

doi: 10.12029/gc20160605

杨俊泉, 刘永顺, 张素荣, 等. 内蒙古东乌旗宾巴勒查干三叠纪两次岩浆活动: 年代学记录、岩石成因及构造背景[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 1913–1931.

Yang Junquan, Liu Yongshun, Zhang Surong, et al. Two Triassic magmatic activities in Binbalechagan area of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia: Geochronologic record, petrogenesis and tectonic settings[J]. *Geology in China*, 2016, 43(6): 1913–1931(in Chinese with English abstract).

内蒙古东乌旗宾巴勒查干三叠纪两次岩浆活动: 年代学记录、岩石成因及构造背景

杨俊泉^{1,2} 刘永顺² 张素荣² 杨永恒³ 张 锋² 戎 合⁴

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;
3. 中油辽河油田分公司, 辽宁 盘锦 124010; 4. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要:内蒙古东乌旗宾巴勒查干分布有大面积三叠纪花岗岩,是研究中亚造山带中东部早中生代构造演化的有利地区。在区域地质调查的基础上,利用同位素年代学在该区识别出三叠纪两期侵入岩:中三叠世二长花岗岩类(238~230 Ma)和晚三叠世正长花岗岩类(223~215 Ma)。采用矿物化学、岩石地球化学等方法对两类侵入岩进行了研究:前者中黑云母为镁质黑云母,岩石以高硅、富钾、过铝、钙碱性为特征,稀土元素中轻稀土相对富集、具明显的负Eu异常,微量元素以相对富集大离子亲石元素、具明显的Ba负异常为特征,地球化学特征介于I型和A型花岗岩之间;后者中黑云母由镁质黑云母向铁质黑云母转变,岩石以高硅、富碱、富钾、弱过铝为特征,稀土、微量元素特征与前者相似,但稀土总量相对较低,Eu、Ba的负异常程度更大,属A型花岗岩。二者可能源于年轻幔源组分形成下地壳的部分熔融。结合区域资料分析,研究区三叠纪侵入岩形成于古亚洲洋闭合背景下,中三叠世时可能处于后造山伸展背景,晚三叠世可能为板内构造背景。

关键词:SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄;地球化学特征;三叠纪花岗岩;构造背景;东乌旗;中亚造山带
中图分类号:P588.12¹~2 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)06-1913-19

Two Triassic magmatic activities in Binbalechagan area of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia: Geochronologic record, petrogenesis and tectonic settings

YANG Jun-quan^{1,2}, LIU Yong-shun², ZHANG Su-rong²,
YANG Yong-heng³, ZHANG Feng², RONG He⁴

(1. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 2. *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China*; 3. *Liaoh Oilfield of CNPC, Panjin 124010, Liaoning, China*; 4. *Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China*)

收稿日期:2015-09-19;改回日期:2015-11-25

基金项目:中国地质调查项目“内蒙古1:5万敖包查干幅、多钦乌拉幅、宾巴勒查干幅、满都胡宝力格幅、1252高地幅区调”(1212010881218)和“华北地区地质矿产调查评价进展跟踪与工作部署研究”(1212011220844)联合资助。

作者简介:杨俊泉,男,1980年生,高级工程师,博士,矿物学、岩石学、矿床学专业,主要从事花岗岩成因与成矿学研究;
Email:dap-yangjunquan@163.com。

Abstract: Triassic intrusive rocks (TIRs) are widespread in Binbalechagan area of Dong Ujimqin Banner in Inner Mongolia, and hence this area has advantage of studying Early Paleozoic evolution of central-east segment of Central Asia Orogenic Belt (CAOB). Based on regional geological survey, the authors recognized two Triassic magmatic activities by evidence from geochronology: mid-Triassic adamellites (with isotope ages of 238–230 Ma) and late-Triassic syenogranites (with isotope ages from 223 to 215 Ma). The former rocks whose geochemical features are between I-type and A-type granites are characterized by magnesia biotite, high silicon, rich K, peraluminum and calc-alkaline nature, abundant light rare earth elements and large ion lithophile elements, and significant negative Eu and Ba anomalies. However, the latter rocks belong to A-type granites and are characterized by high silicon, enriched alkali, abundant K and, weak peraluminum nature. Otherwise, total REE in the latter is lower, and negative anomaly degrees of Eu and Ba in the latter are more obvious than those of the former. These TIRs probably originated from partial melting of the lower crust which consisted of newly derived mantle. In combination with regional information, it can be concluded that the TIRS was formed after the closure of the Paleo-Asian Ocean. In mid-Triassic, the study area probably was in post-orogenic background, and hence this area was mainly in an intraplate tectonic setting in late Triassic.

Key words: SHRIMP U–Pb dating; geochemical characteristics; Triassic granites; tectonic setting; Dong Ujimqin Banner; CAOB

About the first author: YANG Jun-quan, male, born in 1980, senior engineer, doctor, mainly engages in the study of genesis and mineralization mechanism of granitoids. E-mail: dap-yangjunquan@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 1212010881218 & 1212011220844).

作为全球最大增生型造山带之一^[1],中亚造山带以其巨大的科学意义和丰富的矿产资源而引人关注^[2]。对中亚造山带的研究不仅有助于理解该区构造演化,还将提升增生造山过程的认识。中生代的构造背景是该区争论焦点之一,目前较为主要的观点有:①同造山构造背景,包含俯冲^[3]、后碰撞^[1,4–5];②后造山或板内构造背景^[6–12]。李锦轶等^[13]则认为早中三叠纪、晚三叠纪形成于不同的构造背景,前者以碰撞造山作用演化晚期的区域性挤压为主,后者以造山带演化晚期区域性伸展为主。出现这些争议的原因,很可能是因为中亚造山带不同地区三叠纪的构造演化也存在差异^[14–16]。

二连—东乌旗位于中亚造山带中东段(图1-a),构造位置处于古亚洲域和滨太平洋域叠加部位^[17],其内发育有大量岩浆岩,就位时代几乎囊括了晚古生代至晚中生代的各个时期^[18–20],是研究中亚造山带构造演化的重要地区。宾巴勒查干分布有二连—东乌旗地区面积最大的三叠纪侵入岩,是研究该区早中生代构造演化的有利对象,笔者等依托1:50000区域地质调查工作,对其进行了详细的调查,根据新获得的年代学资料,在其中识别出了两期岩浆活动,并对其矿物化学、地球化学进行了研究,以期中亚造山带中东段三叠纪构造演化研究提供新的资料。

1 地质概况

宾巴勒查干地区的三叠纪侵入岩总体沿北东

向呈不规则带状展布,向北东延至蒙古国境内,境内出露总面积逾170 km²(图1-b)。其主要围岩有泥盆系安格尔音乌拉组、三叠系哈达陶勒盖组及侏罗系满克头鄂博组,岩体侵入前两者中,被后者不整合覆盖,此外,该期岩体还被侏罗纪花岗斑岩侵入。主要接触证据为:该期岩体与泥盆系安格尔音乌拉组的外接触带多见角岩化接触变质;三叠系哈达陶勒盖组宏观上呈捕虏体状包裹于三叠纪侵入岩中(图1-b),路线调查中见该期岩体内相邻的两个哈达陶勒盖组安山岩捕虏体产状不一致(图2);野外在地势相对较高的部位,多见侏罗系满克头鄂博组火山岩不整合覆盖于三叠纪岩体之上;侏罗纪花岗斑岩局部呈岩枝状侵入三叠纪花岗岩中。

泥盆系安格尔音乌拉组岩石类型主要为正常沉积的一套海相碎屑岩,下部碎屑较粗,上部为细碎屑岩夹硅质岩;三叠系哈达陶勒盖组主要为一套中性火山岩、火山碎屑岩、碎屑岩沉积建造,岩性有灰绿色安山岩、杏仁状安山岩、玄武安山岩及安山质集块熔岩及火山角砾岩等;侏罗系满克头鄂博组主要为陆相火山碎屑岩沉积,岩性主要为流纹质熔结凝灰岩、流纹质含角砾凝灰岩,含少量流纹岩。

宾巴勒查干三叠纪侵入岩中主要造岩矿物为石英、钾长石、斜长石,暗色矿物均以黑云母为主,但岩体内主要矿物含量、结构构造等并不均一,其按成分可分为二长花岗岩类及正长花岗岩类。前者主要为粗中粒二长花岗岩,后者按侵入序次由早

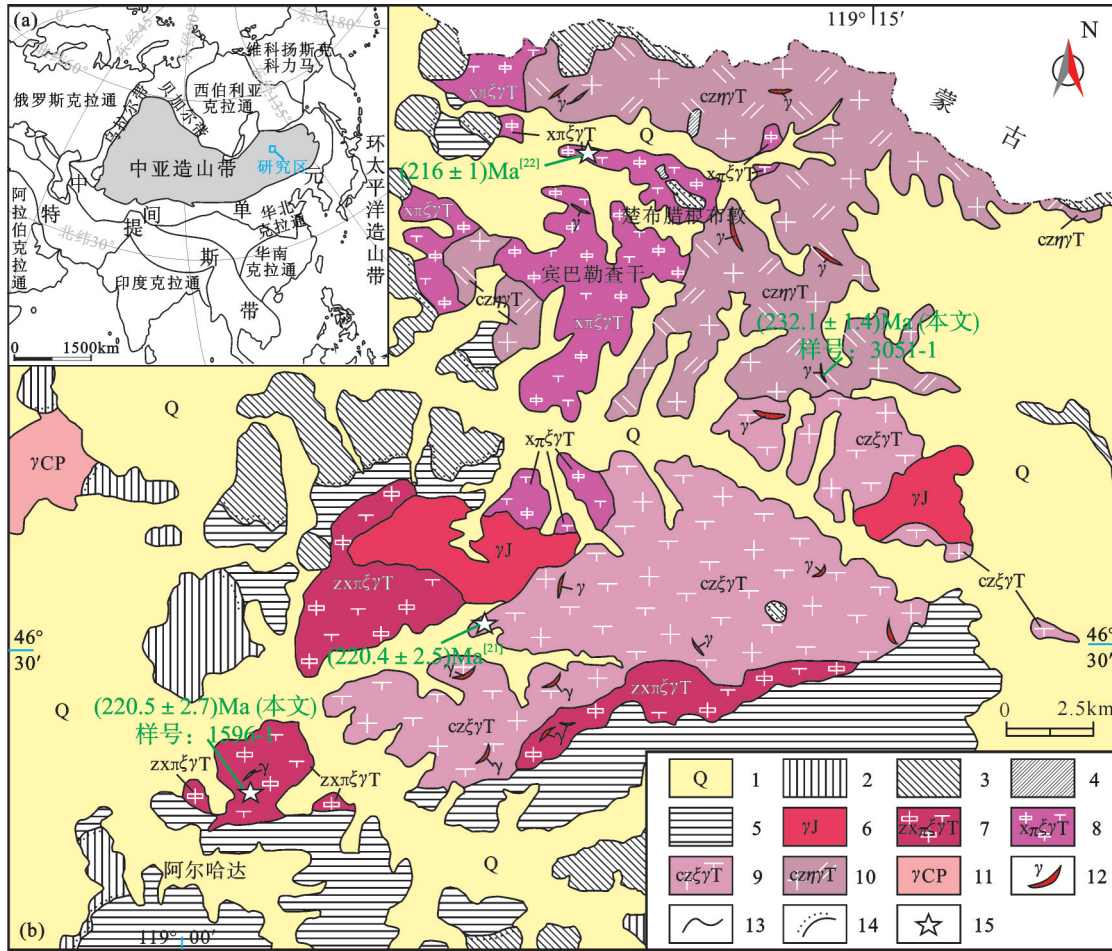


图1 内蒙古东乌旗宾巴勒查干一带地质简图示三叠纪侵入岩的分布

a—底图据文献[1]修改;b—据①②修改

1—第四系;2—白垩系;3—侏罗系;4—三叠系;5—泥盆系;6—侏罗纪侵入岩;7—三叠纪中细粒似斑状正长花岗岩;8—三叠纪细粒似斑状正长花岗岩;9—三叠纪粗中粒正长花岗岩;10—三叠纪粗中粒二长花岗岩;11—石炭—二叠纪侵入岩;12—脉岩;13—侵入界线或第四系界线;14—角度不整合界线;15—同位素样品采集点。图中7~10为本文的研究对象

Fig. 1 Sketch geological map of Binbalechagan area in Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, showing distribution of Triassic intrusive rocks

a—Reproduction modified after reference [1]; b— modified after reference ①②

1—Quaternary; 2—Cretaceous; 3— Jurassic; 4—Triassic; 5— Devonian; 6—Jurassic intrusive rocks; 7—Triassic medium-fine grained porphyry syenogranite; 8—Triassic fine grained porphyry syenogranite; 9—Triassic coarse-medium grained syenogranite; 10— Triassic coarse-medium grained adamallite; 11—Carboniferous - Permian intrusive rocks; 12—Veins; 13—Intrusive boundary or boundary between Quaternary and other rocks; 14—Angular unconformity; 15—Isotope sampling site. No. 7~10 above are the objects of this study

到晚分别为:粗中粒正长花岗岩、细粒似斑状正长花岗岩、中细粒似斑状正长花岗岩。需要说明的是,正长花岗岩类侵入序次的建立基于以下两点:

①野外见有中细粒似斑状正长花岗岩呈岩枝状侵入粗中粒正长花岗岩(图3);②根据粒径较大岩浆岩所需结晶时间也越长,推测细粒似斑状正长花岗

①杨俊泉,滕学建,程银行,等. 内蒙古1:5万敖包查干幅(L50E008020)、多钦乌拉幅(L50E009020)、宾巴勒查干幅(L50E009021)、满都胡宝力格幅(L50E010020)、1252高地幅(L50E010021)区调报告[R].天津:中国地质调查局天津地质调查中心,2013.

