

内蒙古济沁河林场晶洞花岗岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征

吴新伟^{1,2}, 李世超¹, 江 斌^{1,2}, 张渝金^{1,2}, 郭 威^{1,2}, 崔天日²,
李 伟², 司秋亮^{2,3}, 李林川^{1,2}

1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心(沈阳地质矿产研究所),
辽宁 沈阳 110034; 3. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819

摘 要: 对大兴安岭中部济沁河林场地区晶洞二长花岗岩进行了锆石 U-Pb 同位素年代学及地球化学研究, 并对其成岩时代、成因及构造意义进行讨论。从阴极发光图像上来看, 该晶洞二长花岗岩中锆石具有典型岩浆成因的振荡生长环带, 高 Th/U 比值也印证了其岩浆成因。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 岩体形成于 113.1~115.1 Ma 的早白垩世晚期。二长花岗岩具有高硅、富碱的特征, Eu 异常较小, 弱过铝质, 富集 U、Th, 强烈亏损 P 和 Ti, 微量元素中富集 Rb、Th、La、Zr、Hf, 而亏损 Ba、Sr、P、Ti。上述特征表明晶洞花岗岩是高分异的 I 型花岗岩, 其形成于华北板块、西伯利亚板块、北美板块和古太平洋板块四者汇聚之后的后碰撞伸展构造环境。

关键词: 大兴安岭; 晶洞花岗岩; 年代学; I 型花岗岩; 伸展构造; 内蒙古

ZIRCON U-Pb AGES AND GEOCHEMISTRY OF MIAROLITIC GRANITES IN JIQINHE LINCHANG AREA, INNER MONGOLIA

WU Xin-wei^{1,2}, LI Shi-chao¹, JIANG Bin^{1,2}, ZHANG Yu-jin^{1,2}, GUO Wei^{1,2}, CUI Tian-ri²,
LI Wei², SI Qiu-liang^{2,3}, LI Lin-chuan^{1,2}

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Shenyang 110034, China; 3. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: With study on the geochemistry and zircon U-Pb isotopic geochronology of the miarolitic granites in middle Daxinganling Mountains, the age, petrogenesis and tectonic implication are discussed. The zircons from the miarolitic granites show oscillatory growth zonation and high Th/U ratios, indicating a magmatic origin. The LA-ICP-MS U-Pb age of 113.1~115.1 Ma suggests that the rock was formed in the late stage of Early Cretaceous. The granites are characterized by high SiO₂ and rich alkali, with negative Eu anomaly and weak peraluminous. The trace elements are enriched in Rb, Th, La, Zr and Hf and depleted in Ba, Sr, P and Ti. It is concluded that the miarolitic granites belong to highly fractionated I-type, formed in a post-collisional extensional setting after the convergence of North China, Siberian, North American and Pacific plates.

Key words: Daxinganling Mountains; miarolitic granite; geochronology; I-type granite; extensional tectonics; Inner Mongolia

收稿日期: 2016-12-27; 修回日期: 2017-02-21. 编辑: 李兰英.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41340024, 41272223); 中国地质调查局项目(1212011120664, DD20160047).

作者简介: 吴新伟(1980—), 男, 博士研究生, 构造地质学专业, 高级工程师, 主要从事大兴安岭地区区域地质调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//46875025@qq.com

通信作者: 李世超(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事构造地质学研究工作, 通信地址 吉林省长春市建设街 2199 号, E-mail//789193@qq.com

大兴安岭地区位于中亚造山带东段的核心部位, 该区广泛发育晚中生代岩浆岩, 其组成、空间展布、演化及形成的构造背景一直是研究热点. 众多学者对大兴安岭地区岩浆岩做了大量的研究工作, 并根据岩浆岩的地球动力学成因陆续提出了多种地球动力学模型, 目前有古太平洋板块俯冲成因^[1-5]、地幔柱成因^[6-8]、软流圈上涌与岩石圈伸展构造成因^[9]以及蒙古-鄂霍次克洋俯冲成因^[10-21]等多种观点. 研究区位于大兴安岭北段南缘, 受古太平洋构造域与蒙古-鄂霍次克洋演化的影响, 是研究中国东北地区地球科学问题的重要地区之一, 然而由于植被覆盖等原因, 该区研究程度较薄弱, 尤其是花岗岩相关的研究更为欠缺.

本文以大兴安岭北段济沁河林场地区伊气罕岩体及济沁河南岸岩体为研究对象, 利用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素和岩石地球化学分析, 讨论大兴安岭北段上述岩体的形成时代、成因以及形成的大地构造背景问题.

1 区域地质背景与岩体地质特征

1.1 区域地质背景

研究区位于西伯利亚板块与华北板块之间古亚洲构造域与环太平洋构造域交汇部位, 属于夹持于二连-贺根山断裂和德尔布干断裂之间的大兴安岭北段晚古生代增生造山带, 西伯利亚古板块大陆边缘向南增生部分一级构造单元, 处于大兴安岭中华力西期褶皱带, 阿尔山复背斜南东翼与乌兰浩特复向斜北西翼三级构造单元上 (图 1). 晚古生代以来受两大构造域的影响, 研究区构造线方向以北东、北北东向为主.

济沁河林场地区出露地层有晚古生代隆起的大民山组变质火山岩、红水泉组变质砂岩、格根敖包组火山岩以及林西组砂岩、板岩; 中生代出露较为齐全的大兴安岭地区晚中生代火山岩序列——塔木兰沟组、满克头鄂博组、玛尼吐组、白音高老组、梅勒图组火山岩, 岩性分别以中性、酸性、中性、酸性、基性火山岩为主. 研究区侵入岩分为两期: 中生代早期为正长花岗岩; 晚中生代多为二长花岗岩和正长花岗岩.

1.2 岩体地质特征

济沁河林场地区的晶洞二长花岗岩主要分布于济沁河林场南岸 (济沁河南岸岩体) 及伊气罕林场一带 (伊气罕岩体). 济沁河南岸岩体总体呈北西向带状及不规则状展布, 由 15 个侵入体组成, 出露面积 39.17 km².

晶洞构造发育, 基质呈文象结构, 岩体发育原生水平层节理和垂直节理 (图 2a), 岩体侵入下白垩统梅勒图组 (K_1m) 及白音高老组 (K_1b), 被早白垩世闪长岩 (δK_1) 侵入. 伊气罕岩体总体呈不规则状、团块状分布, 出露面积 6.4 km², 岩体侵入上侏罗统玛尼吐组 (J_3mn) 及满克头鄂博组 (J_3m).

1) 济沁河南岸岩体

似斑状结构, 基质为文象结构, 具晶洞构造及块状构造. 斑晶中斜长石为自形板状, 环带发育, 部分聚片双晶可见, 由更长石组成, 含量 20% 左右. 黑云母为片状, 大小 3~5 mm, 含量 1%~2%. 基质: 碱长石为他形粒状, 大小 2~4 mm, 含量 38% 左右; 斜长石呈半自形板状, 大小 2~5 mm, 含量 15% 左右; 石英为他形粒状, 部分呈半自形晶, 且多为晶洞充填物, 大小 2~4 mm, 含量 23% 左右; 黑云母为细片状, 含量 2% 左右. 基质由碱长石、石英构成文象连晶, 互相穿插组成各种花纹, 其连晶粒度 1~3.5 mm. 岩石中石英颗粒细小, 基本都在基质中, 晶洞较发育, 在晶洞中可见石英晶簇. 该岩体由中心到边缘粒度逐渐由中粒过渡到细粒, 表现出明显的中心相、过渡相和边缘相, 相应的斜长石斑晶的粒度由 3~5 mm 变为 2~4 mm (图 2b).

