大兴安岭牙克石乌奴尔地区晚石炭世正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义

李利阳[1)],陈满[1)],龚全德[1)],张传恒[2)],王献[1)]

1)武警黄金第四支队,辽宁辽阳,111000; 2)中国地质大学(北京),北京,100083

内容提要:内蒙古牙克石市乌奴尔地区位于西伯利亚板块东南缘古生代陆缘增生带,该区发育大量正长花岗岩。本文对该区正长花岗岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和岩石地球化学测试。结果表明:正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 310.8±2.5 Ma(MSWD=1.6),属晚石炭世。岩石地球化学数据显示,岩体属高钾钙碱性系列,铝饱和指数 A/CNK=1.03~1.08,为过铝质花岗岩。岩石整体富集 Rb、Th 等大离子亲石元素,亏损 Ba、Sr 以及高场强元素 Nb、Ti,LREE 相对富集,HREE 相对亏损,具有明显的负 Eu 异常(δEu=0.36~0.90)。岩石地球化学分析表明,正长花岗岩具有 S 型花岗岩特征,具有壳源的特征,源岩为泥质岩,形成于中等温度(700~720 ℃)、低压(0.15~0.2 GPa)环境。综合区域地质特征及本次研究认为,正长花岗岩应为晚石炭世古亚洲洋闭合时的产物,为古亚洲洋的闭合及东北地块构造演化研究提供了新的约束和佐证实例。

关键词:大兴安岭、内蒙古、乌奴尔地区;正长花岗岩;U-Pb 年龄;地球化学

中亚造山带是全球最大的造山带之一,其形成与古亚洲洋的构造演化密切相关。古亚洲洋从形成(1.0 Ga)(Khain et al.,2002)到最终闭合(250 Ma)(孙德有等,2004;汪相,2018),最新研究显示,最终闭合可能在晚白垩世(吕洪波等,2018),但无论最终闭合时间是晚古生代或晚白垩世,古亚洲洋的构造演化都经历了多期次的俯冲作用,形成了大量的增生杂岩、岩浆弧、海底高原、洋岛等构造单元,导致现今中亚造山带复杂的构造格局(Windley et al.,2007)。

大兴安岭地区位于中亚造山带的东段,是研究造山带构造演化的重要窗口之一。古亚洲洋在该区的闭合经历了多地块的拼贴过程。早古生代,大兴安岭地区发育大量与俯冲作用密切相关的岩浆岩,如内蒙古苏尼特左旗发育 490~429 Ma 的白音宝力道岩体(Chen Bin et al.,2002;刘敦一等,2003;石玉若等,2004);索伦地区发育 439 Ma 的岛弧玄武岩(郭锋等,2009);多宝山地区出露 485 Ma 的花岗闪长岩(葛文春等,2007)及奥陶纪钙碱性火山岩(余金杰等,1996),这些材料暗示区内经历过多次洋盆俯冲作用与岩浆弧形成事件。晚古生代岩浆岩也较为发育,但其形成的构造环境却一直存在争议,部分学者认为古亚洲洋于早古生代末期就已经闭合,晚古生代岩浆岩形成于裂谷(裂陷槽)环境(唐克东,1989;苏养正,1996),而多数学者则认为古亚洲洋于晚二叠世闭合(Li Jinyi,2006;孙德有等,2004),岩浆岩形成于俯冲带,苏尼特左旗—西乌珠穆沁旗一线也已证实石炭纪岩浆弧的存在(Chen Bin et al.,2002;刘建峰等,2009),最新也有学者认为,古亚洲洋的最终闭合时间为晚白垩世(吕洪波等,2018),狼山蛇绿混杂岩为关键的证据。然而,大兴安岭北部却一直缺少泥盆纪—石炭纪与俯冲作用相关的岩浆岩。

大兴安岭地区发育大量晚古生代花岗岩,记录了这一时期的构造演化过程。但其研究程度很低,一直缺少精确的年代学和系统的地球化学研究,形成环境一直存在争议。本文对牙克石乌奴尔地区正长花岗岩进行了年代学、岩石地球化学研究,探讨了岩石成因及形成的构造背景,为区域构造演化提供新的依据。

注:本文为中国地质调查项目"内蒙古高吉山林场(M51E020005)、哈拉沟(M51E020006)幅 1∶5 万区域地质矿产调查(DD2016007808)"的成果。

收稿日期:2018-09-29;改回日期:2019-02-14;责任编辑:章雨旭。Doi:10.16509/j.georeview.2019.02.009

作者简介:李利阳,男,1989 年生,硕士,主要从事岩浆岩及大地构造方面研究,Email:406054622@qq.com。

1 地质背景

研究区位于大兴安岭北部牙克石乌奴尔地区，构造上属于兴安地块，北部与额尔古纳地块相邻，南部为松嫩地块(图 1)。区内奥陶系具有岛弧—弧后盆地火山沉积建造特征(苏养正，1996)，出露地层主要为多宝山组、裸河组，多宝山组主要为一套岛弧特征的中酸性火山岩，裸河组为一套具有活动大陆边缘性质的陆缘碎屑岩(肖霞等，2016；陈安霞等，2016)，区内志留纪地层缺失，泥盆系主要为泥鳅河组和大民山组，泥鳅河组为一套陆缘碎屑岩(张海华等，2004)，大民山组为一套具有岛弧性质的中酸性火山岩与火山碎屑岩互层(刘娜，2012；张渝金等，2016)。中侏罗世以来受鄂霍茨克洋闭合和环太平洋构造域的双重影响，侏罗纪早期北东向断裂复活、并新形成了一系列受北东向断裂构造控制的火山隆起和火山断(拗)陷盆地，发生强烈的火山活动，中生代地层主要为满克头鄂博组、玛尼吐组、白音高老组，满克头鄂博组主体为一套酸性火山岩、玛尼吐组主体为一套中性火山岩、白音高老组主体为一套酸性火山岩(邵积东等，2011；张吉衡，2009)。本次研究的正长花岗岩被中生代白音高老组及第四系覆盖(图 1)。

2 岩石学特征

岩性主要为中细粒正长花岗岩、中粗粒正长花岗岩。岩石风化面为褐色，新鲜面为肉红色，花岗结构(图 2a、2b)，块状构造。主要矿物成分为石英、钾长石、斜长石。石英，无色，透明，粒径 0.1～8.0 mm，含量 30%～50%；斜长石，无色，透明，聚片双晶，粒径 0.1～3.0 mm，含量 40%～50%；钾长石，无色，透明，主要为条纹长石，弱黏土化，粒径 0.2～7.0 mm，含量 10%～20%。

3 年代学特征

锆石分选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。经重液浮选和电磁分离分选后，在双目镜下挑选出晶型完好、透明度高、无包裹体和无裂纹的锆石颗粒作为测定对象。挑选好的锆石和标样一起固定在环氧树脂中抛光制靶，进行阴极发光、透射

