

赤峰哈拉道口早石炭世花岗闪长岩年代学、地球化学及其地质意义

李 巍¹, 陈井胜², 高忠晖¹, 刘 森², 李 斌², 杨 帆²

1. 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110029;

2. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘 要:以内蒙古赤峰哈拉道口地区花岗闪长岩为研究对象,利用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年技术进行年代学研究,测试结果为 352.4~355.9Ma,显示其形成时代为早石炭世早期,为华北板块北缘早石炭世岩浆岩活动研究提供了新的资料。地球化学特征显示,花岗闪长岩总体上贫 Si、Al,总碱量偏高, Eu 仅有轻微的亏损,属铝未饱和、高钾钙碱性系列岩石。同时花岗闪长岩具有较高 Sr 含量,较低的 MgO、Y、Yb 含量,富集 LREEs,亏损 HREEs 和 HFSEs, Sr/Y 比值介于 34.62~48.43 之间, (La/Yb)_N 比值为 15.31~17.14,显示“C 型埃达克岩”特征。较高的 K₂O、Cr、Ni 含量和较低的 Mg[#] 值说明其不可能是由拆沉下地壳物质的熔融形成,而是形成于增厚下地壳镁铁质岩的部分熔融。微量元素特征显示花岗闪长岩形成于活动大陆边缘弧环境。所以,早石炭世早期,本区处于古亚洲洋板块向南俯冲的大地构造背景。

关键词:早石炭世早期;花岗闪长岩;年代学;地球化学;内蒙古

GEOCHRONOLOGY AND GEOCHEMISTRY OF THE EARLY CARBONIFEROUS GRANODIORITES IN HALADAOKOU AREA OF CHIFENG CITY: Geological Implication

LI Wei-wei¹, CHEN Jing-sheng², GAO Zhong-hui¹, LIU Miao², LI Bin², YANG Fan²

1. Liaoning Institute of Geology and Mineral Resources Co., Ltd., Shenyang 110029, China

2. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The geochronology of the granodiorites in Haladaokou area of Chifeng City, Inner Mongolia, is studied by zircon LA-ICP-MS U-Pb dating. The test result of 352.4–355.9 Ma indicates that the rocks were formed in the early stage of Early Carboniferous, which provides new data for the research of Early Carboniferous magmatic activity on the northern margin of North China Plate. Geochemically, the granodiorites are generally poor in Si and Al, with high total alkali content and slight Eu depletion, belonging to the Al-unsaturated, high-K calc-alkaline series. Moreover, the granodiorites have high Sr content and low MgO, Y and Yb contents, enrichment of LREEs and depletion of HREEs and HFSEs, with the Sr/Y ratio of 34.62–48.43 and (La/Yb)_N ratio of 15.31–17.14, showing the characteristics of C-type adakite. The high K₂O, Cr and Ni contents and low Mg[#] value reveal they cannot be formed by the melting of delamination of lower crust materials, but by the partial melting of thickened lower crust mafic rocks. The characteristics

收稿日期:2020-03-18;修回日期:2020-04-09. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局项目“辽东-吉中地区区域地质调查”(DD20190042),“内蒙古 1:5 万敖汉旗、揭旗、新地、铁匠营子区域地质矿产调查”(12120113053400).

作者简介:李巍巍(1987—),女,硕士,现从事矿产地质调查研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区北陵大街 31 号, E-mail//654683380@qq.com

通信作者:陈井胜(1983—),男,博士,高级工程师,现从事辽东-吉中地区区域地质调查研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//5202268@qq.com

of trace elements indicate that the granodiorites were formed in the active continental margin arc environment. Therefore, the study area was in the geotectonic setting of southward subduction of Paleo-Asian Ocean plate during the early stage of Early Carboniferous.

Key words: early stage of Early Carboniferous; granodiorite; geochronology; geochemistry; Inner Mongolia

0 引言

内蒙古赤峰地区处于兴蒙造山带与华北板块北缘这两大构造单元的交界位置,是研究两大构造单元的属性、边界、碰撞拼合历史及岩浆-构造演化历史的有利地区^[1-7].赤峰地区存在大量的古生代及早中生代岩浆岩(图 1),对于了解古亚洲洋及兴蒙造山带的演化历史有着重要的科学意义.众多学者将注意力放在古亚洲洋最终拼合的位置及时限上,越来越多的资料证明,西拉沐伦河-长春-延吉一线为南、北两大板块

最终碰撞拼合位置^[8-12],拼合时间发生在晚二叠世末—早三叠世^[8,13-16].

赤峰地区分布有大面积岩浆岩,一些学者仅仅识别出来早泥盆世和晚泥盆世的火山岩^[17-19]、早二叠世末期的火山岩和一些晚二叠世—早三叠世的花岗岩^[20-21],中间缺失石炭纪的演化研究,主要原因是没有识别出石炭纪岩浆岩.本文对赤峰哈拉道口地区早石炭世早期花岗质岩体进行岩相学、锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究,以期填补本区石炭纪演化研究空白.