2) 伊气罕岩体

具文象结构, 晶洞及块状构造. 由黑云母 (2% 左右)、斜长石 (30% 左右)、钾长石 (43% 左右) 及石英 (25% 左右) 组成. 斜长石为半自形板状, 聚片双晶宽窄不一, 大小 2~5 mm, 环带发育, 由更长石组成; 钾长石为半自形板状, 由条纹长石组成, 大部分与石英镶嵌呈文象结构, 大小 2~4 mm; 石英呈他形粒状, 晶面干净, 波状消光, 大部分与钾长石呈文象结构, 大小 2~5 mm; 黑云母为片状, 大小 2~4 mm. 该岩体由中心到边缘粒度逐渐由中粒过渡到细粒, 表现出明显的中心相、过渡相和边缘相, 相应的斑晶的粒度由大变小.

在 QAP 实际矿物图解 (图略) 中, 均投影入二长花岗岩区. 根据人工重砂样品分析可知, 2 个岩体的副矿物组合为: 锆石+磷灰石+钛铁矿+赤褐铁矿+榍石+绿帘石+角闪石+磁铁矿.

2 分析方法

用于锆石定年的样品采自天然露头的新鲜样品. 样品的破碎和锆石的挑选工作由河北省廊坊市科大矿

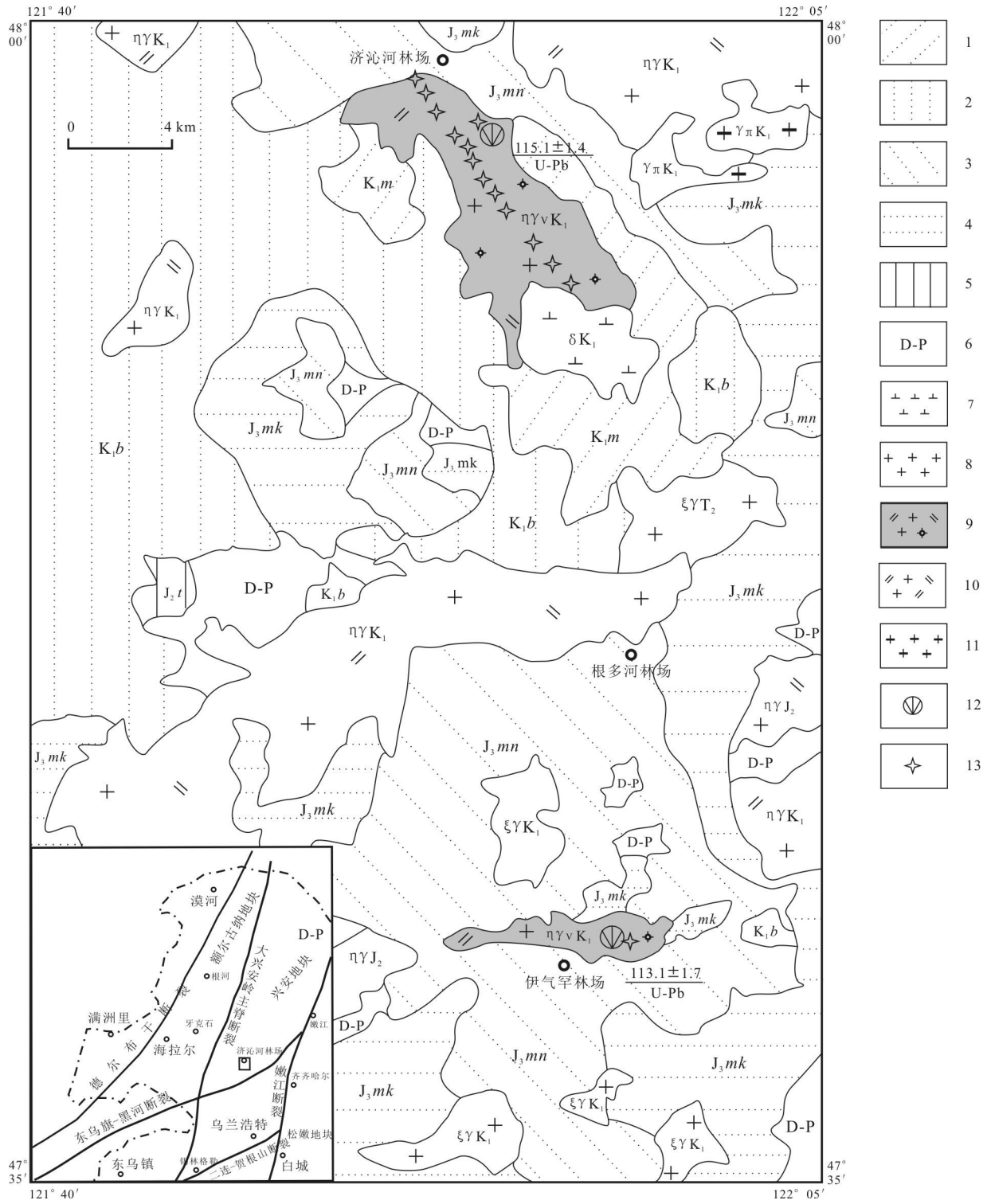


图1 济沁河林场地区岩体分布图

Fig. 1 Distribution of intrusive rocks in Jiqinhe Linchang area

1—梅勒图组 (Meiletu fm.); 2—白音高老组 (Baiyin'gaolao fm.); 3—玛尼吐组 (Ma'nitu fm.); 4—满克头鄂博组 (Manketou'ebo fm.); 5—塔木兰沟组 (Tamulan'gou fm.); 6—晚古生代地层 (Late Paleozoic); 7—闪长岩 (diorite); 8—正长花岗岩 (syengranite); 9—晶洞二长花岗岩 (miarolitic granite); 10—二长花岗岩 (monzogranite); 11—花岗斑岩 (granite porphyry); 12—同位素采样位置 (isotope sample position); 13—地球化学采样位置 (geochemical sample position)

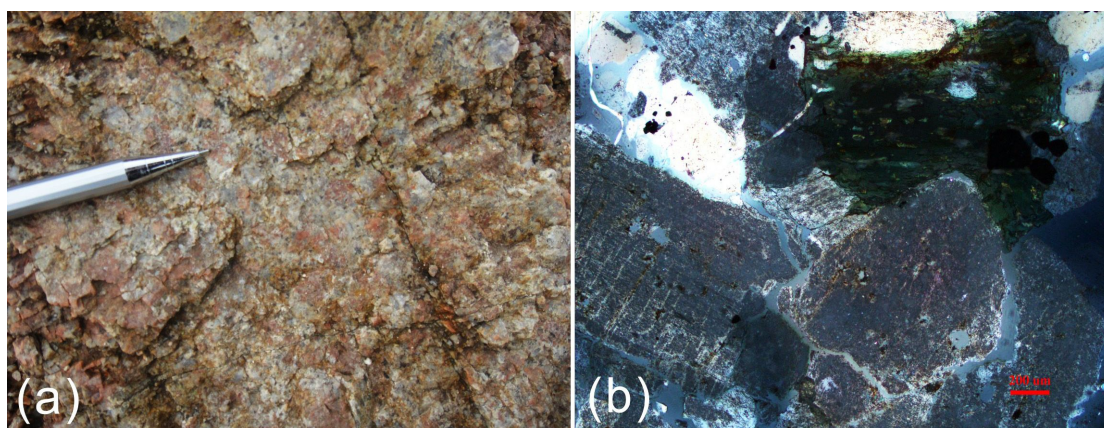


图2 晶洞二长花岗岩图片

Fig. 2 Images of the miarolitic granite

a—野外照片(field photograph); b—显微照片(microphotograph)

