	0.36	0.0536±0.0015	0.3666±0.0094	0.0502±0.0004	354±65	317±7	316±2
	11	451.14	450.91	92.04	0.97	0.0522±0.0036	0.3637±0.0246	0.0509±0.0007	295±91	315±18	320±4
	12	708.36	378.81	140.54	0.52	0.0536±0.0024	0.3613±0.0165	0.0495±0.0003	354±100	313±12	311±2
	13	583.64	276.95	117.41	0.42	0.0557±0.0019	0.3831±0.013	0.0502±0.0004	439±78	329±10	316±2
	14	725.51	300.27	144.45	0.37	0.0616±0.0014	0.4217±0.0091	0.0498±0.0003	661±47	357±6	313±2
	15	495.20	253.83	99.18	0.50	0.0553±0.003	0.3853±0.0239	0.0502±0.0003	406±52	331±18	316±2
	16	599.64	868.45	121.24	1.38	0.0543±0.0022	0.3789±0.0152	0.0506±0.0005	443±28	326±11	318±2
	17	799.35	299.10	162.15	0.35	0.0527±0.0012	0.3658±0.0075	0.0506±0.0004	317±52	317±6	318±2
	18	339.93	166.11	68.91	0.47	0.0574±0.0019	0.3957±0.0124	0.0505±0.0004	483±80	339±9	318±2
	19	601.23	179.73	118.86	0.30	0.0524±0.001	0.3618±0.0068	0.0501±0.0004	302±43	314±5	315±2
	20	864.36	505.08	172.70	0.52	0.0523±0.0009	0.3585±0.0064	0.0496±0.0003	298±41	311±5	312±2
D6021	1	1955.81	864.27	210.70	0.42	0.0496±0.0008	0.1764±0.0027	0.0258±0.0001	176±6	165±2	164±1
	2	1494.86	757.11	159.44	0.46	0.0493±0.0009	0.1782±0.0033	0.0263±0.0002	161±47	166±3	167±1
	3	1141.51	794.36	125.42	0.68	0.0486±0.0011	0.1777±0.004	0.0266±0.0002	128±56	166±3	169±1
	4	3253.26	1036.62	361.53	0.27	0.0493±0.001	0.1774±0.0035	0.0261±0.0002	167±42	166±3	166±1
	5	2034.85	485.67	219.49	0.23	0.0496±0.0013	0.1744±0.0047	0.0254±0.0002	172±103	163±4	162±1
	6	590.20	522.00	65.27	0.86	0.0498±0.0018	0.1806±0.0068	0.0261±0.0002	187±116	169±6	166±1
	7	1467.84	765.39	161.90	0.50	0.0492±0.0009	0.1771±0.003	0.0261±0.0002	167±36	166±3	166±1
	8	2264.21	1427.36	249.59	0.58	0.0477±0.0007	0.1718±0.0026	0.0261±0.0001	83±32	161±2	166±1
	9	1731.19	896.55	190.45	0.50	0.0486±0.0008	0.1746±0.0027	0.026±0.0001	128±32	163±2	166±1
	10	3314.18	780.77	382.53	0.23	0.0479±0.0006	0.1811±0.0023	0.0273±0.0001	100±37	169±2	174±1
	11	1864.91	819.73	205.74	0.42	0.051±0.0015	0.1843±0.0048	0.0263±0.0002	254±130	172±4	167±1
	12	1737.11	464.94	187.48	0.26	0.0492±0.0021	0.1776±0.0075	0.0261±0.0001	167±100	166±7	166±1
	13	1471.24	774.91	162.04	0.50	0.0494±0.0032	0.181±0.0122	0.0265±0.0001	165±152	169±10	168±1
	14	602.66	392.98	66.38	0.62	0.05±0.0018	0.1811±0.006	0.0265±0.0002	195±83	169±5	169±1
	15	903.58	502.03	98.56	0.52	0.0492±0.0011	0.1776±0.0039	0.0262±0.0002	167±56	166±3	166±1
	16	1595.67	877.10	170.49	0.52	0.0497±0.0011	0.1777±0.0036	0.0258±0.0002	169±106	166±3	164±1
	17	1526.32	727.84	166.12	0.45	0.0495±0.0011	0.1805±0.0034	0.0265±0.0002	172±50	168±3	169±1
	18	1787.77	853.06	195.72	0.46	0.05±0.0012	0.183±0.0035	0.0267±0.0002	195±28	171±3	170±1
	19	906.96	670.54	93.16	0.68	0.049±0.0015	0.174±0.005	0.0259±0.0003	165±64	163±4	165±2
	20	3081.00	3346.42	334.18	1.02	0.0505±0.002	0.1835±0.0058	0.0267±0.0004	198±36	171±5	170±2

岩单元外接触带角岩化分布特征,该期岩浆侵位还是引起上泥盆统安格尔音乌拉组地层角岩化的成因。

3.1.2　灰白色细粒二长花岗岩单元。

锆石在双目镜下,呈透明、金刚光泽、聚型组成包括(110)、(100)、(311)、(131)及(111)、为(110)型复柱同源岩浆锆石、可见锥柱不对称的歪晶现象、部分可见固相黑包体特征。除上述六点同晚石炭世花岗岩锆石完全一致外,其它晶体特征或多或少存在些差异:首先,锆石颜色单一均呈黄色;其次,锆石晶群集中,为自形柱状相似,但多数锆石呈短柱状,少数长柱状,长约 110 ~ 300μm,长宽比约 1.2∶ 1 ~ 2.5∶ 1;第三,锆石颗粒晶棱晶锥平直完整相似,但少数锆石还略显圆钝;第四,多数锆石裂纹较发育,整体略显酥较易碎,有铁染这几点特征也相似,但晶体表面可见凹坑,溶蚀痕迹发育,锆石结晶后又受力加溶蚀改造。

锆石颗粒阴极发光(CL)图像(图 3b)中,同晚石炭世花岗岩单元锆石特征相似,显示了岩浆型锆石的振荡/韵律环带结构或明暗相间的条带结构,且一般为较窄的岩浆环带,这种较窄的岩浆环带一般为低温条件下微量元素的扩散速度慢形成(吴元保等,2004)。锆石的 Th、U 含量分别介于 $392.98 \times 10^{-6} \sim 3346.42 \times 10^{-6}$ 和 $590.2 \times 10^{-6} \sim 3314.18 \times 10^{-6}$,Th/U 比值介于 0.23 ~ 1.02,同为典型的岩浆成因锆石。

同灰黄色中细粒含巨斑二长花岗岩单元中锆石一样,对样品选取了无裂纹发育、无包体发育、晶形、阴极发光特征典型的 20 颗锆石进行了激光剥蚀年龄测定,具体测试结果见表 1。由表 1 及锆石 U-Pb 年龄谐和图(图 4b)可知,样品全部位于谐和线及其附近区域,20 个分析点年龄分布集中,范围在 162 ± 1 ~ 174 ± 1 之间,得出其加权平均年龄为 167.1 ± 1.3Ma($n = 20$, $MSWD = 0.73$)。该年龄同样代表锆石的结晶年龄,是灰白色细粒二长花岗岩的侵位年龄,侵位时代为中—晚侏罗世。其侵入到晚石炭世灰黄色中细粒斑状含黑云母二长花岗岩中,并引起外接触带上的晚泥盆系安格尔音乌拉组地层弱矿化,该期岩浆活动与研究区成矿作用关系密切。