②胡醒民,孟宪锋,陈英富,等. 内蒙古1:5万辉音敖包(L50E009022)、达勒廷查干(L50E009023)、固腊卜赛罕敖包(L50E010022)、乌兰哈德农场(L50E010023)幅区调报告[R].河北:河北省区域地质矿产调查研究所,2012.

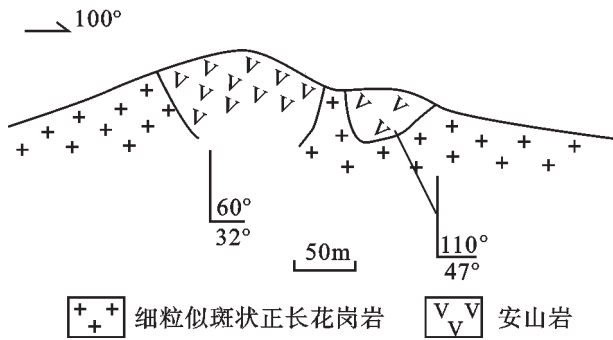


图2 三叠纪细粒似斑状正长花岗岩侵入三叠系哈达陶勒盖组安山岩

Fig. 2 Triassic fine grained porphyry syenogranite that intruded into andesites of Triassic Hadataolegai Formation

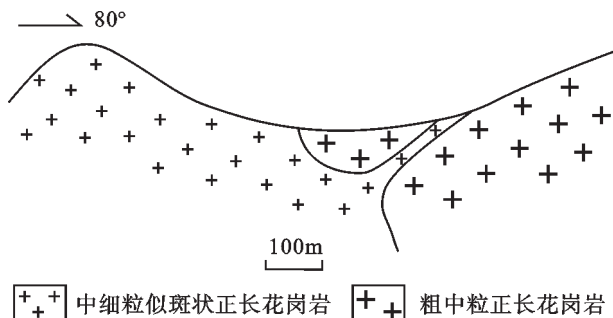


图3 三叠纪中细粒似斑状正长花岗岩侵入三叠纪粗中粒正长花岗岩

Fig. 3 Triassic medium-fine grained porphyry syenogranite that intruded into Triassic coarse-medium grained syenogranite

岩形成早于中细粒似斑状正长花岗岩。

2 样品特征及分析方法

2.1 样品特征

野外避开蚀变带、断裂破碎带等,采集新鲜样品经室内岩矿鉴定后,选择代表性样品用于分析测试。本次用于同位素测试的样品共2件,用于电子探针分析的样品共7件,用于岩石全分析样品共20件。其中,用于锆石U-Pb定年的2件样品分别采自中细粒似斑状正长花岗岩(样号:1596-1)、粗中粒二长花岗岩中的细粒正长花岗岩脉(样号:3051-1),GPS地理坐标位置分别为:119°01'40"E,46°27'52"N;119°12'58"E,46°35'13"N(图1-b)。

2.2 分析方法

测年采用锆石SHRIMP U-Pb法(离子探针质谱法)。

锆石分选由河北省廊坊区域地质调查所实验室完成:用水清洗样品、粉碎至200目后,先后经用水粗淘、强磁分选、电磁分选和酒精细淘,再用实体显微镜手工挑选锆石。锆石制靶在天津地质矿产研究所同位素实验室完成,测年前在北京离子探针中心完成了透射光、反射光、阴极发光照相等的拍摄。锆石SHRIMP U-Pb测试在中国地质科学院北京离子探针中心完成,测年方法见张艳飞等^[23]、杨俊泉等^[24],用于校正U含量的标准锆石为SL13($U=238\times 10^{-6}$),TEM($t=417\text{ Ma}$)用于校正年龄,TEM和待测样之比为1:3~1:4。

黑云母矿物成分分析共计两批次:粗中粒二长花岗岩中的黑云母成分在大陆构造与动力学国家重点实验室测定,采用JXA-8100型电子探针仪,加速电压15 kV,电子束流20 nA,电子束斑直径为5 μm ;其余岩石类型中的黑云母成分在中国科学院地质与地球物理研究所进行,采用的电子探针仪型号也是JXA-8100,加速电压为15 kV、电子束流为10 nA、电子束斑直径5 μm 。

岩石全分析样品由河北省区域地质矿产调查研究所实验室测试:主量元素、Zr用Axios^{max} X射线荧光光谱仪测试,执行标准按GB/T 14506.28-2010,精度优于2%~3%;LOI用P1245电子分析天平测定,执行标准DZG20-1;稀土元素、微量元素用X Serise2等离子体质谱仪(ICP-MS)测试,按GB/T 14506.30-2010标准执行,当元素含量 $>10\times 10^{-6}$ 时,其精度优于5%,当元素含量 $<10\times 10^{-6}$ 时,精度优于10%。

3 分析结果

3.1 SHRIMP 锆石U-Pb测年结果

本次共进行了2个同位素样品的测定,测试结果见表1。

样品3051-1采自粗中粒二长花岗岩中的细粒正长花岗岩脉:所测锆石的CL图像整体发暗(图4-a),这与其相对较高的U、Th含量相对应;锆石粒径较大,形态较为简单,均为自形-半自形柱状,长宽比多数为2:1~4:1,少数可达5:1~6:1(测点3.1所在锆石),振荡环带发育,Th/U为0.43~2.48,显示岩浆成因锆石特征;对29个锆石进行了同位素测定,4个点偏离谐和线,可能为不同程度的铅丢失造成,其余25个测点均落在谐和线附近,加权平均值(232.1

表1 内蒙古东乌旗宾巴勒查干三叠纪侵入岩锆石U-Pb测试结果

Table 1 Zircon U-Pb isotope data of Triassic intrusive rocks from Binbalechagan, Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia

点号	含量/10 ⁻⁶			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma			
	²⁰⁶ Pb*	U	Th		²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb* ±%	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U ±%	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U ±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb					
粗中粒二长花岗岩中的细粒正长花岗岩脉(3051-1)														
1.1	47	1196	668	0.56	0.0516	1.27	0.2634	1.32	0.0370	0.96	234	±2	270	±29
2.1	100	2166	2828	1.31	0.0973	1.14	0.4874	1.16	0.0363	0.81	230	±2	1574	±21
3.1	49	1138	1153	1.01	0.0522	1.26	0.2618	1.31	0.0364	0.97	230	±2	295	±29
4.1	41	728	1803	2.48	0.0792	3.09	0.3963	3.78	0.0363	1.43	230	±3	1177	±61
5.1	32	768	1127	1.47	0.0536	1.93	0.2664	2.03	0.0361	0.88	228	±2	354	±44
6.1	60	1523	1069	0.70	0.0516	1.09	0.2597	1.25	0.0365	0.88	231	±2	266	±25
7.1	68	1669	1355	0.81	0.0516	1.17	0.2612	1.28	0.0367	0.77	232	±2	267	±27
8.1	62	1507	1156	0.77	0.0539	1.09	0.2747	1.19	0.0370	1.40	234	±3	365	±25
9.1	63	1498	1475	0.98	0.0662	1.26	0.3285	1.28	0.0360	0.81	228	±2	812	±26
10.1	57	1461	1061	0.73	0.0506	1.02	0.2553	1.13	0.0366	1.02	232	±2	224	±24
11.1	41	986	928	0.94	0.0523	1.56	0.2635	1.95	0.0365	1.17	231	±3	300	±36
12.1	88	2182	1537	0.70	0.0532	1.07	0.2692	1.09	0.0367	1.15	232	±3	339	±24
13.1	39	952	1465	1.54	0.0657	1.49	0.3222	1.66	0.0356	0.86	225	±2	796	±31
14.1	47	1264	962	0.76	0.0524	2.09	0.2573	2.20	0.0356	0.75	226	±2	302	±48
15.1	63	1702	733	0.43	0.0517	0.91	0.2634	0.99	0.0370	0.86	234	±2	271	±21
17.1	46	1062	1089	1.03	0.0529	2.70	0.2620	3.33	0.0359	1.09	228	±2	323	±61
18.1	28	702	562	0.80	0.0531	1.58	0.2696	1.63	0.0368	0.82	233	±2	333	±36
19.1	48	1178	999	0.85	0.0533	1.27	0.2726	1.34	0.0371	0.81	235	±2	342	±29
20.1	71	1684	2020	1.20	0.0526	1.12	0.2617	1.41	0.0361	1.01	229	±2	310	±25
21.1	53	1288	1250	0.97	0.0519	1.10	0.2628	1.14	0.0368	0.95	233	±2	279	±25
22.1	45	1044	1138	1.09	0.0518	1.23	0.2593	1.30	0.0363	0.83	230	±2	276	±28
23.1	49	1155	1072	0.93	0.0520	1.11	0.2634	1.19	0.0367	0.84	233	±2	284	±25
24.1	90	2221	1331	0.60	0.0519	0.84	0.2688	0.90	0.0375	0.86	238	±2	281	±19
25.1	43	1084	819	0.76	0.0529	1.81	0.2644	1.92	0.0362	0.81	229	±2	327	±41
26.1	46	880	1555	1.77	0.0530	1.58	0.2736	1.62	0.0374	0.77	237	±2	330	±36
27.1	44	1084	625	0.58	0.0524	1.19	0.2718	1.24	0.0377	0.95	238	±2	301	±27
28.1	58	1311	1182	0.90	0.0510	1.27	0.2627	1.29	0.0374	0.97	237	±2	240	±29
29.1	76	1809	2158	1.19	0.0527	1.00	0.2610	0.98	0.0359	0.97	228	±2	315	±23
30.1	31	759	496	0.65	0.0516	1.40	0.2670	1.51	0.0375	1.14	237	±3	269	±32
中细粒似斑状正长花岗岩(1596-1)														
1.1	18.1	612	443	0.75	0.0525	2.6	0.2493	3.2	0.03447	1.8	218.5	±3.9	305	±60
1.2	14.5	475	636	1.38	0.0494	2.9	0.2415	3.5	0.03547	1.9	224.7	±4.2	166	±68
2.1	18.9	653	352	0.56	0.0507	3.4	0.2348	3.8	0.03359	1.8	213.0	±3.8	227	±78
3.1	46.3	1825	952	0.54	0.04968	1.3	0.2022	2.2	0.02952	1.8	187.5	±3.3	180	±30
4.1	7.08	241	178	0.76	0.0522	5.0	0.245	5.4	0.03406	2.1	215.9	±4.4	294	±110
5.1	4.63	149	104	0.72	0.0534	3.9	0.266	4.4	0.03608	2.1	228.5	±4.8	346	±88
6.1	1.96	64	45	0.74	0.0393	13	0.190	14	0.0350	5.5	222	±12	-396	±330
7.1	3.41	111	114	1.06	0.0498	7.0	0.244	7.4	0.03556	2.3	225.2	±5.0	187	±160
8.1	6.37	208	160	0.79	0.0470	3.8	0.2298	4.3	0.03543	2.1	224.4	±4.6	52	±90
9.1	5.32	183	316	1.78	0.0524	4.1	0.242	4.7	0.03351	2.4	212.5	±5.0	304	±93
10.1	6.29	205	195	0.98	0.0486	4.5	0.238	4.9	0.03557	2.0	225.3	±4.5	127	±110
11.1	13.7	475	258	0.56	0.0508	3.0	0.2349	4.0	0.03356	2.7	212.8	±5.7	230	±68
12.1	10.2	346	305	0.91	0.0476	3.9	0.224	4.5	0.03415	2.2	216.5	±4.7	81	±93
13.1	5.59	183	164	0.93	0.0433	12	0.209	12	0.03502	2.1	221.9	±4.6	-151	±310
14.1	8.15	268	153	0.59	0.0469	5.5	0.227	5.9	0.03516	2.0	222.8	±4.3	43	±130
15.1	10.2	336	278	0.85	0.0518	3.7	0.253	4.1	0.03532	1.9	223.8	±4.1	279	±84
16.1	9.51	314	248	0.82	0.0499	3.7	0.241	4.3	0.03507	2.2	222.2	±4.8	192	±87

注:表中误差为1σ;Pb*指示放射成因铅。测年在北京离子探针中心完成。

±1.4) Ma(图4-c),应为脉岩的成岩年龄。

样品1596-1对应的岩性为中细粒似斑状正长花岗岩:其内锆石呈自形-半自形柱状,长宽比多为2:1~3:1,绝大多数锆石的阴极发光图像颜色较浅,呈灰白色,且发育较窄的震荡环带,具酸性岩浆成

因锆石特征(图4-b),对15个此类锆石进行了16个点的测定,获得的Th/U为0.56~1.78,同位素时代为(212.5±5)~(228.5±4.5) Ma(表1),其谐和年龄(220.5±2.7) Ma应代表了岩石形成时代(图4-d)。测点3.1所在锆石U、Th含量明显高于其他锆石,阴

