

大兴安岭明水地区三叠纪花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义

刘希雯¹, 杨 浩¹, 董 玉¹, 王清海², 葛文春¹, 张彦龙¹, 田德欣¹

(1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 吉林大学 东北亚国际地学研究的教学中心, 吉林 长春 130026)

摘 要: 大兴安岭中段明水地区头道河岩体主要由花岗闪长岩、二长花岗岩组成。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年结果显示, 头道河岩体形成于 243~240 Ma 的中三叠世。岩石地球化学资料显示头道河岩体具有高硅($\text{SiO}_2 = 61.32\% \sim 78.19\%$), 富铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.85\% \sim 16.87\%$), 贫铁($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.56\% \sim 5.93\%$), 镁($\text{MgO} = 0.16\% \sim 3.30\%$), 钙($\text{CaO} = 0.26\% \sim 2.94\%$)的特征, 为一套高钾钙碱性的 I 型花岗岩; 稀土元素总量偏低($\Sigma\text{REE} = 75.5 \times 10^{-6} \sim 149.49 \times 10^{-6}$), 稀土元素分馏明显, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 8.71~17.61 之间, 无明显铕异常; 微量元素以富集 Rb、Pb、Th、U 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素为特征。锆石原位 Hf 同位素分析表明, 该岩体花岗质岩石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 811~0.283 227, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为较高的正值 (+6.55~+12.19), Hf 二阶段模式年龄(t_{DM2}) 介于 595~1 107 Ma 之间。上述地球化学特征指示, 头道河岩体源区物质为中元古代-显生宙期间从亏损地幔增生的年轻火成岩地壳物质。结合区域地质资料及同期火成岩物质的时空展布规律, 认为中三叠世头道河岩体形成于古亚洲洋闭合后的造山后伸展构造环境。

关键词: 大兴安岭中段; 锆石 U-Pb 年代学; Hf 同位素; I 型花岗岩; 伸展环境

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)02-0143-16

Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Triassic granites from the Mingshui area in the Da Hinggan Mountains and their tectonic implications

LIU Xi-wen¹, YANG Hao¹, DONG Yu¹, WANG Qing-hai², GE Wen-chun¹,
ZHANG Yan-long¹ and TIAN De-xin¹

(1. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. International Center for Geoscience Research and Education in Northeast Asia, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: The Toudaohe pluton, located in Mingshui area of middle Da Hinggan Mountains, is mainly composed of granodiorite and monzogranite. LA-ICP-MS zircon U-Pb data indicate that the Toudaohe pluton formed during the Middle Triassic with the ages of 243~240 Ma. Geochemically, the granitic rocks are high in SiO_2 (61.32%~78.19%), and Al_2O_3 (11.85%~16.87%), but low in total Fe_2O_3 (0.56%~5.93%), MgO (0.16%~3.30%), and CaO (0.26%~2.94%), suggesting that they are high-K calc-alkaline I-type granites. These granitoids have low total REE content ($\Sigma\text{REE} = 75.5 \times 10^{-6} \sim 149.49 \times 10^{-6}$) with fractionated REE [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 8.71 \sim 17.61$], and no remarkable Eu anomalies. Moreover, they are enriched in large ion lithophile elements (e.g., Rb, Pb, Th, U), and depleted in high field strength elements (e.g., Nb, Ta, Ti). Zircon Hf isotope analyses show that these granitoids have high initial $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios (0.282 811~0.283 227), positive $\epsilon\text{Hf}(t)$ values (6.55~21.28), and young Hf two-stage model ages of 595~1 107 Ma. These geochemical characteristics indicate that the source materials of Toudaohe pluton were juvenile igneous

收稿日期: 2014-09-09; 修订日期: 2014-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272076)

作者简介: 刘希雯(1989-), 女, 汉族, 硕士研究生, 岩石学专业, E-mail: 751964119@qq.com; 通讯作者: 葛文春, 教授, 岩石学、地球化学专业, E-mail: gewenchun@jlu.edu.cn

crust rocks which originated from depleted mantle during the Mesoproterozoic to Phanerozoic period. Based on regional geological investigations and spatial and temporal distribution of the coeval igneous materials, the authors hold that the Middle Triassic Toudaohe pluton was emplaced in a post-orogenic extensional environment linked with the final closure of the Paleo-Asian Ocean.

Key words: Da Hinggan Mountains; zircon U-Pb geochronology; Hf isotopes; I-type granites; extensional environment

大兴安岭位于中亚造山带东段,该区中生代花岗岩广泛分布,与小兴安岭-张广才岭花岗岩共同构成了中国大陆东部中生代“花岗岩海”(吴福元等, 1999)。关于这些花岗岩形成时代、成因以及地球动力学背景的探讨一直是地质学领域研究的热点问题。早期研究曾认为这些花岗岩为古生代板块俯冲-碰撞不同阶段的产物(赵春荆等, 1983; 内蒙古自治区地质矿产局, 1991),但近年来高精度同位素年龄结果显示,这些花岗岩多数形成于中生代(叶栩松等, 2001; 苗来成等, 2003; Wu *et al.*, 2003; 余宏全等, 2012; 杨俊泉等, 2012),并且以侏罗纪一早白垩世为主,并非以往所认识的古生代或前寒武纪(Wu *et al.*, 2011)。然而,在中生代火成岩得到广泛关注并取得大量成果的背景下,区内关于三叠纪

岩浆事件的相关专题报道,尤其是年代学和地球化学方面的研究却相对薄弱,从而导致区内关于三叠纪花岗岩形成时代和成因等方面的认识并不准确。为此,本文通过对大兴安岭中段明水地区头道河岩体进行锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素分析以及地球化学研究,来探讨头道河岩体形成时代、成因以及其形成的地球动力学背景等问题。

1 地质背景及样品特征

1.1 区域地质概况

研究区位于内蒙古自治区兴安盟阿尔山市南部明水地区,大地构造位置处于西伯利亚板块和华北板块之间的兴蒙造山带东部的兴安地块之上(图1a),

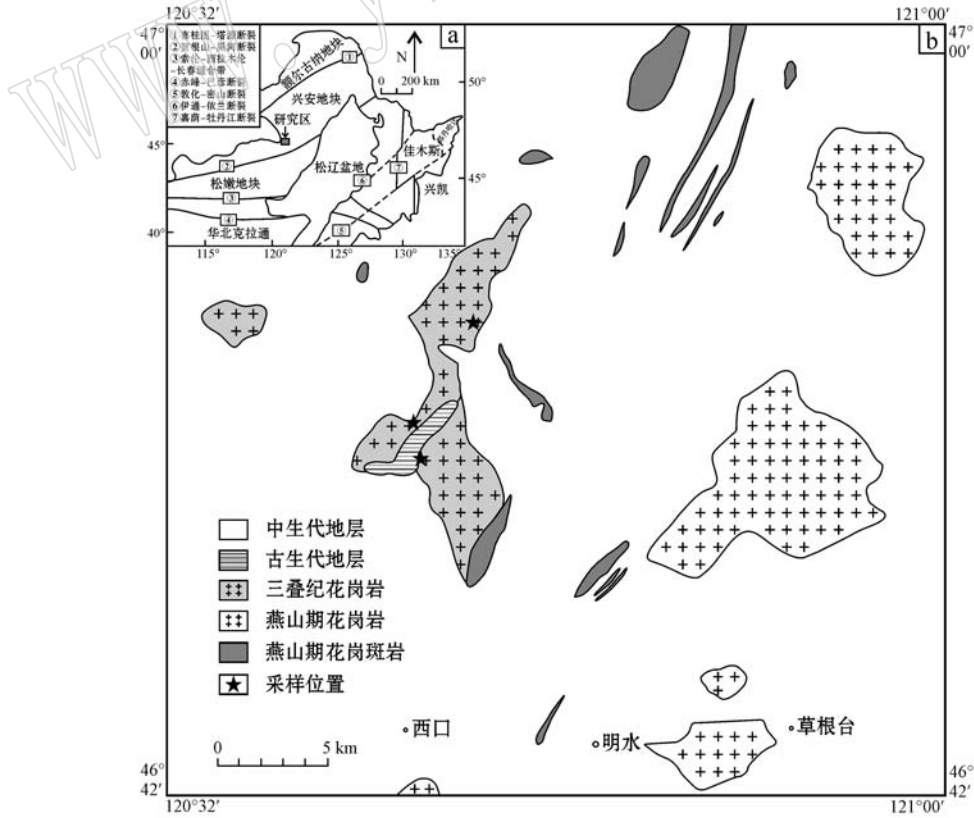


图 1 东北地区构造简图(a)和研究区地质简图(b)
Fig. 1 Tectonic sketch map of Northeast China (a) and simplified geological map of the study area (b)

接近贺根山-黑河缝合带。该区构造演化复杂,在古生代期间,经历了华北板块和西伯利亚板块间复杂的造山作用,表现为不同块体或地块间的碰撞拼合,导致两大板块最终拼合在一起(Sengör and Burtman, 1993; Robinson *et al.*, 1999; 郭峰等, 2001; 吴华英等, 2008; 张吉衡, 2009),而在中生代以后,该区又经历了太平洋构造域的叠加改造作用(徐公愉, 1983; 赵国龙等, 1989; Zhang *et al.*, 2008, 2010)。区内花岗质侵入体规模较大,中生代的侏罗纪地层广泛发育,并有少量二叠纪地层出露。头道河岩体呈南北走向展布,南部侵入到二叠系大石寨组火山角砾岩中,北部被侏罗系白音高老组火山岩所覆盖,晚期被第四系水系沿南北方向切割。岩体发育的岩性并不均一,主要为二长花岗岩和花岗闪长岩。岩石矿物组成和矿物颗粒粒度方面也存在着差异,显示岩相方面的变化。

1.2 样品特征

为对研究区内头道河岩体进行深入研究,我们对其开展了系统的野外地质观察和室内岩矿鉴定工作,结果显示头道河岩体主要岩石类型为角闪黑云

二长花岗岩、角闪二长花岗岩、黑云母花岗闪长岩。

二长花岗岩(PM013-1-3, PM008-4-1): 为本区发育最多的岩石,多为中细粒半自形粒状结构,主要矿物为石英(40%~50%)+钾长石(20%~30%)+斜长石(15%~25%)+角闪石(50%~8%)+少量黑云母。石英呈他形粒状,粒径为0.5~2.5 mm,多见有波状消光。钾长石多为微斜长石和条纹长石,呈板柱状,粒径为1.5~3 mm,蚀变强烈。斜长石呈柱状、板柱状,粒径为1~3 mm,可见聚片双晶。角闪石在岩体中较发育,呈长柱状,具有多色性和解理。