3.2　地球化学

阿木古楞花岗岩体主量和微量地球化学分析结果见表 2。从表 2 可以看出,晚石炭世花岗岩单元和中—晚侏罗世花岗岩单元地球化学特征基本相似,略有差异。

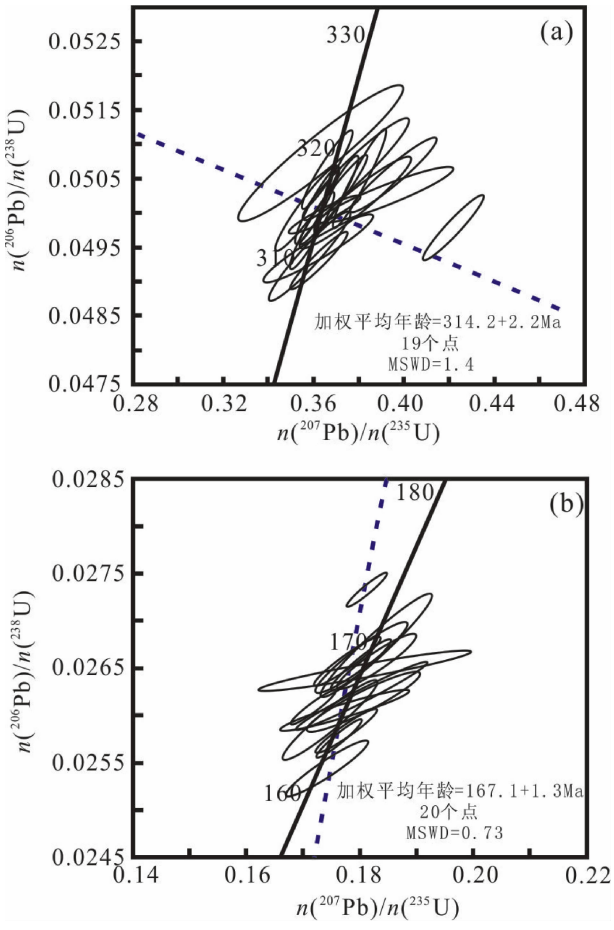

图 4 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞岩体锆石激光剥蚀 U-Pb 年龄谐和图:(a) 晚石炭世花岗岩;(b)为中—晚侏罗世花岗岩

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams and recalculated weighted mean $^{206}Pb/^{238}U$ ages for zircons from the the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia: (a) the Late Carboniferous granite; (b) the Meddle—Late Jurassic granite

3.2.1　晚石炭世花岗岩单元

晚石炭世花岗岩含量 SiO_2 = 70.99% ~ 75.07%, TiO_2 = 0.16% ~ 0.36%, Al_2O_3 = 12.51% ~ 13.88%, MgO = 0.31% ~ 0.62%, CaO = 0.97% ~ 1.36%, Na_2O = 3.42% ~ 3.93%, K_2O = 4.25% ~ 4.84%,全碱含量($K_2O + Na_2O$) = 7.8% ~ 8.4%, K_2O/Na_2O = 1.14% ~ 1.42%,具有富 Si,贫 Ti、Mg、Ca 的特点。在 SiO_2— K_2O 图解(图 5)中,5 个样品全部位于高钾钙碱性系列。而 A/CNK 值介于 0.98 ~ 1.01(均值为 1),正好位于准铝质向过铝质过渡地带(图 6)。

晚石炭世花岗岩的稀土元素总量介于 33.75 ×

表 2 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞岩体主量元素(%)、稀土元素($\times10^{-6}$)、微量元素($\times10^{-6}$)分析结果表

Table 2 Major(%), REE and trace elements($\times10^{-6}$) compositions for the Amuguleng granite body in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

样品号	D6012	D6017	D6019	D6016	D6014	D6013	D6015	D6020	D6021	D6018	D9293
	晚石炭世花岗岩					中—晚侏罗世花岗岩					
SiO_2	74.08	73.83	75.07	70.99	73.49	76.34	77.01	76.13	77.00	76.57	75.87
Al_2O_3	12.91	12.88	12.51	13.88	13.25	12.64	11.81	12.28	12.07	12.01	13.71
Fe_2O_3	2.26	2.01	2.11	3.12	2.35	1.23	1.27	1.43	1.20	1.45	1.49
FeO	0.95	1.25	0.95	1.40	0.75	0.65	0.80	0.55	0.75	0.90	0.80
MgO	0.37	0.31	0.33	0.62	0.43	0.08	0.12	0.14	0.10	0.09	0.15
CaO	1.21	1.26	0.97	1.36	1.12	0.62	0.45	0.67	0.63	0.53	0.51
Na_2O	3.42	3.55	3.57	3.93	3.67	3.24	3.15	3.58	3.26	3.12	4.65
K_2O	4.84	4.25	4.71	4.47	4.69	5.05	5.39	5.17	5.02	5.31	2.97
MnO	0.03	0.04	0.04	0.06	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03
TiO_2	0.21	0.16	0.20	0.36	0.25	0.14	0.10	0.10	0.11	0.11	0.01
P_2O_5	0.09	0.09	0.09	0.20	0.09	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03	0.05
烧失	0.59	1.57	0.39	0.98	0.61	0.60	0.63	0.44	0.57	0.74	0.54
总和	100.95	101.20	100.94	101.37	100.74	100.63	100.78	100.53	100.73	100.88	100.78
K_2O+Na_2O	8.26	7.80	8.28	8.40	8.36	8.29	8.54	8.75	8.28	8.43	7.62
K_2O/Na_2O	1.42	1.20	1.32	1.14	1.28	1.56	1.71	1.44	1.54	1.70	0.64
TFe_2O_3	3.32	3.40	3.17	4.68	3.18	1.95	2.16	2.04	2.03	2.45	2.38
TFeO	2.98	3.06	2.85	4.21	2.86	1.76	1.94	1.84	1.83	2.20	2.14
A/CNK	0.99	1.01	0.98	1.01	1.01	1.06	1.00	0.97	1.01	1.01	1.16
A/NK	1.19	1.23	1.14	1.23	1.19	1.17	1.07	1.07	1.12	1.10	1.26
$Mg^{\#}$	18.10	15.30	17.12	20.80	21.11	7.16	9.92	11.96	8.88	6.92	11.10
Li	20.20	15.60	30.80	24.10	9.22	9.71	19.50	8.45	8.54	8.30	23.00
Be	2.71	4.10	3.69	3.88	3.34	3.84	3.42	3.42	3.64	4.37	3.07
Sc	3.38	2.48	2.68	5.76	1.29	2.13	4.45	1.88	1.60	2.02	1.42
V	26.20	19.90	22.40	39.60	11.20	12.00	28.40	13.50	14.80	12.20	16.90
Cr	28.50	32.90	20.50	23.10	22.70	23.20	23.00	17.10	27.50	30.50	21.70
Co	2.92	2.21	2.93	3.76	1.81	1.89	3.84	1.51	1.34	1.68	1.56
Ni	4.36	5.51	5.12	6.03	6.33	2.04	6.27	3.40	4.43	5.34	4.34
Cu	7.58	4.96	6.32	7.40	9.54	19.60	9.15	4.09	6.48	14.70	13.90
Zn	22.00	17.60	23.30	36.80	15.60	11.40	22.80	19.50	14.10	25.10	13.00
Ga	15.40	15.70	15.00	17.80	14.80	13.30	16.90	13.40	13.80	15.10	12.80
Rb	147.00	157.00	173.00	159.00	147.00	161.00	166.00	181.00	148.00	188.00	183.00
Sr	194.00	253.00	160.00	290.00	24.90	105.00	195.00	147.00	72.40	102.00	131.00
Nb	10.10	7.63	10.20	10.30	11.10	9.56	10.20	6.25	8.65	7.07	5.39
Mo	2.50	1.91	0.80	0.80	4.22	3.99	3.23	1.15	5.02	2.77	3.35
Cd	0.10	0.13	0.09	0.05	0.06	0.09	0.21	0.06	0.09	0.04	0.06
In	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Sb	0.18	0.21	0.20	0.95	0.28	0.30	0.22	0.20	1.38	0.20	0.62
Cs	3.06	4.04	2.07	4.38	3.00	1.67	5.37	2.31	1.36	1.83	4.76
Ba	285.00	232.00	247.00	742.00	81.90	138.00	443.00	350.00	115.00	126.00	189.00
La	42.60	24.90	35.00	41.00	5.86	34.20	35.30	23.90	14.00	33.40	36.50
Ce	66.20	38.10	50.80	80.00	21.10	52.10	63.50	39.80	22.20	40.90	49.50
Pr	6.63	3.58	4.56	9.13	0.94	5.41	7.07	4.26	2.14	3.16	4.13
Nd	21.80	12.10	13.50	34.30	3.06	15.80	24.90	14.50	6.59	8.86	12.40
Sm	3.27	1.78	2.06	5.92	0.57	2.71	4.56	2.95	1.24	1.15	1.38
Eu	0.93	0.60	0.57	1.36	0.10	0.66	0.94	0.76	0.36	0.42	0.48
Gd	3.48	1.49	2.05	4.95	0.51	2.12	4.01	2.43	0.97	1.03	1.19
Tb	0.52	0.27	0.31	0.87	0.10	0.40	0.69	0.40	0.16	0.12	0.18
Dy	2.80	1.41	1.89	4.62	0.61	1.86	3.82	2.20	0.93	0.66	1.02
Ho	0.58	0.26	0.34	0.86	0.10	0.38	0.76	0.37	0.17	0.10	0.20
Er	1.58	0.84	1.06	2.63	0.30	1.03	2.06	1.30	0.56	0.31	0.58