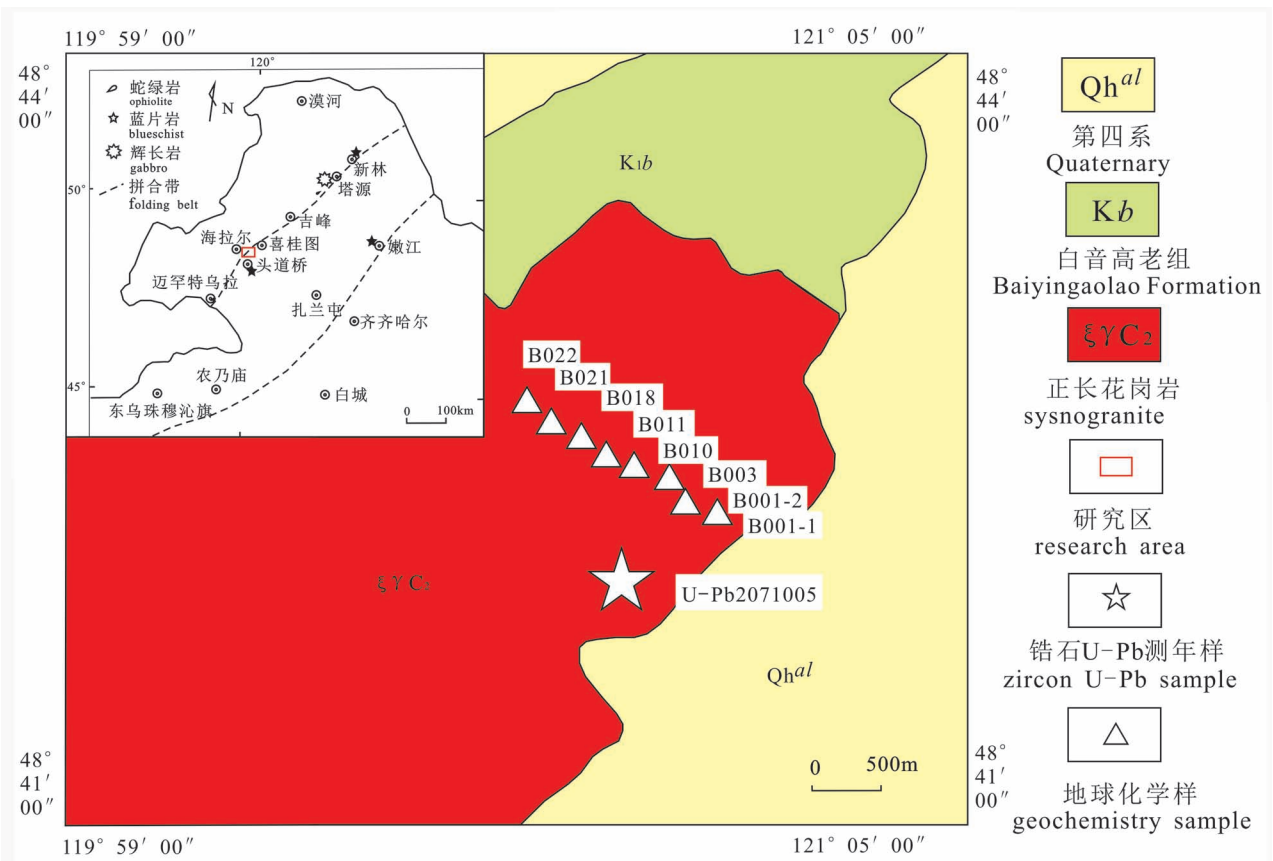


图 1 大兴安岭牙克石市乌奴尔地区地质简图及采样位置

Fig. 1 Sketch geologic map of Wunuer area, Great Hinggan Mountains and the sampling position

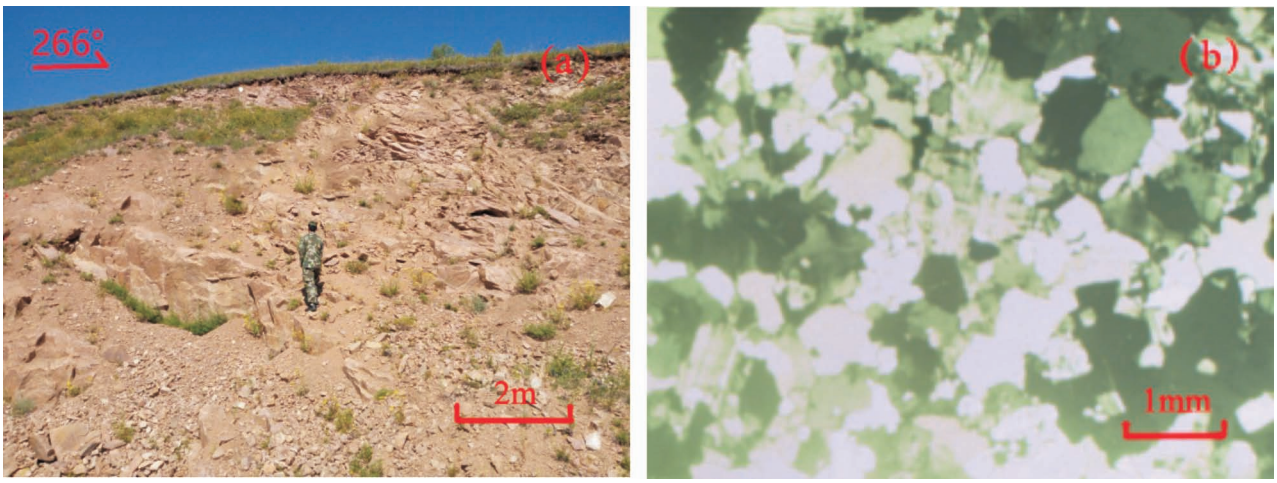


图 2 大兴安岭牙克石乌奴尔地区正长花岗岩野外照片和显微照片

Fig. 2 field occurrence(a) and microphotograph(b) of syenogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains

光和单偏光照相。锆石阴极发光(CL)图像分析在北京锆石领航科技有限公司高分辨热场发射能谱阴极发光室进行,锆石原位 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析测年在北京科荟测试技术有限公进行,对测试数据进行普通铅校正,年龄计算和谐和图绘制采用 Isoplot 程序。

样品(U/Pb20171005)采自工作区高吉山林场幅南部(取样点位置:E:121°02′48″,N:48°41′03″,由 GPS 确定),所采样品新鲜无蚀变,重约 5kg,本次研究对所选 25 颗锆石进行 U-Pb 测年,锆石阴极发光(CL)图像显示,锆石形态多为长柱状,具有典型的岩浆生长振荡环带和韵律结构,属于岩浆结晶的产物(图 3),锆石粒度多在 100~200 μm 之间,柱状晶体长宽比多数为 1.5~2.0。锆石晶体测定位置的选取,需要结合透射光、反射光和 CL 图像,以避开锆石晶体中的裂纹和包裹体,选取的分析点均位于明显的岩浆环带部位。

测定结果显示(表 1),25 个数据中,除 3 个数

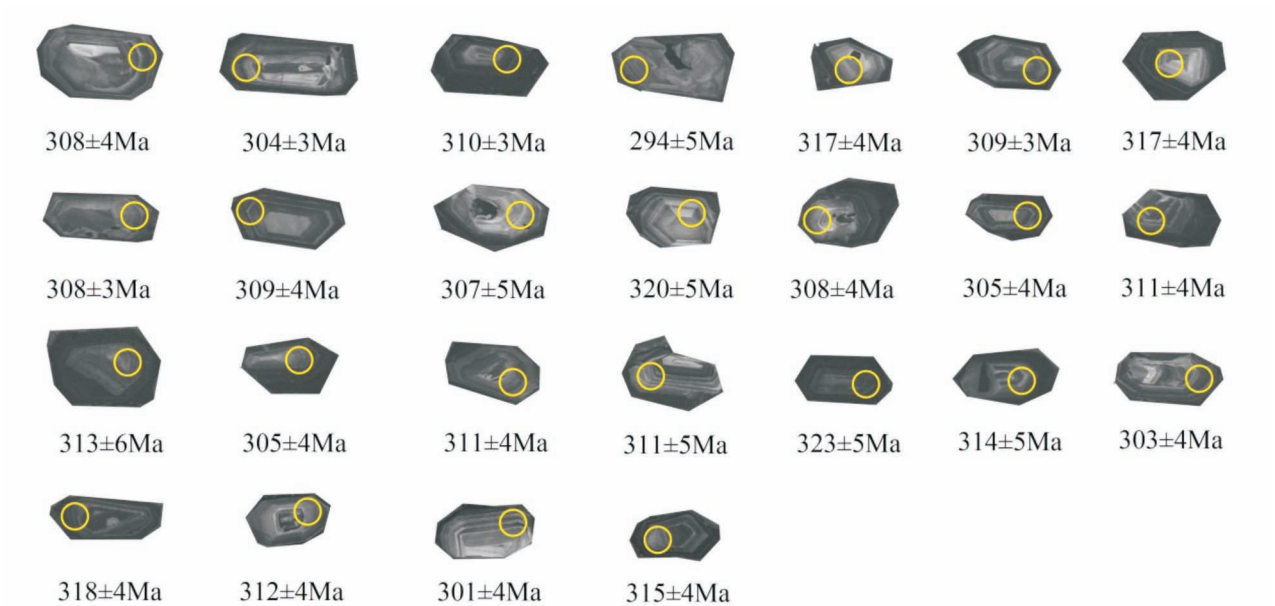


图 3 大兴安岭牙克石乌奴尔地区正长花岗岩样品 U-Pb20171005 锆石 CL 图像特征及测点位置(环形标注)

Fig. 3 CL images and testing positions of the zircons from Sample U-Pb20171005, syenogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains

表 1 大兴安岭牙克石乌奴尔地区正长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据表

Table1 LA-ICP-MS U-Pb analytical results of the zircons from syenogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains

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(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{208}Pb)/n(^{232}Th)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ		
1	19.69	197.0	337.4	0.58	0.0515	0.0018	0.3487	0.0129	0.0490	0.0007	0.0181	0.0011	361.3	20.3	303.7	9.7	308.5	4.2	98
2	10.73	108.8	187.0	0.58	0.0534	0.0024	0.3565	0.0162	0.0484	0.0006	0.0171	0.0009	342.5	18.7	309.6	12.1	304.8	3.8	98
3	23.43	1123	344.0	3.27	0.0711	0.0022	0.4821	0.0142	0.0493	0.0006	0.0072	0.0006	145.7	11.7	399.5	9.7	310.1	3.4	74
5	15.44	213.0	228.1	0.93	0.1389	0.0072	0.9011	0.0505	0.0467	0.0009	0.0221	0.0012	440.0	23.4	652.3	27.0	294.2	5.2	24
6	10.10	112.1	165.6	0.68	0.0508	0.0026	0.3520	0.0183	0.0504	0.0007	0.0177	0.0009	354.7	17.6	306.2	13.7	317.1	4.3	96
8	15.45	163.0	263.0	0.62	0.0552	0.0019	0.3724	0.0118	0.0492	0.0006	0.0172	0.0008	344.8	15.9	321.4	8.7	309.4	3.7	96
9	10.75	107.2	176.5	0.61	0.0589	0.0032	0.4097	0.0207	0.0506	0.0007	0.0189	0.0009	378.6	18.7	348.7	14.9	317.9	4.4	90
11	13.58	157.1	225.5	0.70	0.0558	0.0022	0.3771	0.0151	0.0490	0.0006	0.0166	0.0008	331.9	15.5	324.9	11.1	308.4	3.8	94
13	27.35	298.5	459.7	0.65	0.0562	0.0019	0.3813	0.0128	0.0492	0.0006	0.0167	0.0008	335.4	15.1	328.0	9.4	309.3	3.5	94
14	6.73	74.8	112.6	0.66	0.0600	0.0032	0.3974	0.0196	0.0488	0.0008	0.0167	0.0009	334.5	18.5	339.8	14.2	307.5	5.1	90
15	10.07	111.9	160.4	0.70	0.0570	0.0030	0.3958	0.0193	0.0510	0.0008	0.0176	0.0009	352.8	17.8	338.6	14.1	320.6	5.0	94
16	9.88	133.9	159.5	0.84	0.0520	0.0025	0.3492	0.0165	0.0489	0.0008	0.0169	0.0009	338.1	18.2	304.2	12.4	308.0	4.8	98
17	21.24	228.7	367.0	0.62	0.0533	0.0021	0.3565	0.0147	0.0485	0.0008	0.0171	0.0009	339.8	18.3	309.6	11.0	305.4	4.7	98
18	16.59	463.6	238.4	1.94	0.1049	0.0037	0.7106	0.0232	0.0495	0.0007	0.0099	0.0006	199.0	11.3	545.1	13.8	311.6	4.5	45
19	27.25	565.8	370.8	1.53	0.0602	0.0022	0.4107	0.0159	0.0498	0.0011	0.0152	0.0008	301.1	16.6	349.3	11.5	313.4	6.6	89
20	10.96	137.6	191.3	0.72	0.0550	0.0025	0.3646	0.0159	0.0485	0.0008	0.0124	0.0006	249.1	12.9	315.6	11.9	305.5	4.6	96
21	11.38	132.5	186.6	0.71	0.0531	0.0024	0.3587	0.0148	0.0495	0.0007	0.0161	0.0008	323.5	15.8	311.2	11.1	311.6	4.1	99
22	8.48	104.4	138.0	0.76	0.0546	0.0031	0.3705	0.0212	0.0495	0.0009	0.0158	0.0008	316.9	15.2	320.0	15.7	311.6	5.4	97
23	24.31	311.3	397.1	0.78	0.0521	0.0016	0.3697	0.0122	0.0515	0.0009	0.0136	0.0006	272.9	12.2	319.5	9.0	323.9	5.2	98
24	12.14	176.9	197.0	0.90	0.0603	0.0028	0.4102	0.0186	0.0501	0.0009	0.0139	0.0007	279.1	14.7	349.0	13.4	314.4	5.5	89
25	14.80	184.9	242.3	0.76	0.0575	0.0024	0.3836	0.0174	0.0482	0.0007	0.0161	0.0007	320.4	14.0	329.7	12.8	303.5	4.4	91

据谐和度较低外(U-Pb 20171005-03、74%; U-Pb 20171005-04、24%; U-Pb 20171005-14、45%),剩余 22 个数据谐和度均大于 85%,可参加年龄计算,对 22 个数据加权平均计算,其加权平均年龄为 310.8±2.5 Ma(图 4a、4b),属于石炭纪晚期(323.2 ~ 298.9 Ma)。

4 岩石化学特征

4.1 样品采集及测试方法

岩石地球化学测试样品均为未风化、未蚀变的新鲜样品,采自岩石地表。样品在核工业北京地质研究院分析中心测试,首先将要测试的粉碎,研磨至 200 目下的粉末备用,主量元素用 X 射线荧光分析,使用仪器为 AB104L, AL104, AxiosmAX X 射线荧光光谱仪,检测方法和依据参照 GB/T 14506.14-2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 14 部分:氧化亚铁量测定》, GB/T 14506.28-2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 28 部分:16 个主次成分量测定》,微量元素采用 NexION300D 等离子体质谱仪,检测方法和依据参照 GB/T 14506.30-2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分:44 个元素量测定》。

4.2 主量元素

样品烧失量较低,范围 0.38% ~ 0.73%,平均值 0.56%(表 2),表明后期流体和蚀变作用对岩体影响较小,所测岩石地球化学数

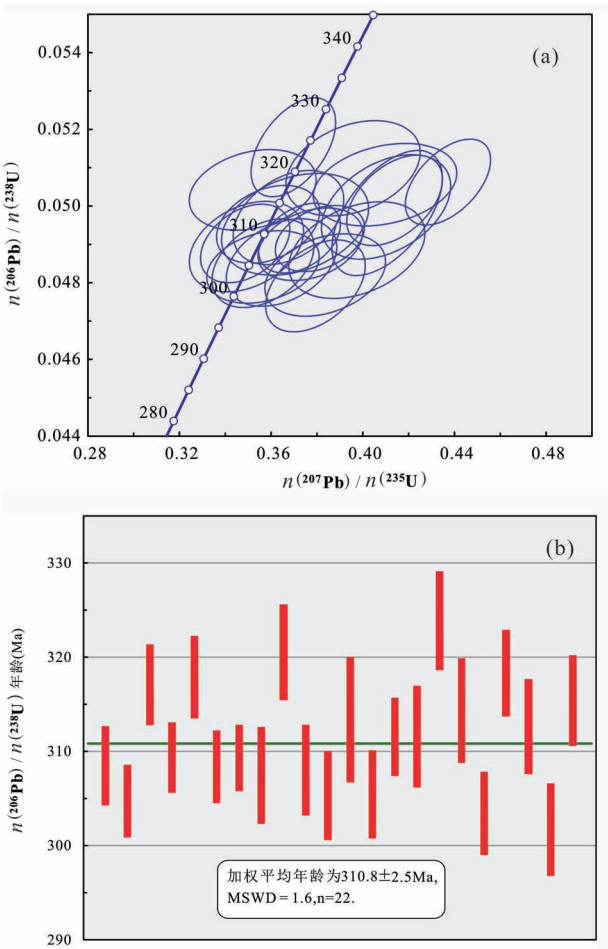


图 4 大兴安岭牙克石乌奴尔地区正长花岗岩样品 U-Pb20171005 U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄

Fig. 4 U-Pb concordian diagrams (a) and the weighted average age (b) of the sample U-Pb20171005, syenogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains

据能够较好地反映岩体特征。通过 CIPW 标准矿物计算结果判定岩石类型为铝过饱和、SiO_2过饱和。与中国正长花岗岩化学成分平均值比,本期花岗岩 SiO_2略显偏高,MgO、CaO 含量略显偏低,TiO_2、Al_2O_3、FeO、MnO、Na_2O、K_2O、P_2O_5含量与之相近。SiO_2 = 75.10%~78.50%,平均值为 77.31%,属酸性岩范畴。在侵入岩 TAS 分类图上(图 5a),样品均落于花岗岩区域,属亚碱性系列。分异指数 DI = 94.53~96.56,平均值为 95.53,固结指数 SI = 1.09~2.57,平均值为 1.69,表明岩浆分异程度较高,符合酸性岩演化特征。富含碱质,K_2O/Na_2O 为 1.29~1.32,K_2O+Na_2O = 7.62%~8.74%。侵入岩 SiO_2—K_2O 图(图 5c)显示样品主要投点于高钾钙碱性系列。高铝,Al_2O_3 = 11.65%~13.33%,铝饱和指数 A/CNK