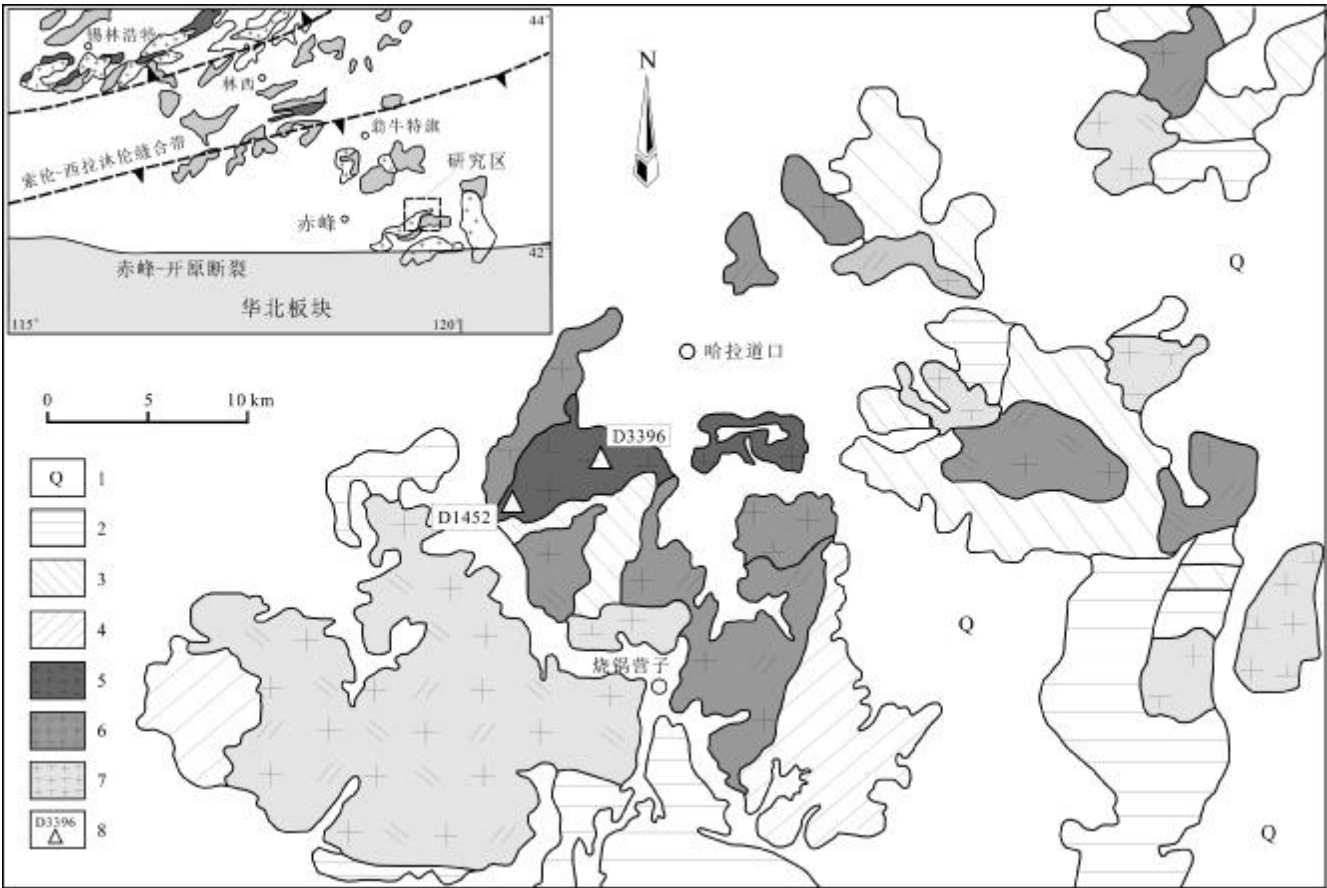


图 1 赤峰哈拉道口地区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of Haladaokou area in Chifeng City

1—第四系(Quaternary); 2—中生代地层(Mesozoic strata); 3—晚古生代地层(Late Paleozoic strata); 4—前寒武系地层(Precambrian strata); 5—正长花岗岩(syenogranite); 6—二长花岗岩(monzogranite); 7—花岗闪长岩(granodiorite); 8—采样点及点号(sampling site and number)

1 区域地质背景及岩石学特征

赤峰哈拉道口地区第四系掩盖较严重,出露的基岩中除有大量的花岗质岩体外还出露有沉积地层,包括前寒武结晶基底、早古生代地层、晚古生代地层及中生代地层(图 1)。区内断裂构造主要为北东向(包括北东东向)逆冲断裂,次为北西向走滑断裂。下新井岩体出露于哈拉道口镇下新井村附近,前人将其划归于烧锅营子岩体。笔者经过地质调查将其解体出来,并重新命名。该岩体岩性为花岗闪长岩,分布面积 12.56 km²,总体展布沿北东向延伸约为 3 km,被早三叠世正长花岗岩侵入,南侧被下二叠统三面井组角度不整合压盖。

岩石属中细粒花岗闪长岩,半自形柱状、粒状结构,块状构造。岩石矿物组成有石英、斜长石、钾长石、黑云母和角闪石(图 2)。石英为他形粒状集合体,充填于长石之间,粒径 1.4~2 mm,含量 20%;斜长石呈半自形板柱状、板状,聚片双晶带宽窄不一,测垂直 a 轴方向, $Np' \wedge (010) = 12^\circ$, $An = 27$,为更长石,部分边缘弱环带,表面清晰洁净,或聚片双晶纹较细密,中心强绢云母化,边缘发育环带,粒径 2~3.6 mm,含量 50%;钾长石呈宽板状,为微斜条纹长石,格子状双晶清晰,条纹细脉状,包含斜长石小晶体交代净边结构,粒径 2~3.6 mm,含量 10%;角闪石,半自形柱状、板柱状,绿色,多色性: Ng —绿, Np —淡黄绿,柱面一组解理,斜消光,见两组解理相交近菱形,部分边缘退变质为黑云母,含量 8%;黑云母,宽片状,边缘齿状,绿泥石化析出榍石,含量 12%。副矿物有榍石,多分布于黑云母

或角闪石之上,最大粒径可达 1.2~1.5 mm。

2 年代学特征

2.1 分析方法

本研究对赤峰地区早石炭世花岗闪长岩进行了锆石 U-Pb 定年工作。在野外地质工作的基础上,选取干净无污染样品 5 kg 左右,在薄片鉴定后,选取准备进行年代学测试的样品,样品破碎和锆石挑选及重砂鉴定工作由廊坊市宇能矿物分选有限公司完成。背散射图像在吉林大学完成,阴极发光(CL)锆石图像采集在中国科学院地质与地球物理研究所完成。样品锆石 U-Pb 同位素定年是由中国地质大学(北京)科学研究院地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。分析仪器为由激光(波长 193 nm)剥蚀进样系统(UPI93SS)和 Agilent 7500a 型四级杆等离子质谱仪联合构成的激光等离子质谱仪(LA-ICP-MS)。采用 He 作为剥蚀物质的载气,激光器工作频率为 10 Hz。测试点的激光束斑直径为 36 μm ,剥蚀时间为 45 s。锆石 U-Pb 及年龄标准选用标准锆石 91500,使用锆石中含量稳定 ^{29}Si 作为内标,以标准锆石 TEMORA(416 $\pm$ 5 Ma)和 QH(160 $\pm$ 1 Ma)作为辅助变样。锆石 U-Pb 同位素比值由 ICP-MS 测定,比值采用 GLITTER 4.4 程序,年龄计算采用国际标准程序 Isoplot/Ex(3.0)。普通铅校正方法同 Anderson(2002)^[22]。

2.2 测试结果

本研究选择两件中粗粒花岗闪长岩样品(D3396、D1452)进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试,测试结果见

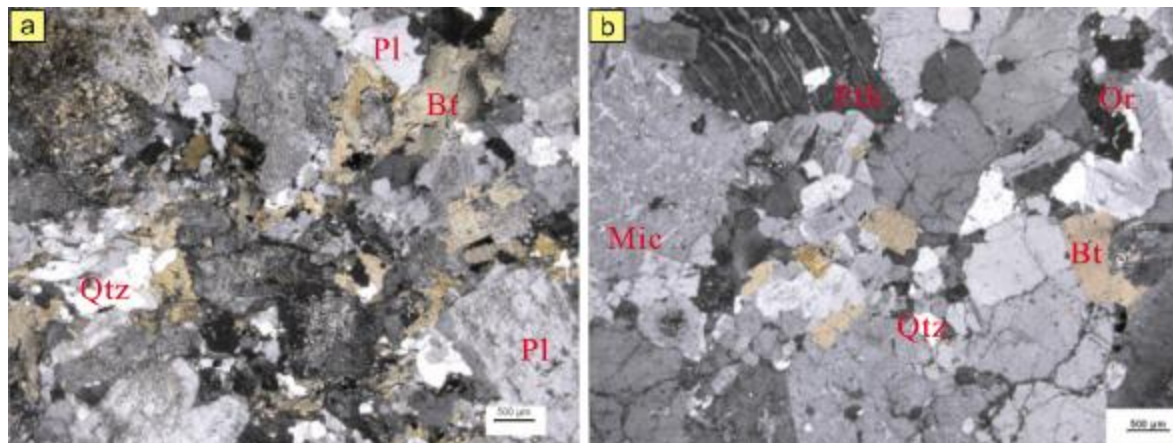


图 2 哈拉道口花岗闪长岩显微照片

Fig. 2 Microphotographs of the granodiorites in Haladaokou area

Pl—斜长石(plagioclase); Mic—微斜长石(microcline); Bt—黑云母(biotite); Qtz—石英(quartz); Or—正长石(orthoclase); Pth—条纹长石(perthite)

表 1.