续表 2

样品号	D6012	D6017	D6019	D6016	D6014	D6013	D6015	D6020	D6021	D6018	D9293
	晚石炭世花岗岩					中—晚侏罗世花岗岩					
Tm	0.32	0.16	0.17	0.38	0.05	0.17	0.32	0.21	0.10	0.05	0.10
Yb	1.82	1.09	1.41	2.45	0.39	1.52	2.27	1.47	0.85	0.68	0.59
Lu	0.34	0.22	0.26	0.39	0.07	0.27	0.46	0.24	0.13	0.13	0.12
Y	19.00	9.42	11.30	25.10	2.61	10.30	22.90	10.50	5.43	3.47	4.76
Ta	1.95	1.03	1.95	1.78	2.05	1.61	1.52	1.33	1.16	1.92	1.03
W	0.68	2.35	0.28	0.75	2.20	5.08	1.57	2.34	6.43	1.56	8.34
Re	0.00	未检出	未检出	未检出	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.03
Tl	0.69	0.65	0.47	0.90	0.79	0.84	0.82	0.80	0.61	1.22	0.74
Pb	9.99	13.20	14.60	15.60	9.03	12.50	11.20	14.90	12.40	14.70	9.29
Bi	未检出	0.03	0.04	0.00	0.04	0.07	0.05	0.06	0.06	0.12	0.07
Th	21.30	23.20	26.10	14.20	5.37	29.30	17.10	19.80	29.30	36.80	34.00
U	3.90	2.48	2.96	1.15	1.52	5.99	4.29	1.88	2.91	4.80	2.82
Zr	173.00	117.00	156.00	193.00	109.00	161.00	169.00	92.40	138.00	165.00	121.00
Hf	5.72	4.13	5.10	5.92	4.58	5.73	5.52	3.55	5.78	6.45	4.94
∑REE	152.86	86.79	113.97	188.87	33.75	118.61	150.66	94.79	50.40	90.98	108.38
LREE/HREE	12.37	14.14	14.24	10.01	14.87	14.33	9.47	10.00	12.02	28.43	26.22
δEu	0.84	1.09	0.83	0.75	0.54	0.81	0.66	0.85	0.96	1.15	1.13
K/Rb	13.67	11.24	11.30	11.67	13.24	13.02	13.48	11.86	14.08	11.72	6.74
Rb/Sr	0.76	0.62	1.08	0.55	5.90	1.53	0.85	1.23	2.04	1.84	1.40
Rb/Ba	0.52	0.68	0.70	0.21	1.79	1.17	0.37	0.52	1.29	1.49	0.97
La/Yb	23.41	22.84	24.82	16.73	14.99	22.50	15.55	16.26	16.49	48.90	61.76

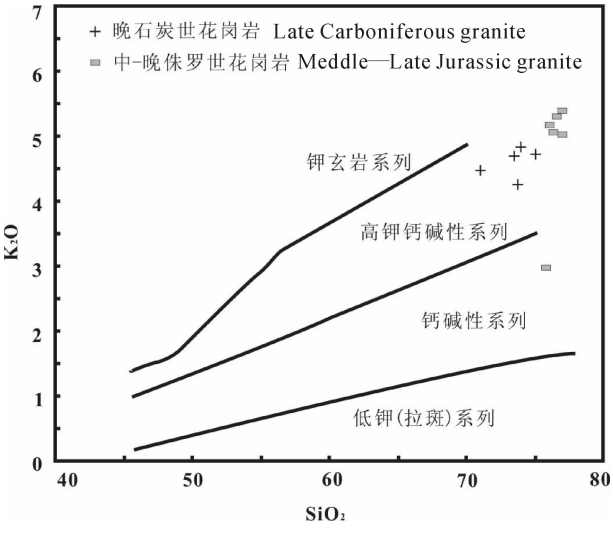

图 5 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞岩体的 SiO_2—K_2O 图

Fig. 5 SiO_2—K_2O diagram for the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

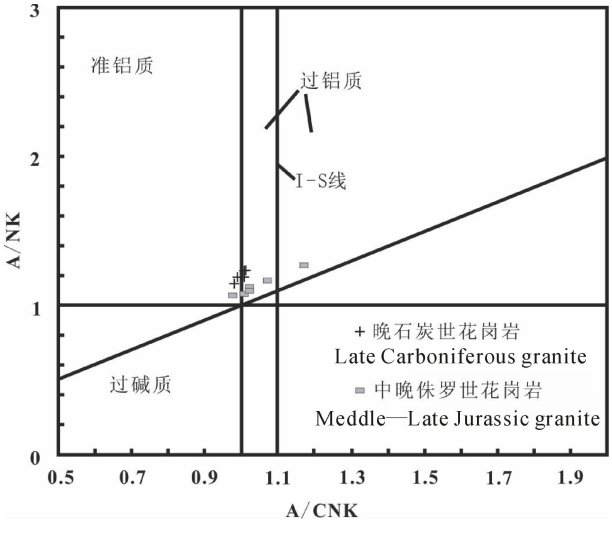

图 6 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞岩体的含铝指数图

Fig. 6 Aluminous index diagrams for the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

10^{-6} ~ 188.87×10^{-6},均值为 115.25,轻稀土元素总量介于 31.61×10^{-6} ~ 171.71×10^{-6},均值为 106.76×10^{-6},除一个样品外,其余均低于我国花岗岩及同类型花岗岩平均值,而重稀土元素含量介于 4.23×10^{-6} ~ 37.31×10^{-6},均值为 19.78×10^{-6},多数高于我国花岗岩及同类型花岗岩平均值(史长义等,2008)。在球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 7a)上,配分曲线表现为相对富集轻稀土元素、亏损重稀土元素的轻重稀土元素分异较大、重稀土曲线却较为平坦的右倾型,轻重稀土元素比值介于 10.1 ~ 14.87,均值为 13.12。而 δEu 介于 0.54 ~ 1.09,均值为 0.81,表现出基本无 Eu 负异常。