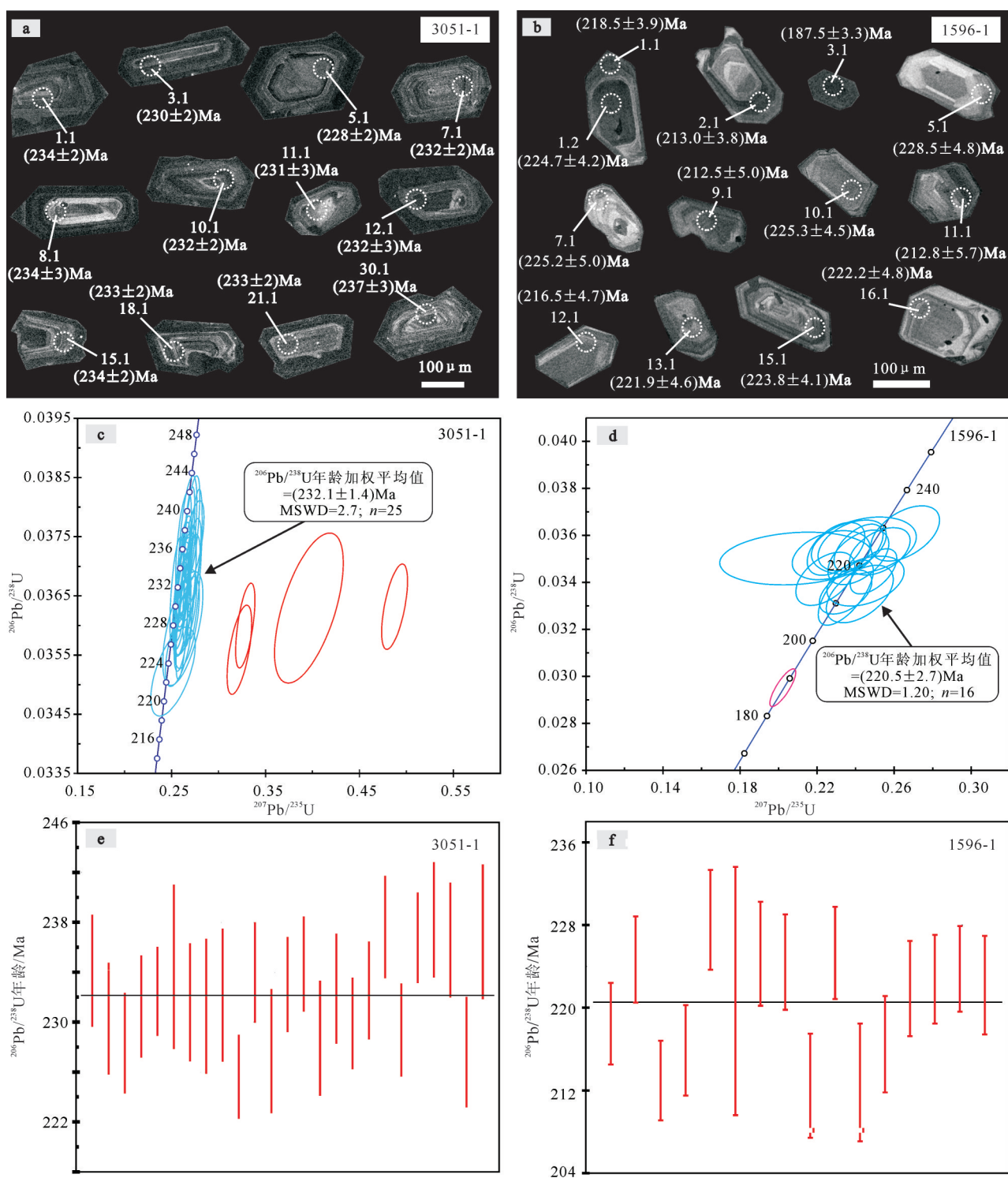


图4 宾巴勒查干三叠纪花岗岩典型锆石阴极发光图像、谐和图及直方图

Fig. 4 Cathodoluminescence images of typical zircons, concordia diagram and histogram of U-Pb SHRIMP data of zircons from Triassic intrusive rocks in Binbalechagan

极发光图像发暗,表面粗糙且不发育环带,可能为重结晶锆石或新生锆石,其同位素时代(187.5±3.3) Ma可能反映了另一期事件。

3.2 黑云母矿物化学分析结果

黑云母是宾巴勒查干三叠纪花岗岩中最为主要的暗色矿物,选取各岩石类型中新鲜的黑云母进行了电子探针分析,结果见表2。

3.2.1 二长花岗岩类中黑云母

粗中粒二长花岗岩中黑云母为褐色片状(图5-a),其MgO质量分数为13.84%~14.42%,FeO质量分数为14.80%~16.19%,TiO₂质量分数为2.99%~3.52%,Al₂O₃质量分数为12.65%~13.97%,结构式中Al^{VI}的含量为0.02~1.12,显示为富镁、铁、高钛且低铝的特征,在黑云母分类图上均在镁质黑云母区域

表2 内蒙古东乌旗宾巴勒查干三叠纪侵入岩中黑云母电子探针测试分析数据

Table 2 Electron microprobe analyses of biotites from Triassic intrusive rocks of Binbalechagan in Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia

岩性	粗中粒二长花岗岩					粗中粒正长花岗岩				细粒似斑状正长花岗岩		中细粒似斑状正长花岗岩		
	J1	J2	J3	J9	J10	C1	F6	F7	F10	H6	H12	A4	B1	I1
样号														
SiO ₂	39.06	38.64	39.5	38.92	37.87	40.94	40.13	40.62	40.77	36.7	37.18	42.07	41.7	40.44
TiO ₂	3.11	3.36	3.36	3.52	2.99	1.83	2.02	1.69	2.04	3.49	3.59	0.96	0.84	1.94
Al ₂ O ₃	13.1	12.86	12.7	12.65	13.97	11.41	13.39	17.46	13.76	15.82	16.42	21.34	21.77	17.99
FeO	14.8	16.07	15.29	16.19	15.62	12.32	12.88	13.05	13.15	18.18	18.64	10.75	12.16	14.5
MnO	0.88	0.82	0.75	0.88	0.77	1.52	1.95	2.17	2.13	0.71	0.62	3.3	3.23	2.98
MgO	14.42	14.15	13.84	14.38	14.34	14.61	10.79	7.13	10.76	10.04	10.61	1.76	1.5	3.6
CaO	0.03	0.02	0.08	0	0.1	0.02	0.18	0	0	0	0.02	0.05	0.03	0.02
Na ₂ O	0.09	0.13	0.07	0.13	0.08	0.28	0.34	0.32	0.31	0.29	0.2	0.44	0.49	0.23
K ₂ O	9.4	9.62	9.78	9.41	7.65	9.72	9.42	9.67	9.66	9.61	9.25	9.92	9.82	9.9
Total	94.92	95.69	95.51	96.08	93.38	92.74	91.31	92.38	92.79	94.94	96.54	90.74	91.61	91.72
以22个氧原子为基础计算的阳离子系数														
Si	2.93	2.9	2.96	2.91	2.87	3.11	3.11	3.09	3.11	2.81	2.78	3.2	3.16	3.13
Al ^{IV}	1.07	1.1	1.04	1.09	1.13	0.89	0.89	0.91	0.89	1.19	1.22	0.8	0.84	0.87
Al ^{VI}	0.09	0.04	0.08	0.02	0.12	0.14	0.33	0.66	0.35	0.23	0.23	1.12	1.11	0.77
Ti	0.18	0.19	0.19	0.2	0.17	0.1	0.12	0.1	0.12	0.2	0.2	0.05	0.05	0.11
Fe ³⁺	0.23	0.19	0.23	0.2	0.29	0.24	0.35	0.48	0.35	0.23	0.26	0.68	0.67	0.56
Fe ²⁺	0.7	0.82	0.72	0.81	0.7	0.55	0.49	0.35	0.49	0.93	0.91	0	0.1	0.38
Mn	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.1	0.13	0.14	0.14	0.05	0.04	0.21	0.21	0.2
Mg	1.61	1.58	1.54	1.6	1.62	1.66	1.25	0.81	1.22	1.14	1.18	0.2	0.17	0.42
Ca	0	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
Na	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.06	0.07	0.03
K	0.9	0.92	0.93	0.9	0.74	0.94	0.93	0.94	0.94	0.94	0.88	0.96	0.95	0.98
Total	7.77	7.81	7.77	7.8	7.71	7.76	7.65	7.52	7.65	7.77	7.74	7.3	7.33	7.44
TFeO/(TFeO+MgO)	0.51	0.53	0.52	0.53	0.52	0.46	0.54	0.65	0.55	0.64	0.64	0.86	0.89	0.8
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ +Mg)	0.3	0.34	0.32	0.34	0.3	0.25	0.28	0.3	0.28	0.45	0.44	0	0.37	0.48
Mg/(Fe ²⁺ +Mg)	0.7	0.66	0.68	0.66	0.7	0.75	0.72	0.7	0.72	0.55	0.56	1	0.63	0.52
MF	0.62	0.6	0.61	0.6	0.61	0.65	0.56	0.45	0.56	0.49	0.5	0.18	0.15	0.27

注:阳离子系数采用路远发^[9]开发的Geokit程序计算,其中Fe²⁺、Fe³⁺采用林文蔚和彭丽君^[30]的方法调整;表中MF=2Mg / (Mg + Fe²⁺ + Mn),氧化物含量单位均为%。

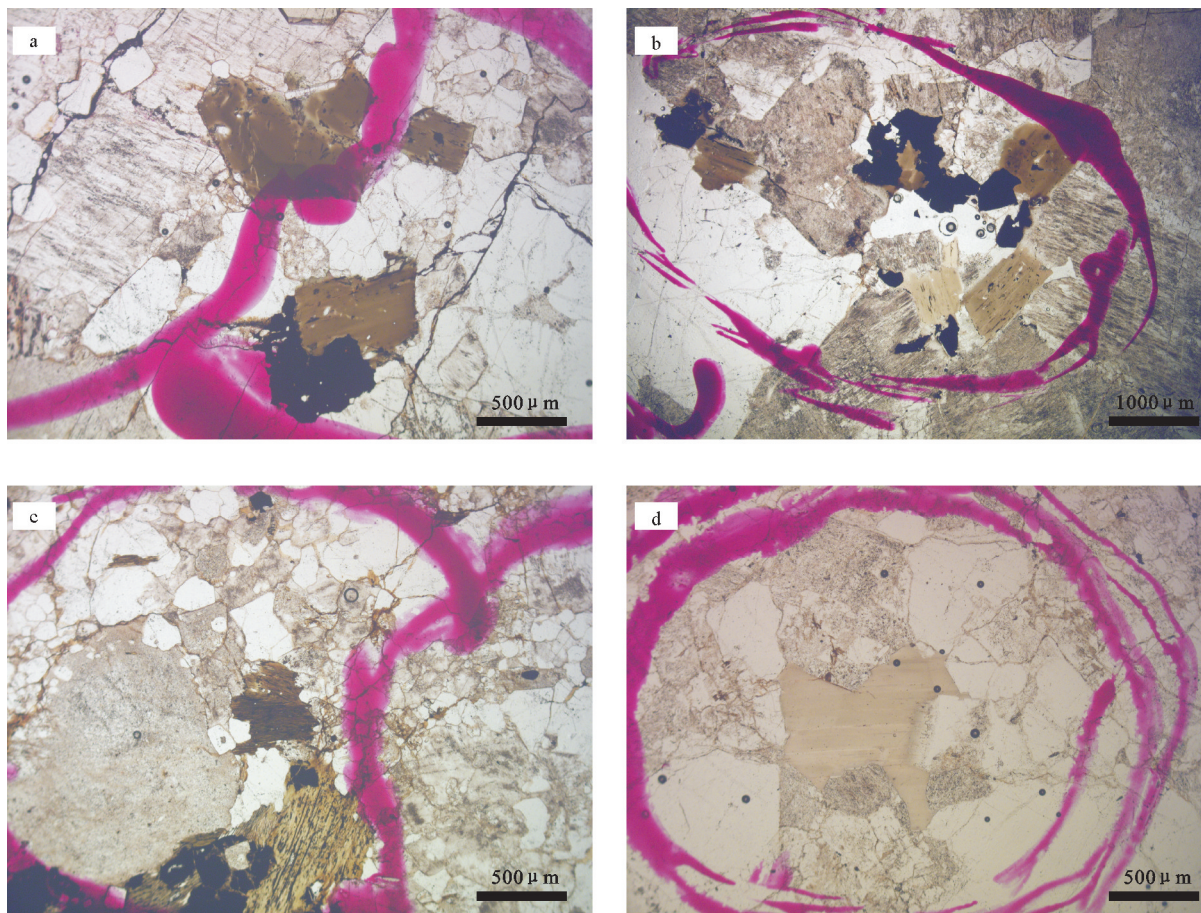


图5 宾巴勒查干三叠纪花岗岩显微照片示黑云母特征(单偏光)

寄主岩石: a—粗中粒二长花岗岩; b—粗中粒正长花岗岩; c—细粒似斑状正长花岗岩; d—中细粒似斑状正长花岗岩

Fig. 5 Microscope photographs of Triassic intrusive rocks in Binbalechagan, showing characteristics of biotites

Host rock: a—Coarse-medium grained adamellite; b—Coarse-medium grained syenogranite; c—Fine grained porphyry syenogranite; d—Medium-fine grained porphyry syenogranite

内(图6-a、b)。 $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ 比值均一,为0.37~0.39,根据Stone^[25]的研究,该比值均一表明岩浆为氧化态岩浆,未受后期流体改造。