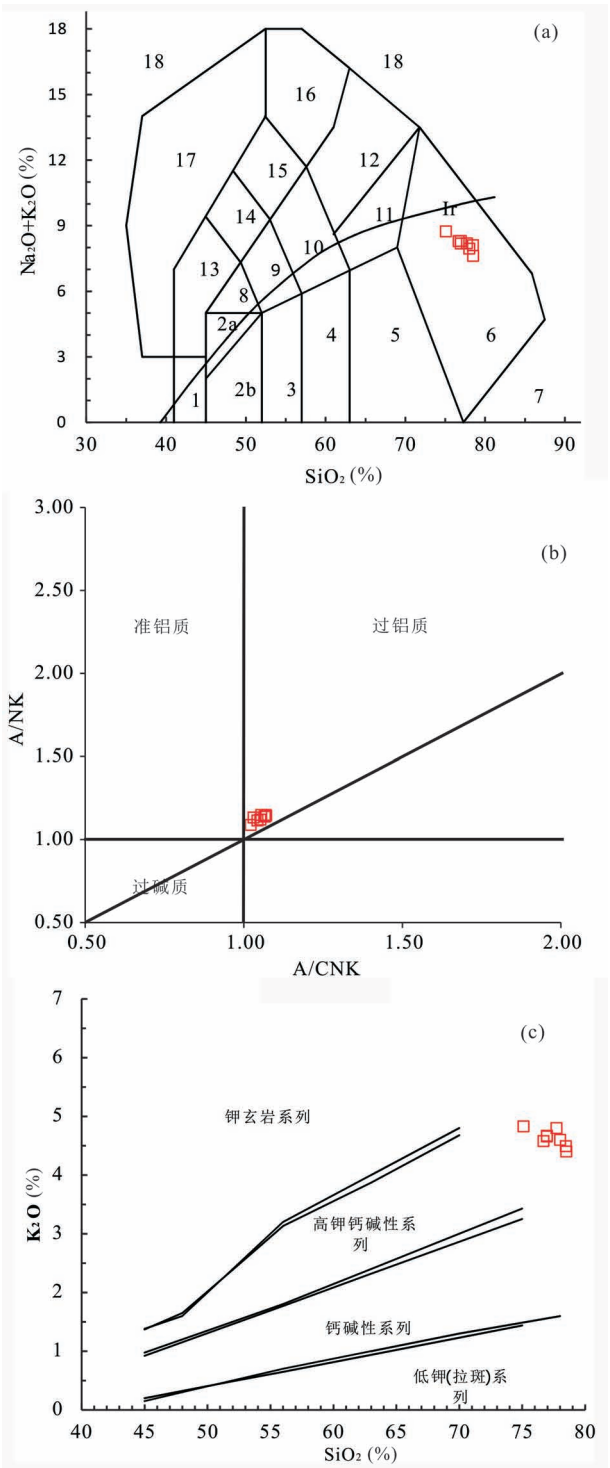


图 5 大兴安岭牙克石乌奴尔地区正长花岗岩 TAS 分类图、A/CNK—A/NK 判别图解、SiO_2—K_2O 图解

Fig. 5 TAS diagram (a), A/CNK—A/NK diagram (b), SiO_2—K_2O diagram (c) of syenogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains

为 1.03~1.08,在 A/CNK—A/NK 判别图解(图 5b)中投点落于过铝质区,综上所述正长花岗岩为过铝质高钾钙碱性系列。

表 2 大兴安岭牙克石乌奴尔地区正长花岗岩主量元素(%)和微量元素($\times10^{-6}$)数据

Table 2 major and trace element compositions ofsysnogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains

样品编号	B001-1	B001-2	B003	B010	B011	B018	B021	B022
SiO_2	76.97	75.1	78.50	78.02	77.73	76.70	8.47	76.97
TiO_2	0.16	0.21	0.18	0.15	0.14	0.17	0.11	0.17
Al_2O_3	12.41	13.33	11.65	12.05	12.17	12.82	11.85	12.51
TFeO	0.82	0.91	0.70	0.58	0.67	0.67	0.52	0.72
MnO	0.05	0.04	0.02	0.06	0.04	0.04	0.02	0.04
MgO	0.14	0.25	0.18	0.12	0.10	0.18	0.11	0.15
CaO	0.43	0.65	0.42	0.40	0.39	0.55	0.39	0.42
Na_2O	3.63	3.91	3.22	3.35	3.39	3.71	3.61	3.52
K_2O	4.67	4.83	4.40	4.60	4.80	4.58	4.49	4.66
P_2O_5	0.02	0.04	0.03	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03
烧失量	0.61	0.64	0.61	0.55	0.46	0.47	0.38	0.73
总计	99.91	99.91	99.91	99.9	99.91	99.91	99.97	99.91
Na_2O+K_2O	8.30	8.74	7.62	7.95	8.19	8.29	8.10	8.18
Q	36.85	32.41	41.82	39.85	38.57	36.09	39.21	37.57
Or	27.81	28.77	26.2	27.38	28.54	27.24	26.66	27.78
Ab	30.95	33.35	27.46	28.55	28.86	31.59	30.69	30.05
DI	95.61	94.53	95.48	95.78	95.97	94.92	96.56	95.40
SI	1.47	2.57	2.11	1.43	1.09	1.93	1.29	1.65
A/CNK	1.05	1.04	1.08	1.07	1.06	1.06	1.03	1.08
AR	3.60	3.54	3.29	3.33	3.34	3.49	3.88	3.39
σ	2.02	2.37	1.63	1.80	1.93	2.04	1.85	1.97
Rb	184	193	164	195	179	203	186	189
Ba	179	179	141	189	146	273	31.9	164
Th	18.4	19.8	16.7	21.1	17.3	15.5	18.4	18.6
U	2.37	2.11	1.72	2.04	1.61	2.12	2.02	2.04
Ta	1.09	1.16	0.996	1.06	0.894	1.29	0.727	1.23
Nb	11.7	12.6	11.1	9.59	7.81	11.2	9.25	13.6
La	29.2	35.9	29.7	5.84	6.14	16	14.9	39.4
Ce	55.5	65.4	56.2	64.8	39.4	49.4	26.6	70.6
Sr	45.5	47.9	41.8	52.5	42.8	74.6	13.8	44.5

样品编号	B001-1	B001-2	B003	B010	B011	B018	B021	B022
Nd	17.20	20.40	17.20	3.69	4.25	11.40	4.51	21.70
Zr	31.20	36.90	30.60	33.90	25.40	31.90	28.90	34.9
Hf	2.10	2.38	2.04	2.27	1.77	2.19	2.15	2.42
Sm	2.90	3.42	2.90	0.75	0.85	2.01	0.63	3.66
Y	15.60	17.00	13.70	5.87	4.61	8.48	4.71	16.90
Yb	1.72	1.75	1.32	1.14	0.74	1.17	0.74	1.79
Lu	0.28	0.29	0.22	0.19	0.12	0.19	0.16	0.29
La	29.20	35.90	29.70	5.84	6.14	16.00	14.90	39.40
Ce	55.5	65.4	56.2	64.8	39.4	49.4	26.6	70.6
Pr	5.20	6.14	5.30	1.13	1.24	3.31	1.65	6.56
Nd	17.20	20.40	17.20	3.69	4.25	11.40	4.51	21.70
Sm	2.90	3.42	2.9	0.76	0.85	2.01	0.63	3.66
Eu	0.39	0.43	0.36	0.25	0.25	0.41	0.13	0.44
Gd	2.92	3.51	2.93	0.94	0.93	1.89	0.77	3.78
Tb	0.40	0.47	0.38	0.15	0.14	0.26	0.10	0.49
Dy	2.19	2.51	1.99	0.95	0.83	1.43	0.55	2.58
Ho	0.46	0.52	0.40	0.22	0.17	0.29	0.13	0.53
Er	1.51	1.63	1.25	0.78	0.57	0.96	0.46	1.68
Tm	0.24	0.25	0.18	0.14	0.10	0.16	0.09	0.25
Yb	1.72	1.75	1.32	1.14	0.75	1.17	0.75	1.79
Lu	0.28	0.29	0.22	0.19	0.12	0.19	0.16	0.29
Y	15.60	17.00	13.70	5.87	4.61	8.48	4.71	16.9
ΣREE	120.1	142.6	120.3	80.9	55.7	88.9	51.4	153.7
$\frac{LREE}{HREE}$	11.36	12.05	12.88	16.96	14.44	13.00	16.09	12.50
δEu	0.41	0.38	0.37	0.90	0.86	0.63	0.57	0.36
δCe	1.02	0.99	1.01	5.80	3.30	1.58	1.08	0.98
La_N/Yb_N	12.18	14.72	16.15	3.68	5.91	9.81	14.31	15.80
La_N/Sm_N	7.23	7.53	7.35	5.54	5.18	5.71	16.92	7.73
Gd_N/Yb_N	1.40	1.66	1.84	0.68	1.03	1.34	0.85	1.75

