

小兴安岭南部早侏罗世二长花岗岩形成时代、地球化学特征及地质意义

尹志刚¹, 庞学昌¹, 王春生², 郝 科¹, 刘松杰², 官兆民¹, 张圣昕¹, 王冠群¹
YIN Zhigang¹, PANG Xuechang¹, WANG Chunsheng², HAO Ke¹, LIU Songjie²,
GONG Zhaomin¹, ZHANG Shengting¹, WANG Guanqun¹

1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 黑龙江省水文地质工程地质勘察院, 黑龙江 哈尔滨 150036

1. Mining Institute of Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. Hydrogeological Engineering Geological Exploration Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150036, Heilongjiang, China

摘要:通过对小兴安岭南部二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年和岩石地球化学分析, 确定了其形成时代及岩石成因。测得二长花岗岩的同位素年龄为 188 ± 2 Ma, 形成于早侏罗世。地球化学特征显示其富硅、富碱, CaO、Fe₂O₃、TiO₂、MnO、MgO 和 P₂O₅ 的含量较低, A/CNK=0.95~1.12, A/NK=1.17~1.32, 属于准铝-弱过铝质、高钾钙碱性系列岩石; 富集大离子亲石元素 Rb、K 和高场强元素 Hf、Zr、Th, 相对亏损大离子亲石元素 Ba、Sr 和高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 P; 稀土元素总量 (Σ REE) 较高, 配分曲线分布型式为轻稀土元素 (LREE) 相对富集、重稀土元素 (HREE) 相对亏损的右倾型, 表现出轻微的负 Eu 异常。元素地球化学特征表明, 二长花岗岩显示出 I 型花岗岩特征。结合区域研究资料, 小兴安岭南部早侏罗世二长花岗岩的形成应与古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用和蒙古-鄂霍茨克洋向额尔古纳地块之下的俯冲作用, 即双向俯冲作用的弧后伸展环境相对应, 其岩浆起源于下地壳物质的部分熔融。

关键词:小兴安岭南部; 早侏罗世; 二长花岗岩; 岩石地球化学特征; 构造背景

中图分类号: P597⁺.3; P534.46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2020)01-0027-13

Yin Z G, Pang X C, Wang C S, Hao K, Liu S J, Gong Z M, Zhang S T, Wang G Q. Formation age, geochemical characteristics and geological significance of the Early Jurassic monzonitic granites in southern Xiao Hinggan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(1): 27-39

Abstract: In this paper, the formation age and petrogenesis of the monzonitic granites were confirmed through LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical analysis in southern Xiao Hinggan Mountains. It is found that the isotopic age of monzogranite is 188 ± 2 Ma, suggesting Early Jurassic. The geochemical characteristics show that Si and ALK are abundant, CaO, Fe₂O₃, TiO₂, MnO, MgO and P₂O₅ are relatively poor, with A/CNK being 0.95~1.12 and A/NK being 1.17~1.32, implying aluminum-weakly peraluminous high potassium calc-alkaline series granites; They are enriched in large ion lithophile elements Rb, K and high field strength elements Hf, Zr, Th, and depleted in large ion lithophile elements Ba, Sr and high field strength elements Nb, Ta, Ti and P. The total rare earth elements (Σ REE) are abundant, the distribution curve shows that the light rare earth elements are more abundant than the heavy rare earth elements and show right-inclined pattern, with weak negative Eu anomalies. The geochemical characteristics of elements indicate that the granites belong to I-type granites. Combined with regional research data, it is suggested that the Early Jurassic monzonitic granites in

收稿日期: 2018-10-20; 修订日期: 2018-11-26

资助项目: 黑龙江省地质勘查基金项目《黑龙江省 1:5 万爱林林场幅、六合屯幅、凤山屯幅区域地质矿产调查》(编号: HLJKD2015-18)

作者简介: 尹志刚 (1962-), 男, 博士, 教授, 从事区域矿产资源研究。E-mail: yzg63@163.com

southern Xiao Hinggan Mountains were formed under an extensional environment similar to back-arc basin which might have been related to double-subductions of the Paleo-Pacific plate beneath the Eurasian continent and the Mongol-Okhotsk oceanic plate beneath the Erguna Massif, and the magmas originated from partial melting of lower crustal materials.

Key words: southern Xiao Hinggan Mountains; Early Jurassic; monzonitic granite; geochemical characteristics; tectonic setting

东北地区位于中亚造山带的东段,古生代经历了古亚洲洋构造体系的演化,以多个微陆块(自西向东包括额尔古纳地块、兴安地块、松嫩-张广才岭地块、佳木斯地块和兴凯地块)之间的拼合和古生代晚期—中生代早期古亚洲洋的最终闭合为特征^[1-5]。在中生代,东北地区不仅经历了环太平洋构造体系的叠加与改造,而且又有蒙古-鄂霍茨克构造体系的叠加与改造^[6-9]。作为巨大的中亚造山带的一部分,东北地区以广泛发育不同时代的花岗岩为特点。前人已经对东北地区中生代花岗岩做了大量的年代学与地球化学方面的研究^[10-16],很多关键的地带已经建立了花岗岩的年代学格架^[8],深化了对东北地区中生代花岗岩及其构造演化的认识^[17]。然而,对东北地区中生代花岗岩形成的构造背景,尤其是对位于小兴安岭南地区中生代花岗岩的形成时代、成因及其与不同构造体系之间成因关系的研究较少。鉴于此,本文对小兴安岭南二长花岗岩进行了地球化学分析和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年,探讨其形成时代、成因类型、岩浆源区特征及其形成的构造背景,为探讨小兴安岭南构造格架及其演变提供证据。

1 区域地质背景及主要岩石特征

研究区位于小兴安岭山脉南坡,松嫩地块东缘(图 1)。成矿区带处于伊春-张广才岭多金属成矿带北端。该地区地质历史演化较漫长,地质构造复杂,岩浆作用发育,尤其是早中生代的岩浆活动十分强烈。研究区地层较发育,古生界下泥盆统、中二叠统、上二叠统、中生界下白垩统及新生界均有出露。早侏罗世二长花岗岩主要分布在爱林林场南部及北部、白石林场北部、青峰林场东部及东南部、六合屯幅中部至东北部,面积约占工作区面积的 30%。经岩相学鉴定,岩性以中粒似斑状二长花岗岩、中粒二长花岗岩和粗中粒二长花岗岩为主。

中粒二长花岗岩:岩石为灰色,中粒花岗结构,块状构造。岩石由钾长石、斜长石、角闪石、石英和黑云母组成。钾长石:为条纹长石,呈他形粒状,多

沿斜长石边缘镶边交代,呈交代蚕蚀结构或斑块状零星交代,条纹呈纹状、细脉状,弱泥化,粒径 0.7~5mm,含量 30%;斜长石:半自形板状,聚片双晶细密,更长石,晶面绢云母、粘土矿物交代发育,粒径 0.7~5mm,含量 40%;角闪石:柱状,黄绿色-草绿色,绿泥石交代,粒径 0.3~1.2mm,含量 7%;石英:不规则状,与钾长石呈文象结构,粒径 0.7~4.5mm,含量 20%;黑云母:长条状,绿泥石交代发育,零星,粒径 0.7mm,含量 3%。主要副矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石。