花岗闪长岩(PM014-20-1): 多为中细粒半自形粒状结构,块状构造,主要矿物组成为石英(约35%)+斜长石(40%)+碱性长石(15%)+黑云母(约10%)。石英为他形粒状,粒径为0.5~2.0 mm不等,波状消光明显;斜长石为板状,粒径介于1.5~2.5 mm,发育聚片双晶,有的颗粒绢云母化蚀变;碱性长石为短板柱状、粒状,粒径为1.0~1.5 mm,卡式双晶发育;黑云母具有褐色-浅褐色多色性,多为他形,绿泥石化显著;副矿物主要有锆石、榍石、磁铁矿等不透明矿物(图2)。

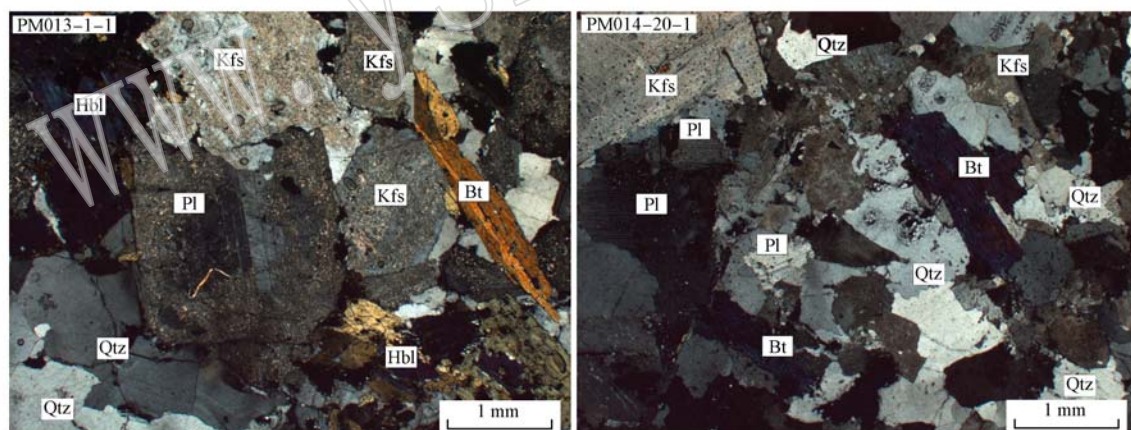


图2 头道河花岗岩显微照片

Fig. 2 Microphotographs of granites in Toudaohe

Qtz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Hbl—角闪石

Qtz—quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Hbl—hornblende

2 分析方法

2.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 和 Hf 同位素

锆石阴极发光图像(CL)分析在北京大学物理学院电镜室的阴极荧光分析系统上完成,锆石的制靶和锆石 U-Pb 同位素测定由中国地质大学(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。仪器为由激光(波长 193 nm)剥蚀进样系统(UP 193SS)和 Agilent 7500a 型四级杆等离子质谱仪联合组成的激光等离子质谱仪(LA-ICP-MS)。本次分析采用高纯度 He 作为剥蚀物质的载气,激光器工作频率为 10 Hz,有效剥蚀时间为 45 s,测试点的激光束斑直径为 36 μm 。选用国际标准锆石

91500 作为锆石 U-Pb 同位素分馏的外部校正,以澳大利亚标准锆石 TEM (416 ± 5 Ma)和 QH (160 ± 1 Ma) 为辅助标样,使用锆石中含量稳定的 29Si 作为内标,详细实验测试流程可参见(袁洪林等, 2003)。锆石 U-Pb 同位素比值由 ICP-MS 测定,比值采用 GLITTER4.4 程序调试,年龄计算采用国际标准程序 Isoplot/Ex(3.0),年龄误差为 2σ。普通铅校正方法见文献(Anderson, 2012)。

锆石 Hf 同位素分析在中国科学院地球物理研究所 LA-MC-ICP-MS 实验室完成,采用 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪测定锆石的 Hf 同位素比值,激光束斑直径为 60 μm,仪器状态监控和样品外部校正采用国际标准锆石 91500 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\,310 \pm 0.000\,035$),详细的测试步骤及仪器参数等见文献(Wu *et al.*, 2006)。

2.2 全岩地球化学分析

主量元素的分析是在核工业北京地质研究院分析测试中心进行,采用 X 荧光光谱法(XRF)分析。其作为目前用于分析岩石主量元素分析最重要的方法,能够检测到浓度低于 $n \times 10^{-6}$ 的样品。测定时

经 BCR-2(玄武岩)和 GSR-1(花岗岩)标样监控,使主量元素分析精度优于 5%。详细操作步骤同文献(Li *et al.*, 2005)。

微量元素的测定在核工业北京地质研究院分析测试中心采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行。样品测试前,采用氢氟酸、硝酸敞开容器分解法与氢氟酸硝酸、密闭容器消解法相结合的方式对样品进行分解,该方法能使样品完全溶解,不带入任何金属离子,并且具有易纯化、污染小和测定限低的优势。微量元素的 ICP-MS 分析精度一般优于 10%,详细流程见文献(Li, 1997)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

本文锆石 U-Pb 测定数据见表 1。部分锆石的阴极发光图像如图 3 所示,U-Pb 谐和图见图 4。由于本区花岗岩锆石的年龄在显生宙范围内,比较年轻,所以采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄作为锆石的结晶年龄。

样品 PM008-4-1 为二长花岗岩,阴极发光图像

表 1 头道河花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for Toudaohe granite

样品编号	$\alpha_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
PM008-4-1 01	7.06	140	172	0.81	0.051 23	0.004 75	0.271 79	0.023 15	0.038 48	0.001 7	244	18	243	11
PM008-4-1 02	7.02	91.3	160	0.57	0.052 60	0.002 43	0.276 04	0.011 72	0.038 06	0.001 09	248	9	241	7
PM008-4-1 03	15.5	244	328	0.74	0.051 36	0.005 13	0.275 3	0.026 29	0.038 88	0.001 14	247	21	246	7
PM008-4-1 04	7.87	121	160	0.76	0.051 52	0.002 86	0.290 24	0.014 81	0.040 86	0.001 29	259	12	258	8
PM008-4-1 05	6.88	99.0	153	0.65	0.051 19	0.002 34	0.272 47	0.011 48	0.038 6	0.001 1	245	9	244	7
PM008-4-1 06	5.81	82.9	135	0.61	0.052 31	0.003 35	0.269 62	0.015 86	0.037 38	0.001 28	242	13	237	8
PM008-4-1 07	7.50	98.5	170	0.58	0.050 96	0.002 34	0.273 18	0.011 6	0.038 88	0.001 1	245	9	246	7
PM008-4-1 08	7.82	84.1	147	0.57	0.053 89	0.006 8	0.270 43	0.033 02	0.036 4	0.001 17	243	26	230	7
PM008-4-1 09	7.48	261	164	1.60	0.051 82	0.003 77	0.284 28	0.018 92	0.039 78	0.001 5	254	15	251	9
PM008-4-1 10	6.60	98.8	142	0.70	0.054 75	0.002 72	0.297 94	0.013 58	0.039 46	0.001 17	265	11	249	7
PM008-4-1 11	5.66	78.6	126	0.62	0.051 88	0.003 7	0.269 34	0.017 68	0.037 65	0.001 37	242	14	238	9
PM008-4-1 12	12.9	229	272	0.84	0.051 91	0.001 85	0.278 3	0.009 22	0.038 88	0.000 99	249	7	246	6
PM008-4-1 13	6.04	90.6	135	0.67	0.051 08	0.003 52	0.271 81	0.017 22	0.038 59	0.001 38	244	14	244	9
PM008-4-1 14	6.71	96.6	154	0.63	0.053 22	0.003 09	0.278 78	0.014 8	0.037 99	0.001 24	250	12	240	8
PM008-4-1 15	6.08	86.9	139	0.62	0.051 99	0.003 14	0.271 66	0.015 04	0.037 90	0.001 26	244	12	240	8
PM008-4-1 16	7.77	114	167	0.69	0.051 38	0.002 57	0.280 71	0.013 09	0.039 62	0.001 14	251	10	250	7
PM008-4-1 17	9.37	260	215	1.20	0.051 64	0.002 94	0.269 40	0.014 08	0.037 83	0.001 22	242	11	239	8
PM008-4-1 18	3.85	49.9	92	0.54	0.055 05	0.005 08	0.283 06	0.023 76	0.037 29	0.001 70	253	19	236	11
PM008-4-1 19	5.22	61.4	119	0.52	0.040 58	0.002 98	0.221 12	0.015 18	0.039 51	0.001 38	203	13	250	9
PM008-4-1 20	8.21	144	180	0.80	0.051 51	0.002 50	0.271 05	0.012 10	0.038 16	0.001 12	244	10	241	7
PM008-4-1 21	6.58	102	145	0.70	0.052 05	0.002 96	0.276 11	0.014 40	0.038 47	0.001 24	248	11	243	8
PM008-4-1 22	12.2	207	257	0.81	0.051 33	0.002 06	0.275 45	0.010 24	0.038 92	0.001 05	247	8	246	7
PM008-4-1 23	6.79	94.8	156	0.61	0.052 00	0.002 84	0.271 94	0.013 71	0.037 92	0.001 17	244	11	240	7
PM008-4-1 24	12.0	203	270	0.75	0.054 64	0.002 29	0.277 58	0.010 67	0.036 84	0.001 02	249	8	233	6
PM013-1-3 01	9.18	157	205	0.77	0.051 06	0.002 37	0.264 61	0.011 29	0.037 58	0.001 08	238	9	238	7

