

大兴安岭中部塔尔气中侏罗世碰撞后花岗质岩石的确定及地质意义*

于泓超¹ 和钟铎^{1**} 隋振民² 董玉¹ 朱凯³

YU HongChao¹, HE ZhongHua^{1**}, SUI ZhenMin², DONG Yu¹ and ZHU Kai³

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. College of Resources and Environment Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China

3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2019-07-19 收稿, 2020-01-05 改回.

Yu HC, He ZH, Sui ZM, Dong Y and Zhu K. 2020. Determination and geological implication of the Middle Jurassic post-collisional granitoids in Taerqi area, central Great Xing'an Range. *Acta Petrologica Sinica*, 36(12): 3721–3740, doi: 10.18654/1000-0569/2020.12.10

Abstract The Great Xing'an Range is characterized by voluminous Phanerozoic granites, and the studies of the stages, characteristics and genesis of the granitic magmatism play important roles in the exploration of tectonic-magmatic evolution in the Northeast China. In this study, we undertook zircon U-Pb dating, whole rock major elements and trace elements, as well as zircon Hf isotopic analyses of the Taerqi complex in the central Great Xing'an Range, with an aim to determine their formation timing, petrogenesis and tectonic settings. The Taerqi complex is the product of Early Carboniferous, Middle Jurassic and Early Cretaceous magmatisms, and the Middle Jurassic granitoids are the major part of the Taerqi complex, which are composed of granodiorite, monzogranite and syenogranite. Zircons from the dated granitoids are euhedral to subhedral in shape, and are characterized by typical oscillatory growth zoning and high Th/U ratios (0.35 ~ 2.02), indicating a magmatic origin. LA-ICP-MS zircon U-Pb data indicates that the Middle Jurassic granitoids were emplaced in 173 ~ 166Ma. These granitoid samples have SiO₂ contents of 70.54% ~ 77.96%, Na₂O/K₂O ratios of 0.86 ~ 1.28, Al₂O₃ contents of 11.67% ~ 14.83%, and TiO₂ contents of 0.07% ~ 0.60%, with low MgO contents (0.02% ~ 0.74%), and A/CNK values of 0.9 ~ 1.1, indicating they belong to high-K calc-alkaline I-type granite, with metaluminous to weakly peraluminous affinities. These granitoid samples are enriched in Rb, Th, U, Zr and light rare earth elements, and depleted in Ba, Nb, Ta, Sr, Ti and heavy rare earth elements, with medium to strong negative Eu anomalies. In addition, zircons from the Middle Jurassic granitoids have initial ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf ratios of 0.282874 to 0.282985, and their $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range in +7.01 ~ +10.9, with corresponding two-stage model age of 768 ~ 516Ma. The above geochemical characteristics suggest that the primary magma was derived from partial melting of juvenile crustal material accreted during the Neoproterozoic to Phanerozoic with plagioclase and hornblende in the residue, of which, the magma then experienced fractional crystallization of plagioclase and K-feldspar during magmatic evolution. Combined with previous studies, we conclude that the studied Middle Jurassic granitoids were emplaced in a post-collisional extensional setting, which was likely related to the lithospheric delamination caused by the closure of the Mongol-Okhotsk Ocean.

Key words Granitoids; Geochronology; Geochemistry; Tectonic setting; Central Great Xing'an Range; Taerqi area

摘 要 大兴安岭地区以发育巨量显生宙花岗岩为特征,而且通过对这些花岗质岩浆作用的期次、特征以及成因进行研究

* 本文受中国地质调查局项目(12120114012901)和自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室自主基金课题(DBY-ZZ-19-22)联合资助。

第一作者简介: 于泓超,男,1991年生,博士生,构造地质学专业, E-mail: yuh-c@qq.com

** 通讯作者: 和钟铎,男,1968年生,教授,博士生导师,主要从事区域地质和构造地质学方面的研究, E-mail: hezhonghua@126.com

对于探讨中国东北地区构造-岩浆演化历史具有重要意义。本文通过对大兴安岭中部塔尔气杂岩体进行锆石 U-Pb 年代学、全岩主量元素和微量元素以及锆石 Hf 同位素组成分析,确定这些花岗质岩石的形成时代、成因以及构造背景。塔尔气杂岩体是早石炭世、中侏罗世和早白垩世三期岩浆作用的产物,且中侏罗世花岗质岩石是塔尔气杂岩体的主体,其主要岩石类型为花岗闪长岩、二长花岗岩和正长花岗岩。这些花岗质岩石的锆石均呈自形-半自形,具有典型的震荡生长环带和高 Th/U (0.35 ~ 2.02) 比值,表明其为岩浆成因锆石。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄结果显示中侏罗世花岗质岩石主要形成于 173 ~ 166Ma。它们的 SiO₂ 含量为 70.54% ~ 77.96%, Na₂O/K₂O 比值为 0.86 ~ 1.28, Al₂O₃ 含量为 11.67% ~ 14.83%, TiO₂ 含量为 0.07% ~ 0.60%, 具有较低的 MgO 含量(0.02% ~ 0.74%), A/CNK 值介于 0.9 ~ 1.1, 表明这些花岗质岩石属于高钾钙碱性 I 型花岗岩,具有准铝质-弱过铝质特征。塔尔气中侏罗世花岗质岩石富集 Rb、Th、U、Zr 和轻稀土元素,亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、Ti 和重稀土元素,且具有中等到强烈的铕负异常。此外,它们的锆石 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282874 ~ 0.282985, ε_{Hf}(t) 值为 +7.01 ~ +10.9, 二阶段模式年龄为 768 ~ 516Ma。上述地球化学特征暗示其原始岩浆源于新元古代-显生宙期间新增生陆壳物质的部分熔融,源区残留相主要为斜长石和角闪石,并在岩浆演化过程中经历了斜长石和钾长石等矿物的分离结晶作用。结合前人研究成果,认为研究区中侏罗世花岗质岩石形成于碰撞后伸展环境,可能与蒙古-鄂霍茨克洋闭合后的岩石圈拆沉作用有关。

关键词 花岗质岩石;年代学;地球化学;构造背景;大兴安岭中部;塔尔气地区

中图法分类号 P588.121; P597.3

兴蒙造山带延绵于蒙古、俄罗斯东部以及我国境内的内蒙古和东北地区,是中亚造山带的组成部分之一,因此具有重要的研究意义。其中,大兴安岭地区位于兴蒙造山带的东段,存在广泛的显生宙岩浆作用,形成了举世瞩目的“花岗岩海”(吴福元等,1999; Wu *et al.*, 2011)。同时,这些显生宙花岗质岩石的发现也为探讨兴蒙造山带东段的构造演化历史和地壳增生事件等科学问题提供了重要的地质证据。近年来大量相关的高精度年代学与地球化学研究(Wu *et al.*, 2002, 2003; Yang *et al.*, 2016; 葛文春等, 2005a, b, 2007; 隋振民等, 2007; 王兴安等, 2012; 王伟等, 2012) 已初步建立了大兴安岭显生宙花岗质岩石的年代学格架(Wu *et al.*, 2011), 深化了关于该地区构造-岩浆作用的认识。早期研究曾普遍认为大兴安岭广泛发育的花岗质岩石主要为海西期岩浆作用的产物,属于古生代板块俯冲和碰撞的产物(赵春荆和李之彤, 1983; 内蒙古自治区地质矿产局, 1991), 但是该认识缺乏高精度的年代学资料的证实。近年来高精度的年代学研究不断开展,已发现大兴安岭地区显生宙花岗质岩石主要形成于中生代,而非早前认识的晚古生代(Dong *et al.*, 2016b; 葛文春等, 2005b; 张健等, 2011; 王兴安等, 2012; 崔芳华等, 2013; 施璐等, 2013; 陈飞等, 2016; 纪政等, 2016)。此外,目前关于这些中生代花岗质岩石形成相关的地球动力学机制等问题仍然存在很大争议(Dong *et al.*, 2016b; 葛文春等, 2005b; 隋振民等, 2007; 张彦龙等, 2010; 王伟等, 2012; 陈飞等, 2016; 纪政等, 2016; 唐杰等, 2016)。其中部分学者认为大兴安岭地区中生代花岗质岩石的形成与古太平洋板块的俯冲作用有关(Dong *et al.*, 2016b; 葛文春等, 2005b; 隋振民等, 2007; 张彦龙等, 2010), 而另外一些学者提出这些花岗质岩石的产生与蒙古-鄂霍茨克构造域的演化关系密切(王伟等, 2012; 陈飞等, 2016; 纪政等, 2016; 唐杰等, 2016)。大兴安岭地区中生代构造-岩浆作用的认识是东北地学研究的重点问题,同时也制约了东北地学研究的发展。综上,本文选择大兴安岭中部

塔尔气杂岩体为研究对象,对其进行系统的岩相学、锆石 U-Pb-Hf 测试分析以及地球化学研究,从而准确厘定该岩体的形成时代、成因以及构造背景,为深入探讨兴蒙造山带中生代构造-岩浆演化历史提供依据。

1 地质背景及样品特征

塔尔气地区位于大兴安岭中部,大地构造位置属于兴安地块(图 1b)。其中,兴安地块北侧为额尔古纳地块,南侧为松嫩地块。古生代时期,大兴安岭地区主要受古亚洲洋构造域演化的影响(Wu *et al.*, 2002; 孙德有等, 2004), 并从中生代以来进入古太平洋构造域或蒙古-鄂霍茨克洋构造域演化阶段(Wu *et al.*, 2011; 葛文春等, 2005b; 许文良等, 2013)。研究区前中生代地层零星出露,主要为新元古代佳疙瘩组和奥陶系裸河组,其中佳疙瘩组岩性为黑云母石英片岩、黑云绿泥石英片岩、角闪绿泥片岩等;奥陶系裸河组岩性主要为绢云长英片岩、绿泥石英片岩和粉砂岩。研究区中生代地层主要为中侏罗世-早白垩世的火山-沉积岩(塔木兰沟组、满克头鄂博组、玛尼吐组和白音高老组),新生代地层主要为大黑沟期玄武岩和第四纪沉积物。此外,研究区广泛发育花岗质岩石,前人在 1:20 万绰尔幅区域地质调查报告中(黑龙江省地质局, 1981^①) 将这些花岗质岩石主要划分为海西期和燕山期,其中海西期花岗质岩石主要以岩基状产出,燕山期花岗岩零星分布,呈小岩株产出(图 1a)。

塔尔气杂岩体位于塔尔气镇东侧,在 1:20 万绰尔幅区域地质调查报告(黑龙江省地质局, 1981) 中称之为大牛圈-塔尔巴干台布其和-塔尔其岩体(本文称其为“塔尔气杂岩体”)。由于该岩体侵入到奥陶纪裸河组地层中,原将其时代定为海西中期。根据野外地质特征和总结同位素年代学研

① 黑龙江省地质局. 1981. 1:20 万喜桂图旗幅-塔尔其幅-绰尔幅区域地质调查报告

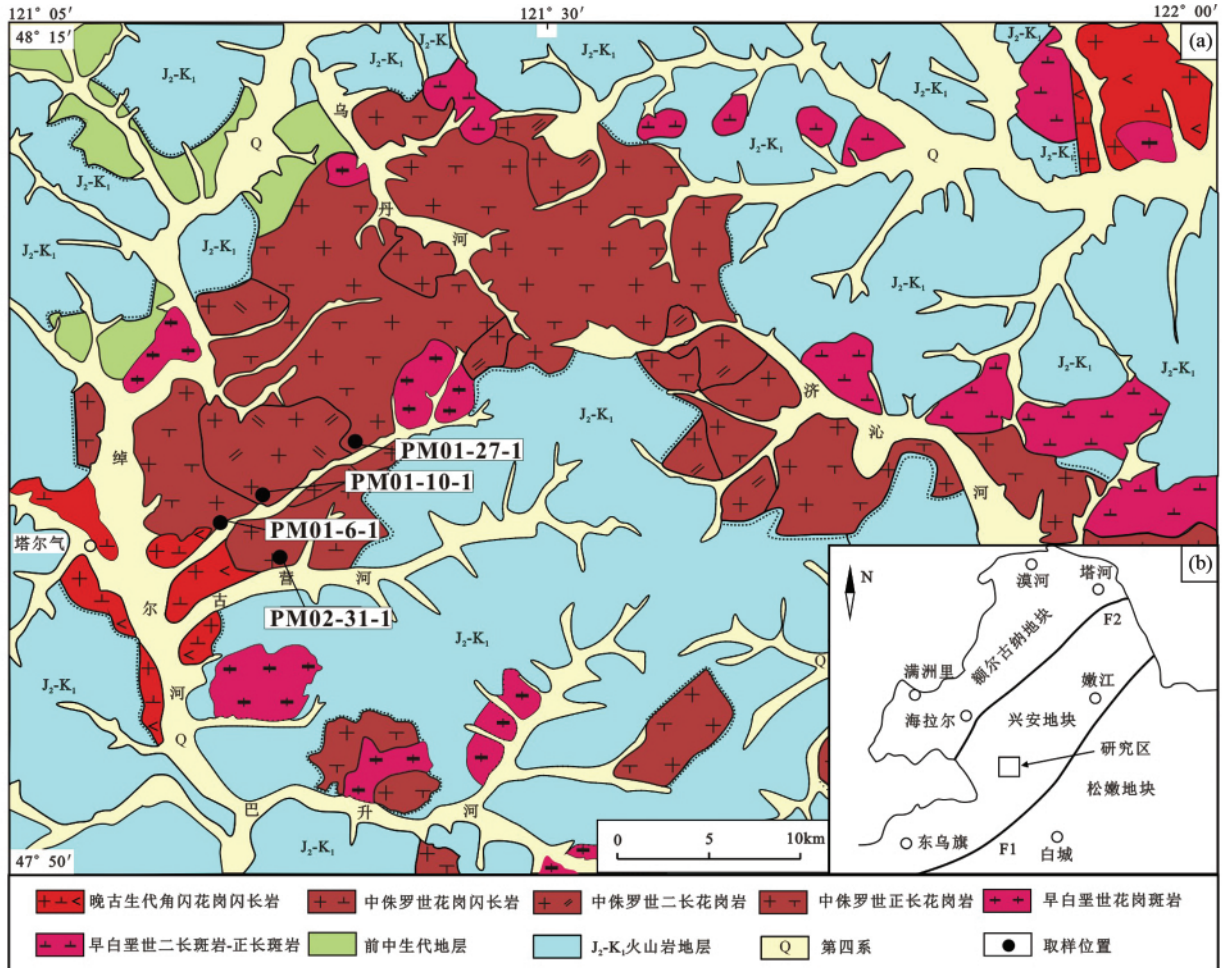


图1 塔尔气杂岩体地质简图

Fig.1 Geological sketch map of the Taerqi complex

究成果, 本文认为塔尔气杂岩体为一个多期侵入的复式岩体, 发育三期岩浆作用(早石炭世、中侏罗世和早白垩世三期)。其中, 早石炭世岩体主要分布在塔尔气镇东部, 被中侏罗世花岗岩侵入, 该期岩浆作用产物主要为石英闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩(张健等, 2011)。中侏罗世花岗质岩石构成了塔尔气杂岩体的主体部分, 主要岩石类型为二长花岗岩、正长花岗岩及少量花岗闪长岩。此外, 早白垩世花岗岩斑岩呈小岩株或岩脉形式零散发育于岩体内, 并与中侏罗世花岗质岩石具有侵入接触关系。