中粒似斑状二长花岗岩:岩石为浅肉红色,中粒似斑状花岗结构,块状构造。斑晶为钾长石 1%~5%,斜长石(1%~7%),粒度为 10~20mm。基质由黑云母(2%)、斜长石(30%)、钾长石(40%)、石英(28%)组成。钾长石:为条纹长石,呈他形粒状,多沿斜长石边缘镶边交代,呈交代蚕蚀结构或斑块状零星交代,条纹呈纹状、细脉状,弱泥化,粒径 0.7~5mm,含量 30%;斜长石:半自形板状,聚片双晶细密,更长石,晶面绢云母、粘土矿物交代发育,粒径 0.7~5mm;石英:不规则状,与钾长石呈文象结构,粒径 0.7~4.5mm;黑云母:长条状,绿泥石交代发育,零星,粒径 0.7mm。主要副矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石。

粗中粒二长花岗岩:岩石为灰色,粗中粒花岗结构,块状构造。岩石由钾长石、斜长石、石英和黑云母组成。钾长石:呈他形粒状,为条纹长石,多沿斜长石边缘镶边交代,呈交代蚕蚀结构或斑块状零星交代,条纹呈纹状、细脉状,弱泥化,粒径 1.5~11mm,含量 40%;斜长石:半自形板状,聚片双晶细密,更长石,晶面绢云母、粘土矿物交代发育,粒径 1.5~5mm,含量 30%;石英:不规则状,粒径 1~4.5mm,含量 28%;黑云母:长条状,绿泥石交代发育,零星,粒径 0.7mm,含量 2%。主要副矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石、榍石。

2 样品采集与分析方法

用于 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年的样

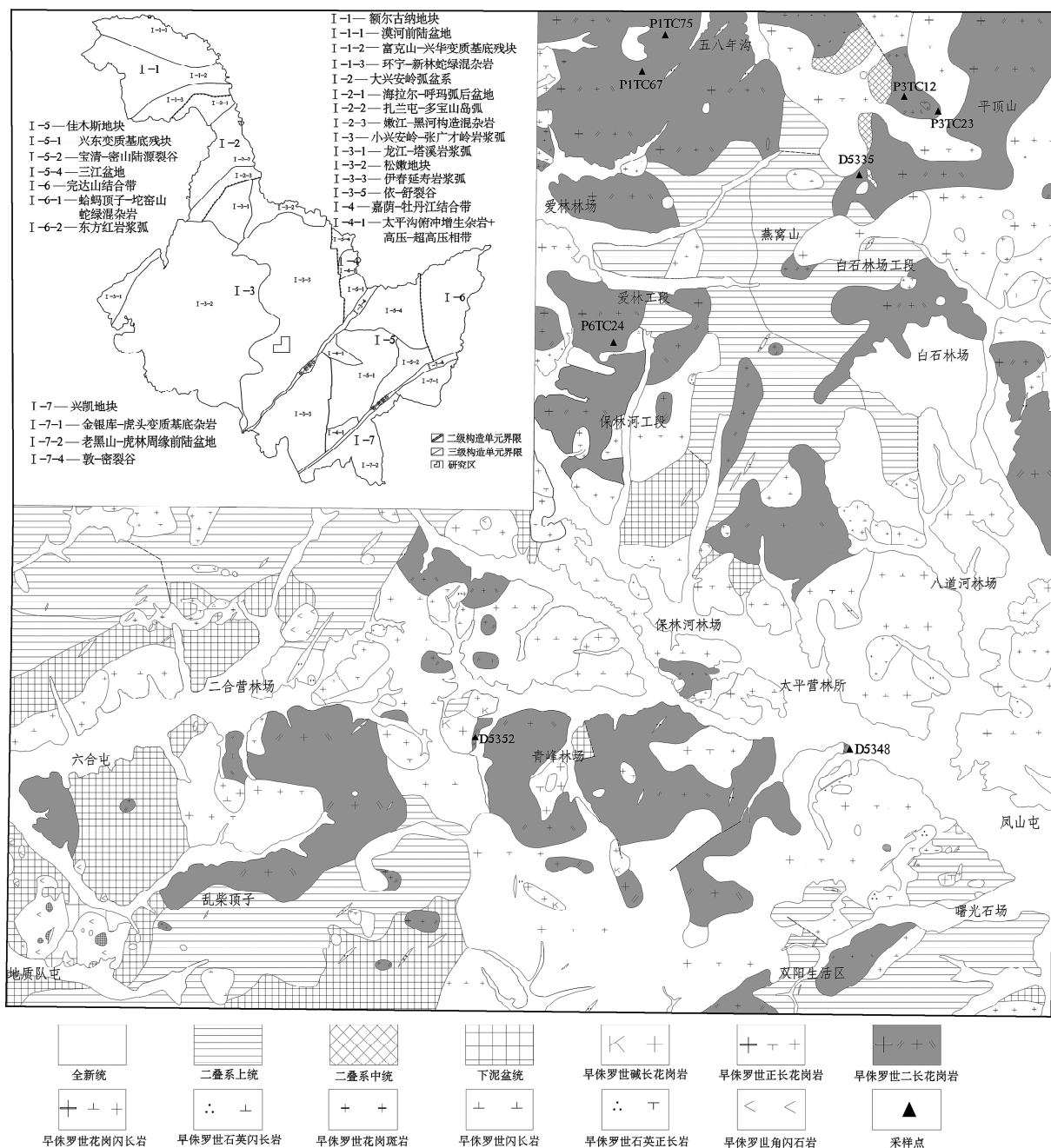


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

品为具有代表性的二长花岗岩样品(D5335)。首先采用常规方法进行粉碎并分选出锆石,在双目镜下挑选出晶形和透明度较好、裂隙和包体较少的锆石颗粒为测定对象,测试工作在天津地质矿产研究所 LA-ICP-MS 实验室完成。测试在加载有 Geolas200M 型激光剥蚀系统的 LA-ICP-MS 仪器上进行(德国 MicroLa 公司生产),采用 193nm ArF

准分子激光与 Elan6100DRC ICP-MS 联接,采用标准锆石 91500 外部校正法进行锆石 U-Pb 定年。激光剥蚀斑束直径为 30 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。详细的实验原理和流程及仪器参数见参考文献[18]。年龄数据处理及谐和图采用 Isoplot 3.0 软件完成^[19]。

采集 8 件新鲜二长花岗岩样品进行岩石地球化

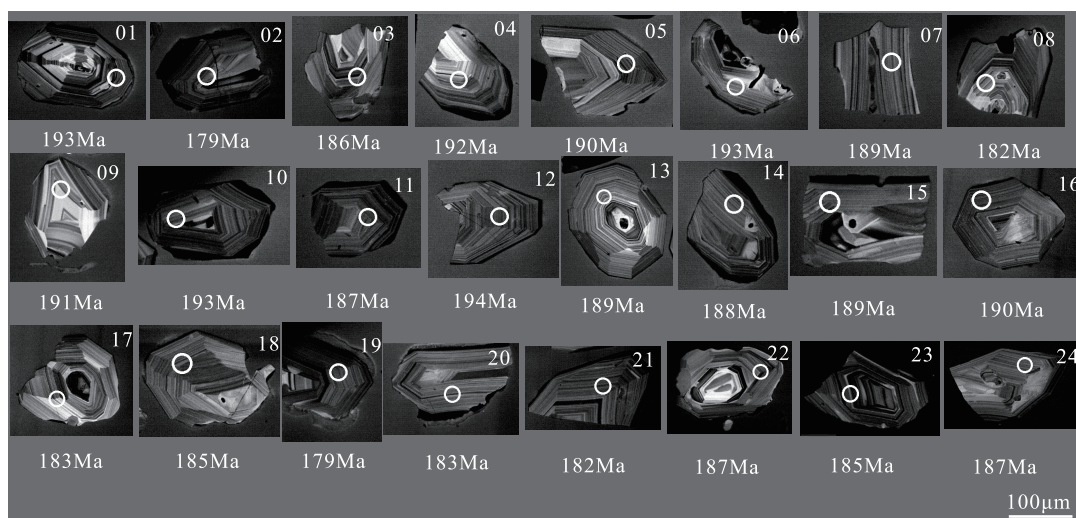


图2 二长花岗岩锆石阴极发光图像(D5335)