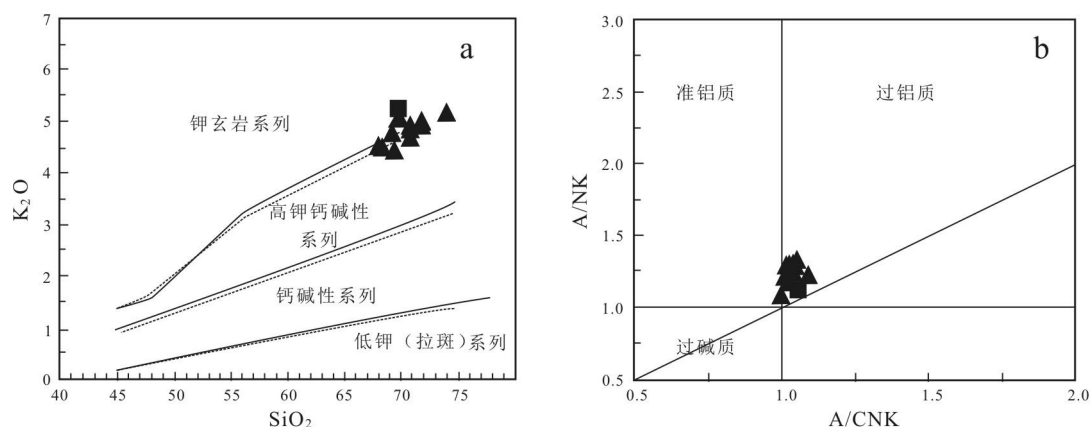
物分选技术股份有限公司完成. 锆石激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS) U-Pb 同位素分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成. 本次实验所采用的激光束斑直径为 20 μm , 普通铅校正采用 Anderson^[22] 的方法, 详细实验测试过程可参见文献[23]. 年龄计算采用国际标准程序 Isoplot (ver3.0). 本文所测试的锆石颗粒均具有清晰的岩浆型振荡环带结构, 表明这些锆石为岩浆结晶成因. 样品的主量元素和痕量元素分析在国土资源部东北矿产资源监督检测中心完成. 主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF), 痕量元素的分析则采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)完成. 主量元素分析精度和准确度优于 5%, 微量元素的分析精度和准确度一般优于 10%.

3 分析结果

3.1 主量元素

济沁河林场地区晶洞二长花岗岩的主量元素和痕量元素分析结果见表 1. 从表中可以看出, SiO_2 含量 67.96%~73.90%, 平均 70.03%, 根据岩浆岩大类划分标准, 属酸性岩类; Al_2O_3 含量 13.18%~15.67%; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 8.65%~9.9%, 平均 9.02%; 样品中 K_2O 与 Na_2O 总体上含量相当.

岩石固结指数 (SI) 1.99~5.73, 分异指数 (DI) 85.54~93.6, 固结指数偏低, 分异指数偏高, 说明岩石的酸性程度及结晶分异程度均较高. 里特曼指数 (σ) 2.7~3.66, 属钙碱性岩石. 在 SiO_2 - K_2O 图解(图 3a)上, 投影点落入高钾钙碱性系列, 伊气罕岩体的投影点落

图3 晶洞二长花岗岩的 SiO_2 - K_2O 图解和 A/CNK - A/NK 图解Fig. 3 The SiO_2 - K_2O diagram and A/CNK - A/NK diagram for the miarolitic granite1—济沁河南岸岩体(pluton in the south bank of Jiqinhe River, $\eta\gamma\gamma\text{K}_1$); 2—伊气罕岩体(Yiqihan pluton, $\eta\gamma\gamma\text{K}_1$)

入钾玄岩系列,也显示高钾钙碱性岩特征。 A/CNK 值在 0.997~1.089,为弱过铝质岩石。在 $ACNK-ANK$ 图(图 3b)中,岩石投影点落入过铝质区。

3.2 痕量元素

由表 1 可知,晶洞二长花岗岩的稀土元素总量(ΣREE)为 110.74×10^{-6} ~ 180.12×10^{-6} ,平均值 151.31×10^{-6} 低于陆壳平均值(154.7×10^{-6})^[24];反映轻重稀土元素分馏程度的 $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 比值为 9.86~13.77; $(La/Yb)_N$ 比值为 8.97~13.11,轻重稀土分馏明显,为轻稀土富集型。在球粒陨石标准化后的稀土元素配分模式(图 4a)中,为不对称右倾“海鸥”型,轻稀土元素曲线较陡,重稀土元素曲线相对较缓,表明轻稀土元素分馏作用较强,重稀土元素分馏作用相对较弱。 Ce 、 Gd 出现弱的正异常, Er 出现弱的负异常; δEu 值为 0.41~0.93,为弱亏损,说明源区岩浆发生过斜长石的分离结晶,导致残余熔体中 Eu 的亏损。

微量元素分析结果表明,微量元素中 Ba 、 K 等相对富集, Ba 、 Nb 、 Ti 、 P 等元素含量变化较大。从微量元素球粒陨石标准化蛛网图(图 4b)上看,高场强元素 Nb 等相对 LILE 亏损。 Nb 呈明显的负异常。 Nb 的负异常可能与地壳混染有关。

3.3 锆石 U-Pb 定年

济沁河林场地区晶洞二长花岗岩的锆石颗粒在透射光和反射光下为黄色,半透明—透明,自形双锥柱状—长柱状居多,少量受力破损呈断柱状、碎块状,金刚光泽,个别晶体内部气液及固相包裹体发育,大小为

50~150 μm ,长宽比 2:1~1:1。锆石颗粒较为破碎,个别颗粒中见有不透明包裹体。阴极发光图像(图 5)显示,锆石晶体的内部结构清晰,振荡生长环带显著,结合锆石具有较高的 Th/U 比值(0.95~2.34),表明锆石为岩浆成因。依照透射光、反射光和阴极发光图像特征对锆石进行了筛选,选取无裂隙、无包体、环带清晰的锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析,分析结果见表 2、3。

由表 2、3 和锆石 U-Pb 年龄协和图(图 6)可知,在经过 Pb 校正之后,济沁河林场晶洞花岗岩中岩浆锆石的分析结果大部分位于协和线上且相对较为集中,样品 RZ19 的 24 个分析点 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄范围在 $(108 \pm 2.28) \sim (120.2 \pm 2.45)$ Ma,得出其加权平均值年龄为 (115.1 ± 1.4) Ma ($n=24$, $MSWD=1.9$);样品 RZ25 的 20 个分析点 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄范围在 $(107.2 \pm 2.23) \sim (116.3 \pm 2.43)$ Ma,得出其加权平均值年龄为 (113.1 ± 1.7) Ma ($n=20$, $MSWD=3.2$)。结合锆石的岩浆成因特征,我们认为该年龄可以被解释为岩体的侵位年龄,表明济沁河林场晶洞花岗岩中岩浆的侵位时代为早白垩世晚期,这一结果与该岩体侵入到晚侏罗世火山岩地层中的地质事实相符。