D3396 样品锆石的晶型较好, 多呈长柱状、短柱状, 长宽比介于 3:2~4:1. 在阴极发光图像中, 锆石发育清晰的振荡生长环带(图 3), 同时锆石的 Th/U 比值较高, 除一个锆石 Th/U 值为 0.37 外, 其余锆石 Th/U 值均大于 0.54. 上述特征指示为典型的岩浆锆石^[23-26].

对该样品共进行了 20 个锆石颗粒的测定, 分析点均位于谐和线上及其附近(图 4), 具有很好的谐和度, 集中分布形成一组谐和年龄, 其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 352.6±2.6 Ma, MSDW=0.44, 代表了此样品岩浆结晶年龄.

D1452 样品锆石的晶型较好, 多呈长、短柱状, 长

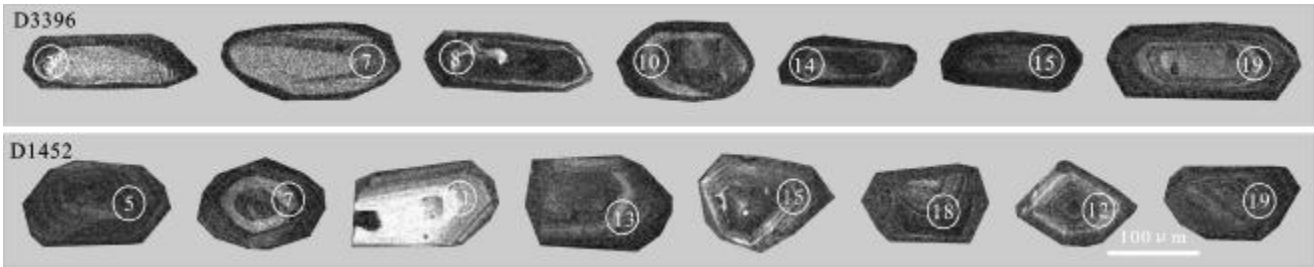


图 3 早石炭世花岗闪长岩部分锆石 CL 图像
Fig. 3 CL images of zircons in the Early Carboniferous granodiorites

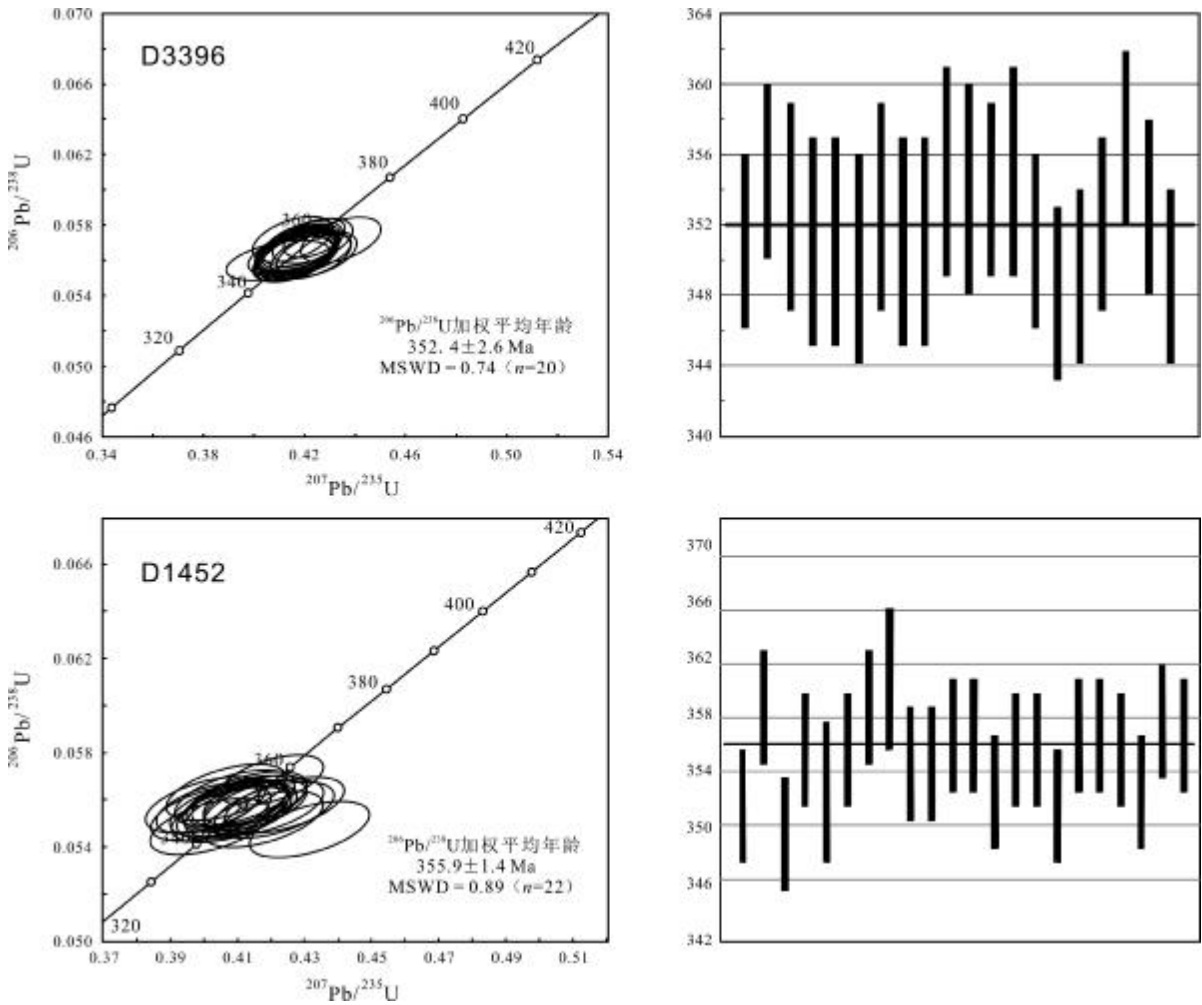


图 4 早石炭世花岗闪长岩锆石 ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 谐和图和加权平均图
Fig. 4 Concordia diagrams and weighted average ages of zircon ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U in the Early Carboniferous granodiorites

表 1 哈拉道口早石炭世花岗闪长岩 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Early Carboniferous granodiorites in Haladaokou area