Fig. 2 Zircon cathodoluminescences images of the monzonitic granites(D5335)

学分析,主量、微量和稀土元素分析在自然资源部哈尔滨矿产资源监督检测中心完成。主量元素采用X-射线荧光光谱仪(XRF-1500)法测试,分析误差优于2%~3%;稀土和微量元素使用ICP-MS(Element II)进行测试,分析误差优于10%。化学分析测试流程见参考文献[20-21]。

3 锆石 U-Pb 测年

二长花岗岩样品(D5335)采自白石林场工段北约2km处的露头,对其进行LA-ICP-MS锆石U-Pb定年。选取了24颗锆石进行测年分析,分析结

果见表1。锆石阴极发光(CL)图像显示,所测锆石晶形较好,颗粒均为自形异晶(图2),内部呈现典型的岩浆生长振荡环带结构,属于岩浆结晶的产物。锆石的Th含量为 $63 \times 10^{-6} \sim 471 \times 10^{-6}$,U含量为 $71 \times 10^{-6} \sim 569 \times 10^{-6}$,Th/U值在0.500~1.205之间,其中23个大于0.6,另外1个在0.6附近,表明这些锆石为岩浆成因锆石。根据测试结果,测得的24个锆石测点均落在谐和线或其附近(图3), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 $179 \pm 2 \sim 194 \pm 2\text{Ma}$,其年龄加权平均值为 $188 \pm 2\text{Ma}$ (MSWD=4.1),代表二长花岗岩的结晶年龄,表明其形成时代属早侏罗世。

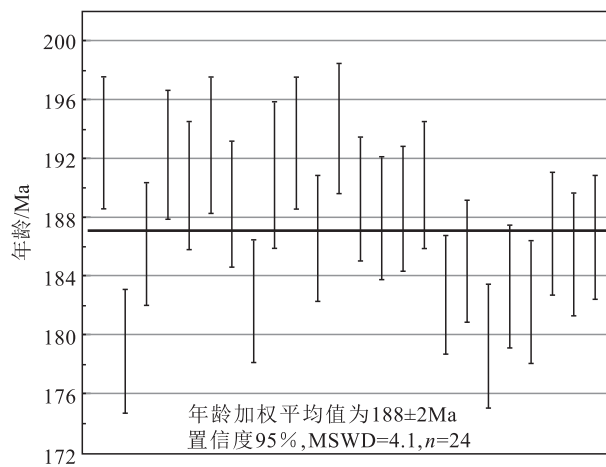
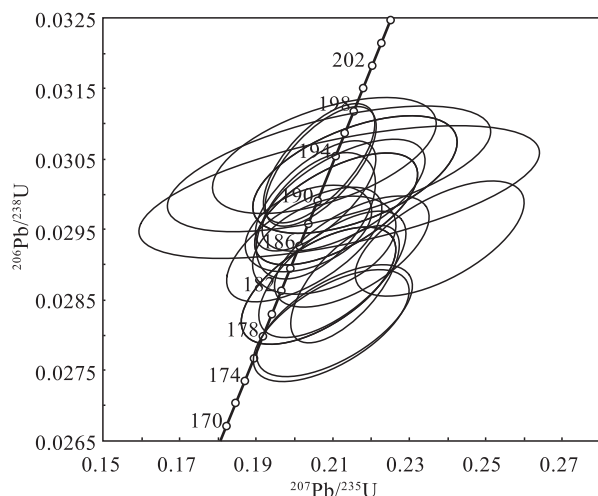


图3 二长花岗岩锆石U-Pb年龄谐和图(D5335)

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram for the monzonitic granites(D5335)

表 1 早侏罗世二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 定年数据 (D5335)
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating results for the Early Jurassic monzonitic granite (D5335)

分析 序号	含量/ 10^{-6}		同位素比值										年龄/Ma					
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	err/%	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	err/%	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	err/%	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	err/%	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	err/%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
1	12	337	0.0304	1.2	0.208	2.8	0.0497	2.9	0.0082	2.5	0.903	0.05	193	2	192	5	179	65
2	18	569	0.0281	1.2	0.210	3.9	0.0540	3.9	0.0084	2.8	0.828	0.01	179	2	193	8	373	88
3	12	361	0.0293	1.1	0.205	4.5	0.0507	4.6	0.0080	2.3	0.900	0.03	186	2	189	9	229	106
4	6	191	0.0303	1.1	0.216	5.0	0.0518	4.9	0.0074	2.4	0.673	0.05	192	2	199	10	275	113
5	11	321	0.0299	1.1	0.206	3.1	0.0499	3.0	0.0070	2.1	1.18	0.11	190	2	190	6	191	70
6	9	256	0.0304	1.2	0.209	8.3	0.0500	8.3	0.0083	2.6	0.935	0.02	193	2	193	16	195	193
7	7	219	0.0297	1.1	0.210	4.5	0.0513	4.4	0.0068	2.8	0.500	0.15	189	2	194	9	252	101
8	6	214	0.0287	1.1	0.207	4.0	0.0522	4.0	0.0065	2.9	0.688	0.31	182	2	191	8	295	91
9	2	71	0.0300	1.3	0.212	10	0.0511	10	0.0077	3.4	0.876	0.01	191	2	195	20	246	233
10	11	337	0.0304	1.2	0.207	2.8	0.0493	2.8	0.0074	2.5	0.896	0.04	193	2	191	5	162	65
11	10	330	0.0294	1.1	0.206	2.9	0.0508	2.9	0.0066	2.3	0.707	0.02	187	2	190	6	233	66
12	8	255	0.0306	1.1	0.208	5.7	0.0494	5.6	0.0066	2.4	0.883	0.03	194	2	192	11	165	131
13	10	340	0.0298	1.1	0.205	2.9	0.0498	2.8	0.0059	2.2	0.639	0.01	189	2	189	5	185	66
14	11	340	0.0296	1.1	0.206	2.6	0.0506	2.6	0.0056	2.2	0.816	0.00	188	2	191	5	223	59
15	12	389	0.0297	1.1	0.202	2.6	0.0493	2.5	0.0055	2.5	0.913	0.03	189	2	187	5	162	59
16	7	206	0.0299	1.1	0.213	4.2	0.0516	4.1	0.0056	2.5	1.21	0.02	190	2	196	8	266	93
17	11	353	0.0288	1.1	0.204	2.7	0.0515	2.6	0.0052	2.2	0.833	0.02	183	2	189	5	265	61
18	12	413	0.0291	1.1	0.214	2.3	0.0533	2.3	0.0059	2.0	0.714	0.04	185	2	197	5	341	52
19	18	569	0.0282	1.2	0.211	3.9	0.0541	3.9	0.0073	2.4	0.817	0.01	179	2	194	8	377	88
20	10	320	0.0288	1.1	0.214	2.6	0.0537	2.5	0.0060	2.0	0.761	0.03	183	2	197	5	359	56
21	10	335	0.0287	1.1	0.213	2.7	0.0538	2.6	0.0061	2.1	0.944	0.08	182	2	196	5	364	58
22	10	308	0.0294	1.1	0.208	3.6	0.0512	3.5	0.0065	2.3	0.898	0.20	187	2	192	7	249	81
23	7	237	0.0292	1.1	0.215	3.8	0.0535	3.7	0.0066	2.5	0.636	0.12	185	2	198	7	348	84
24	7	237	0.0294	1.1	0.238	3.8	0.0587	3.7	0.0072	2.5	0.636	0.12	187	2	217	8	556	81