4 讨论

4.1 岩石成因类型

根据板块理论,板块的不同构造部位由于温度、压力、流体的差异,加之源岩成分的不同,就会产生千差万别的花岗岩。前人根据源岩、构造环境的差别总

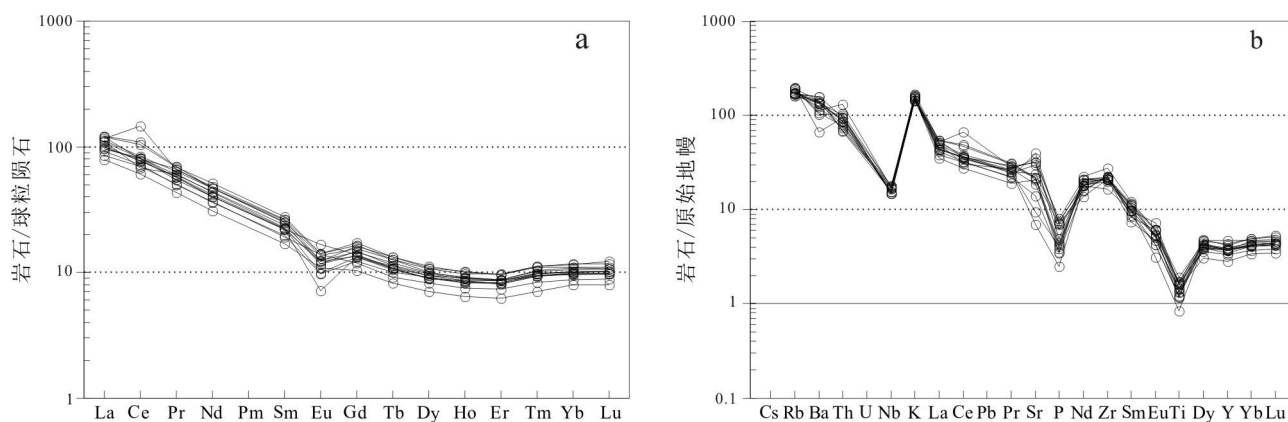


图 4 晶洞二长花岗岩的球粒陨石标准化稀土元素配分图和原始地幔标准化微量元素蛛网图

(据文献[25-26])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagram for the miarolitic granites

(After References [25-26])

表 1 晶洞二长花岗岩主量元素、微量元素和稀土元素成分

Table 1 Major and trace element composition of the miarolitic granites

样品号	PM122 -1	PM122 -3	PM122 -5	PM122 -8	PM122 -9	PM122 -10	PM122 -11	PM122 -12	PM122 -14	PM122 -15	PM122 -16	PM122 -17	2011 RZ19	2011 RZ25
Na ₂ O	4.38	4.59	4.16	4.20	4.40	4.13	4.63	4.30	4.41	4.28	4.67	4.32	4.63	4.84
MgO	0.38	0.41	0.23	0.39	0.37	0.35	0.51	0.72	0.58	0.56	0.67	0.59	0.48	0.42
Al ₂ O ₃	14.56	14.85	13.18	14.24	14.44	14.34	15.19	15.14	15.27	15.44	15.67	15.29	15.16	15.06
SiO ₂	70.70	70.61	73.90	71.75	71.73	70.77	69.04	68.71	68.72	68.52	67.96	68.93	69.38	69.67
P ₂ O ₅	0.09	0.10	0.05	0.09	0.08	0.08	0.15	0.16	0.13	0.15	0.18	0.16	0.11	0.08
K ₂ O	4.76	4.54	4.99	4.74	4.83	4.67	4.61	4.38	4.39	4.37	4.38	4.41	4.28	5.06
CaO	0.98	1.05	0.54	0.83	0.94	0.73	1.33	1.64	1.68	1.62	1.41	1.57	1.43	0.45
TiO ₂	0.28	0.29	0.18	0.26	0.26	0.26	0.32	0.37	0.35	0.36	0.37	0.35	0.31	0.41
MnO	0.10	0.12	0.09	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.12
Fe ₂ O ₃	1.41	1.55	0.99	1.37	1.34	1.86	1.27	1.57	1.65	1.86	1.77	1.89	1.31	1.93
FeO	1.20	1.10	1.39	1.10	0.99	1.10	1.56	1.71	1.53	1.24	1.46	1.16	1.53	1.22
LOI	0.93	0.56	0.11	0.65	0.30	1.35	1.19	1.00	0.95	1.26	1.14	1.03	1.22	0.55
Total	99.77	99.77	99.80	99.75	99.78	99.75	99.90	99.78	99.77	99.76	99.77	99.79	99.92	99.80
K ₂ O+Na ₂ O	9.14	9.13	9.15	8.95	9.22	8.80	9.24	8.68	8.80	8.65	9.05	8.73	8.91	9.90
DI	90.46	89.93	93.6	91.07	91.2	90.51	88.26	85.54	85.97	85.88	86.61	86.38	87.66	91.99
SI	3.17	3.4	1.99	3.33	3.16	2.89	4.08	5.73	4.65	4.58	5.28	4.81	3.94	3.19
σ	2.99	3	2.7	2.77	2.95	2.76	3.25	2.9	2.98	2.9	3.24	2.91	2.98	3.66
A/CNK	1.03	1.033	0.997	1.051	1.02	1.089	1.011	1.022	1.014	1.05	1.046	1.038	1.022	1.056
A/NK	1.18	1.19	1.08	1.18	1.16	1.21	1.21	1.28	1.27	1.31	1.26	1.29	1.24	1.12
Ba	965.57	863.88	465.86	718.98	791.70	746.84	1100.00	937.81	953.10	1000.00	1100.00	1000.00	943.88	1000.00
Co	1.14	1.37	1.03	0.90	1.09	2.87	1.80	3.33	3.63	2.84	3.55	2.91	1.07	2.07
Cr	3.34	3.58	5.76	4.62	5.53	6.47	4.42	6.40	5.36	5.70	3.60	5.68	4.55	4.27
Cu	0.43	1.54	1.38	0.53	3.62	1.34	2.30	5.22	2.53	2.11	2.03	3.44	2.32	1.42
Nb	12.01	11.67	12.75	12.44	12.26	12.69	10.67	11.15	10.66	10.72	11.04	10.60	11.08	12.14
Ni	6.55	6.75	6.27	7.36	7.90	9.77	6.71	7.83	6.97	8.05	7.77	7.24	6.78	6.90
Rb	110.62	107.23	125.17	123.67	115.00	120.20	107.90	109.12	108.73	110.51	109.00	103.40	101.70	122.82
V	9.40	12.11	6.13	8.53	10.88	10.39	15.84	24.90	19.98	23.46	25.24	22.17	14.16	17.28
Zn	42.13	61.93	33.87	52.94	46.89	35.85	57.51	48.59	44.63	48.97	65.13	41.91	44.93	49.00
Zr	234.41	246.83	184.31	221.11	249.75	231.23	236.82	243.46	238.58	250.23	247.95	249.53	232.40	306.91
Sr	391.46	459.20	147.02	200.59	293.99	467.44	438.19	745.03	633.46	845.01	676.86	506.28	674.78	452.82
Li	15.03	17.51	8.54	13.98	9.07	17.38	17.11	15.37	15.58	17.23	20.31	16.23	16.17	9.54
Be	2.81	2.65	2.87	3.31	3.13	3.12	2.41	2.60	2.82	2.50	2.59	2.65	2.68	3.26
W	0.62	0.52	0.76	0.55	1.62	0.61	0.50	0.65	0.50	0.58	0.85	0.69	0.70	1.45
Th	7.42	6.28	8.04	8.87	11.21	6.60	8.22	7.96	8.53	7.40	5.74	7.44	6.88	5.91
B	6.11	4.94	5.44	5.40	5.45	5.31	5.03	5.11	4.62	5.41	5.23	4.95	4.57	5.32
Au	0.51	0.62	0.66	0.53	0.39	0.32	0.32	0.54	0.55	0.40	0.36	0.51	0.42	0.53
Y	16.98	16.91	16.97	15.65	16.85	18.86	12.73	17.81	17.45	15.10	21.47	17.19	19.71	16.89
La	34.29	37.29	29.90	31.61	26.32	37.65	24.47	33.61	29.97	28.58	35.76	30.65	35.16	37.16
Ce	54.71	64.57	65.76	61.88	56.30	87.61	49.19	65.62	64.32	57.89	118.76	62.90	67.91	84.22
Pr	7.40	8.07	6.99	7.07	6.21	8.54	5.24	7.35	6.69	6.11	8.00	6.97	7.82	8.41
Nd	26.00	27.98	24.12	24.78	21.58	28.12	18.50	26.36	24.16	22.01	28.87	24.22	28.10	30.69
Sm	4.41	4.84	4.30	4.32	3.84	5.05	3.31	4.64	4.29	3.75	5.12	4.29	4.93	5.38
Eu	0.86	0.86	0.53	0.72	0.71	0.90	0.80	0.92	0.90	1.01	1.03	1.23	1.00	1.03
Gd	3.52	3.79	3.41	3.43	3.17	4.18	2.67	3.77	3.49	3.06	4.48	3.61	4.00	4.28
Tb	0.50	0.54	0.51	0.50	0.48	0.62	0.39	0.56	0.53	0.44	0.63	0.52	0.60	0.60
Dy	2.90	3.12	3.03	2.89	2.93	3.57	2.26	3.17	3.04	2.64	3.46	2.85	3.42	3.25
Ho	0.60	0.63	0.64	0.59	0.61	0.72	0.46	0.66	0.62	0.54	0.74	0.61	0.70	0.65
Er	1.70	1.79	1.82	1.74	1.72	2.01	1.31	1.83	1.80	1.54	2.01	1.69	2.04	1.81
Tm	0.31	0.32	0.34	0.31	0.31	0.36	0.23	0.33	0.31	0.27	0.35	0.30	0.36	0.31
Yb	2.06	2.08	2.28	1.99	2.11	2.42	1.67	2.20	2.12	1.83	2.31	2.03	2.44	2.03
Lu	0.32	0.33	0.34	0.31	0.33	0.39	0.26	0.34	0.33	0.28	0.35	0.31	0.38	0.31
ΣREE	139.58	156.22	143.99	142.13	126.62	182.15	110.74	151.35	142.58	129.94	211.89	142.18	158.85	180.12
LREE/HREE	10.72	11.39	10.63	11.09	9.86	11.77	11.00	10.77	10.64	11.28	13.77	10.93	10.39	12.61
(La/Yb) _N	11.96	12.84	9.42	11.37	8.97	11.18	10.53	10.94	10.15	11.21	11.09	10.85	10.33	13.11
δEu	0.65	0.59	0.41	0.55	0.60	0.58	0.79	0.65	0.69	0.89	0.64	0.93	0.67	0.64
Zr+Nb+Ce+Y	318.11	339.98	279.80	311.08	335.16	350.40	309.42	338.05	331.01	333.94	399.22	340.23	331.10	420.15