样品号及 分析点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值 $\pm 1\sigma$				年龄/Ma $\pm 1\sigma$			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
D1452-01	27	399	402	0.99	0.40055	0.01184	0.05460	0.00072	347	9	348	4
D1452-02	24	205	386	0.53	0.41924	0.01019	0.05550	0.00071	361	7	353	4
D1452-03	12	173	185	0.94	0.40235	0.01292	0.05518	0.00074	348	9	351	5
D1452-04	62	746	942	0.79	0.40307	0.00871	0.05568	0.00070	349	6	354	4
D1452-05	26	237	432	0.55	0.40542	0.00978	0.05507	0.00070	351	7	351	4
D1452-06	22	223	358	0.62	0.42352	0.01141	0.05559	0.00072	364	8	354	4
D1452-07	57	549	897	0.61	0.41918	0.00897	0.05608	0.00070	360	6	357	4
D1452-08	37	394	588	0.67	0.41206	0.00978	0.05593	0.00071	355	7	356	4
D1452-09	36	283	603	0.47	0.41678	0.01186	0.05491	0.00072	359	8	350	4
D1452-10	13	102	212	0.48	0.45911	0.01465	0.05637	0.00074	389	10	359	5
D1452-11	37	406	578	0.70	0.41766	0.00992	0.05611	0.00071	359	7	357	4
D1452-12	44	429	705	0.61	0.42363	0.00916	0.05542	0.00069	364	7	353	4
D1452-13	25	340	378	0.90	0.40663	0.01019	0.05564	0.00071	351	7	354	4
D1452-14	34	351	540	0.65	0.41228	0.00942	0.05586	0.00070	356	7	355	4
D1452-15	35	246	581	0.42	0.40397	0.00928	0.05576	0.00071	350	7	355	4
D1452-16	40	522	584	0.89	0.44040	0.01240	0.05575	0.00073	376	9	355	4
D1452-17	44	692	623	1.11	0.40709	0.00934	0.05517	0.00070	352	7	351	4
D1452-18	56	793	826	0.96	0.40747	0.00876	0.05556	0.00070	352	6	354	4
D1452-19	49	462	795	0.58	0.40230	0.00869	0.05501	0.00069	348	6	350	4
D1452-20	78	922	1197	0.77	0.40760	0.00866	0.05587	0.00070	352	6	355	4
D1452-21	73	834	1115	0.75	0.41071	0.00828	0.05560	0.00069	354	6	354	4
D1452-22	32	469	463	1.01	0.41457	0.00981	0.05585	0.00071	357	7	355	4
D3396-01	8	84	123	0.68	0.41882	0.01490	0.05657	0.00098	353	11	353	6
D3396-02	26	349	365	0.96	0.42047	0.01107	0.05687	0.00090	354	8	355	5
D3396-03	9	73	136	0.54	0.42106	0.01481	0.05700	0.00097	355	11	355	6
D3396-04	29	175	370	0.47	0.42370	0.01005	0.05723	0.00089	357	7	357	5
D3396-05	23	261	348	0.75	0.41674	0.01272	0.05615	0.00092	352	9	350	6
D3396-06	22	229	335	0.68	0.42028	0.01018	0.05684	0.00089	354	7	354	5
D3396-07	16	196	223	0.88	0.42097	0.01177	0.05690	0.00092	355	8	355	6
D3396-08	17	200	244	0.82	0.41754	0.01159	0.05640	0.00091	352	8	352	6
D3396-09	21	304	292	1.04	0.41491	0.01046	0.05623	0.00089	350	8	351	5
D3396-10	18	202	270	0.75	0.41256	0.01078	0.05585	0.00089	349	8	348	5
D3396-11	25	352	348	1.01	0.41574	0.01076	0.05631	0.00088	351	8	351	5
D3396-12	18	249	255	0.98	0.41897	0.01272	0.05656	0.00091	353	9	353	6
D3396-13	15	140	231	0.61	0.41376	0.01116	0.05594	0.00090	350	8	349	5
D3396-14	16	154	249	0.62	0.41424	0.01071	0.05602	0.00090	350	8	349	5
D3396-15	18	221	268	0.83	0.43146	0.01267	0.05653	0.00090	362	9	352	5
D3396-16	24	349	339	1.03	0.41211	0.01026	0.05590	0.00088	348	7	349	5
D3396-17	12	113	185	0.61	0.41522	0.01208	0.05623	0.00093	351	9	351	6
D3396-18	30	296	458	0.65	0.41820	0.01677	0.05630	0.00102	353	12	351	6
D3396-19	14	147	204	0.72	0.41689	0.01206	0.05629	0.00092	352	9	351	6
D3396-20	14	157	199	0.79	0.42099	0.01310	0.05686	0.00096	355	9	355	6

宽比介于 1:1~3:1. 在阴极发光图像中,锆石发育清晰的振荡生长环带(图 3),同时锆石的 Th/U 比值较高,介于 0.42~1.11 之间,均大于 0.4. 上述特征指示所测锆石为典型的岩浆锆石^[23-26]. 对该样品共进行了 25 个锆石颗粒的测定,其中两个分析点谐和度不高,在作图时去除,其余 22 个分析点位于谐和线上及其附近(图 4),其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 355.9±1.4 Ma, MSDW=0.89,代表了此样品结晶年龄.

从 2 个测年样品可以看出,花岗闪长岩的成岩年龄为 352.4~355.9 Ma,表明其形成于早石炭世早期,代表了本区早石炭世花岗质岩浆作用. 这也是首次确认了赤峰地区存在早石炭世岩浆活动事件. 前人研究认为,华北板块北缘早石炭世岩浆活动微弱,近年来仅有个别报道,如内蒙古乌拉山地区约 353 Ma 的大桦背花岗岩^[27]、集宁地区约 342 Ma 的大南沟南部黑云母正长花岗岩^[28].

3 花岗闪长岩地球化学特征

样品主量元素、微量元素和稀土元素测试在中国地质调查局沈阳地质调查中心检测分析中心完成. 岩石化学分析数据见表 2、3.

早石炭世花岗岩样品 SiO₂ 含量为 63.67%~64.93%,属酸性岩类,在 TAS 分类图解(图 5)中均落在花岗闪长岩区域; Al₂O₃ 含量 14.49%~15.22%,含量中等; TiO₂、MgO、<FeO>和 P₂O₅ 含量偏低,分别为 0.49%~0.63%、1.69%~2.56%、2.03%~2.97%和 0.14%~0.19%; K₂O 含量相对偏高,为 2.68%~3.45%,在 SiO₂-K₂O 图解(图 6)中投影点均落于高钾钙碱性系列范围内; Na₂O+K₂O 为 6.48%~7.25%, Na₂O/K₂O 为 1.03 与 1.42,均大于 1,为富碱高钠岩石. A/CNK 为 0.91~0.98,在 ACNK-ANK 图解(图 7)中,投影点均落入准铝质区,说明岩石属于低铝质岩石, CIPW 标准矿物中未出现刚玉分子(C). 总体上看,该期花岗闪长岩属铝未

表 2 早石炭世花岗闪长岩主量元素分析结果
Table 2 Major element contents of the Early Carboniferous granodiorites

样品号	D1452-1	D1452-2	D1452-3	D1453-1	D1453-2	D3396-1	D3397-1	D3397-2
SiO ₂	64.93	64.62	64.54	64.18	63.67	63.20	63.74	64.32
TiO ₂	0.50	0.67	0.55	0.58	0.63	0.61	0.59	0.56
Al ₂ O ₃	14.49	15.17	15.12	14.73	14.69	15.22	14.74	14.78
TFe ₂ O ₃	4.36	4.84	4.39	4.55	5.32	4.89	4.82	4.34
FeO	2.03	2.74	2.29	2.61	2.97	2.92	2.65	2.38
MnO	0.10	0.08	0.07	0.08	0.09	0.09	0.08	0.07
MgO	1.69	2.20	2.06	2.10	2.56	2.32	2.21	2.01
CaO	3.15	3.90	3.13	3.34	3.47	3.71	3.34	3.35
Na ₂ O	4.13	3.81	3.84	3.81	3.35	3.94	3.95	3.83
K ₂ O	3.13	2.68	3.11	3.45	3.26	3.15	3.10	3.33
P ₂ O ₅	0.14	0.18	0.17	0.16	0.17	0.19	0.17	0.18
LOI	3.14	2.01	3.11	3.16	2.58	2.86	3.37	3.34
Total	99.74	100.1	100.0	100.1	99.79	100.1	100.1	100.1
A/NK	1.42	1.66	1.56	1.47	1.63	1.54	1.50	1.49
A/CNK	0.91	0.93	0.98	0.92	0.96	0.92	0.93	0.92
Na ₂ O+K ₂ O	7.25	6.48	6.95	7.26	6.60	7.09	7.05	7.16
Na ₂ O/K ₂ O	1.32	1.42	1.23	1.11	1.03	1.25	1.27	1.15
AR	2.4	2.03	2.23	2.34	2.14	2.2	2.28	2.31
R1	1980	2098	2038	1926	2060	1854	1924	1975
R2	716	818	740	755	787	810	762	756

含量单位: %(质量分数).