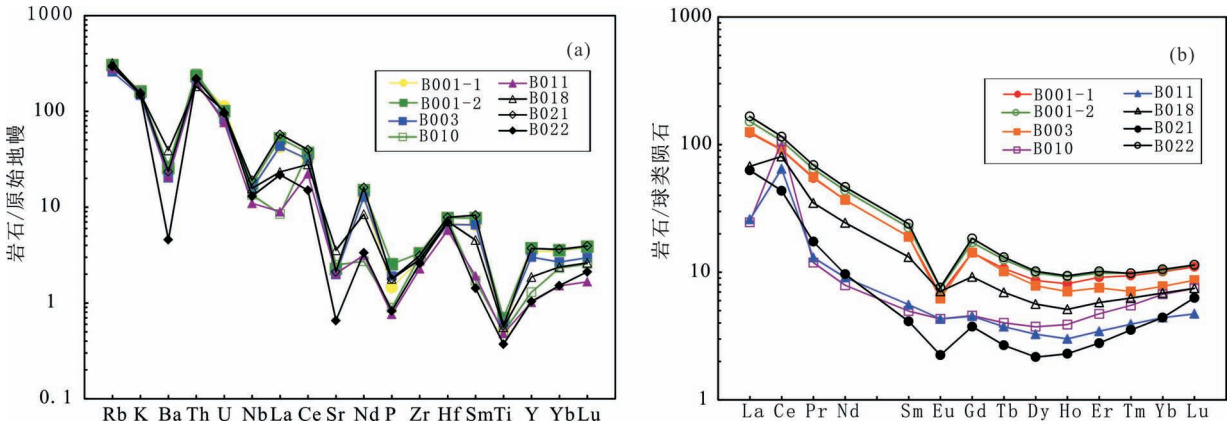


图 6 大兴安岭牙克石乌奴尔地区正长花岗岩微量元素蛛网图(a)与稀土元素配分曲线(b)

Fig. 6 Trace elements apider diagram(a) and Rare earth elememt distribution curve(b) of syenogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains

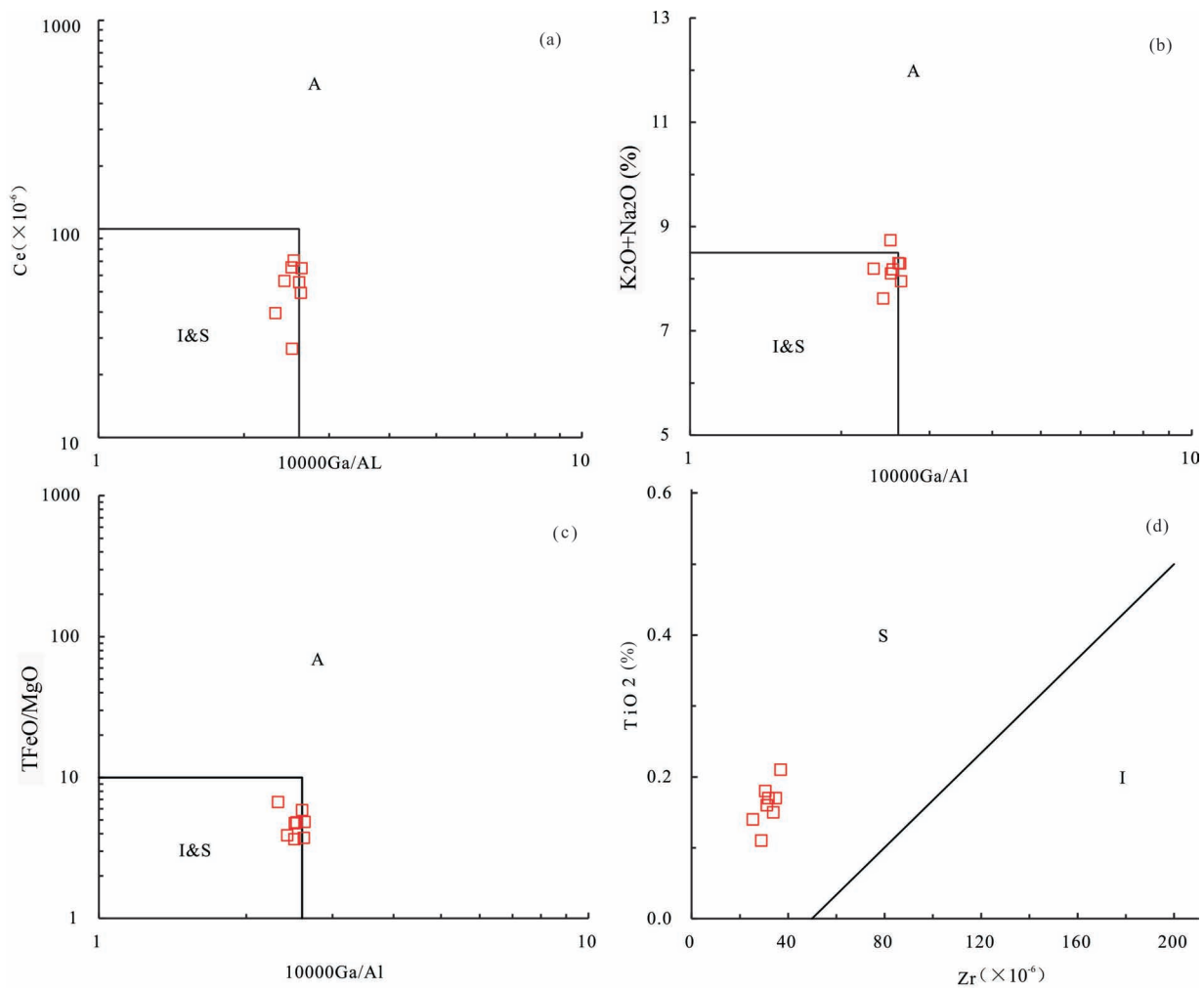


图 7 大兴安岭牙克石乌奴尔地区正长花岗岩 10000×Ga/Al—Ce 图解(a)、10000×Ga/Al—K_2O+Na_2O 图解(b)、10000×Ga/Al—TFeO/MgO 图解(c)、Zr—TiO_2图解(d)

Fig. 7　10000×Ga/Al—Ce diagram(a), 10000×Ga/Al—K_2O+Na_2O diagram(b), 10000×Ga/Al—TFeO/MgO diagram(c), Zr—TiO_2 diagram(d) of syenogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains

