

吉林东部延边地区二长花岗岩年代学、岩石成因学及其构造意义研究*

张超 郭巍** 徐仲元 刘正宏 刘永江 雷聪聪

ZHANG Chao, GUO Wei**, XU ZhongYuan, LIU ZhengHong, LIU YongJiang and LEI CongCong

吉林大学地球科学学院, 长春 130061

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

2013-05-10 收稿, 2013-11-11 改回.

Zhang C, Guo W, Xu ZY, Liu ZH, Liu YJ and Lei CC. 2014. Study on geochronology, petrogenesis and tectonic implications of monzogranite from the Yanbian area, eastern Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 512–526

Abstract Gaoling pluton is located to the east of Helong City in Yanbian area, Jilin Province. Tectonically, it is at the eastern segment of the northern margin of the NCC. It is mainly of porphyritic monzogranite with the matrix of medium to medium-fined texture and alkali feldspar phenocryst. Sample YH04 and N5 were selected for LA-ICP-MS zircon U-Pb dating. The analyses of zircons yield weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of $172.25 \pm 0.97\text{Ma}$ and $170.9 \pm 0.68\text{Ma}$, respectively, suggesting they are formed in the Middle Jurassic. Petrogeochemically, Gaoling pluton is high in SiO_2 (69.60% ~ 74.30%), Al_2O_3 (13.90% ~ 15.80%) and K_2O (3.05% ~ 4.50%), and low in MgO (0.22% ~ 0.82%) and $\text{Mg}^\#$ (26 ~ 37). They are strongly enriched in light REE and depleted in heavy REE with weak negative to positive δEu (0.78 ~ 2.14), which is similar to adakites. Gaoling pluton is enriched in large ion lithophile elements (LILE) (e.g., Cs, Rb, Ba, Th, U, K, and Sr), and depleted in high field strength elements (HFSE) (e.g., Nb, Ta and P). These rocks have low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7039 ~ 0.7051) and negative $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (-0.6 ~ -0.3), with the t_{DM1} ranging from 922Ma to 928Ma and while t_{DM2} ranging from 984Ma to 1011Ma, suggesting the existence of Neoproterozoic crustal growth event. The geochemical data indicate that the Gaoling pluton magma was derived mainly from partial melting of mafic rocks in thickened lower crust which likely affected by Neoproterozoic accretion material. Combined with regional tectonic evolution, we suggest that the emplacement of Gaoling pluton was related to the subduction of the circum-Pacific tectonic system beneath the Eurasian continent and continually collision between North China and Siberia Plates.

Key words LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Geochemistry; Tectonic setting; Middle Jurassic; Yanbian area

摘要 高岭岩体位于吉林省延边地区和龙市东侧,大地构造位置上位于华北板块北缘东段,岩性主要为似斑状二长花岗岩,基质为中粒-中细粒结构。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示,样品 YH04 和 N-5 的加权平均年龄分别为 $172.25 \pm 0.97\text{Ma}$ 和 $170.9 \pm 0.68\text{Ma}$,表明岩体侵位时代为中侏罗世。岩石地球化学特征上,高岭岩体样品具有高硅(69.60% ~ 74.30%)、富铝(13.90% ~ 15.80%)、富钾(3.05% ~ 4.50%)和低镁(0.22% ~ 0.82%)及 $\text{Mg}^\#$ (26 ~ 37) 的特点。样品富集轻稀土元素,相对亏损重稀土元素(LREE/HREE = 13 ~ 21),具有微弱的负 Eu 到正 Eu 异常($\delta\text{Eu} = 0.78 \sim 2.14$),其稀土元素配分模式图与埃达克岩稀土元素配分模式图类似。高岭岩体样品富集大离子亲石元素 Cs、Rb、Ba、K、Sr 和高场强元素 Th、U 和 Zr,同时亏损高场强元素 Nb、Ta 以及 P 元素。同时样品具有较低的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.7039 ~ 0.7051)和负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-0.6 ~ -0.3),且其 t_{DM1} 和 t_{DM2} 模式年龄分别为 922 ~ 928Ma 和 984 ~ 1011Ma,表明研究区新元古代存在地壳增生事件。Sr-Nd 同位素特征及岩石地球化学特征表明高岭岩体母源岩浆来源于加厚下地壳基性岩石部分熔融且受到了新元古代增生物质的影响。结合区域构造演化,中侏罗世高岭岩体侵位构造环境可能受到环太平洋构造体系和华北板块与西伯利亚板块持续碰撞的叠加影响。

关键词 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年; 岩石地球化学; 构造环境; 中侏罗世; 延边地区

中图法分类号 P581.121; P597.3

* 本文受国家自然科学基金项目(41272223, 41211120171, 41340024)和中国地质调查局项目(12120113098500)联合资助。

第一作者简介: 张超,男,1986年生,博士生,构造地质学专业,E-mail: bosewell@163.com

** 通讯作者: 郭巍,男,1960年生,教授,主要从事地质构造和石油地质研究,E-mail: guow@jlu.edu.cn

1 引言

东北地区显生宙以来受到古亚洲洋构造域、蒙古-鄂霍次克构造体系和环太平洋构造体系的叠加影响(张兴洲等, 2012; 张允平, 2011; 张连昌等, 2010), 地质演化历史较为复杂, 古生代以来先后经历了额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块和那丹哈达地块等微板块的拼贴, 是解决东北乃至东亚大陆构造演化的关键地区(刘永江等, 2010)。近年来的研究资料表明东北地区分布有大量的中生代花岗岩(吴福元等, 1999, 2007; Wu *et al.*, 2011), Zhang *et al.* (2004) 和 Cao *et al.* (2013) 分别对研究区附近的百里坪岩体和吉林中部地区岩浆岩进行了形成时代和地球化学特征的报告, 对认识古亚洲洋构造域和环太平洋构造域的演化具有重要的意义。许文良等(2013)对吉黑东部的中生代火山岩进行了讨论, 认为中生代晚期(170Ma 和 ~145Ma)有两次重要的陆壳加厚过程, 并影响到了华北板块北缘。同时黑龙江群中存在 160~220Ma 的变质年龄(赵英利等, 2010; Li *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2007), 表明在早中生代吉黑东部可能受到环太平洋构造体系作用的影响。但由于对古亚洲洋构造域和滨太

平洋构造域转换的时限认识不清(崔盛芹等, 1983; 彭玉鲸等, 2012; 赵越等, 1994; 张连昌等, 2010; 许文良等, 2013; Yu *et al.*, 2012; 张允平, 2011; 李超文等, 2007), 东北地区中生代花岗岩的成因及其构造背景仍存在较大的争议(董树文等, 2008; 吴福元等, 1999; Wu *et al.*, 2011; 孟庆丽等, 1996; 邵治安等, 2001; 肖庆辉等, 2010; 耿树芳等, 2012; Yu *et al.*, 2012; 徐美君等, 2013)。

高岭岩体位于吉林省延边地区, 华北板块北缘东段; 1:20 万大拉子幅地质报告(吉林省地质局区域地质测量大队, 1964^①)中将该岩体侵位时代定为晚二叠世, 1:25 万延吉幅地质报告(吉林省地质调查院, 2007^②)中将该岩体解体为晚二叠世和早侏罗世两个岩体, Wu *et al.* (2011) 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年认为该岩体侵位时代为中侏罗世, 但对其地球化学特征及形成的构造背景未作详细的报道。因此高岭岩体的侵位时代仍存在争议, 且对其地球化学特征和构造背景探讨也较少。鉴于此, 本文对高岭岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和系统的岩石地球化学分析, 结合区域地质资料, 进一步确定了高岭岩体的形成时代并讨论了其成因及构造背景, 对认识华北板块北缘东段及东北地区中生代构造演化具有重要意义。