表 3 早石炭世花岗闪长岩微量元素、稀土元素分析结果

Table 3 Trace and rare earth element contents of the Early Carboniferous granodiorites

样品号	D1452-1	D1452-2	D1452-3	D1453-1	D1453-2	D3396-1	D3397-1	D3397-2
La	24.04	41.81	26.85	32.17	30.18	26.67	27.60	29.65
Ce	43.54	79.12	53.77	63.48	56.57	53.73	54.46	57.22
Pr	4.40	8.39	6.05	7.01	5.91	6.03	6.05	6.25
Nd	15.32	29.08	21.39	24.98	20.90	21.88	21.57	21.88
Sm	2.80	4.82	3.69	4.26	3.67	3.81	3.69	3.69
Eu	0.83	1.25	1.09	1.21	0.84	1.08	1.07	1.09
Gd	2.35	3.66	2.93	3.39	3.03	2.99	2.92	2.97
Tb	0.35	0.57	0.44	0.54	0.42	0.48	0.45	0.46
Dy	1.90	3.06	2.43	2.89	2.26	2.55	2.44	2.43
Ho	0.38	0.61	0.48	0.55	0.44	0.50	0.48	0.47
Er	1.07	1.56	1.24	1.46	1.20	1.30	1.26	1.27
Tm	0.17	0.29	0.23	0.28	0.19	0.24	0.24	0.23
Yb	1.13	1.68	1.28	1.49	1.26	1.34	1.30	1.37
Lu	0.17	0.28	0.20	0.25	0.19	0.21	0.21	0.21
Y	11.66	16.09	12.62	14.68	13.27	13.25	13.00	12.88
ΣREE	98	176	122	143	127	122	123	129
LREE	90	164	112	133	118	113	114	119
HREE	7.52	11.72	9.24	10.84	9.00	9.61	9.30	9.41
L/H	12.10	14.04	12.21	12.28	13.12	11.78	12.31	12.72
(La/Yb) _N	15.31	17.87	15.10	15.49	17.14	14.25	15.29	15.47
δEu	0.97	0.88	0.98	0.94	0.74	0.94	0.97	0.98
δCe	0.96	0.98	0.99	0.99	0.98	1.00	0.99	0.98
Sc	7.32	9.89	8.79	10.16	9.65	9.92	9.63	8.80
V	70.50	94.11	88.13	88.70	83.78	91.87	92.03	82.38
Cr	19.05	24.55	22.37	22.10	38.41	24.43	30.09	24.12
Co	11.07	13.82	11.92	12.85	12.70	14.21	14.16	10.91
Ni	17.79	16.42	16.31	16.64	22.84	17.56	18.62	16.37
Be	2.13	2.04	1.97	1.77	1.78	1.87	1.75	1.66
Rb	94	89	109	112	97	121	108	111
Sr	500	614	611	508	512	562	525	511
Ba	580	433	558	601	549	484	587	547
Li	16.60	15.51	22.07	22.77	26.57	14.58	22.77	21.03
Zr	111	136	98	120	136	125	121	110
Nb	12.24	18.62	12.52	14.58	13.10	13.91	14.11	13.57
Hf	3.20	0.98	0.71	0.79	5.78	0.83	0.75	0.70
Ta	1.44	1.60	1.15	1.35	2.40	1.06	1.25	1.26
Th	8.39	12.95	12.62	9.61	18.54	6.68	9.81	8.94
U	1.47	3.55	2.68	2.33	2.20	2.15	2.18	1.89
Sr/Y	42.90	38.20	48.43	34.62	38.65	42.41	40.40	39.73
Zr+Nb+Ce+Y	179	250	177	213	219	206	203	194

含量单位: 10⁻⁶.

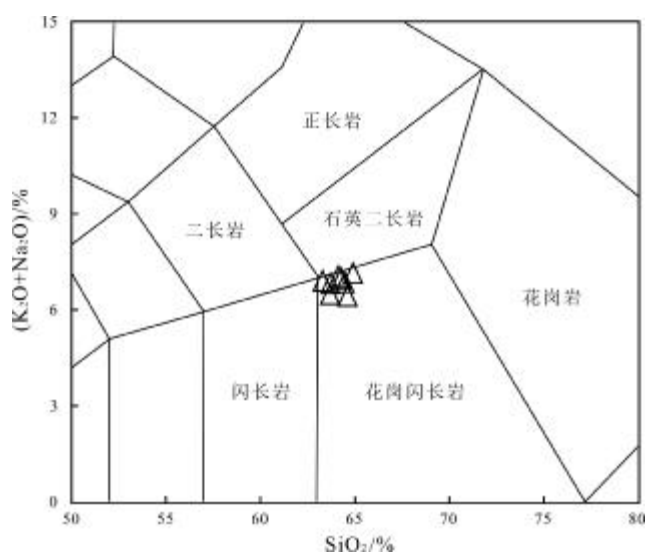
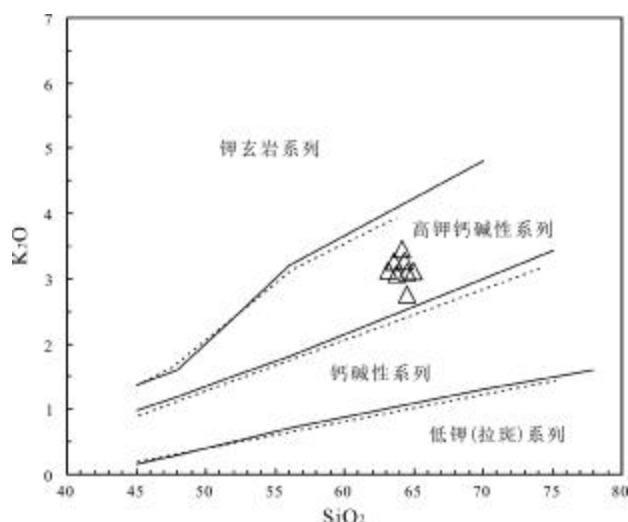


图5 花岗闪长岩 TAS 分类图解

Fig. 5 The TAS classification diagram of granodiorites

图6 花岗闪长岩 SiO_2 - K_2O 图解Fig. 6 The SiO_2 - K_2O diagram of granodiorites

饱和、高钾钙碱性系列岩石。

岩石稀土元素总量 ($\sum \text{REE}$) 介于 $98.45 \times 10^{-6} \sim 176.19 \times 10^{-6}$, 其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 LREE/HREE 值分别为 $15.31 \sim 17.14$ 和 $12.10 \sim 14.04$, 具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型稀土元素配分模式 (图 8)。重稀土曲线相对较缓, 而轻稀土曲线较陡, 表明轻稀土元素分异程度较高, 而重稀土元素分异程度相对偏低。 δEu 值为 $0.74 \sim 0.98$, 呈现出轻微的负 Eu 异常。富集大离子亲石元素 (LILE, Rb, Ba, K, La, Sr), 略亏损高场强元素 (HFSE, Nb, Ta), 略微富集高场强元素 Zr、Hf, 并且具有 Ba、La 正异常和 P、Ti 负异常的特征 (图 9), 说

