内蒙古正镶白旗中二叠世花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义

彭云彪,蒋孝君,剡鹏兵,戴明建,邢亚杰
核工业二〇八大队,内蒙古包头,014000

内容提要:前呼和陶勒盖岩体位于白乃庙岛弧,岩性主要为黑云母花岗岩。岩石锆石具有明显的环带结构,Th/U 值介于 0.37~0.69,为典型的岩浆成因。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果表明,其形成年龄为 276.4±1.5Ma,为中二叠世。该岩体富硅(70.99%~71.78%),富碱(7.32%~8.08%),K_2O/Na_2O 值为 0.73~0.95,Al_2O_3 含量为 14.60%~14.73%。所有样品相对富集轻稀土而亏损重稀土,$(La/Yb)_N$ = 11.89~13.59,铕具有微弱的负异常(δEu=0.69~0.76);大离子亲石元素 K、Rb 等明显富集;高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 强烈亏损。根据数据处理分析及对比研究,认为该岩体属于分异的 I 型花岗岩类,其岩浆来源于地壳物质受俯冲板片脱水产生的流体影响而发生的低程度部分熔融,侵位于西伯利亚板块和华北板块北缘碰撞接近尾声的活动大陆边缘弧环境,所以研究区内两大古板块碰撞缝合结束时间应不早于 276.4 Ma。

关键词:花岗岩;年代学;地球化学;中二叠世;古亚洲洋;正镶白旗

中亚造山带夹持于西伯利亚克拉通和塔里木—华北克拉通之间,是地球上保存最大的、最好的元古宙—显生宙增生造山带(Jahn Bor-ming et al., 2000;汪相,2018)。它是由一系列的岩浆弧、蛇绿混杂岩、前寒武纪地体等构成,在造山过程中伴随有大量的新生物质产出。中亚造山带的南部发育有广泛的岩浆岩,记录了古亚洲洋从新元古代到二叠纪以来长期的向南俯冲削减过程(Windley et al., 2007; Xiao Wenjiao et al., 2003, 2015)。最终,该大洋沿着索伦—西拉木伦河缝合带闭合。然而,对于最终的闭合时间仍然没有统一的认识。Xu Bei 等(2013)认为在泥盆纪已经闭合了,而其他学者则认为闭合的时间要晚很多,可能发生在晚古生代末到三叠纪之间(Xiao Wenjiao et al., 2003, 2015; Miao Laicheng et al., 2008; Song Dongfang et al., 2015;汪相,2018)。近来,吕洪波等(2018)在狼山地区发现晚中生代蛇绿混杂岩,认为中亚造山带的最后拼合可能在狼山—阴山一线,时间可能是白垩纪。因此,该问题需要进一步研究。

研究区正镶白旗地区位于内蒙古中部偏东,白乃庙岛弧北缘(图 1a),经历了复杂的构造演化,岩浆活动强烈,其中二叠纪—早三叠世岩浆活动最为显著(内蒙古自治区地质矿产局,1991;柳长峰,2010;张拴宏等,2010)。区内主要发育中生代火山岩,古生代—中生代侵入岩小规模出露。本文通过对正镶白旗地区前呼和陶勒盖岩体野外产出特征、镜下显微特征、地球化学特征、年代学特征等的研究,详细鉴别了其岩性、岩石类别,确定了其形成时代,讨论了其成因及形成构造背景,进而探讨了西伯利亚板块和华北板块北缘碰撞缝合的时限。

1 地质背景和岩体地质

研究区大地位置上处于白乃庙岛弧北缘,属于华北古生代大陆边缘,是兴蒙造山带的一部分,中生代区域性岩浆活动对该区叠加改造作用强烈(图 1),同时也属于正镶白旗火山盆地正镶白旗破火山。区内大面积出露新生界的宝格达乌拉组和第四系沉积物;其次大量发育中生界地层,主要为上侏罗统白音高老组、玛尼吐组、满克头鄂博组等火山岩;少量古生界地层,主要为下二叠统额里图组、三面井组。侵入岩则主要发育中生代花岗斑岩、花岗岩等;次为小范围出露的二叠纪花岗闪长岩、花岗岩等。本文将存在较多疑问的前呼和陶勒盖岩体作为主要研究对象,该岩体位于正镶白旗明安图东南约 6 km

注:本文为中国核工业地质局项目(编号:201604)和中国地质调查局项目(编号:DD2016013624)的成果。
收稿日期:2018-04-03;改回日期:2018-08-22;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.06.006
作者简介:彭云彪,男,1965 年生,博士,研究员级高工,铀矿地质专业,主要从事铀矿地质研究,Email:208y@bog.com.cn。

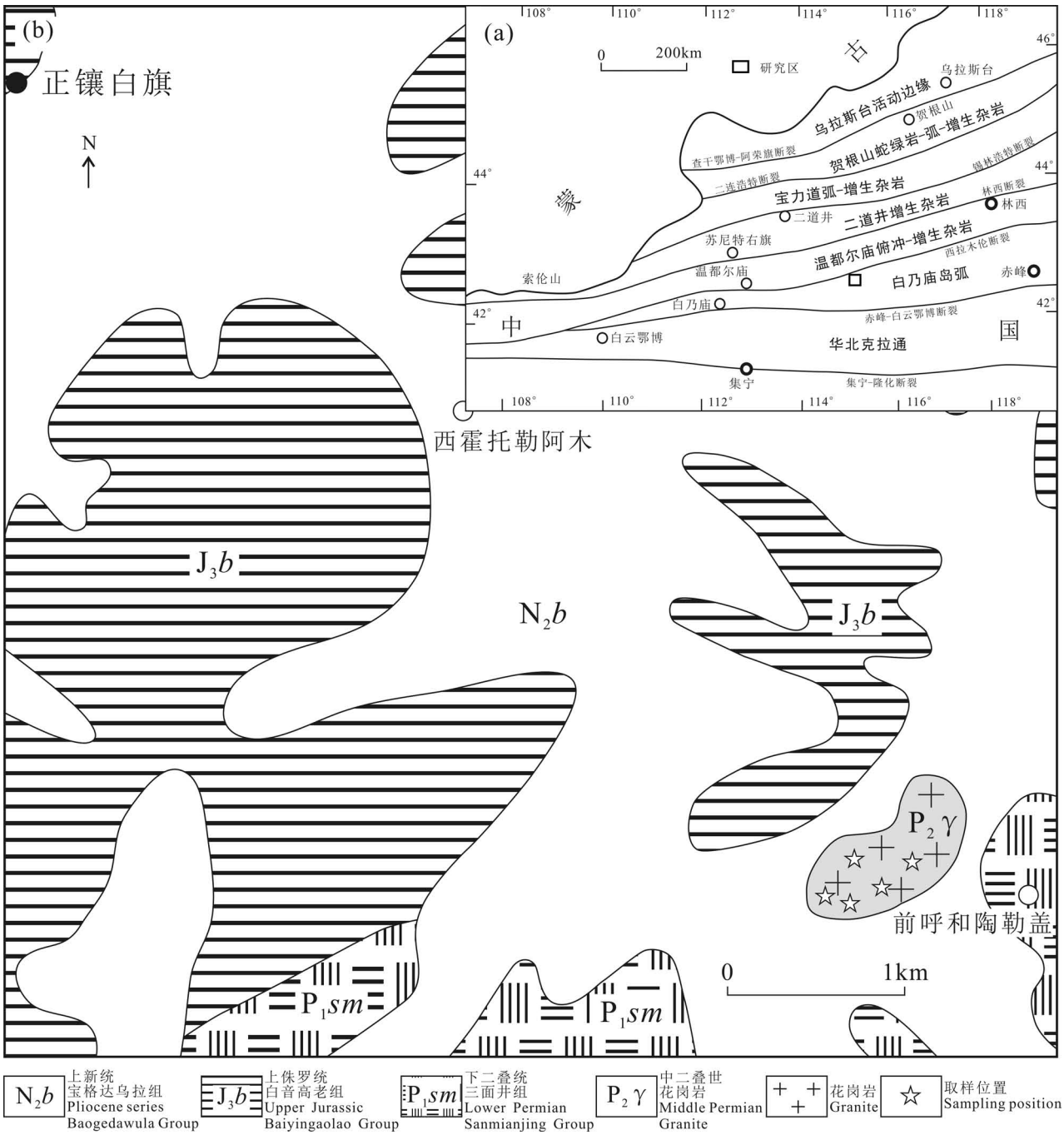


图 1 正镶白旗前呼和陶勒盖岩体构造位置图(a)及地质简图(b)

Fig. 1 Structural location(a) and Geological sketch map(b) of Qianhuhetaolegai pluton in Zhengxiangbai Banner

处,出露面积约 0.43 km^2,整体呈北东向的近椭圆状小岩株展布,被上新统宝格达乌拉组角度不整合覆盖接触(图 1b)。

2 岩相学特征

前呼和陶勒盖岩体整体出露面积小,岩性单一。岩石风化面浅黄色、浅灰红色,新鲜面灰红色,中细粒花岗结构,块状构造(图 2a)。岩石含有少量斑晶(<5%),斑晶成分主要为斜长石,短柱状,粒径不大于 1cm,基质主要由石英和长石组成,石英(30%),粒状,粒径小于 1 mm,斜长石(35%),短柱状,粒径 1~3 mm,显微镜下可见聚片双晶,局部发育绿泥石化蚀变,钾长石(25%),板柱状,局部发育弱伊利石化蚀变;暗色矿物主要为黑云母,含量 5%~10%,细