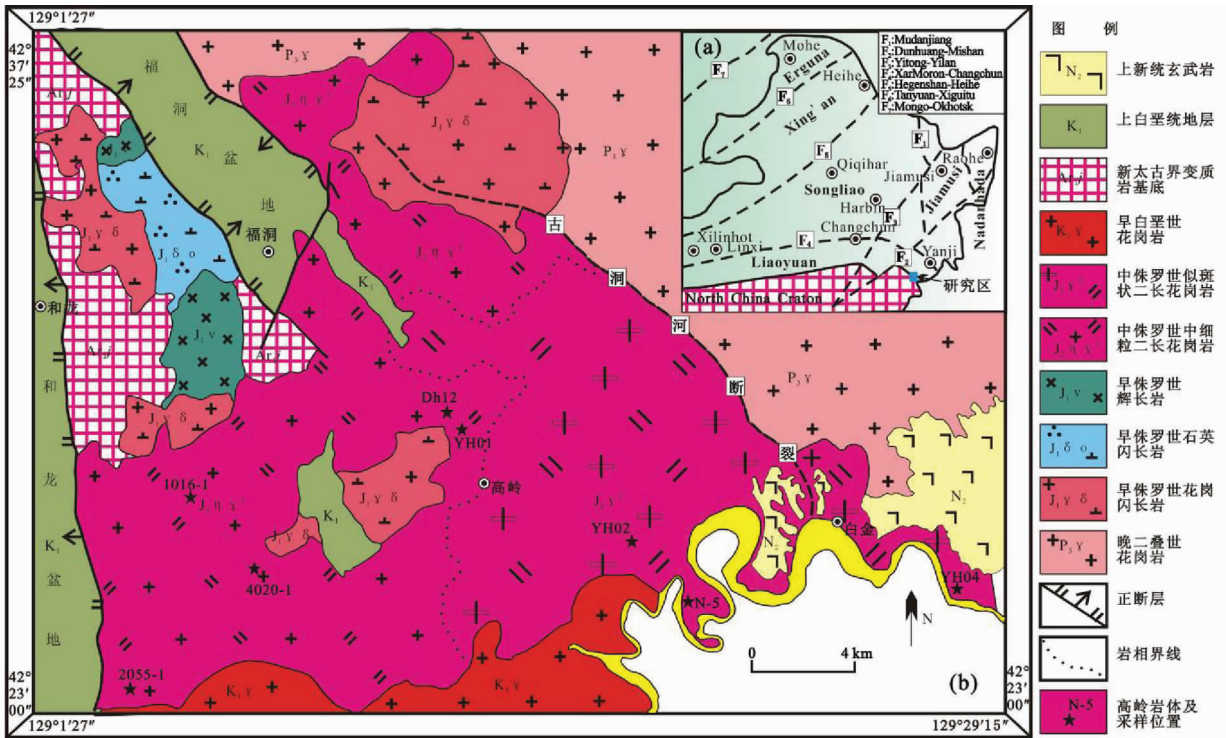


图 1 东北构造简图(a, 据 Wu *et al.*, 2011) 和高岭岩体地质简图(b)

Fig.1 Tectonic sketch map of NE China (a, modified after Wu *et al.*, 2011) and geological map of the Gaoling pluton that includes the sampling locations (b)

① 吉林省地质局区域地质测量大队. 1964. 大拉子幅(1:20 万)区域地质测量报告. 长春: 吉林省区域地质矿产调查所

② 吉林省地质调查院. 2007. 延吉市幅区域地质调查报告. 北京: 全国地质资料馆

2 地质背景与样品描述

研究区位于吉林省延边地区和龙市东侧,大地构造位置位于华北板块北缘东段,滨太平洋构造域西侧,传统意义的“槽-台”边界古洞河断裂从该区通过(图1)。显生宙以来研究区经历了古亚洲洋构造域和滨太平洋构造域的叠加影响,岩浆活动强烈,其特殊的地理位置对研究古亚洲洋构造域和

滨太平洋构造域的转换具有重要意义。区内出露华北地台古老基底,主要为一套绿片岩相的片麻岩和角闪岩组合(徐公愉,1993),缺失古生代地层,中生代以来主要为一套白垩系的陆相火山-碎屑岩沉积组合、类磨拉石碎屑(含煤)沉积组合(张允平,2011)。古洞河断裂在该区呈北西向展布,控制着研究区内显生宙以来的岩浆活动。

高岭岩体位于古洞河断裂西南侧,沿断裂呈北西向展布,面积约350km²,侵入到新太古界变质岩基底以及早侏罗

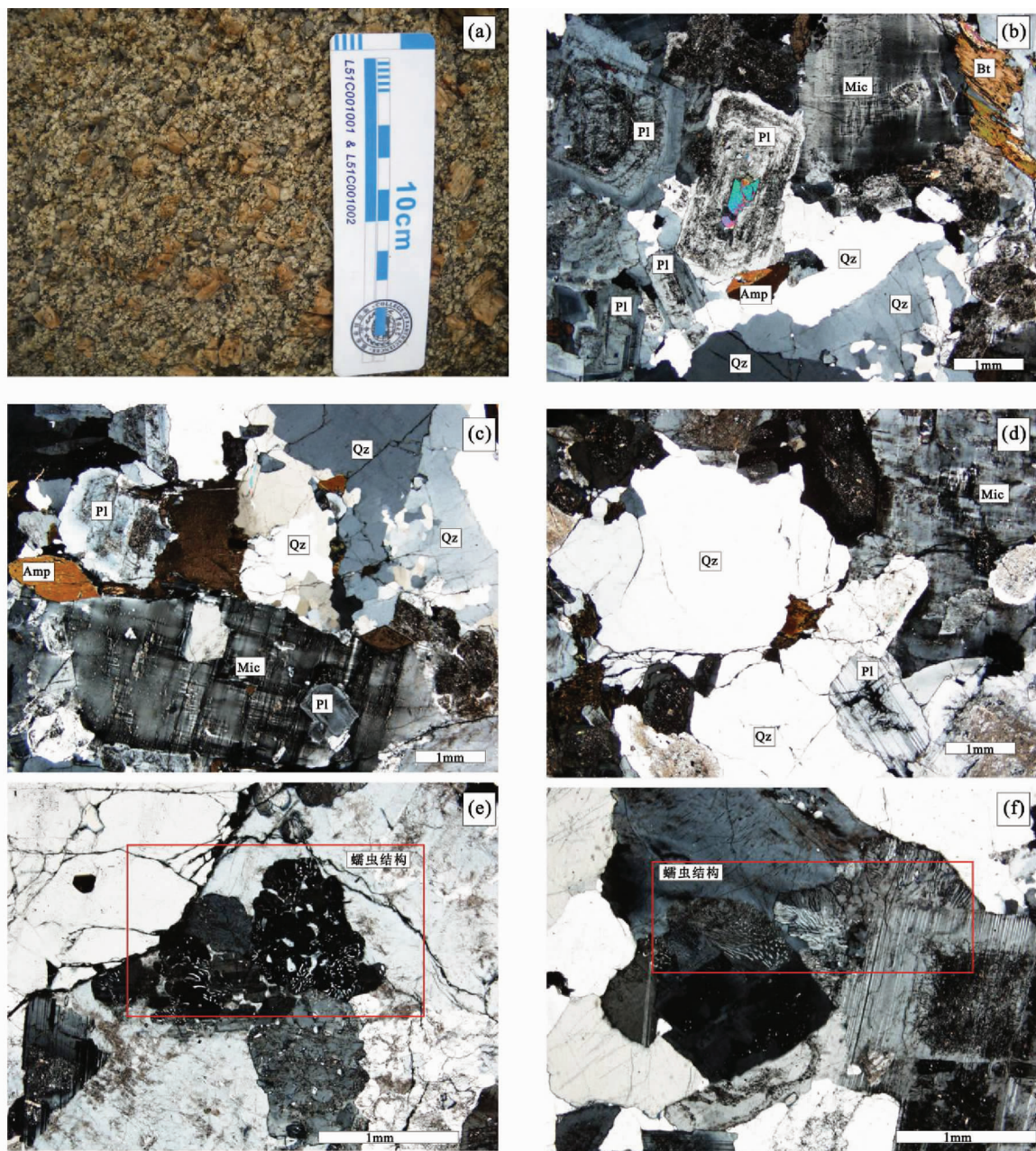


图2 中侏罗世二长花岗岩野外照片和镜下照片特征
Qz-石英; Pl-斜长石; Mic-微斜长石; Amp-角闪石; Bt-黑云母

Fig.2 Photographs and microphotographs features for the Middle Jurassic monzogranite
Qz-quartz; Pl-plagioclase; Mic-microcline; Amp-amphibole; Bt-biotite