花岗闪长岩 岩石呈灰白色, 中细粒半自形粒状结构, 块状构造(图2a)。岩石主要由石英(20%~25%)、斜长石(45%~60%)、碱长石(5%~15%)和黑云母(5%~10%)组成, 含少量锆石、磷灰石和磁铁矿等副矿物。斜长石为半自形-自形板状, 粒径为1~4mm; 碱长石为半自形板状, 主要为条纹长石, 少量正长石, 粒径为1~4mm; 石英为他形粒状, 粒径为1~3mm; 黑云母为片状, 具有浅褐-深褐色吸收性, 粒径为0.5~1mm。

二长花岗岩 岩石呈浅褐色, 中粒半自形粒状结构, 块

状构造(图2b)。岩石主要由石英(25%~30%)、斜长石(30%~45%)、碱长石(25%~35%)、黑云母(1%~5%)组成, 含少量锆石、磷灰石、磁铁矿等副矿物。斜长石为半自形-自形板状, 发育细密的聚片双晶, 粒径为2~4mm; 碱长石为半自形板状, 主要为微斜长石, 少量条纹长石, 粒径为2~5mm; 石英为他形粒状, 粒径为1~5mm; 黑云母为片状, 具有浅褐-深褐色吸收性, 粒径为1~2mm。

正长花岗岩 岩石呈肉红色, 矿物粒径变化较大, 为中粗粒、中粒及中细粒半自形粒状结构, 矿物主体粒径为1~7mm, 块状构造(图2c)。岩石主要由石英(20%~30%)、碱长石(45%~65%)、斜长石(10%~15%)、黑云母(3%~10%)组成, 含少量锆石、磷灰石、磁铁矿等副矿物。局部斜长石含量减少, 岩石类型过渡为碱长花岗岩。斜长石为半自形-自形板状, 可见聚片双晶, 粒径为1~5mm; 碱长石为半自形板状, 主要为微斜长石、条纹长石, 粒径多在2~7mm; 石英为他形粒状, 粒径为1~4mm; 黑云母为片状, 具有浅褐-深褐色吸收性, 粒径在1~2mm(图2d)。

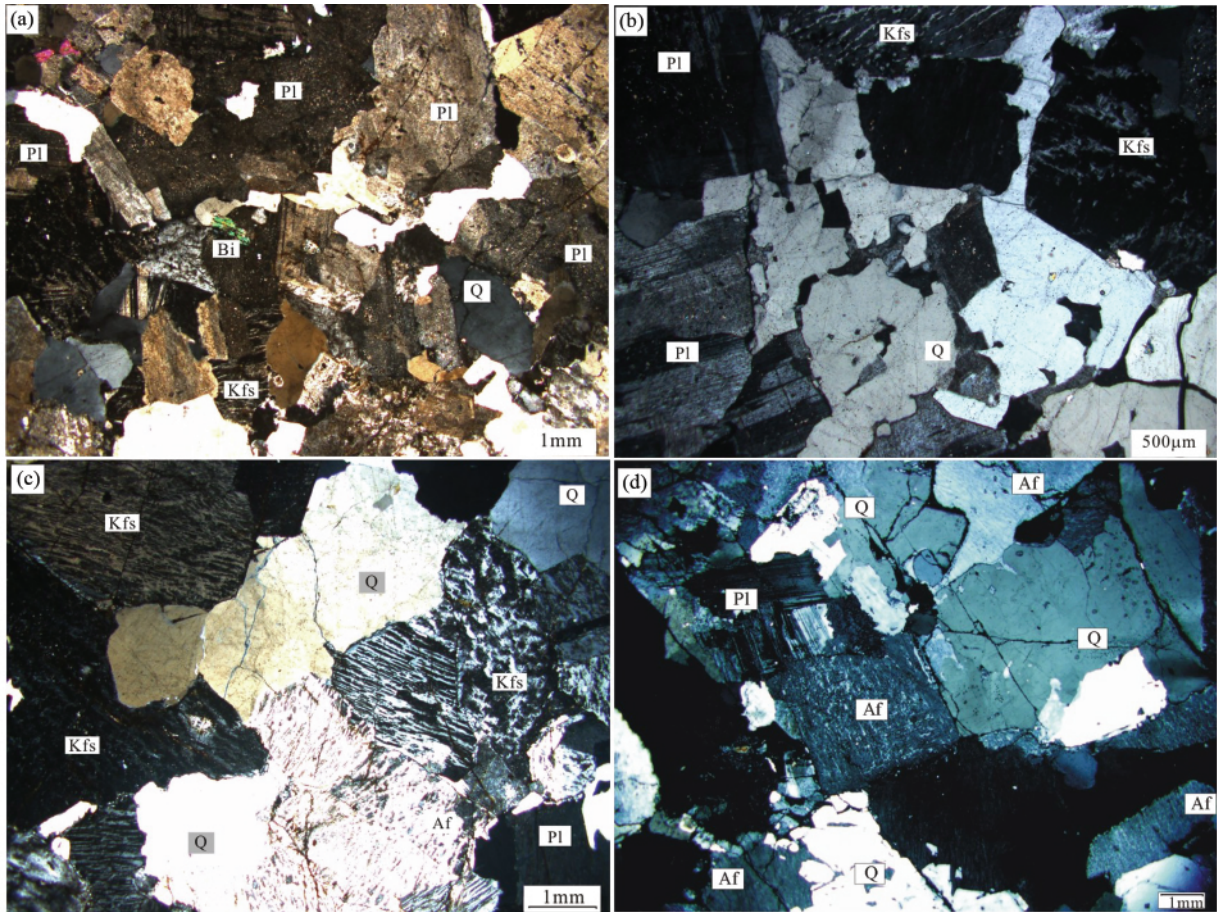


图2 塔尔气中侏罗世花岗质岩石岩石学特征照片

Q-石英; Pl-斜长石; Kfs-钾长石; Af-碱性长石; Bi-黑云母

Fig. 2 The petrological photographs of the Middle Jurassic granitoids in Taerqi area

2 分析方法

锆石 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素测试均在中国科学院地质与地球物理研究所进行。锆石的挑选和处理工作在廊坊区域地质调查研究所进行,采用重液和磁选方法进行分选,并在双目镜下对锆石进行制靶工作,随后对其进行透射光、反射光和阴极发光 (CL) 图像的采集。锆石制靶与 CL 图像的采集在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室进行。实验采用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪 (LA-ICP-MS) 对锆石进行 U-Pb 同位素测年分析,锆石定年过程中激光脉冲为 10Hz,激光束斑直径为 30 μ m,剥蚀深度为 20~40 μ m,试验中采用高纯度 He 气作为剥蚀物质载气。实验分析步骤和数据处理方法见 (Wu *et al.*, 2006),实验测得的数据通过文献 (Andersen, 2002) 中方法对同位素比值进行校正。Lu-Hf 同位素分析选用配有 193nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子质谱仪 (LA-MC-ICP-MS),激光束斑直径为 40 μ m,激光脉冲宽度为 15ns,在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

和模式年龄计算中,二阶段模式年龄采用平均地壳 $f_{\text{cc}} = -0.548$ (Veevers *et al.*, 2005) 进行计算,详细分析方法参见谢烈文等 (2008)。

主量和微量元素分析在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,主量元素采用压片法 X 射线荧光光谱 (XRF) 分析,微量元素采用电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 分析完成,主量元素分析精度和准确度优于 5%,痕量元素的分析精度和准确度优于 10%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

本文对塔尔气杂岩体中 4 个代表性样品进行了锆石 U-Pb 测试分析 (表 1)。样品的阴极发光图像显示,大部分锆石为自形-半自形晶,普遍发育典型的岩浆震荡生长环带 (图 3),锆石 Th/U 比值介于 0.35~2.02 之间,暗示其为岩浆成因锆石。锆石 U-Pb 测试分析结果列于表 1,相关锆石 U-Pb 谐和图如图 4 所示,其结果以 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄计算,年龄误差

表1 塔尔气地区中侏罗世花岗质岩石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 Ziron LA-ICP-MS U-Pb analyses for the Middle Jurassic granitoids in Taerqi area

测点号	Th		U	Th/U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (Ma)		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U (Ma)		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	
	(×10 ⁻⁶)			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	Age	1σ	Age	1σ	Age	1σ		
PM02-31-1 花岗闪长岩																	
-01	45.4	60.23	0.75	0.04948	0.00582	0.19146	0.02242	0.02806	0.00055	171	223	178	19	178	3		
-02	57.2	79.28	0.72	0.04979	0.00429	0.18703	0.01603	0.02724	0.00048	185	160	174	14	173	3		
-03	228	185	1.23	0.04931	0.00309	0.18490	0.01160	0.02719	0.00042	163	114	172	10	173	3		
-04	70.6	73.22	0.96	0.04931	0.00489	0.18524	0.01827	0.02724	0.00050	163	187	173	16	173	3		
-05	65.5	113	0.58	0.04938	0.00405	0.18591	0.01520	0.02730	0.00045	166	153	173	13	174	3		
-06	48.0	59.3	0.81	0.04950	0.00708	0.19189	0.02734	0.02811	0.00056	172	265	178	23	179	4		
-07	781	569	1.37	0.04943	0.00167	0.18095	0.00619	0.02655	0.00038	168	53	169	5	169	2		
-08	154	208	0.74	0.04938	0.00286	0.18866	0.01093	0.02771	0.00043	166	103	175	9	176	3		
-09	186	164	1.13	0.04947	0.00273	0.18505	0.01018	0.02712	0.00043	170	97	172	9	172	3		
-10	21.5	24.8	0.87	0.04994	0.01976	0.19247	0.07578	0.02795	0.00123	192	612	179	65	178	8		
-11	175	133	1.31	0.04970	0.00473	0.21175	0.02009	0.03089	0.00051	181	183	195	17	196	3		
-12	52.6	62.6	0.84	0.04938	0.00589	0.18881	0.02243	0.02773	0.00054	166	228	176	19	176	3		
-13	54.8	58.8	0.93	0.04971	0.00680	0.18576	0.02531	0.02710	0.00055	181	260	173	22	172	3		
-14	67.8	67.8	1.00	0.04963	0.00475	0.18468	0.01756	0.02698	0.00050	178	179	172	15	172	3		
-15	95.9	76.8	1.25	0.04946	0.00450	0.18879	0.01706	0.02768	0.00050	170	169	176	15	176	3		
-16	63.5	77.2	0.82	0.04967	0.00564	0.18634	0.02107	0.02721	0.00052	180	219	174	18	173	3		
-17	134	119	1.13	0.04963	0.00327	0.18270	0.01197	0.02669	0.00045	178	118	170	10	170	3		
-18	388	368	1.05	0.04944	0.00177	0.18780	0.00678	0.02755	0.00039	169	58	175	6	175	2		
-19	1198	627	1.91	0.05290	0.00192	0.19580	0.00718	0.02684	0.00037	325	58	182	6	171	2		
-20	137	118	1.16	0.04987	0.00438	0.18966	0.01659	0.02758	0.00046	189	166	176	14	175	3		
-21	58.7	63.2	0.93	0.04945	0.00474	0.18615	0.01772	0.02730	0.00052	169	178	173	15	174	3		
-22	178	166	1.07	0.04971	0.00390	0.18933	0.01480	0.02762	0.00045	181	146	176	13	176	3		
-23	319	379	0.84	0.04987	0.00164	0.18661	0.00622	0.02714	0.00038	189	51	174	5	173	2		
-24	98.2	95.1	1.03	0.04977	0.00483	0.19065	0.01842	0.02778	0.00048	184	185	177	16	177	3		
-25	514	470	1.09	0.05137	0.00222	0.18646	0.00813	0.02632	0.00037	257	74	174	7	167	2		
PM01-10-1 二长花岗岩																	
-01	1027	675	1.52	0.10368	0.00308	0.39326	0.01176	0.02751	0.00039	1691	34	337	9	175	3		
-02	243	236	1.03	0.04960	0.00307	0.18492	0.01144	0.02704	0.00040	176	113	172	10	172	5		
-03	752	632	1.19	0.04605	0.00242	0.16345	0.00831	0.02574	0.00035		114	154	7	164	3		
-04	249	282	0.88	0.04966	0.00268	0.18586	0.01003	0.02714	0.00039	179	97	173	9	173	3		
-05	716	496	1.44	0.05455	0.00227	0.19782	0.00825	0.02630	0.00038	394	67	183	7	167	3		
-06	644	768	0.84	0.04924	0.00171	0.17806	0.00623	0.02622	0.00037	159	55	166	5	167	3		
-07	504	582	0.87	0.04937	0.00189	0.17932	0.00691	0.02634	0.00037	165	64	167	6	168	3		
-08	1088	1103	0.99	0.04998	0.00148	0.18200	0.00550	0.02641	0.00036	194	45	170	5	168	3		
-09	1344	940	1.43	0.05684	0.00178	0.20441	0.00650	0.02608	0.00036	485	46	189	5	166	3		
-10	173	175	0.99	0.04939	0.00335	0.18787	0.01270	0.02758	0.00043	166	124	175	11	175	5		
-11	1981	1140	1.74	0.05193	0.00160	0.1895	0.00596	0.02646	0.00036	282	47	176	5	168	3		
-12	199	171	1.17	0.04949	0.00371	0.18516	0.01384	0.02713	0.00045	171	138	172	12	173	5		
-13	1118	726	1.54	0.05730	0.00201	0.21187	0.00754	0.02681	0.00037	503	54	195	6	171	3		
-14	905	765	1.18	0.05906	0.00200	0.21255	0.00729	0.02610	0.00037	569	50	196	6	166	3		
-15	1213	1010	1.20	0.04956	0.00159	0.17929	0.00587	0.02623	0.00037	174	50	167	5	167	3		
-16	980	837	1.17	0.04943	0.00188	0.17805	0.00684	0.02612	0.00038	168	62	166	6	166	3		
-17	3167	1885	1.68	0.04924	0.00142	0.18163	0.00538	0.02675	0.00037	159	44	169	5	170	3		
-18	446	472	0.94	0.04928	0.00217	0.18527	0.00821	0.02726	0.00040	161	76	173	7	173	5		
-19	299	302	0.99	0.04937	0.00230	0.18900	0.00884	0.02776	0.00042	165	81	176	8	177	5		
-20	797	807	0.99	0.05067	0.00195	0.18661	0.00730	0.02670	0.00038	226	64	174	6	170	3		