含量单位:主量元素为%,其他元素为 10⁻⁶.

表 2 2011RZ19 样品 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析结果表
Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronologic analysis result for sample No. 2011RZ19

样品 测试点	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ
1	1.167586	0.05697	0.00167	0.15527	0.00479	0.01994	0.00041	127.3	2.59	489.9	64.06	126.7	2.34
2	1.221256	0.04921	0.00182	0.12458	0.00487	0.01859	0.00039	118.8	2.47	157.7	84.53	113.4	2.29
3	1.244714	0.04879	0.00143	0.13729	0.00419	0.02074	0.00042	132.3	2.67	137.6	67.37	117.8	2.16
4	1.230796	0.05039	0.00187	0.12816	0.00504	0.01867	0.00039	119.2	2.48	213.2	83.94	118.8	2.4
5	1.326095	0.05035	0.00158	0.13399	0.00438	0.01964	0.0004	125.3	2.54	211.2	71.03	126.1	2.37
6	0.981883	0.05235	0.00227	0.12732	0.00588	0.01785	0.00039	114	2.44	300.8	96.16	119.1	2.48
7	1.356492	0.05206	0.0015	0.14968	0.00451	0.02118	0.00043	135.1	2.73	288.1	64.54	130	2.4
8	1.128045	0.05286	0.00161	0.13397	0.00429	0.01883	0.00039	120.2	2.45	322.9	67.87	117	2.18
9	1.451735	0.04897	0.00147	0.11888	0.00372	0.01823	0.00037	116.5	2.37	146.4	68.77	124.4	2.33
10	1.399334	0.04876	0.00177	0.13028	0.00492	0.01986	0.00041	126.8	2.59	136.5	82.89	122.8	2.47
11	1.632258	0.04919	0.00265	0.11952	0.00689	0.01757	0.0004	112.3	2.51	156.8	121.54	116	3.16
12	2.071500	0.05143	0.0018	0.12894	0.00475	0.01863	0.00039	119	2.45	260.1	78.4	122.7	2.69
13	0.954844	0.0501	0.0012	0.12434	0.00305	0.01823	0.00037	116.4	2.32	199.7	54.79	113.9	1.94
14	1.247802	0.04979	0.00133	0.12575	0.00346	0.01887	0.00038	120.5	2.41	185	60.93	117.6	2.09
15	1.410324	0.04885	0.00194	0.11936	0.00501	0.01827	0.00039	116.7	2.44	140.4	90.85	123.2	2.6
16	1.140929	0.05046	0.00211	0.12384	0.00549	0.01777	0.00038	113.5	2.4	216.1	94.1	110.9	2.36
17	1.180360	0.04991	0.0013	0.13478	0.00364	0.01987	0.0004	126.9	2.53	190.8	59.68	127.9	2.24
18	1.271738	0.0506	0.00196	0.12067	0.00494	0.01762	0.00037	112.6	2.35	222.7	87.15	117.7	2.44
19	1.346774	0.05061	0.00215	0.12469	0.00563	0.01863	0.0004	119	2.52	223.1	95.47	123.8	2.72
20	1.369234	0.05397	0.00249	0.12877	0.00632	0.01796	0.00039	114.8	2.47	369.8	100.19	129.1	2.96
21	1.495045	0.04682	0.00239	0.11168	0.00605	0.01804	0.0004	115.3	2.52	40	117.78	115	2.91
22	1.475206	0.05005	0.00192	0.11879	0.0048	0.01755	0.00037	112.2	2.33	197.4	86.77	122.4	2.56
23	1.376663	0.05055	0.00187	0.12023	0.00467	0.01811	0.00038	115.7	2.39	220.5	83.27	121.6	2.48
24	1.916211	0.04755	0.00362	0.0991	0.00795	0.01494	0.00037	95.6	2.33	76.4	172.14	105.6	3.8
25	1.181780	0.048	0.00149	0.11822	0.0038	0.01848	0.00037	118	2.37	98.1	73.01	118.6	2.17
26	1.798837	0.05092	0.00215	0.11839	0.00528	0.01689	0.00036	108	2.28	237.3	94.35	114.5	2.71
27	1.790502	0.05004	0.00299	0.11167	0.00711	0.01745	0.0004	111.5	2.56	196.7	133.09	119.3	3.6
28	0.977910	0.04761	0.00179	0.10648	0.00419	0.01695	0.00035	108.4	2.24	79	87.68	107.5	2.09
29	1.472604	0.04739	0.00274	0.1017	0.00623	0.01573	0.00036	100.6	2.28	68.1	132.64	107.7	2.93
30	1.604329	0.04576	0.00133	0.1169	0.00349	0.01873	0.00038	119.6	2.38	0.1	53.49	117.6	2.16
31	1.301335	0.04877	0.00175	0.11568	0.00434	0.01773	0.00037	113.3	2.31	136.8	82.29	111.2	2.22
32	0.976792	0.04915	0.0015	0.11764	0.00373	0.01804	0.00037	115.3	2.32	154.9	69.94	113	2.05
33	0.983974	0.04831	0.00176	0.1186	0.00453	0.01793	0.00037	114.6	2.34	114.6	83.74	117	2.23
34	1.207456	0.04968	0.00152	0.12052	0.00383	0.01796	0.00036	114.8	2.3	179.9	69.9	121	2.22
35	2.343131	0.04809	0.00379	0.10636	0.00889	0.01538	0.00038	98.4	2.43	103.8	176.56	119.1	4.68

表 3 2011RZ25 样品 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析结果表

Table 3 Zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronologic analysis result for sample No. 2011RZ25