世花岗闪长岩和辉长岩中,与晚二叠世花岗岩呈断层接触,并被早白垩世二长花岗岩侵入,在和龙盆地边界与中生代地层呈断层接触关系,在白金一带见上新统船底山组玄武岩覆盖在高岭岩体之上(图 1b)。

高岭岩体主要为一套灰白色似斑状二长花岗岩,岩石中见有碱性长石斑晶(图 2a),斑晶分布不均匀,基质为中粒-中细粒结构。灰白色似斑状二长花岗岩:似斑状结构,基质中粒-中细粒花岗结构,块状构造,主要组成矿物:石英(30%),粒度 1~5mm,他形粒状,发生碎裂,裂纹发育;斜长石(35%),粒度 1~3.5mm,呈半自形-自形板柱状,聚片双晶发育,颗粒中心发生绢云母化和高岭土化,部分颗粒具有环带结构;条纹状长石(10%),粒度 3~5mm,他形粒状,形状极不规则,具有不连续的条纹;微斜长石(20%),粒度 1~5mm,他形粒状,格子状双晶发育。此外含有少量的黑云母和角闪石,黑云母多发生绿泥石化。副矿物有磁铁矿、榍石和磷灰石(图 2b-d)。在显微镜下还观测到细小的蠕虫状或指状石英分布在斜长石中形成蠕虫结构(图 2e, f),该结构常见于中深成花岗岩内。

3 分析方法

本文所研究的高岭岩体样品采自高岭村附近及图们江沿岸。

在野外基岩露头处采集锆石测年样品(YH04: E129°25'

17°N42°26'6", N-5: E129°20'00"N42°25'39"),较新鲜,锆石挑选在河北省廊坊市区域地质调查研究所进行。将样品水洗并晾干,后粉碎至 80~100 目,通过淘洗和电磁方法对锆石进行挑选。在双目镜下选择裂隙和包体少、表面洁净的锆石 100~150 粒进行制靶。再对样靶打磨和抛光后采集反射光、透射光和阴极发光图像。其中样品 YH04 的制靶、反射光、透射光和阴极发光的采集在北京离子探针中心完成,锆石 U-Pb 同位素分析在天津地质矿产所同位素实验室完成,所用仪器为 Thermo FisHer 公司制造的 Neptune 型 LA-MC-ICPMS 和 ESI 公司生产的 UP193-FX ArF 准分子激光器联机。用 193nm 激光器对锆石进行剥蚀的深度为 20~40 μ m,激光剥蚀斑束直径 35 μ m。应用 TEMORA 和 GJ-1 作为外部锆石年龄标准进行分馏校正,元素含量则采用玻璃标样 NIST SRM610 作为外标(李怀坤等,2010)。样品 N-5 的制靶、反射光、透射光和阴极发光的采集以及锆石 U-Pb 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石样品测年在 Agilent7500 型 ICP-MS 和 ComPex102 ArF 准分子激光器以及 GeoLas200M 光学系统联机下进行,对锆石样品分析的激光束剥蚀深度为 20~40 μ m,直径为 30 μ m。将国际标准锆石 91500 作为锆石年龄外标标准物质,元素含量则采用 NIST SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标(王兴安等,2012; Yuan *et al.*, 2004)。通过 Anderson(2002)的方法对两个年龄样实验测得数据进行同位素比值校正以去除普通铅的影响,锆石年

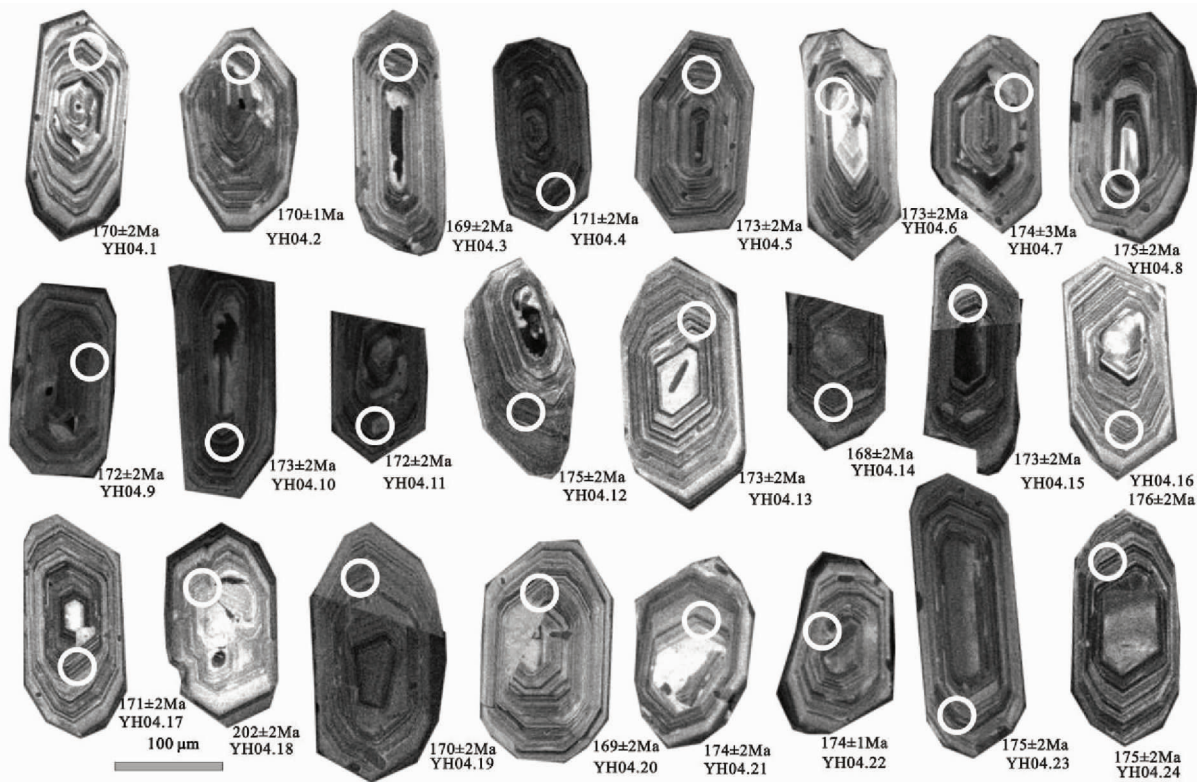


图 3 中侏罗世二长花岗岩锆石 CL 图像(YH04)

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircons from the Middle Jurassic monzogranite (YH04)

表 1 延边地区高岭岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data for Gaoling pluton in Yanbian area