续表 1

Continued Table 1

样品编号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
PM013-1-3 02	8.48	165	188	0.87	0.052 99	0.002 73	0.273 13	0.012 93	0.037 38	0.001 14	245	10	237	7
PM013-1-3 03	6.60	99.3	151	0.66	0.052 49	0.002 86	0.2764 90	0.013 90	0.038 20	0.001 18	248	11	242	7
PM013-1-3 04	6.86	98.0	156	0.63	0.051 40	0.002 65	0.272 16	0.012 96	0.038 40	0.001 15	244	10	243	7
PM013-1-3 05	8.61	138	194	0.71	0.051 11	0.002 78	0.272 70	0.013 62	0.038 69	0.001 21	245	11	245	8
PM013-1-3 06	8.22	126	191	0.66	0.052 01	0.004 51	0.270 47	0.021 59	0.037 71	0.001 57	243	17	239	10
PM013-1-3 07	7.17	100	154	0.65	0.050 72	0.003 70	0.286 96	0.019 3	0.041 03	0.001 52	256	15	259	9
PM013-1-3 08	4.31	60.3	94	0.64	0.051 10	0.005 09	0.275 44	0.025 13	0.039 09	0.001 85	247	20	247	11
PM013-1-3 09	14.1	190	320	0.59	0.051 13	0.001 97	0.271 41	0.009 69	0.038 50	0.001 01	244	8	244	6
PM013-1-3 10	6.84	93.0	159	0.59	0.050 57	0.002 49	0.263 58	0.011 96	0.037 80	0.001 11	238	10	239	7
PM013-1-3 11	7.39	104	169	0.62	0.050 39	0.002 76	0.263 18	0.013 33	0.037 88	0.001 17	237	11	240	7
PM013-1-3 12	8.89	138	167	0.82	0.052 27	0.002 99	0.271 19	0.014 29	0.037 62	0.001 20	244	11	238	7
PM013-1-3 13	10.3	186	232	0.80	0.051 25	0.002 11	0.262 98	0.010 03	0.037 21	0.001 01	237	8	236	6
PM013-1-3 14	8.09	110	176	0.62	0.053 73	0.002 83	0.298 98	0.014 51	0.040 36	0.001 24	266	11	255	8
PM013-1-3 15	8.52	151	189	0.80	0.052 10	0.002 32	0.274	0.011 31	0.038 14	0.001 07	246	9	241	7
PM013-1-3 16	8.23	103	191	0.54	0.053 18	0.002 53	0.278 53	0.012 17	0.037 98	0.001 11	249	10	240	7
PM013-1-3 17	6.56	95.5	147	0.65	0.056 52	0.002 57	0.300 01	0.012 5	0.038 5	0.001 12	266	10	244	7
PM013-1-3 18	8.76	156	198	0.78	0.051 83	0.002 90	0.269 32	0.013 87	0.037 69	0.001 19	242	11	238	7
PM013-1-3 19	8.70	121	192	0.63	0.046 93	0.004 27	0.243 01	0.020 93	0.037 56	0.001 09	221	17	238	7
PM013-1-3 20	5.04	75.5	116	0.65	0.051 47	0.003 82	0.269 40	0.018 46	0.037 97	0.001 41	242	15	240	9
PM013-1-3 21	5.88	123	134	0.92	0.050 9	0.002 92	0.266 69	0.014 12	0.038	0.001 21	240	11	240	8
PM013-1-3 22	7.96	123	179	0.69	0.050 58	0.002 26	0.268 93	0.011 11	0.038 56	0.001 09	242	9	244	7
PM013-1-3 23	6.48	81.7	132	0.62	0.050 97	0.004 48	0.299 67	0.024 18	0.042 64	0.001 83	266	19	269	11
PM013-1-3 24	5.94	75.7	131	0.58	0.051 99	0.004 01	0.291 73	0.020 62	0.040 70	0.001 60	260	16	257	10
PM013-1-3 25	10.1	154	230	0.67	0.051 11	0.002 93	0.266 95	0.014 71	0.037 88	0.001 03	240	12	240	6
PM014-20-1 01	6.45	93.5	139	0.67	0.057 47	0.003 46	0.302 31	0.016 63	0.038 14	0.001 28	268	13	241	8
PM014-20-1 02	8.70	148	183	0.81	0.051 36	0.002 53	0.268 00	0.012 15	0.037 84	0.001 10	241	10	239	7
PM014-20-1 03	8.64	123	189	0.65	0.051 91	0.002 25	0.271 94	0.010 84	0.037 99	0.001 05	244	9	240	7
PM014-20-1 04	8.63	128	192	0.67	0.051 57	0.002 75	0.266 95	0.013 08	0.037 54	0.001 14	240	10	238	7
PM014-20-1 05	6.31	90.5	136	0.66	0.051 92	0.002 79	0.277 35	0.013 71	0.038 74	0.001 20	249	11	245	7
PM014-20-1 06	6.98	94.2	145	0.65	0.050 70	0.002 34	0.268 31	0.011 44	0.038 38	0.001 08	241	9	243	7
PM014-20-1 07	13.2	226	280	0.81	0.051 81	0.002 07	0.271 80	0.010 03	0.038 05	0.001 02	244	8	241	6
PM014-20-1 08	5.88	74.5	128	0.58	0.051 98	0.005 76	0.274 81	0.028 23	0.038 34	0.001 86	247	22	243	12
PM014-20-1 09	9.48	148	200	0.74	0.052 73	0.006 25	0.275 35	0.029 81	0.037 87	0.002 08	247	24	240	13
PM014-20-1 10	9.55	121	218	0.56	0.051 97	0.002 83	0.274 79	0.013 76	0.038 35	0.001 19	247	11	243	7
PM014-20-1 11	9.92	152	216	0.70	0.051 95	0.002 56	0.278 17	0.012 65	0.038 83	0.001 14	249	10	246	7
PM014-20-1 12	11.5	185	242	0.77	0.052 26	0.004 17	0.272 46	0.019 93	0.037 81	0.001 50	245	16	239	9
PM014-20-1 13	9.12	163	195	0.84	0.051 48	0.002 89	0.274 93	0.014 19	0.038 73	0.001 22	247	11	245	8
PM014-20-1 14	9.51	148	196	0.75	0.052 10	0.002 35	0.275 66	0.011 46	0.038 37	0.001 08	247	9	243	7
PM014-20-1 15	10.2	166	219	0.76	0.049 82	0.002 34	0.262 57	0.011 43	0.038 22	0.001 09	237	9	242	7
PM014-20-1 16	19.2	396	372	1.06	0.050 99	0.001 85	0.271 70	0.009 12	0.038 65	0.000 99	244	7	44	6
PM014-20-1 17	9.52	173	206	0.84	0.051 74	0.003 30	0.268 10	0.015 68	0.037 58	0.001 28	241	13	238	8
PM014-20-1 18	10.9	170	218	0.78	0.055 28	0.005 44	0.280 59	0.025 11	0.036 81	0.001 77	251	20	233	11
PM014-20-1 19	12.7	252	276	0.91	0.052 77	0.003 74	0.272 67	0.017 72	0.037 47	0.001 37	245	14	237	9
PM014-20-1 20	7.34	101	168	0.60	0.051 01	0.002 82	0.265 21	0.013 53	0.037 71	0.001 16	239	11	239	7
PM014-20-1 21	8.01	96.2	178	0.54	0.057 68	0.007 44	0.319 4	0.037 37	0.040 16	0.002 47	281	29	254	15
PM014-20-1 22	8.13	117	176	0.67	0.052 36	0.002 74	0.271 94	0.013 09	0.037 67	0.001 15	244	10	238	7
PM014-20-1 23	8.36	141	185	0.76	0.051 16	0.005 05	0.271 88	0.024 61	0.038 54	0.001 81	244	20	244	11
PM014-20-1 24	10.4	156	222	0.70	0.051 54	0.002 61	0.277 71	0.010 75	0.039 08	0.001 06	249	9	247	7

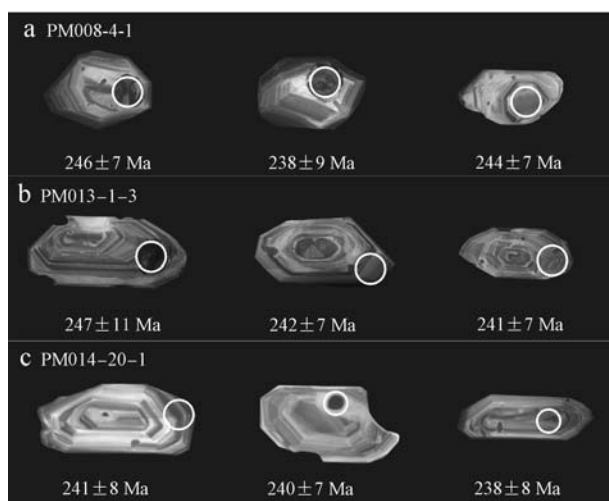


图 3 花岗岩中部分测定锆石的阴极发光图像
Fig. 3 CL images of representative zircons from granites

(图 3)显示锆石均为自形晶,内部结构特征清晰,发育明显的生长震荡环带,边部很亮、较均匀且很平直,说明锆石的边部不是变质产生的,可能是岩浆结晶后期温度或者是成分发生变化后重新生长的,故其具有典型岩浆成因锆石的特征。该样品一共测定了 24 个锆石颗粒,其中有 23 颗锆石的测试结果位于 U-Pb 谐和线上及其附近, Th/U 值介于 0.63~1.84 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 230~258 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 243 ± 3 Ma ($n=23$, MSWD=0.69)。这个年龄反映了该二长花岗岩的形成时代为中三叠世。

样品 PM013-1-3 为二长花岗岩,阴极发光图像(图 3)显示锆石均为自形晶,内部结构特征清晰,发育明显的生长震荡环带,具有典型岩浆成因锆石的特征。该样品一共测定了 25 个锆石颗粒,全部位于 U-Pb 谐和线上及其附近, Th/U 值介于 1.09~1.86 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 236~269 Ma, 加权平均年龄为 240 ± 3 Ma ($n=25$, MSWD=0.62), 这表明该二长花岗岩形成于中三叠世。

样品 PM014-20-1 岩性为花岗闪长岩,阴极发光图像(图 3)显示锆石具有典型的岩浆成因特征。该样品一共测定了 24 个锆石颗粒,其中有 23 颗锆石颗粒的测试结果位于 U-Pb 谐和线上及其附近, Th/U 值介于 0.94~1.80 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 233~246 Ma, 加权平均年龄为 242 ± 3 Ma ($n=24$, MSWD=0.19), 表明花岗闪长岩的形成时代为中三叠世。