明花岗闪长岩的原始岩浆起源于地壳物质的部分熔融。考虑其具有轻微 Eu 负异常或无 Eu 异常, 暗示其地壳层位可能相对较深。

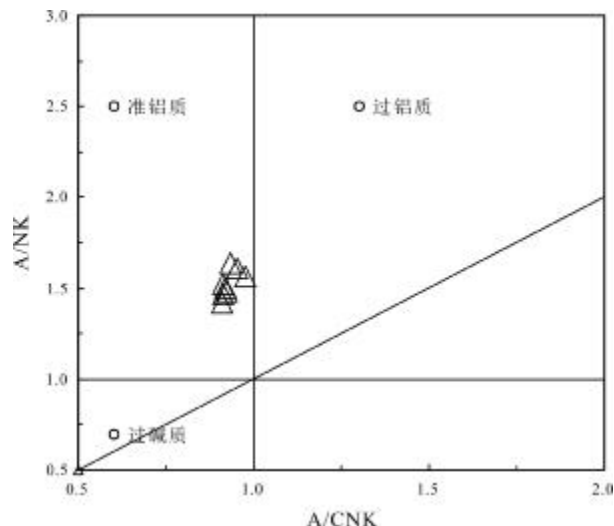


图7 花岗闪长岩 A/CNK-A/NK 图解

Fig. 7 The A/CNK-A/NK diagram of granodiorites

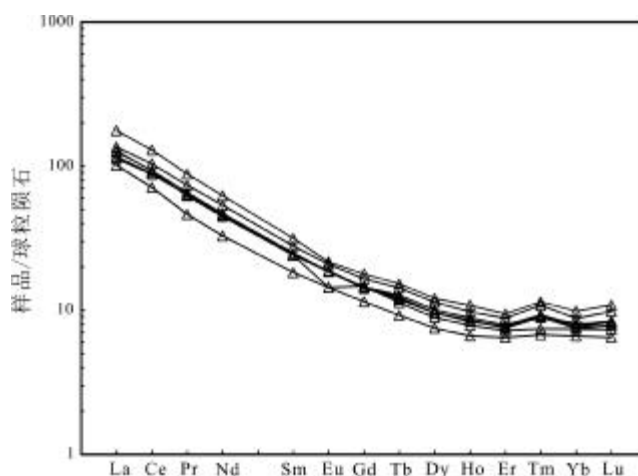


图8 花岗闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of granodiorites

4 讨论

4.1 早石炭世花岗闪长岩成因

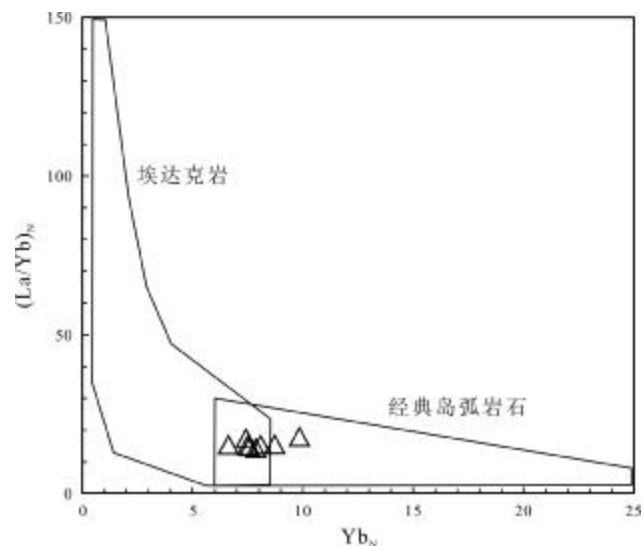
岩石化学、地球化学等特征显示出早石炭世中粒花岗闪长岩属铝未饱和、高钾钙碱性系列岩石, 推断为 I 型花岗岩。 SiO_2 含量为 $63.67\% \sim 64.93\%$ (均大于 56%); Al_2O_3 含量 $14.49\% \sim 15.22\%$, 含量中等, 处于 15% 左右; Na_2O $3.35\% \sim 4.13\%$ ($>3.5\%$), Sr 含量 $500.3 \times 10^{-6} \sim 614.73 \times 10^{-6}$ ($>400 \times 10^{-6}$)。较低的 MgO 含量 ($1.69\% \sim$



图9 花岗闪长岩原始地幔标准化微量元素配分模式图

Fig. 9 Primitive mantle-normalized trace element spidergram of granodiorites

2.56%, < 3%), Y 含量($11.66 \times 10^{-6} \sim 12.27 \times 10^{-6}$, $< 18 \times 10^{-6}$)、Yb 含量($1.13 \times 10^{-6} \sim 1.49 \times 10^{-6}$, $< 1.9 \times 10^{-6}$), 具有轻微的负 Eu 异常(δEu 主体为 0.94~0.98), 富集 LREEs, 亏损 HREEs 和 HFSEs, Sr/Y 比值介于 34.62~48.43, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值为 15.31~17.14 之间, 具有埃达克岩特征^[29-31]. 在 $\text{Yb}_N - (\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解(图 10)中, 早石炭世花岗闪长岩落在了埃达克岩区域。

图10 早石炭世花岗闪长岩 $\text{Yb}_N - (\text{La}/\text{Yb})_N$ 图Fig. 10 The $\text{Yb}_N - (\text{La}/\text{Yb})_N$ diagram of Early Carboniferous granodiorites

最开始在阿留申群岛发现的具有埃达克岩地球化学特征的岩石是由年轻的(<25 Ma)并且是热的俯冲洋壳在 75~85 km 深处发生部分熔融形成的埃达克质

熔体^[29, 32-33], 被称为经典埃达克岩. 此种情况形成的岩浆在上升过程中与上覆地幔楔发生物质交换作用, 通常形成准铝质的钙碱性系列埃达克质岩石, 并具有相对较低的 K 含量和 Rb/Sr 比值 (0.04~0.05)、较高的 $\text{Mg}^\#$ 值($\text{Mg}^\# > 47$)^[33-34] 和 Cr、Ni 含量($\text{Cr} > 36 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} > 24 \times 10^{-6}$). 与经典的埃达克岩相比, 早石炭世花岗闪长岩具有较高的 K_2O 含量 (2.68%~3.45%)、Rb/Sr 比值 (0.15~0.22), 较低的 $\text{Mg}^\#$ 值 (38~41)、Cr 含量 ($19.05 \times 10^{-6} \sim 38.41 \times 10^{-6}$)、Ni 含量 ($16.31 \times 10^{-6} \sim 22.84 \times 10^{-6}$), 所以不属于俯冲型埃达克岩^[32].

近年来许多学者认为埃达克岩不仅可以由老的俯冲洋壳形成^[32], 还可能与加厚下地壳底部基性岩或底侵玄武岩的部分熔融有关^[31, 35-36]. 地球化学特征显示, 早石炭世花岗闪长岩与华北型埃达克岩相类似^[37], 为“C 型埃达克岩”^[35, 37-38].