测点号	²³² Th ($\times 10^{-6}$)	²³⁸ U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)			
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ
N-5.1	1092	2253	0.48	0.05218	0.00104	0.1909	0.00292	0.02674	0.00023	177	2	170	1
N-5.2	1096	2583	0.42	0.05207	0.0007	0.19338	0.00259	0.02689	0.00017	180	2	171	1
N-5.3	1963	3119	0.63	0.05318	0.00129	0.1978	0.00463	0.02698	0.00016	183	4	172	1
N-5.4	1154	2423	0.48	0.04987	0.0007	0.18364	0.0025	0.02666	0.00013	171	2	169.6	0.8
N-5.5	884	2018	0.44	0.0512	0.00076	0.18961	0.00286	0.02679	0.00017	176	2	170	1
N-5.6	1085	2197	0.49	0.05263	0.00119	0.19335	0.00423	0.02664	0.00015	179	4	169.5	0.9
N-5.7	921	2525	0.36	0.05259	0.00116	0.19648	0.00415	0.0271	0.00018	182	4	172	1
N-5.8	1246	1916	0.65	0.05358	0.0013	0.20068	0.00429	0.0272	0.00019	186	4	173	1
N-5.9	1202	2120	0.57	0.05157	0.00087	0.19296	0.00337	0.02704	0.00021	179	3	172	1
N-5.10	693	1749	0.40	0.05393	0.0011	0.20173	0.00401	0.02712	0.00022	187	3	172	1
N-5.11	722	1811	0.40	0.05159	0.00083	0.19258	0.00268	0.02717	0.00016	179	2	173	1
N-5.12	379	1333	0.28	0.05106	0.00085	0.19034	0.00337	0.027	0.00016	177	3	172	1
N-5.13	1205	2639	0.46	0.05209	0.00186	0.188	0.00651	0.02618	0.00022	175	6	167	1
N-5.14	791	1625	0.49	0.04961	0.00131	0.18507	0.00476	0.02706	0.00017	172	4	172	1
N-5.15	860	1908	0.45	0.05341	0.0011	0.19846	0.0036	0.02705	0.00016	184	3	172.1	1
N-5.16	848	2047	0.41	0.05075	0.00082	0.18968	0.00325	0.02706	0.00019	176	3	172	1
N-5.17	1142	1967	0.58	0.05105	0.00149	0.18756	0.00532	0.02665	0.00018	175	5	170	1
N-5.18	561	1708	0.33	0.05229	0.00172	0.19111	0.00612	0.0265	0.00019	178	5	169	1
N-5.19	1126	2245	0.50	0.05053	0.00076	0.18782	0.0031	0.02686	0.00023	175	3	171	1
N-5.20	1847	3196	0.58	0.05275	0.0022	0.19634	0.0092	0.02679	0.00017	182	8	170	1
N-5.21	1303	2419	0.54	0.05041	0.00093	0.18713	0.00327	0.02683	0.00016	174	3	170.7	1
YH04.1	19	657	0.47	0.0513	0.0011	0.1893	0.0043	0.0268	0.0003	176	4	170	2
YH04.2	21	731	0.44	0.0504	0.0008	0.1854	0.0028	0.0266	0.0002	173	3	170	1
YH04.3	21	714	0.57	0.0465	0.0007	0.1706	0.0027	0.0266	0.0003	160	3	169	2
YH04.4	23	827	0.40	0.0500	0.0007	0.1854	0.0027	0.0269	0.0002	173	3	171	2
YH04.5	15	522	0.49	0.0495	0.0011	0.1861	0.0040	0.0273	0.0003	173	4	173	2
YH04.6	10	349	0.38	0.0487	0.0019	0.1829	0.0073	0.0272	0.0003	171	7	173	2
YH04.7	9	328	0.39	0.0477	0.0015	0.1800	0.0060	0.0273	0.0004	168	6	174	3
YH04.8	22	756	0.46	0.0480	0.0008	0.1826	0.0030	0.0276	0.0003	170	3	175	2
YH04.9	18	651	0.29	0.0521	0.0009	0.1948	0.0035	0.0271	0.0003	181	3	172	2
YH04.10	26	911	0.41	0.0523	0.0006	0.1956	0.0023	0.0271	0.0003	181	2	173	2
YH04.11	20	716	0.45	0.0501	0.0009	0.1870	0.0032	0.0271	0.0002	174	3	172	2
YH04.12	22	756	0.38	0.0483	0.0010	0.1829	0.0041	0.0274	0.0003	171	4	175	2
YH04.13	14	511	0.40	0.0485	0.0012	0.1817	0.0044	0.0272	0.0003	170	4	173	2
YH04.14	13	463	0.40	0.0491	0.0016	0.1785	0.0062	0.0264	0.0003	167	6	168	2
YH04.15	23	745	0.60	0.0492	0.0007	0.1841	0.0027	0.0271	0.0004	172	3	173	2
YH04.16	20	649	0.54	0.0467	0.0008	0.1783	0.0032	0.0277	0.0003	167	3	176	2
YH04.17	14	473	0.46	0.0509	0.0013	0.1889	0.0051	0.0269	0.0003	176	5	171	2
YH04.18	9	299	0.16	0.0535	0.0021	0.2347	0.0104	0.0318	0.0003	214	9	202	2
YH04.19	14	478	0.49	0.0492	0.0012	0.1814	0.0047	0.0267	0.0003	169	4	170	2
YH04.20	16	549	0.52	0.0534	0.0010	0.1955	0.0037	0.0265	0.0004	181	3	169	2
YH04.21	9	326	0.30	0.0485	0.0015	0.1824	0.0060	0.0273	0.0003	170	6	174	2
YH04.22	9	301	0.46	0.0478	0.0018	0.1803	0.0076	0.0273	0.0002	168	7	174	1
YH04.23	11	387	0.47	0.0479	0.0011	0.1811	0.0046	0.0274	0.0003	169	4	175	2
YH04.24	13	430	0.50	0.0480	0.0012	0.1823	0.0046	0.0276	0.0003	170	4	175	2

龄协和图通过 Isoplot 3.0 (Ludwig, 2001) 绘制而成, 所得同位素比值年龄的误差均在 1 σ 。

在国家地质测试中心采用 X 射线荧光光谱仪对样品进

行微量元素分析, 通过等离子质谱仪 (X-series) 进行微量元素的分析。

本文 Sm-Nd 同位素测试工作在天津地质矿产研究所同

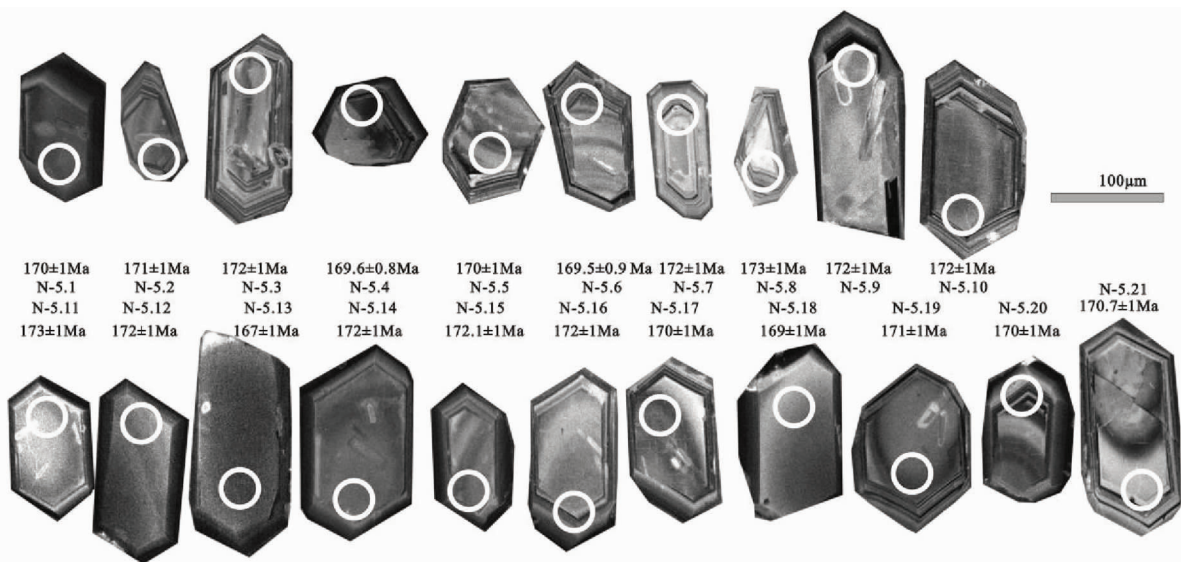


图4 中侏罗世二长花岗岩锆石 CL 图像(N-5)