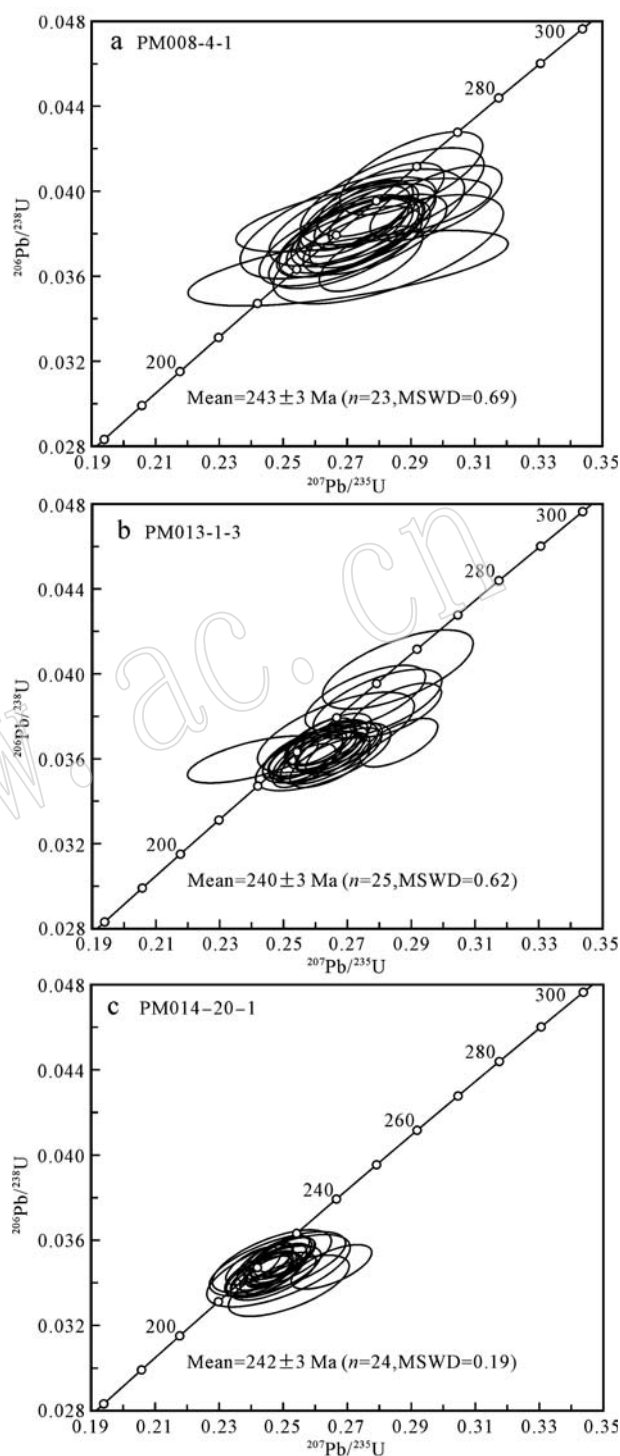


图 4 锆石 LA-ICP MS U-Pb 年龄谐和图
Fig. 4 Zircon LA-ICP MS U-Pb ages concordia diagram

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

主量元素的分析结果列于表 2。头道河岩体的 SiO_2 含量为 61.32%~78.19%; 岩体碱含量较高, K_2O 含量为 2.42%~5.42%, Na_2O 含量为 2.78%

~4.55%； TFe_2O_3 (0.56% ~ 5.93%)， FeO (0.10% ~ 3.30%)， CaO (0.26% ~ 2.94%)， P_2O_5 (0.01% ~ 2.85%)， MnO (0.01% ~ 0.08%)， MgO 0.16% ~ 0.24% 的含量较低。 Al_2O_3 的含量为 11.85% ~

表 2 主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果
Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) data

样品号	PM008-4-1	PM013-1-1	PM013-1-4	PM014-20-1	D9851-1	D9851-2	D9851-3	D9851-4
SiO_2	78.19	61.37	76.08	61.32	73.47	73.92	69.06	67.68
TiO_2	0.09	0.70	0.30	0.77	0.32	0.33	0.55	0.469
Al_2O_3	11.85	16.53	12.33	16.87	12.89	12.67	14.39	14.22
Fe_2O_3	0.56	5.06	1.47	5.93	2.23	2.43	4.03	3.46
FeO	0.10	2.65	0.15	2.85	0.90	1.10	1.49	1.94
MnO	0.01	0.08	0.04	0.07	0.04	0.03	0.06	0.07
MgO	0.16	2.80	0.43	3.30	1.11	1.04	1.83	1.87
CaO	0.32	2.94	0.61	1.80	0.43	0.26	0.43	1.73
Na_2O	3.14	4.34	2.78	4.55	3.52	3.24	3.44	4.03
K_2O	5.42	2.92	4.41	2.42	4.37	4.38	3.72	3.28
P_2O_5	0.01	0.21	0.07	0.24	0.08	0.08	0.15	0.14
LOI	0.18	3.04	1.45	2.72	1.15	1.27	2.02	2.71
Total	99.92	99.99	99.96	99.99	100.51	100.75	101.17	101.60
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	8.56	7.26	7.19	6.97	7.89	7.62	7.16	7.31
A/CNK	1.02	1.06	1.18	1.26	1.14	1.20	1.37	1.07
A/NK	1.07	1.61	1.32	1.67	1.23	1.26	1.49	1.40
FeO^*	0.50	4.55	1.32	5.34	2.01	2.19	3.63	3.11
Ga	12.50	20.30	13.60	18.20	12.40	11.60	15.20	15.00
Rb	132.00	75.10	123.00	50.40	102.00	99.20	102.00	84.00
Sr	143.00	744.00	375.00	696.00	240.00	107.00	170.00	235.00
Y	7.31	19.60	12.30	14.90	8.94	8.34	8.46	14.10
Zr	88.10	36.10	202.00	17.80	62.80	78.50	62.10	57.50
Nb	6.25	6.77	6.51	5.69	7.60	8.84	8.68	6.90
Ba	342.00	1012.00	955.00	900.00	346.00	253.00	469.00	432.00
Hf	4.30	1.84	6.17	0.92	2.59	3.16	2.24	1.88
Ta	1.38	0.61	0.65	0.44	0.89	1.04	0.88	0.65
Pb	9.24	13.00	29.60	10.80	16.80	13.10	27.80	20.90
Th	35.80	7.40	10.70	4.71	15.70	16.30	16.90	18.00
U	2.11	1.28	5.19	1.08	1.60	1.55	1.77	1.51
La	20.20	28.80	33.80	25.60	17.70	16.10	26.90	29.40
Ce	37.80	60.70	54.40	52.00	43.80	33.50	53.40	51.00
Pr	2.87	7.36	6.14	6.11	4.29	4.07	5.85	5.97
Nd	8.57	30.80	21.00	23.20	15.70	14.50	20.90	23.70
Sm	1.12	5.93	3.13	4.52	2.62	2.30	3.29	3.70
Eu	0.36	1.64	0.92	1.38	0.67	0.51	0.91	1.07
Gd	1.09	4.39	2.28	3.58	2.01	1.89	2.47	3.37
Tb	0.19	0.76	0.38	0.57	0.32	0.28	0.38	0.50
Dy	1.12	3.99	2.15	3.19	1.76	1.54	1.87	2.46
Ho	0.24	0.72	0.43	0.56	0.34	0.30	0.31	0.46
Er	0.71	1.95	1.42	1.51	1.14	0.96	0.99	1.40
Tm	0.13	0.28	0.21	0.21	0.20	0.17	0.17	0.22
Yb	0.94	1.89	1.60	1.33	1.37	1.16	1.03	1.41
Lu	0.17	0.27	0.26	0.23	0.21	0.16	0.16	0.23
δEu	0.98	0.94	1.01	1.01	0.85	0.72	0.94	0.91
LREE	70.92	135.23	119.39	112.81	84.78	70.98	111.25	114.84
HREE	4.58	14.26	8.73	11.18	7.35	6.46	7.37	10.05
LREE/HREE	15.48	9.48	13.68	10.09	11.53	10.99	15.09	11.43
ΣREE	75.50	149.49	128.12	123.99	92.13	77.44	118.62	124.89
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	14.53	10.27	14.24	12.98	8.71	9.36	17.61	14.06
10000Ga/Al	1.99	2.27	2.08	2.00	1.82	1.73	2.00	1.99

$A/CNK = \text{mole}[\text{Al}_2\text{O}_3]/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, $A/NK = \text{mole}[\text{Al}_2\text{O}_3]/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, $\delta\text{Eu} = (\text{Eu})_N/[(\text{Gd})_N + (\text{Sm})_N]/2$; LREE = La + Ce + Pr + Nd + Sm + Eu, HREE = Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu, $\Sigma\text{REE} = \text{LREE} + \text{HREE}$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = (\text{La}/0.310)/(\text{Yb}/0.209)$.

16.87%, A/CNK 范围介于 1.02~1.37 之间, 里特曼指数 1.56~2.79。结合 A/NK - A/CNK 图解(图 5a)和 K_2O - SiO_2 图解(图 5b), 显示其属于过铝质高钾钙碱性系列。

3.2.2 微量元素

头道河岩体的稀土元素总量(ΣREE)为 $(75.50 \sim 149.49) \times 10^{-6}$, 轻重稀土元素比值(LREE/HREE)为 9.48~15.48, 轻稀土元素(LREE)含量为 $(70.92 \sim 135.23) \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N$ 比值为 8.71~

17.61, 轻重稀土元素分馏明显。稀土元素配分模式为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型(图 6a), 除样品 PM013-1-4 与样品 PM014-20-1 的 δEu 值均为 1.01、具有轻微的正铕异常外, 其余样品的 δEu 为 0.72~0.98, 均具有中等-轻微的负铕异常。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6b)中, 头道河岩体表现出亏损高场强元素 Nb、Ta, 富集大离子亲石元素 Rb、Th、Pb、U 的特征。

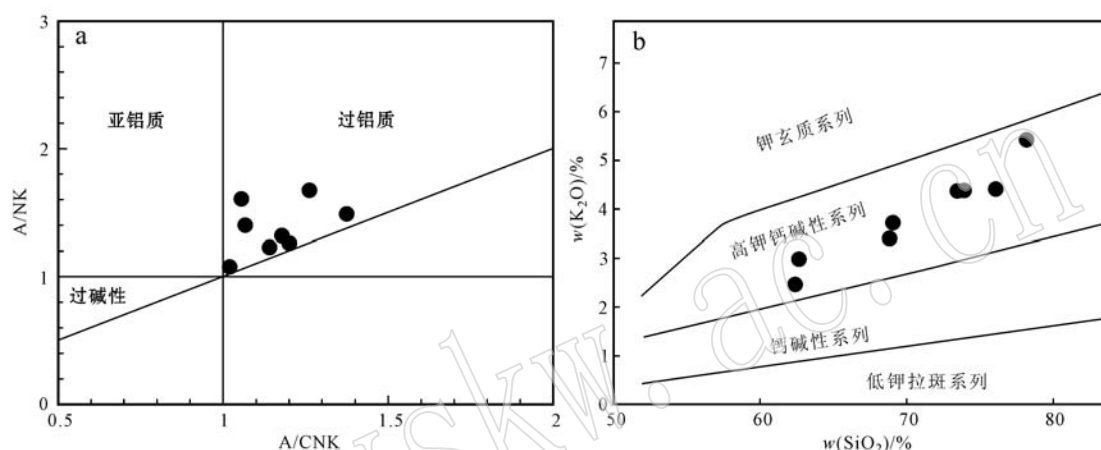


图 5 A/NK - A/CNK 图解(a, Maniar and Piccoli, 1989)和 K_2O - SiO_2 图解(b, Peccerillo *et al.*, 1976)