注:测试单位为天津地质矿产研究所测试中心

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

研究区二长花岗岩的主量、微量和稀土元素分析结果见表 2。二长花岗岩样品的 SiO_2 含量为 70.46%~74.46%, 平均值为 71.71%; 全碱含量 ($\text{ALK} = \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 为 7.67%~8.59%, 平均值为 8.02%, 表现出富硅、富碱的特征。全岩 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.81~1.16, 平均值为 0.99, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 。含铝指数 A/CNK 和 A/NK 分别为 0.95~1.12 和 1.17~1.32。 MgO 、 TiO_2 和 P_2O_5 含量分别

为 0.39%~1.15%、0.27%~0.49% 和 0.05%~0.13%, 岩石固结指数 (SI) 为 4.00~9.55, 里特曼指数 (σ) 在 1.90~2.50 之间, 显示岩石为钙碱性。根据 $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图解 (图 4-a), 二长花岗岩样品点均落入花岗岩区域, 与岩相学观察特征基本一致, 且所有样品点均落在亚碱性系列区; 用 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解进一步分类, 所有样品点均落入高钾钙碱性系列区 (图 4-b)。在 $\text{A}/\text{CNK} - \text{A}/\text{NK}$ 图解 (图 4-c) 上, 样品点全部落在准铝-弱过铝质花岗岩区。总体看, 样品为准铝-弱过铝质、高钾钙碱性系列岩石。

表 2 早侏罗世二长花岗岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace elements and REE compositions for the Early Jurassic monzonitic granite

样品号	P ₁ TC ₆₇	P ₁ TC ₇₅	P ₃ TC ₁₂	P ₃ TC ₂₃	P ₇ TC ₂₄	5335	5348	5352
SiO ₂	74.46	72.50	72.08	70.92	70.92	70.78	71.52	70.46
TiO ₂	0.27	0.31	0.29	0.37	0.43	0.42	0.37	0.49
Al ₂ O ₃	13.11	13.76	13.94	14.28	13.85	14.17	14.20	13.72
Fe ₂ O ₃	0.91	1.20	1.12	1.20	0.84	1.47	1.59	1.86
FeO	0.73	0.70	0.91	1.04	1.83	1.55	0.94	1.36
MnO	0.06	0.09	0.06	0.07	0.15	0.08	0.08	0.09
MgO	0.39	0.53	0.66	0.77	0.79	0.59	0.60	1.15
CaO	1.23	1.25	1.74	1.98	1.66	1.77	1.62	1.00
Na ₂ O	3.58	4.31	4.13	4.54	3.82	4.10	4.13	3.75
K ₂ O	4.15	4.28	3.83	3.66	4.07	3.74	4.11	3.92
P ₂ O ₅	0.05	0.07	0.08	0.09	0.11	0.11	0.06	0.13
烧失量	0.36	0.28	0.36	0.46	0.76	0.38	0.64	1.34
总计	99.30	99.28	99.20	99.38	99.23	99.16	99.86	99.27
σ	1.90	2.50	2.18	2.41	2.23	2.21	2.38	2.14
SI	4.00	4.82	6.21	6.88	6.96	5.16	5.30	9.59
ALK	7.73	8.59	7.96	8.20	7.89	7.84	8.24	7.67
A/CNK	1.04	0.98	0.99	0.95	1.01	1.01	1.00	1.12
K/Na	1.16	0.99	0.93	0.81	1.07	0.91	1.00	1.05
A/MF	4.12	3.56	3.17	2.88	2.44	2.54	2.91	1.90
AR	3.34	3.68	3.06	3.03	3.07	2.94	3.17	3.18
La	34.20	35.70	30.60	28.10	33.70	43.40	39.10	38.60
Ce	70.00	69.10	55.60	53.00	61.80	93.80	79.90	77.30
Pr	7.84	7.91	5.83	6.05	6.55	9.26	9.10	7.86
Nd	27.80	27.60	19.20	21.20	22.50	31.90	32.00	27.30
Sm	4.89	4.85	3.14	3.54	3.69	5.42	5.79	4.52
Eu	0.97	1.07	0.77	0.89	0.93	1.00	1.13	1.06
Gd	4.30	4.18	2.81	3.07	3.23	4.89	5.10	3.95
Tb	0.69	0.66	0.42	0.46	0.48	0.74	0.83	0.58
Dy	4.10	3.85	2.31	2.55	2.60	4.28	4.94	3.13
Ho	0.82	0.79	0.49	0.52	0.53	0.89	1.05	0.64
Er	2.56	2.37	1.53	1.62	1.62	2.74	3.26	1.92
Tm	0.40	0.39	0.26	0.26	0.26	0.46	0.55	0.32
Yb	2.75	2.64	1.81	1.88	1.83	3.33	3.99	2.28
Lu	0.42	0.41	0.31	0.29	0.29	0.50	0.64	0.42
Y	22.50	21.70	14.40	14.50	15.10	26.10	29.60	17.30
Σ REE	161.74	161.52	125.08	123.43	140.01	202.61	187.38	169.88
LREE/HREE	9.08	9.56	11.58	10.59	11.92	10.36	8.20	11.83
(La/Yb) _N	8.38	9.12	11.40	10.08	12.42	8.79	6.61	11.41
(La/Sm) _N	6.99	7.36	9.75	7.94	9.13	8.01	6.75	8.54
δ Ce	0.99	0.95	0.94	0.94	0.94	1.08	0.99	1.01

续表 2

样品号	P ₁ TC ₆₇	P ₁ TC ₇₅	P ₃ TC ₁₂	P ₃ TC ₂₃	P ₇ TC ₂₄	5335	5348	5352
δEu	0.63	0.71	0.78	0.81	0.81	0.58	0.62	0.75
Sr	214	187	262	318	330	291	236	230
Rb	123	132	119	114	125	125	126	127
Ba	500	735	711	817	664	573	668	553
Th	11.6	11.1	10.5	8.21	9.99	21.3	16	18.6
Nb	13.3	14.2	11.9	11.7	13.2	18.7	22.7	18.5
Zr	82	131	106	114	138	201	113	132
Ta	1.33	1.03	1.08	1.00	0.98	2.00	2.08	1.52
Hf	3.20	5.10	3.40	5.10	4.30	5.70	4.40	4.10
Sc	2.11	3.24	3.01	3.02	3.06	4.01	4.18	6.99
Ti	1719	1812	1928	2397	2631	2718	2377	3160
Zr/Hf	25.63	25.69	31.18	22.35	32.09	35.26	25.68	32.20
Rb/Sr	0.57	0.71	0.45	0.36	0.38	0.43	0.53	0.55

注:测定单位为自然资源部哈尔滨矿产资源监督检测中心。主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

4.2 稀土和微量元素

根据稀土元素组成(表 2)及配分曲线分布型式(图 5-a),二长花岗岩样品的稀土元素总量(ΣREE)为 $123.43 \times 10^{-6} \sim 202.61 \times 10^{-6}$,平均为 155.72×10^{-6} ,略大于陆壳平均值(154.70×10^{-6})。轻稀土元素(LREE)为 $112.78 \times 10^{-6} \sim 184.86 \times 10^{-6}$,重稀土元素(HREE)为 $9.94 \times 10^{-6} \sim 20.36 \times 10^{-6}$,LREE/HREE 值为 6.93~11.92, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 6.61~12.42。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线分布型式为轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的右倾型(图 5-a),其轻稀土元素配分曲线斜率较大,表明轻稀土元素经历了较高的分异变化,而重稀土元素曲线相对平坦,表明重稀土元素经历的分异作用较低。另外,二长花岗岩样品($\delta\text{Eu} = 0.58 \sim 0.81$)表现出轻微的负 Eu 异常。