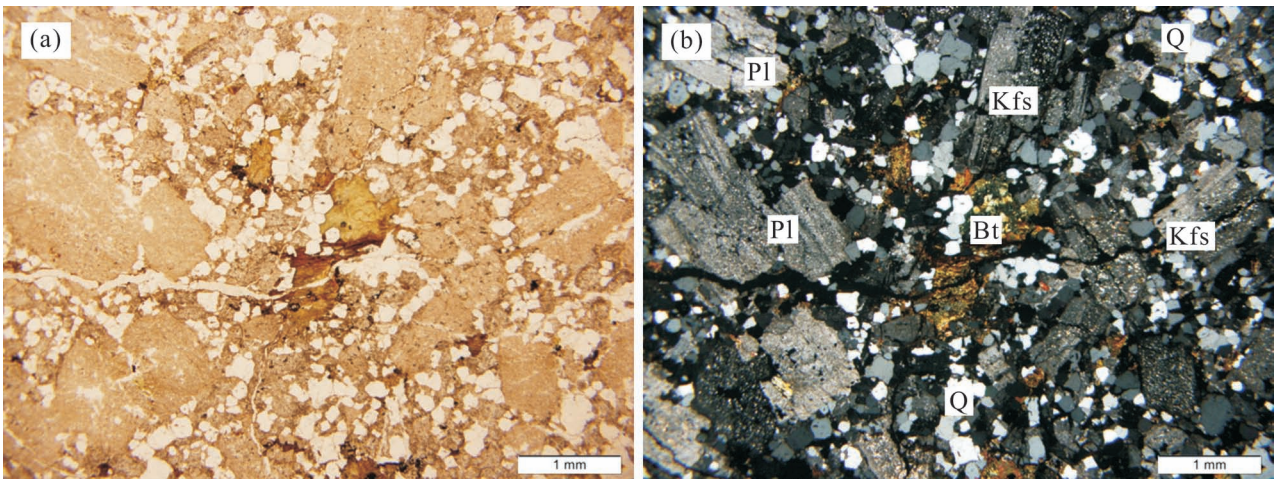


图 2 正镶白旗前呼和陶勒盖中细粒黑云母花岗岩显微镜下单偏光(a)和正交偏光特征(b)

Fig. 2 Single polarization(a) and Orthogonal polarization(b) characteristics of biotite granites in Qianhuhetaolegai of Zhengxiangbai Banner

Q—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Bt—黑云母

Q—Quartz;Kfs—Potash feldspar;Pl—Plagioclase;Bt—Biotite

小鳞片状,粒径小于 0.5 mm,多为集合体(图 2b),可见少量角闪石,含量小于 5%,长柱状,野外能肉眼清晰辨别者粒径可达 2~3 mm;副矿物主要为磁铁矿等。根据野外特征和镜下显微特征,该岩石明显区别于前人资料正长斑岩,综合定名为中细粒黑云母花岗岩;且地球化学特征显示,其 SiO_2 含量普遍高于 70%,属于典型的酸性岩,在 TAS 判别图解中也落入花岗岩范围内,进一步排除了正长斑岩,详述见后文。

3　样品采集及实验方法

在正镶白旗东南前呼和陶勒盖地区采取了 5 组新鲜的中细粒黑云母花岗岩样品进行全岩的主量和微量元素分析,选取了 1 组样品同时开展了全岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年研究,取样位置如图 1。

锆石的分选、制靶及反射光、透射光和阴极发光(CL)的显微照相在河北省廊坊市区域地质调查研究所实验室完成,锆石同位素测年在北京燕都中实测试技术有限公司实验室完成。本次测试利用 LA-Q-ICP-MS 分析完成,激光剥蚀系统为 New Wave UP213,ICP-MS 为布鲁克 M90。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 Y 型接头混合。U-Pb 同位

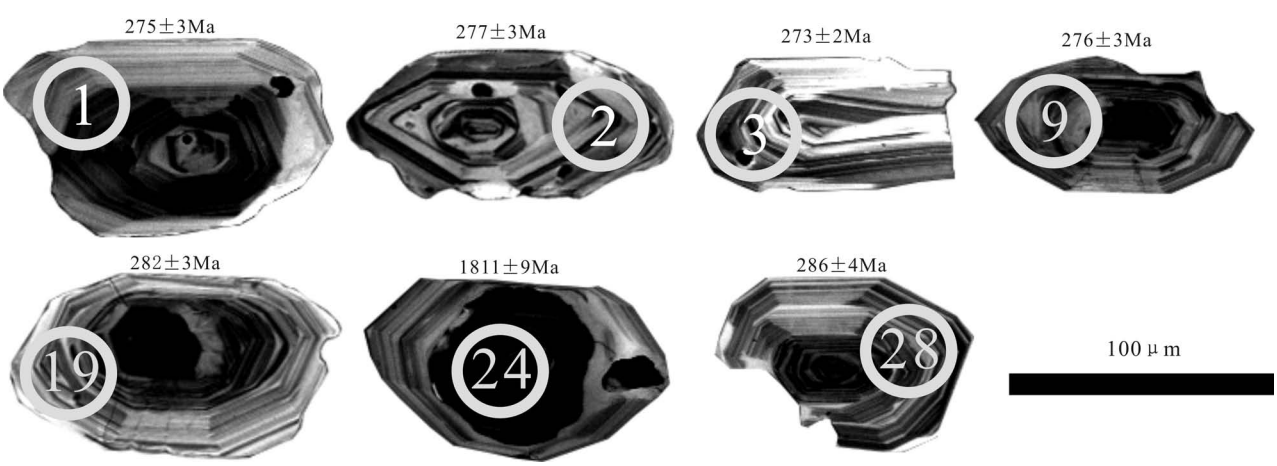


图 3 正镶白旗前呼和陶勒盖中细粒黑云母花岗岩的锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of zircons from biotite granites in Qianhuhetaolegai of Zhengxiangbai Banner

表 1 正镶白旗前呼和陶勒盖中细粒黑云母花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating data of biotite granites in Qianhuhetaolegai of Zhengxiangbai Banner

测点号	元素含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度(%)
	Th	U	Pb		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
N-B-6-01	71	165	8	0.43	0.0437	0.0004	0.3206	0.0088	0.0534	0.0015	275	3	282	7	346	63	97
N-B-6-02	74	149	7	0.50	0.0439	0.0005	0.3165	0.0094	0.0524	0.0015	277	3	279	7	302	67	99
N-B-6-03	136	240	12	0.57	0.0432	0.0004	0.3350	0.0085	0.0563	0.0014	273	2	293	6	465	56	92
N-B-6-04	180	277	14	0.65	0.0436	0.0004	0.3191	0.0072	0.0533	0.0012	275	3	281	6	343	54	97
N-B-6-05	108	183	9	0.59	0.0437	0.0004	0.3164	0.0087	0.0527	0.0015	276	2	279	7	317	69	98
N-B-6-06	111	221	11	0.50	0.0437	0.0004	0.3020	0.0071	0.0504	0.0012	275	3	268	6	213	83	97
N-B-6-07	51	111	5	0.46	0.0440	0.0006	0.3190	0.0116	0.0527	0.0019	278	4	281	9	317	80	98
N-B-6-08	162	249	13	0.65	0.0439	0.0005	0.3271	0.0085	0.0543	0.0014	277	3	287	6	387	59	96
N-B-6-09	90	171	8	0.53	0.0437	0.0005	0.3047	0.0091	0.0506	0.0014	276	3	270	7	220	67	97
N-B-6-10	70	143	7	0.49	0.0434	0.0005	0.3163	0.0097	0.0529	0.0016	274	3	279	7	324	67	98
N-B-6-11	82	171	8	0.48	0.0434	0.0004	0.3169	0.0084	0.0530	0.0014	274	2	279	6	328	27	97
N-B-6-12	106	193	10	0.55	0.0435	0.0004	0.3126	0.0093	0.0522	0.0015	275	2	276	7	300	67	99
N-B-6-13	170	256	13	0.66	0.0455	0.0005	0.3227	0.0079	0.0518	0.0013	287	3	284	6	276	57	99
N-B-6-14	145	262	13	0.56	0.0442	0.0004	0.3217	0.0077	0.0532	0.0014	279	3	283	6	345	59	98
N-B-6-15	139	246	12	0.56	0.0433	0.0003	0.3117	0.0077	0.0523	0.0013	273	2	276	6	298	64	99
N-B-6-16	79	160	8	0.49	0.0436	0.0004	0.3203	0.0089	0.0533	0.0015	275	3	282	7	343	95	97
N-B-6-17	104	203	10	0.51	0.0435	0.0005	0.3144	0.0092	0.0527	0.0016	274	3	278	7	317	64	98
N-B-6-18	97	174	9	0.56	0.0457	0.0005	0.3796	0.0147	0.0600	0.0022	288	3	327	11	606	80	87
N-B-6-19	95	184	9	0.52	0.0448	0.0004	0.3248	0.0084	0.0527	0.0013	282	3	286	6	322	57	98
N-B-6-20	92	169	8	0.55	0.0437	0.0004	0.3126	0.0091	0.0521	0.0015	276	3	276	7	287	67	99
N-B-6-21	108	203	10	0.53	0.0423	0.0004	0.4349	0.0152	0.0748	0.0027	267	2	367	11	1065	77	68
N-B-6-22	49	112	6	0.43	0.0488	0.0007	0.3991	0.0149	0.0597	0.0022	307	4	341	11	594	81	89
N-B-6-23	149	232	12	0.64	0.0438	0.0004	0.3125	0.0065	0.0519	0.0012	277	2	276	5	283	52	99
N-B-6-24	159	428	155	0.37	0.3196	0.0026	4.9516	0.0557	0.1122	0.0010	1788	13	1811	9	1835	15	98
N-B-6-25	77	153	8	0.50	0.0490	0.0005	0.3628	0.0102	0.0538	0.0015	308	3	314	8	361	61	98
N-B-6-26	114	177	10	0.65	0.0493	0.0006	0.3565	0.0098	0.0528	0.0015	310	4	310	7	320	65	99
N-B-6-27	31	74	4	0.42	0.0483	0.0007	0.5532	0.0226	0.0852	0.0039	304	4	447	15	1320	89	61
N-B-6-28	92	190	10	0.48	0.0454	0.0006	0.3174	0.0100	0.0507	0.0015	286	4	280	8	228	66	97
N-B-6-29	213	307	18	0.69	0.0478	0.0004	0.4038	0.0088	0.0614	0.0014	301	3	344	6	650	44	86
N-B-6-30	89	165	8	0.54	0.0446	0.0006	0.3644	0.0164	0.0593	0.0025	281	4	316	12	589	125	88