晚石炭世花岗岩微量元素除 Th 和 Rb 含量略高

于一般花岗岩外(史长义等,2008),其它元素多数接近或低于同类岩石的平均值。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 7b)上,晚石炭世花岗岩富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、Pb,弱富集轻稀土元素 La、Ce,明显亏损高场强元素 Nb、Ba、Ti 和 Sr。

3.2.2 中—晚侏罗世花岗岩

中晚侏罗世花岗岩含量 SiO_2 = 75.87% ~ 77.01%,TiO_2 = 0.01% ~ 0.14%,Al_2O_3 = 11.81% ~ 13.71%,MgO = 0.08% ~ 0.15%,CaO = 0.45% ~ 0.67%,Na_2O = 3.12% ~ 4.65%,K2O = 2.97% ~ 5.39%,全碱含量(K_2O + Na_2O) = 7.62% ~ 8.75%,K_2O/Na_2O = 0.64% ~ 1.71%,同样表现为富 Si,贫 Ti、Mg、Ca 的特点。较晚石炭世花岗岩相比,Si、Na 和 K 的含量更高,而 Ca、Mg 含量偏低,Al 含量相似。在 SiO_2— K_2O 图解(图 5)中,6 个样品 5 个样品位于高钾钙碱性系列,1 个样品位于钙碱性系列。A/CNK 值介于 0.97 ~ 1.16,均值为 1.035,除一个样为准铝质外,其余均为弱过铝质(图 6)。该特征同众多复式岩体特征基本一致,即年轻的花岗岩总是较富 Si,且有较高的分异指数(DI)及 NK/A、Fe_2O/FeO 比值,较低的总 Fe、Ti、Mg、Ca 和 P 含量(陈国能等,2009),推测其可能是中—晚侏罗世大规模的热事件而使得早期晚石炭世形成的花岗质地壳发生重熔所致。

中—晚侏罗世花岗岩的稀土元素总量介于 $50.4 \times 10^{-6} \sim 150.66 \times 10^{-6}$,均值为 102.3×10^{-6},轻稀土元素总量介于 $46.53 \times 10^{-6} \sim 136.27 \times 10^{-6}$,均值为 95.36×10^{-6},重稀土元素含量介于 $5.23 \times 10^{-6} \sim 33.28 \times 10^{-6}$,均值为 14.55×10^{-6},均低于晚石炭世花岗岩。球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 7c)上,配分曲线完全相似,表现出相对富集轻稀土元素、亏损重稀土元素的轻重稀土元素分异较大、重稀土曲线却较为平坦的右倾型,轻重稀土元素比值介于 $9.47 \times 10^{-6} \sim 28.43 \times 10^{-6}$,均值为 16.75,较晚石炭世花岗岩分异更加明显。而 δEu 介于 0.66 ~ 1.15,均值为 0.93,同样无明显负 Eu 异常。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 7d)上,曲线特征同晚石炭世花岗岩基本一致:富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、Pb,弱富集轻稀土元素 La、Ce,明显亏损高场强元素 Nb、Ba 和 Sr、Ti。

4 讨论

4.1 岩体成因类型和演化

阿木古楞岩体无论是晚石炭世花岗岩还是中—

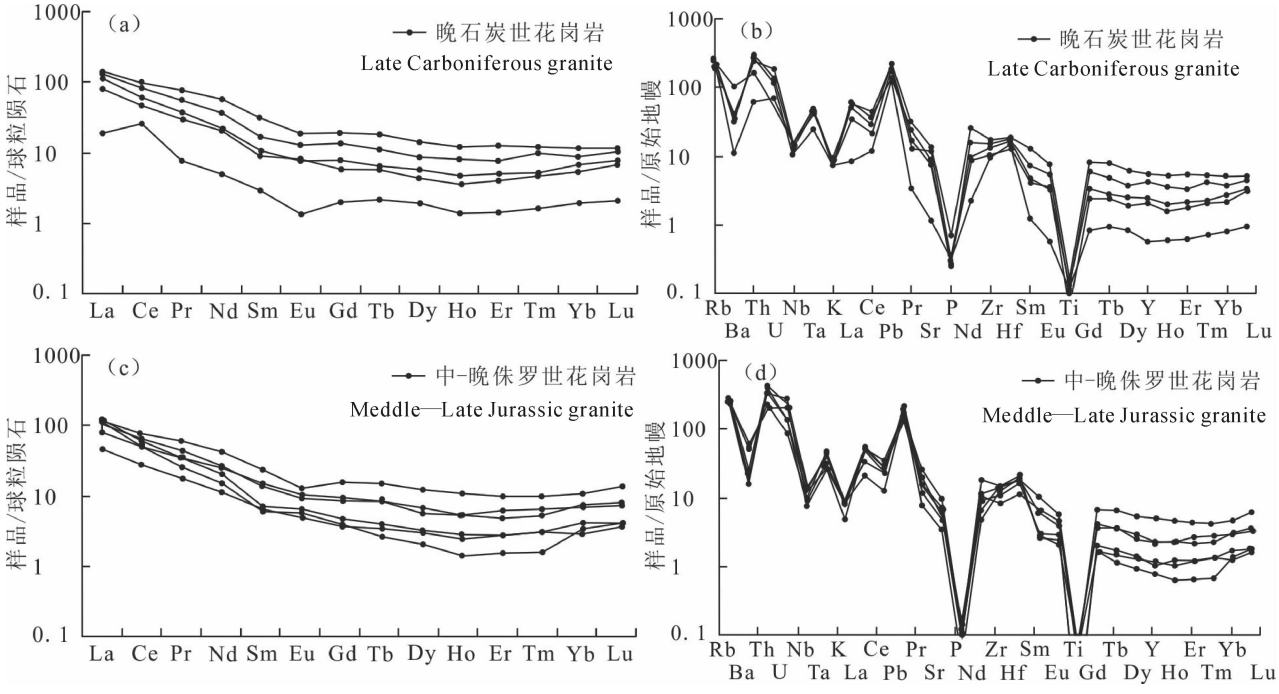

图 7 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞岩体球粒陨石标准化稀土元素配分图和原始地幔标准化微量元素蛛网图
(球粒陨石标准化值据 Boynton,1984;原始地幔标准化值据 Sun and McDonough,1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia (chondrite-normalized values after Boynton,1984; primitive mantle-normalized values after Sun and McDonough,1989)

晚侏罗世花岗岩,岩石系列各组成单位的成分相近,岩石组合均为二长花岗岩。其矿物组成中少见白云母和石榴子石,虽在中—晚侏罗世花岗岩中发育少量白云母,但分布范围有限,表现为云英岩化次生特征。而其副矿物显示富含磁铁矿、独居石、磷灰石和榍石,中—晚侏罗世花岗岩中还发育萤石。地球化学特征显示岩体岩性绝大多数为准铝质—弱过铝质高钾钙碱性系列,岩石中 K_2O 略高于 Na_2O,Na_2O 的含量大于 3.2%,K_2O/Na_2O 大于 1,钙的含量比较高。综合这些特征揭示阿木古楞岩体为典型的 I 型花岗岩。不仅如此,岩体中多处还可见暗色包体发育(图 2),从侧面证明它们同属于 I 型花岗岩。

不仅如此,阿木古楞岩体两类 I 型花岗岩还表现为高分异钙碱性花岗岩特征。在 100(MgO + FeO + TiO_2)/SiO_2—(Al_2O_3 + CaO)/(FeOt + Na_2O + K_2O)图解(Sylvester,1989)(图 8)及(Zr + Nb + Ce + Y)—(Na_2O + K_2O)/CaO 图解(Whalen,1987;Eby,1990)(图 9)中,其均位于高分异区域。