续表 1

Continued Table 1

测点号	Th ($\times 10^{-6}$)	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma)		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (Ma)		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	Age	1σ	Age	1σ	Age	1σ
-21	559	288	1.94	0.04938	0.00236	0.18353	0.00884	0.02695	0.00040	166	84	171	8	171	5
-22	152	170	0.89	0.04952	0.00345	0.18560	0.01289	0.02718	0.00045	173	126	173	11	173	5
-23	108	121	0.89	0.04985	0.00506	0.19009	0.01903	0.02766	0.00048	188	231	177	16	176	5
-24	1410	1005	1.40	0.04912	0.00155	0.17773	0.00575	0.02624	0.00037	154	49	166	5	167	3
-25	167	213	0.78	0.04854	0.00424	0.18489	0.01589	0.02763	0.00043	126	198	172	14	176	5
PM01-6-1 正长花岗岩															
-01	190	207	0.92	0.04960	0.00261	0.17860	0.00932	0.02611	0.00040	176	92	167	8	166	3
-02	467	388	1.20	0.04944	0.00163	0.17654	0.00581	0.02589	0.00035	169	52	165	5	165	2
-03	369	284	1.30	0.04946	0.00236	0.18207	0.00862	0.02669	0.00039	170	83	170	7	170	2
-04	345	298	1.15	0.04914	0.00234	0.18107	0.00858	0.02672	0.00038	155	83	169	7	170	2
-05	387	297	1.30	0.04912	0.00238	0.17601	0.00847	0.02599	0.00037	154	85	165	7	165	2
-06	565	396	1.43	0.04931	0.00187	0.17876	0.00673	0.02629	0.00037	163	62	167	6	167	2
-07	901	808	1.12	0.04946	0.00152	0.17527	0.00538	0.02569	0.00035	170	46	164	5	164	2
-08	436	496	0.88	0.04960	0.00180	0.17643	0.00638	0.02579	0.00035	176	59	165	6	164	2
-09	717	734	0.98	0.05182	0.00178	0.18265	0.00625	0.02556	0.00035	277	53	170	5	163	2
-10	190	176	1.08	0.04934	0.00289	0.18061	0.01048	0.02655	0.00042	164	103	169	9	169	3
-11	412	256	1.61	0.05048	0.00304	0.18432	0.01105	0.02648	0.00038	217	111	172	9	168	2
-12	325	295	1.10	0.04940	0.00202	0.17884	0.00724	0.02625	0.00037	167	68	167	6	167	2
-13	210	255	0.82	0.04934	0.00243	0.18166	0.00888	0.02670	0.00040	164	86	169	8	170	3
-14	422	446	0.95	0.04934	0.00176	0.17940	0.00636	0.02636	0.00037	164	57	168	5	168	2
-15	166	147	1.13	0.04944	0.00305	0.18166	0.01111	0.02665	0.00042	169	110	169	10	170	3
-16	321	338	0.95	0.04915	0.00211	0.17528	0.00748	0.02586	0.00037	155	73	164	6	165	2
-17	756	440	1.72	0.04941	0.00173	0.17913	0.00623	0.02629	0.00036	167	56	167	5	167	2
-18	261	281	0.93	0.04926	0.00232	0.17575	0.00818	0.02587	0.00039	160	80	164	7	165	2
-19	100	128	0.78	0.04907	0.00333	0.17438	0.01174	0.02577	0.00041	151	122	163	10	164	3
-20	458	327	1.40	0.05001	0.00218	0.18013	0.00776	0.02612	0.00037	195	74	168	7	166	2
-21	122	120	1.01	0.04945	0.00291	0.17806	0.01037	0.02611	0.00041	169	104	166	9	166	3
-22	322	410	0.78	0.04937	0.00194	0.17922	0.00696	0.02632	0.00037	165	64	167	6	167	2
-23	263	252	1.04	0.04927	0.00216	0.17834	0.00773	0.02625	0.00038	161	74	167	7	167	2
-24	224	248	0.90	0.04952	0.00252	0.18202	0.00919	0.02665	0.00039	173	90	170	8	170	2
-25	334	308	1.08	0.04956	0.00251	0.18049	0.00907	0.02641	0.00038	174	90	168	8	168	2
PM01-27-1 正长花岗岩															
-01	532	737	0.72	0.04907	0.00119	0.17437	0.00434	0.02577	0.00034	151	34	163	4	164	2
-02	868	967	0.90	0.04936	0.00113	0.17571	0.00412	0.02581	0.00033	165	32	164	4	164	2
-03	354	327	1.08	0.04935	0.00185	0.18214	0.00685	0.02676	0.00037	164	62	170	6	170	2
-04	1089	966	1.13	0.04930	0.00110	0.17934	0.00412	0.02638	0.00034	162	30	167	4	168	2
-05	323	453	0.71	0.04941	0.00153	0.17815	0.00556	0.02615	0.00035	167	48	166	5	166	2
-06	966	478	2.02	0.05257	0.00196	0.18695	0.00700	0.02579	0.00036	310	60	174	6	164	2
-07	55.5	52.8	1.05	0.04948	0.00695	0.18142	0.02531	0.02659	0.00056	171	260	169	22	169	4
-08	96.4	118	0.81	0.04938	0.00372	0.18120	0.01358	0.02661	0.00044	166	138	169	12	169	3
-09	211	264	0.80	0.04985	0.00250	0.18102	0.00906	0.02633	0.00037	188	90	169	8	168	2
-10	370	518	0.71	0.04922	0.00161	0.17560	0.00577	0.02587	0.00035	158	51	164	5	165	2
-11	163	209	0.78	0.04605	0.00270	0.16396	0.00940	0.02582	0.00033		128	154	8	164	2
-12	262	338	0.78	0.04917	0.00181	0.17821	0.00657	0.02628	0.00036	156	61	167	6	167	2
-13	486	508	0.96	0.04940	0.00153	0.17232	0.00537	0.02529	0.00034	167	48	161	5	161	2
-14	209	267	0.78	0.04934	0.00228	0.18076	0.00831	0.02657	0.00038	164	80	169	7	169	2
-15	384	381	1.01	0.04929	0.00200	0.17696	0.00719	0.02603	0.00036	162	69	165	6	166	2

续表 1

Continued Table 1

测点号	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma)		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (Ma)		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	Age	1σ	Age	1σ	Age	1σ
-6	1218	1030	1.18	0.04932	0.00130	0.17234	0.00459	0.02534	0.00034	163	38	161	4	161	2
-7	58.8	69.7	0.84	0.04930	0.00588	0.18149	0.02151	0.02670	0.00051	162	228	169	18	170	3
-8	845	676	1.25	0.04947	0.00186	0.17270	0.00651	0.02532	0.00035	170	62	162	6	161	2
-9	1227	718	1.71	0.04935	0.00133	0.17819	0.00483	0.02618	0.00035	164	39	167	4	167	2
-20	326	449	0.73	0.04928	0.00161	0.17937	0.00586	0.02639	0.00036	161	51	168	5	168	2
-21	301	380	0.79	0.04906	0.00178	0.17849	0.00644	0.02638	0.00037	151	58	167	6	168	2
-22	170	239	0.71	0.04935	0.00216	0.18141	0.00789	0.02665	0.00039	164	74	169	7	170	2
-23	208	225	0.92	0.04926	0.00203	0.18104	0.00742	0.02665	0.00039	160	68	169	6	170	2
-24	149	204	0.73	0.04605	0.00421	0.20559	0.01853	0.03238	0.0005	197	190	16	205	3	
-25	198	237	0.83	0.04933	0.00192	0.17944	0.00697	0.02638	0.00038	164	64	168	6	168	2

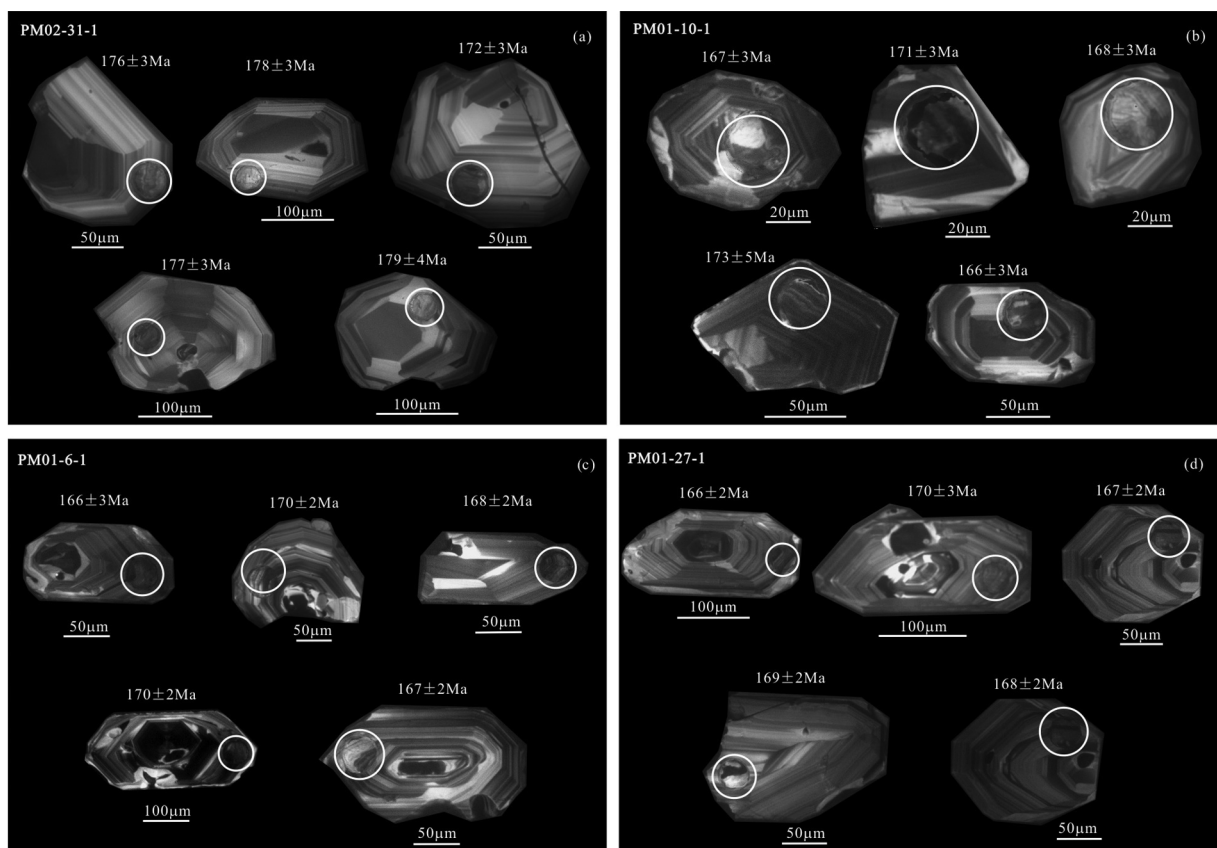


图3 中侏罗世花岗质岩石锆石 CL 照片

Fig. 3 CL images of zircons of the Middle Jurassic granitoids in Taerqi area

为 1σ 。

样品 PM02-31-1 ($47^{\circ}59'13''\text{N}, 121^{\circ}18'15''\text{E}$) 岩性为花岗闪长岩。23 个锆石颗粒分析结果显示, 所有测点均位于 U-Pb 谐和线上, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 167 ~ 196Ma 之间 (表 1), 加权平均年龄为 $173.0 \pm 1.3\text{Ma}$ (图 4a)。

样品 PM01-10-1 ($48^{\circ}00'18''\text{N}, 121^{\circ}16'03''\text{E}$) 岩性为二长

花岗岩。21 个锆石颗粒分析结果显示, 所有测点均位于 U-Pb 谐和线上, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 164 ~ 175Ma 之间 (表 1), 加权平均年龄为 $169.4 \pm 1.6\text{Ma}$ (图 4b)。

样品 PM01-6-1 ($48^{\circ}00'05''\text{N}, 121^{\circ}15'39''\text{E}$) 岩性为正长花岗岩。25 个锆石颗粒分析结果显示, 所有测点均位于 U-Pb 谐和线上, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 163 ~ 170Ma 之间 (表