样品 测试点	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ
1	1.225407	0.04849	0.00131	0.12729	0.00351	0.01943	0.00039	124	2.45	123.4	62.29	123.6	2.17
2	1.161823	0.0534	0.00398	0.12474	0.01003	0.01766	0.00045	112.8	2.83	345.6	159.98	119.8	3.77
3	1.296473	0.05625	0.00628	0.11805	0.01417	0.0143	0.00045	91.5	2.88	461.6	230.76	106	4.84
4	1.239038	0.05293	0.00232	0.12226	0.00568	0.01684	0.00036	107.6	2.28	325.8	96.26	119.9	2.62
5	1.421185	0.049	0.0015	0.12056	0.00381	0.01867	0.00038	119.3	2.38	147.9	70.18	129.7	2.4
6	0.907880	0.04892	0.00158	0.11444	0.00384	0.01756	0.00036	112.2	2.26	144.1	74.02	111.5	2.03
7	3.306079	0.06139	0.00365	0.13699	0.00881	0.01651	0.00039	105.6	2.48	652.8	122.72	1200.4	23.7
8	1.056050	0.05039	0.00159	0.1158	0.00379	0.01704	0.00034	108.9	2.19	212.8	71.57	110.2	2.03
9	2.266242	0.04879	0.00124	0.12415	0.0032	0.01931	0.00038	123.3	2.42	137.7	58.54	126.1	2.29
10	1.273726	0.04863	0.00182	0.114	0.00445	0.01753	0.00036	112	2.29	129.9	85.52	113.2	2.28
11	1.343476	0.04768	0.00228	0.11209	0.00566	0.01773	0.00038	113.3	2.41	82.5	110.7	121.3	2.77
12	1.895537	0.16587	0.00606	0.45598	0.01997	0.02091	0.00048	133.4	3.01	2516.4	60.14	305.5	7.22
13	0.760487	0.04836	0.00199	0.11285	0.00491	0.0175	0.00037	111.8	2.33	116.8	94.45	111.7	2.18
14	1.019608	0.04742	0.00162	0.10985	0.00392	0.01777	0.00036	113.5	2.29	69.9	80.14	115.2	2.16
15	1.265775	0.04834	0.00132	0.12324	0.00343	0.01893	0.00038	120.9	2.38	116.1	62.96	121.3	2.15
16	1.163923	0.0492	0.0016	0.12271	0.00419	0.01857	0.00039	118.6	2.45	157.2	74.22	119.5	2.24
17	0.984368	0.05186	0.00159	0.12654	0.00407	0.018	0.00037	115	2.36	279.1	68.54	113.4	2.06
18	0.878162	0.20478	0.00507	0.554	0.01543	0.01991	0.00042	127.1	2.64	2864.6	39.73	202.4	3.61
19	0.814598	0.04798	0.00166	0.1132	0.00413	0.01677	0.00035	107.2	2.23	97.2	81.13	99.8	1.86
20	0.719154	0.05167	0.00219	0.12258	0.00554	0.01696	0.00037	108.4	2.34	270.7	94.12	105.9	2.1
21	1.494404	0.14319	0.00448	0.40422	0.01462	0.02032	0.00044	129.7	2.8	2266.2	53	239.6	4.89
22	1.125438	0.04865	0.00174	0.13135	0.00499	0.01948	0.00041	124.4	2.58	131.2	82.05	127.1	2.46
23	1.291918	0.04952	0.00233	0.11464	0.00571	0.01713	0.00038	109.5	2.38	172.6	106.12	115.5	2.62
24	1.396424	0.04831	0.00252	0.11134	0.00618	0.01762	0.0004	112.6	2.5	114.7	118.82	115.8	2.88
25	1.239603	0.05292	0.0027	0.12123	0.00662	0.01644	0.00037	105.1	2.36	325.5	111.63	121	2.88
26	0.999192	0.04954	0.00173	0.12536	0.00464	0.0185	0.00039	118.2	2.45	173.7	79.68	118	2.24
27	1.344902	0.05064	0.00294	0.12729	0.00793	0.01813	0.00042	115.8	2.65	224.3	128.85	120.5	3.23
28	1.691090	0.04903	0.00213	0.12096	0.00558	0.01799	0.00039	114.9	2.46	149.1	98.69	121.6	2.82
29	1.150730	0.04787	0.00179	0.12127	0.00481	0.01821	0.00038	116.3	2.43	91.8	87.41	121.8	2.4
30	1.316818	0.04858	0.00151	0.11442	0.00372	0.01732	0.00036	110.7	2.26	127.5	71.65	117.1	2.18
31	1.293726	0.05298	0.003	0.11413	0.00691	0.01577	0.00037	100.9	2.32	328	123.41	121.5	3.09
32	1.483688	0.0496	0.00154	0.11474	0.00371	0.01732	0.00036	110.7	2.26	176.2	70.65	122.7	2.31
33	2.375298	0.04376	0.00325	0.10896	0.00864	0.01807	0.00044	115.4	2.81	0.1	49.22	122.3	4.69
34	1.623108	0.04974	0.00195	0.12258	0.00511	0.01767	0.00038	112.9	2.38	182.6	88.84	121.8	2.65
35	0.930207	0.04956	0.00138	0.12783	0.0037	0.019	0.00039	121.3	2.45	174.2	63.61	118.4	2.07



图5 晶洞二长花岗岩中锆石 CL 图像

Fig. 5 The CL images of zircons for the miarolitic granites

结了 I、S、M、A 型 4 种成因类型。由于具有碱性长石且 $w(\text{K}_2\text{O}) > 0.6\%$, 因此排除济沁河林场晶洞花岗岩 M 型成因的可能; 济沁河林场地区的花岗岩是以晶洞二长花岗岩为主的高钾钙碱性花岗岩, 次要矿物、副矿物中含有钛铁矿、赤褐铁矿、榍石、自生绿帘石、角闪石、磁铁矿, 缺少霓辉石、霓石、钠铁闪石、富铁钠闪石等碱性暗色矿物, $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值小于 0.85 (介于 0.56~0.69), A/CNK 值多介于 1~1.05, 碱不饱和, 多数 $w(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) < 350 \times 10^{-6}$, 因此也可以排除 A 型花岗岩的可能; 同时晶洞二长花岗岩也缺少堇青石、夕线石、红柱石、石榴子石等富铝矿物, A/CNK 值小于 1.06, 为准铝质到弱过铝质, 没有源岩为变质沉积岩岩浆的强过铝质的特征 ($\text{A/CNK} > 1.1$)。这些都

表明其不具备 S 型花岗岩的矿物学和地球化学特征。

济沁河林场晶洞二长花岗岩由石英、斜长石、碱性长石、黑云母及少量角闪石组成, 高硅、钙、富碱 ($\text{Na}_2\text{O} > 3.6\%$), Eu 异常较小, 弱过铝质 ($\text{A/CNK} < 1.1$), 富集 U、Th, 强烈亏损 P 和 Ti, 为典型 I 型花岗岩的特征^[28]。但在 Whalen 等^[27]建议的花岗岩成因图解 (图 7) 上, 济沁河林场晶洞二长花岗岩多落入分异的、未分异的花岗岩及 A 型花岗岩的交界部位, 同时随着 SiO_2 的增加, P_2O_5 的含量逐渐降低, 且含量均低于 0.2%^[29-30], 微量元素中富集 Rb、Th、La、Zr、Hf, 而亏损 Ba、Sr、P、Ti。综合以上特征, 笔者认为济沁河林场晶洞二长花岗岩为高分异的 I 型花岗岩。