中国东部 C 型埃达克岩有以下两种成因: 1) 拆沉下地壳物质的熔融^[39-40]; 2) 增厚下地壳镁铁质岩的部分熔融^[31, 35-36, 41]. 下地壳熔融和玄武质岩石在 1.0~4.0 GPa 的条件下熔融形成的埃达克质岩浆或熔体的 $\text{Mg}^\#$ 一般小于 47^[34, 42]. 实验岩石学研究表明, MORB 发生部分熔融产生的熔体 $\text{Mg}^\#$ 一般不超过 45, 因此 $\text{Mg}^\# > 50$ 的埃达克岩说明在其形成演化过程中曾受到比玄武岩更基性物质的混染, 因此很多学者用埃达克质熔体与地幔发生混合的模式来解释^[32, 42]. 实验岩石学研究显示, 埃达克岩与橄榄岩发生 10% 的混染便可导致熔体的 $\text{Mg}^\#$ 从 44 提高到 55^[32]. 由于在拆沉下地壳物质熔融形成埃达克质岩浆时, 从下地壳拆离的榴辉岩密度大于地幔, 在重力影响下沉入软流圈的地幔中, 在地幔热力的影响下发生部分熔融形成埃达克质岩石的原始岩浆, 此岩浆会与其周围的地幔橄榄岩发生反应, 所以由此种模式形成的埃达克质岩的 $\text{Mg}^\#$ 一定很高, 形成富镁的埃达克岩^[43]. 早石炭世花岗闪长岩具有较高的 K_2O 含量 (2.68%~3.45%), 较低的 $\text{Mg}^\#$ 值 (38~41)、Cr 含量 ($19.05 \times 10^{-6} \sim 38.41 \times 10^{-6}$)、Ni 含量 ($16.31 \times 10^{-6} \sim 22.8 \times 10^{-6}$), 不同于拆沉下地壳物质熔融形成的低 Th/U 比值, 高 MgO 、Cr 和 Ni 含量的埃达克质岩石^[40, 44], 所以推测花岗闪长岩埃达克质岩体不可能是由拆沉下地壳物质的熔融形成, 而是形成于增厚下地壳镁铁质岩的部分熔融。

4.2 早石炭世花岗闪长岩形成的构造背景

地球化学等特征显示出早石炭世中粒花岗闪长岩属铝未饱和、高钾钙碱性系列岩石,为 I 型花岗岩。地球化学特征显示其可能形成于火山弧环境,在早石炭世花岗闪长岩 Nb-Y、Rb-(Yb+Ta)和 Rb-(Y+Nb)图解(图 11)上可以看出,3 个图中样品均落在火山弧的范围内。将花岗闪长岩与 Miniar(1999)的造山花岗岩的构造环境判别比值进行对比(表 4),早石炭世花岗岩类的构造环境应与岛弧花岗岩(IAG)相接近。因此本区早石炭世花岗闪长岩形成于活动大陆边缘弧环境。

区域上,不整合于包尔汗图-白乃庙岛弧和徐尼乌苏组弧后盆地沉积之上的上志留统西别河组磨拉石建造,标志着华北克拉通北缘的一次弧陆碰撞事

件的结束^[15, 45-46],随后在泥盆纪早期出现同碰撞环境下的英云闪长岩(417 Ma)以及赤峰地区八当山火山岩(403 Ma)^[17, 47],说明白乃庙岛弧在早泥盆世(约 403 Ma)与华北板块碰撞拼贴结束。紧接着在 390~370 Ma,一套“双峰式火山岩”在华北板块北缘及其早古生代增生带两大构造单元呈带状分布,应该是与白乃庙岛弧与华北板块碰撞拼贴后的伸张作用有关^[18-19, 48-49]。白乃庙岛弧与华北板块碰撞拼贴完成后,古亚洲洋板块继续向南俯冲,在本区形成了早石炭世早期花岗闪长岩,随后持续的俯冲形成了平行于华北板块北缘边界东西向出露的大面积的早石炭世晚期一晚石炭侵入岩。这些侵入岩在空间分布、矿物组合、岩石组合、岩石地球化学及同位素组成等方面均显示出

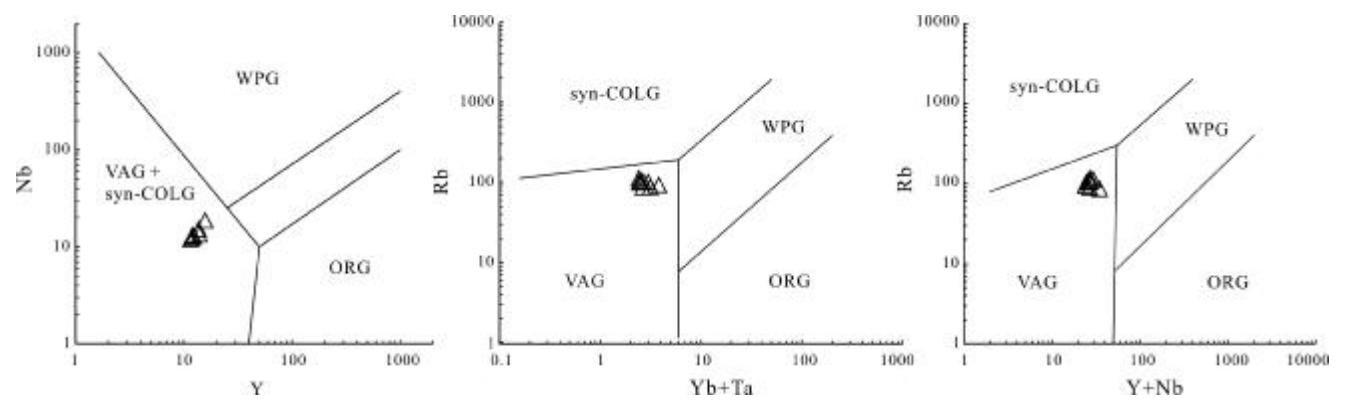


图 11 早石炭世花岗闪长岩 Nb-Y、Rb-(Yb+Ta)和 Rb-(Y+Nb)图解

Fig. 11 The Nb-Y, Rb-(Yb+Ta) and Rb-(Y+Nb) diagrams of Early Carboniferous granodiorites

VAG—火山弧花岗岩(volcanic arc granite); WPG—板内花岗岩(within-plate granite); syn-COLG—同碰撞花岗岩(syn-collision granite); ORG—洋中脊花岗岩(oceanic ridge granite)

表 4 早石炭世花岗闪长岩与 Maniar 花岗岩类构造环境化学参数对比表

Table 4 Comparison of geochemical parameters by tectonic settings between the Early Carboniferous granodiorites and Maniar granites

类别	花岗闪长岩	岛弧花岗岩(IAG)	大陆弧花岗岩(CAG)	大陆碰撞花岗岩(CCG)	后造山花岗岩(POG)
SiO ₂	63.67~64.93	60~68	62~76	70~76	70~78
钙碱指数	钙碱性	钙性-钙碱性	钙碱性	钙碱性-碱钙性	碱钙性
山德指数	偏铝质	偏铝质	偏铝质过铝质	过铝质	过铝质偏铝质
Na ₂ O/CaO	0.96~1.31	1.0	4.0	2.0~10.0	2.0~18.0
Na ₂ O/K ₂ O	1.03~1.42	0.4~0.43	0.4~2.0	0.4~1.5	0.6~1.2
MgO/TF ₂ O	0.39~0.48	0.3~0.85	0.10~0.50	0.05~0.6	0.02~0.3
MgO/MnO	17.38~29.80	12.0~28.0	2.0~38.0	2.0~45.0	2.0~18.0
Al ₂ O ₃ /(Na ₂ O+K ₂ O)	2.00~2.34	>1.5	>1.1	>1.1	0.9~1.4