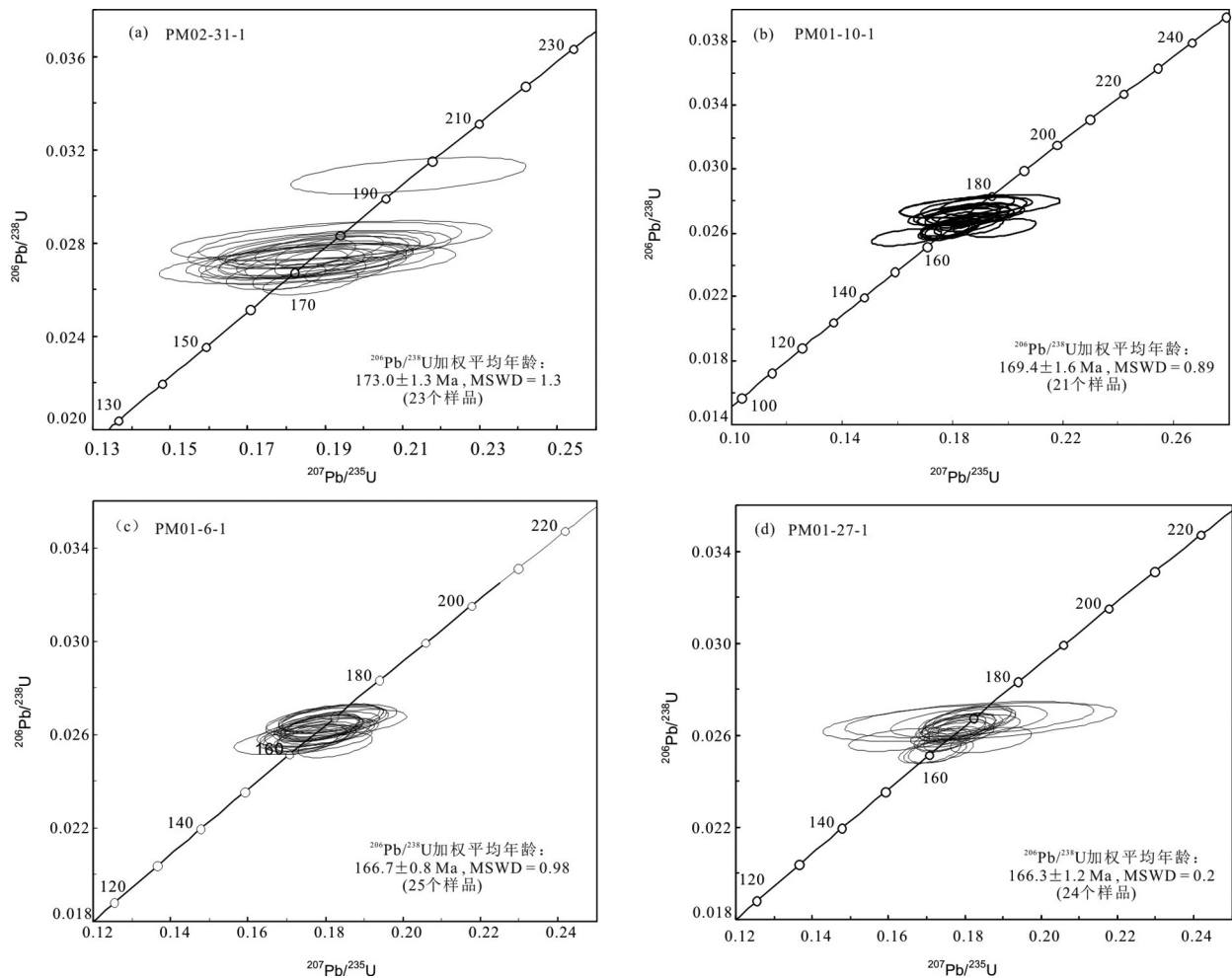


图4 塔尔气中侏罗世花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams of the Middle Jurassic granitoids in Taerqi area

1) 加权平均年龄为 $166.7 \pm 0.8 \text{ Ma}$ (图 4c)。

样品 PM01-27-1 ($48^{\circ}02'17''\text{N}$, $121^{\circ}21'20''\text{E}$) 岩性为正长花岗岩。24 个锆石颗粒分析结果显示,所有测点均位于 U-Pb 谐和线上,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 161 ~ 170 Ma 之间 (表 1) 加权平均年龄为 $166.3 \pm 1.2 \text{ Ma}$ (图 4d), 说明该岩体形成时代为中侏罗世。有 1 个锆石的表面年龄 205 Ma, 可能为岩浆上升过程中捕获的早期岩浆锆石。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

塔尔气杂岩体中中侏罗世花岗质岩石样品的主量元素分析结果见表 2。花岗质岩石样品的 SiO_2 含量较高, 介于 70.54% ~ 77.96% 之间; K_2O 含量介于 4.12% ~ 5.13% 之间; Na_2O 含量介于 3.73% ~ 4.97% 之间; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于 0.86 ~ 1.28 之间, 平均为 1.09; Al_2O_3 含量介于 11.67% ~ 14.83% 之间; TiO_2 含量介于 0.07% ~ 0.60% 之间; MgO 含量介于 0.02% ~ 0.74% 之间; CaO 含量介于 0.05% ~ 1.44% 之间。从铝饱和指数图解 (图 5a) 上可以看出, A/CNK 值在

0.9 ~ 1.1 之间, 为准铝质-弱过铝质; 在 SiO_2 - K_2O 图解 (图 5b) 中, 位于高钾钙碱性系列。

3.2.2 微量元素

塔尔气杂岩体中中侏罗世花岗质岩石样品的微量元素分析结果见表 2。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见图 6。

塔尔气杂岩体中中侏罗世花岗质岩石样品 (除 2 个样品 PM01-11 和 JB5177, $\sum \text{REE}$ 分别为 96.34×10^{-6} 和 81.69×10^{-6}) 的稀土元素总量较高, $\sum \text{REE}$ 介于 123.1×10^{-6} ~ 257.3×10^{-6} 之间, 平均值为 170.9×10^{-6} 。这些花岗质岩石样品具有轻稀土元素 (LREE) 相对富集, 重稀土元素 (HREE) 相对亏损的特征, 其中 LREE/HREE 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分别介于 5.08 ~ 13.8、3.36 ~ 12.85 之间, 而且铕异常较明显 (δEu 介于 0.04 ~ 0.60 之间, 平均为 0.40)。此外, 中侏罗世塔尔气杂岩体中花岗质岩石样品表现出相对富集 Rb、Th、U、Zr 等元素, 而亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、Ti 等元素的特征。

3.2.3 Hf 同位素

塔尔气杂岩体中中侏罗世花岗质岩石样品 (PM01-10-1)

表2 塔尔气地区中侏罗世花岗岩主量元素(wt%)及微量元素($\times 10^{-6}$)测试结果Table 2 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements data of the Middle Jurassic granitoids in Taerqi area

样品号	PM02-31-1	PM01-10-1	PM01-25	PM01-4-1	PM02-36	PM02-45	LB6025	LB6051
岩性	花岗闪长岩				二长花岗岩			
SiO ₂	73.74	75.37	71.6	75.37	72.6	73.81	70.54	75.29
Al ₂ O ₃	13.73	13.27	14.83	13.18	14.3	13.56	14.13	13.3
TiO ₂	0.28	0.15	0.31	0.21	0.29	0.31	0.60	0.21
Fe ₂ O ₃	1.20	0.89	1.35	0.91	1.26	1.29	1.89	0.93
FeO	0.43	0.19	0.60	0.31	0.55	0.50	1.08	0.38
MnO	0.05	0.05	0.06	0.03	0.07	0.06	0.09	0.05
MgO	0.27	0.08	0.46	0.21	0.47	0.43	0.74	0.24
CaO	0.39	0.11	0.63	0.36	0.45	0.72	1.44	0.64
Na ₂ O	4.06	4.55	4.97	3.99	4.55	4.20	4.41	3.78
K ₂ O	5.13	4.82	4.27	4.66	4.55	4.30	4.12	4.44
P ₂ O ₅	0.07	0.02	0.09	0.06	0.10	0.08	0.16	0.04
LOI	0.55	0.44	0.75	0.65	0.71	0.65	0.69	0.65
Total	99.89	99.94	99.92	99.94	99.9	99.9	99.9	99.96
La	36.7	42.7	38.2	29.9	50.7	36.1	52.0	41.6
Ce	81.4	83.0	79.1	48.83	78.7	73.3	106	69.6
Pr	7.96	9.02	6.90	6.03	8.49	8.21	12.8	8.26
Nd	27.9	30.3	21.3	20.00	26.9	27.6	47.2	26.4
Sm	5.48	5.71	3.71	3.70	4.71	4.95	9.19	4.21
Eu	0.79	0.55	0.67	0.57	0.76	0.75	1.38	0.55
Gd	4.38	4.90	2.97	3.09	3.89	3.95	7.91	3.85
Tb	0.73	0.82	0.46	0.52	0.59	0.66	1.33	0.56
Dy	4.48	5.15	2.71	3.55	3.53	4.12	7.73	3.16
Ho	0.88	1.04	0.53	0.72	0.72	0.82	1.56	0.65
Er	2.44	2.83	1.45	2.16	2.01	2.31	4.23	1.83
Tm	0.46	0.55	0.29	0.43	0.38	0.42	0.70	0.34
Yb	3.03	3.75	2.15	3.18	2.66	2.85	4.42	2.25
Lu	0.44	0.52	0.30	0.47	0.37	0.37	0.78	0.44
ΣREE	177.0	190.9	160.7	123.1	184.4	166.4	257.3	163.7
δEu	0.47	0.31	0.60	0.50	0.53	0.50	0.48	0.41
LREE/HREE	9.52	8.76	13.8	7.73	12.0	9.73	7.98	11.5
(La/Yb) _N	3.90	4.00	3.90	2.1	2.90	2.80	7.58	2.72
V	19.1	7.30	21.9	13.7	22.1	24.2	38.9	19.9
Cr	15.1	15.4	13.9	13.0	13.0	14.1	4.60	4.80
Co	1.24	0.36	2.24	1.08	1.78	1.87	3.29	1.48
Ni	9.03	9.25	9.81	9.59	8.95	9.51	1.30	1.80
Ga	19.8	22.7	20.9	18.4	19.6	18.8	22.6	17.7
Rb	193	176	177	175	177	151	141	157
Sr	91.1	14.5	186	71.3	156	190	210	130
Y	21.0	25.4	10.9	17.40	17.7	20.9	42.7	18.9
Zr	234	208	173	161.7	156	183	293	103
Nb	18.2	21.0	18.8	18.60	19.1	22.1	30.3	16.2
Ba	513	49.1	540	257.5	436	512	501	369
Hf	13.9	12.2	11.4	9.38	9.77	10.6	12.5	4.39
Ta	1.28	1.26	1.33	1.45	1.46	1.76	2.15	1.65
Th	26.2	24.5	28.3	19.79	17.8	22.5	28.4	26.4
U	4.28	2.94	3.34	2.65	4.53	2.94	5.19	5.03
Pb	17.1	18.9	20.4	16.9	16.5	15.9	38.8	16.4

续表 2

Continued Table 2

样品号	PM01-7	PM01-27	PM01-41	PM01-23	JB5177	JB5176	JB8073	JB8064	LB1098
岩性	正长花岗岩								
SiO ₂	74.37	72.81	75.57	74.94	77.77	77.96	77.48	77.87	77.95
Al ₂ O ₃	13.53	13.86	12.8	13.0	11.9	11.67	11.98	11.75	11.71
TiO ₂	0.24	0.34	0.21	0.28	0.15	0.17	0.16	0.16	0.07
Fe ₂ O ₃	1.40	1.24	0.88	1.06	1.12	0.78	0.74	0.84	1.26
FeO	0.20	0.79	0.55	0.62	0.05	0.38	0.31	0.26	0.14
MnO	0.05	0.08	0.04	0.06	0.03	0.05	0.09	0.08	0.02
MgO	0.21	0.49	0.24	0.37	0.02	0.09	0.09	0.08	0.04
CaO	0.45	1.09	0.53	0.94	0.05	0.07	0.11	0.12	0.07
Na ₂ O	4.28	4.28	4.02	3.99	3.85	3.82	3.73	3.99	4.00
K ₂ O	4.48	4.39	4.66	4.12	4.63	4.59	4.75	4.56	4.32
P ₂ O ₅	0.06	0.10	0.05	0.07	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
LOI	0.63	0.45	0.39	0.48	0.41	0.36	0.47	0.22	0.39
Total	99.9	99.91	99.94	99.93	99.99	99.96	99.94	99.95	99.97
La	42.3	50.1	17.4	38.2	19.0	33.6	35.3	33.5	28.3
Ce	110	76.7	36.8	67.9	41.7	64.2	70.9	62.5	83.4
Pr	8.27	8.51	4.88	7.74	2.82	5.41	5.8	5.37	7.42
Nd	26.5	27.4	17.2	25.5	7.8	15.2	16.1	14.9	26.4
Sm	4.67	4.59	3.69	4.36	1.08	2.22	2.39	2.26	6.22
Eu	0.60	0.83	0.55	0.72	0.09	0.15	0.20	0.15	0.08
Gd	4.11	3.88	3.14	3.67	1.41	2.53	2.89	2.62	5.66
Tb	0.63	0.61	0.62	0.57	0.23	0.35	0.44	0.40	1.11
Dy	4.17	3.72	4.24	3.58	1.77	2.31	3.22	2.73	7.54
Ho	0.86	0.73	0.87	0.71	0.48	0.58	0.82	0.68	1.61
Er	2.53	2.07	2.54	2.04	1.68	1.94	2.77	2.26	4.61
Tm	0.52	0.40	0.49	0.40	0.37	0.43	0.60	0.48	0.82
Yb	3.71	2.80	3.49	2.90	2.74	3.14	4.43	3.52	5.12
Lu	0.50	0.36	0.46	0.40	0.59	0.68	0.93	0.80	0.91
ΣREE	209.3	182.8	96.34	158.7	81.69	132.7	146.8	132.2	179.2
δEu	0.41	0.59	0.48	0.54	0.23	0.19	0.23	0.19	0.04
LREE/HREE	11.3	11.6	5.08	10.1	7.81	10.1	8.12	8.80	5.55
(La/Yb) _N	2.40	4.30	4.00	3.50	3.66	3.57	4.02	3.34	1.34
V	14.2	25.8	7.30	22.2	13.6	11.4	13.6	12.9	10.4
Cr	13.4	14.4	15.4	14.9	4.70	4.40	4.90	4.20	4.20
Co	1.07	2.38	0.36	1.78	1.40	0.38	0.40	0.21	0.46
Ni	8.91	9.16	9.25	9.49	1.30	0.80	1.40	0.80	0.90
Ga	20.1	19.3	22.7	20.0	21.4	21.2	24.1	21.0	26.8
Rb	182	165	176	165	229	215	243	225	245
Sr	72.4	179	14.5	158	8.90	6.40	9.90	7.80	8.40
Y	20.2	18.7	25.4	19.1	15.9	16.7	25.5	20.4	40.5
Zr	182	187	208	159	203	220	226	242	278
Nb	14.0	24.1	21.0	26.0	35.3	40.5	41.2	40.4	55.6
Ba	261	469	49.1	410	23.1	22.4	89.6	27.8	17.8
Hf	9.57	12.0	12.2	10.5	8.18	9.00	9.05	11.0	10.7
Ta	1.08	1.65	1.26	2.00	2.43	3.00	2.99	3.00	5.55
Th	32.5	31.2	24.5	32.4	50.1	28.5	42.8	44.7	40.7
U	2.80	3.80	2.94	4.13	4.47	5.40	13.0	9.20	5.92
Pb	14.6	18.0	18.9	17.4	20.2	17.5	41.5	23.4	13.4