Fig. 5 A/NK versus A/CNK diagram (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and K_2O versus SiO_2 diagram (b, after Peccerillo *et al.*, 1976)

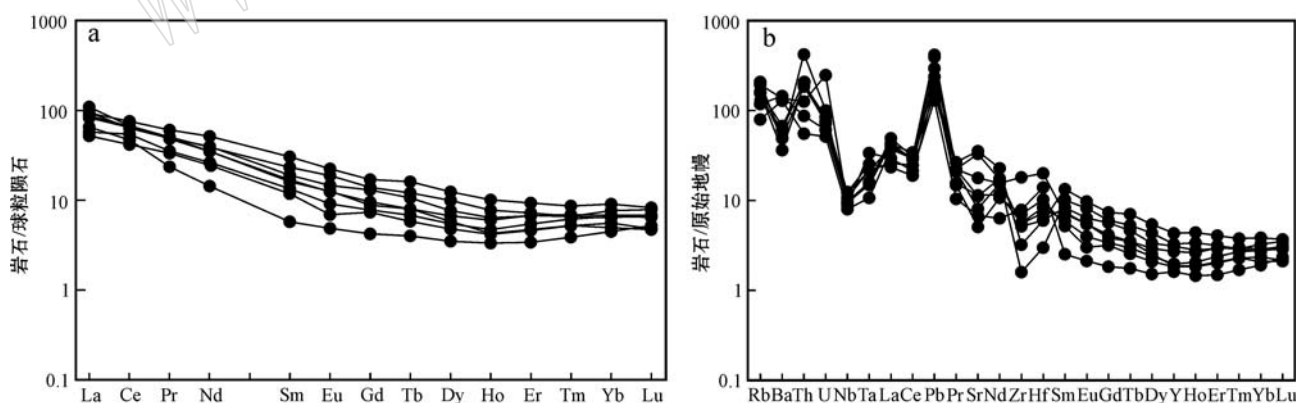


图 6 稀土元素配分模式(a, Boynton, 1984)和微量元素蛛网图(b, Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a, after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b, after Sun and McDonough, 1989)

3.3 Lu-Hf 同位素

在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析的基础上, 对样品进行了锆石微区 Hf 同位素测定, 测定结果如表 3 所示。锆石均具有低的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值, 指

示锆石在形成以后具有较低放射成因 Hf 的积累, 因此锆石 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值可以为探讨岩石成因提供重要信息(Kinny and Maas, 2003)。

样品 PM013-1-3 共分析 24 个点, 除去 $^{206}Pb/^{238}U$

表 3 中三叠世花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果
Table 3 Zircon Hf isotopic data for Middle Triassic granites

样品点	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	2σ	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	f_{Lu}/Hf
PM008-4-1 01	242	0.026 5	0.000 701	0.282 876	0.000 023	3.68	8.89	0.80	529	896	-0.98
PM008-4-1 02	242	0.023 3	0.000 613	0.282 900	0.000 017	4.51	9.73	0.61	495	820	-0.98
PM008-4-1 03	242	0.032 1	0.000 842	0.282 896	0.000 023	4.38	9.57	0.83	503	834	-0.97
PM008-4-1 04	242	0.034 4	0.000 868	0.282 897	0.000 020	4.42	9.60	0.69	502	831	-0.97
PM008-4-1 05	242	0.025 9	0.000 700	0.282 907	0.000 020	4.78	9.98	0.72	486	797	-0.98
PM008-4-1 06	242	0.024 8	0.000 643	0.282 888	0.000 021	4.10	9.31	0.74	512	857	-0.98
PM008-4-1 07	242	0.021 0	0.000 549	0.282 875	0.000 020	3.66	8.89	0.70	528	896	-0.98
PM008-4-1 08	242	0.029 7	0.000 735	0.282 931	0.000 024	5.61	10.81	0.87	453	722	-0.98
PM008-4-1 09	242	0.030 0	0.000 777	0.282 840	0.000 022	2.39	7.58	0.78	582	1014	-0.98
PM008-4-1 10	242	0.029 0	0.000 747	0.282 888	0.000 022	4.11	9.30	0.77	513	858	-0.98
PM008-4-1 11	242	0.044 8	0.001 562	0.282 976	0.000 027	7.21	12.27	0.96	398	588	-0.95
PM008-4-1 12	242	0.046 9	0.001 609	0.282 874	0.000 019	3.59	8.65	0.67	546	917	-0.95
PM008-4-1 13	242	0.024 9	0.000 613	0.282 911	0.000 021	4.92	10.14	0.75	479	782	-0.98
PM008-4-1 14	242	0.036 5	0.000 892	0.282 891	0.000 021	4.20	9.38	0.75	511	851	-0.97
PM008-4-1 15	242	0.027 7	0.000 691	0.282 873	0.000 019	3.56	8.76	0.66	534	907	-0.98
PM008-4-1 16	242	0.032 5	0.000 833	0.282 841	0.000 016	2.43	7.62	0.58	581	1011	-0.97
PM008-4-1 17	242	0.040 2	0.001 064	0.282 905	0.000 019	4.72	9.86	0.67	493	807	-0.97
PM008-4-1 18	242	0.026 6	0.000 714	0.282 843	0.000 013	2.51	7.71	0.46	576	1 003	-0.98
PM008-4-1 19	242	0.022 9	0.000 695	0.282 893	0.000 016	4.26	9.47	0.56	506	843	-0.98
PM008-4-1 20	242	0.026 6	0.000 716	0.282 898	0.000 018	4.46	9.66	0.64	499	826	-0.98
PM008-4-1 21	242	0.033 6	0.001 134	0.282 935	0.000 023	5.77	10.91	0.81	451	713	-0.97
PM008-4-1 22	242	0.043 7	0.000 997	0.282 898	0.000 016	4.47	9.63	0.55	502	829	-0.97
PM008-4-1 23	242	0.038 9	0.000 860	0.282 878	0.000 019	3.73	8.91	0.68	529	894	-0.97
PM008-4-1 24	242	0.024 3	0.000 606	0.282 835	0.000 016	2.23	7.45	0.56	586	1 026	-0.98
PM013-1-3 01	240	0.029 4	0.000 684	0.283 227	0.000 186	16.11	21.28	6.59	32	-234	-0.98
PM013-1-3 02	240	0.032 8	0.000 719	0.282 811	0.000 042	1.39	6.55	1.50	621	1 107	-0.98
PM013-1-3 03	240	0.032 2	0.000 647	0.282 875	0.000 048	3.64	8.81	1.71	530	902	-0.98
PM013-1-3 04	240	0.033 2	0.000 809	0.282 941	0.000 033	5.98	11.12	1.16	439	692	-0.98
PM013-1-3 05	240	0.027 0	0.000 569	0.282 875	0.000 048	3.64	8.82	1.71	529	901	-0.98
PM013-1-3 06	240	0.026 4	0.000 672	0.282 949	0.000 032	6.25	11.42	1.14	426	665	-0.98
PM013-1-3 07	240	0.030 7	0.000 740	0.282 847	0.000 035	2.64	7.80	1.23	571	993	-0.98
PM013-1-3 08	240	0.031 7	0.000 756	0.283 025	0.000 033	8.96	14.12	1.18	319	420	-0.98
PM013-1-3 09	240	0.032 6	0.000 859	0.282 918	0.000 029	5.18	10.31	1.01	472	765	-0.97
PM013-1-3 10	240	0.042 6	0.001 259	0.282 917	0.000 024	5.14	10.21	0.85	478	774	-0.96
PM013-1-3 11	240	0.028 0	0.000 785	0.282 938	0.000 026	5.87	11.02	0.92	443	701	-0.98
PM013-1-3 12	240	0.035 8	0.000 990	0.282 905	0.000 028	4.71	9.82	0.98	492	810	-0.97
PM013-1-3 13	240	0.020 1	0.000 593	0.282 878	0.000 029	3.76	8.93	1.03	525	890	-0.98
PM013-1-3 14	240	0.020 4	0.000 638	0.282 834	0.000 030	2.21	7.38	1.05	587	1 031	-0.98
PM013-1-3 15	240	0.022 8	0.000 661	0.282 830	0.000 026	2.04	7.20	0.93	594	1 047	-0.98
PM013-1-3 16	240	0.020 7	0.000 649	0.282 898	0.000 039	4.44	9.61	1.39	498	829	-0.98
PM013-1-3 17	240	0.013 4	0.000 463	0.282 880	0.000 023	3.83	9.03	0.82	520	882	-0.99
PM013-1-3 18	240	0.019 5	0.000 664	0.282 896	0.000 026	4.39	9.56	0.91	500	833	-0.98
PM013-1-3 19	240	0.021 0	0.000 731	0.282 812	0.000 027	1.42	6.57	0.95	620	1 105	-0.98
PM013-1-3 20	240	0.021 5	0.000 702	0.282 872	0.000 025	3.53	8.69	0.89	535	913	-0.98
PM013-1-3 21	240	0.015 2	0.000 460	0.282 933	0.000 033	5.71	10.91	1.17	445	711	-0.99
PM013-1-3 22	240	0.018 0	0.000 548	0.282 874	0.000 036	3.60	8.79	1.27	530	904	-0.98
PM013-1-3 23	240	0.024 3	0.000 826	0.282 879	0.000 025	3.79	8.93	0.88	527	891	-0.98
PM013-1-3 24	240	0.022 2	0.000 699	0.282 971	0.000 028	7.03	12.19	0.99	396	595	-0.98

为 238 ± 7 Ma、 247 ± 11 Ma 的 2 颗锆石外,其余 22 颗岩 浆 锆 石 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值 为 $0.282\,811 \sim 0.282\,971$,加 权 平 均 值 为 $0.282\,890 \pm 0.000\,019$ ($n = 22$, MSWD = 8.7) (图 7a), $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 为 $+6.55 \sim +12.19$,二 阶 段 Hf 模 式 年 龄 (t_{DM2}) 为 $595 \sim 1\,107$ Ma。