活动大陆边缘岩浆弧特征^[28,48,50],

5 结论

(1)在赤峰哈拉道口地区识别出花岗闪长岩,锆石 U-Pb 定年结果为 352.4~355.9 Ma,表明其形成于早石炭世早期,代表了本区早石炭世花岗质岩浆作用。

(2)地球化学特征显示早石炭世早期具有埃达克岩性质,属于“C 型埃达克岩”,但其具有较高的 K₂O 含量(2.68%~3.45%),较低的 Mg[#] 值(38~41)、Cr 含量(19.05×10⁻⁶~38.41×10⁻⁶)、Ni 含量(16.31×10⁻⁶~22.84×10⁻⁶),显示其不可能是由拆沉下地壳物质的熔融形成,而是形成于增厚下地壳镁铁质岩的部分熔融。

(3)微量元素特征显示花岗闪长岩形成于活动大陆边缘弧环境。早泥盆世白乃庙岛弧与华北板块碰撞拼贴完成后,古亚洲洋板块继续向南俯冲,在本区形成了早石炭世早期花岗闪长岩,以及随后出露的大面积的早石炭世晚期—晚石炭世侵入岩。

参考文献:

- [1] Tang K D. Tectonic development of Paleozoic foldbelts at the north margin of the Sino-Korean craton[J]. *Tectonics*, 1990,9(2):249-260.
- [2] 赵春荆,彭玉鲸,党增欣,等. 吉黑东部构造格架及地壳演化[M]. 沈阳:辽宁大学出版社,1996:1-186.
- [3] 邵济安,臧绍先,牟保磊,等. 造山带的伸展构造与软流圈隆起——以兴蒙造山带为例[J]. *科学通报*,1994,39(6):533-537.
- [4] 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)*,1997,27(5):390-394.
- [5] 李锦轶. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识[J]. *地质论评*,1998,44(4):339-347.
- [6] 吴福元,孙德有,林强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. *岩石学报*,1999,15(2):181-189.
- [7] 吴福元,Wilde A,孙德有. 佳木斯地块片麻状花岗岩的锆石离子探针 U-Pb 年龄[J]. *岩石学报*,2001,17(3):443-452.
- [8] 孙德有,吴福元,张艳斌,等. 西拉木伦河—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[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,2004,34(2):174-181.
- [9] 李益龙,周汉文,钟增球,等. 华北与西伯利亚板块的对接过程:来自西拉木伦缝合带变形花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄证据[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*,2009,34(6):931-938.
- [10] Song S G, Wang M M, Xu X, et al. Ophiolites in the Xing'an-Inner Mongolia accretionary belt of the CAOB: Implications for two cycles of seafloor spreading and accretionary orogenic events[J]. *Tectonics*, 2015,34(10):2221-2248, doi:10.1002/2015TC003948.
- [11] 赵越,翟明国,陈虹,等. 华北克拉通及相邻造山带古生代—侏罗纪早期大地构造演化[J]. *中国地质*,2017,44(1):44-60.
- [12] Liu Y J, Li W M, Feng Z Q, et al. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 2017,43:123-148.
- [13] 李朋武,高锐,管焯,等. 古亚洲洋和古特提斯洋的闭合时代——论二叠纪末生物灭绝事件的构造起因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,2009,39(3):521-527.
- [14] 张晓晖,张宏福,汤艳杰,等. 内蒙古中部锡林浩特—西乌旗早三叠世 A 型酸性火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*,2006,22(11):2769-2780.
- [15] 李锦轶,张进,杨天南,等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,2009,39(4):584-605.
- [16] 田树刚,李子舜,张永生,等. 内蒙东部及邻区晚石炭世—二叠纪构造古地理环境及演变[J]. *地质学报*,2016,90(4):688-707.
- [17] 刘建峰,李锦轶,迟效国,等. 华北克拉通北缘与弧—陆碰撞相关的早泥盆世长英质火山岩——锆石 U-Pb[J]. *地质通报*,2013,32(2/3):267-278.
- [18] 叶浩,张拴宏,赵越,等. 内蒙古赤峰地区泥盆纪晚期火山岩的发现及其地质意义[J]. *地质通报*,2014,33(9):1274-1283.
- [19] 徐博文,郝爱华,葛玉辉,等. 内蒙古赤峰地区晚古生代 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. *地质学报*,2015,89(1):58-69.
- [20] 邵济安,张舟,余宏全,等. 华北克拉通北缘赤峰地区显生宙麻粒岩的发现及其意义[J]. *地学前缘*,2012,19(3):188-198.
- [21] 段培新,李长民,刘翠,等. 内蒙古赤峰金厂沟梁金矿区花岗岩类年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*,2014,30(11):3189-3202.
- [22] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb[J]. *Chemical Geology*, 2002,192(1/2):59-79.
- [23] Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002,143(5):602-622.
- [24] Hoskin P W O, Ireland T R. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator [J]. *Geology*, 2000,28(7):627-630.
- [25] 钟玉芳,马昌前,余振兵. 锆石地球化学特征及地质应用研究综述[J]. *地质科技情报*,2006,25(1):27-34,40.
- [26] 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. *地质调查与研究*,2009,33(3):161-174.
- [27] 苗来成, Qiu Y M,关康,等. 内蒙古乌拉山地区大桦背岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *地质论评*,2001,47(2):169-174.
- [28] 张臣,刘树文,韩宝福,等. 内蒙古商都大石沟花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. *岩石学报*,2007,23(3):591-596.
- [29] Defant M J, Xu J F, Kepezhinskis P, et al. Adakites: Some variations on a theme[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002,18(2):129-

- 142.
- [30]Castillo P R. 埃达克岩成因回顾[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 617–627.
- [31]张旗, 秦克章, 王元龙, 等. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 195–204.
- [32]Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662–665.
- [33]Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 2005, 79(1/2): 1–24.
- [34]Smithies R H. The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 182(1): 115–125.
- [35]张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 236–244.
- [36]王强, 许继峰, 赵振华. 一种新的火成岩——埃达克岩的研究综述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 201–208.
- [37]张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 晚中生代的中国东部高原: 证据、问题和启示[J]. 地质通报, 2008, 27(9): 1404–1430.
- [38]葛小月, 李献华, 陈志刚, 等. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约[J]. 科学通报, 2002, 47(6): 474–480.
- [39]王强, 赵振华, 许继峰, 等. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 351–360.
- [40]Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(1): 119–144.
- [41]Xiong X L, Li X H, Xu J F, et al. Extremely high-Na adakite-like magmas derived from alkali-rich basaltic underplate: The Late Cretaceous Zhantang andesites in the Huichang Basin, SE China[J]. *Geochemical Journal*, 2003, 37(2): 233–252.
- [42]Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa [J]. *Chemical Geology*, 1999, 160(4): 335–356.
- [43]Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 2004, 432(7019): 892–897.
- [44]Karsli O, Ketenci M, Uysal I, et al. Adakite-like granitoid porphyries in the Eastern Pontides, NE Turkey: Potential parental melts and geodynamic implications[J]. *Lithos*, 2011, 127(1/2): 354–372.
- [45]苏养正. 中国东北区二叠纪和早三叠世地层[J]. 吉林地质, 1996, 15(3/4): 55–65.
- [46]陶继雄, 白立兵, 宝音乌力吉, 等. 内蒙古满都拉地区二叠纪俯冲造山过程的岩石记录[J]. 地质调查与研究, 2003, 26(4): 241–249.
- [47]张维, 简平. 内蒙古达茂旗北部早古生代花岗岩类 SHRIMP U–Pb 年代学[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 778–787.
- [48]张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 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[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 824–842.
- [49]郭森. 赤峰地区基性岩年代学及其地质意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [50]张拴宏, 赵越, 宋彪, 等. 冀北隆化早前寒武纪高级变质区内的晚古生代片麻状花岗闪长岩——锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其构造意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 621–626.