3.2.2 正长花岗岩类中黑云母

粗中粒正长花岗岩、细粒似斑状正长花岗岩中的黑云母为褐色片状(5-b、c),前者中黑云母矿物成分以FeO、MgO、TiO₂含量普遍较低,而Al₂O₃、MnO含量相对较高为特点,后者以富铁、铝而低镁为特征,二者中所测黑云母的 $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ 比值均一,显示未受后期流体改造;与粗中粒二长花岗岩中黑云母相比,二者中黑云母最显著的特点是MgO值相对较低,在图6中测点虽然仍落在镁质黑云母区域,但已显示出向铁质黑云母转化的趋势。

中细粒似斑状正长花岗岩中黑云母显示出截

然不同的特征:其颜色相对较浅,解理纹相比之下不甚明显(图5-d),表明其可能经历了交代作用;矿物化学分析获得的主要氧化物总量较低,暗示其含有的挥发份较高,结合 $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ 比值差别较大这一事实(表2),有理由相信该岩石类型遭受了后期流体改造。此外,其黑云母的Al₂O₃质量分数为17.99%~21.77%,Al^{VI}为0.77~1.12,MgO质量分数仅为1.50%~3.60%,有两个样品的TiO₂质量分数比前三者低了一个数量级,这些化学组成特征介于标准黑云母与白云母之间(图6-a),在图6-b中的投点均落在铁质黑云母区域,以富铝、铁而贫镁、钛为其典型特征。据前人研究,黑云母的钛含量和结构式中Al^{VI}的含量可指示其形成环境^[26-27],高钛低Al^{VI}常反映其形成于相对高温和高 f_{O_2} 的介质环境。该岩

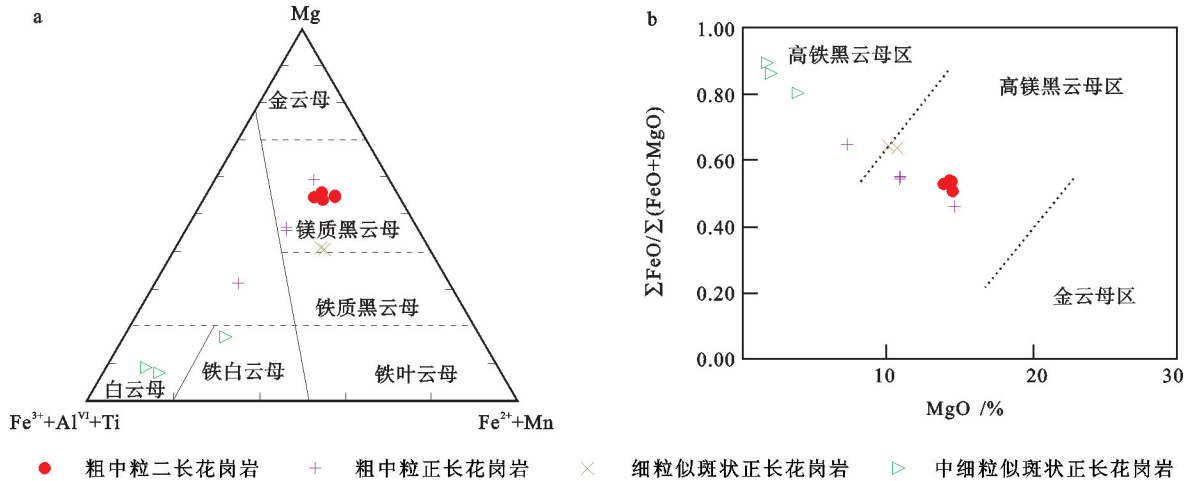


图6 宾巴勒查干三叠纪侵入岩中的黑云母分类图

a—底图据文献[31]修改; b—底图据文献[32]修改

Fig. 6 Classification diagrams of biotites from Triassic intrusive rocks in Binbalechagan a, after reference [31]; b, after reference [32]

石类型中的黑云母相对低钛高 Al^{VI} 的特点, 指示的是相对低温、低 f_{O_2} 的介质环境, 这暗示其赋存的岩石, 处于相对还原的环境, 该岩石类型与阿尔哈达铅锌银矿的密切关系^[28], 似乎也印证了这种对成矿有利环境的存在。

3.3 岩石地球化学特征

3.3.1 主量元素

如表3列出的测试结果所示, 正长花岗岩类各主量元素的含量差别不大, 与之相比, 二长花岗岩类的 SiO₂ 含量相对较低, TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、FeO、MgO、P₂O₅ 的含量则相应较高。

二长花岗岩类主量元素以高硅、富钾、过铝为特征: 其 SiO₂ 含量为 70.44%~72.40%, 硅碱图上落在花岗岩区(图 7-a); Na₂O < K₂O, 富钾, 在 SiO₂-K₂O 分类图解(图 7-b)上, 落在钾玄岩-高钾钙碱性岩之间; Al₂O₃ 含量为 13.51%~14.62%, A/CNK 在 1.04~1.18, 为过铝质花岗岩(图 7-c); 其全碱含量较高, CaO 含量较低, 在(Na₂O+K₂O)-SiO₂ 图解上落在碱钙区(图 7-d), 这一特征与 A 型花岗岩较为一致, 但是其碱性指数(AI=(Na₂O+K₂O)/Al₂O₃(分子比))为 0.79~0.83, 按照洪大卫等^[33]的定义, 应属钙碱性花岗岩。

正长花岗岩类则以高硅、富碱、富钾、弱过铝为特征: 其酸性程度相对更高, SiO₂ 含量在 72.84%~

78.27%, 在 TAS 图解(图 7-a)上落在花岗岩区; 24 个样品中除 1 个样品 K₂O 含量为 3.93% 之外, 其余均在 4.18%~5.58%, 且这 23 个样品 K₂O 含量均大于 Na₂O 含量, 在 SiO₂-K₂O 分类图解(图 7-b)中均落在高钾钙碱性系列及钾玄岩系列中; Al₂O₃ 含量在 11.82%~14.62% (多数为 12%~13%), A/CNK 平均为 1.05, 总体表现为弱过铝质特征(图 7-c); (Na₂O+K₂O) 含量为 7.58%~10.48%, 在硅碱图上的位置多落在亚碱性、接近碱性系列的区域(图 7-a), 碱性指数(AI)为 0.79~1.01, 平均为 0.89, 接近洪大卫等^[33]的碱性花岗岩(AI≥0.90), CaO 含量较低, 在(Na₂O+K₂O)-CaO)-SiO₂ 图解上多落在碱钙区(图 7-d), 显示与 A 型花岗岩较为一致的特征。

3.3.2 微量元素

宾巴勒查干三叠纪两类侵入岩的微量元素特征有很多相似之处: 轻稀土元素相对富集、稀土曲线具明显的负 Eu 异常、相对富集大离子亲石元素、均具明显的 Ba 负异常, 但稀土总量、轻重稀土的分馏程度、Eu 和 Ba 的负异常程度以及某些单个元素的丰度等方面都存在差异。

二长花岗岩类的稀土总量为 200.55 × 10⁻⁶~333.23 × 10⁻⁶; LREE/HREE=2.90~4.14, 轻重稀土分异程度不大; 由于稀土总量存在差异, 稀土配分曲线纵向上较为离散, 但这些样品均具相似的曲线形态

表3 内蒙古东乌旗宾巴勒查干三叠纪侵入岩主要元素(%)、稀土元素(10^{-6})、微量元素分析结果(10^{-6})
Table 3 Analytical results of major elements (%), trace elements (10^{-6}) and REE (10^{-6}) of Triassic intrusive rocks from Binbalechagan in Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia

岩性 及样号	粗中粒正长花岗岩 ^[21]										细粒似斑状正长花岗岩										中细粒似斑状正长花岗岩										
	P3-97-1	P3-82-1	P3-103-1	P2-22-1	P2-24-1	P2-12-1	3477-2	P2-12-3	3634-1	P2-12-2	P3-65-1	3919-1	P2-40-1	P3-4-3	P3-4-1	P3-51-1	P3-16-2	1596-1	3174-1	P2-4-1	P2-4-1	P2-4-1	P2-4-1	P2-4-2	P12-5-1	P12-7-2	P2-5-1	P12-7-1	P2-7-2		
SiO ₂	72.40	72.14	70.44	78.27	77.93	77.68	77.50	77.45	75.99	75.70	75.40	75.20	74.12	73.54	73.42	73.24	72.84	77.56	77.46	77.40	77.30	77.20	76.82	76.46	76.44	76.04	75.94				
TiO ₂	0.34	0.42	0.47	0.16	0.02	0.06	0.07	0.14	0.19	0.09	0.18	0.18	0.02	0.27	0.16	0.21	0.23	0.05	0.09	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.04	0.02	0.14				
Al ₂ O ₃	14.31	13.51	14.62	11.82	12.07	12.20	12.39	12.09	12.91	13.37	13.15	12.58	14.12	13.35	13.64	13.68	13.91	12.03	12.36	12.31	12.27	12.47	12.62	12.46	13.16	12.86	12.84				
Fe ₂ O ₃	1.01	1.74	1.57	0.36	0.06	0.59	0.38	0.60	0.45	0.63	0.87	1.01	0.00	1.42	1.36	0.98	1.18	0.40	0.29	0.04	0.29	0.17	0.20	0.30	0.32	0.37	0.47				
FeO	0.29	0.89	0.69	0.10	0.08	0.07	0.17	0.14	0.17	0.19	0.07	0.23	0.17	0.36	0.24	0.60	0.55	0.10	0.22	0.34	0.12	0.24	0.28	0.31	0.14	0.14	0.24				
MnO	0.10	0.06	0.05	0.01	0.01	0.15	0.01	0.03	0.01	0.03	0.06	0.02	0.01	0.03	0.03	0.04	0.04	0.09	0.03	0.06	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05				
MgO	0.32	0.56	0.59	0.06	0.06	0.10	0.10	0.12	0.16	0.11	0.14	0.22	0.06	0.33	0.29	0.33	0.35	0.11	0.07	0.07	0.05	0.07	0.10	0.08	0.06	0.09	0.10				
CaO	0.38	0.96	0.81	0.21	0.29	0.35	0.27	0.22	0.58	0.38	0.27	0.79	0.81	1.03	0.62	0.85	0.81	0.42	0.21	0.58	0.46	0.31	0.27	0.50	0.38	0.35	0.91				
Na ₂ O	3.29	3.68	3.76	3.67	3.50	3.40	3.41	3.55	3.63	3.94	4.17	3.46	5.13	3.09	3.15	3.33	3.43	3.68	3.68	3.92	3.98	3.83	4.02	4.09	3.98	3.73					
K ₂ O	5.58	4.76	4.91	4.82	4.94	4.18	5.03	4.97	5.11	5.58	3.93	5.02	5.35	5.02	5.35	4.98	5.05	4.54	4.95	4.50	4.58	4.40	4.94	4.65	4.54	5.02	4.70				
P ₂ O ₅	0.16	0.15	0.22	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.06	0.02	0.10	0.06	0.03	0.12	0.12	0.19	0.12	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03				
LOI	1.21	1.06	1.28	0.48	0.45	0.63	0.45	0.64	0.50	0.26	0.98	1.03	0.53	1.08	1.05	0.96	0.91	0.64	0.60	0.62	0.46	0.45	0.49	0.50	0.48	0.49	0.68				
La	25.42	47.54	67.51	24.56	15.80	29.60	18.93	40.19	39.14	46.56	12.53	22.39	35.92	39.68	32.88	42.78	39.15	36.95	11.81	37.28	33.61	29.66	41.39	42.73	34.27	32.84	43.79				
Ce	96.33	114.80	112.60	42.79	24.82	60.03	31.20	79.34	83.54	89.81	50.85	40.15	85.60	75.50	57.70	65.94	68.79	63.52	18.73	46.39	54.37	52.64	51.49	56.45	51.92	47.92	79.42				
Pr	5.31	14.25	16.55	4.64	2.95	4.58	2.69	6.73	9.84	8.71	3.52	5.61	8.06	9.34	7.92	10.01	9.56	4.81	1.62	4.61	3.92	3.74	5.13	5.18	5.66	3.77	7.12				
Nd	19.01	52.75	59.31	13.05	8.54	1.37	2.16	0.94	2.85	5.86	4.22	2.97	3.83	4.37	6.18	5.36	6.74	6.25	1.60	5.52	1.33	1.14	1.05	1.47	1.52	2.22	0.94	2.62			
Sm	3.88	10.16	10.91	1.98	1.37	0.18	0.16	0.43	0.72	0.31	0.44	0.40	0.38	0.80	0.67	0.80	0.77	0.12	0.08	0.07	0.08	0.05	0.10	0.10	0.09	0.08	0.12				
Eu	0.61	1.27	1.50	0.23	0.18	0.18	0.16	0.43	0.72	0.31	0.44	0.40	0.38	0.80	0.67	0.80	0.77	0.12	0.08	0.07	0.08	0.05	0.10	0.10	0.09	0.08	0.12				
Gd	3.54	8.10	7.99	2.02	1.29	2.26	0.99	2.74	4.85	3.58	2.63	3.04	3.27	5.12	4.39	5.50	4.87	1.57	0.59	1.56	1.19	1.37	1.65	1.81	2.31	1.25	2.81				
Tb	0.71	1.43	1.30	0.36	0.26	0.46	0.20	0.48	0.90	0.59	0.56	0.55	0.52	0.87	0.76	0.97	0.84	0.30	0.12	0.25	0.25	0.23	0.27	0.29	0.39	0.19	0.46				
Dy	4.54	8.00	6.66	2.59	1.73	3.16	1.51	3.56	5.54	3.41	3.44	3.10	2.87	4.71	4.25	5.07	4.56	2.16	1.18	1.71	2.04	1.68	1.86	2.05	2.60	1.38	3.15				
Ho	1.02	1.62	1.30	0.59	0.43	0.79	0.36	0.83	1.18	0.82	0.75	0.64	0.65	0.94	0.85	1.03	0.92	0.59	0.36	0.51	0.60	0.50	0.53	0.58	0.69	0.40	0.82				
Er	3.06	4.75	3.70	2.02	1.56	2.83	1.40	2.91	3.68	2.86	2.21	1.97	2.12	2.72	2.51	2.96	2.69	2.62	1.62	2.34	2.96	2.25	2.35	2.51	2.71	1.73	3.13				
Tm	0.57	0.81	0.64	0.54	0.33	0.65	0.33	0.76	0.69	0.59	0.39	0.36	0.44	0.47	0.44	0.52	0.47	0.66	0.53	0.66	0.81	0.62	0.61	0.66	0.64	0.47	0.72				
Yb	3.56	5.01	3.99	3.68	2.52	4.96	2.69	5.44	4.53	4.34	2.57	2.38	3.30	2.93	2.71	3.33	2.98	5.86	4.18	5.87	7.40	5.48	5.28	5.84	5.15	4.30	5.42				
Lu	0.53	0.71	0.58	0.61	0.43	0.96	0.50	0.83	0.71	0.72	0.43	0.44	0.53	0.53	0.50	0.55	0.49	1.18	0.68	1.12	1.54	1.13	1.01	1.11	0.86	0.85	0.90				
Y	32.47	52.54	38.69	19.60	17.92	31.33	13.57	25.85	40.59	30.34	24.34	18.62	24.60	28.06	29.87	35.15	31.57	23.35	11.69	27.07	25.71	24.20	25.09	30.55	31.19	17.96	32.37				
ΣREE	200.55	323.74	333.23	119.27	80.12	156.44	82.24	191.69	234.25	222.60	120.55	122.87	197.87	210.70	177.82	216.74	206.87	156.63	57.44	140.97	144.21	132.94	150.02	163.24	155.33	122.10	201.42				
σEu	0.50	0.42	0.47	0.35	0.41	0.25	0.49	0.47	0.40	0.24	0.48	0.35	0.29	0.42	0.41	0.39	0.41	0.22	0.45	0.15	0.20	0.13	0.19	0.19	0.13	0.23	0.13				
(La/Yb) _N	4.81	6.39	11.40	4.50	4.23	4.02	4.74	4.98	5.83	7.24	3.28	6.35	7.33	9.14	8.17	8.66	8.85	4.25	1.90	4.28	3.06	3.65	5.28	4.93	4.48	5.15	5.45				