4.2 构造背景

高钾钙碱性 I 型花岗岩通常被认为可以形成于以下两种构造背景中: 1) 安第斯型的陆弧, 其岩浆产生于地幔楔与俯冲板片脱水演化而来的流体相互作用, 并在上升过程中与地壳物质发生混染^[31-32]; 2) 主碰撞地壳加厚之后的后碰撞阶段, 此阶段由于应力的释放, 加厚的岩石圈开始伸展垮塌, 减压导致地幔上升, 引发强烈的壳幔作用使下地壳熔融, 形成长英质岩浆活动^[33]。相关微量元素的构造环境判别图解显示, 济沁河林场晶洞二长花岗岩均投影于后碰撞伸展 (post-collision extension) 的构造环境中 (图 8)。这与区域上同时代的梅勒图组中基性亚碱高钾火山岩^[34]、A 型花岗岩^[35-37]、伸展滑脱带^[38]、变质核杂岩^[15]所反映的构造背景一致,

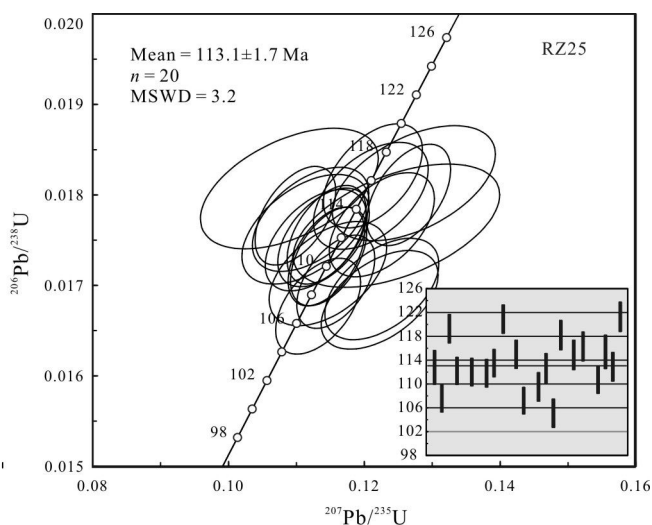
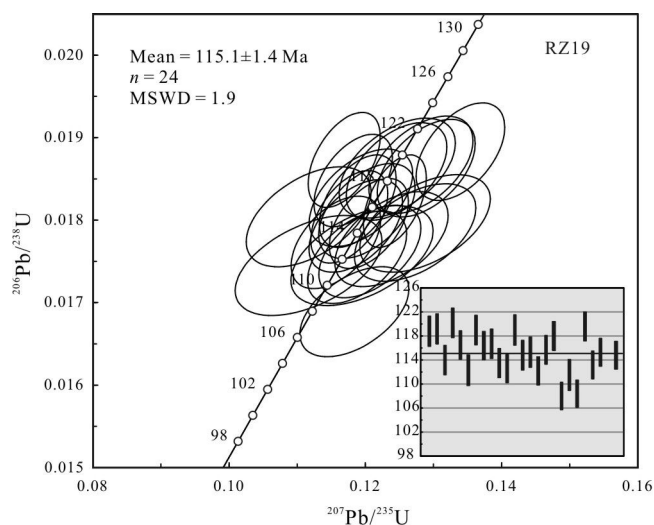


图6 晶洞二长花岗岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄协和图

Fig. 6 U-Pb concordia diagrams LA-ICP-MS zircon data for the miarolitic granites

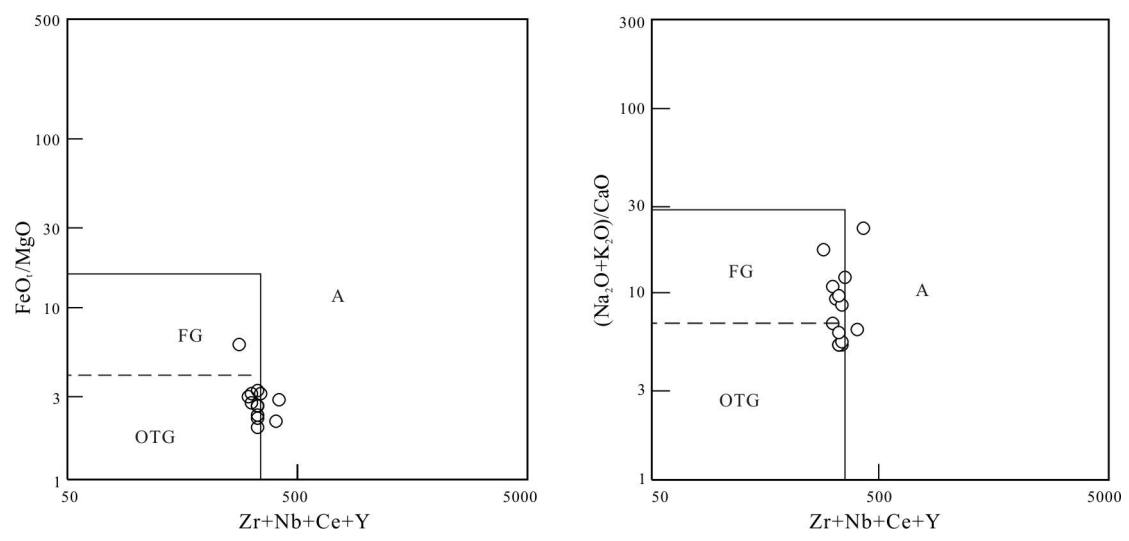


图 7 晶洞二长花岗岩的花岗岩成因图解
(据文献[27])

Fig. 7 Origin diagram for the miarolitic granites
(After Reference [27])

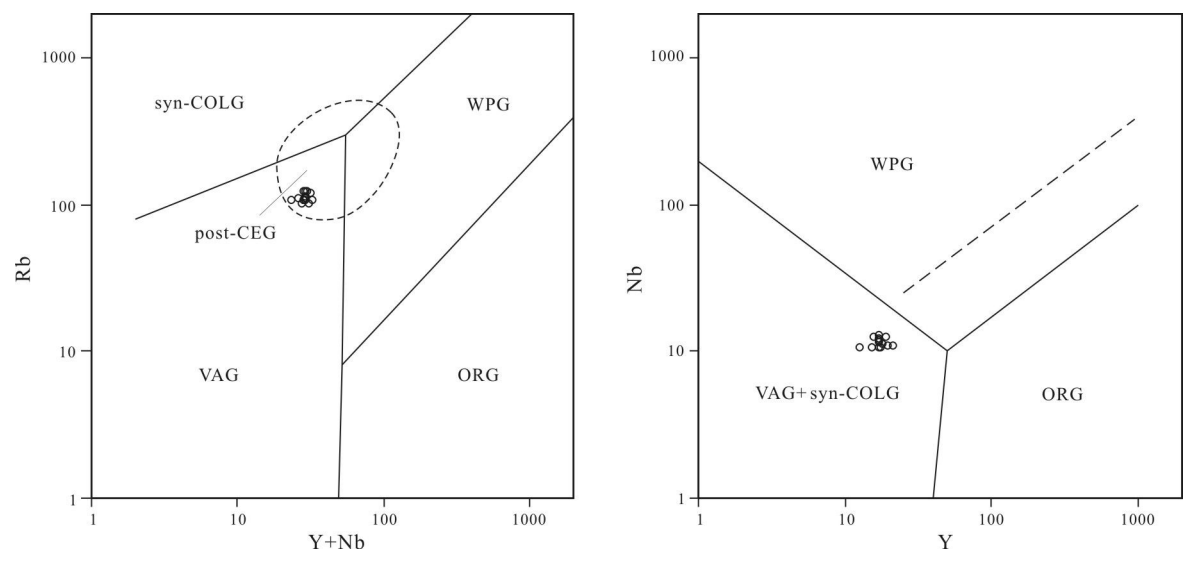


图 8 晶洞二长花岗岩的花岗岩微量元素构造环境图
(据文献[40])

Fig. 8 Tectonic environment of trace elements for the miarolitic granites
(After Reference [40])

是侏罗纪时期华北板块、西伯利亚板块、北美板块和古太平洋板块四者汇聚后的区域性伸展^[39].