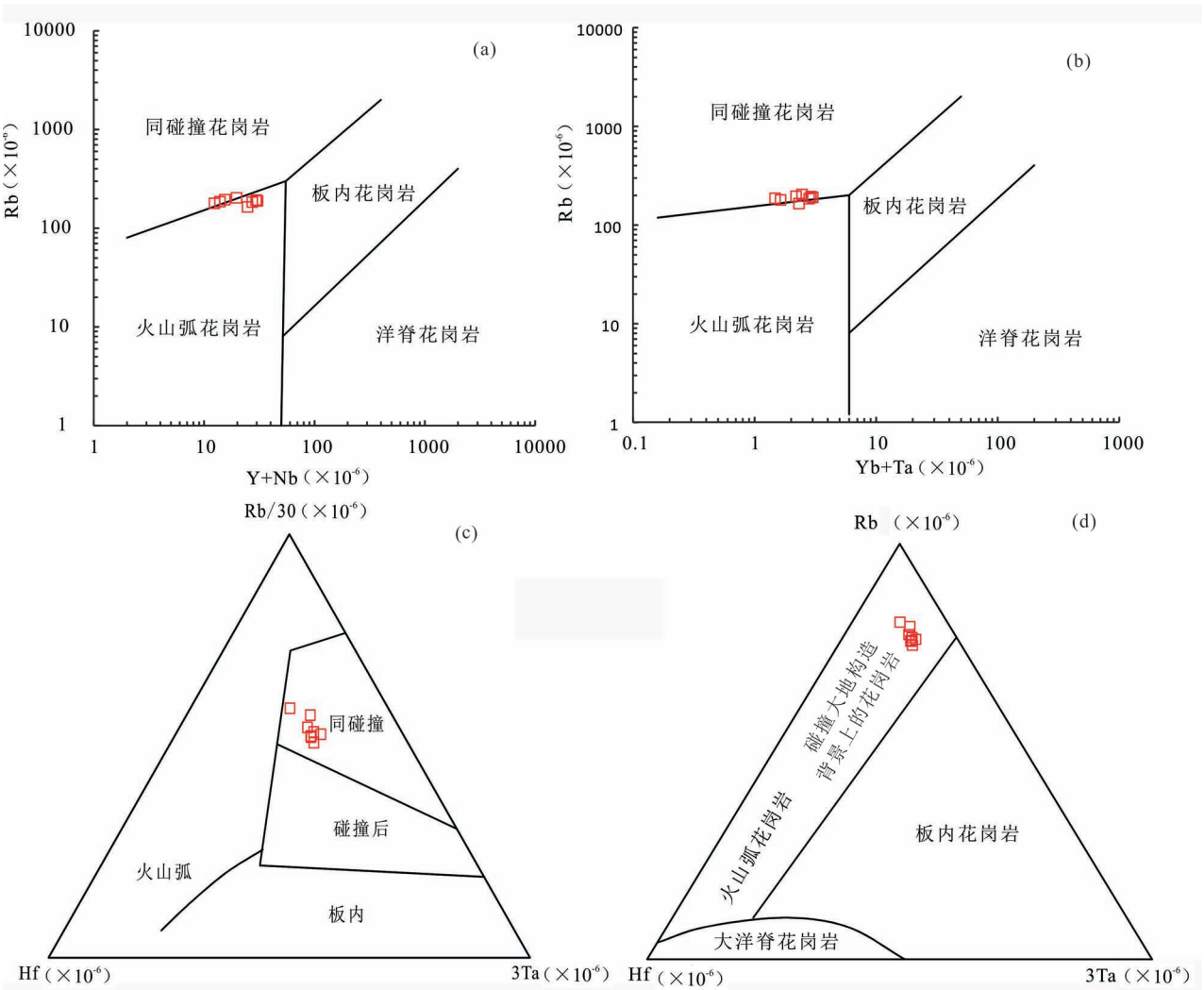


图 8 大兴安岭牙克石乌奴尔地区正长花岗岩 Y+Nb—Rb(a)、Yb+Ta—Rb(b)、Rb/30—Hf—3Ta(c)、Rb/10—Hf—3Ta(d)构造判别图解

Fig. 8 Y+Nb—Rb(a), Yb+Ta—Rb(b), Rb/30—Hf—3Ta(c), Rb/10—Hf—3(d)Ta tectonic distrimination diagrams of syenogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains

4.3 微量元素特征

正长花岗岩的微量元素原始地幔标准化图(图 6a)呈右倾的锯齿状型式,微量元素分析结果(表 2)显示,岩体总体富集大离子亲石元素 Rb 和高场强元素 Th、La、Nd、Hf 等,而亏损大离子亲石元素 Ba、Sr、Eu 及高场强元素 Nb、P、Ti 等,可能是成岩过程中钛铁矿、斜长石、磷灰石等矿物的分离结晶所致,与同碰撞花岗岩的分布型式相近。

4.4 稀土元素特征

正长花岗岩的稀土元素含量(表 2)显示:其稀土总量∑REE 为 $51.43\times10^{-6}\sim153.75\times10^{-6}$,均值为 101.73×10^{-6},稀土含量一般。LREE 为 $48.42\times10^{-6}\sim142.36\times10^{-6}$,HREE 为 $3.00\times10^{-6}\sim11.39\times10^{-6}$,LREE/HREE 为 11.36~16.96,La_N/Yb_N 为 3.68~16.15,总体上岩体富集轻稀土,重稀土相对亏损且较平坦,轻重稀土分异明显。稀土元素配分型式(图 6b)显示 8 件正长花岗岩样品具有明显的负 Eu 异常,Eu 具“V”谷的曲线特征,δEu 值为 0.36~0.90,平均值为 0.56,表明该正长花岗岩为地壳浅部岩石重熔而成或早期岩浆在结晶过程中形成了大量钙斜长石。

5 讨论

5.1 岩石成因

从地球化学的角度来看,正长花岗岩为过铝质

(A/CNK = 1.03 ~ 1.08),表现出变质沉积岩发生部分熔融形成熔体的过铝质的特征,在 Whalen 等(1987)提出的一系列以 Ga/Al 值为基础的判别图解中,均落在 I&S 型花岗岩区域(图 7a、7b、7c),在 Zr—TiO_2基础的判别图解中,均落在 S 型花岗岩区域(图 7d)。综合分析认为,晚石炭世正长花岗岩为过铝质 S 型花岗岩。

5.2　大地构造背景

在花岗岩 Y+Nb—Rb 构造判别图中,正长花岗岩主要落入 VAG 火山弧花岗岩区和 Syn-COLG 同碰撞花岗岩区内(图 8a)。在花岗岩 Yb+Ta—Rb 构造判别图中,正长花岗岩主要落入 Syn-COLG 同碰撞花岗岩区,少数落入 VAG 火山弧花岗岩区(图 8b)。在 Rb/30—Hf—3Ta、Rb/10—Hf—3Ta 构造判别图解中均落于同碰撞背景区域(图 8c、8d)。综合表明晚石炭世侵入岩的形成环境造山作用下的同碰撞构造环境。

5.3　岩石温压条件及就位机制

在 Q—Ab—Or—H_2O 系图(图 9a)上,晚石炭世正长花岗岩侵入体形成的结晶温压条件为 700 ~ 750℃和 50 ~ 200 MPa,显示晚石炭世花岗岩结晶温度中等,岩浆冷凝矿物共结晶时的深度相当于 1.65 ~ 6.6 km(1 GPa≈33km)。

晚石炭世正长花岗岩 Nb/Ta 为 8.7 ~ 12.7,介于地幔 Nb/Ta 标准值 17.5 与地壳 Nb/Ta 标准值 11 ~ 12 之间,Cr 为 0.5×10^{-6} ~ 3.6×10^{-6},含量极低,远低于平均地壳($Cr = 135\times10^{-6}$),CaO/Na_2O 值为 0.11 ~ 0.17<0.3,源区为泥质岩,来自浅部地壳,岩浆类型以壳源为主。结合稀土元素特征,在 δEu—La_N/Yb_N图解中(图 9b),总体具有壳源的特征,在 Rb/Sr—Rb/Ba 图解中(图 9c)样品分散于泥质岩源区。

综上所述,晚石炭世正长花岗岩总体具有壳源的特征,源岩应为泥质岩,形成于中等温度(700 ~ 720℃)、低压(0.15 ~ 0.2 GPa)环境,与碰撞背景一致。

结合区域构造背景(陈安霞等,2004;冯志强,2005;沈龙等,2011;徐备等,2014;李可等,2015;Liu Yongjiang et al., 2017; Wu Fuyuan, 2011; Feng Zhiqiang et al.,2018),且资料显示乌尔其汗、免渡河地区发现有岛弧火山岩(373.2 ±5.3 Ma)和高锶低钇(adakitic)花岗闪长岩(331.2 ±3.7 Ma),表明晚泥盆世—早石炭世发生过大洋板片的俯冲作用(赵芝等,2010),研究区发育的过铝质正长花岗岩可能