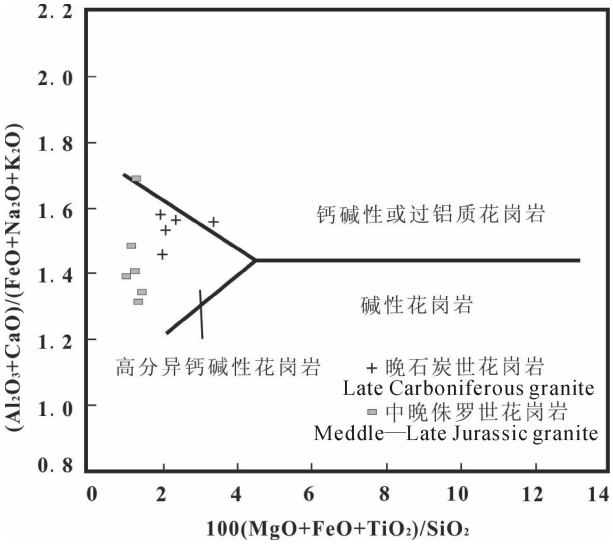

图 8 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞花岗岩体 100(MgO + FeO + TiO_2)/SiO_2—(Al_2O_3 + CaO)/(FeO_t + Na_2O + K_2O)图解(底图引自 Sylvester,1989)

Fig. 8 100(MgO + FeO + TiO_2)/SiO_2—(Al_2O_3 + CaO)/(FeOt + Na_2O + K_2O) diagrams for the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

一般来讲,花岗岩亏损 Ba、Sr 与源区残留斜长石或与独居石在岩浆中饱和而发生分离结晶有关,考虑晚阿木古楞花岗岩又基本无 Eu 负异常,其更可能同独居石在岩浆中饱和而发生分离结晶有关。而花岗岩所表现出的 Ti、Nb 的亏损还指示了富钛矿物

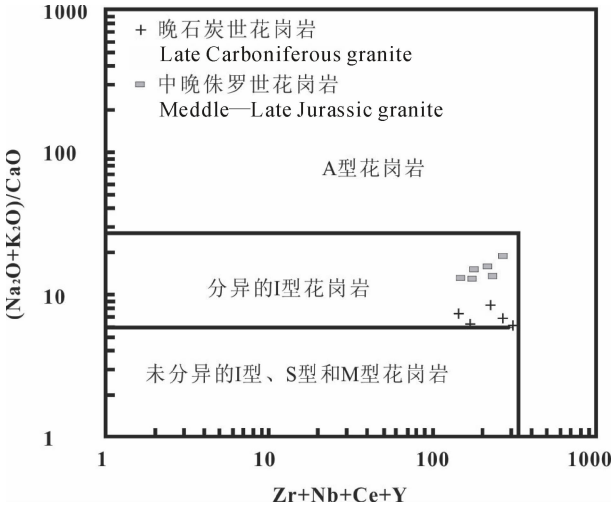

图 9 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞花岗岩体(Zr + Nb + Ce + Y)—(Na_2O + K_2O)/CaO 图解(底图引自 Whalen,1987;Eby,1990)

Fig. 7(Zr + Nb + Ce + Y)—(Na_2O + K_2O)/CaO diagrams for the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

相(金红石、钛铁矿)的分离,P 的强烈亏损指示了磷灰石的分离结晶。这些特征与岩体表现出的 Th、U 正异常和岩体的高放射性强度及富含独居石类、钛铁矿、磷灰石等副矿物一致。同时,阿木古楞岩体还表现出低 Sr、低 Y、Yb(表 2)的特征,同喜马拉雅型花岗岩特征相似(张旗等,2008),这类花岗岩很有可能源区还发生石榴子石的分离结晶作用。因为,石榴子石不仅是导致花岗岩轻重稀土元素强烈分离的最重要的矿物相(Martin et al,2005),而且还是花岗岩中最常见的容纳 Yb 的矿物相之一(张旗等,2008)。

同时,阿木古楞岩体中—晚石炭世花岗岩单元局部集中发育有暗色包体。这些包体仅成群分布于岩体中部,呈椭球状、浑圆状形态,基本同寄主岩均具有截然的接触关系,并多数发育淬冷边,表现为在塑性状态下与寄主岩岩浆近同时结晶的岩浆镁铁质微粒包体特征(范洪海等,2001;肖庆辉等,2002)。而包体发育为斑状结构,基质颗粒多数小于 1mm,并可见镶嵌的多被暗色矿物镶边的长石巨晶及石英眼斑(图 2a、2b),包体中出现了明显的不平衡结构和矿物组合,具有在酸性岩浆结晶过程中又有基性岩浆的加入特征,使二者的物理化学条件发生了明显的改变(张建军等,2012)。

4.2 花岗岩岩浆来源

关于I型花岗岩的岩浆来源,一直以来争议较大(张旗等,2008)。近些年来,张旗(2008)等认为花岗岩不可能是幔源的,都是壳源成因,且大致分为洋壳、陆壳以及两者之间过渡的三种源区。林强等(2004)等对大兴安岭中生代花岗岩的同位素资料整理发现均表现出低$\left[\frac{n(^{87}Sr)}{n(^{86}Sr)}\right]_i$和高$\varepsilon_{Nd}(t)$值特征,认为其起源于地幔的年轻地壳(陆壳)物质。阿木古楞岩体地处大兴安岭西部中生代大的构造—岩浆岩带中,发育有中—晚侏罗世花岗岩次级单元,岩性、岩相及地球化学特征同邻区相似,反映其源区物质可能为来自亏损地幔物质经过改造形成的年轻的陆壳?研究区三叠纪已经从主要受特提斯构造域的影响转变为主要受环太平洋构造域的影响(洪大卫等,1994),及阿木古楞岩体中—晚侏罗世明显不同的北北东向子岩体展布,有别于北东东宏观查干敖包—奥尤特—朝不楞岩浆岩带的构造线方向,均能较好的为其提供佐证。

阿木古楞岩体中—晚石炭世花岗岩单元同中—晚侏罗世花岗岩单元在成岩时差上差异甚远,根据目前的实验模拟和理论计算的结果(Petford et al,2000;Glazner et al,2004),单个侵入体从岩浆形成到锆石U-Pb同位素体系封闭的时间不超过1Ma。因此,其不太可能为同一原始岩浆通过结晶分异演化形成。但是,比较中—晚侏罗世花岗岩单元及晚石炭世花岗岩单元,它们在岩性、岩相及地球化学特征基本相似,在P_2O_5—SiO_2图(Treuil et al,1975)(图10)上,二者呈良好的负相关演化,而Rb/Sr、Rb/Ba(表2)表现出早期小晚期大,TFe_2O_3、MgO、CaO含量及K/Rb值表现出早期大晚期小的特征,该些化学成分的演变趋势同同源岩浆分异演化的特点一致。是否从某种程度上推测阿木古楞岩体中中—晚侏罗世花岗岩岩浆来源就是晚石炭世形成的年轻陆壳花岗岩的重熔或部分重熔或它们具有类似的岩浆源区?