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircons from the Middle Jurassic monzogranite (N-5)

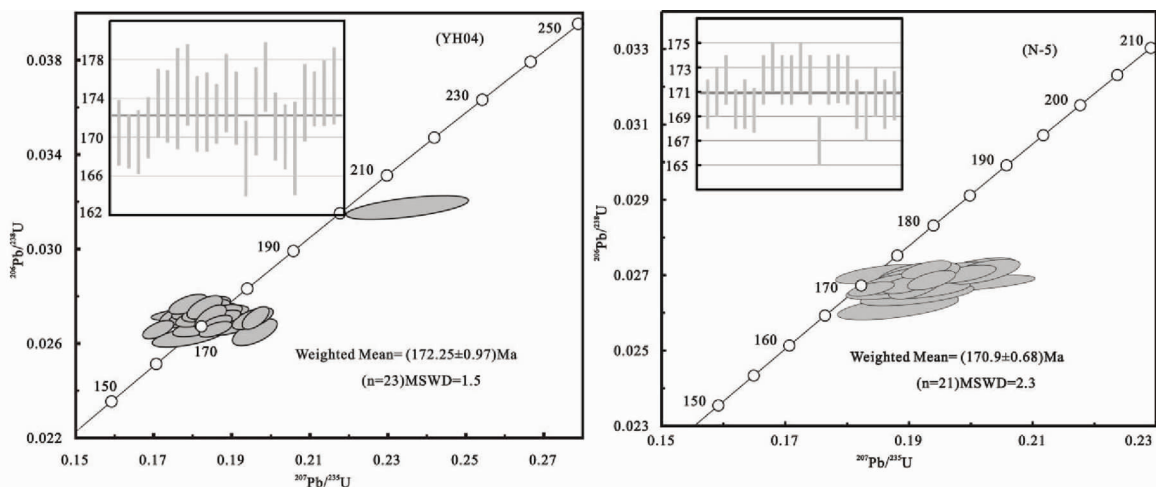


图5 高岭岩体中侏罗世二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 协和图和加权平均年龄图

Fig. 5 U-Pb concordia diagrams and the average age diagrams summarizing the LA-ICP-MS zircon data for the Middle Jurassic monzogranite from Gaoling pluton

位素实验室的 TRITON 热电离质谱仪(08-100016sb) 仪器上完成。在样品测试的整个过程中,所测定的 JNDI Nd 标样和 NBS-9 ^{87}Sr 标样的 Nd-Sr 同位素比值分别为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512104 \pm 0.000003 (\pm 2\sigma)$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710264 \pm 0.000004 (\pm 2\sigma)$ (贾丽琼等,2013)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

本次野外对高岭岩体取 YH04 和 N-5 两个样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析,分析结果见表 1。

YH04 样品中的锆石为自形晶,直径约 $50 \sim 200 \mu\text{m}$,具有明显的岩浆震荡环带(图 3),Th/U 比值为 $0.16 \sim 0.60$,暗示其为岩浆成因(Pupin, 1980; 吴元保和郑永飞,2004)。23 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄值介于 $168 \pm 2\text{Ma} \sim 176 \pm 2\text{Ma}$ 之间,1 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄值为 $202 \pm 2\text{Ma}$,应为捕获的早期锆石,23 个测点的加权平均年龄为 $172.25 \pm 0.97\text{Ma}$ 。

N-5 样品中的锆石也为自形晶-半自形晶,大小约 $80 \sim 200 \mu\text{m}$,具有岩浆震荡环带(图 4),其 Th/U 比值为 $0.28 \sim 0.65$,暗示其岩浆成因(Pupin, 1980; 吴元保和郑永飞,2004)。对样品中的 21 粒锆石进行锆石 U-Pb 测年,所得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于 $167 \pm 1\text{Ma} \sim 173 \pm 1\text{Ma}$ 之间,21 个测点的加权平均年龄为 $170.9 \pm 0.68\text{Ma}$ 。

表2 延边地区高岭岩体样品主量元素(wt%)、痕量元素($\times 10^{-6}$)和Sr-Nd同位素数据分析结果Table 2 Major element (wt%), trace element ($\times 10^{-6}$) and Sr-Nd isotopic data of Gaoling pluton in Yanbian area

样品号	2055-1	4020-1	N-5	YH02	Dh012	YH04	1016-1	YH01	平均值	中国东部 adakite
SiO ₂	69.60	72.20	71.00	74.30	70.80	70.00	71.40	70.70	71.25	66.28
TiO ₂	0.49	0.21	0.46	0.18	0.17	0.64	0.32	0.31	0.35	0.55
Al ₂ O ₃	15.10	14.09	14.80	13.90	15.80	14.60	15.20	15.60	14.99	15.89
Fe ₂ O ₃	1.01	0.82	1.01	0.68	0.83	1.27	0.86	0.84	0.92	
FeO	1.46	1.00	1.09	0.51	0.77	1.57	1.07	1.19	1.08	1.39
MnO	0.05	0.036	0.048	0.021	0.018	0.05	0.048	0.044	0.039	0.11
MgO	0.71	0.57	0.53	0.22	0.36	0.82	0.43	0.41	0.51	1.73
CaO	2.30	2.32	2.14	0.98	2.20	2.79	1.73	1.97	2.05	3.34
Na ₂ O	4.15	4.14	4.42	3.98	4.03	4.08	4.32	4.58	4.21	4.16
K ₂ O	3.83	3.05	3.64	4.50	4.46	3.37	3.84	3.58	3.78	3.63
P ₂ O ₅	0.14	0.10	0.11	0.06	0.06	0.18	0.10	0.11	0.11	0.26
H ₂ O ⁺	0.45	0.19	0.34	0.21	0.07	0.13	0.33	0.21	0.24	
CO ₂	0.30	0.09	0.10	0.18	0.12	0.12	0.10	0.10	0.14	
烧失量	0.80	0.39	0.44	0.45	0.21	0.25	0.44	0.31	0.41	
Total	100.39	100.02	100.13	100.17	99.90	99.87	100.19	99.95	100.08	
A/CNK	0.99	1.04	0.98	1.05	1.02	0.95	1.05	1.04	1.01	
Mg [#]	35	37	32	26	30	35	29	27	31	42
Na ₂ O/K ₂ O	1.08	1.36	1.2	0.88	0.9	1.21	1.12	1.28	1.13	1.33
Sc	2.81	2.14	2.82	1.28	1.46	3.79	2.13	1.75	2.27	
V	35.9	20.1	25.8	10.7	18.9	43.9	14.7	16.1	23.26	
Cr	7.94	8.78	3.63	2.88	10.4	7.59	4.4	3.98	6.20	
Co	4.03	2.72	3.09	1.13	1.66	4.53	2.12	2.12	2.68	
Ni	3.66	6.55	3.57	2.56	3.33	2.84	1.76	1.93	3.28	
Rb	103	61.5	134	177	76.6	100	149	114	114.39	
Cs	2.27	1.11	3.64	4.88	1.25	2.47	4.87	3.59	3.01	
Sr	359	723	335	221	514	481	446	549	453.5	751
Ba	442	1020	412	518	2570	464	618	824	858.5	
Zr	172	88.1	119	111	154	135	119	168	133.3	
Hf	4.35	2.2	3.29	3.14	3.53	3.54	3.63	5.09	3.60	
U	2.76	0.33	2.73	1.53	0.33	1.66	1.37	1.17	1.49	
Th	24.3	2.92	26.5	8.46	4.72	12.8	12.6	12.1	13.05	
Nb	5.6	3.74	9.06	4.78	3.68	7.14	7.4	7.39	6.10	
Ta	0.48	0.085	0.91	0.55	0.22	0.65	0.61	0.57	0.51	
Y	8.58	4.4	9.16	6.52	5.83	11	8.15	5.92	7.45	12.3
La	20.5	9.25	27.5	14.6	20.4	28.6	17	22.3	20.02	44.8
Ce	35.7	18.8	55.9	29.2	34	52.2	32.7	48.2	38.34	
Pr	4.04	1.89	5.99	3.18	3.21	6.54	3.45	4.35	4.08	
Nd	14.5	6.79	21.2	11	9.97	24.4	12.3	15	14.40	
Sm	2.63	1.22	3.76	1.95	1.32	4.29	2.17	2.29	2.45	
Eu	0.66	0.64	0.79	0.52	0.87	0.98	0.59	0.72	0.72	
Gd	1.89	1.01	2.55	1.38	1.17	2.8	1.81	1.88	1.81	
Tb	0.26	0.14	0.34	0.2	0.14	0.34	0.26	0.24	0.24	
Dy	1.3	0.75	1.53	1.05	0.76	1.9	1.28	1.07	1.21	
Ho	0.25	0.14	0.28	0.19	0.15	0.34	0.23	0.17	0.22	
Er	0.67	0.36	0.74	0.52	0.44	0.95	0.63	0.48	0.60	
Tm	0.1	0.056	0.12	0.084	0.07	0.14	0.1	0.078	0.094	
Yb	0.64	0.35	0.74	0.53	0.45	0.91	0.69	0.52	0.60	1.13
Lu	0.1	0.056	0.12	0.084	0.072	0.14	0.11	0.092	0.097	
LREE	78.03	38.59	115.1	60.45	69.77	117.01	68.21	92.86	80.01	
HREE	5.21	2.86	6.42	4.04	3.25	7.52	5.11	4.53	4.87	
ΣREE	83.24	41.45	121.6	64.49	73.02	124.5	73.32	97.39	84.88	
LREE/HREE	15	13	18	15	21	15	13	20	16.3	