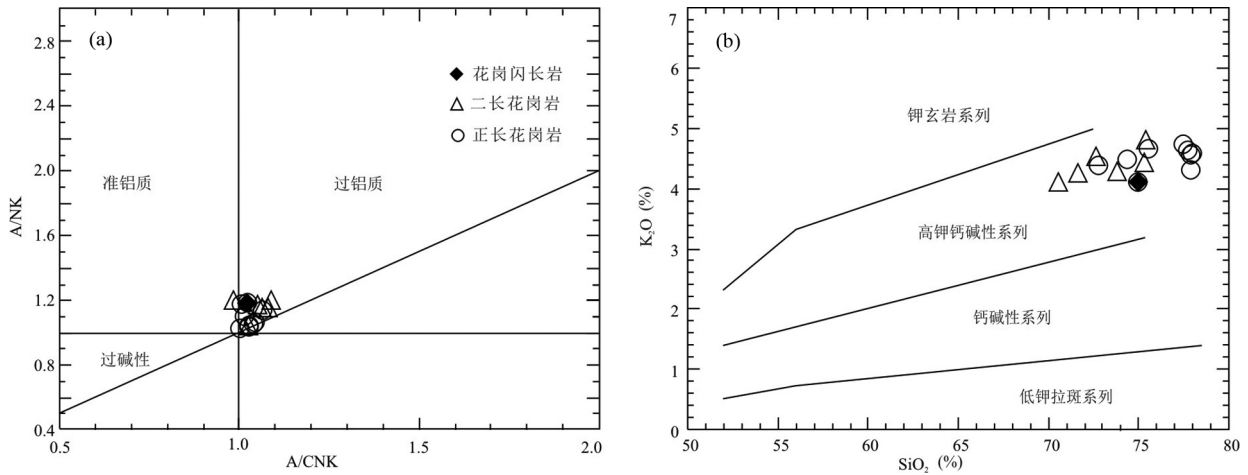


图5 塔尔气中侏罗世花岗质岩石的 A/CNK-A/NK (a) 和 SiO₂-K₂O (b) 图解

后图图例同此图

Fig.5 Aluminous Saturation Index (a) and SiO₂ vs. K₂O (b) diagrams of the Middle Jurassic granitoids in Taerqi area

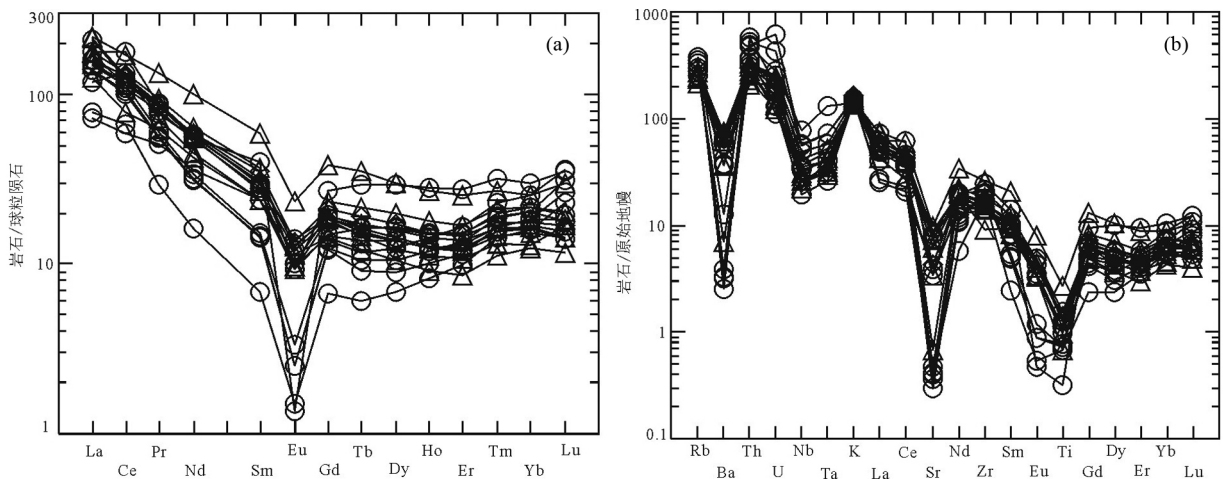


图6 塔尔气中侏罗世花岗质岩石的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a 标准化值据 Boynton, 1984) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) of the Middle Jurassic granitoids in Taerqi area

的锆石进行了 25 个测点分析(表 3),其中 1 个测点的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值明显偏高(0.283074), $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +14.0$, 两阶段模式年龄较低(269Ma)。其余 24 个测点的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 介于 0.282874 ~ 0.282985(图 7a), 加权平均值为 0.282918 ± 0.00001 (n = 24), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 +7.01 ~ +10.9, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +8.84 \pm 0.37$, 两阶段模式年龄为 516 ~ 768Ma。

4 讨论

4.1 塔尔气杂岩体的侵位时代

前人曾根据塔尔气杂岩体的 K-Ar 年龄(234 ~ 289Ma; 黑龙江省地质局, 1981), 将塔尔气杂岩体的侵位时代限定为

海西期。但是 K-Ar 体系具有相对较低的封闭温度, 且研究区后期经历了多期次构造岩浆热事件的改造作用, 导致获得的 K-Ar 年龄可能并不能准确反映岩浆的结晶时代。目前, 由于锆石富含 Th、U 而贫普通 Pb, 且锆石 U-Pb 体系具有高封闭温度, 因此锆石原位 U-Pb 同位素分析已在确定岩浆岩结晶年龄方面得到了广泛应用。其中, 塔尔气杂岩体中锆石普遍具有典型的岩浆震荡生长环带, 并具有较高的 Th/U 比值(0.35 ~ 2.02), 表明这些锆石为典型的岩浆成因锆石, 因此锆石 U-Pb 测年结果可以代表岩体的形成时代。

结合前人相关年代学研究结果, 认为塔尔气杂岩体为复式岩体, 是三期花岗质岩浆作用叠加的产物(早石炭世、中侏罗世和早白垩世)。其中, 第一期早石炭世岩浆作用的产物

表3 二长花岗岩(样品 PM01-10-1) 锆石 Lu-Hf 同位素测试结果

Table 3 Zircon Lu-Hf isotope analysis of the monzogranite (Sample PM01-10-1)

测点号	Age(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	2σ	t _{DM1} (Ma)	t _{DM2} (Ma)	f _{Lu/Hf}
01		0.068106	0.002445	0.282886	0.000030	4.05	7.5	1.1	539	737	-0.93
02		0.053525	0.002262	0.282904	0.000026	4.67	8.1	0.9	511	696	-0.93
03		0.058393	0.002380	0.282879	0.000030	3.77	7.2	1.1	550	754	-0.93
04		0.042283	0.001730	0.282935	0.000029	5.78	9.3	1.0	458	621	-0.95
05		0.050832	0.001975	0.282982	0.000028	7.43	10.9	1.0	393	516	-0.94
06		0.071242	0.002701	0.282943	0.000019	6.03	9.5	0.7	460	612	-0.92
07		0.081297	0.002987	0.282905	0.000028	4.69	8.1	1.0	521	700	-0.91
08		0.073746	0.002690	0.282985	0.000026	7.52	10.9	0.9	397	516	-0.92
09		0.063995	0.002385	0.282905	0.000027	4.69	8.2	0.9	512	695	-0.93
10		0.039192	0.001583	0.282899	0.000023	4.48	8.0	0.8	509	703	-0.95
11		0.061954	0.002384	0.282976	0.000034	7.21	10.7	1.2	406	533	-0.93
12		0.044534	0.001754	0.282881	0.000028	3.85	7.4	1.0	537	744	-0.95
13	170	0.077691	0.002885	0.282874	0.000026	3.61	7.0	0.9	564	768	-0.91
14		0.091072	0.003296	0.283074	0.000023	10.66	14.0	0.8	269	318	-0.90
15		0.084181	0.003180	0.282897	0.000027	4.42	7.8	1.0	535	718	-0.90
16		0.066457	0.002652	0.282900	0.000023	4.51	7.9	0.8	523	708	-0.92
17		0.059222	0.002212	0.282878	0.000029	3.74	7.2	1.0	549	755	-0.93
18		0.066686	0.002640	0.282965	0.000023	6.83	10.3	0.8	425	560	-0.92
19		0.108031	0.004694	0.282913	0.000025	4.97	8.2	0.9	534	694	-0.86
20		0.061091	0.002271	0.282877	0.000022	3.71	7.2	0.8	551	757	-0.93
21		0.120188	0.004236	0.282968	0.000030	6.94	10.2	1.1	440	564	-0.87
22		0.045593	0.001859	0.282949	0.000023	6.26	9.8	0.8	440	591	-0.94
23		0.028236	0.001142	0.282882	0.000021	3.89	7.5	0.8	527	737	-0.97
24		0.056918	0.002187	0.282887	0.000022	4.07	7.6	0.8	535	733	-0.93
25		0.039292	0.001605	0.282973	0.000022	7.10	10.6	0.8	403	535	-0.95

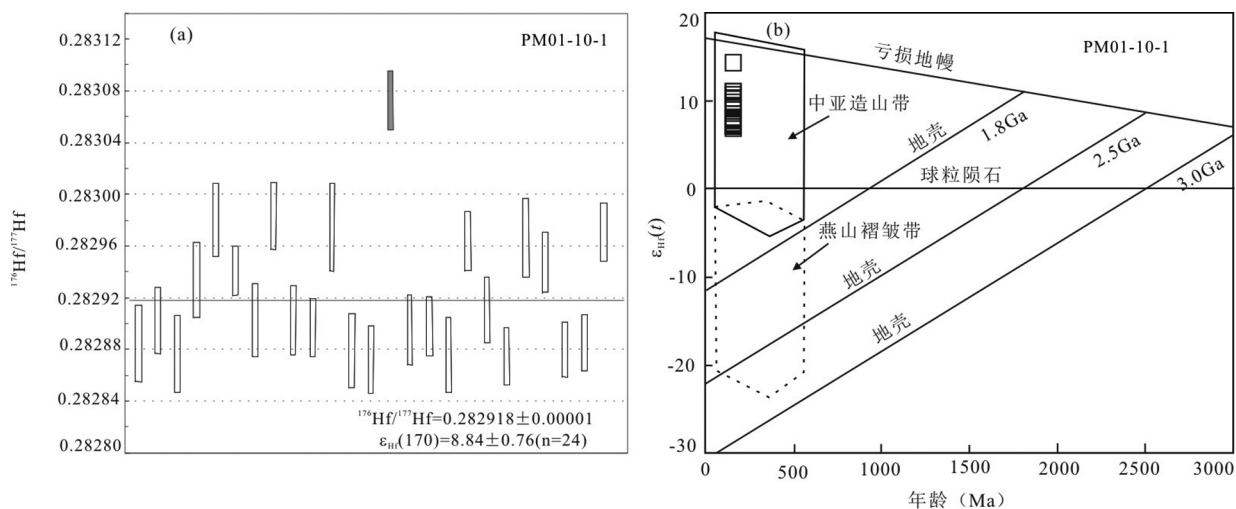


图7 中侏罗世二长花岗岩 Hf 同位素特征(a) 和 ε_{Hf}(t) -年龄(Ma) 图解(b, 底图据 Yang *et al.* ,2006)

Fig.7 Characteristics of Hf isotope (a) and ε_{Hf}(t) vs. Age (Ma) diagram (b ,base map after Yang *et al.* ,2006) for the Middle Jurassic monzogranite

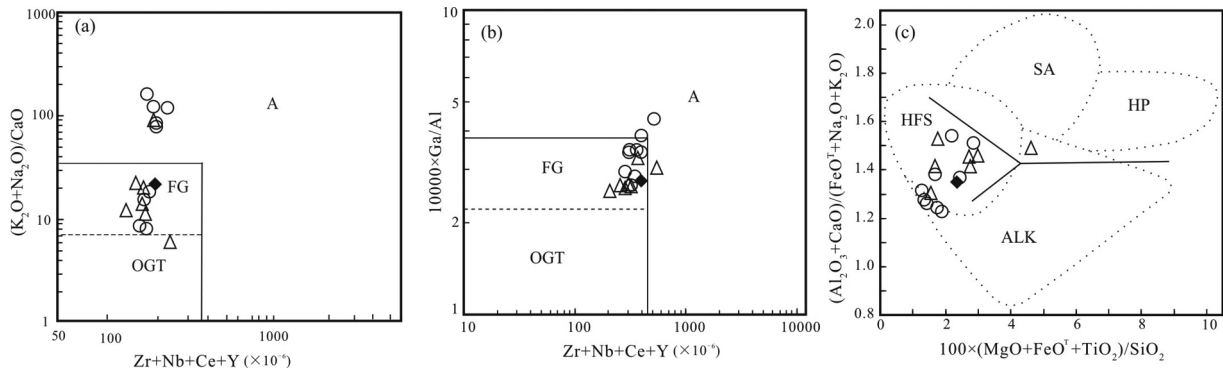


图8 塔尔气中侏罗世花岗质岩石的 $(Zr + Nb + Ce + Y) - (K_2O + Na_2O) / CaO$ (a)、 $(Zr + Nb + Ce + Y) - 10000 \times Ga / Al$ (b) 及 $100 \times (MgO + FeO^T + TiO_2) / SiO_2 - (Al_2O_3 + CaO) / (FeO^T + Na_2O + K_2O)$ (c) 判别图解(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 8 $Zr + Nb + Ce + Y$ vs. $(K_2O + Na_2O) / CaO$ (a), $Zr + Nb + Ce + Y$ vs. $10000 \times Ga / Al$ (b) and $100 \times (MgO + FeO^T + TiO_2) / SiO_2$ vs. $(Al_2O_3 + CaO) / (FeO^T + Na_2O + K_2O)$ (c) discrimination diagrams of the Middle Jurassic granitoids in Taerqi area (after Whalen *et al.*, 1987)