微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5-b)中,岩石样品表现为富集大离子亲石元素 Rb、K 和高场强元素 Hf、Zr、Th,相对亏损大离子亲石元素 Ba、Sr 和高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 P,具活动大陆边缘岩浆弧花岗岩的特点^[22]。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上表现出总体右倾趋势,大离子亲石元素 Ba、Sr 及高场强元素 Nb、Ti 等和 P 相对于其他不相容元素为负异常,构成了 5 个明显的亏损槽。

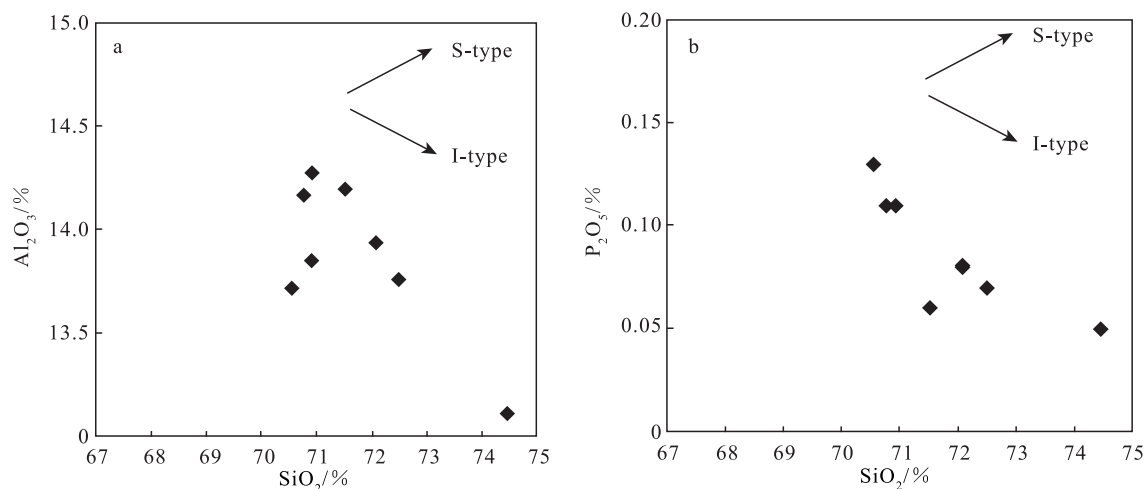
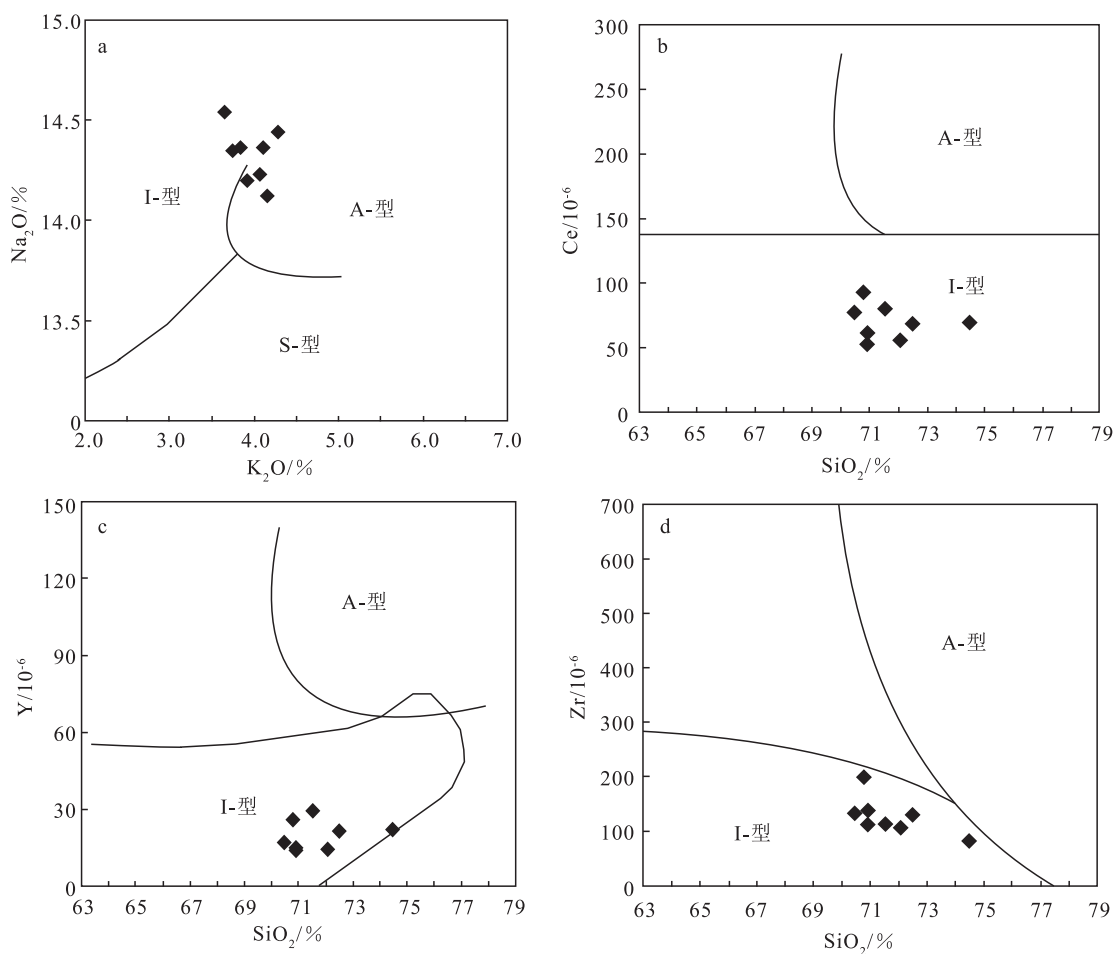
5 讨论

5.1 岩石成因类型及岩浆源区性质

研究区二长花岗岩属于高钾钙碱系列, SiO_2 含

量高,均在 70.46% 以上, TFeO/MgO 平均值为 3.46,贫钙(CaO 含量平均值为 1.53%), Al_2O_3 含量为 13.11%~14.28%,小于 15%,全碱含量介于 7.67%~8.59%之间,平均值为 8.02%,贫镁(MgO 含量平均值为 0.69%)、低磷(P_2O_5 含量平均值为 0.09%)、低钛(TiO_2 含量平均值为 0.37%),分异指数(DI)为 85.21~90.08,反映岩石分异程度较高。