一般来说,I型花岗岩源岩为岩浆成因,已经经历过一个分离结晶的演化旋回,再次产生岩浆并发生分异时,必定保持明显的规律性(邱家骧等,1991)。从某种意义来说,我们也可以认为I型花岗岩虽经历重熔、结晶分异演化,其仍或多或少保留有最初源岩的某些特征。因此,阿木古楞岩体晚石炭世花岗岩单元具有高的Si,富K、低Al的特征,是否也能基本暗示其起源地为高K、正常水含量的长英质岩石(Auwera et al,2003;King et al,1997),推测认为其源区物质同样也为来自亏损地幔物质经过改造形成的年轻的陆壳。当然,这点还可以从晚石炭世花岗岩单元岩性长石斑晶中发育细小的石英、黑云母微晶来证明。因为,岩石中斜长石的核部偶尔包含着细小的石英晶体,这说明石英是一种液相线相,因此也应是生成这一岩系的源岩中的一个残留相(邱家骧等,1991)。同时,在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图7d),晚石炭世花岗岩几乎所有不相容元素均有不同程度的富集,在总体富集的背景上,具有Ba、Nb、Sr、P、Ti的相对亏损,也表明其物源以壳源物质为主。

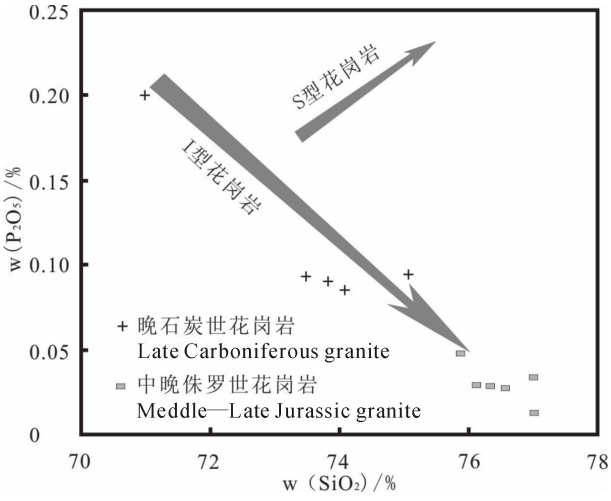

图10 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞花岗岩体P_2O_5—SiO_2图解(底图引自Treuil,1975)

Fig. 10 P_2O_5—SiO_2 diagrams for the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

当然,阿木古楞岩体晚石炭世花岗岩中局部还集中发育有暗色包体,且包体中出现了明显的不平衡结构和矿物组合,说明其壳源酸性岩浆物质结晶过程中可能又有基性岩浆的加入。因此,其岩浆来源除来源于高K、正常水含量的长英质岩石外,还可能混有基性玄武质组分。基性玄武质岩浆来源是幔源的(张旗等,2008)。综上,晚石炭世花岗岩单元岩浆来源为壳源物质和幔源物质的混合来源。考虑包体在岩体内部分布有限,且仅集中分布于一处,幔源玄武质岩浆组分在晚石炭世花岗岩单元中来源总体有限。

4.3 构造背景与大地构造演化

花岗岩浆的活动是整个区域地质历史的一部分,研究花岗岩必须研究区域地质演化历史及背景,

二者不可分割(战明国等,1998)。前人通过对已知大地构造背景花岗岩的地球化学特征研究创造了一系列花岗岩与构造背景分析的图解,如 Rb—Y—Nb 图解(Pearce et al. ,1984)、Hf—Rb—Ta 图解(Harris et al. ,1986)等,并长期以来被用于对花岗岩构造背景的研究(Rollison et al,2000)。对阿木古楞岩体花岗岩进行 *R*1—*R*2 因素判别图(Bechelor et al,1985)投图(图 11),晚石炭世花岗岩单元投在了 syn-COLG 区内,而中—晚侏罗世花岗岩则投在了 syn-COLG 和 POG 过渡带内;对其进行 Rb—Y + Nb 微量元素判别图(图 12)投图及 Hf—Rb—Ta 判别图投图(图 13),晚石炭世及中晚侏罗世花岗岩单元均投在了 VAG 和 syn-COLG 过渡地带。

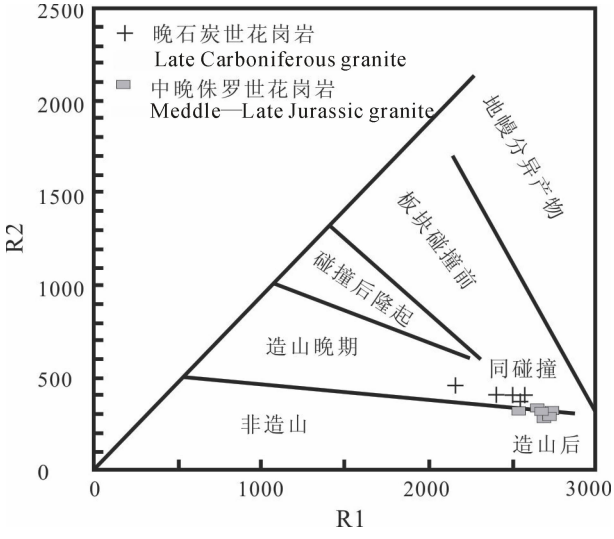

图 11 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞花岗岩体 *R*1—*R*2 构造环境判别图解

Fig. 11 *R*1—*R*2 for tectonic setting of the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

综合上述不同图解并考虑阿木古楞岩体岩石化学、岩体产状、分布特点和源岩特征,推测晚石炭世花岗岩单元构造背景环境为区域挤压造山构造环境,形成于中亚造山挤压大地构造背景下的同碰撞晚期构造—岩浆事件。该点与沈晓丽(2012)、佘宏全(2012)、辛后田(2011)等多人研究一致。晚石炭世,由于区域性碰撞造山挤压作用,先期新生地壳加厚并发生重熔,沿着构造薄弱地带侵入到上地壳近地表,形成研究区广布的类似喜马拉雅花岗岩低 Sr 低 Yb 的 I 型花岗岩。期间,除强烈的岩浆活动外,区域上鄂伦春地区和东乌珠穆沁旗地区也基本结束了海相环境转入陆相(佘宏全等,2012)。而研究区

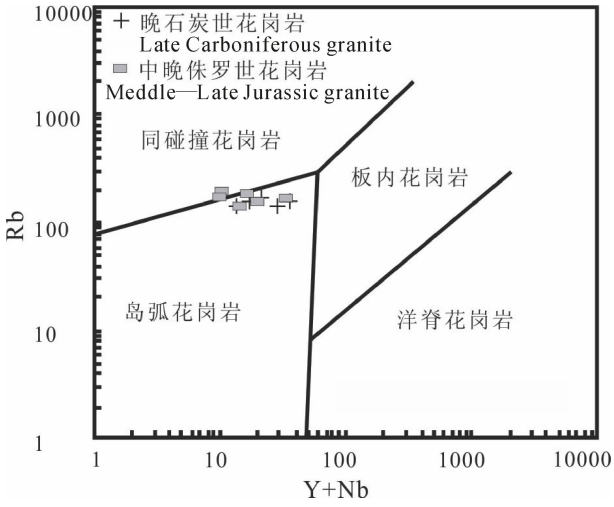

图 12 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞花岗岩体 (Y + Nb)—Rb 构造环境判别图解

Fig. 12 Trace element discrimination diagram of (Y + Nb)—Rb for tectonic setting of the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