主要为角闪石英闪长岩、角闪花岗闪长岩(333.4 ± 2Ma; Yun *et al.*, 2015)。该期岩浆作用时代与张健等(2011)报道的塔尔气、狼峰附近花岗质岩石的结晶时代相似(335 ~ 320Ma)。经野外地质踏勘发现研究区早石炭世侵入岩的出露面积较小,主要呈岩株状产出,并与侏罗纪中粗粒正长花岗岩具有侵入接触关系。第二期中侏罗世岩浆作用的范围相对广泛,其产物是塔尔气杂岩体的主体部分,且可划分为三个阶段:第一阶段岩浆作用产物为花岗闪长岩(锆石 U-Pb 年龄为 173.0 ± 1.3Ma),第二阶段岩浆作用产物为二长花岗岩(锆石 U-Pb 年龄为 169.4 ± 1.6Ma),第三阶段岩浆作用产物正长花岗岩(锆石 U-Pb 年龄分别为 166.7 ± 0.8Ma 和 166.3 ± 1.2Ma)。其中,第一阶段岩浆作用的产物花岗闪长岩被正长花岗岩所侵入,暗示这些花岗闪长岩为该期花岗质岩浆作用的早期产物。虽然野外未直接观察到二长花岗岩与正长花岗岩的侵入接触关系,但依据锆石 U-Pb 年龄结果,暗示二长花岗岩的形成可能略早于正长花岗岩。综合上述花岗质岩石形成时代的先后关系,发现其与地球化学特征表现出的岩浆分离结晶程度逐渐升高的特点相一致(花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩)。第三期早白垩世岩浆作用的产物主要为花岗斑岩(锆石 U-Pb 年龄为 136.5 ± 1.3Ma; 陈飞等, 2016),且经野外踏勘发现其呈小岩珠或岩脉形式切穿中侏罗世二长花岗岩和正长花岗岩。此外,中生代花岗质岩石广泛发育于大兴安岭地区,这对理解东北地区岩浆-构造演化历史具有重要意义。

4.2 中侏罗世花岗质岩石的岩石成因

中侏罗世花岗质岩石构成了塔尔气杂岩体的主体部分,主要岩石类型为二长花岗岩、正长花岗岩以及少量花岗闪长岩,矿物组成主要为石英、钾长石和斜长石,含少量黑云母,未见堇青石、石榴子石等富铝矿物,副矿物组合为磁铁矿-榧

石-锆石。这些中侏罗世花岗质岩石具有偏铝质-弱过铝质的地球化学特征(大多数样品的 $A / CNK < 1.1$, 且 $A / NK > 1.0$) 且 Al_2O_3 和 P_2O_5 含量与 SiO_2 含量变化具有负相关性。综合样品的岩石学与地球化学特征,认为研究区发育的中侏罗世花岗质岩石并非 S 型花岗岩(Chappell and White, 1992),可能为 I 型或 A 型花岗岩。同时,这些中侏罗世花岗质岩石样品的 $10000Ga / Al$ 值(平均值 2.34)明显低于典型 A 型花岗岩(2.74)(Wu *et al.*, 2007),且样品的平均锆石饱和温度为 813.18°C(低于典型 A 型花岗岩 850°C),因此塔尔气杂岩体中中侏罗世花岗质岩石可能具有 I 型花岗岩特征。此外,在 $(Zr + Nb + Ce + Y) - (K_2O + Na_2O) / CaO$ 、 $(Zr + Nb + Ce + Y) - 10000 \times Ga / Al$ 及 $100 \times (MgO + FeO^T + TiO_2) / SiO_2 - (Al_2O_3 + CaO) / (FeO^T + Na_2O + K_2O)$ 判别图解中(图 8) 塔尔气杂岩体中中侏罗世花岗质岩石表现出高分异 I 型花岗岩特征。

塔尔气杂岩体中中侏罗世二长花岗岩样品的锆石 $^{176}Hf / ^{177}Hf$ 变化于 0.282874 ~ 0.282985, $\epsilon_{Hf}(t)$ 介于 +7.01 ~ +10.9, 两阶段模式年龄为 516 ~ 768Ma。在 $\epsilon_{Hf}(t) - t$ 图解上,大多数锆石样品落入兴蒙造山带东段显生宙火成岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值范围内(图 7b),暗示中侏罗世花岗质岩石的源区主要为新元古代-显生宙期间新增生的陆壳物质。通过总结包括研究区在内整个兴安地块晚古生代-中生代花岗岩的锆石 Hf 同位素资料,我们发现兴安地块晚古生代-中生代花岗岩普遍具有正 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和新元古代-显生宙的两阶段模式年龄(表 4),暗示兴安地块普遍存在新元古代-显生宙地壳增生事件。此外,塔尔气杂岩体中中侏罗世花岗质岩石样品普遍富硅、富碱、贫铁、贫镁以及贫钙,并亏损 Ba、Sr 和 Eu 等元素,暗示其母岩经历了相对明显的分离结晶作用。首先,根据分离结晶模拟矢量图(图 9)中的变化趋势,认为 Sr、Eu、Ba 表现出的负异常可能与斜长石和钾长石的分离结晶作用有

表4 兴安地块花岗质岩石的锆石 Hf 同位素组成特征

Table 4 Zircon Hf Isotopic compositions of the granitoids in Xing'an Block

序号	样品号	岩性	年龄 (Ma)	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	参考文献
1	WE14-1	花岗闪长岩	331 ± 4	+12.78 ~ +14.54	443 ~ 603	赵芝等(2010)
2	GW07005	花岗闪长岩	319 ± 3	+7.8 ~ +12.10	627 ~ 954	张彦龙等(2010)
3	GW07007	二长花岗岩	316 ± 4	+5.85 ~ +9.05	753 ~ 958	张彦龙等(2010)
4	GW07009	二长花岗岩	315 ± 4	+7.17 ~ +10.28	675 ~ 865	张彦龙等(2010)
5	13GW443	碱长花岗岩	315 ± 3	+10.1 ~ +15.1	364 ~ 682	田德欣(2015)
6	13GW460	碱长花岗岩	310 ± 2	+7.8 ~ +12.9	502 ~ 823	田德欣(2015)
7	14GW179	二长花岗岩	309 ± 2	+6.34 ~ +12.72	484 ~ 841	Dong <i>et al.</i> (2016a)
8	04GW023	正长花岗岩	308 ± 3	+6.53 ~ +12.06	648 ~ 1149	Dong <i>et al.</i> (2016a)
9	04GW025	二长花岗岩	308 ± 3	+8.56 ~ +11.81	677 ~ 972	Dong <i>et al.</i> (2016a)
10	13GW436	碱长花岗岩	307 ± 2	+8.8 ~ +13.8	440 ~ 696	田德欣(2015)
11	13GW450	碱长花岗岩	306 ± 2	+7.6 ~ +13.5	458 ~ 835	田德欣(2015)
12	GW05157	碱长花岗岩	298 ± 2	+7.11 ~ +11.01	611 ~ 861	隋振民等(2009)
13	13GW348	正长花岗岩	244 ± 3	+8.3 ~ +12.1	502 ~ 747	Yang <i>et al.</i> (2016)
14	PM008-4-1	二长花岗岩	243 ± 3	+7.45 ~ +10.91	713 ~ 1026	刘希雯等(2015)
15	PM013-1-3	二长花岗岩	240 ± 3	+6.55 ~ +12.19	595 ~ 1107	刘希雯等(2015)
16	G02017-2	碱长花岗岩	236 ± 2	+9.69 ~ +12.27	493 ~ 631	周漪等(2011)
17	13GW234	正长花岗岩	230 ± 2	+4.4 ~ +8.9	691 ~ 986	Yang <i>et al.</i> (2016)
18	G02017-1	碱长花岗岩	229 ± 3	+6.62 ~ +14.75	318 ~ 748	周漪等(2011)
19	13GW237	正长花岗岩	226 ± 3	+5.4 ~ +11.2	548 ~ 911	Yang <i>et al.</i> (2016)
20	13GW222	正长花岗岩	225 ± 2	+6.1 ~ +11.3	534 ~ 867	Yang <i>et al.</i> (2016)
21	13GW228	二长花岗岩	214 ± 3	+5.1 ~ +12.9	429 ~ 923	Yang <i>et al.</i> (2016)
22	13GW210	二长花岗岩	212 ± 2	+5.7 ~ +11.6	511 ~ 882	Yang <i>et al.</i> (2016)
23	13GW255	二长花岗岩	206 ± 2	+7.1 ~ +11.5	507 ~ 785	Yang <i>et al.</i> (2016)
24	GW07017	二长花岗岩	187 ± 6	+5.73 ~ +9.42	473 ~ 642	张彦龙等(2010)
25	HSW6-12	正长花岗岩	185 ± 2	+7.7 ~ +12.3	624 ~ 1012	徐美君等(2013)
26	HSW6-4	正长花岗岩	183 ± 2	+6.3 ~ +12.8	530 ~ 1092	徐美君等(2013)
27	G0211-2	黑云母花岗岩	182 ± 3	+9.27 ~ +13.05	384 ~ 470	周漪等(2011)
28	13GW280	二长花岗岩	180 ± 1	+5.9 ~ +11.9	461 ~ 850	Dong <i>et al.</i> (2016b)
29	13GW276	花岗闪长岩	177 ± 2	+4.0 ~ +10.3	516 ~ 865	Dong <i>et al.</i> (2016b)
30	G02013-4	花岗闪长岩	174 ± 4	+9.37 ~ +12.74	405 ~ 621	周漪等(2011)
31	GW07019	二长花岗岩	171 ± 4	+4.46 ~ +13.08	573 ~ 931	张彦龙等(2010)
32	13GW289	正长花岗岩	171 ± 2	+5.8 ~ +10.6	541 ~ 847	Dong <i>et al.</i> (2016b)
33	13GW297	碱长花岗岩	170 ± 2	+7.9 ~ +11.8	547 ~ 726	Dong <i>et al.</i> (2016b)
34	GW07012	二长花岗岩	169 ± 3	+5.59 ~ +11.03	511 ~ 859	张彦龙等(2010)
35	13GW272	二长花岗岩	151 ± 1	+1.8 ~ +7.8	705 ~ 1091	Dong <i>et al.</i> (2016b)
36	13GW349	正长花岗岩	143 ± 1	+4.9 ~ +9.3	598 ~ 882	纪政等(2016)
37	13GW375	正长花岗岩	141 ± 2	+2.1 ~ +8.1	676 ~ 1062	纪政等(2016)
38	G0208-1	花岗闪长岩	136 ± 3	+6.47 ~ +9.40	586 ~ 775	周漪等(2011)
39	G0208-3	花岗闪长岩	134 ± 2	+6.14 ~ +10.22	535 ~ 796	周漪等(2011)
40	12GW104	碱长花岗岩	134 ± 1	+7.02 ~ +10.94	638 ~ 998	田德欣(2015)
41	12GW106	碱长花岗岩	~ 130	+6.42 ~ +14.42	316 ~ 1044	田德欣(2015)
42	G0206-2	花岗斑岩	128 ± 3	+5.82 ~ +8.95	683 ~ 814	周漪等(2011)
43	G0215-4	碱长花岗岩	125 ± 2	+7.76 ~ +10.69	497 ~ 685	周漪等(2011)

表5 大兴安岭及邻区早中侏罗世花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄

Table 5 Zircon U-Pb ages of the Early-Middle Jurassic granitoids in the Great Xing'an Range and its adjacent region

地块	地区	样品号	岩石类型	年龄(Ma)	坐标位置	参考文献
额尔古纳 地块	盘古	GW03138	二长花岗岩	182 ± 1	51°38'27"N, 123°41'09"E	Wu <i>et al.</i> (2011)
	满归	GW03269	正长花岗岩	189 ± 2	52°07'32"N, 122°03'54"E	Wu <i>et al.</i> (2011)
	莫尔道嘎	GW04114	二长花岗岩	198 ± 2	51°19'54"N, 120°39'56"E	Wu <i>et al.</i> (2011)
	满洲里南	M141-1	二长花岗岩	179 ± 1	49°25'13"N, 111°17'48"E	王天豪等(2014)
	满洲里南	M114-2	花岗斑岩	179 ± 1	49°25'13"N, 111°17'48"E	王天豪等(2014)
	乌奴格吐山铜矿	WS-10	花岗岩	180 ± 0.9	49°25'40.9"N, 117°17'39.1"E	余宏全等(2012)
	乌奴格吐山铜矿	WS-12	花岗斑岩	180 ± 0.5	49°25'41.6"N, 117°17'48"E	余宏全等(2012)
	乌奴格吐山铜矿	WLS-12	花岗斑岩	196 ± 4.1	49°25'30.3"N, 117°17'12.3"E	余宏全等(2012)
	乌奴格吐山铜矿	WLS-15	黑云母花岗岩	197 ± 2.7	49°24'20.9"N, 117°19'10.2"E	余宏全等(2012)
	查干陶勒盖山	MZ23-1	二长花岗岩	171 ± 2	49°28'15.5"N, 117°60'42.7"E	王伟等(2012)
乌奴格吐山	MZ18-2	正长花岗岩	180 ± 2	49°24'26.8"N, 117°19'13.4"E	王伟等(2012)	
兴安地块	塔河东南正棋村	GW05067	花岗闪长岩,	190 ± 1	52°31'50.3"N, 126°08'24.9"E	隋振民等(2007)
	韩家园子	GW05099	石英闪长岩	188 ± 1	52°02'42.8"N, 125°38'39.9"E	隋振民等(2007)
	兴华一翻身屯	CW05085	二长花岗岩	178 ± 1	52°00'22.2"N, 126°12'46"E	隋振民等(2007)
	鸡尾甸子	GW05112	二长花岗岩	181 ± 1	51°52'45.3"N, 125°47'40.2"E	隋振民等(2007)
	黑花山	GW05129	花岗闪长岩,	171 ± 2	50°53'40.8"N, 127°04'59.5"E	隋振民等(2007)
	新开岭东	2002XKL-2	花岗闪长岩	164 ± 4	50°13'29"N, 126°54'29"E	苗来成等(2003)
	新开岭西	2002XKL-7	二长花岗岩	167 ± 4	50°15'25"N, 126°47'45"E	苗来成等(2003)
	乌兰浩特景阳	G0213-4	花岗闪长岩	174 ± 4	46°34'54"N, 121°17'47.5"E	葛文春等(2005b)
	大石寨	G0211-4	黑云母花岗岩	182 ± 3	44°13'33.8"N, 121°28'55.4"E	葛文春等(2005b)
	三矿沟铜矿东	GW04512	花岗闪长岩	177 ± 3	50°23'01.9"N, 125°39'09.0"E	葛文春等(2007)
	三矿沟铜矿东	GW04516	花岗闪长岩	176 ± 3	50°22'50.4"N, 125°43'50.4"E	葛文春等(2007)
	查巴奇七一沟	GW280	二长花岗岩	180 ± 1	48°38'00.0"N, 123°13'36.7"E	Dong <i>et al.</i> (2018)
	岔路口东新生村	GW276	花岗闪长岩	177 ± 2	48°37'47.4"N, 123°11'01.6"E	Dong <i>et al.</i> (2018)
	鄂伦春北石井	GW289	正长花岗岩	171 ± 2	48°40'09.0"N, 123°22'10.0"E	Dong <i>et al.</i> (2018)
	鄂伦春北石井	GW297	碱长花岗岩	170 ± 2	48°40'15.5"N, 123°21'12.0"E	Dong <i>et al.</i> (2018)
	锦河农场	TC53	花岗闪长岩	171 ± 21		赵海滨等(2007)
	卧都河大桥西	JGD-03	花岗岩	171 ± 0.8	50°32.157"N, 125°47.271"E	余宏全等(2012)
梨子山铁矿	LZS-01	花岗闪长岩	161 ± 2.5	48.36463°N, 120.8330°E	余宏全等(2012)	
三矿沟	SKG-61	黑云母花岗岩	177 ± 0.35	50°21.500°N, 125°43.228°E	余宏全等(2012)	
铜山	TS-04	花岗闪长岩	167 ± 0.7	50°14'53.4"N, 125°47'34.5"E	余宏全等(2012)	
松嫩地块	龙镇区朝阳农场	GW07012	二长花岗岩	169 ± 3	48°50'47.5"N, 126°31'4.3"E	张彦龙等(2010)
	龙镇区朝阳农场	GW07019	二长花岗岩	171 ± 4	49°01'48.3"N, 126°22'23.3"E	张彦龙等(2010)
	松南121井	SN121	二长花岗岩	165 ± 2	43°47'19"N, 124°35'58"E	高福红等(2007)
	松南122井	SN122	二长花岗岩	165 ± 1	43°48'18"N, 124°37'08"E	高福红等(2007)
	松南72井	SN72	钾长花岗岩	161 ± 4	43°48'18"N, 124°37'08"E	高福红等(2007)
	伊舒地埝昌11	CH11	二长花岗岩	162 ± 2		许文良等(2008)
	孙吴县辰清镇	076-1	二长花岗岩	187 ± 2	48°44'3.12"N, 127°13'54.6"E	苟军等(2013)
	孙吴县辰清镇	078-1	碱长花岗岩	184 ± 2	48°43'6.96"N, 127°17'44.5"E	苟军等(2013)
	鹿鸣矿区	LMN-01	二长花岗岩	176 ± 2.2		杨言辰等(2012)
	霍吉河矿区	HJHN1-01	二长花岗岩	186 ± 1.7		杨言辰等(2012)