研究区二长花岗岩岩体中,暗色矿物出现黑云母、角闪石,显示二长花岗岩样品具有 I 型花岗岩的特点^[23];主要副矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石、榍石,未见堇青石、白云母、石榴子石等富铝矿物;从主量元素分析结果可以看出,其具有准铝-弱过铝质岩石的特点,属于高钾钙碱性系列的花岗岩。在 $(\text{Na} + \text{K} + \text{Ca}/2) - \text{Al}$ 图解(图 4-d)上,样品点落入 I 型花岗岩区域,其含铝指数 $\text{A}/\text{CNK} = 0.95 \sim 1.12$, $\text{A}/\text{NK} = 1.17 \sim 1.32$,高硅富碱,低 CaO 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 MnO 、 MgO 和 P_2O_5 的特征。 Al_2O_3 和 P_2O_5 的含量随着 SiO_2 含量的升高而降低(图 6),与 S 型花岗岩演化趋势具有明显差异^[24-26],具有 I 型花岗岩的演化趋势。另外,岩石相对富集 REE(除 Eu)和大离子亲石元素(Rb、K),强烈亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、Ti、P,与 A 型花岗岩低 Sr、Eu 和富集 Nb、Zr 等元素的特点不符^[27-28]。在 $\text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O}$ 图解(图 7-a)上,样品点大部分落入 I 型花岗岩区。从 $\text{SiO}_2 - \text{Ce}$ 、 $\text{SiO}_2 - \text{Y}$ 、 $\text{SiO}_2 - \text{Zr}$ 花岗岩成因类型判别图解可以看出(图 7-b、c、d),样品均落在高分异的 I 型花岗岩区域,因

图 6 二长花岗岩 SiO_2 - Al_2O_3 (a) 和 SiO_2 - P_2O_5 (b) 图解Fig. 6 SiO_2 - Al_2O_3 (a) and SiO_2 - P_2O_5 (b) discriminant diagrams of monzonitic granites图 7 二长花岗岩 K_2O - Na_2O (a)、 SiO_2 - Ce (b)、 SiO_2 - Y (c) 和 SiO_2 - Zr (d) 图解Fig. 7 K_2O - Na_2O (a), SiO_2 - Ce (b), SiO_2 - Y (c) and SiO_2 - Zr (d) discriminant diagrams of monzonitic granites

此也能够排除是 A 型花岗岩的可能性^[15, 29-30]。综上所述,本次研究的二长花岗岩属于准铝质-弱过铝质高钾钙碱性的 I 型花岗岩。而高钾钙碱性 I 型花岗岩的岩浆主要来源于下地壳岩石的部分熔融^[31-32]。

花岗质岩石的成因主要分为幔源岩浆的结晶分异、岩浆混合过程和地壳物质的部分熔融。由于花岗岩是大陆地壳的重要组成部分,花岗岩的成因显然与大陆的演化存在密切联系。Pitcher 等^[33]在安第斯山花岗岩的研究中提出,花岗岩主要是通过两阶段岩浆作用形成的。在该区活动大陆边缘的背景下,弧后的扩张使地幔发生部分熔融,造成岩浆底侵,正是持续不断的底侵作用使早期的底侵物质发生部分熔融形成花岗岩,这对岛弧和活动大陆边缘环境下 I 型花岗岩的形成可能有一定的普适性。吴福元等^[34-35]提出,东北地区的绝大多数岩体属于 I 型花岗岩,为大量岩浆以板底垫托形式就位于地壳底部,并促使上覆的先存年轻地壳发生部分熔融形成花岗质岩浆。

本次研究的早侏罗世二长花岗岩具有高硅和贫钙、铁、镁的地球化学特征,在稀土元素球粒陨石标准化分布图解上,研究区早侏罗世二长花岗岩均体现出轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的“右倾”配分模式,以及轻微的负 Eu 异常($\delta\text{Eu} = 0.58 \sim 0.81$),暗示在分馏作用中斜长石从岩浆分离出来或在部分熔融作用下斜长石残留在源区^[36]。其次,二长花岗岩显示有较高的 Yb ($1.81 \times 10^{-6} \sim 3.99 \times 10^{-6}$) 和 Y ($14.4 \times 10^{-6} \sim 29.6 \times 10^{-6}$) 含量,说明残留相中没有石榴子石。由于花岗岩中的 Sr 主要代替 Ca 富集于斜长石中, Ba 占据早结晶含 K 矿物的 K 位置,所以元素 Sr、Ba 和 K 的亏损,说明斜长石、钾长石和黑云母发生了明显的分离作用;元素 P 和 Ti 的亏损,可能与磷灰石、榍石等含 P、Ti 矿物的分离结晶作用有关;元素 Nb、Ta 的强烈亏损,表明岩浆为地壳来源或受到地壳物质的混染^[37];Nb 的负异常也是大陆地壳的特征,可能指示地壳物质参与了岩浆过程^[38]。以上数据说明,研究区二长花岗岩起源于下地壳物质的部分熔融,且在形成过程中存在分离结晶作用^[39-41]。

5.2 构造背景及地质意义

研究区大地构造位置位于兴安岭-内蒙地槽褶皱区(I 级)、小兴安岭-张广才岭岩浆弧(I-3)、

伊春-延寿岩浆弧(I-3-3)。该地区经历了古亚洲洋扩张、萎缩、陆缘增生演化阶段、古太平洋板块活动阶段及滨太平洋大陆边缘活动阶段 3 个主要的构造发展阶段。在 Y-Nb 构造判别图解(图 8-a)上,研究区二长花岗岩样品点均落入火山弧花岗岩(VAG)和同碰撞花岗岩(syn-COLG)区域;在 Yb-Ta 构造判别图解(图 8-b)上,样品点落在火山弧花岗岩(VAG)、同碰撞花岗岩(syn-COLG)和板内花岗岩(WPG)的交汇区域,而且大部分在火山弧花岗岩(VAG)区域。在(Y+Nb)-Rb 构造判别图解(图 8-c)上,样品点均落入火山弧花岗岩(VAG)及后碰撞花岗岩(Post-COLG)重叠区域;在(Yb+Ta)-Rb 构造判别图解(图 8-d)上,样品点均落入火山弧花岗岩(VAG)内;在 Rb/30-Hf-Ta $\times 3$ 判别图解(图 9-a)上,样品点均落在火山弧花岗岩和碰撞后花岗岩的边界附近。在 R₁-R₂ 图解(图 9-b)上,样品点大部分都落入同碰撞期区域。研究区所有样品都表现出负 Nb 异常,且其他高场强元素相对亏损,呈现出与俯冲有关的岩浆特征,也可见于以岛弧物质为物源的壳源花岗岩中^[38, 44-45]。上述特征表明,研究区二长花岗岩是活动大陆边缘岩浆活动的产物。

小兴安岭南部地区的构造环境是与东部的古太平洋板块的俯冲有关,还是与该区西北部的蒙古-鄂霍茨克洋板块俯冲作用有关?首先,吉黑东部-朝鲜半岛北端的早侏罗世陆缘钙碱性火成岩到小兴安岭-张广才岭-辽东半岛地区的典型双峰式火山岩组合,构成了平行东北亚东部大陆边缘的成分分带,指示了俯冲的方向,分别对应古太平洋板块向欧亚大陆下俯冲形成的活动大陆边缘环境和弧后伸展环境,进一步说明古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用始于早侏罗世^[1-2, 46];在古太平洋板块俯冲于欧亚大陆之下的过程中,这些古老的俯冲带再次复活,形成具有活动陆缘构造背景以钼为主的斑岩型矿床,如小兴安岭-张广才岭早侏罗世斑岩型矿床的形成^[47-48];而研究区早侏罗世二长花岗岩属于高钾钙碱性 I 型花岗岩,具有活动大陆边缘及火山弧花岗岩的特点,暗示该时期研究区二长花岗岩形成于古太平洋板块向欧亚大陆下俯冲作用。其次,从东北地区中生代火山岩的空间展布可以判定,吉黑东部和额尔古纳地区早-中侏罗世钙碱性火山岩的存在分别标志古太平洋板块和蒙