续表 2

Continued Table 2

样品号	2055-1	4020-1	N-5	YH02	Dh012	YH04	1016-1	YH01	平均值	中国东部 adakite
$(La/Yb)_N$	21.6	17.82	25.05	18.57	30.56	21.19	16.61	28.91	22.54	30.7
δEu	0.91	1.76	0.78	0.97	2.14	0.86	0.91	1.06	1.17	
Sr/Y	42	164	36	34	88	44	55	93	69.5	
$^{87}Rb/^{86}Sr$	1.1507		1.4572	2.0859		0.5881				
$^{87}Sr/^{86}Sr$	0.706916		0.707816	0.709523		0.706746				
$2\sigma (\times 10^{-6})$	17		10	5		2				
$^{147}Sm/^{144}Nd$	0.1094		0.1075	0.1101		0.1082				
$^{143}Nd/^{144}Nd$	0.512521		0.512505	0.512525		0.512548				
$2\sigma (\times 10^{-6})$	9		2	8		2				
$I_{Sr} (171Ma)$	0.7039		0.7044	0.7046		0.7051				
$\varepsilon_{Nd}(t)$	-0.4		-0.6	-0.3		-0.5				
t_{DM1}	922		928	922		924				
t_{DM2}	989		1011	984		1001				
$f_{Sm/Nd}$	-0.44		-0.45	-0.44		-0.45				

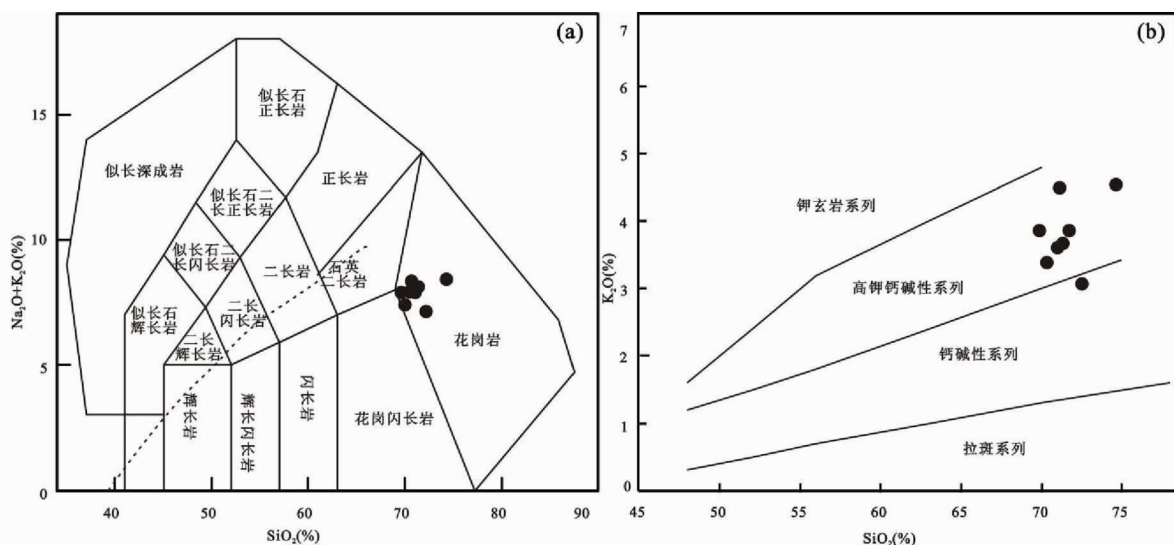


图 6 研究区中侏罗世二长花岗岩 TAS 图解(a)和 SiO_2 - K_2O 图解(b) (界线分别根据 Irvine and Baragar, 1971; Rickwood, 1989)

Fig. 6 Plots of SiO_2 vs. total alkali ($K_2O + Na_2O$) (TAS) (a) and SiO_2 vs. K_2O (b) for the Middle Jurassic monzogranite in the study area (the boundary lines after Irvine and Baragar (1971) and Rickwood (1989), respectively)

上述 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果可以代表高岭岩体的侵位年龄(图 5)。

4.2 地球化学

高岭岩体花岗岩的主、微量元素分析结果见表 2。

4.2.1 主量元素

8 个样品均具有较高的 SiO_2 (69.60% ~ 74.30%)、 Al_2O_3 (13.90% ~ 15.80%) 和 K_2O (3.05% ~ 4.50%) 含量及低的 MgO (0.22% ~ 0.82%) 含量和 $Mg^\#$ (26 ~ 37)。在 TAS 图解(图 6a)中, 8 个样品均落入亚碱性系列和花岗岩的分类中, 其 A/CNK 介于 0.95 ~ 1.05, 从准铝质向过铝质过渡。 $Na_2O/$

K_2O 为 0.88 ~ 1.36, 在 SiO_2 - K_2O 的图解(图 6b)中, 除了样品 4020-1 落入钙碱性系列外, 其余样品均落入了高钾钙碱性系列中。

4.2.2 微量元素

高岭岩体稀土元素总量含量中等 ($\sum REE = 41.45 \times 10^{-6} \sim 124.5 \times 10^{-6}$), 所有样品具有相似的稀土分配模式(图 7a)。 $(La/Yb)_N$ 比值为 16.61 ~ 30.56, LREE/HREE 比值为 13 ~ 21, 具有轻稀土元素相对富集, 重稀土元素强烈亏损的特点。重稀土元素的亏损可能暗示源区存在石榴石或角闪石。 δEu 为 0.78 ~ 2.14, 具有微弱的负 Eu 异常到正 Eu 异常, 结合其具有较高的 Sr 含量, 暗示源区未发生斜长石的