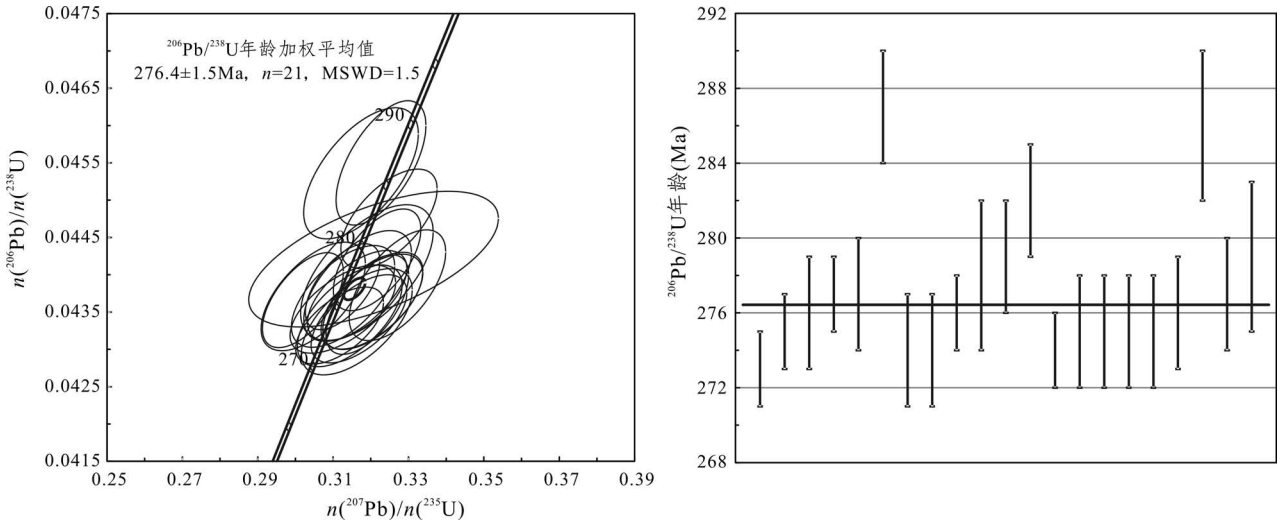


图 4 正镶白旗前呼和陶勒盖中细粒黑云母花岗岩的锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb concordian diagrams of zircons from biotite granites in Qianhuhetaolegai of Zhengxiangbai Banner

素定年中采用锆石标准 GJ-1 作外标进行同位素分馏校正，每分析 5～10 个样品点，分析 2 次 GJ-1。锆石微量元素含量利用 SRM610 作为多外标、Si 作内标的方法进行定量计算。根据锆石显微照相选择锆石测年区域，剥蚀光斑直径选择 30 μm。运用 Andersen 方法（Anderson，2002）进行同位素比值校正，以扣除普通 Pb 的影响。使用 ICP-MS DataCal 程序处理锆石测年中 U-Pb 年龄、Pb 同位素比值和微量元素含量，采用 Isoplot 程序进行加权平均年龄计算和成图（Ludwig，1991）。另外，测试数据、单个测试点年龄值的误差均为 1σ。因为该锆石年龄都较为年轻（<1000 Ma），因此年龄值选用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄（李怀坤等，2009）。

化学分析样品的主量元素、微量元素和稀土元素的测定均在北京燕都中实测试技术有限公司实验室完成。样品粗碎至厘米级，选取无蚀变及脉体穿插的新鲜样品用纯净水冲洗干净，烘干并研磨至 200 目以备测试使用。采用消解法对样品进行预处理，使用电感耦合等离子质谱仪（ICP-MS）M90 测定全岩微量稀土元素的含量；采用 XRF 荧光光谱仪熔融法进行岩石主量元素精密分析。

4　年代学特征

本文对中细粒黑云母花岗岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年，测年结果见表 1，其锆石 CL 图像见图 3。锆石年龄谐和图见图 4。

该样品的锆石晶型较好，颗粒大小 100 μm 左右，多数具有明显而宽缓的震荡环带，且锆石的 Th/U 值均大于 0.1，介于 0.37～0.69，属岩浆成因（William et al.，1996）。共完成了 30 个测点的测试，其中有 6 个测点谐和度较低；有 2 个测点数据分别为 308 Ma 和 310 Ma，与该样品锆石年龄集中值偏离较远，推测可能为捕获锆石；另有 1 个测点打点位置为锆石中心的古老锆石包体（图 3），其年龄为 1811 Ma，该锆石为元古宙古老锆石残留的重新结晶生长。其余 21 个有效锆石测点谐和度均较好，测试数据均投影在 U-Pb 谐和线上及附近，$^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄的加权平均值为 276.4 Ma±1.5 Ma（MSWD=1.5）（图 4），所以该岩体形成于中二叠世。

5　地球化学特征

样品的主量元素分析结果及稀土微量元素分析结果见表 2。

中细粒黑云母花岗岩富硅（SiO_2 = 70.99%～71.78%）；富碱，全碱含量为 7.32%～8.08%，其中 K_2O 含量在 3.13%～3.73%，Na_2O 含量在 3.92%～4.55%，K_2O/Na_2O 值为 0.73～0.95，属钠质；Al_2O_3 含量为 14.60%～14.73%；TiO_2（0.22%），P_2O_5（0.07%～0.09%），CaO（0.33%～0.44%）的含量均明显较低；MgO（0.42%～0.57%），FeO^T（2.76%～3.28%）含量相对偏低。A/CNK 的值在 1.21～1.36（>1.1），碱铝指数 AKI 值在 0.69～0.77。在岩浆岩 TAS 图解（图 5a）中全部样品均落入花岗岩范围内，且位于 Ir 分界线以下，属于亚碱性系列，在硅钾图

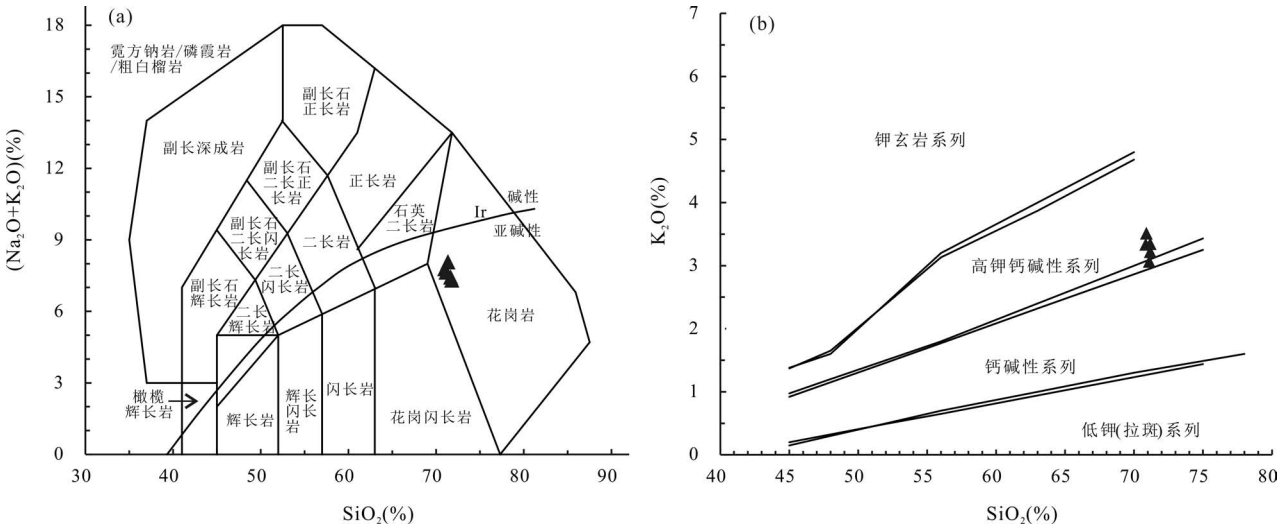


图 5 正镶白旗前呼和陶勒盖中细粒黑云母花岗岩的 TAS 图解(a)和 SiO_2—K_2O 图解(b)

Fig. 5 TAS (a) and SiO_2—K_2O (b) diagrams of biotite granites in Qianhuhetaolegai of Zhengxiangbai Banner

解(图 5b)所有样品均投入高钾钙碱性系列范围内,在 A/NK—A/CNK 判别图解(图略)中全部样品落入过铝质范围内,所以该岩体属于过铝质高钾钙碱性系列花岗岩类。

该岩体稀土元素总量(∑REE)为 136.2×10^{-6} ~ 152.9×10^{-6},其中轻稀土明显富集(125.4×10^{-6} ~ 140.9×10^{-6}),重稀土明显亏损(10.51×10^{-6} ~ 12.01×10^{-6}),轻重稀土分馏明显,$(La/Yb)_N$ = 11.89 ~

表 2 正镶白旗前呼和陶勒盖中细粒花岗岩的主量元素(%)、稀土和微量元素($\times10^{-6}$)分析结果

Table 2 Analysis data of major elements(%), rear earth elements and trace elements($\times10^{-6}$) in biotite granites in Qianhuhetaolegai of Zhengxiangbai Banner