续表3

岩性及 样品号	粗中粒正长花岗岩 ²¹										细粒似斑状正长花岗岩										中细粒似斑状正长花岗岩									
	P3-97-1	P3-82-1	P3-103-1	P2-22-1	P2-24-1	P2-12-1	3477-2	P2-12-3	3634-1	P2-12-2	P3-65-1	3919-1	P2-40-1	P3-4-3	P3-4-1	P3-51-1	P3-16-2	1596-1	3174-1	P2-4-1	1774-1	P2-4-2	P12-5-1	P12-7-2	P2-5-1	P12-7-1	P2-7-2			
Cs	8.54	4.92	5.76	6.25	5.20	10.18	10.77	10.90	4.43	9.07	7.46	4.70	6.69	12.52	12.65	8.07	9.87	10.40	9.08	8.54	7.88	8.46	11.98	19.18	10.77	11.58	15.92			
Rb	317.30	181.10	187.70	215.60	288.20	365.40	284.50	282.20	217.70	381.90	158.80	200.70	413.30	254.30	278.20	194.20	276.70	493.20	395.70	581.30	485.90	651.70	554.60	592.20	427.10	560.60	670.20			
Sr	69.41	114.00	175.00	9.97	9.00	6.66	14.50	9.93	41.80	8.95	60.37	29.40	28.81	65.85	88.56	85.73	103.60	10.00	8.76	10.32	13.10	4.20	3.95	4.26	6.22	3.68	3.87			
Ba	425.01	359.22	505.51	52.32	50.00	63.51	44.85	52.35	189.90	54.81	303.92	182.40	109.13	452.40	350.79	341.76	389.41	49.80	19.10	31.43	28.20	19.62	22.07	34.82	17.36	19.23	16.95			
Nb	21.56	27.00	25.94	25.17	17.99	39.95	21.92	25.53	20.29	31.07	15.31	17.92	43.71	16.94	17.14	18.14	21.54	32.02	51.59	68.16	83.83	54.10	32.25	38.80	46.17	31.60	34.40			
Ta	1.83	2.15	2.14	1.99	1.34	1.88	1.42	1.98	1.62	2.20	1.70	1.82	4.60	1.89	1.82	1.90	2.09	2.59	4.22	5.06	7.27	2.91	1.74	1.99	2.90	2.00	2.31			
Zr	186.30	213.20	180.30	128.10	324.70	625.20	77.00	117.83	164.50	437.50	260.10	400.80	235.60	488.10	479.00	375.30	392.80	121.60	100.76	605.10	156.60	806.10	555.80	606.30	387.70	583.00	424.00			
Hf	1.92	2.15	1.78	6.12	3.04	6.79	3.54	6.12	6.07	4.28	2.10	7.76	2.67	8.54	3.31	2.94	3.05	6.73	6.71	8.06	9.06	10.58	6.54	7.01	4.46	6.44	11.30			
Th	22.72	16.39	14.40	32.45	28.52	40.31	17.33	32.00	14.55	29.32	14.85	43.28	28.21	24.18	18.40	18.61	19.37	47.80	13.74	38.81	44.60	51.99	39.24	42.30	35.26	38.10	48.45			
V	36.66	35.67	36.46	17.29	8.83	8.97	2.00	18.67	6.40	8.92	17.24	12.65	6.71	18.65	24.30	20.84	26.60	2.00	15.28	8.14	2.70	5.33	7.44	9.73	5.48	8.81	4.05			
Cr	9.92	10.29	9.61	8.64	5.35	5.24	4.50	8.57	2.90	5.57	7.63	6.71	5.86	8.55	8.99	8.48	9.61	4.80	6.82	5.22	3.60	5.25	5.93	6.58	5.08	6.21	5.87			
Co	1.95	2.77	3.35	0.22	0.24	0.71	0.21	0.98	0.44	0.25	1.32	1.13	0.33	1.79	1.20	1.27	1.79	0.15	0.40	0.18	0.30	0.32	0.18	0.19	0.26	0.26	0.33			
Ni	2.79	3.40	3.14	1.06	0.81	4.67	1.42	2.28	0.81	1.31	3.81	2.16	1.55	2.42	2.95	2.29	2.71	2.14	1.87	1.14	2.00	1.51	1.45	0.89	1.21	0.86	0.91			
Li	16.29	24.15	27.56	17.01	15.78	93.84	59.97	83.42	32.20	81.16	14.18	10.79	9.49	25.48	22.58	23.87	31.20	111.80	19.53	135.80	68.65	172.00	164.60	189.10	71.19	114.30	144.20			
Sc	7.66	8.64	8.78	5.13	5.58	7.62	6.88	6.35	5.62	7.51	6.16	4.32	5.83	4.66	7.02	6.64	7.93	7.61	7.25	9.83	9.68	8.77	9.80	8.84	7.85	8.67	7.46			
U	2.51	2.14	1.94	4.89	4.89	5.30	3.09	4.85	3.23	3.93	4.28	5.08	3.24	12.45	5.27	2.85	2.51	5.14	3.00	3.79	5.98	15.08	3.98	6.23	3.99	6.75	6.48			

注:测试单位为河北省区域地质矿产研究所实验室。表中主要氧化物含量为重量百分比,稀土、微量元素含量为10⁻⁶。除粗中粒正长花岗岩的7个样品外,其余均为新发表数据。

(图8-a),即轻稀土呈相对富集的右倾曲线、重稀土平直、负Eu异常较为明显。微量元素蛛网图上(图8-b),岩石以Rb及Th的“峰”、Ba的“槽”为特征,高场强元素Nb、Ta、Hf与相邻元素相比略微亏损。

与前者相比,正长花岗岩类的稀土总量则总体较低,介于 $57.44 \times 10^{-6} \sim 234.25 \times 10^{-6}$; LREE/HREE=1.74~4.17,轻重稀土分异程度也并不大;轻稀土右倾、具明显负Eu异常、重稀土多数分馏不明显等特征(图8-a,c),微量元素中Ba、Sr、P、Ti、Nb、Ta相对亏损的特征(图8-b,d),均与二长花岗岩相一致,但Eu、Ba的负异常程度则愈加明显,且从早到晚,该负异常程度有增强趋势;Zr、Hf相对富集的特征,也与前者有所不同。此外,较为特殊的是,最晚期中细粒似斑状正长花岗岩的中稀土较为亏损,重稀土呈左倾正斜率(图8-c),通常情况下,中稀土可赋存于角闪石中,重稀土多赋存于石榴石中,因此,这一特殊的地球化学特征可被理解为源区石榴石减少、角闪石增加所致,从而与麻粒岩相到角闪岩相减压过程联系起来。但是这一论断尚缺乏其它有力的论据,而根据前述黑云母矿物化学的研究,中细粒似斑状正长花岗岩可能遭受了流体改造,鉴于中稀土元素可溶于酸性流体,本研究更倾向于将其特殊的地球化学行为与流体作用相联系。

4 讨论

4.1 宾巴勒查干岩体的时代

前人在研究宾巴勒查干岩体时,均将其作为一个整体来考虑。关于岩体的时代,最初依据区域对比,结合邻近具相似岩貌侵入体的同位素年龄来确定(马秀等^①;内蒙古自治区地质矿产局^[40]);张万益等^[28]对阿尔哈达黑云母花岗岩进行了锆石SHRIMP U-Pb测定,获得了加权平均年龄(218±5) Ma(MSWD=1.7),认为代表了岩体的就位时代。然而,从后者的采样位置来看,阿尔哈达黑云母仅对应于前述中细粒似斑状正长花岗岩,尚不足以代表整个岩体的年龄;同时,在其所测定9颗锆石中,有3颗同位素年龄值集中在(235.5±5.1) Ma~(238±11) Ma,反映了岩体的就位时代可能并不均一。本次在3051-1样品中取得的锆石SHRIMP U-Pb年龄,进

①马秀,王文双,周盛德,等.1:200000 贺斯格乌拉幅区域地质调查报告[R].呼和浩特:内蒙古自治区地质局.

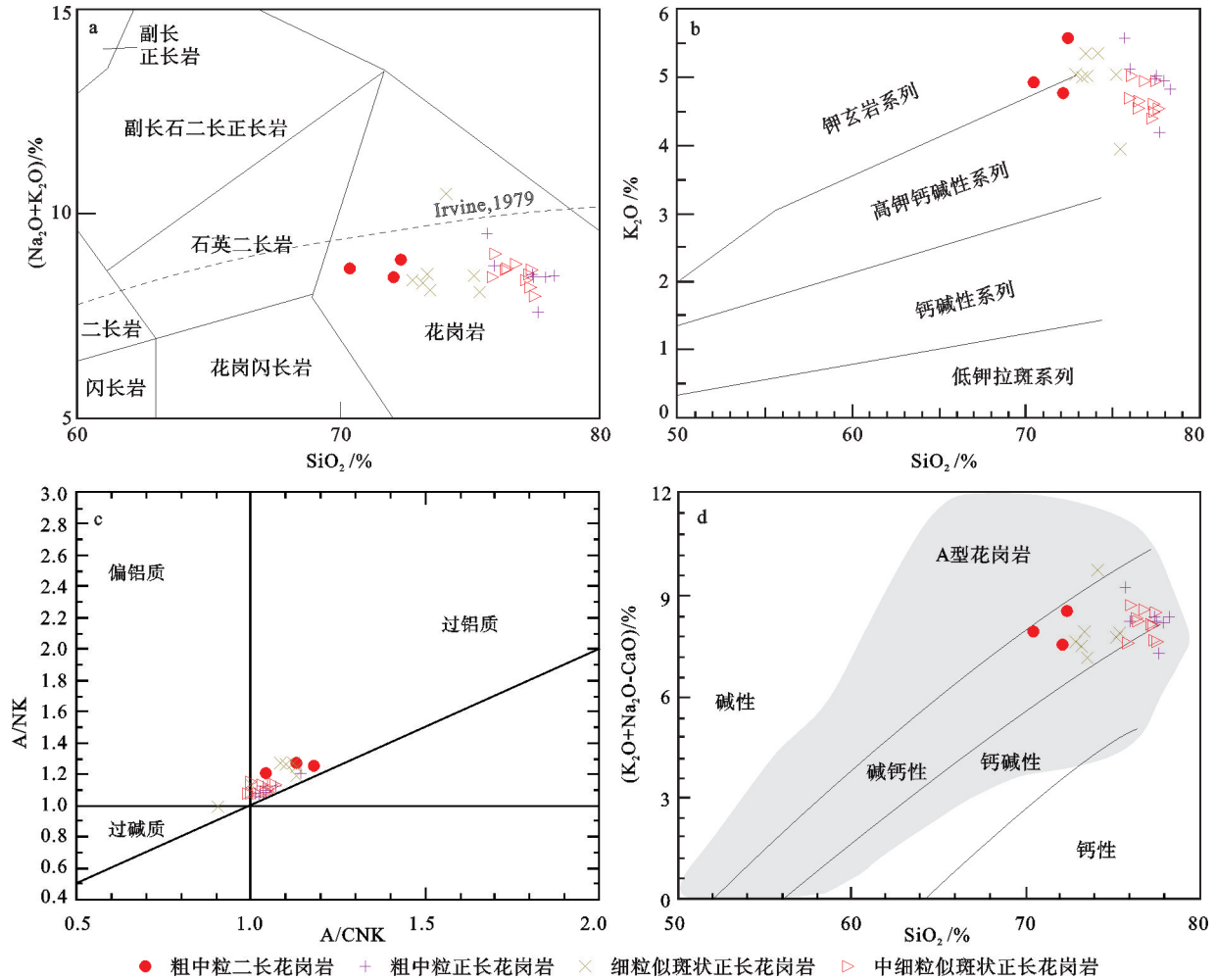


图7 宾巴勒查干三叠纪侵入岩岩石类型和系列划分图解

a—TAS图解(据文献[34]);b—SiO₂-K₂O分类图解(据文献[35]);

c—A/NK-A/CNK图解(据文献[36]);d—(Na₂O+K₂O-CaO)-SiO₂图解(据文献[37])