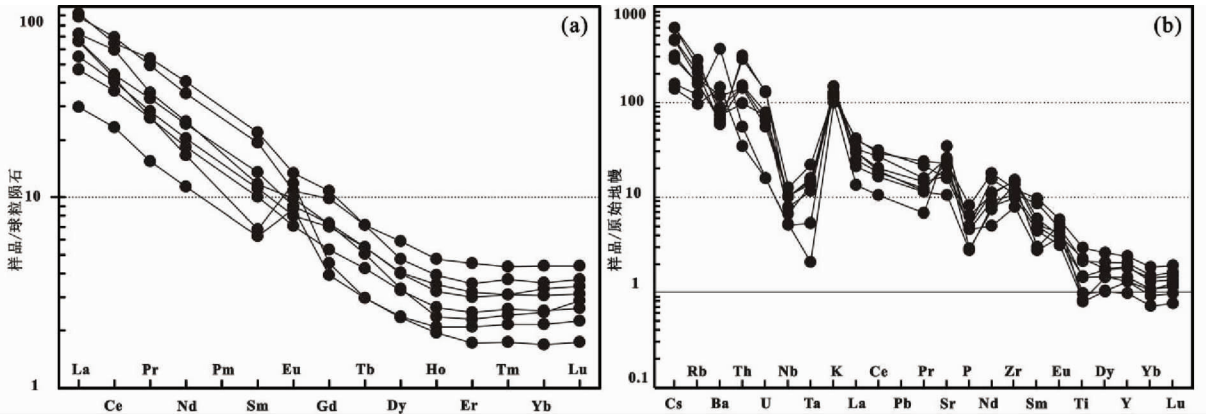


图7 中侏罗世二长花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a, 标准化值据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element spiderdiagrams (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) for the Middle Jurassic monzogranite

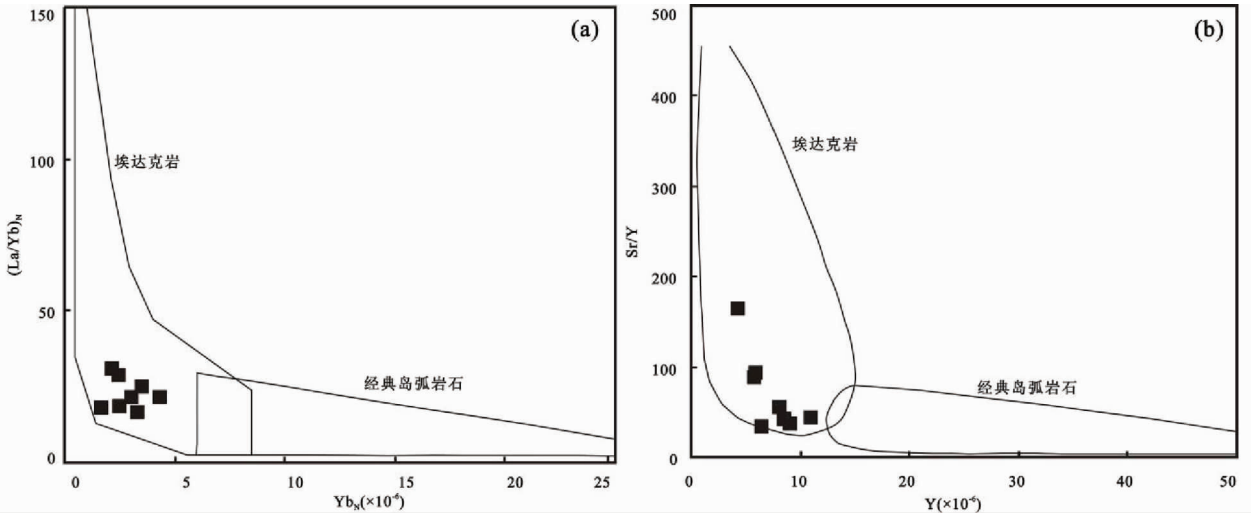


图8 中侏罗世二长花岗岩 Yb_N - $(La/Yb)_N$ (a) 和 Y - Sr/Y (b) 埃达克岩判别图(据 Defant and Drummond, 1990)

Fig.8 Plots of Yb_N vs. $(La/Yb)_N$ (a) and Y vs. Sr/Y (b) for the Middle Jurassic monzogranite (the ranges in the plots after Defant and Drummond, 1990)

分离结晶作用。而且重稀土元素强烈亏损和源区没有斜长石残留指示岩浆的起源深度应大于 55km, 为强烈加厚的地壳(刘红涛等, 2002)。高 Sr ($221 \times 10^{-6} \sim 723 \times 10^{-6}$)、低 Y ($4.4 \times 10^{-6} \sim 11 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($0.35 \times 10^{-6} \sim 0.91 \times 10^{-6}$) 及稀土元素分配模式图等特点与埃达克岩相类似, 同时在 $(Yb_N - (La/Yb)_N)$ (图 8a) 和 $(Y - Sr/Y)$ (图 8b) 图中, 样品均落入了埃达克岩的范围内。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 7b)中, 高岭岩体明显富集 Cs、Rb、Ba、K、Sr 等大离子亲石元素(LILE)以及 Th、U、Zr 高场强元素(HFSE), 亏损 Nb、Ta、P 高场强元素(HFSE)。高场强元素 Nb、Ta 的亏损反映了岩浆可能来源于地壳或者受到地壳物质的混染。

4.2.3 Sr-Nd 同位素

对高岭岩体二长花岗岩进行了 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析, 分析数据见表 2。

高岭岩体的 Rb 和 Sr 含量分别为 $61.5 \times 10^{-6} \sim 177 \times 10^{-6}$ 和 $221 \times 10^{-6} \sim 723 \times 10^{-6}$, 其 Rb/Sr 比值为 0.09 ~ 0.80; Sm 和 Nd 的含量分别为 $1.22 \times 10^{-6} \sim 4.29 \times 10^{-6}$ 和 $6.79 \times 10^{-6} \sim 24.4 \times 10^{-6}$, 其 Sm/Nd 比值为 0.13 ~ 0.18。高岭岩体现今的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 为 0.707 ~ 0.710, 根据岩体侵位年龄 ($t = 171$ Ma) 计算出高岭岩体的 I_{Sr} 值为 0.7039 ~ 0.7051, Nd 同位素比值为 0.512, 其单阶段模式年龄 t_{DM1} 为 922 ~ 928Ma, 两阶段模式年龄 t_{DM2} 为 984 ~ 1011Ma, 其 Sr-Nd 同位素特点与中亚造山带特点相似(Wu *et al.*, 2000; 洪大卫等, 2000)。

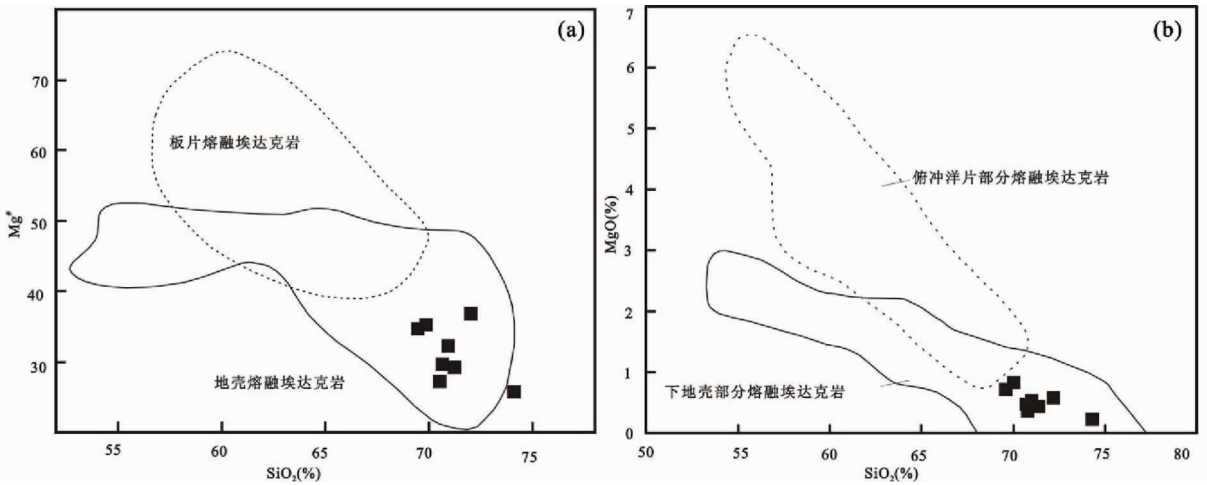


图9 中侏罗世二长花岗岩 SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ (a) 和 SiO_2 - MgO (b) 埃达克岩判别图(分别据 Sheppard *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2007)