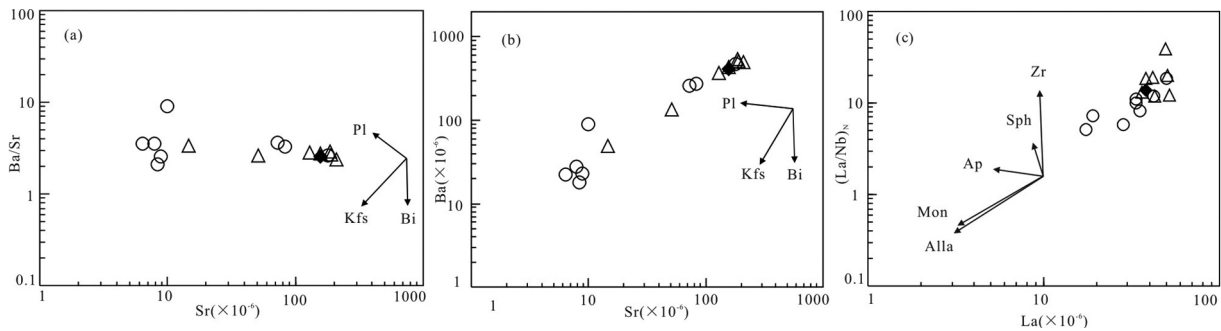


图9 中侏罗世花岗岩质岩石 Sr-Ba/Sr (a)、Sr-Ba (b) 和 La-(La/Yb)_N (c) 关系图及分离结晶趋势

Fig. 9 Diagrams of Sr vs. Ba/Sr (a), Sr vs. Ba (b) and La vs. (La/Yb)_N (c) for the Middle Jurassic granitoids

关。其次根据张旗等(2006, 2010)研究结果, 本文还将研究区塔尔气杂岩体中侏罗世花岗岩质岩石样品按照 Sr 和 Yb 含量进行分类, 其中大多花岗岩质岩石样品表现出低或极低 Sr ($6.40 \times 10^{-6} \sim 190 \times 10^{-6}$) 含量和高 Yb ($2.15 \times 10^{-6} \sim 4.43 \times 10^{-6}$) 含量的特征, 认为属于张旗等(2006, 2010)划分的南岭型(少量为华南型花岗岩)。结合张旗等(2006, 2010)的研究, 认为研究区塔尔气杂岩体中侏罗世花岗岩质岩石的源区压力为 $< 0.8 \text{ GPa}$, 源区残留相主要为斜长石和角闪石。

4.3 地球动力学机制

前人关于东北地区的地质研究曾认为该地区早-中侏罗世花岗岩质岩石主要发育于小兴安岭和张广才岭, 其岩石组合和地球化学特征类似于活动大陆边缘岩浆岩(葛文春等, 2005b; Ge *et al.*, 2007; 隋振民等, 2007; Wu *et al.*, 2011; 王伟等, 2012), 并具有斑岩型钼矿的成矿属性特征(Ge *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2011; 陈衍景等, 2012; 杨言辰等, 2012), 同时提出这些活动大陆边缘环境下发育的早-中侏罗世花岗岩质岩石与古太平洋板块的俯冲作用密切相关(孙德有等, 2004; 葛文春等, 2005b; Ge *et al.*, 2007; 隋振民等, 2007; Wu *et al.*, 2011)。但是近年来随着地质调查工作的逐步深入以及高精度测年方法的广泛应用, 发育于兴蒙造山带东部的中生代侵入岩(或侵入变质杂岩)逐渐被识别出来, 其中无论在小兴安岭-张广才岭、松辽盆地, 还是额尔古纳和兴安地块均存在早中侏罗世花岗岩质岩石(表5)。同时, 古太平洋板块俯冲作用对于我国东北地区的时空影响范围还存在着较大争议。近年来不断有学者根据额尔古纳和兴安地块发育的侏罗纪钙碱性岩浆岩组合, 提出由于大兴安岭地区远离古太平洋俯冲带, 因此松辽盆地以西地区侏罗纪岩浆作用的产生与蒙古-鄂霍茨克洋的南向俯冲有关(孟恩等, 2011; 王伟等, 2012; Xu *et al.*, 2013; 许文良等, 2013; 李宇等, 2015; 唐杰等, 2016)。但是, 部分学者认为蒙古-鄂霍茨克大洋可能仅存在北向俯冲作用, 并不存在双向俯冲过程(Zorin, 1999)。随着高精度年代学研究技术的不断发展, 目前额尔古纳地块已识别出大量中生代岩浆岩, 暗示了蒙古-鄂霍茨克大洋板片南向俯冲过程(Wu *et al.*, 2011; Xu *et*

al., 2013; 唐杰等, 2016)。

经过总结前人相关研究成果(表5), 东北地区侏罗纪花岗岩质岩石的主要岩石类型为花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩、碱长花岗岩以及花岗斑岩, 且这些侏罗纪花岗岩质岩石主要为高钾钙碱性 I 型花岗岩。至于这些大面积展布横跨不同构造单元的侏罗纪花岗岩质岩石相关的地球动力学机制问题, 显然任何板块的俯冲作用都无法解释。Barbarin (1999) 曾提出高钾钙碱性花岗岩(KCG)可以从挤压体制向拉张体制转变的过程中产生, 实际代表了构造体制的转变。同时期, 大兴安岭地区还发育一系列由断层控制的裂陷盆地(李思田等, 1987)。此外, 黑龙江新开岭变质核杂岩形成于中侏罗世, 其伸展隆升时间为 $171 \sim 164 \text{ Ma}$ (赵海滨等, 2007)。因此, 同时期断陷盆地的发育和变质核杂岩的出露等地质现象均为大兴安岭地区发育大规模伸展作用的重要证据。关于该期伸展作用的地球动力学机制问题, 前人曾普遍认为与古亚洲闭合后的伸展作用有关(吴福元等, 1998), 但是近年来通过对蒙古-鄂霍茨克造山带的不断研究, 越来越多的研究者认为该期伸展作用与蒙古-鄂霍茨克洋碰撞造山后的伸展作用密切相关(余宏全等, 2012; 施璐等, 2017)。这些中侏罗世造山后花岗岩质岩石的发现同时预示着蒙古-鄂霍茨克洋已于中侏罗世之前发生闭合, 而不是前人定义的晚侏罗世-早白垩世(Kravchinsky *et al.*, 2002)。此外, 余宏全等(2011)认为蒙古-鄂霍茨克洋中段可能于三叠纪中期闭合, 并在晚三叠世至三叠纪末期达到碰撞高峰。同时, 这种碰撞挤压过程将导致岩石圈发生变形并增厚隆升。东北地区大范围缺失三叠纪-早侏罗世沉积记录也表明该时期处于相对隆起的状态。最后, 由于受到造山后岩石圈拆沉作用的影响, 深部岩浆底侵并诱发增厚的下地壳发生减压熔融, 进而形成东北地区大面积发育的造山后花岗岩质岩石。

5 结论

通过对塔尔气杂岩体进行锆石 U-Pb 年代学、全岩岩石地球化学以及锆石 Hf 同位素研究, 并结合前人研究成果, 得出如下结论:

(1) 中侏罗世花岗质岩石构成了塔尔气杂岩体的主体, 其主要岩石类型为二长花岗岩、正长花岗岩及少量花岗闪长岩。锆石 U-Pb 年代学表明其形成于 173 ~ 166Ma。

(2) 塔尔气杂岩体中中侏罗世花岗质岩石具有富硅、富碱、贫铁、贫镁以及贫钙的地球化学特征, 属于 I 型花岗岩, 其为新元古代-显生宙期间新增生陆壳物质部分熔融的产物。

(3) 塔尔气杂岩体中侏罗世花岗质岩石形成于造山后伸展环境, 可能与蒙古-鄂霍茨克洋碰撞造山后的伸展作用密切相关。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithosphere*, 46(3): 605-626
- Boynnton WV. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. *Developments in Geochemistry*, 2: 63-114
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region. 1991. *Regional Geology of the Inner Mongolia Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 1-725 (in Chinese)
- Chappell BW and White AJR. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. In: Brown PE and Chappell BW (eds.). *The Second Hutton Symposium on the Origin of Granites and Related Rocks*. America: Geological Society of America, 1-26
- Chen F, He ZH, Zhang CL, Sui ZM, Wang Y and Zhang J. 2016. The ages and petrogenesis of granite porphyry in Tarqi area, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 35(5): 776-789 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Zhang C, Li N, Yang YF and Deng K. 2012. Geology of the Mo deposits in Northeast China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1223-1268 (in Chinese with English abstract)
- Chen ZG, Zhang LC, Wan B, Wu HY and Cleven N. 2011. Geochronology and geochemistry of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit in NE China, and their geological significance. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 92-105
- Cui FH, Zheng CQ, Xu XC, Yao WG, Shi L, Li J and Xu JL. 2013. Late carboniferous magmatic activities in the Quanshenglinchang area, Great Xing'an Range: Constrains on the timing of amalgamation between Xing'an and Songnen massifs. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1247-1263 (in Chinese with English abstract)
- Dong Y, Ge WC, Zhao GC, Yang H, Liu XW and Zhang YL. 2016a. Petrogenesis and tectonic setting of the Late Paleozoic Xing'an complex in the northern Great Xing'an Range, NE China: Constraints from geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 228-246
- Dong Y, Ge WC, Yang H, Xu WL, Zhang YL, Bi JH and Liu XW. 2016b. Geochronology, geochemistry, and Hf isotopes of Jurassic intermediate-acidic intrusions in the Xing'an Block, northeastern China: Petrogenesis and implications for subduction of the Paleo-Pacific oceanic plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 118: 11-31
- Dong Y, He ZH, Ren ZH, Ge WC, Yang H, Ji Z and He Y. 2018. Formation of the Permian Taipinggou igneous rocks, north of Luobei (Northeast China): Implications for the subduction of the Mudanjiang Ocean beneath the Bureya-Jiamusi Massif. *International Geology Review*, 60(10): 1195-1212
- Gao FH, Xu WL, Yang DB, Pei FP, Liu XM and Hu ZC. 2007. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating from granitoids in southern basement of Songliao basin: Constraints on ages of the basin basement. *Science in China (Series D)*, 50(7): 995-1004
- Ge WC, Wu FY, Zhou CY and Abdel Rahman AA. 2005a. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Ergun block in the northern part of the Da Hinggan Range. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2097-2105
- Ge WC, Wu FY, Zhou CY and Zhang JH. 2005b. Zircon U-Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749-762 (in Chinese with English abstract)
- Ge WC, Sui ZM, Wu FY, Zhang JH, Xu XC and Cheng RY. 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics and their implications of the Early Paleozoic granites in the northeastern Da Hinggan Mts., northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 423-440 (in Chinese with English abstract)
- Ge WC, Wu FY, Zhou CY and Zhang JH. 2007. Porphyry Cu-Mo deposits in the eastern Xing'an-Mongolian Orogenic Belt: Mineralization ages and their geodynamic implications. *Chinese Science Bulletin*, 52(24): 3416-3427
- Gou J, Sun DY, Li R, Wei HY, Wang TH, Liu XM and Hu ZC. 2013. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Early Mesozoic granites in the Sunwu-Jiayin area, Heilongjiang Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(1): 119-133 (in Chinese with English abstract)
- Ji Z, Ge WC, Yang H, Tian DX, Zhang YL and Chen HJ. 2016. Petrogenesis of Early Cretaceous granites in Taerqi area of central Great Xing'an Range and its tectonic setting. *Global Geology*, 35(2): 283-296 (in Chinese with English abstract)
- Kravchinsky VA, Cogne JP, Harbert WP and Kuzmin MI. 2002. Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean as constrained by new paleomagnetic data from the Mongol-Okhotsk suture zone, Siberia. *Geophysical Journal International*, 148(1): 34-57
- Li ST, Yang SG, Wu CL, Huang JF, Cheng ST, Xia WC and Zhao GR. 1987. Late Mesozoic rifting in Northeast China and Northeast Asia fault basin system. *Science in China (Series B)*, 31(2): 246-256
- Li Y, Ding LL, Xu WL, Wang F, Tang J, Zhao S and Wang ZJ. 2015. Geochronology and geochemistry of muscovite granite in Sunwu area, NE China: Implications for the timing of closure of the Mongol-Okhotsk Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 56-66 (in Chinese with English abstract)
- Liu XW, Yang H, Dong Y, Wang QH, Ge WC, Zhang YL and Tian DX. 2015. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Triassic granites from the Mingshui area in the Da Hinggan Mountains and their tectonic implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(2): 143-158 (in Chinese with English abstract)
- Meng E, Xu WL, Yang DB, Qiu KF, Li CH and Zhu HT. 2011. Zircon U-Pb chronology, geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from the Lingquan basin in Manzhouli area, and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1209-1226 (in Chinese with English abstract)
- Miao LC, Fan WM, Zhang FQ, Liu DY, Jian P, Shi GH, Tao H and Shi YR. 2004. Zircon SHRIMP geochronology of the Xinkailing-Kele complex in the northwestern Lesser Xing'an Range, and its geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(2): 201-209
- She HQ, Liang YW, Li JW, Guan JD, Zhang DQ, Yang YC, Xiang AP, Jin J, Tan G and Zhang B. 2011. The Early-Mesozoic magmatic activity at Moerdaoga district in Inner Mongolia and its geodynamic implication. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1831-1864 (in Chinese with English abstract)
- She HQ, Li JW, Xiang AP, Guan JD, Yang YC, Zhang DQ, Tan G and Zhang B. 2012. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 571-594 (in Chinese with English abstract)
- Shi L, Zheng CQ, Yao WG, Li J, Xu JL, Gao Y and Cui FH. 2013. Geochronology, petro-geochemistry and Tectonic setting of the