5 结论

通过对大兴安岭中部济沁河林场晶洞二长花岗岩的岩石学、地球化学、年代学研究,可以得出如下结论:

1)岩石中的锆石为岩浆成因,LA-ICP-MS U-Pb 定

年结果为 113~115 Ma,表明其侵位于早白垩世晚期.

2)岩石高硅、钙、富碱, Eu 异常较小,弱过铝质,富集 U、Th,强烈亏损 P 和 Ti,微量元素中富集 Rb、Th、La、Zr、Hf,而亏损 Ba、Sr、P、Ti,为高分异的 I 型花岗岩.

3)岩石形成于华北板块、西伯利亚板块、北美板块和古太平洋板块四者汇聚之后的后碰撞伸展构造环境.

参考文献:

- [1]徐公愉. 大兴安岭的大陆火山岩及其矿化作用[J]. 中国区域地质, 1983(3):39-51.
- [2]蒋国源, 权恒. 大兴安岭根河、海拉尔盆地中生代火山岩[J]. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊, 1988, 17:23-100.
- [3]赵国龙, 杨桂林, 王忠. 大兴安岭中南部中生代火山岩[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1989.
- [4]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.
- [5]吴新伟, 郭威, 张渝金, 等. 内蒙古扎兰屯地区新立屯岩体锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 地质与资源, 2013, 22(6):464-470.
- [6]林强, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义[J]. 地质科学, 1998, 33(2):129-139.
- [7]林强, 葛文春, 曹林, 等. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征[J]. 地球化学, 2003, 32(3):208-222.
- [8]葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征: 壳幔相互作用的证据[J]. 岩石学报, 1999, 15(3):396-406.
- [9]邵治安, 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.
- [10]谢鸣谦. 拼贴板块构造及其驱动机理——中国东北及邻区的大地构造演化[M]. 北京: 科学出版社, 2000:1-252.
- [11]Meng Q R. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? [J]. Tectonophysics, 2003, 369(3/4), 155-174.
- [12]Xu W L, Ji W Q, Pei F P, et al. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34:392-402.
- [13]Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41:1-30.
- [14]Zhao Y W, Fan Q C. Mantle sources and magma genesis of Quaternary volcanic rocks in the Halaha River and Chaoer River area, Great Xing'an Range[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(4):1119-1129.
- [15]Wang T, Guo L, Zheng Y D, et al. Timing and processes of late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes[J]. Lithos, 2012, 154:315-345.
- [16]李世超, 李廷栋, 刘正宏, 等. 大兴安岭中部莫克河地区晚更新世火山活动[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2012, 42(2):410-421.
- [17]李世超, 徐仲元, 刘正宏, 等. 大兴安岭中段玛尼吐组火山岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 地质通报, 2013, 32(2/3):399-407.
- [18]许文良, 王枫, 孟恩, 等. 黑龙江省东部古生代—早中生代的构造演化: 火成岩组合与碎屑锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012(5):1378-1389.
- [19]Donskaya T V, Gladkochub D P, Mazukabzov A M, et al. The Late Triassic Kataev volcanoplutonic association in western Transbaikalia, a fragment of the active continental margin of the Mongol-Okhotsk Ocean[J]. Russian Geology and Geophysics, 2012, 53(1):22-36.
- [20]Li S C, Liu Z H, Zhong Y X, et al. Age and tectonic setting of volcanic rocks of the Tamulangou Formation in the Great Xing'an Range, NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 13: 471-480.
- [21]Wang T, Guo L, Zhang L, et al. Timing and evolution of Jurassic Cretaceous granitoid magmatisms in the Mongol-Okhotsk belt and adjacent areas, NE Asia: Implications for transition from contractional crustal thickening to extensional thinning and geodynamic settings[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 97: 365-392.
- [22]Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{206}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192:59-79.
- [23]范晨子, 胡明月, 赵令浩, 等. 锆石铀-铅定年激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱原位微区分析进展[J]. 岩矿测试, 2012, 31(1):29-46.
- [24]黎彤. 大洋地壳和大陆地壳的元素丰度[J]. 大地构造与成矿学, 1984, 8(1):19-27.
- [25]Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [C]//Henderson P, ed. Rare Earth Element Geochemistry. New York: Elsevier, 1984:63-114.
- [26]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 1989, 42:313-345.
- [27]Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and Petrogenesis [J]. Contrib Mineral Petrol, 1987, 95:407-419.
- [28]肖庆辉. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002:19-22.
- [29]Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt [J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1992, 83:1-26.
- [30]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, 23(6):1217-1238.
- [31]Dickenson W R. Potash-depth (K-h) relations in continental margins and intra-oceanic magmatic arcs [J]. Geology, 1975, 3:53-56.
- [32]Pitcher W S. Granites and yet more granites forty years on [J]. Geologische Rundschau, 1987, 76(1)1-79.
- [33]Liegé J-P. Preface — Some words on the post-collisional magmatism [J]. Lithos, 1998, 45:15-17.
- [34]金玲, 杨伟红, 杨德明, 等. 内蒙古科右中旗地区梅勒图组安山岩年代学特征及其地质意义[J]. 世界地质, 2014, 33(1):48-58.

但是,随着时间的增长,后续工作需要我们对模型进行修正,进一步提升预警准确度和不预警置信度。

参考文献:

- [1]浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1989:4-9.
- [2]俞火明,何建友. 浙江省滑坡地质灾害发育规律研究[J]. 工程地质学报,2008,16(S1):208-211.
- [3]周雨,刘志萍,盛志军,等. 基于有效雨量的鹰厦铁路降雨诱发滑坡预警预报概率模型[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):22-25.
- [4]周明浪,邵新民,罗美芳. 浙江温州滑坡地质灾害预警方法及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(2):90-97.
- [5]伍宇明,兰恒星,高星,等. 台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究——以福建地区为例[J]. 工程地质学报,2014,22(2):255-262.
- [6]麻土华,李长江,孙乐玲,等. 浙江地区引发滑坡的降雨强度-历时关系[J]. 中国地质灾害与防治学报,2011,22(2):20-25.
- [7]陈宏凯,魏来,谭玲. 降雨型滑坡经验性降雨阈值研究综述[J]. 重庆交通大学学报,2012,31(5):990-996.
- [8]高华喜,殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学,2007,28(5):1055-1060.
- [9]吴益平,张秋霞,唐辉明,等. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2014,39(7):889-895.
- [10]陈善雄,谭新,柳治国. 降雨条件下土质边坡稳定性预测预报方法[J]. 岩土力学,2002,23(S1):31-36.
- [11]詹良通,李鹤,陈云敏,等. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J]. 岩土力学,2012,33(3):872-880.
- [12]张群,许强,甯娜. 降雨条件下低缓浅层土质滑坡稳定性影响因素及耦合研究[J]. 水文地质工程地质,2014,41(5):90-94.
- [35]王兴安,徐仲元,刘正宏,等. 大兴安岭中部柴河地区钾长花岗岩的成因及构造背景:岩石地球化学、锆石 U-Pb 同位素年代学的制约[J]. 岩石学报,2012,28(8):2647-2655.
- [36]施璐,郑常青,姚文贵,等. 大兴安岭中段五岔沟地区蛤蟆沟林场 A 型花岗岩年代学、岩石地球化学及构造背景研究[J]. 地质学报,2013,87(9):1264-1276.
- [37]田德欣,王清海,葛文春,等. 内蒙古阿尔山绿水碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 世界地质,2013,32(4):681-693.
- [38]梁琛岳,刘永江,李伟,等. 黑龙江省嫩江地区科洛杂岩隆升时代[J]. 地质科学,2012,47(2):360-375.
- [39]张允平. 东北亚地区晚侏罗—白垩纪构造格架主体特点[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011,41(5):1267-1284.
- [40]Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace-element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984,25:956-983.

(上接第 244 页 /Continued from Page 244)