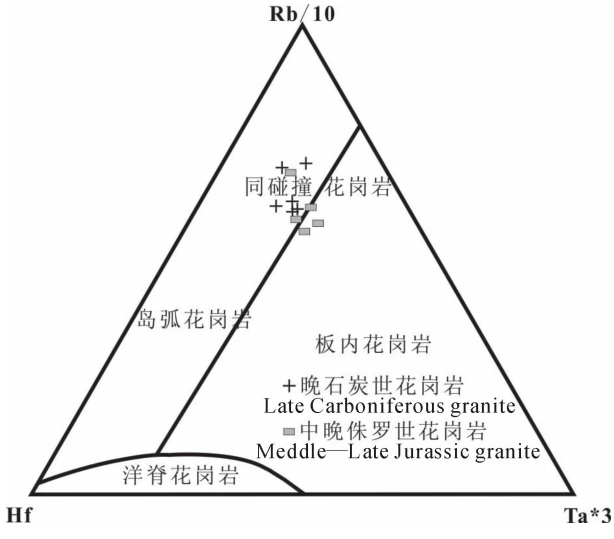

图 13 东乌珠穆沁旗阿木古楞花岗岩体 Hf—(Ta * 3)—(Rb/10)构造环境判别图解

Fig. 13 Trace element discrimination diagram of Hf—(Ta * 3)—(Rb/10) for tectonic setting of the Amuguleng granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

的东乌珠穆沁旗地区发育为一套巨厚的陆相中酸性火山熔岩、火山碎屑岩和正常沉积的碎屑岩组合——宝力高庙组沉积,其与该地区普遍存在的早期晚泥盆纪海相沉积在沉积环境上发生了翻天覆地的变化。该过程持续到三叠纪,最终以出现大量后碰撞花岗岩(李锦轶等,2007)而结束,造成区域上普

遍缺失三叠纪和早侏罗世的沉积(余宏全等,2012)。

阿木古楞岩体中—晚侏罗世花岗岩单元构造背景环境则为区域拉伸构造环境,形成于蒙古—鄂霍次克洋和古太平洋构造域转换、大地构造背景以伸展拉张为主的后碰撞造山构造—岩浆事件。期间,太平洋板块向西俯冲,形成濒西太平洋沟—弧—盆系统和东亚北北东向构造体系(新华夏系)。同时,西伯利亚板块向南运动,蒙古—鄂霍次克洋关闭(董树文等,2007,2008,2009)。这种多个板块向东亚的极性运动,以及产生的变形图像及深部响应,被称之为"东亚多向板块汇聚",又称为"东亚汇聚",由此形成以陆内俯冲和陆内造山为特征的中—晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系(王五力等,2012)。于这种体系下,区域上自晚三叠世以来,总体处于大规模伸展拉张背景。在伸展拉张作用下,岩石圈减薄、压力降低、软流圈上涌、下地壳岩石熔点降低,地壳发生重熔或部分熔岩,于晚中生代侵位—喷发。研究区形成面积广布的酸性侵入岩类,而整个大兴安岭地区则广布中—酸性火山岩类,包括晚侏罗纪满克头鄂博组、玛尼吐组及白垩纪白音高老组、梅勒图组火山岩。

总之,阿木古楞岩体二期岩石单元虽同为一个岩体,却是不同构造域、不同构造动力学背景下的产物。研究区经历过 2 期大地构造演化:古生代到早侏罗世处于中亚造山带东段,中侏罗世到早白垩世则进入环太平洋或陆内伸展构造体制(刘昊等,2011)。两阶段演化过程均伴随着强烈的火山活动和花岗岩类侵入(刘伟等,2007)。正是由于构造域、构造动力学的不同,其内部花岗岩单元宏观产出特征也不一样,由晚石炭世的北东东向转化为中晚侏罗世的北北东向(图 1)。

5 结论

通过对内蒙古东乌旗阿木古楞复式花岗岩体的综合野外路线调查、岩石学、岩相学研究,结合岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学方法,可以得出如下结论:

(1) 内蒙古东乌旗阿木古楞岩体可分解为灰黄色中细粒含巨斑二长花岗岩单元和灰白色细粒二长花岗岩单元。前者锆石 U-Pb 加权平均年龄为 314.2 ±2.2Ma,后者为 167.1 ±1.3Ma。岩体表现为复式岩体特征,是二次岩浆作用的产物。

(2) 阿木古楞岩体两期花岗岩单元岩石系列各组成单位的成分相近,岩性均为二长花岗岩,副矿物均显示富含磁铁矿、独居石、磷灰石和榍石。主量元素表现为总体富 Si,且有较高的分异指数(DI)及碱/铝(NK/A)、Fe_2O/FeO 比值,较低的总 Fe、Ti、Mg、Ca 和 P 含量特征。微量元素蛛网图表现为富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、Pb,弱富集轻稀土元素 La、Ce,明显亏损高场强元素 Nb、Ba 和 Sr、Ti 特征。而稀土元素配分图则表现出相对富集轻稀土元素、亏损重稀土元素的轻重稀土元素分异较大、重稀土曲线却较为平坦的右倾型特征。两期岩石单元均属于高分异准铝质—弱过铝质高钾钙碱性系列的 I 型花岗岩。其中,晚石炭世二长花岗岩还经历了岩浆混合作用。

(3) 阿木古楞岩体两期花岗岩单元的区别主要在于:中—晚石炭世二长花岗岩颜色多表现为灰黄色,粒度较粗,多为中细粒,局部表现为粗中粒,多数含不同比例的长石巨斑,且可见闪长岩包体。而中—晚侏罗世花岗岩则颜色多数为灰白色,粒度较细,以细粒为主,基本不发育斑晶,其地球化学特征上则表现出更加富 Si,和更高的分异指数(DI)及碱/铝(NK/A)、Fe_2O/FeO 比值,更低的 TFe、Ti、Mg、Ca 和 P 含量。

(4) 阿木古楞岩体两期花岗岩单元源区物质均可能为来自亏损地幔物质经过改造形成的年轻的陆壳高 K、正常水含量的长英质陆壳岩石物质。晚石炭世花岗岩单元还混有少许基性玄武质岩浆物质,中—晚侏罗世花岗岩单元岩浆来源更有可能源于早期的晚石炭世花岗岩的重熔或部分重熔,至少具有类似的岩浆来源。

(5) 阿木古楞岩体二期岩石单元虽同为一个岩体,却是不同构造域、不同构造动力学背景下的产物。晚石炭世花岗岩单元构造背景环境为区域挤压造山构造环境,形成于中亚造山挤压大地构造背景下的同碰撞晚期构造—岩浆事件。中—晚侏罗世花岗岩单元构造背景环境为区域拉伸构造环境,形成于蒙古—鄂霍次克洋和古太平洋构造域转换、大地构造背景以伸展拉张为主的后碰撞造山构造—岩浆事件。

注 释 / Notes

❶ 内蒙古自治区区域地质测量队. 1973. 东乌珠穆沁旗幅 1: 20 万区域地质调查报告. 北京:全国地质资料馆.

❷ 内蒙古自治区区域地质测量队. 1976. 宝力格幅 1: 20 万区域地质调查报告. 北京:全国地质资料馆.

❸ 内蒙古自治区地质调查研究院. 2008. 翁图乌兰幅 1: 25 万区域地质调查报告. 北京:全国地质资料馆.

❹ 内蒙古自治区地质调查研究院. 2008. 东乌珠穆沁旗幅 1: 25 万区域地质调查报告. 北京:全国地质资料馆.

参 考 文 献 / References

陈国能, 洛尼·格拉佩斯. 2009. 花岗岩成因:原地重熔与地壳演化. 武汉:中国地质大学出版社.

董树文,张岳桥,龙长兴. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81(11):1449~1461.

董树文,张岳桥,陈宣华. 2008. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征. 地球学报, 29(3):306~317.

董树文,李廷栋,钟大赉. 2009. 侏罗纪/白垩纪之交东亚板块汇聚的研究进展和展望. 中国科学基金, 5:281~286.

范洪海,王德滋,刘昌实,赵连泽,沈渭洲,凌洪飞,段芸. 2001. 江西相潜火山岩中淬冷包体的发现及其成因机制探讨. 地质学报, 75(1): 64~69.

洪大卫,黄怀曾,肖宜君,徐海明,靳满元. 1994. 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, 68(3):219~230.