样品号	BQ-26	BQ-27	BQ-28	BQ-29	BQ-30	样品号	BQ-26	BQ-27	BQ-28	BQ-29	BQ-30
SiO_2	71.15	70.99	71.78	71.35	71.67	Hf	4.55	4.18	4.59	4.33	4.70
Al_2O_3	14.73	14.64	14.61	14.65	14.60	Ho	0.48	0.51	0.48	0.60	0.57
CaO	0.44	0.42	0.33	0.42	0.35	La	33.58	31.97	32.61	37.44	35.47
FeO^T	3.14	3.28	2.97	2.76	3.20	Lu	0.30	0.28	0.27	0.32	0.30
K_2O	3.73	3.48	3.38	3.53	3.13	Nb	9.46	9.10	9.36	9.41	9.68
MgO	0.57	0.50	0.44	0.42	0.44	Nd	22.33	21.74	21.36	24.50	23.63
MnO	0.09	0.08	0.09	0.04	0.05	Pr	6.48	6.19	6.20	7.04	6.74
Na_2O	3.92	4.31	3.94	4.55	4.31	Rb	128.3	113.4	112.2	113.7	95.20
P_2O_5	0.08	0.08	0.07	0.09	0.08	Sm	3.40	3.32	3.32	3.78	3.68
TiO_2	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	Sr	157.9	178.4	133.6	236.2	149.6
烧失	1.51	1.30	1.80	1.54	1.68	Ta	0.53	0.49	0.52	0.50	0.52
总量	99.57	99.31	99.62	99.56	99.73	Tb	0.49	0.50	0.49	0.56	0.55
A/NK	1.41	1.35	1.44	1.30	1.39	Th	9.97	9.69	9.86	9.97	9.86
A/CNK	1.31	1.26	1.36	1.21	1.31	Tm	0.29	0.27	0.25	0.30	0.29
AKI	0.71	0.74	0.69	0.77	0.71	U	1.39	1.06	1.15	1.32	1.27
Ba	1194	1251	1021	1263	961.1	Y	12.47	12.66	12.50	17.92	15.66
Ce	62.92	61.33	62.74	67.25	60.90	Yb	1.91	1.81	1.75	1.86	1.89
Cs	5.16	4.29	8.01	8.34	5.00	Zr	180.76	163.15	178.94	170.31	184.01
Dy	2.55	2.65	2.55	3.01	2.94	∑REE	140.2	136.2	137.5	152.9	143.1
Er	1.53	1.56	1.51	1.86	1.76	δEu	0.69	0.76	0.71	0.75	0.70
Eu	0.76	0.82	0.77	0.90	0.83	10000Ga/Al	2.29	2.30	2.29	2.26	2.25
Ga	17.84	17.80	17.74	17.54	17.40	Zr+Nb+Ce+Y	265.6	246.2	263.5	264.9	270.3
Gd	3.23	3.23	3.20	3.50	3.51						

13.59。稀土元素标准化分布型式图(图 6a)呈现微弱的“燕式”分布,铕具有微弱的负异常(δEu=0.69~0.76)。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上所有样品具有相似的分布型式(图 6b),大离子亲石元素 K、Rb 等明显富集,Sr 强烈亏损;高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 强烈亏损,U 相对亏损。

6　讨论

6.1　岩石成因类型

目前,花岗岩成因类型最被普遍接受和使用的划分方案是将花岗岩划分为 A 型、I 型、S 型和 M 型,而自然界真正由地幔岩浆衍生出的 M 型花岗岩极少,故学者们通常讨论的花岗岩成因类型主要为 A 型、I 型和 S 型。

该花岗岩 FeO^T/MgO 值较低(5.53~7.25),区别于 A 型花岗岩显著富铁的特征($FeO^T/MgO>16$, Whalen et al., 1987);其碱铝指数(AKI 值)变化于 0.69~0.77,明显低于 Whalen et al.厘定的 A 型花岗岩的平均值(AKI=0.95);其 Ga 含量较低,10000·Ga/Al 值变化于 2.25~2.30,明显低于 A 型花岗岩的下限值(2.60);Zr+Nb+Ce+Y 和值变化于 246.2×10^{-6}~270.3×10^{-6},也明显低于 A 型花岗岩的下限值(350×10^{-6})(Whalen et al., 1987);该花岗岩的锆石饱和温度运用 Watson 等(1983)的方法计算为 805℃~821℃,平均值 814℃,低于一般 A 型花岗岩的成岩温度(Miller et al, 2003;肖娥等,2007)。结合花岗岩成因判别图解,在 Ce—10000·Ga/Al(图 7a)、K_2O/MgO—10000·Ga/Al(图略)、(K_2O+Na_2O)—10000·Ga/Al(图 7b)和 Nb—10000·Ga/Al(图略)岩石成因判别图解中,所有样品都具有同样的特征,全部落入 A 型花岗岩之外,在 I&S 型花岗岩范围内;而在 FeO^T/MgO—(Zr+Nb+Ce+Y)(图 7c)和(Na_2O+K_2O)/CaO—(Zr+Nb+Ce+Y)(图 7d)岩石成因判别图解中所有样品均投影在 FG 范围内,即分异的 I 型或 S 型花岗岩,于是,该花岗岩基本排除 A 型花岗岩可能,应属于分异的 I 型或 S 型花岗岩。该岩石铁、镁、钙、钛、磷、锰等的含量均低,且分异指数 DI 值较高(88.8~90.8),平均值达 89.6,指示其可能经历了较强的结晶分异演化过程。不相容元素 P 显示出强烈亏损的特征,指示岩浆经历了较高程度的分异演化,分离结晶矿物相主要为磷灰石;Ti 的负异常应主要为钛铁矿和金红石等含钛矿物的分离结晶所致,由于金红石对 Nb、Ta 也具有高的分配系数(Foley et al., 2000),故其分离结晶可能也是岩石 Nb、Ta 明显亏损的主要原因(邱检生等,2008);岩石中 Sr、Eu 均呈现一定程度的负异常,指示斜长石也发生了一定程度的结晶分异,如上所述进一步指示该花岗岩可能发生了较高程度的分异作用,应属于分异的 I 型或 S 型花岗岩。

该岩石的 A/CNK 介于 1.21~1.36,平均值为 1.29,属过铝质;对岩石进行 CIPW 标准矿物计算时,出现了刚玉分子,这些似乎都体现了 S 型花岗岩的特点。然而,邓晋福等(2015)指出刚玉分子不能直接作为 S 型花岗岩的判别标准,该花岗岩标准矿物虽出现了刚玉,但其平均值较小,为 3.55%(<4%),且未出现透辉石,极可能来源于准铝质岩浆的结晶分异(Chappell, 1999, 2001;柳长峰,2010)。更

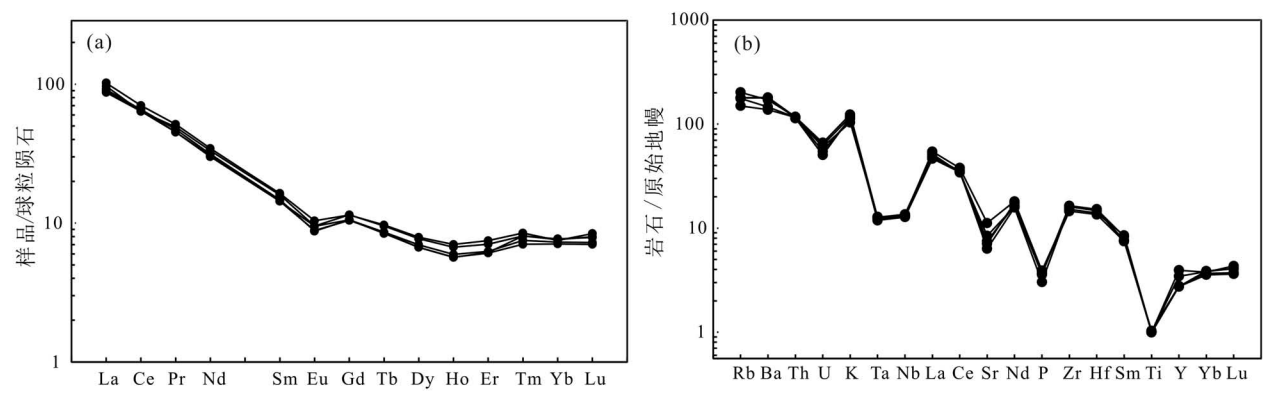


图 6 正镶白旗前呼和陶勒盖中细粒黑云母花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized diagram (b) from biotite granites in Qianhuhetaolegai of Zhengxiangbai Banner