Fig.7 Classification and series diagrams of Triassic intrusive rocks in Binbalechagan

a— Total alkalis versus silica diagram (after reference [34]); b—K₂O versus SiO₂ diagram (after reference [35]); c—A/NK versus A/CNK diagram (after reference [36]); d—(Na₂O+K₂O-CaO) versus SiO₂ diagram (after reference [37])

一步说明研究区存在 235 Ma 的同位素信息,这也反映该岩体并非一次岩浆活动的产物,而是由两次岩浆活动形成,这两次岩浆作用的产物及判别依据如下:

4.1.1 中三叠世二长花岗岩类(238~230 Ma)

主要为粗中粒二长花岗岩,本次虽未在其中取到揭示时代的直接证据,但根据其围岩可作出限制:其侵入的最新围岩为三叠系哈达陶勒盖组,笔者等近年在其中所取同位素年龄为(234.8±3.2)Ma~(231.4±1.2)Ma(U-Pb 锆石 LA-ICPMS法;程银行等^[41]),这为该岩体侵位时代提供了下限;本次对该岩体中的细粒正长花岗岩脉采集了同位素样品(前述样品

3051-1),测试结果为(232.1±1.4)Ma,可作为粗中粒二长花岗岩的上限。由此将粗中粒二长花岗岩的侵位时代大致限定为 238~230 Ma。

4.1.2 晚三叠世正长花岗岩类(223~215 Ma)

包括粗中粒正长花岗岩、细粒似斑状正长花岗岩、中细粒似斑状正长花岗岩,确定时代的主要依据有:本文发表的中细粒似斑状正长花岗岩的同位素年龄为(220.5±2.7) Ma,以及作者等近年发表的粗中粒正长花岗岩、细粒似斑状正长花岗岩同位素年龄(分别为(220.4±2.5) Ma、(216±1) Ma;采样位置及参考文献见图 1-b)。这些结果在误差限的时

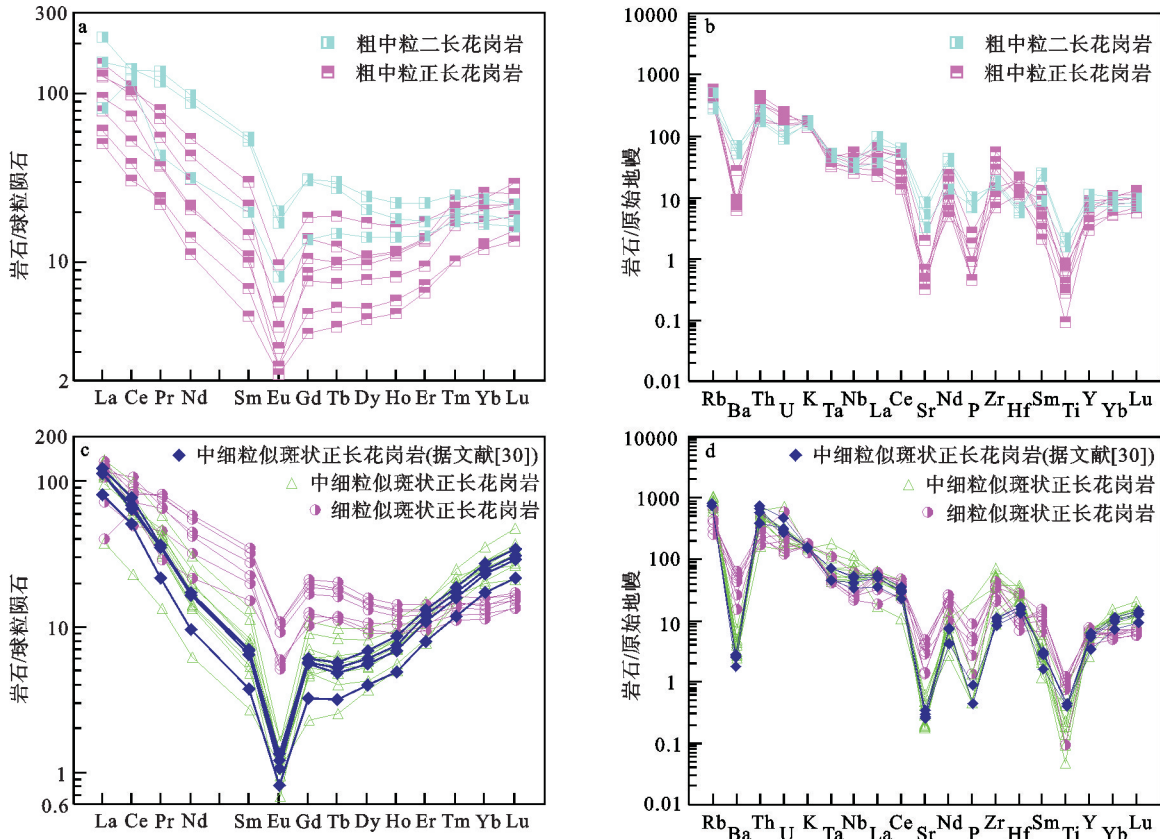


图8 宾巴勒查干三叠纪侵入岩地球化学图谱

a, c 标准化数值据文献[38]; b, d 标准化数值据文献[39];

图中文献[30]的数据为国家地质测试中心分析结果,用于验证本次数据的可靠性

Fig. 8 REE patterns (a, c) and trace element spider diagram (b, d) of Triassic intrusive rocks in Binbalechagan

Normalization values are from reference [38] and reference [39], respectively.

Data of reference [30] analyzed by NRCGA (National Research Center for Geoanalysis) aiming to verify the reliability of data in this paper

间区间为 223~215 Ma。

4.2 岩石类型

中三叠世二长花岗岩类和晚三叠世正长花岗岩类代表了两次侵入岩浆活动,属不同的岩石类型:

中三叠世二长花岗岩类的 A/CNK 值为 1.04~1.18,介于 I 型、S 型花岗岩之间,而其暗色矿物以镁质黑云母为主,矿物组合中未见富铝的堇青石、白云母等矿物,且 $w(\text{Na}_2\text{O}) < w(\text{K}_2\text{O})$, 这些均不符合 S 型花岗岩特征;其主量元素中高硅、富钾、低钙的特征,具明显负 Eu 异常的稀土元素配分曲线,以及 Rb、Th 相对富集和 Ba 亏损的微量元素特征,均与 A 型花岗岩较为一致,但是其相对较高的 Al_2O_3 含量 (13.51%~14.62%) 及较低的 Nb、Ta、Hf 和 Zr 含量 (图 9-a) 则有别于 A 型花岗岩,样品在图 9-b 上处于 A 型花岗岩与

分异的长英质花岗岩之间。总体来看,其特征介于 I 型和 A 型之间,应属 I-A 型花岗岩。

相比之下,晚三叠世正长花岗岩类中黑云母的 FeO 丰度明显偏高,其主量元素以高 SiO_2 、相对低 Al_2O_3 、富钾、全碱含量较高为特征,稀土配分曲线具明显 Eu 负异常,微量元素 Sr、Ba、P、Ti 亏损,高场强元素 Zr、Hf 较为富集,这些均为 A 型花岗岩的典型特征^[42],所采岩石样品在 SiO_2 -Zr 图解 (图 9-a) 及 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{CaO}$ 图解 (图 9-b) 上也显示出 A 型花岗岩特征。

根据 Eby^[43] 的研究, A 型花岗岩可划分为两类: A1 型 ($\text{Y}/\text{Nb} < 1.2$; 与大陆裂谷或板内环境有关) 和 A2 型 ($\text{Y}/\text{Nb} > 1.2$; 造山后或后碰撞环境)。宾巴勒查干两种花岗岩类在 A 型花岗岩分类图解 (图 10-a, b) 上显

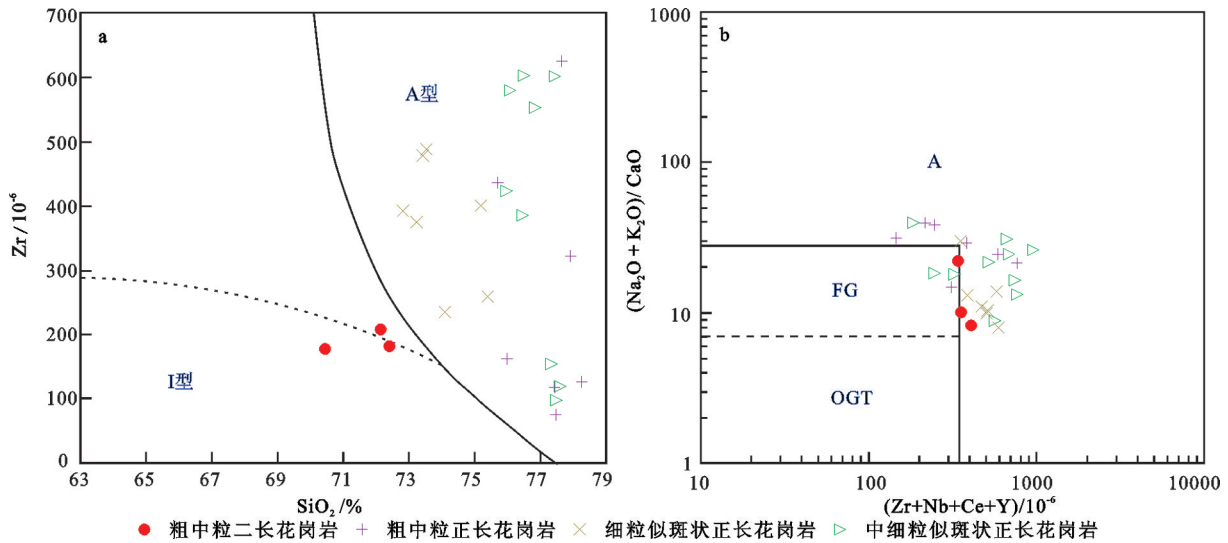


图9 宾巴勒查干三叠纪侵入岩分类图解

a— SiO_2 -Zr分类图解(据文献[44]);b— $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解(据文献[45]);
FG—分异的长英质花岗岩;OGT—未分异的I、S、M型花岗岩

Fig. 9 Classification diagrams of Triassic intrusive rocks in Binbalechagan

a— SiO_2 versus Zr diagram (after reference [44]); b— $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ versus $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ diagram (after reference [45]); FG— Fractionated felsic granites; OGT— Unfractionated I-, S- and M-type granites

示出不同的特征:中二叠世二长花岗岩处于A2区域,晚三叠世正长花岗岩类则多落在A1型区域。

4.3 成因

花岗岩的形成具多样性,其中主要的成因模式有:地幔玄武质岩浆结晶分异^[46];壳幔物质混合^[47];壳源物质的部分熔融^[48]。

由于尚缺乏宾巴勒查干岩体详细的Sr-Nd-Pb同位素资料,还不能对其源岩和成因模式做出准确的限定,但从野外调查的现象来看,宾巴勒查干三叠纪侵入岩的围岩中,未见有大规模分布的基性岩,这排除掉了其由幔源基性岩浆直接分异形成的可能性。兴蒙造山带大量花岗岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值的特点^[15,49],反映出该区受古老地壳物质污染的影响很小,因此,目前较为主流的观点是,该区大量花岗岩形成于年轻地幔来源物质组成下地壳的部分熔融^[15,49-50]。

前人对阿尔哈达黑云母花岗岩(相当于本文的中细粒似斑状正长花岗岩)的同位素研究显示,其铅同位素组成显示地幔铅特征、铍同位素具深源特征、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 多为正值,显示有幔源组分参与了宾巴勒查干三叠纪侵入岩的形成过程^[28]。黑云母的物质成分也可反映寄主岩石的成因类型和形成环境^[51],本