样 品 P008-4-1 共 计 分 析 24 个 点,除 去 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 为 238 ± 9 Ma 的 锆 石 外,其 余 23 颗 岩 浆 锆 石 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比 值 为 $0.282\,835 \sim 0.292\,935$,加 权 平 均 值 为 $0.282\,881 \pm 0.000\,012$ ($n = 23$, MSWD = 8.6) (图 7b), $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 为 $+7.45 \sim +10.91$,二 阶 段 Hf 模 式 年 龄 (t_{DM2}) 为 $713 \sim 1\,026$ Ma。

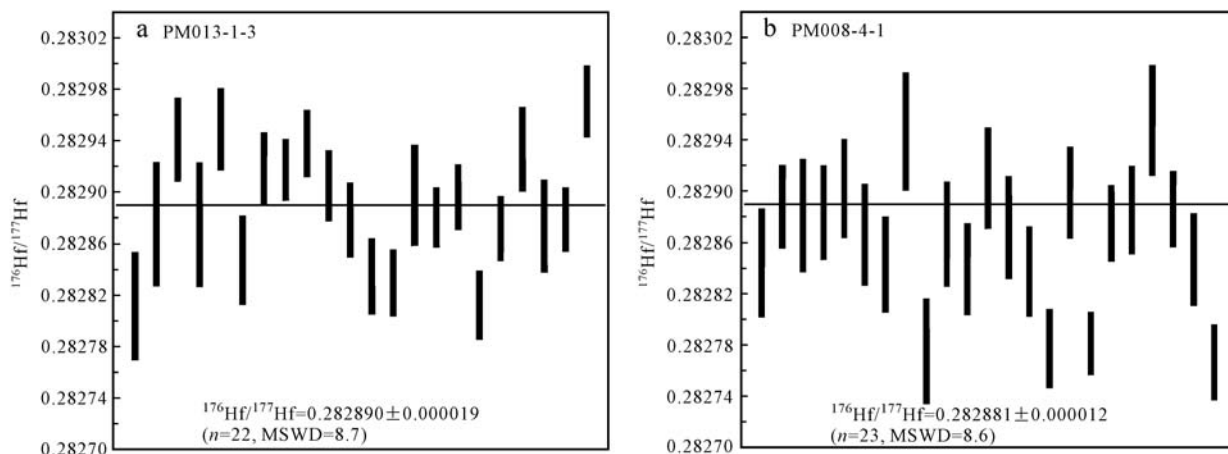


图 7 头道河花岗岩的 Hf 同位素特征

Fig. 7 Characteristics of Hf isotope for Toudaohe granites

4 讨论

4.1 花岗岩的形成时代

通过野外地质踏勘,观察到头道河岩体侵入二叠纪大石寨组火山岩之中,并且被早白垩世白音高老组火山岩覆盖,由此初步判断研究区内头道河岩体形成于二叠纪之后,早白垩世之前。但是,通过其与地层间的接触关系对侵入体形成时代的限制,往往只能得到一个宽泛的时间范围。由于缺乏高精度的年代学研究,因此不能准确反映头道河花岗质岩浆的侵位结晶时代。

为了准确厘定头道河岩体的形成时代,本文对研究区内的头道河岩体进行了锆石 U-Pb 同位素分析。阴极发光(CL)图像显示(图 3),所测定样品的锆石多呈半自形-自形晶,发育明显的振荡生长环带,具有较高的 Th/U 值(0.60~1.86),显示其具典型的岩浆成因特征,暗示着锆石 U-Pb 定年结果代表了岩体的形成时代。3 个代表性样品的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄分别为 243 ± 3 、 242 ± 3 和 240 ± 3 Ma,表明头道河岩体形成于中三叠世。此外,葛文春等(2005)和周漪等(2011)报道大兴安岭中部乌兰浩特-索伦地区存在中晚三叠世酸性岩浆活动,进一步证实大兴安岭中段存在中三叠世花岗质岩浆作用。

4.2 头道河岩体的成因类型

头道河岩体的岩性主要为花岗闪长岩、二长花岗岩,元素间显示出连续的线性变化趋势(图 8),可

以说明其是由同一岩浆演化而来的。此外,头道河岩体普遍具有高硅、富碱、富铝、贫铁、镁、钙的特征, P_2O_5 含量与 SiO_2 含量呈现负相关性变化(图 9a)。以上这些特征均显示头道河岩体为 I 型花岗岩。头道河岩体中出现了角闪石和黑云母等特征代表矿物,未见石榴石、矽线石、堇青石和碱性矿物等特征矿物,进一步证实其为 I 型花岗岩。但在 A/NK-A/CNK 图解(图 5a)中,头道河岩体 A/CNK 比值变化于 1.02~1.37 之间,多数 >1.1 ,不符合典型 I 型花岗岩特征,这有可能为结晶分异作用的结果,导致 CaO、 Na_2O 含量偏低,造成 A/CNK 比值偏高。Bea 等(1992)曾提出岩石的 P_2O_5 含量是比铝饱和指数(A/CNK)更好的判别原始岩浆性质的指标。在 10 000 Ga/Al(图 9b)判别图解中,样品也落入 I 型花岗岩区域。综上,可判断大兴安岭中段头道河岩体花岗质岩石为 I 型花岗岩。

4.3 头道河岩体的源区性质与地壳增生

区内花岗岩以高 SiO_2 、贫 MgO 、 TiO_2 和 Fe_2O_3 为特征,属于过铝质高钾钙碱性 I 型花岗岩。上述特征暗示其原始岩浆应是起源于陆壳物质的部分熔融,并且亏损高场强元素的特征也证实了这一观点(裴福萍等,2008)。由于花岗质岩浆大多是绝热式上升就位的,那么岩浆在早期结晶时近似代表岩浆形成时的温度(吴福元等,2007),因此可以通过锆石饱和温度计算来获取岩浆初始温度(具体计算方法参见 Watson and Harison, 1983)。本文中三叠世花岗岩样品的锆石饱和温度为 623~829℃,平均温度为 719℃,这表明了头道河岩体含源区残留物较多,

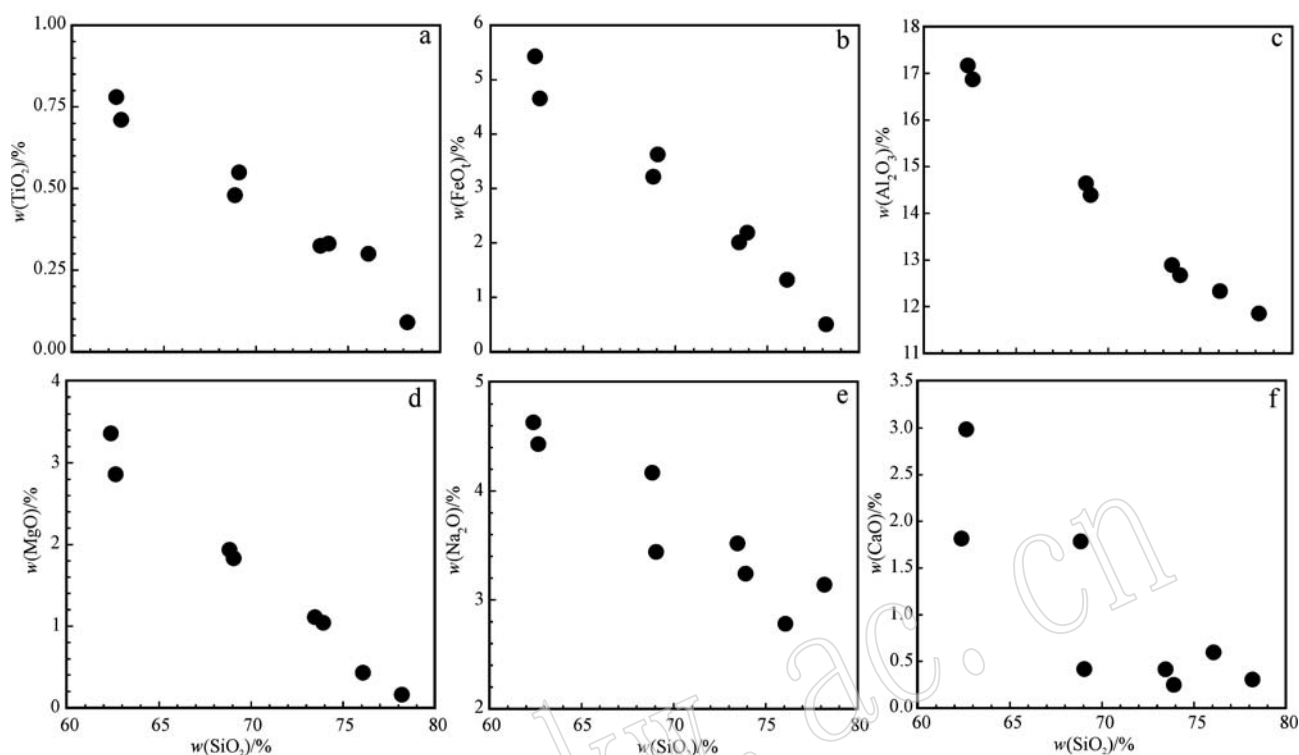
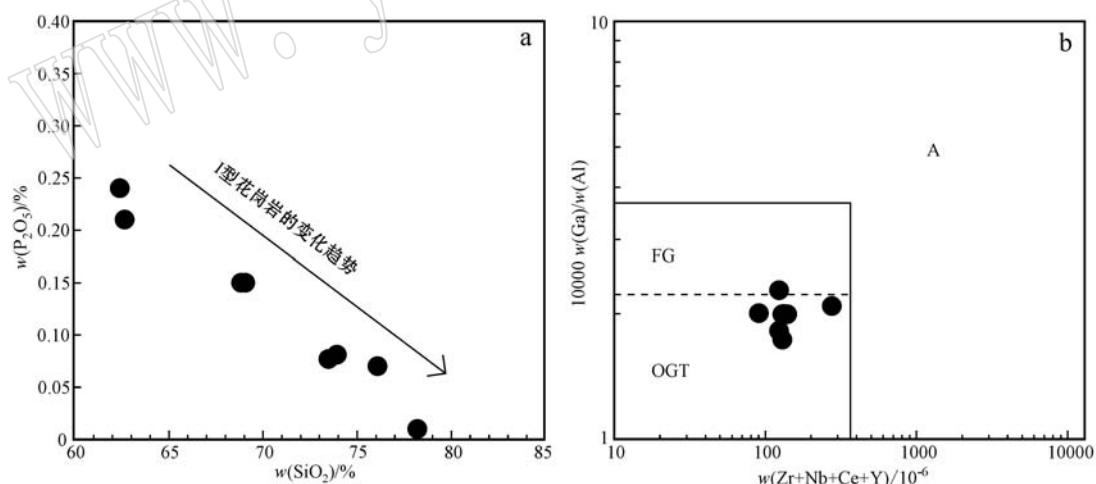