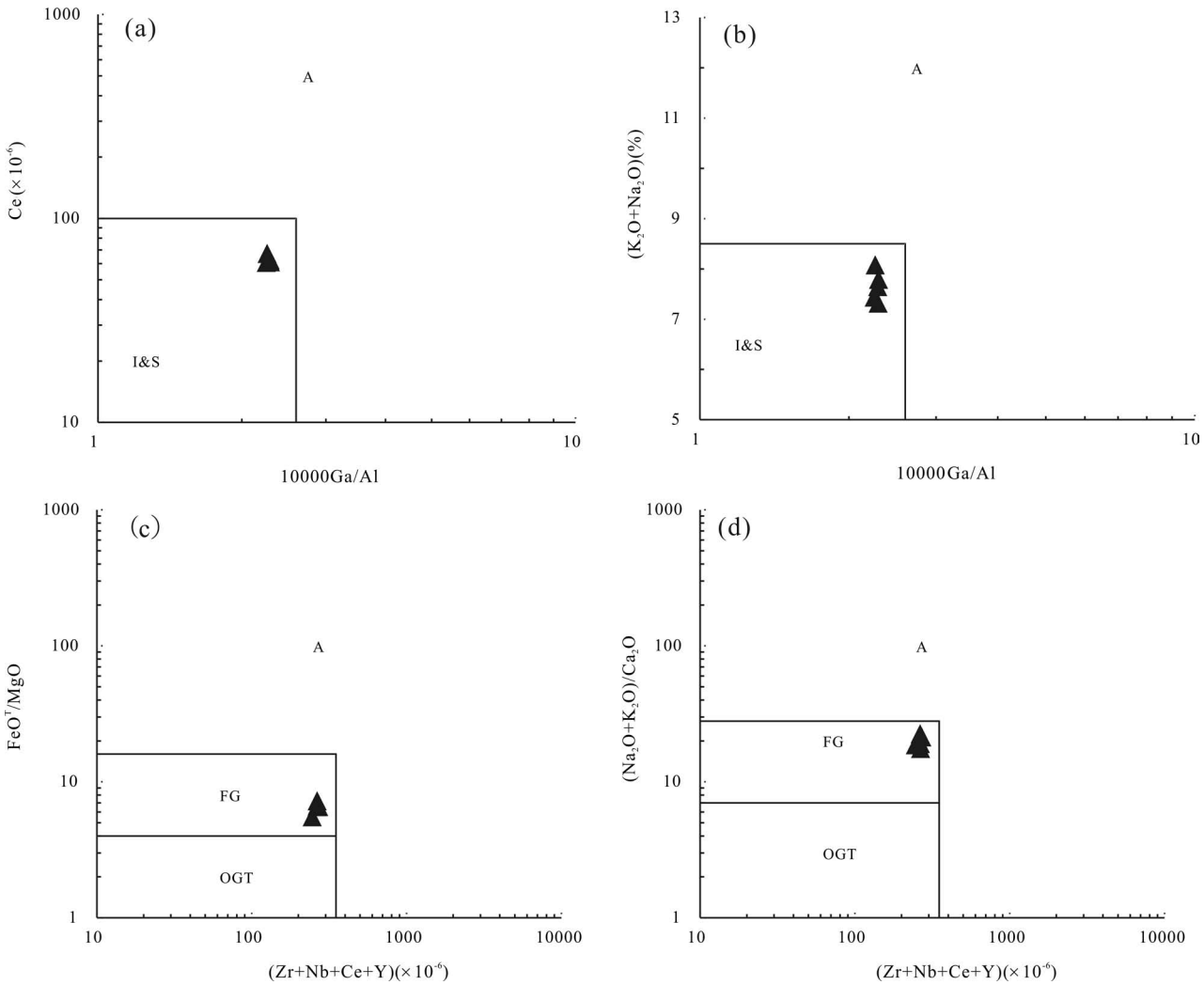


图 7 正镶白旗前呼和陶勒盖中细粒黑云母花岗岩的 Ce—10000 · Ga/Al(a)、(K_2O+Na_2O)—10000 · Ga/Al(b)、FeO^T/MgO—(Zr+Nb+Ce+Y)(c)和(Na_2O+K_2O)/CaO—(Zr+Nb+Ce+Y)(d)岩石成因判别图解(据 Whalen 等,1987)

Fig. 7 Ce—10000 · Ga/Al(a)、(K_2O+Na_2O)—10000 · Ga/Al(b)、FeO^T/MgO—(Zr+Nb+Ce+Y)(c) and (Na_2O+K_2O)/CaO—(Zr+Nb+Ce+Y)(d) diagrams of biotite granites in Qianhuhetaolegai of Zhengxiangbai Banner (After Whalen et al., 1987)

为重要的是,岩相学特征表明,长石矿物有蚀变现象,在低级别蚀变过程中,Al 相对稳定不容易受到影响,而 K、Na、Ca 则因为更加活泼而丢失(Bédard, 1999;Smith et al., 1976),因此,蚀变会导致 Al 的相对富集,从而使得样品具有高的铝饱和指数。

地球化学特征上该岩石具有富硅碱,贫 CaO、FeO^T、TiO_2、MnO、MgO 和 P_2O_5的特征,其中 P_2O_5含量很低,小于 0.10%,且 P_2O_5的含量与 SiO_2的含量呈负相关,这些特征均显示了 I 型花岗岩的演化特点;在 Zr—TiO_2判别图解(图 8a)中,所有样品也全部落入 I 型花岗岩范围内。火成岩 Rb/Sr 值能灵敏地记录源区物质的性质,该岩体 Rb/Sr 值在 0.48~0.84,均小于 0.9,属于 I 型花岗岩范围内(王德滋等,1993)。另外,该岩体主要岩性为黑云母花岗岩,主要矿物组成为斜长石、碱性长石和石英,暗色矿物主要为黑云母和少量角闪石。其矿物组成中没有白云母、堇青石等过铝质矿物,而出现暗色矿物组合黑云母+角闪石,也暗示该岩体不属于 S 型花岗岩(邓晋福等,2004,2015)而属于 I 型花岗岩(吴福元等,2007;邱检生等,2008)。综合所述,该岩石可以进一步排除 S 型花岗岩,应属于分异的 I 型花岗岩类。

6.2 岩浆来源

广义的花岗质岩浆的岩浆物质来源比较复杂,可能来自地壳不同结构层及消减带的消减洋壳和地幔楔形区(路凤香等,2002),而通常 I 型花岗岩则来

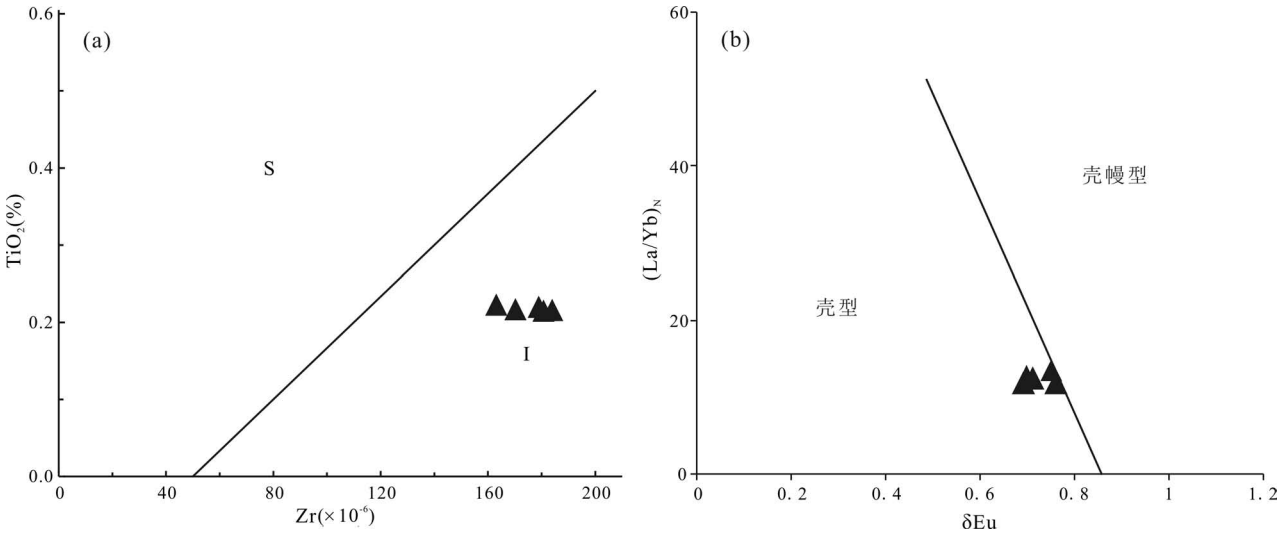


图 8 正镶白旗前呼和陶勒盖中细粒黑云母花岗岩的 Zr—TiO_2 判别图解(a)(路远发,2004)和 δEu—$(La/Yb)_N$ 图解(b)(据康磊等,2012)

Fig. 8 Zr—TiO_2(a) (after Lu Yuanfa , 2004&) and δEu—$(La/Yb)_N$(b)(after Kang Lei et al., 2012&) diagrams of biotite granites in Qianhuhetaolegai of Zhengxiangbai Banner

自地壳未经风化的火成岩熔融形成的岩浆(Chappell et al., 1974)。该岩石稀土元素为右倾型配分模式,δEu 值为 0.69~0.76, Ba 富集,Eu 和 Sr 弱亏损,反映源区钾长石基本无残留,斜长石有较弱的残留,岩石可能由地壳的部分熔融形成的岩浆演化而来(高秉璋等,1991;Harris et al., 1992)。

该岩石岩浆演化过程中发生了较强的结晶分异作用,但该岩体轻稀土明显富集,重稀土亏损,La 含量与 La/Sm 和 La/Yb 值均呈正相关(图略),指示其岩浆演化过程中以部分熔融为主(Treuil et al., 1975)。该岩体主量元素 Harker 图解显示随着 SiO_2 含量的增加,其余主量元素的含量总体呈降低趋势,且全碱含量较高,也表明其岩浆源区的部分熔融程度有限。在过铝质花岗岩部分熔融过程中,低 Rb/Sr 值花岗岩一般与含水条件下的部分熔融有关,代表部分熔融的初始阶段(Harrison et al., 1999)。且该岩石富含 Na、K、Si、Al 的矿物含量高,富含 Fe、Ca、Mg 的矿物含量明显偏低,进一步指示其部分熔融的程度偏低(韩吟文等,2008)。

该花岗岩属于高钾钙碱性系列,在微量元素原始地幔标准化图中明显亏损 Nb、Ta、P、Ti 而富集 Zr、Hf 等元素,且具较低的 MgO、FeO^T 含量,同时存在 Eu 弱负异常,诸上特征均表明其岩浆来源可能为地壳物质的部分熔融或存在地壳物质的混染作用,并受到大洋板块俯冲有关的流体交代作用(La Fleche at al., 1998;孙德有等,2004)。La/Nb 值介于 3.48~3.98,均大于 1.0 而区别于地幔来源的岩浆(DePaolo and Daley,2000)。由于 Ba 在流体中的活动性远高于 Th,因此 Ba/Th 值用于度量与俯冲有关的流体对岩浆源区的贡献,而 Nb/Zr 是地幔因先前的熔融作用而发生亏损的标志(马昌前等,2004),该岩体 Nb/Zr 值稳定,Ba/Th 值变化明显,也明显显示受到了板片流体的影响(罗红玲等,2010)。在 δEu—$(La/Yb)_N$ 图解(图 8b)中所有样品落入壳型区域(康磊等,2012;赵江林等,2017)。综上所述,判断该岩石岩浆来源于地壳物质受俯冲板片脱水产生的流体影响而发生的低程度部分熔融。