次对黑云母的研究也得出了相同的结论:研究区中三叠世二长花岗岩的黑云母为镁质黑云母,晚三叠世早期侵入岩中的镁质黑云母有向铁质黑云母演变趋势,最晚期的中细粒似斑状正长花岗岩中黑云母则为铁质黑云母(图6-b);根据周作侠^[52]的研究,镁质黑云母形成于壳幔混源或年轻地幔组成的下地壳,铁质黑云母形成于壳源,研究区三叠纪花岗岩中镁质黑云母的存在,表明有幔源物质参与了岩浆形成过程,镁质黑云母向铁质黑云母的转变,则可能反映了幔源物质对成岩的贡献在逐步减弱、消失。

除上述幔源物质参与岩浆形成过程的证据之外,本次调查还发现,该期侵入岩的起源与地壳关系也较为密切,主要证据有:①该期侵入岩除中细粒似斑状正长花岗岩外,均普遍含有富云包体,据Jean Didier^[53]的研究,富含该类型包体的岩浆是大陆壳产生岩浆的极好证据;②虽然三叠纪各岩石类型地球化学特征有所差异,但均具有富集轻稀土元素、富集微量元素Rb、Th等的特征,反映了有地壳物质参与岩石的形成;③据Atherton and Petford^[54]的研究, $\text{Mg}^\#$ 值小于45的岩石可能是由下地壳岩石直接部分熔融形成,未与地幔相互作用,本区三叠纪岩体的 $\text{Mg}^\#$ 值普遍在20.00~40.54之间,仅有1个样

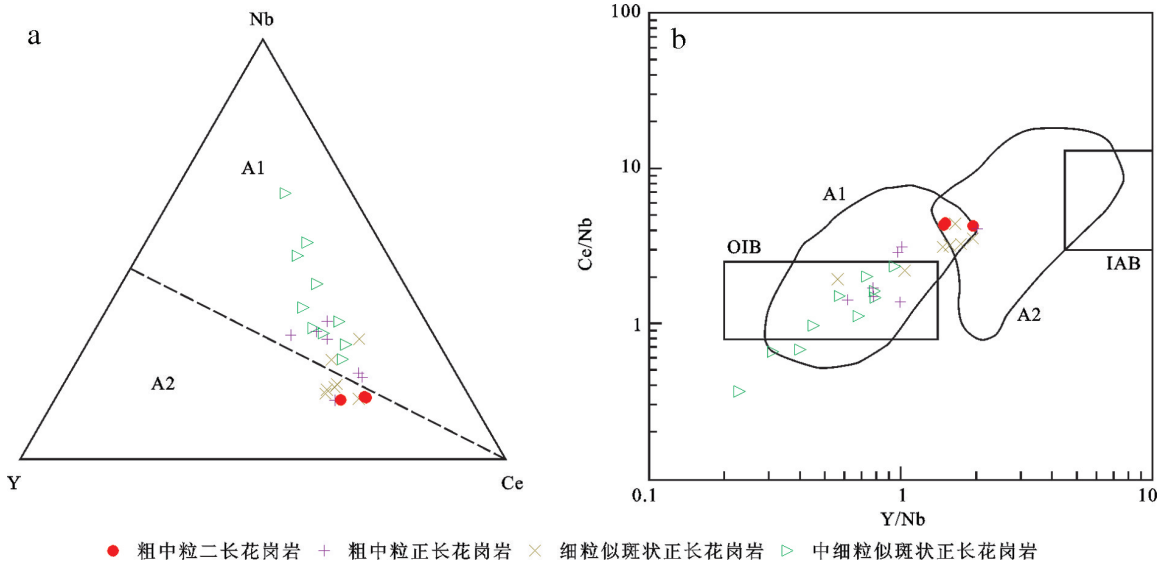


图10 宾巴勒查干三叠纪侵入岩A型花岗岩分类图解(据文献[43])

A1—非造山花岗岩类;A2—后造山花岗岩类;IAB—岛弧玄武岩;OIB—洋岛玄武岩

Fig.10 Chemical subdivision of A-type granite from Triassic intrusive rocks in Binbalechagan (after reference [43])

A1—Anorogenic granitoids; A2—Post-orogenic granitoids; IAB— Island arc basalt; OIB— Ocean arc basalt

品为46.03,表明地壳对岩石的形成贡献较大。

基于上述讨论,笔者等认为宾巴勒查干三叠纪侵入岩与兴蒙造山带大量正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 、正 $\epsilon_{Hf}(t)$ 花岗岩的成因一致,其可能源于年轻地幔组成下地壳的部分熔融。

4.4 构造背景

前已述及,中亚造山带三叠纪的构造背景尚存争议,李舳等^[6]认为这可能是由于多数学者在研究时将早中生代(即涵盖了中、晚三叠世)作为一个整体来考虑,其通过系统的总结,发现中亚造山带中南段三叠纪经历了两个岩浆活动阶段,即早中三叠世及晚三叠世,不同区域的两期花岗岩可能形成于不同构造背景。宾巴勒查干中三叠世和晚三叠世不同的岩石特征,也暗示两时期花岗岩构造背景有所差异:

中三叠世二长花岗岩具I-A型花岗岩地球化学特征,带有A2型花岗岩的印迹(图9-b),这是后碰撞或造山后花岗岩特征^[43],其在 R_1-R_2 构造环境判别图解上落在碰撞晚期范围内(图11-a),在 $Rb-(Y+Nb)$ 图解上落在后造山区域(11-b),这些均是后造山伸展背景下形成的岩石特征。而研究区同时期形成的三叠系哈达陶勒盖组岩石,以及与之同处南蒙古—兴安带的查干敖包中三叠世石英闪长

岩,均是伸展背景下的产物^[12,55,56]。而据前人资料,二连—东乌旗地区的洋盆已于晚二叠世闭合,主要依据有:①从沉积相角度看,该区沉积环境在二叠纪晚期已从海相转变为陆相^[40,57-58],周志广等^[59]甚至在研究区附近发现了早—中二叠世潟湖相地层;②不同生物群的混生在二叠纪中晚期就已发生^[60-62];③南蒙古活动边缘分布的早二叠世双峰式岩浆岩^[63],以及白音乌拉—东乌珠穆沁旗地区分布的大量晚石炭世—早二叠世碱性花岗岩^[6,14,18,49,64],表明二叠纪晚期处于板块碰撞后的张性环境。因此,研究区的古亚洲洋洋盆已于晚二叠世闭合,中三叠世时可能处于后造山伸展背景之下。

晚三叠世正长花岗岩类,具A1型花岗岩特征,根据Eby^[43]的研究,这是非造山环境形成花岗岩特征;在 R_1-R_2 构造环境判别图解上,与早期花岗岩不同,落在造山期后或非造山区(图11-a);区域上同时期碱性花岗岩星罗棋布,广泛分布于中亚造山带与华北北缘^[14-16,18,64]。这些都暗示晚三叠世区域构造趋向单极演化,可能已进入板内伸展阶段。

5 结论

(1)内蒙古宾巴勒查干三叠纪侵入岩由中三叠世二长花岗岩(238~230 Ma)和晚三叠世正长花岗岩

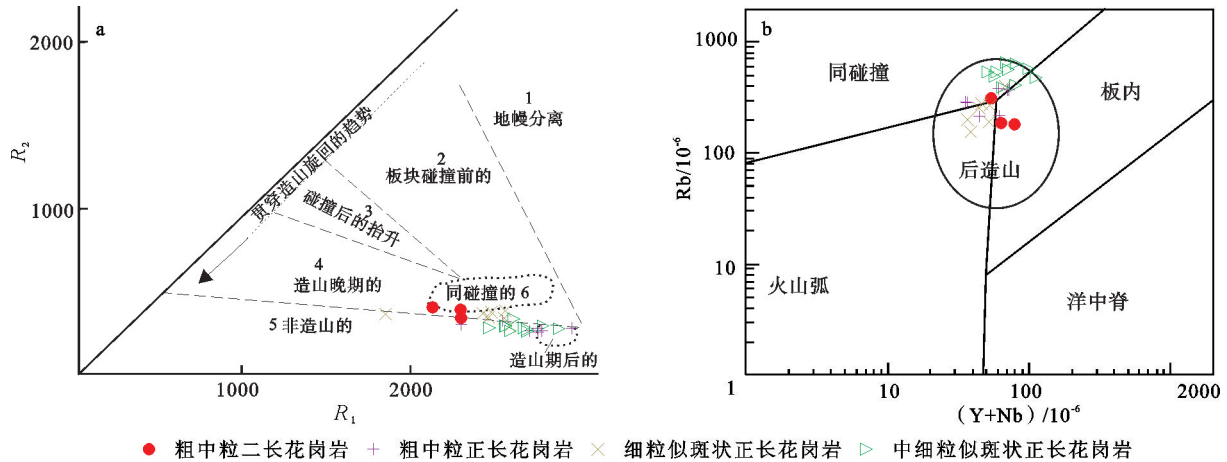


图 11 三叠纪侵入岩构造环境判别图解

a—据文献[65];b—据文献[66](图中圆圈据文献[67])

Fig. 11 Diagrams for discriminating tectonic environment of Triassic intrusive rocks in Binbalechagan
a—after reference [65]; b—after reference [66] (circle in the figure is taken from reference [67])

岩类(223~215 Ma)组成,是两次岩浆活动的产物;

(2)中三叠世二长花岗岩I-A型花岗岩地球化学特征,带有A2型花岗岩的印迹,晚三叠世正长花岗岩类属A型花岗岩,具A1型花岗岩特征。

(3)宾巴勒查干三叠纪侵入岩可能源于年轻地幔组成下地壳的部分熔融。

(4)研究区三叠纪侵入岩形成于古亚洲洋闭合背景下,中三叠世时可能处于后造山伸展背景,晚三叠世可能为板内伸展阶段。

致谢:与昆明理工大学刘学龙博士进行的有益讨论给予了笔者启发,尹海龙、黄烈工程师协助完成了野外工作,长安大学向坤鹏博士在写作中提供了帮助,中国地质科学院地质研究所张洪瑞博士认真审阅了全文并提出了建设性的修改意见,在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献(References):

- [1] Xiao W J, Windley B F, Huang B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6):1189–1217.
- [2] 张洪瑞,魏刚锋,李永军,等. 东天山大南湖岛弧带石炭纪岩石地层与构造演化[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(1):1–14.
- Zhang Hongrui, Wei Gangfeng, Li Yongjun, et al. Carboniferous lithologic association and tectonic evolution of Dananhu arc in the East Tianshan Mountains [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*,

2010, 29(1): 1–14(in Chinese with English abstract).

- [3] Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of Early–Middle Triassic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the Mongol–Okhotsk Ocean [J]. *Lithos*, 2014, 184–187:1–16.
- [4] 苗来成,朱明帅,张福勤. 北山地区中生代岩浆活动与成矿构造背景分析[J]. *中国地质*, 2014,41(4):1190–1204.
- Miao Laicheng, Zhu Mingshuai, Zhang Fuqin. Tectonic setting of Mesozoic magmatism and associated metallogenesis in Beishan area [J]. *Geology in China*, 2014, 41(4): 1190–1204(in Chinese with English abstract).
- [5] Chen B, Jahn B M, Tian W. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U–Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd–Sr isotope compositions of subduction– and collision–related magmas and forearc sediments [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(3):245–257.
- [6] Wu F Y, Sun D Y, Li H, et al. A–type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187(1/2):143–173.
- [7] Ling M X, Zhang H, Li H, et al. The Permian–Triassic granitoids in Bayan Obo, North China Craton: A geochemical and geochronological study [J]. *Lithos*, 2014, 190–191:430–439.
- [8] Hu C, Li W, Xu C, et al. Geochemistry and zircon U–Pb–Hf isotopes of the granitoids of Baolidao and Halatu plutons in Sonidzuoqi area, Inner Mongolia: Implications for petrogenesis and geodynamic setting [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 294–306.
- [9] Yang H, Ge W, Zhao G, et al. Early Permian–Late Triassic granitic magmatism in the Jiamusi–Khanka Massif, eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt and its implications [J]. *Gondwana*