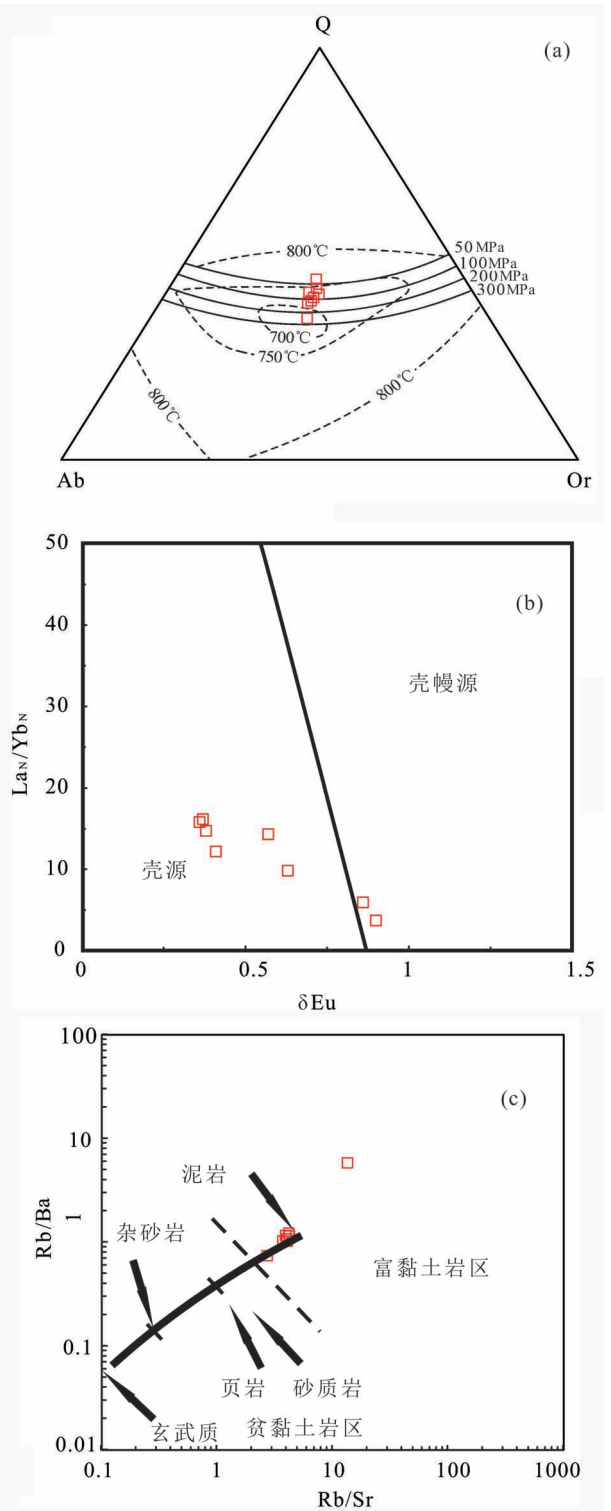


图 9 大兴安岭牙克石乌奴尔地区正长花岗岩 Q—Ab—Or—H_2O 图解(a)、δEu—La_N/Yb_N图解(b)、Rb/Sr—Rb/Ba 图解(c)

Fig. 9 Q—Ab—Or—H_2O(a), δEu—La_N/Yb_N(b), Rb/Sr—Rb/Ba(c) diagram of syenogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains

就是这次俯冲作用结束后,碰撞—后碰撞构造体系下的产物,为头道桥—新林缝合带的闭合时限提供证据,为古亚洲洋的闭合及东北地块构造演化研究提供了新的约束和佐证实例。

6 结论

(1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示:内蒙古牙克石乌奴尔地区正长花岗岩成岩年龄为 310.8 ±2.5 Ma,为晚石炭世。

(2)岩石学、岩相学及地球化学特征显示:正长花岗岩为过铝质高钾钙碱性系列 S 型花岗岩。

(3)正长花岗岩形成于温压条件为 700 ~ 750℃、50~200 MPa 环境,源区为泥质岩,来自浅部地壳。

(4)结合区域地质特征,正长花岗岩的区域构造背景属于同碰撞环境,揭示了在晚石炭世古亚洲洋于研究区附近发生了一次俯冲—碰撞作用。

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)

陈安霞,周多,张庆奎,关培彦,马良,邵学峰,费平.2004.大兴安岭中北段头道桥一带晚古生代构造沉积环境分析.地质与资源, 23(1):1~7.

陈安霞,周多,张庆奎.2016.兴安地块中部奥陶纪构造沉积环境.现代地质,30(5):1061~1071.

冯志强.2015.大兴安岭北段古生代构造—岩浆演化.导师:刘永江.吉林大学博士论文:1~128.

郭锋,范蔚茗,李超文,苗来成,赵亮.2009.早古生代古亚洲洋俯冲作用:来自内蒙古大石寨玄武岩的年代学与地球化学证据.中国科学(D 辑),39(5):569~579.

葛文春,吴福元,周长勇,张吉衡.2007.兴蒙造山带东段斑岩型 Cu,Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义.科学通报,52(20):2407~2417.

刘敦一,简平,张旗,张福勤,石玉若,施光海,张履桥,陶华.2003.内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年:早古生代洋壳消减的证据.地质学报,77(3):317 ~327.

刘建峰,迟效国,张兴洲,马志红,赵芝,王铁夫,胡兆初,赵秀羽.2009.内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义.地质学报,83(3):365~376.

刘娜.2012.牙克石地区泥盆系"大民山组"的解体及构造属性探讨.导师:白志达.中国地质大学(北京)硕士论文:1~54.

李可,张志诚,冯志硕,李建锋,汤文豪,罗志文,陈彦.2015.兴蒙造山带中段北部晚古生代两期岩浆活动及其构造意义.地质学报,89(2):272~288.

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.

内蒙古自治区地质矿产局.1996.内蒙古自治区岩石地层.武汉:中国地质大学出版社.

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

苏养正.1996.兴安地层区的古生代地层.吉林地质, 15(3~4):23~34.

邵积东,谭强,王惠,张明,贺宏云.2011.大兴安岭地区中生代地层及侏罗—白垩纪界线的讨论.地质与资源,20(1):4~8.

沈龙,李堤,赵寒冬.2011.兴蒙造山带东段火成岩构造组合、构造岩浆阶段及大地构造演化.地质与资源, 20(6):420~425.

石玉若,刘敦一,张旗.2004.内蒙古苏左旗地区闪长—花岗岩类 SHRIMP 年代学.地质学报,78(6):789~799.

唐克东.1989.中朝陆台北侧褶皱带构造发展的几个问题.现代地质,3(2):195~204.

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.

肖霞,王少华,刘正宏,地里夏提买买提,曾振.2016.大兴安岭中北段奥陶系裸河组碎屑岩地球化学特征及物源环境分析.西部探矿工程,(3):138~142.

徐备,赵盼,鲍庆中,周永恒,王炎阳,罗志文.等.2014.兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探.岩石学报,30(7):1841~1857.

余金杰,徐志刚,徐凤山.1996.小兴安岭西北部奥陶系火山岩形成环境.地球学报,17(1):54~64.

张海华,徐德斌,张扩.2004.大兴安岭北段泥盆系泥鳅河组地球化学特征及沉积环境.地质与资源,23(4):316~322.

张吉衡.2009.大兴安岭中生代火山岩年代学及地球化学研究.导师:高山.中国地质大学(武汉)博士论文:1~126.

周建波,石爱国,景妍.2016.东北地块群:构造演化与古大陆重建.吉林大学学报(地球科学版),46(4):1042~1055.

张渝金,张超,吴新伟,崔天日,杨雅军,陈会军,江斌,郭威,马永非.2016.大兴安岭北段扎兰屯地区晚古生代海相火山岩年代学和地球化学特征及其构造意义.地质学报,90(10):2706~2720.

赵芝,迟效国,刘建峰,王铁夫,胡兆初.2010.内蒙古牙克石地区晚古生代弧岩浆岩:年代学及地球化学证据.岩石学报,26(11):3245~3258.

Chen Anxia, Zhou Duo, Zhang Qingkui, Guan Peiyan, Ma Liang, Shao Xuefeng, Fei Ping. 2004&. Late Paleozoic tectonic sedimentary environment of Toudaoqiao area in the north—central section of Daxing'anling, Geology and Resources, 23(1):1~7.

Chen Anxia, Zhou Duo, Zhang Qingkui. 2016&. Tectonic and sedimentary environment in the Ordovician Period of central Xing'an block. Geoscience, 30(5):1061~1071.

Chen Bin, Jahn Bor-ming, Wilde S, Xu Bei. 2002. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. Tectonophysic, 328(1~2): 157~182.

Feng Zhiqiang, Liu Yongjiang, Li Long, She Hongquan, Jiang Liwei, Du Binying, Liu Yuwei, Li Weimin, Wen Quanbo, Liang Chenyue. 2018. Subduction, accretion, and collision during the Neoproterozoic—Cambrian orogeny in the Great Hinggan Mountains, NE China: Insights from geochemistry and geochronology of the Ali River ophiolitic mélange and arc-type granodiorites. Precambrian Research, 311:117~135.