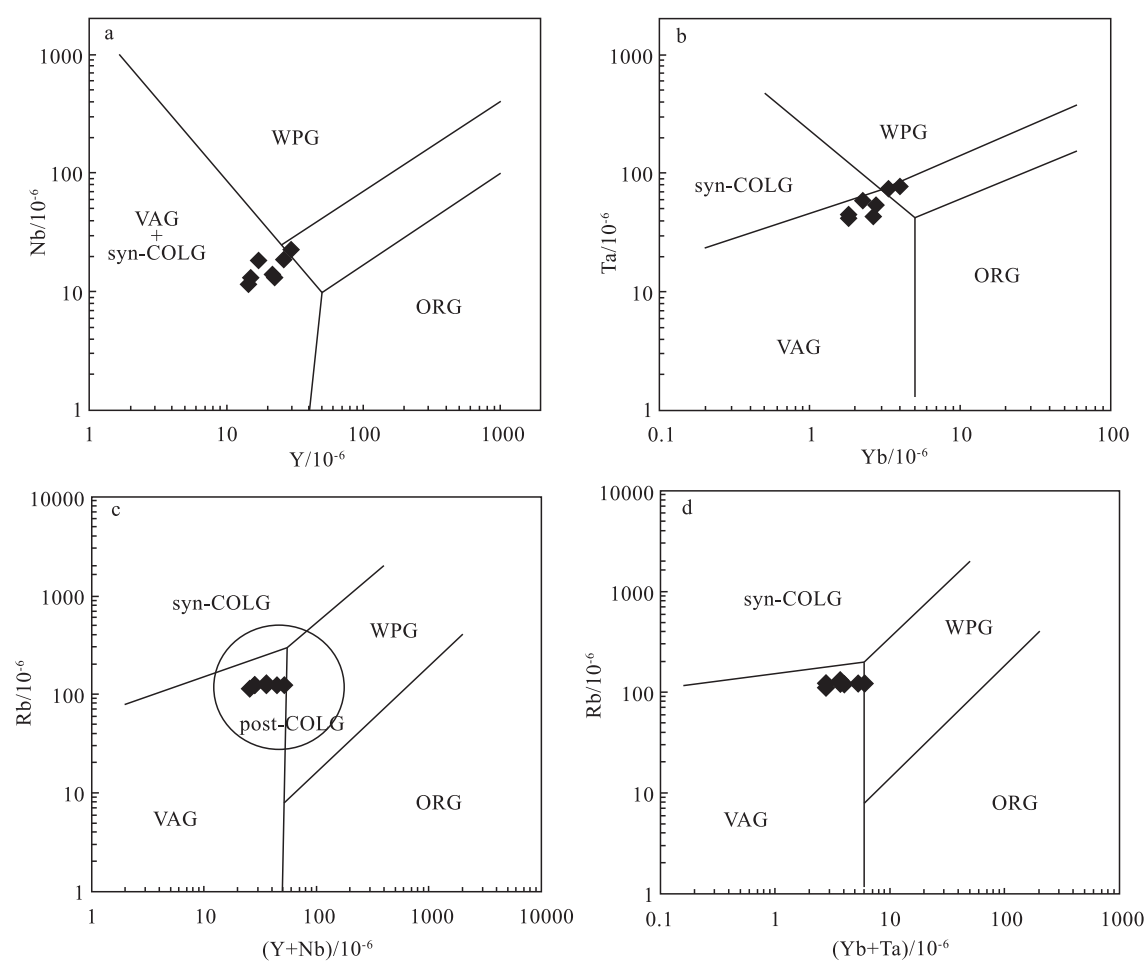


图 8 微量元素构造环境判别图^[42-43]

Fig. 8 Tectonic environment discriminant diagrams of trace elements
ORG—大洋脊花岗岩;WPG—板内花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;
syn-COLG—同碰撞花岗岩;post-COLG—后碰撞花岗岩

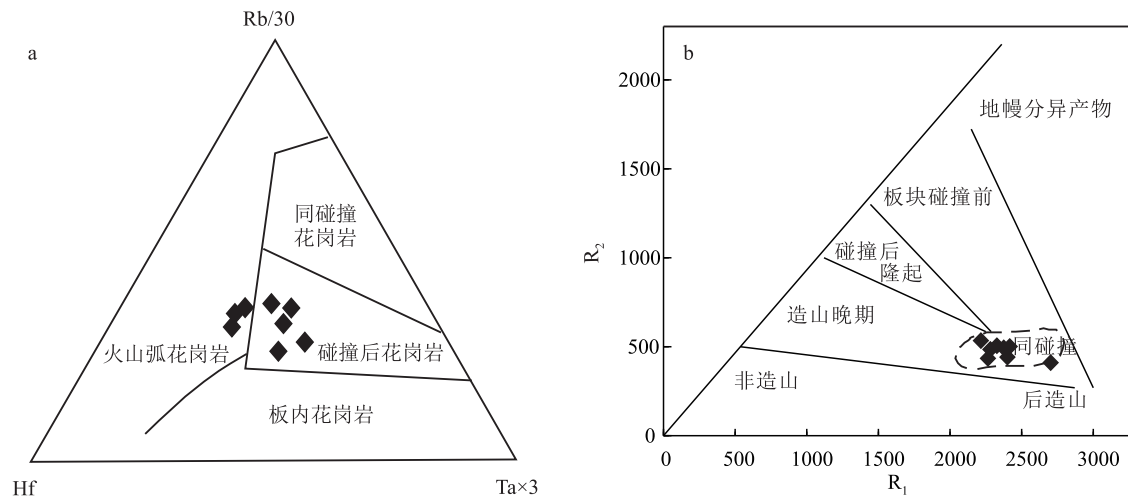


图 9 二长花岗岩 Rb/30-Hf-Ta×3(a)和 R₁-R₂(b)判别图解

Fig. 9 Rb/3-Hf-Ta×3(a) and R₁-R₂(b) discriminant diagrams of monzonitic granites

古-鄂霍茨克洋板块俯冲作用的发生,而小兴安岭—张广才岭早—中侏罗世火山岩则以双峰式火成岩组合为特征,反映了双向俯冲的弧后伸展环境^[6];额尔古纳地块的西缘也存在一套早中侏罗世二长花岗岩与正长花岗岩组合,且它们具有斑岩型钼(铜)矿的成矿属性,暗示活动陆缘的构造背景^[49-50]。这也在额尔古纳地块中早侏罗世(183Ma)钙碱性火山岩的发现中得到证实,这种活动陆缘背景应是蒙古-鄂霍茨克洋向额尔古纳地块之下俯冲作用的结果。小兴安岭—张广才岭早侏罗世火成岩同样处于蒙古-鄂霍茨克洋向额尔古纳地块之下俯冲的弧后环境^[51],暗示该时期研究区二长花岗岩形成于蒙古-鄂霍茨克洋向额尔古纳地块之下俯冲的弧后环境。

综上所述,研究区早侏罗世二长花岗岩的形成应与古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用和蒙古-鄂霍茨克洋向额尔古纳地块之下的俯冲作用,即双向俯冲作用的弧后伸展环境相对应,其岩浆起源于下地壳物质的部分熔融。

6 结 论

(1)小兴安岭南部早侏罗世二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 188 ± 2 Ma,属于早侏罗世,为小兴安岭南部中生代构造演化研究提供了可靠的年代学资料。

(2)地球化学特征表明,研究区二长花岗岩属准铝—弱过铝质高钾钙碱性系列的 I 型花岗岩,富集大离子亲石元素 Rb、K 和高场强元素 Hf、Zr、Th,相对亏损大离子亲石元素 Ba、Sr 和高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 P,岩浆来源为下地壳物质的部分熔融。

(3)研究区二长花岗岩的形成应与古太平洋板块向欧亚大陆下的俯冲作用和蒙古-鄂霍茨克洋向额尔古纳地块之下的俯冲作用,即双向俯冲作用的弧后伸展环境相对应。

致谢:感谢项目组成员的辛勤付出,感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

[1] 唐杰,许文良,王枫,等.古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史:东北亚陆缘中生代—古近纪岩浆记录[J].中国科学:地球科学,2018,48(5):549-583.