古亚洲洋洋壳向华北板块北缘俯冲过程中,当洋壳俯冲到一定深度发生脱水形成富含大离子亲石元素的流体(王梁等,2012;王挽琼等,2013),流体进入俯冲洋壳之上的地壳,发生交代作用,并使地壳物质部分熔融形成原始岩浆,随后岩浆继续演化并伴随一定程度的结晶分异作用,最终侵位成岩。

6.3　构造意义

该岩体区域构造位置上属于白乃庙岛弧,夹持于西拉木伦断裂和赤峰—白云鄂博断裂之间(图 1a),同时属于正镶白旗火山盆地正镶白旗破火山东南缘,该岩体形成于中二叠世,而该火山盆地的形成较晚,属于中生代火山活动产物,故岩体构造意义

与中生代火山活动关系不大。

该花岗岩为 I 型花岗岩,成岩平均温度为 814℃,属于偏低温花岗岩,其形成可能与流体的加入有关,反映了其形成构造背景极可能与板块俯冲作用有关(吴福元等,2007)。前文所述其地球化学特征也显示了其岩浆演化过程受到大洋板片俯冲有关的流体交代作用。且前文提到,该花岗岩属于高钾钙碱性系列,在微量元素原始地幔标准化图中明显亏损 Nb、Ta、P、Ti 而富集 Zr、Hf 等元素,进一步指示其可能形成于与岛弧和活动大陆边缘有关的构造背景。在 Y+Nb—Rb 构造判别图解(图 9a)中全部样品落入火山弧花岗岩区内,在 Y—Nb 构造判别图解(图 9b)中全部样品落在火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩区内,综合表明该岩体形成于板块俯冲接近尾声的活动大陆边缘弧环境,是古生代白乃庙岛弧的一部分。该岩体出露面积不大,但总体呈北东向展布(图 1a),与区域构造带方向一致。

该岩体侵位于 276.4±1.5 Ma,期间正镶白旗地区所在的白乃庙岛弧北缘处于活动陆缘弧环境,因此,对应的西伯利亚板块和华北板块北缘正在索伦缝合带发生碰撞缝合,且趋向尾声,指示研究区对应两大古板块在中二叠世期间正在缝合。该论断同众多学者认为两大板块碰撞缝合时限为二叠纪—三叠纪初的观点一致(王荃等,1986;孙德有等,2004;陈斌等,2011)。作为地质热点,古亚洲洋的演化和对应古板块的碰撞缝合问题近些年也取得了诸多进展。内蒙古四子王旗乌尔塔高勒碰撞后正长花岗岩侵位于 261±2 Ma(柳长峰等,2011);四子王旗格尔图白云母正长岩侵位于 238±6 Ma,形成于后造山构造环境(柳长峰等,2010);内蒙古西部甜水井地区龙脊山—神蛇岭岩体具有后造山特征,侵位于 267.1 Ma(贺峰等,2004);乌拉特中旗温更地区北七哥陶辉长岩形成于后碰撞的构造环境,侵位于 269 Ma(赵磊等,2011);乌拉特中旗二狼山岩体侵位于 270±8 Ma,形成于后碰撞构造环境(Luo Hongling et al., 2009);察哈尔右翼后旗红格尔图地区 I 型花岗岩侵位于 267.2~272.1 Ma,形成于后碰撞构造环境(蒋孝君等,2016);镶黄旗乌兰哈达碱长花岗岩侵位于后碰撞构造环境,形成时代为 265.1±1.5 Ma(蒋孝君等,2013);镶黄旗一带出露的具有后造山性质的 S 型花岗岩侵位于 275~262 Ma(洪大卫等,2007);苏左旗—锡林浩特构造带上发现的 A 型花岗岩侵位于 267±2 Ma,形成于造山期后的伸展环境(Shi Guanghai et al., 2004);锡林浩特地区双峰式火山岩形成于碰撞后的伸展环境,形成时间为 280 Ma(Zhang Xiaohui et al., 2008);本文研究岩体前呼和陶勒盖花岗岩体侵位于板块俯冲碰撞背景下的活动陆缘弧环境,侵位时代为 276.4±1.5 Ma。如上研究结果均指示,内蒙古中部地区西伯利亚板块和华北板块北缘在中二叠世期间碰撞缝合,并逐步完成碰撞作用。

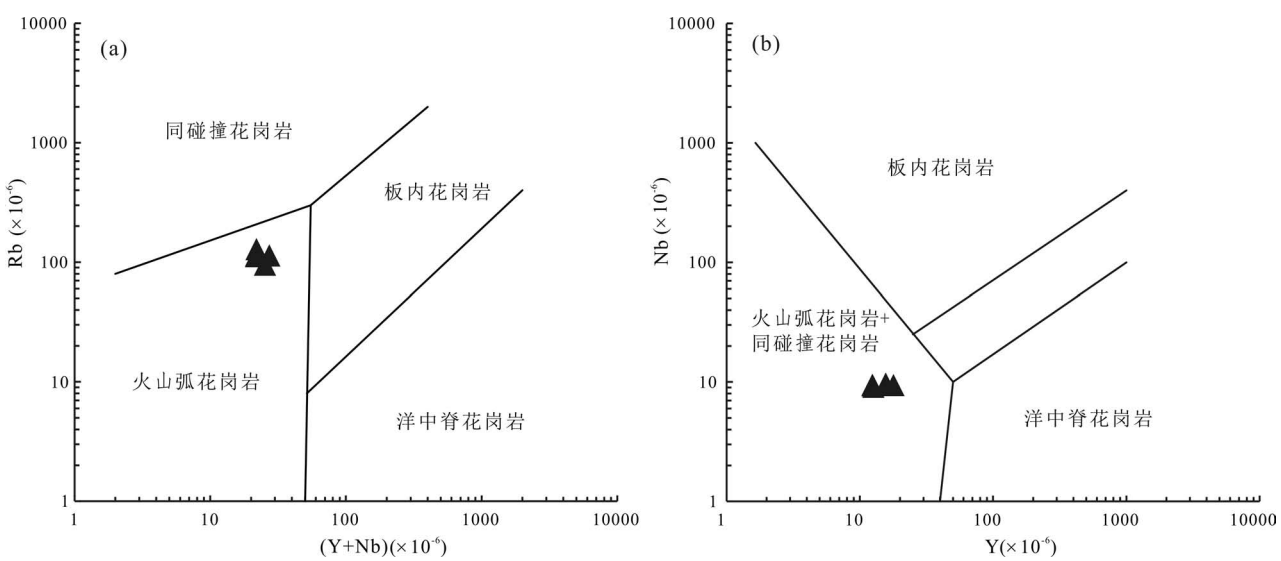


图 9 正镶白旗前呼和陶勒盖中细粒黑云母花岗岩的(Y+Nb)—Rb(a)和 Y—Nb(b)构造环境判别图解(据 Pearce et al., 1995)

Fig. 9 (Y+Nb)—Rb(a) and Y—Nb(b) diagrams of biotite granites in Qianhuhetaolegai of Zhengxiangbai Banner (after Pearce et al., 1995)

7　结论

（1）经详细的野外和显微镜下观察及岩石地球化学分析，基本排除了前人正镶白旗前呼和陶勒盖岩体为正长斑岩的论断，认为其为中细粒黑云母花岗岩。

（2）经 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究，正镶白旗前呼和陶勒盖岩体形成时代为 276.4 Ma±1.5 Ma（MSWD=1.5），属于中二叠世。

（3）正镶白旗前呼和陶勒盖岩体属于分异的 I 型花岗岩类，形成于俯冲背景下，中二叠世期间，其所属白乃庙岛弧北缘的正镶白旗地区属于活动陆缘弧环境；受古亚洲洋闭合演化影响，两侧西伯利亚板块和华北板块北缘持续碰撞缝合，并趋于结束，所以研究区内两大古板块碰撞缝合结束时间应不早于 276.4 Ma。

致谢：成文过程中得到了核工业二〇八大队地勘五处同志们的野外工作支持，实验测试得到了北京燕都中实测试技术有限公司的大力支持，文章修改得到了兰州大学地质科学与矿产资源学院讲师刘铮博士的建议，在此一并表示衷心的感谢！

参　考　文　献　/　References

（The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract）

陈斌. 2011. 内蒙古兴安地区二叠系沉积特征及构造背景. 导师：周洪瑞. 北京：中国地质大学（北京）硕士学位论文：30~53.

邓晋福，刘翠，冯艳芳，肖庆辉，狄永军，苏尚国，赵国春，段培新，戴蒙. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用：讨论与建议. 地质论评，61(4)：717~734.

邓晋福，罗照华，苏尚国，莫宣学，于炳松，赖兴运，谌宏伟. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京：地质出版社：155~187.

高秉璋，洪大卫，郑基俭，廖庆康，方宗斌. 1991. 花岗岩类 1∶5 万区域地质填图方法指南.北京：中国地质大学出版社：110~122.

韩吟文，马振东，张宏飞，张本仁，李方林，高山，鲍征宇. 2008. 地球化学. 北京：地质出版社：1~370.

贺锋，许立权，苏宏伟，李新仁. 2004. 内蒙古西部甜水井地区中二叠世 A 型花岗岩. 西北地质，37(3)：7~14.

洪大卫，王涛，童英. 2007. 中国花岗岩概述. 地质论评，53(增刊)：9~16.