- Hamagou forest farm A-type granites in the Wuchagou region, central Great Xing' an Range. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1264–1276 (in Chinese with English abstract)
- Shi L, Zheng CQ, Tang Z, Qin T, Ma GX and Hao XF. 2017. Genesis and tectonic significance of the Early-Middle Jurassic granitoids in the Central Great Xing' an Range, NE China. *Geological Review*, 63: 309–310 (in Chinese)
- Sui ZM, Ge WC, Wu FY, Zhang JH, Xu XC and Cheng RY. 2007. Zircon U-Pb ages, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in northeastern part of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 461–480 (in Chinese with English abstract)
- Sui ZM, Ge WC, Xu XC and Zhang JH. 2009. Characteristics and geological implications of the Late Paleozoic post-orogenic Shierzhan granite in the Great Xing' an Range. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2679–2686 (in Chinese with English abstract)
- Sun DY, Wu FY, Zhang YB and Gao S. 2004. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone: Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(2): 174–181 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Tang J, Xu WL and Wang F. 2016. Rock associations and their spatial-temporal variations of the Early Mesozoic igneous rocks in the NE Asia: Constraints on the initial subduction timing of the Paleo-Pacific Plate. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(6): 1181–1194 (in Chinese with English abstract)
- Tian DX. 2015. Petrogenesis and geological implications of miarolitic alkali feldspar granites in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia of NE China. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 1–52 (in Chinese with English summary)
- Veevers JJ, Saeed A, Belousova EA and Griffin WL. 2005. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn Craton. *Earth-Science Reviews*, 68(3–4): 245–279
- Wang TH, Zhang SY, Sun DY, Gou J, Ren YS, Wu PF and Liu XM. 2014. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic characteristics of Mesozoic granitoids from southern Manzhouli, Inner Mongolia. *Global Geology*, 33(1): 26–38 (in Chinese with English abstract)
- Wang W, Xu WL, Wang F and Meng E. 2012. Zircon U-Pb chronology and assemblages of Mesozoic granitoids in the Manzhouli-Erguna area, NE China: Constraints on the regional tectonic evolution. *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 88–105 (in Chinese with English abstract)
- Wang XA, Xu ZY, Liu ZH and Zhu K. 2012. Petrogenesis and tectonic setting of the K-feldspar granites in Chaihe area, central Greater Xing' an Range: Constraints from petro-geochemistry and zircon U-Pb isotope chronology. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2647–2655 (in Chinese with English abstract)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419
- Wu FY, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 1998. The petrogenesis and age of Xinhuatun pluton in Zhangguangcailing. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 17(3): 226–234 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY and Lin Q. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181–189 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1–2): 143–173
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66(3–4): 241–273
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1–2): 105–126
- Wu FY, Yang JH, Lo CH, Wilde SA, Sun DY and Jahn BM. 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China. *Island Arc*, 16(1): 156–172
- Wu FY, Sun DY, Ge WC, Zhang YB, Grant ML, Wilde SA and Jahn BM. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30
- Xie LW, Zhang YB, Zhang HH, Sun JF and Wu FY. 2008. In situ simultaneous determination of trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes in zircon and baddeleyite. *Chinese Science Bulletin*, 53(10): 1565–1573
- Xu MJ, Xu WL, Wang F, Gao FH and Yu JJ. 2013. Geochronology and geochemistry of the Early Jurassic granitoids in the central Lesser Xing' an Range, NE China and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 354–368 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Pei FP, Gao FH, Yang DB and Bu YJ. 2008. Zircon U-Pb age from basement granites in Yishu graben and its tectonic implications. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 33(2): 145–150 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Pei FP, Wang F, Meng E, Ji WQ, Yang DB and Wang W. 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167–193
- Xu WL, Wang F, Pei FP, Meng E, Tang J, Xu MJ and Wang W. 2013. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 339–353 (in Chinese with English abstract)
- Yang H, Ge WC, Yu Q, Ji Z, Liu XW, Zhang YL and Tian DX. 2016. Zircon U-Pb-Hf isotopes, bulk-rock geochemistry and petrogenesis of Middle to Late Triassic I-type granitoids in the Xing' an Block, Northeast China: Implications for Early Mesozoic tectonic evolution of the central Great Xing' an Range. *Journal of Asian Earth Sciences*, 119: 30–48
- Yang JH, Wu FY, Shao JA, Wilde SA, Xie LW and Liu XM. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3–4): 336–352
- Yang YC, Han SJ, Sun DY, Guo J and Zhang SJ. 2012. Geological and geochemical features and geochronology of porphyry molybdenum deposits in the Lesser Xing' an Range-Zhanguangcai Range metallogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 379–390 (in Chinese with English abstract)
- Yun XY, He ZH and Yan WB. 2015. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic study of Early Carboniferous granodiorites in Taerqi region, central Daxing' anling and its tectonic implication. *Global Geology*, 18(2): 98–108
- Zhang J, Chen JS, Li BY, Gao Y and Zhang YL. 2011. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of Late Paleozoic granites in Taerqi area, Inner Mongolia. *Global Geology*, 30(4): 521–531 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Li CD, Wang YL, Jin WJ and Jia XQ. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249–2269 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Jin WJ, Li CD and Wang YL. 2010. On the classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb concentrations III: Practice. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3431–3455 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YL, Ge WC, Gao Y, Chen JS and Zhao L. 2010. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of granites in Longzhen area and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1059–1073 (in

Chinese with English abstract)

- Zhao CJ and Li ZT. 1983. Paleozoic tectono-granitic provinces in northern Northeast China and their geologic and tectonic significance. In: Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources (ed.). Contributions for the Project of Plate Tectonic in Northern China. Beijing: Geological Publishing House, 280 - 292 (in Chinese with English abstract)
- Zhao HB, Mo XX, Xu SM, Li SL and Ma BY. 2007. Composition and evolution of the Xinkailing metamorphic core complexes in Heilongjiang Province. Chinese Journal of Geology, 42(1): 176 - 188 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Z, Chi XG, Liu JF, Wang TF and Hu ZC. 2010. Late Paleozoic arc-related magmatism in Yakeshi region, Inner Mongolia: Chronological and geochemical evidence. Acta Petrologica Sinica, 26(11): 3245 - 3258 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Y, Ge WC and Wang QH. 2011. Petrogenesis of Mesozoic granite in Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountains: Constraints from geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope. Acta Petrologica et Mineralogica, 30(5): 901 - 923 (in Chinese with English abstract)
- Zorin YA. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia. Tectonophysics, 306(1): 33 - 56
- 附中文参考文献**
- 陈飞, 和钟铎, 张春雷, 隋振民, 王阳, 张菁. 2016. 内蒙古塔儿气地区花岗岩斑岩的形成时代与岩石成因. 地质通报, 35(5): 776 - 789
- 陈衍景, 张成, 李诺, 杨永飞, 邓珂. 2012. 中国东北钼矿床地质. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1223 - 1268
- 崔芳华, 郑常青, 徐学纯, 姚文贵, 施璐, 李娟, 徐久磊. 2013. 大兴安岭全胜林场地区晚石炭世岩浆活动及其地质意义. 地质学报, 87(9): 1247 - 1263
- 高福红, 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 柳小明, 胡兆初. 2007. 松辽盆地南部基底花岗岩质岩石锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年: 对盆地基底形成时代的制约. 中国科学(D辑), 37(3): 331 - 335
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, Abdel Rahman AA. 2005a. 大兴安岭北部塔儿花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约. 科学通报, 50(12): 1239 - 1247
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2005b. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 岩石学报, 21(3): 749 - 762
- 葛文春, 隋振民, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程瑞玉. 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. 岩石学报, 23(2): 423 - 440
- 苟军, 孙德有, 李蓉, 魏红艳, 王天豪, 柳小明, 胡兆初. 2013. 孙吴-嘉荫地区早中生代花岗岩的年代学、地球化学与成因. 吉林大学学报(地球科学版), 43(1): 119 - 133
- 纪政, 葛文春, 杨浩, 田德欣, 张彦龙, 陈会军. 2016. 大兴安岭中段塔儿气地区早白垩世花岗岩成因及形成构造环境. 世界地质, 35(2): 283 - 296
- 李思田, 杨士恭, 吴冲龙, 黄家福, 程守田, 夏文臣, 赵根榕. 1987. 中国东北部晚中生代裂隙作用和东北亚断陷盆地系. 中国科学(B辑), 21(2): 185 - 195
- 李宇, 丁磊磊, 许文良, 王枫, 唐杰, 赵硕, 王子进. 2015. 孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的年代学与地球化学: 对蒙古-鄂霍茨克洋闭合时间的限定. 岩石学报, 31(1): 56 - 66
- 刘希雯, 杨浩, 董玉, 王清海, 葛文春, 张彦龙, 田德欣. 2015. 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. 岩石矿物学杂志, 34(2): 143 - 158
- 孟恩, 许文良, 杨德彬, 邱昆峰, 李长华, 祝洪涛. 2011. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. 岩石学报, 27(4): 1209 - 1226
- 苗来成, 范蔚茗, 张福勤, 刘敦一, 简平, 施光海, 陶华, 石玉若. 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. 科学通报, 48(22): 2315 - 2323
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 - 725
- 余宏全, 梁玉伟, 李进文, 关继东, 张德全, 杨郅城, 向安平, 金俊, 谭刚, 张斌. 2011. 内蒙古莫尔道嘎地区早中生代岩浆作用及其地球动力学意义. 吉林大学学报(自然科学版), 41(6): 1831 - 1864
- 余宏全, 李进文, 向安平, 关继东, 杨郅城, 张德全, 谭刚, 张斌. 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. 岩石学报, 28(2): 571 - 594
- 施璐, 郑常青, 姚文贵, 李娟, 徐久磊, 高源, 崔芳华. 2013. 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. 地质学报, 87(9): 1264 - 1276
- 施璐, 郑常青, 唐振, 秦涛, 马国祥, 郝晓飞. 2017. 大兴安岭中部早中侏罗世花岗岩成因及构造背景. 地质论评, 63: 309 - 310
- 隋振民, 葛文春, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩质岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因. 岩石学报, 23(2): 461 - 480
- 隋振民, 葛文春, 徐学纯, 张吉衡. 2009. 大兴安岭十二站晚古生代后造山花岗岩的特征及其地质意义. 岩石学报, 25(10): 2679 - 2686
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 高山. 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间-来自吉林大玉山花岗岩体的证据. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2): 174 - 181
- 唐杰, 许文良, 王枫. 2016. 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. 矿物岩石地球化学通报, 35(6): 1181 - 1194
- 田德欣. 2015. 内蒙古东乌旗地区晶洞碱长花岗岩的成因及其地质意义. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 1 - 52
- 王天豪, 张书义, 孙德有, 苟军, 任云生, 武鹏飞, 柳小明. 2014. 满洲里南部中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征. 世界地质, 33(1): 26 - 38
- 王伟, 许文良, 王枫, 孟恩. 2012. 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. 高校地质学报, 18(1): 88 - 105
- 王兴安, 徐仲元, 刘正宏, 朱凯. 2012. 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 年龄同位素年代学的制约. 岩石学报, 28(8): 2647 - 2655
- 吴福元, 林强, 葛文春, 孙德有. 1998. 张广才岭新华屯岩体的形成时代与成因研究. 岩石矿物学杂志, 17(3): 226 - 234
- 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. 岩石学报, 15(2): 181 - 189
- 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 孙金凤, 吴福元. 2008. 锆石/斜锆石 U-

- Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定. 科学通报, 53(2): 220-228
- 徐美君, 许文良, 王枫, 高福红, 于介江. 2013. 小兴安岭中部早侏罗世花岗岩的年龄学与地球化学及其构造意义. 岩石学报, 29(2): 354-368
- 许文良, 裴福萍, 高福红, 杨德彬, 卜永吉. 2008. 伊舒地堑基底花岗岩的锆石 U-Pb 年代学及其构造意义. 地球科学(中国地质大学学报), 33(2): 145-150
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 孟恩, 唐杰, 徐美君, 王伟. 2013. 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. 岩石学报, 29(2): 339-353
- 杨言辰, 韩世炯, 孙德有, 郭嘉, 张苏江. 2012. 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. 岩石学报, 28(2): 379-390
- 张健, 陈井胜, 李泊洋, 高妍, 张彦龙. 2011. 内蒙古塔尔气地区晚古生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征. 世界地质, 30(4): 521-531
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2249-2269
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2010. 三论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 应用. 岩石学报, 26(12): 3431-3455
- 张彦龙, 葛文春, 高妍, 陈井胜, 赵磊. 2010. 龙镇地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及地质意义. 岩石学报, 26(4): 1059-1073
- 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. 见: 沈阳地质矿产研究所编. 中国北方板块构造文集. 北京: 地质出版社, 280-292
- 赵海滨, 莫宣学, 徐受民, 李尚林, 马伯永. 2007. 黑龙江新开岭变质核杂岩的组成及其演化. 地质科学, 42(1): 176-188
- 赵芝, 迟效国, 刘建峰, 王铁夫, 胡兆初. 2010. 内蒙古牙克石地区晚古生代弧岩浆岩: 年代学及地球化学证据. 岩石学报, 26(11): 3245-3258
- 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. 岩石矿物学杂志, 30(5): 901-923