- Research, 2015, 27(4):1509–1533.
- [10] Li Y, Zhou H, Brouwer F M, et al. Early Paleozoic to Middle Triassic bivergent accretion in the Central Asian Orogenic Belt: Insights from zircon U–Pb dating of ductile shear zones in central Inner Mongolia, China [J]. *Lithos*, 2014, 205:84–111.
- [11] 孙德有, 吴福元, 高山, 等. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质A型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 263–275.
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Gao Shan, et al. Confirmation of two episodes of A-type granite emplacement during Late Triassic and Early Jurassic in the central Jilin Province, and their constraints on the structural pattern of Eastern Jilin–Heilongjiang Area, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 263–275 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张万益, 聂凤军, 高延光, 等. 内蒙古查干敖包三叠纪碱性石英闪长岩的地球化学特征及成因 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 525–534.
- Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Gao Yanguang, et al. Geochemical characteristics and genesis of Triassic Chagan Obo alkaline quartz diorites in Inner Mongolia. [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2): 525–534 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 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 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 565–582.
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, et al. Shuangjinzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(3): 565–582(in Chinese with English abstract).
- [14] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1):1–30.
- [15] Li S, Wang T, Wilde S A, et al. Evolution, source and tectonic significance of Early Mesozoic granitoid magmatism in the Central Asian Orogenic Belt (central segment) [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 126(11):206–234.
- [16] 李虬, 王涛, 童英. 中亚造山系中南段早中生代花岗岩类时空分布特征及构造环境 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 642–662.
- Li Shan, Wang Tao, Tong Ying. Spatial-temporal distribution and tectonic settings of Early Mesozoic granitoids in the middle-south segment of the Central Asia Orogenic System [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6):642–662 (in Chinese with English abstract).
- [17] 邵济安, 牟保磊, 何国琦, 等. 华北北部在古亚洲域与古太平洋域构造叠加过程中的地质作用 [J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 1997, 27(5): 390–394.
- Shao Jian, Mu Baolei, He Guoqi, et al. Geological Process in the superposition of structures between the Paleo-Asian and Paleo-Pacific Domains in northern North China [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 27(5):390–394 (in Chinese).
- [18] 童英, 洪大卫, 王涛, 等. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义 [J]. *地球学报*, 2010, 31(3): 395–412.
- Tong Ying, Hong Dawei, Wang Tao, et al. Spatial and Temporal Distribution of Granitoids in the Middle Segment of the Sino-Mongolian Border and Its Tectonic and Metallogenic Implications [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(3):395–412 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张万益, 聂凤军, 刘树文, 等. 大兴安岭南段西坡金属矿床特征及成矿规律 [J]. *中国地质*, 2013, 40(5):1583–1599.
- Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Liu Shuwen, et al. Characteristics and metallogenic regularities of ore deposits on the western slope of the southern section of the Da Hinggan Mountains metallogenic belt [J]. *Geology in China*, 2013, 40(5):1583–1599 (in Chinese with English abstract).
- [20] Jahn B M, Litvinovsky B A, Zandvilevich A N, et al. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian–Transbaikalian Belt: Evolution, petrogenesis and tectonic significance [J]. *Lithos*, 2009, 113(3–4):521–539.
- [21] 杨俊泉, 刘永顺, 滕学建, 等. 内蒙古宾巴勒查干粗中粒正长花岗岩年代学及岩石地球化学 [J]. *地质调查与研究*, 2012, 35(2): 128–135.
- Yang Junquan, Liu Yongshun, Teng Xuejian, et al. Geochronology and Geochemistry of the Coarse-medium Grained Syenogranites in the Binbalechagan Area, Inner Mongolia [J]. *Geological Survey and Research*, 2012, 35(2): 128–135 (in Chinese with English abstract).
- [22] Yang Junquan, Liu Yongshun, Cheng Yinhang. New Evidence of Indosinian Magmatic Activity and Revelation of Old Ages in Binbalechagan, Inner Mongolia [C]. // Hao D H, Zhang J G, Niu S Y, et al. (eds.) *Geological Engineering and Mining Exploration in Central Asia – Proceeding Source: The XVIII Kerulien International Conference on Geology*, Shijiazhuang, China 2013. Riverwood: Aussino Academic Publishing House, 2013: 39–44.
- [23] 张艳飞, 刘敬党, 肖荣阁, 等. 辽宁后仙峪硼矿区元古代电气石岩: 锆石特征及 SHRIMP 定年 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2010, 35(6): 985–999.
- Zhang Yanfei, Liu Jingdang, Xiao Rongge, et al. The Hyalotourmalites of Houxianyu Borate Deposit in Eastern Liaoning: Zircon Features and SHRIMP Dating [J]. *Earth Science——Journal of China University of Geoscience*, 2010, 35(6): 985–999 (in Chinese with English abstract).
- [24] 杨俊泉, 万渝生, 刘永顺, 等. 阿尔金北缘元古代壳源火成碳酸岩的发现 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2012, 37(5): 929–936.
- Yang Junquan, Wan Yusheng, Liu Yongshun, et al. Discovery of Paleoproterozoic crustally derived carbonatite in the northern Altyn Tagh [J]. *Earth Science——Journal of China University of Geoscience*, 2012, 37(5): 929–936(in Chinese with English

- abstract).
- [25] Stone D. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens River area, northwest Superior Province, Ontario, Canada [J]. *Canadian Mineralogist*, 2000, 38(5):455–470.
- [26] Carlos A R De Albuquerque. Geochemistry of biotites from granitic rocks, Northern Portugal [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 37(7):1779–1802.
- [27] Buddington A F, Lindsley D H. Iron–titanium oxide minerals and synthetic equivalents [J]. *Journal of Petrology*, 1964, 5(2):310–357.
- [28] 张万益, 聂凤军, 江思宏, 等. 内蒙古东乌珠穆沁旗岩浆活动与金属成矿作用 [M]. 地质出版社, 2009:48–58.
Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Jiang Sihong, et al. Magmatic activity and metallogeny of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009:48–58 (in Chinese).
- [29] 路远发. GeoKit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包 [J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 459–464.
Lu Yuanfa. GeoKit—A geochemical toolkit for Microsoft Excel [J]. *Geochimica*, 2004, 33(5): 459–464(in Chinese with English abstract).
- [30] 林文蔚, 彭丽君. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的 Fe^{3+} , Fe^{2+} [J]. *长春地质学院学报*, 1994, 24(2): 155–162.
Lin Wenwei, Peng Lijun. The estimation of Fe^{3+} and Fe^{2+} contents in amphibole and biotite from EMPA data [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1994, 24(2): 155–162 (in Chinese with English abstract).
- [31] Foster M D. Interpretation of composition of trioctahedral micas [J]. *U S Geol Surv Prof Paper*, 1960, (354B):1–49.
- [32] 周作侠. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 1988, 4(3): 63–73.
Zhou Zuoxia. Chemical characteristics of mafic Mica in intrusive rocks and its geological meaning [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1988, 4(3): 63–73 (in Chinese with English abstract).
- [33] 洪大卫, 郭文岐, 李戈晶, 等. 福建沿海晶洞花岗岩带的岩石学和成因演化 [M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1987:6–7.
Hong Dawei, Guo Wenqi, Li Gejing, et al. The petrology of Mirolitic granites along the southeast coast of Fujian province and their generation [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1987:6–7(in Chinese).
- [34] Le Maitre R W. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms* [M]. Cambridge U. K.: Cambridge University Press, 2002.
- [35] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1):63–81.
- [36] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5):635–643.
- [37] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A Geochemical Classification for Granitic Rocks [J]. *Journal of Petrology*. 2001. volume 42(11):2033–2048(16).
- [38] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteoric studies [J]. *Rare Earth Element Geochemistry*, 1984:63–114.
- [39] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [C]//*Orogenic Andesites and Related Rocks*, 1982:525–548.
- [40] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
Nei Mongol Bureau of Geology and Mineral Resources. *Regional Geology of Inner Mongolia Autonomous Region* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991 (in Chinese).
- [41] 程银行, 杨俊泉, 刘永顺, 等. 大兴安岭敖包查干地区安山岩年代学、地球化学研究 [J]. *地质调查与研究*, 2012, 35(2): 118–127.
Cheng Yinhang, Yang Junquan, Liu Yongshun, et al. Age and Geochemistry of Andesites in the Qagan Obo Area, Da Hinggan Mountains [J]. *Geological Survey and Research*, 2012, 35(2): 118–127 (in Chinese with English abstract).
- [42] 张旗, 冉焱, 李承东. A型花岗岩的实质是什么? [J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(4): 621–626.
Zhang Qi, Ran Gao, Li Chengdong. A-type granite: what is the essence? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(4): 621–626(in Chinese with English abstract).
- [43] Eby G N. Chemical subdivision of the A– type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641–644.
- [44] Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and Origin of A– Type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia [J]. *Contributions, Mineralogy and Petrology*, 1982, 80(2): 189–200.
- [45] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A– type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1987, 95(4):407–419.
- [46] Han B, Wang S, Jahn B M, et al. Depleted–mantle source for the Ulungur River A– type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd–Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth [J]. *Chemical Geology*, 1997, volume 138(3):135–159(25).
- [47] Konopelko, Dmitry, Biske, et al. Hercynian post– collisional A– type granites of the Kokshaal Range, Southern Tien Shan, Kyrgyzstan [J]. *Lithos*, 2007, (1–2):140–160.
- [48] 王德滋, 沈渭洲. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(3):209–220.
Wang Dezi, Shen Weizhou. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China [J]. *Earth Science Frontier*, 2003, 10(3): 209–220 (in Chinese with English abstract).
- [49] 洪大卫, 王式光, 谢锡林, 等. 兴蒙造山带正 $\epsilon(Nd, t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(2): 441–456.

- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, et al. Genesis of positive $\epsilon(\text{Nd}, t)$ granitoids in the Dahinggan Mts.—Mongolia orogenic belt and growth continental crust [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(2): 441–456(in Chinese with English abstract).
- [50] 杨高学, 李永军, 张兵, 等. 新疆西准噶尔接特布调A型花岗岩年代学、地球化学及岩石成因[J]. *地球学报*, 2013, 34(3):295–306. Yang Gaoxue, Li Yongjun, Zhang Bing, et al. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Jietebutiao A-type Granites in West Junggar, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, 34(3): 295–306 (in Chinese with English abstract).
- [51] 刘学龙, 李文昌, 尹光侯, 等. 云南格咱岛弧普朗斑岩型铜矿年代学、岩石矿物学及地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 3049–3064. Liu Xuelong, Li Wenchang, Yin Guanghou, et al. The geochronology, mineralogy and geochemistry study of the Pulang porphyry copper deposits in Geza arc of Yunnan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9): 3049–3064(in Chinese with English abstract).
- [52] 周作侠. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. *岩石学报*, 1986, 2(1): 59–70. Zhou Zuoxia. The origin of intrusive mass in Fengshandong, Hubei province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1986, 2(1): 59–70 (in Chinese with English abstract).
- [53] Didier J. Contribution of enclave studies to the understanding of origin and evolution of granitic magmas [J]. *Geologische Rundschau*, 1987, 76(1):41–50.
- [54] Atherton M, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. *Nature*, 1993, 362(6416): 144–146.
- [55] Cheng Y H, Teng X J, Yang J Q. Geochronology of the Middle Triassic Andesites in Mohe'ertu Area, Inner Mongolia, China, and Its Implications [C]//Hao D H, Zhang J G, Niu S Y, et al. (eds.) *Geological Engineering and Mining Exploration in Central Asia – Proceeding Source: The XVIII Kerulien International Conference on Geology*, Shijiazhuang, China 2013. Riverwood: Aussino Academic Publishing House, 2013: 58–65.
- [56] 张万益, 聂凤军, 江思宏, 等. 内蒙古查干敖包石英闪长岩锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2008, 27(3): 177–184. Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Jiang Sihong, et al. Zircon SHRIMP U–Pb age of quartz diorite in Qagan Obo of Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, 27(3): 177–184(in Chinese with English abstract).
- [57] Heumann M J, Johnson C L, Webb L E, et al. Paleogeographic reconstruction of a late Paleozoic arc collision zone, southern Mongolia [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2012, 124(9–10):1514–1534.
- [58] Johnson C L, Amory J A, Zinniker D, et al. Sedimentary Response to Arc–Continent Collision, Permian, Southern Mongolia [J]. *American Geophysical Union*, 2007, 436(4):363–390.
- [59] 周志广, 谷永昌, 柳长峰, 等. 内蒙古东乌珠穆沁旗满都胡宝拉格地区早—中二叠世华夏植物群的发现及地质意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(1): 21–25. Zhou Zhiguang, Gu Yongchang, Liu Changfeng, et al. Discovery of Early—Middle Permian cathaysian flora in Manduhubalage area, Dong Ujimqin Qi, Inner Mongolia, China and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(1): 21–25 (in Chinese with English abstract).
- [60] 黄本宏, 丁秋红. 中国北方安加拉植物群[J]. *地球学报: 中国地质科学院院报*, 1998, 19(1): 97–104. Huang Benhong Ding Qiu hong. The Angara Flora from Northern China [J]. *Acta Geoscientia Sinica: Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1998, 19(1): 97–104(in Chinese with English abstract).
- [61] 王惠, 高荣宽. 内蒙古达茂旗满都拉地区早二叠世生物地层划分对比再研究[J]. *内蒙古地质*, 1999, (2): 8–21. Wang Hui, Gao Rongkuan. Further Study on Biostratum Division and Correlation of Early Permian Epoch of Mandula Area of Damaoqi, Inner Mongolia [J]. *Geology of Inner Mongolia*, 1999, (2): 8–21(in Chinese with English abstract).
- [62] Shi G R, Zwan L P. A Mixed Mid–Permian Marine Fauna From The Yanji Area, Northeastern China: A Paleobiogeographical Reinterpretation [J]. *Island Arc*, 2006, 5(4):386–395.
- [63] Yarmolyuk V V, Kovalenko V I, Sal'nikova E B, et al. Geochronology of igneous rocks and formation of the Late Paleozoic south Mongolian active margin of the Siberian continent [J]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2008, 16(2):162–181.
- [64] 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 等. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J]. *地质学报*, 1994, 68(3): 219–230. Hong Dawei, Huang Huaizeng, Xiao Yijun, et al. The Permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(3):219–230(in Chinese with English abstract).
- [65] Roche H D I, Leterrier J, Grandclaude P, et al. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2–diagram and major–element analyses—Its relationships with current nomenclature [J]. *Chemical Geology*, 1980, 29(80):183–210.
- [66] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks [J]. *J. Petrology*, 1984, 25(4):956–983.
- [67] Förster H J, Tischendorf G, Trumbull R B. An evaluation of the Rb vs. (Y + Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks [J]. *Lithos*, 1997, 40(2–4):261–293.