图8 头道河花岗岩 Harker 图解

Fig. 8 Harker diagrams of Toudaohe granites

图9 头道河花岗岩 P_2O_5 - SiO_2 (a, Chappell and White, 1992) 和 $10000 Ga/Al$ - $Zr+Nb+Ce+Y$ (b, Eby, 1990) 判别图解Fig. 9 P_2O_5 - SiO_2 (a, after Chappell and White, 1992), $10000 Ga/Al$ - $Zr+Nb+Ce+Y$ (b, after Eby, 1990) discrimination diagrams of Toudaohe granites

其形成主要与流体加入有关 (Miller *et al.*, 2003)。此外, 张旗等 (2012) 的研究表明具有贫 Sr 富 Yb 的花岗岩 (Sr 变化于 $40 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 之间, $Yb > 1.5 \times 10^{-6}$, $Al_2O_3 = 12\% \sim 17\%$, $\delta Eu = 0.4 \sim 1.0$), 源区残留相主要为斜长石和角闪石, 花岗岩形成的压力

小于 1.0 GPa。头道河岩体也具有贫 Sr 富 Yb 的特点, 暗示其源区在部分熔融过程中有斜长石和角闪石作为残留相。在球粒陨石标准化图解中 (图 6a), 样品的 MREE 相对于 HREE 略微亏损, 指示部分熔融的残留相中可能含有少量角闪石, 印证了上述推断。但是,

研究区内头道河岩体 Eu 负异常并不明显,表明在部分熔融过程中可能没有斜长石作为残留相,这种稀土元素特征与 Sr、Yb 特征的解耦可能与部分熔融过程中源区存在磷灰石有关。由于磷灰石等副矿物对 REE 型式影响较大,虽然其在岩石中的含量很低,但是其分配系数非常大,在长英质熔体中,磷灰石和斜长石作为残留相,其 Eu 负异常可能被抵消。此外,在原始地幔标准化图解(图 6b)中,样品具有 Ba、Sr、P、Ti 等亏损特征,也指示着在部分熔融过程中,源区可能存在斜长石、磷灰石以及钛铁矿的残留。综上,我们推断在部分熔融过程中,源区存在斜长石、角闪石、磷灰石以及钛铁矿等的残留。

张旗等(2012)的研究显示 Sr 和 Yb 的变化可以反映压力的变化,因此结合本文中头道河岩体的 Sr、Yb 特征,可以推断花岗岩源区的压力。本文中的头道河岩体应归为其提出的浙闽型花岗岩,与浙闽型花岗岩平衡的残留相为斜长石和角闪石,这就暗示着相对于埃达克型花岗岩,其形成的压力较低(< 1.0 GPa),也指示着较浅的形成深度(约 30~40 km),因此头道河岩体可能是下地壳角闪岩相部分熔融作用的产物。

一般认为,具有正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的岩石或是直接来自于亏损地幔,或是从亏损地幔中新生的年轻地壳物质的部分熔融(隋振民等,2007)而来。头道河岩体的锆石 Hf 同位素分析数据显示, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值在 0.282 811~0.283 227 之间变化, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值,变化于 6.55~21.28 之间,在 Hf 同位素演化图解中(图 10),所有数据都偏离古老地壳 Hf 演化线,靠近亏损地幔演化线,暗示其源于从亏损地幔中新

增生地壳物质的部分熔融(吴福元等,2007)。并且,头道河岩体的锆石 Hf 二阶段模式年龄(t_{DM2})变化于 595~1 107 Ma 之间,进一步反映其源区物质主要是从中元古代—显生宙期间从亏损地幔中新生的地壳物质。结合 Zhang 等(2006)、隋振民等(2007)以及周漪等(2011)的研究成果,可推断包括研究区在内的兴安地块是在中元古代—显生宙期间发生增生的,而葛文春等(2007)与张彦龙等(2008)研究显示,额尔古纳地块在中元古代时期曾发生过一次地壳增生事件,暗示额尔古纳地块与兴安地块具有不同的地壳增生历史,反映其不同的构造属性和演化历史。

4.4 构造背景

研究区内头道河岩体形成于 243~240 Ma 的中三叠世,从时间上看,其是古亚洲洋构造域向中生代环太平洋构造域转化的产物。古亚洲洋在中三叠世之前已经闭合,而中三叠世头道河岩体的形成可能与古亚洲构造域造山后的伸展作用有关(邵济安等,1997)。

头道河岩体为高钾钙碱性 I 型花岗岩,样品的 REE 蛛网图(图 6a)表现为右倾型,亏损重稀土元素,无明显 Eu 异常;微量元素原始地幔标准化蛛网图上表现为富集大离子亲石元素(Rb、Pb、U),亏损高场强元素(Nb、Ta),这些均显示其具有俯冲作用的岛弧岩浆的地球化学特征。Liegeois 等(1998)指出高钾钙碱性岩浆岩的出现,并向安粗质岩浆过渡是造山作用过程演化到最后阶段的标志。区内样品 K_2O 含量高(2.46%~5.42%),暗示其可能是造山后伸展作用的产物(程银行等,2012)。综上,我们推

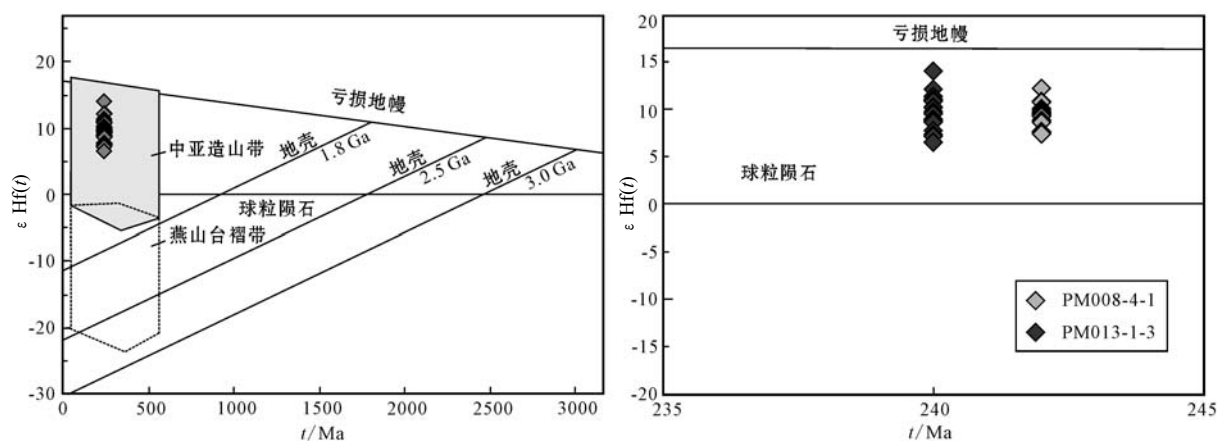


图 10 头道河花岗岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解(Yang *et al.*, 2006)

Fig. 10 Diagrams of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t for zircons of Toudaohe granites(Yang *et al.*, 2006)

断中三叠世头道河岩体可能形成于造山后张性伸展构造环境。

此外,贺根山蛇绿岩的形成(295 Ma)和侵位年龄(244 Ma)(Miao *et al.*, 2008)、三叠纪基性火山岩(214~250 Ma, 张连昌等, 2008)、一系列碰撞后的A型花岗岩(Wu *et al.*, 2002, 施光海等, 2004)、中三叠世碱性石英闪长岩(237 Ma, 张万益, 2012)、三叠纪花岗岩-闪长岩(245~239 Ma)、玄武岩(224 Ma, 张维, 2010)和早三叠世英安岩-流纹岩(K-Ar: 245 Ma, 张晓辉等, 2006)的研究显示大兴安岭三叠纪的岩浆活动主要形成于后造山伸展环境,进一步证实本文中大兴安岭中段头道河岩体的伸展构造背景。

综上,我们认为在中三叠世时古亚洲洋已经闭合,大兴安岭岩石圈发生了伸展减薄,紧接着软流圈的地幔物质上涌,在这种伸展构造环境下,上涌的软流圈加热地壳物质,形成了一定规模岩浆活动,而本文研究的头道河岩体就是该地球动力学机制下的产物。

5 结论

(1) 大兴安岭中段头道河岩体形成于中三叠世(243~240 Ma)。

(2) 大兴安岭中段头道河岩体为高钾钙碱性I型花岗岩。

(3) 大兴安岭中段头道河岩体形成于古亚洲洋闭合后的造山后张性伸展构造环境。

致谢 感谢中国地质大学(北京)苏犁教授及中国地质大学(北京)科学研究院地质过程与矿产资源国家重点实验室工作人员在锆石 U-Pb 测试中给予的诸多帮助;感谢核工业北京地质研究院分析测试中心和中国科学院地球物理研究所 LA-MC-ICP-MS 实验室工作人员在主、微量元素测试和锆石 Hf 同位素分析测试中给予的支持。

References

Anderson T. 2012. Correction of common lead in the U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1/2): 59~79.
Bea F, Fershtater G and Corretgé L G. 1992. The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effect of aluminium[J]. *Lithos*,

29(1): 43~56.

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Elements Geochemistry* [C]. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
Chappell B W and White A J R. 1992. I-and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1~26.
Cheng Yinhang, Yang Junquan, Liu Yongshun, *et al.* 2012. Age and geochemistry of andesites in the Qagan Obo Area, Da Hinggan Mountains[J]. *Geological Survey and Research*, 35(2): 118~127 (in Chinese with English abstract).
Eby G N. 1990. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26: 115~134.
Ge Wenchun, Sui Zhenmin, Wu Fuyuan, *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics and their implications of the Early Paleozoic granites in the northeastern Da Hinggan Mts, Northeastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 423~440 (in Chinese with English abstract).
Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, *et al.* 2005. Zircon U-Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749~760 (in Chinese with English abstract).
Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, *et al.* 2001. Petrogenesis of the Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the southern Da Hinggan Mts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 161~168 (in Chinese with English abstract).
Inner Mongolian Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. Regional Geology of Inner Mongolia[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~725 (in Chinese).
Kinny P D and Maas R. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd Isotope Systems in Zircon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 327~341.
Li X H. 1997. Geochemistry of the Longsheng ophiolite from the southern margin of Yangtze craton, SE China[J]. *Geochemical Journal*, 31: 323~338.
Li X H, Qi C S, Liu Y, *et al.* 2005. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze block: new constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2 081~2 486.
Liegouis J P, Navez J, Hertogen J, *et al.* 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization[J]. *Lithos*, 45: 1~28.

- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of American Bulletin, 101(5): 635~643.
- Miao Laicheng, Fan Weiming, Zhang Fuqin, *et al.* 2003. SHRIMP zircon geochronology and its implications on the Xinkailing-Keluo complex, Northwestern of Lesser Xing'an Range [J]. Chinese Science Bulletin, 48(22): 2 315~2 323.
- Miao L C, Fan W M, Li D Y, *et al.* 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China [J]. Asian Earth Sci., 32: 348~370.
- Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance [J]. Geology, 31: 529~532.
- Pearce R R, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Petrology, 25: 956~983.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58 (1): 63~81.
- Pei Fuping, Xu Wenliang, Yu Yang, *et al.* 2008. Petrogenesis of the Late Triassic Mayihe Pluton in Southern Jilin Province: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 38(3): 351~362.
- Robinson P T, Zhou M F and Hu X F. 1999. Geochemical constraints on the petrogenesis and tectonic setting of the Hegenshan ophiolite [J]. Asian Earth Sci., 17: 423~442.
- Sengör A M C and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia [J]. Nature, 364: 299~307.
- She Hongquan, Li Jinwen, Xiang Anping, *et al.* 2012. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution [J]. Acta Petrologica Sinica, 28(2): 571~594.
- Sui Zhenmin, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in north-eastern Part of the Da Hinggan Mts. [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 461~480 (in Chinese with English abstract).
- Sui Zhenmin. 2007. Zircon U-Pb ages, Petrogenesis and Crustal Evolution of the Granites in Northeastern Part of the Great Xing'an Range [D]. Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 64: 295~304.
- Wu F Y, Jahn B M, Lo C H, *et al.* 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis [J]. Lithos, 66: 241~273.
- Wu F Y, Li X H, Yang J H, *et al.* 2007. Discussions on the Petrogenesis of granites [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1 217~1 238.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185~220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, *et al.* 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 41: 1~30.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. Chem. Geol., 187: 143~173.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou and Lin Qiang. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China [J]. Acta Petrologica Sinica, 15(2): 181~189 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. Chemical Geology, 234(1/2): 105~126.
- Wu Huaying, Zhang Lianchang, Zhou Xinhua, *et al.* 2008. Geochronology and geochemical characteristics of the Late Mesozoic andesites in the Central Da-Hinggan Mountains, and its genesis [J]. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1 339~1 352 (in Chinese with English abstract).
- Xu Gongyu. 1983. Continental volcanic rocks in the Greater Khingan Mountain and their mineralization [J]. Regional Geology of China, 5(3): 39~51 (in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Wu F Y, Shao J A, *et al.* 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan fold and thrust belt, North China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 246(3/4): 336~352.
- Yang Junquan, Liu Yongshun, Teng Xuejian, *et al.* 2012. Geochronology and Geochemistry of the Coarse-medium Grained Syenogranites in the Binbalechagan Area, Inner Mongolia [J]. Geological Survey and Research, 35(2): 128~135 (in Chinese).
- Ye Xusong, Liao Qun'an and Ge Mengchun. 2011. Petrogenesis and tectonic significance of Triassic peraluminous granitoids in Xilinhaote and Linxi Area, Inner Mongolia [J]. Geological Science and Technology Information, 30(3): 57~64 (in Chinese with English abstract).

- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, *et al.* 2003. Determination of U-Pb age and trace element of zircons of Cenozoic intrusion in NE by Laser-ablation inductively couple plasma mass spectrometry[J]. Chinese Science Bulletin, 48(14): 1 511~1 520(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiheng. 2009. Geochronology and Geochemistry of the Mesozoic Volcanic rocks in the Great Xing'an Range, Northeastern China [D]. China University of Geoscience(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiheng, Gao Shan, Ge Wenchun, *et al.* 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination[J]. Chemical Geology, 276(3): 144~165.
- Zhang Jiheng, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, *et al.* 2006. Mesozoic bimodal volcanic suite in Zhalantun of the Da Hinggan Range and its geological significance: Zircon U-Pb age and Hf isotopic constraints [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 80(1): 58~69.
- Zhang Jiheng, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, *et al.* 2008. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, northeastern China[J]. Lithos, 102(1): 138~157.
- Zhang Lianchang, Ying Jifeng, Chen Zhiguang, *et al.* 2008. Age and tectonic setting of Triassic basic volcanic rocks in southern Da Hinggan Range[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(4): 911~920(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi and Li Chengdong. 2012. Granites: Implications for Continental Geodynamics[M]. Beijing: Maritime Press, 1~276(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Gao Yanguang, *et al.* 2012. Geochemical characteristics and genesis of Triassic Chagan Obo alkaline quartz diorites in Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(2): 525~534(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Jian Ping, Liu Dunyi, *et al.* 2010. Geochemistry, geochronology and Hf isotopic compositions of Triassic granodiorite and shoshonite from the Damaoqi area, central Inner Mongolia, China[J]. Geological Bulletin of China, 29(7): 821~832(in Chinese).
- Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Tang Yanjie, *et al.* 2006. Early Triassic A-type felsic volcanism in the Xilinhaote-Xiwuqi, central Inner Mongolia: Age, geochemistry and tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(11): 2 769~2 780(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanlong, Ge Wenchun, Liu Xiaoming, *et al.* 2008. Isotopic characteristics and its significance of the Xinlin town pluton, Great Hinggan Mountains[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 38(2): 177~186(in Chinese with English abstract).
- Zhao Chunjing and Li Zhitong. 1983. Paleozoic tectono-granitic provinces in northern Northeast China and their geologic and tectonic significance[A]. Contributions for the Project of Plate Tectonics in Northern China[C]. Shenyang: Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, 250~292(in Chinese with English abstract).
- Zhao Guolong, Yang Guilin, Wang Zhong, *et al.* 1989. Mesozoic Volcanic Rocks in Middle-South Da-Hinggan Mountains[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yi, Ge Wenchun and Wang Qinghai. 2011. Petrogenesis of Mesozoic granite in Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountains: constraints from geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 30(5): 901~923(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程银行, 杨俊泉, 刘永顺, 等. 2012. 大兴安岭敖包查干地区安山岩年代学、地球化学研究[J]. 地质调查与研究, 35(2): 118~127.
- 葛文春, 隋振民, 吴福元, 等. 2007. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J]. 岩石学报, 23(2): 423~440.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 2005. 大兴安岭中部乌兰浩特特区内生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 21(3): 749~760.
- 郭 锋, 范蔚茗, 王岳军, 等. 2001. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用[J]. 岩石学报, 17(1): 161~168.
- 苗来成, 范蔚茗, 张福勤, 等. 2003. 小兴安岭西北部新开岭-科洛杂岩锆石 SHRIMP 年代学研究及其意义[J]. 科学通报, 48(22): 2 315~2 323.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~725.
- 裴福萍, 许文良, 于 洋, 等. 2008. 吉林南部晚三叠世蚂蚁河岩体的成因: 锆石 U-Pb 年代学和地球化学证据[J]. 吉林大学学报, 38(3): 351~362.
- 邵济安, 牟保磊, 何国琦, 等. 1997. 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), 27(5): 390~394.
- 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 2012. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系[J]. 岩石学报, 28(2): 571~594.
- 施光海, 苗来成, 张福勤, 等. 2004. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的

- 时代及区域构造意义[J]. 科学通报, 49(4): 384~389.
- 隋振民, 葛文春, 吴福元, 等. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 23(2): 461~480.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 吴福元, 孙德有, 林 强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. 岩石学报, 15(2): 181~189.
- 吴华英, 张连昌, 周新华, 等. 2008. 大兴安岭中段晚中生代安山岩年代学和地球化学特征及成因分析[J]. 岩石学报, 24(6): 1339~1352.
- 徐公愉. 1983. 大兴安岭的大陆火山岩及其矿化作用[J]. 中国区域地质, 5(3): 39~51.
- 杨俊泉, 刘永顺, 滕学建, 等. 2012. 内蒙古宾巴勒查干粗中粒正长花岗岩年代学及岩石地球化学[J]. 地质调查与研究, 35(2): 128~135.
- 叶栩松, 廖群安, 葛梦春. 2011. 内蒙古锡林浩特-林西地区三叠纪过铝质花岗岩的成因及构造意义[J]. 地质科技情报, 30(3): 57~64.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 2003. 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, 48(14): 1511~1520.
- 张吉衡. 2009. 大兴安岭中生代火山岩年代学及地球化学研究[D]. 中国地质大学.
- 张连昌, 英基丰, 陈志广, 等. 2008. 大兴安岭南段三叠纪基性火山岩时代与构造环境[J]. 岩石学报, 24(4): 911~920.
- 张 旗, 李承东. 2012. 花岗岩: 地球动力学意义[M]. 北京: 海洋出版社, 1~276.
- 张万益, 聂凤军, 高延光, 等. 2012. 内蒙古查干敖包三叠纪碱性石英闪长岩的地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 28(2): 525~534.
- 张 维, 简 平, 刘敦一, 等. 2010. 内蒙古中部达拉特旗地区三叠纪花岗岩和钾玄岩的地球化学、年代学和 Hf 同位素特征[J]. 地质通报, 29(7): 821~832.
- 张晓辉, 张宏福, 汤艳杰, 等. 2006. 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, 22(11): 2769~2780.
- 张彦龙, 葛文春, 柳小明, 等. 2008. 大兴安岭新林镇岩体的同位素特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 38(2): 177~186.
- 赵春荆, 李之彤. 1983. 东北北部地区古生代构造花岗岩区划及其地质构造意义[A]. 中国北方板块构造文集[C]. 沈阳地质矿产研究所, 280~292.
- 赵国龙, 杨桂林, 王 忠, 等. 1989. 中南部中生代火山岩[M]. 北京科学技术出版社.
- 周 漪, 葛文春, 王清海. 2011. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的成因-地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石矿物学杂志, 30(5): 901~923.