蒋孝君，刘正宏，徐仲元，王挽琼，王兴安，张超. 2013. 内蒙古镶黄旗乌兰哈达中二叠世碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征. 地质通报，32(11)：1760~1768.

蒋孝君，刘正宏，徐仲元，薛伟，刻鹏兵，邢亚杰. 2016. 内蒙古中部红格尔图地区花岗岩的成因及构造背景——LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学的制约. 地质通报，35(5)：750~765.

康磊，校培喜，高晓峰，董曾产，过磊，奚仁刚. 2012. 西昆仑慕士塔格岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年：对古特提斯碰撞时限的制约. 地质论评，58(4)：763~774.

李怀坤，耿建珍，郝爽，张永清，李慧民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪（LA-MC-ICP MS）测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. 矿物学报，29(s1)：600~601.

柳长峰，杨帅师，武将伟，张华锋. 2010. 内蒙古中部四子王旗地区晚二叠—早三叠世过铝花岗岩定年及成因. 地质学报，84(07)：1002~1016.

柳长峰，周志广，张华锋，刘文灿，张磊. 2011. 内蒙古四子王旗乌尔塔高勒庙岩体的侵位时代及岩石地球化学特征. 矿物岩石，31(4)：34~43.

柳长峰. 2010. 内蒙古四子王旗地区古生代—早中生代岩浆岩带及其构造意义. 导师：万晓樵. 北京：中国地质大学（北京）博士学位论文：111~117.

路凤香，桑隆康，邬金华. 2002. 岩石学. 北京：地质出版社：1~399.

路远发. 2004. Geokit：一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. 地球化学，33(5)：459~464.

吕洪波，冯雪东，王俊，朱晓青，董晓朋，张海春，章雨旭. 2018. 狼山发现蛇绿混杂岩---华北克拉通与中亚造山带碰撞边界的关键证据. 地质论评，64(4)：777~805.

罗红玲，吴泰然，赵磊. 2010. 乌拉特中旗二叠纪 I 型花岗岩类地球化学特征及构造意义. 北京大学学报（自然科学版），46(5)：805~820.

马昌前，明厚利，杨坤光. 2004. 大别山北麓的奥陶纪岩浆弧：侵入岩年代学和地球化学证据. 岩石学报，20(3)：393~402.

内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京：地质出版社：351~458.

邱检生，肖娥，胡建，徐夕生，蒋少涌，李真. 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因：锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报，24(11)：2468~2484.

孙德有，吴福元，张艳斌，高山. 2004. 西拉木伦—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据. 吉林大学学报，34(2)：174~181.

汪相. 2018. 白云鄂博超大型稀土—铌—铁矿床的成矿时代及成因探析——兼论 P—T 之交生物群灭绝事件和"阿蒙兴造山运动". 地质论评，64(2)：299~345.

王德滋，刘昌实，沈渭洲，陈繁荣. 1993. 桐庐Ⅰ型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比. 岩石学报，9(1)：44~54.

王梁，郭晓东，贾丽琼，王治华，张延彦. 2012. 滇西马厂箐岩体暗色微粒包体岩相学特征及成因机制探讨. 地质与资源，21(3)：332~337.

王荃. 1986. 内蒙古中部中朝与西伯利亚古板块间缝合线的确定. 地质学报，1：33~45.

王挽琼，刘正宏，徐仲元，赵庆英，蒋孝君. 2013. 华北板块北缘中段早中二叠世的构造属性：来自花岗岩类锆石 U-Pb 年代学及地球化学的制约. 岩石学报，29(9)：2987~3003.

吴福元，李献华，杨进辉，郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报，23(6)：1217~1238.

肖娥，邱检生，徐夕生，蒋少涌，胡建，李真. 2007. 浙江瑶坑碱性花岗岩体的年代学、地球化学及其与构造指示意义. 岩石学报，23(6)：1431~1440.

张拴宏，赵越，刘建民，胡健民，宋彪，刘健，吴海. 2010. 华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景. 岩石矿物学杂志，29(6)：824~842.

赵江林，贺宁强，杜彪，曾忠诚，袁璋. 2017. 西昆仑奇台达坂一带晚三叠世中酸性侵入岩锆石 LA-ICP-MS 年龄、地球化学特征及其构造意义. 地质论评，63(5)：1337~1360.

赵磊，吴泰然，罗红玲. 2011. 内蒙古乌拉特中旗北七哥陶辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义. 岩石学报，27(10)：3071~3082.

Anderson T. 2002. Correction of common of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. Chemical Geology, 192: 59~79.

Bédard J H. 1999. Petrogenesis of boninites from the Betts Cove Ophiolite, Newfoundland, Canada: identification of subducted source components. Journal of Petrology, 40: 1853~1889.

Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types. Pacific Geology, 8: 173~174.

Chappell B W, White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. Australian Journal of Earth Sciences, 48: 489~499.

Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. Lithos, 46: 535~552.

Chen Bin. 2011&. Sedimentary characteristics and tectonic setting of the Permian in Xing'an Regin of Inner Mongolian Autonomous Region. Instructor: Zhou Hongrui. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) Master's thesis: 30~53.

Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015&. On the correct application in the common igneous petrlilgical diagrams: discussion and suggestion. Geological Review, 61(4): 717~734.

Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo, Mo Xuanxue, Yu Bingsong, Lai Xingyun, Chen Hongwei. 2004#. Rock genesis, tectonic setting and mineralization. Beijing: Geological Publishing House: 155~187.

DePaolo D J and Daley E E. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning duringcontinental extension. Chemical Geology, 169(1~2): 157~185.

Foley S F, Barth M G and Jenner G A. 2000. Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas. Geochim. Cosmochim. Acta, 64: 933~938.

Gao Bingzhen, Hong Dawei, Zheng Jiwei, Liao Qingkang, Fang Zongbin. 1991#. Guide to 1∶50,000 Regional Geological Mapping Methods for Granites. Beijing: China University of Geosciences Press: 110~122.

Han Yuwen, Ma Zhendong, Zhang Hongfei, Zhang Benren, Li Fanglin, Gao Shan, Bao Zhengyu.2008#. Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House: 1~370.

Harris N B W, Inger S. 1992. Trace element modelingof pelite-derived granites. Contributions to Mineralogy and Petrology, 110(1): 46~56.

Harrison T M, Grove M, Mckeegan K D. 1999. Origin and episodic emplacement of the Manaslu intrusive complex, central Himalayan. Journal of Petrology, 40: 3~19.

He Feng, Xu Liquan, Su Hongwei, Li Xinren. 2004&. Middle Permian A-type granite in the sweet water well area of western Inner Mongolia. Northwest Geology, 37(3): 7~14.

Hong Dawei, Wang Tao, Tong Ying. 2007&. Overview of Chinese granite. Geological Review, 53 (Supplement): 9~16.

Inner Mongolia Autonomous Region Geology and Mineral Resources Bureau. 1991 #. Inner Mongolia Autonomous Region Regional Geology. Beijing: Geological Publishing House: 351~458.

Jahn Bor-ming, Wu Fuyuan, and Chen Bin. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic, Trans. R. Soc. Edinburgh, Earth Sci., 91(1~2), 181~193.

Jiang Xiaojun, Liu Zhenghong, Xu Zhongyuan, Wang Wanqiong, Wang Xing'an, Zhang Chao. 2013&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Wulanhada middle Permian alkali-feldspar granites in Xianghuang Banner, central Inner Mongolia, and its geochemical characteristics. Geological Bulletin, 32(11): 1760 ~1768.

Jiang Xiaojun, Liu Zhenghong, Xu Zhongyuan, Xue Wei, Yan Pengbing, Xing Yajie. 2016&. Petrogenesis and tectonic setting of the granites in Honggeertu area, central Inner Mongolia: Constraints from LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and geochemistry. Geology Bulletin, 35(5): 750~765.

Kang Lei, Xiao Peixi, Gao Xiaofeng, Dong Zengchan, Guo Lei, Qi Rengang. 2012&. LA-ICP-MS U-Pb dating of the zircon from Muztagata pluton in western Kunlun orogenic: constraints on the time of Paleotethys' collision. Geological Review, 58(4): 763~774.

Lü hongbo, Feng Xuedong, Wang Jun, Zhu Xiaoqing, Dong Xiaopeng, Zhang Haichun, Zhang Yuxu. 2018&. Ophiolitic Mélanges found in mount Langshan as the crucial evidence of collisional margin between North China Craton and Central Asian Orogenic Belt. Geological Review, 64(4):777~805.

La Fleche M R, Camire G and Jenner G A. 1998. Geochemistry of post-Acadian, Carboniferous continental intraplate basalts from the Maritimes Basin, Magdalen Islands, Quebec, Canada. Chemical Geology, 148(3~4): 115~136.

Li Huaikun, Gen Jianzhen, Hao Shuang, Zhang Yongqing, Li Huimin. 2009#. Determination of zircon U-Pb isotopic age by laser ablation multi-receiver plasma mass spectrometry (LA-MC-ICP MS). Acta Mineralogica Sinica, 29(s1) : 600~601.

Liu Changfeng, Yang Shuaishi, Wu Jiangwei, Zhang Huafeng. 2010&. Dating and Petrogenesis of Late Permian—Early Triassic Peraluminous granites in the Siziwangqi area, Inner Mongolia. Chinese Journal of Geology, 84(07): 1002~1016.

Liu Changfeng, Zhou Zhiguang, Zhang Huafeng, Liu Wencan, Zhang Lei. 2011&. Petrochemical characteristics and timing of wuertagaolemiao granitoids, Siziwangqi, Inner Mongolia. Mineral Rock, 31(4): 34~43.

Liu Changfeng. 2010&. Paleozoic—Early Mesozoic magmatic belts and tectonic significance in Siziwangqi area, Inner Mongolia. Instructor: Wan Xiaoqiao. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) PhD. thesis: 111~117.

Lu Fengxiang, Sang Longkang, Jin Jinhua. 2002#. Petrology. Beijing: Geological Publishing House: 1~399.