[2] 唐杰,许文良,王枫,等.东北亚早中生代火成岩组合的时空变异:对古太平洋板块俯冲开始时间的制约[J].矿物岩石地球化学通

报,2016,35(6):1181-1194.

[3] Sengör A M C, Natal' in B A. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis[C]//Yin A, Harrison T M. The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 486-641.

[4] Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 26(3/4): 207-224.

[5] Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Petrogenesis and implications for the breakup of the Rodinia supercontinent[J]. Precambrian Research, 2013, 224: 597-611.

[6] 许文良,王枫,裴福萍,等.中国东北中生代构造体制与区域成矿背景:来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J].岩石学报,2013,29(2):339-353.

[7] Xu W L, Ji W Q, Pei F P, et al. Triassic Volcanism in Eastern Heilongjiang and Jilin Province, NE China: Chronology, Geochemistry, and Tectonic Implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34: 392-402.

[8] Wu F Y, Sun D Y, Ge W Z, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(1): 1-30.

[9] 孟恩,许文良,裴福萍,等.黑龙江省东部中泥盆世火山作用及其构造意义——来自岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素的制约[J].岩石矿物学杂志,2011,30(5):883-900.

[10] 吴福元,SWILDE,孙德有,等.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,(3):443-452.

[11] 吴福元,杨进辉,柳小明,等.辽东半岛中生代花岗岩质岩浆作用的年代学格架[J].高校地质学报,2005,(3):305-317.

[12] Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. Chemical Geology, 2002, 187(1): 143-173.

[13] 张艳斌,吴福元,李惠民,等.吉林黄泥岭花岗岩体的单颗粒锆石 U-Pb 年龄[J].岩石学报,2002,(4):475-481.

[14] 林强,葛文春,吴福元,等.大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学[J].岩石学报,2004,(3):403-412.

[15] 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,(2):263-275.

[16] 孙德有,铃木和博,吴福元,等.吉林省南部荒沟山地区中生代花岗岩 CHIME 定年[J].地球化学,2005,(4):305-314.

[17] 徐美君,许文良,王枫,等.小兴安岭中部早侏罗世花岗岩质岩石的年代学与地球化学及其构造意义[J].岩石学报,2013,29(2):354-368.

[18] 袁洪林,吴福元,高山,等.东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J].科学通报,2003,(14):1511-1520.

[19] Ludwig K R. User's Manual for ISOPLOT 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, 2003, 4: 1-74.

[20] Chen F K, Hegner E, Todt W, et al. Zircon ages and Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest,

- Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc [J]. International Journal of Earth Sciences, 2000, 88(4): 791–802.
- [21] Chen F K, Siebel W, Satir M, et al. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone [J]. International Journal of Earth Sciences, 2002, 91(3): 469–481.
- [22] 王广婷, 孙德有, 孙如江, 等. 张广才岭南横道河子岩体地球化学特征及其成因 [J]. 世界地质, 2015, 34(2): 321–329.
- [23] 高秉璋, 洪大卫, 郑基俭, 等. 花岗岩类区 1: 5 万区域地质填图方法指南 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1991.
- [24] London D, Wolf M B, Morgan, et al. Experimental silicate–phosphate equilibria in peraluminous granitic magmas, with a case study of the albuquerque batholith at Tres Arroyos, Badajoz, Spain [J]. J. Petrol., 1999, 40: 215–240.
- [25] Broska I, Williams C T, Uher P, et al. The geochemistry of phosphorus in different granite suites of the western Carpathians, Slovakia: The role of apatite and P-bearing feldspar [J]. Chem. Geol., 2004, 205: 1–15.
- [26] 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等. 岩石成因、构造环境与成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [27] 贾小辉, 王强. A 型花岗岩的研究进展及意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 465–480.
- [28] 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 高分异花岗岩的识别与研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 745–765.
- [29] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W, et al. A-Type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407–419.
- [30] 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 等. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议 [J]. 地质论评, 2015, 61(4): 717–734.
- [31] 胡培远, 李才, 解超明, 等. 藏北羌塘中部桃形湖蛇绿岩中钠长花岗岩——古特提斯洋壳消减的证据 [J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4404–4414.
- [32] 贾晓亮, 郭瑞清, 柴凤梅, 等. 新疆库鲁克塔格西段泥盆纪二长花岗岩年龄、地球化学特征及其构造意义 [J]. 地质通报, 2013, 32(213): 239–250.
- [33] Pitcher W S, Atherton M D, Cobbing E J, et al. Magmatism at a plate edge: The Peruvian Andes [M]. Blackie, Glasgow, 1985.
- [34] 吴福元, 孙德有, 林强, 等. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生 [J]. 岩石学报, 1999, (2): 22–30.
- [35] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题 [J]. 岩石学报, 2007, (6): 1217–1238.
- [36] 杨学明, 杨小勇. 岩石地球化学 [M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2000.
- [37] 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, (2): 174–181.
- [38] 李佐臣, 裴先治, 李瑞保, 等. 西秦岭糜棱岩花岗岩体年代学、地球化学特征及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2013, 29(8): 2617–2634.
- [39] 李蓉, 孙德有, 荀军, 等. 张广才岭北部苇河花岗岩基的地球化学特征与岩石成因 [J]. 世界地质, 2012, 31(3): 462–470.
- [40] 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]. 地质学前沿, 2005, (2): 263–275.
- [41] 郑博. 黑龙江省铁力市东南部地区中生代晚三叠世—早侏罗世侵入岩的时代、地球化学特征及地质意义 [D]. 吉林大学博士学位论文, 2016.
- [42] Pearce J A, Harris, et al. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956–983.
- [43] Pearce A. Sources and Settings of Granitic Rocks [J]. Episodes, 1996, 19: 120–125.
- [44] Briquieu L, Bougault H, Joron J L, et al. Quantification of Nb, Ta, Ti and V anomalies in Magmas associated with subduction zones: Petrogenetic implications [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 68(2): 297–308.
- [45] Ma C Q, Li Z C, Ehlers C, et al. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China [J]. Lithos, 1998, 45(1/4): 431–456.
- [46] Yu J J, Wang F, Xu W L, et al. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an–Zhangguangcai Range, NE China, and its tectonic implications: Constraints from zircon U–Pb chronology and geochemistry [J]. Lithos, 2012, 142/143: 256–266.
- [47] 陈静, 孙丰月, 潘彤, 等. 黑龙江霍吉河钨矿成矿地质特征及花岗岩闪长岩年代学、地球化学特征 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增刊): 207–215.
- [48] 杨学辰, 韩世炯, 孙德有, 等. 小兴安岭—张广才岭成矿带斑岩型钼矿床岩石地球化学特征及其年代学研究 [J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 379–390.
- [49] 秦克章, 李惠民, 李伟实, 等. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床的成岩、成矿时代 [J]. 地质论评, 1999, 45(2): 180–185.
- [50] 陈志广, 张连昌, 吴华英, 等. 内蒙古西拉木伦成矿带碾子沟钼矿区 A 型花岗岩地球化学和构造背景 [J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 879–889.
- [51] 王伟, 许文良, 王枫, 等. 满洲里—额尔古纳地区中生代花岗岩的锆石 U–Pb 年代学与岩石组合: 对区域构造演化的制约 [J]. 高校地质学报, 2012, 18(1): 88–105.