Feng Zhiqiang. 2015&. The Paleozoic tectono—magmatic evolution of the northern Great Xing'an range. Tutor: Liu Yongjiang. Jilin University Doctor's thesis:1~128.

Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, Zhang Jiheng. 2007 #. Geochronology and geological implications of Cu—Mo porphyry deposit in in the ease section of Xiang'an—Mongolian Orogenic

Belt.Chinese Science Bulletion,52(20):2407~2417.

Guo Feng, Fan Weiming, Li Wenchao, Miao Laicheng, Zhao Liang. 2009&. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: geochronological and geochemical evidence from the Dazhizai basalts, Inner Mongolia. Sci. China Ser. D——Earth Sci., 39(5): 569~579.

Khain E V, Bibikova E V, Kroner A, Zhuravlev D Z, Sklyarov E V, Fedotova A A, Kravchenko-Berezhnoy I R. 2002. The most ancient ophiolites of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhugur complex, eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications. Earth and Planetary Science Letters, 199(3~4): 311~325.

Li Jinyi. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. Journal of Asian Earth Sciences, 26(3~4): 207~224.

Li Ke, Zhang Zhicheng, Feng Zhishuo, Li Jianfeng, Tang Wenhao, Luo Zhiwen, Chen Yan. 2015&. Two-phase magmatic events during Late Paleozoic in the north of the central Inner Mongolia—Da Hinggan Orogenic Belt and its tectonic significance, Acta Geologica Sinica, 89(2): 272~288.

Liu Dunyi, Jian Ping, Zhang Qi, Zhang Fuqin, Shi Yuruo, Shi Guanghai, Zhang Lüqiao, Tao Hua. 2003&. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the early Paleozoic subduction. Acta Geological Sinica, 77(3): 317~327.

Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Zhang Xingzhou, Ma Zhihong, Zhao Zhi, Wang Tiefu, Hu Zhaochu, Zhao Xiuyu. 2009&. Geochemical characteristic of Carboniferous quartz-diorite in the southern Xiwuqi area, Inner Mongolia and its tectonic significance. Acta Geological Sinica, 83(3): 365~376.

Liu Na. 2012&. Disintegration and tectonic attribute of Devonian " Daminshan Formation " in Yakeshi. Tutor: Bai Zhida. China University of Geological(Beijing) Master's thesis: 1~54.

Liu Yongjiang, Li Weimin, Feng Zhiqiang, Wen Quanbo, Franz Neubauer, Liang Chenyue. 2017. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern pare of Central Asian Orogenic Belt . Gondwana Research, 43: 123~148.

Lü Hongbo, Feng Xuedong, Wang Jun, Zhu Xiaoqing, Dong Xiaopeng, Zhang Haichun, Zhang Yuxu. 2018&. Ophiolitic melanges 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.

Shao Jidong, Tan Qiang, Wang Hui, Zhang Ming, He Hongyun. 2011&. The Mesozoic and the Jurassic—Cretaceous boundary in the Daxing'anling region, Geology and Resources, 20(1): 4~8.

Shen Long, Li Ti, Zhao Handong. 2011&. The Paleozoic—Early Mesozoic igneous rocks in the east section of Xiang'an—Mongolian Orogenic Belt: Tectonic assemblage, division of tectonomagmatic stages and tectonic evolution, Geology and Resources, 20(6): 420~425.

Shi Yuruo, Liu Dunyi, Zhang Qi. 2004&. SHRIMP dating of diorites and granites in southern Suzuoqi, Inner Mongolia. Acta Geological Sinica, 78(6): 789~799.

Su Yangzheng. 1996&. Paleozoic stratigraphy of Hinggan Stratigraphical Province. Jilin Geology, 15(3~4): 23~34.

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

Tang Kedong. 1989#. Several problems in tectonic development of the fold in north China—Korea. Geoscience, 3(2): 195~204.

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.

Windley B F, Alexeiev D, Xiao Wenjiao, Kroner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic belt. Journal of the Geological Society, 164(1): 31~47.

Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, Zhang Yanbin, Grant M L, Wilde S A, Jahn Bor-Ming. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeast China .Journal of Asian Earth Sciences, 41: 1~30.

Xiao Xia, Wang Shaohua, Liu Zhenghong, Dilixiali Maimaiti, Zheng Zhen. 2016#. Geochemical characteristics and Source environment analysis of Luohe Formation in the north—central of Great Hinggan Mountains. West China Exploration Engineer, 64(2): 299~345.

Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, Zhou Yongheng, Wang Yanyang, Luo Zhiwen. 2014&. Preliminary study on the pre-Mesozic tectonic unit division of the Xing—Meng Orogenic Belt. Acta Pereologica Sinica, 30(7): 1841~1857.

Yu Jinjie, Xu Zhigang, Xu Fengshan. 1996&. Tectonic setting of Ordovician volcanic rocks in northwestern Xiaoxing'anling, Heilongjiang Province. Acta Geological Sinica, 17(1): 54~64.

Zhang Haihua, Xu Debin, Zhang Kuo. 2004&. Geochemical characteristic and sedimentary environment of the Devonian Niqiuhe Formation in northern Daxinganling Range. Geology and Resources, 23(4): 316~322.

Zhang Jiheng. 2009&. Geochronological framework of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, NE China. Tutor: Gao Shan. China University of Geological(Wuhan) Doctor's thesis: 1~126.

Zhang Yujin, Zhang Chao, Wu Xinwei, Cui Tianri, Yang Yajun, Chen Huijun, Jiang Bin, Guo Wei, Ma Yongfei. 2016&. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic marine volcanic from the Zhalantun area in northern Da Hinggan Mountains and its geological significance. Acta Geological Sinica, 90(10): 2706~2720.

Zhao Zhi, Chi Xiaoguo, Liu Jianfeng, Wang Tiefeng, Hu Zhaochu. 2010&. Late Paleozoic arc-related magmatism in Yakeshi region, Inner Mongolia: Chronological and geochemical evidence. Acta Pereologica Sinica, 26(11): 3245~3258.

Zhou Jianbo, Shi Aiguo, Jing Yan. 2016&. The combined NE China Blocks: Tectonic evolution and supercontinent reconstructions. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 46(4): 1042~1055.

Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and geological significance of syenogranite in Wunuer area, Great Hinggan Mountains

LI Liyang[1)], CHEN Man[1)], GONG Quande[1)], ZHANG Chuanheng[2)], WANG Xian[1)]

1) *No. 4th Detachment of Gold Headquarters, Liaoyang, Liaoning*, 111000;

2) *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing*, 100083

Objectives: Wunuer area, Great Hinggan Mountains (Daxing'an Mountains), Inner Mongolia is a part of the accretion zone of the Paleozoic continental margin of the southeast Siberian plate, where the syenogranite is widely found, it is essential to carry out geochronological study and petrogeochemical analysis for better understanding of the syenogranite.

Methods: On the basis of detailed field work, the petrogeochemical testing and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating age are carried out on the syenogranite

Results: LA-ICP-MS zircon U-Pb age 310.8 ± 2.5 Ma (MSWD = 1.6), belongs to Late Carboniferous. Petrogeochemical researches indicate that the granite belongs to high-K calc-alkaline, the granite is peraluminous granite with A/CNK = 1.03 ~ 1.08. The granite is enriched in Rb, Th, depleted in Ba, Sr and Nb, Ti; is enriched in LREE and relatively depleted in HREE, with obvious negative Eu anomaly (δEu = 0.36 ~ 0.90). Petrogeochemical analysis shows that the granite has the characteristics of S-type granite. Its source rock is continental crust and it is from partial melting of continental crust mudstone. The initial magma temperature is 700 ~ 750℃, the initial magma pressure is 0.15 ~ 0.2 GPa.

Conclusions: Comprehensive studies indicate that the granite is formed in the closing of the Paleo Asian Ocean, which provided new constraints and a supporting instance on the close time of the Paleo Asian Ocean and tectonic evolution of the northeast China block group.

Keywords: Wunuer area, Inner Mongolia/Great Hinggan Mountains (Daxing'an Mountains, Daxing'an Range); syenogranite; zircon U-Pb age; petrogeochemistry

Acknowledgements: This study was supported by China Geological Survey, We are grateful to anonymous reviewers and editing committee for their thoughtful reviews and constructive comments.

First author: LI Liyang, male, born in 1989. master, research area: Sedimentary geology and environment analysis. Email: 406054622@qq.com

Manuscript received on: 2018-09-29; Accepted on: 2019-02-14; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.02.009