Lu Yuanfa. 2004&. Geokit: a geochemical toolkit for microsoft excel. Geochemistry, 33(5): 459~464.

Ludwig K R. 1991. Isoplot——A plotting and regression program for radio-genic-isotope date. US Geological Survey Open-File Report, 39: 91~445.

Luo Hongling, Wu Tairan, Zhao Lei, et al. 2009. Permian High Ba—Sr Granitoids: Geochemistry, Age and Tectonic Implications of Erlangshan Pluton, Urad Zhongqi, Inner Mongolia. Acta Geologica Sinica (English Edition), 83(03): 603~614.

Luo Hongling, Wu Tairan, Zhao Lei. 2010&. Geochemistry and tectonic Implications of the Permian I type granitoids from Urad Zhongqi, Inner Monglia. Journal of Peking University (Natural Science), 46(5): 805~820.

Ma Changqian, Ming Houli, Yang Kunguang. 2004&. An Ordovician magmatic arc at the northern foot of Dabie Mountains: Evidence from geochronology and geochemistry of intrusive rocks. Acta Petrologica Sinica, 20(3): 393~402.

Miao Laicheng, Fan Weiming, Liu Dunyi, Zhang Fuqing, Shi Yuruo and Guo Feng. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia - Daxinganling orogenic belt, China: Journal of Asian Earth Sciences, 32: 348~370.

Miller C F, Mc Dowell S M, Mapes R W. 2003. Hot and cold granites, Implication of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. Geology, 31: 529~532.

Pearce J A, Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. ANNU. Rev. Sci., 23: 251~285.

Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong, Li Zhen. 2008&. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes. Acta Petrologica Sinica, 24(11): 2468~2484.

Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang Fuqing, Jian Ping, Fan Weiming and Liu Dunyi. 2004. Emplacement age and tectonic implications of the Xilinhot A-type granite in Inner Mongolia, China. Chinese Science Bulletin, 49(7): 723~729.

Smith R E, Smith S E. 1976. Comments on the use of Ti, Zr, Y, Sr, K, P and Nb in classification of basaltic magmas. Earth and Planetary Science Letters, 32: 114~120.

Song Dongfang, Xiao Wenjiao, Windley B F, Han Chunming and Tian Zhonghua. 2015. A Paleozoic Japan-type subduction—accretion system in the Beishan orogenic collage, southern Central Asian orogenic belt: Lithos, 224~225: 195~213.

Sun Deyou, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, Gao Shan. 2004&. The final closing time of the west Lamulun River—Changchun—Yanji plate suture zone—Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province. Journal of Jilin University, 34(2): 174~181 .

Treuil M, Joron J L. 1975. Utilisation des elements hydromagmatophiles pour la simplification de la modelisation quantitative desprocesses magmatiques. Exemples de Lpafar et de la dorsale medioatlantique. Society of Italia Mineralogy and Petrology, 31: 125~174.

Wang Dezi, Liu Changshi, Shen Weizhou, Chen Fanrong. 1993&. The contrast between Tonglu I - type and Xiangshan S - type clastopophyritic lava. Acta Petrologica Sinica, 9(1): 44~54.

Wang Liang, Guo Xiaodong, Jia Liqiong, Wang Zhihua, Zhang Yanyan. 2012&. Petrography and genesis of the dark microgranular enclaves in the Machangqing intrusice body, western Yunnan Province. Geology and Resources, 21(3): 332~337.

Wang Quan. 1986#. Determination of the suture between the ancient sorghum and the Siberian ancient plate in central Inner Mongolia. Chinese Journal of Geology, 1: 33~45.

Wang Wanqiong, Liu Zhenghong, Xu Zhongyuan, Zhao Qingying, Jiang Xiaojun. 2013&. Early—Middle Permian tectonic evolution of the central—northern margin of the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the granitoid rocks. Acta Petrologica Sinica, 29(9) : 2987~3003.

Wang Xiang. 2018&. Analysis on the oreforming time and genesis of the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit: With a discussion on the mass extinction at the P—T boundary and "AMH Orogeny". Geological Review, 64(2):299~345.

Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth Planet. Sci. Lett., 64: 295~304.

Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407~419.

William I S, Buick A, 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.

Windley B F, Alexeiev D, Xiao Wenjiao, Kröner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Bel. Journal of the Gelolgical Society of London, 164(12): 31~47.

Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007&. Discussions on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217~1238.

Xiao E, Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong, Hu Jian, Li Zhen. 2007&. Geochronology and geochemistry of the Yaokeng alkaline granite pluton in Zhejiang Province: Petrogenetic and tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1431~1440.

Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie and Zhai Mingguo. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian orogenic belt: Tectonics, 22: 1069.

Xiao Wenjiao, Windley B F, Sun Shu, Li Jiliang, Huang Baochun, Han Chunming, Yuan Chao, Sun Min and Chen Hanlin. 2015, A tale of amalgamation of three Permo—Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 43: 477~507.

Xu Bei, Charvet J, Chen Yan, Zhao Pan, and Shi Guanzhong. 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt: Gondwana Research, 23: 1342~1364.

Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, Hu Jianmin, Song Biao, Liu Jian, Wu Hai. 2010&. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic—Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China block: A preliminary review. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 824~842.

Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Tang Yanjie. 2008. Geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from central Inner Mongolia, North China: implication for tectonic setting and Phanerozoic continental growth in Central Asian Orogenic Belt. Chemical Geology, 249: 262~281.

Zhao Jianglin, He Ningqiang, DuBiao, Zeng Zhongcheng, Yuan Zhang. 2017&. LA-ICP-MS Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics of Late Triassic Intermediate—Acid intrusive rocks in Qitaidaban area, Western Kunlun and their tectonic significance. Geological review, 63(5): 1337~1360.

Zhao Lei, Wu Tairan, Luo Hongling. 2011&. SHRIMP U-Pb dating, geochemistry and tectonic implications of the Beiqigetao gabbros in Urad Zhongqi area, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 3071~3082.

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages, Geochemical Characteristics of Middle Permian Qianhuhetaolegai Granite in Zhengxiangbai Banner, Inner Mongolia and Their Tectonic Significances

PENG Yunbiao, JIANG Xiaojun, YAN Pengbing, DAI Mingjian, XING Yajie

Geological Survey No. 208, *China National Nuclear Corporation*, *Baotou*, *Inner Mongolia*, 014000

Objectives: There are abundant magmatic rocks in the south of the Central Asian orogenic belt, recording the

Neoproterozoic to Permian subduction of the Paleo-Asian ocean. However, there is still no uniform understanding of the final closing time. Based on the study of Qianhuhetaolegai intrusion in the Bainaimiao island arc, this paper provides a further constraint for determining the time limit.

Methods: Five fresh samples were collected for analyzing the whole-rock main and trace elements in Qianhuhetaolegai of Zhengxiangbai Banner. One sample was selected to carry out the zircon U-Pb dating study by LA-ICP-MS method.

The determination of major elements, trace elements and rare earth elements in chemical analysis samples was completed in the laboratory of Beijing Yanduzhongshi Testing Technology Co., Ltd. The sample was pretreated by digestion method, and the content of trace rare earth elements in whole rock was determined by inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) M90. The precise analysis of the main elements of rock was carried out by XRF fluorescence spectrometer melting method.

The test was performed using LA-Q-ICP-MS. The laser ablation system was New Wave UP213 and ICP-MS was Bruker M90. The zircon dating area was selected according to zircon photomicrography, and the diameter of the ablation spot was selected to be 30 μm. The isotope ratio correction was performed using the Andersen method. The U-Pb age, Pb isotope ratio and trace element content in zircon dating were processed using the ICP-MS DataCal program, and the weighted mean age calculation and mapping were performed using the Isoplot program.

Results: Based on the study of the field occurrence characteristics, microscopic characteristics, geochemistry characteristics and chronological characteristics of the intrusion, the lithology and rock types were identified in detail, its emplacement age was determined, and its origin and tectonic background were discussed. Zircons collected from the intrusion exhibit zone texture and have high Th/U ratios of 0.37 to 0.69, consistent with magmatic zircons. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating revealed that the intrusion was emplaced in the middle Permian (276.4±1.5Ma). All the samples are enriched in SiO_2(70.99% to 71.78%), alkalis contents (7.32% to 8.08%), with high K_2O/Na_2O ratios (0.73 to 0.95). They are enriched in LREEs relative to HREEs, with $(La/Yb)_N$ = 11.89 to 13.59 and slightly negative Eu anomalies of 0.69 to 0.76. All the samples are relatively enriched in LILEs (e.g., K and Rb) and depleted in HFSEs (e.g., Nb, Ta, P and Ti).

Conclusions: The Qianhuhetaolegai biotite granite was emplaced in the middle Permian. The Elemental data suggest that the intrusion belongs to I-type granite and was derived by partial melting of crustal source induced by subducted slab-released fluids. Thus, the intrusion was likely emplaced in an active continental margin. We consider that the final collision between two paleo-plates in the study area should not be earlier than 276.4 Ma.

Keywords: granites; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; geochemistry; Middle Permian; Paleo-Asian Ocean; Zhengxiangbai Banner, Inner Mongolia

Acknowledgemengts: In the process of writing, we got the support of the field work from the 5th geoexploration department, Geological Survey No. 208, China National Nuclear Corporation. The test has got the strong support of Yanduzhongshi geological analysis laboratories Ltd. The revision of the article was approved by Dr. Liu Zheng, a lecturer at the College of Geology and Mineral Resources of Lanzhou University. Thank you sincerely here.

First author: PENG Yunbiao, male, doctor, Professor senior engineer, born in 1965, Uranium geology major, Mainly engaged in the study of uranium geology. Email: 208y@bog.com.cn

Manuscript received on:2018-04-03;Accepted on: 2018-08-22; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.06.006