林强,葛文春,吴福元,孙德有,曹林. 2004. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学. 岩石学报, 20(3):403~412.

李锦轶,高立明,孙桂华,李亚萍,王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23(3):565~582.

刘昊,杨欣德,郝彬,刘贵权,李勇锋. 2011. 内蒙古赤峰北部晚侏罗世花岗岩地球化学特征及构造背景. 地质力学学报, 17(3):286~294.

刘伟,潘小菲,谢烈文. 2007. 大兴安岭南段林西地区花岗岩类的源岩:地壳生长的时代和方式. 岩石学报, 23(2): 441~460.

内蒙古地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京:地质出版社.

邱家骧,林景仟. 1991. 岩石化学. 北京:地质出版社.

沈晓丽,张宝林,贾文臣,郭志华,黄雪飞,崔敏利. 2012. 蒙古国东南部巴音苏赫图晚古生代—早中生代二长花岗岩地球化学特征及其对构造环境的约束. 吉林大学学报(地球科学版), 42(1):281~295 .

佘宏全,李进文,向安平,关继东,杨郧成,张德全,谭刚,张斌. 2012. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系. 岩石学报, 28(2):571~594.

史长义,鄢明才,池清华. 2008. 中国花岗岩类化学元素丰度. 北京:地质出版社.

王五力,郭胜哲. 2012. 中国东北古亚洲与古太平洋构造域演化与转换. 地质与资源, 21(1):27~34.

吴元保,郑永飞. 2004. 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, 49(8):1589~1604.

肖庆辉,邓晋福,马大铨,洪大卫,莫宣学. 2002. 花岗岩研究思维方法. 北京:地质出版社.

辛后田,滕学建,程银行. 2011. 内蒙古东乌旗宝力高庙组地层划分及其同位素年代学研究. 地质调查与研究, 34(1):1~9.

战明国. 1998. 花岗岩分类与定位机制研究动向和进展. 中国区域地质, 17(2): 182~188.

张万益. 2008. 内蒙古东乌珠穆沁旗岩浆活动与金属成矿作用. 博士学位论文. 北京:中国地质科学院.

张旗,王焰,熊小林,李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩:挑战与机遇. 北京:中国大地出版社.

张建军,王涛,张招崇,童英,张磊,史兴俊,郭磊,李舢,曾涛. 2012. 华北地块北缘西段巴音诺尔公—狼山地区牙马图岩体的岩浆混合成因——岩相学和元素地球化学证据. 地质论评, 58(1):53~66.

Auwera J V, Bogaerts M, Liegeois J P, Demaiffe D, Wilmart E, Bolle O and Duchesne J C. 2003. Derivation of 1.0~0.9Ga ferro potassic A type granitoids of southern Nor way by extreme differentiation from basic magmas. Precambrian Research, 124:107~148 .

Bechelor R A. 1986. 利用多阳离子参数对花岗岩系作成因解释. 基础地质译丛,(4): 36~45, 61.

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: metcorite studies. In: Henderson P. ed. Rare Earth Element Geochemistry. Elserbier, 63~114.

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

Glazner A F, Bartley J M, Coleman D S, Gray W, Taylor R Z. 2004. Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? GSA Today, 14(4~5):4~11.

King P L, White A J R, Chappell B W and Allen C N. 1997. Characterization and origin of aluminous A typegranites from the Lachlan Fold Belt, Southeasten Australia. J. Petrol., 38:371~391.

Liu Y S, Gao S, Gao C G, Wang D B, Zong K Q and Hu Z C. 2009. Timing of melt—peridotite interactions in xenoliths of the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircon. Journal of Petrology, 51:537~571.

Ludwing K R. 2001. Users manual for Isoplot/EX (Rev. 2. 49): A geochronological toolkit for Microsoft Execl. Berkeley Geochronology Center Special Pulication,1~55.

Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F, Champin D. 2005. An overview of adakite, tonalite—trondhjemite—granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. Lithos, 79:1~24.

Pearce J A, Harris N B and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. J. Petrol., 25: 956~983.

Petford N, Gruden A R, McCaffrey K J W, Vigneresse J L. 2000. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. Nature, 408:669~673.

Rollison Hugh R.. 2000. 岩石地球化学. 杨学明,杨晓勇,陈双喜. 译. 合肥:中国科学技术出版社.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Sannders A D and Norry M J. eds. Magnatism in Ocean Basins. Geol. Soc. London. Spec. Publ., 42, 313~345.

Sylvester P J. 1989. Post-collisional alkaline granites. Journal of Geology, 97: 261~280.

Treuil M, Joron J L. 1975. Utilisation deselements hydromagmatophiles pour la simplification de la modelisation quantitative desprocesses magmatiques——Exemples de L'A far et de la dorsale medioat lantique. Society of Italia Mineralogy and Petrology, 31:125~174.

Whal en J B, Currie K L , Chappel l B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, di scriminat ion and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407~419.

Williams I S, Buick A and Cartwright I. 1996. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynold Region, central Australia. Journal of Metamorphic Geology, 14: 29~47.

Ages, Origin and Geological Implications of the Amuguleng Composite Granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia

HE Fubing[1)], XU Jixiang[1)], GU Xiaodan[2)], CHENG Xinbin[1)],
WEI Bo[1)], LI Zhao[1)] LIANG Yanan[1)], WANG Zelong[1)], HUANG Qi[1)]
1) *Beijing Institute of Geological Survey*, *Beijing*, 100195;
2) *China University of Petroleum*(*Beijing*), *Beijing*, 102200

Abstract: Amuguleng granite is located at the north of East Ujimqin Banner (Dong Ujimqin Qi) Administration Center in Inner Mongolia. Geological investigation indicates that the granite composing of 2 intrusive rocks: gray-yellow medium—fine, medium—coarse grained adamellite containing huge phenocryst and gray-white fine adamellite. Zircon U-Pb age of the granite dated as 314.2 ±2.2Ma and 167.1 ±1.3Ma, suggesting that they were products of magmatic evolution during Late Carboniferous and Middle Late Jurassic respectively. Accessory minerals of both the two granites are rich in magnetite, monazite, and sphene, and there is fluorite in the Mid – Late Jurassic granite. Compositon of the rocks indicates that these two kinds of granites have similar geochemical characteristics: major element are characterized by enrichment of Si, higher DI and NK/A, Fe_2O/FeO ratios. The race element spider diagram indicates that granites are relatively rich in Rb, Th, U, Pb, slightly enriched in the light rare earth elements La, Ce, and depleted in high field strength elements such as Nb, Ba and Sr, Ti; While the distribution model of REE is right oblique, which is relatively LREE-enriched and HREE- depleted, and the HREE curve is flat. Based on the results, these two kinds of granites are attributed to high differentiated metaluminous—weakly peraluminous high-K calc-alkaline series, which are the typical I-type granites. The source materials might come from younger crustal felsic rocks with high K and normal water content, And the source material of felsic continental rocks of late Carboniferous granite unit is mixed with mantle-derived basaltic components. The Middle Late Jurassic granitic magma maybe originated from the remelting or the partial remelting of Late Carboniferous granite, at least, it has similar magma source with that of the Late Carboniferous granite. The Late Carboniferous granite unit was formed in compression setting at the late syn-collision stage of Central Asian Orogeny. The Middle Late Jurassic granite unit was formed in the extension environment setting, while the geotectonic background was changing from Mongolia—Ochotsk ocean system into the Paleo-pacific tectonic dynamic systems.

Key words: Amuguleng granite; zircon U-Pb age; geochemical characteristics; tectonic background; the East Ujimqin Banner(Dong Ujimqin Qi)