Fig.9 The plots of SiO_2 vs. $\text{Mg}^\#$ (a) and SiO_2 vs. MgO (b) for the Middle Jurassic monzogranite (the ranges of two kinds of adakites in the plots after Sheppard *et al.* (2001) and Wang *et al.* (2007), respectively)

5 讨论

5.1 成因机制

埃达克岩是一套具有特殊地球化学特征的中酸性火山岩和侵入岩组合,其地球化学标志是: $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ 、 $\text{MgO} < 3\%$ (很少 $> 6\%$)、贫 K、Y 和 Yb ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2$ 、 $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$)、 $\text{Sr} \geq 400 \times 10^{-6}$ 、LREE 富集,无 Eu 异常或有轻微的负 Eu 异常, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.705$ (Defant and Drummond, 1990; Castillo and Drummond, 2012)。目前对埃达克岩的成因机制主要有四种:(1)与俯冲有关的大洋板块的部分熔融作用 (Defant and Drummond, 1990; Kay and Kay, 2002; Castillo, 2012);(2)同期玄武质母岩浆的地壳混染和分离结晶作用 (Castrillo *et al.*, 1999; Rooney *et al.*, 2011);(3)加厚下地壳的部分熔融作用 (Gao *et al.*, 2004; Kay and Kay, 2002; Xiong *et al.*, 2005; 张超等, 2012);(4)折沉下地壳的部分熔融作用 (Kay and Kay, 2002; Xu *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2006)。与典型的埃达克岩相比,近年来报道的中国东部埃达克岩更富 K_2O ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.88 \sim 1.36$),且 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.704$,张旗等(2001)根据其特点将其命名为大陆型(C型)埃达克岩,并推测是由于软流圈地幔玄武岩底侵到加厚的陆壳($> 50\text{km}$)底部导致下地壳基性岩部分熔融形成的。

高岭岩体具有高 Si 富 Al、Sr 和贫 Y 和 Yb 的特点,岩石地球化学特点类似于埃达克岩,其富集 Sr 和轻微的 Eu 异常表明斜长石在岩浆源区未发生分离结晶作用, Y 和 Yb 及 HREEs 的亏损可能与角闪石的分离结晶作用有关,而且 Nb 和 Ta 异常表明岩浆可能起源于下地壳。在 Y-Sr/Y 和 Yb_N -

(La/Yb)_N 图解中,样品落入了埃达克岩的范围内。其岩体高钾钙碱性、K 元素富集的特点不同于俯冲大洋板块部分熔融作用形成的 adakite。尽管该区新发现了早侏罗世晚期的基性岩体(待发表资料),但其野外仅呈岩株状出现,很难通过玄武质母岩浆的地壳混染和分离结晶作用来解释大面积的中侏罗世酸性花岗岩的成因。此外拆沉下地壳部分熔融作用生成的 adakite 通常具有较高的 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$,但高岭岩体的 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 较低。在 SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ (图 9a) 和 SiO_2 - MgO (图 9b) 的判别图解中,样品落入了地壳部分熔融埃达克岩的范围内。结合其 Nb、Ta 元素的亏损,暗示其可能起源于地壳加厚过程中下地壳部分熔融环境中,类似于大陆型(C型)埃达克岩。且重稀土的强烈亏损和微弱负 Eu 到正 Eu 异常暗示了其起源深度 $> 30\text{km}$ (吴福元等, 2007)。张超等(2012)根据大陆下地壳成分、含水基性岩体系部分熔融的基本原理和实验岩石学资料认为通过含水大陆下地壳的部分熔融可以得到类似大别山 C 型埃达克岩成分的熔体。综上所述加厚下地壳的部分熔融作用是高岭岩体最可能的成因机制。

高岭岩体具有较低的 I_{Sr} 值和负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,与兴蒙造山带中花岗岩的 Sr-Nd 同位素 (Wu *et al.*, 2000) 特点一致,其单阶段模式年龄 t_{DM1} 为 922 ~ 928Ma, 两阶段模式年龄 t_{DM2} 为 984 ~ 1011Ma, 其负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 较低的 I_{Sr} 值和较年轻的 t_{DM2} 模式年龄表明在高岭岩体形成过程中受到了新元古代增生物质的影响。且 $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值小于 0 而 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值位于 -10 和 0 之间的特点,表明高岭岩体母源岩浆来源于地壳物质部分熔融(韩吟文, 2003)。 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - I_{Sr} 图解(图 10)显示高岭岩体岩浆包含了 70% 左右的新生组分和 30% 的下地壳物质。

岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素特征表明高岭岩体岩浆应来自于加厚下地壳基性岩石的部分熔融,并受到了新元古

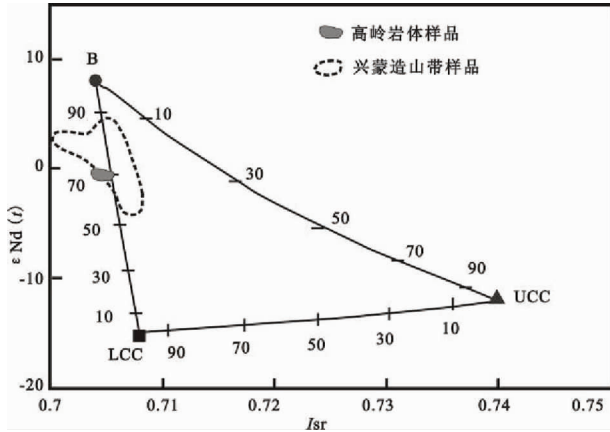


图10 高岭岩体中侏罗世二长花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ - I_{Sr} 图(兴蒙造山带花岗岩范围根据 Wu *et al.* (2000)

B-代表亏损新生组分的幔源基性岩石;LCC-代表地壳组分的下地壳;UCC-代表地壳组分的上地壳

Fig. 10 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. I_{Sr} diagram for the Middle Jurassic monzogranite from Gaoling pluton (the ranges of granitoids from XMOB after Wu *et al.*, 2000)

B-the mantle-derived basaltic rocks which represent the depleted juvenile component; LCC-lower continental crust which represents the crustal components; UCC-upper continental crust which represents the crustal components

代增生物质的影响。

5.2 构造环境

研究区位于华北板块北缘东段和滨太平洋构造域西侧,其特殊的地理位置对研究古亚洲洋和滨太平洋构造域的转换具有重要意义。近年来高精度锆石 U-Pb 测年结果表明东北地区分布有大量的中生代花岗岩(Wu *et al.*, 2011),但对其形成的构造背景仍存在较大的争议(吴福元等,1999;Wu *et al.*, 2011;孟庆丽和周永昶,1996;吴利仁,1985;邵济安等,2001;肖庆辉等,2010;Yu *et al.*, 2012)。产生争议的原因主要是对古亚洲洋构造域和滨太平洋构造域转换的时限不清,目前对其转换的时间主要有晚三叠世(崔盛芹等,1983;毕守业等,1995;赵院冬等,2009;张炯飞和祝洪臣,2000;刘兴桥等,2010;彭玉鲸等,2012;裴福萍等,2004)、早-中侏罗世(赵越,1994;翟明国等,2003;张连昌等,2010;孙德有等,2005;孙卫东等,2008;许文良等,2013;Yu *et al.*, 2012;Wu *et al.*, 2011)和晚侏罗世-白垩纪(张允平,2011;李超文等,2007)三种认识。

许文良等(2013)通过对中国东北地区中生代火山岩的年代学、岩石组合及其时空分布规律的研究,认为环太平洋构造体系对欧亚大陆下的俯冲作用始于早侏罗世,而蒙古-鄂霍次克构造体系在中生代晚期(170Ma和~145Ma)有两次重要的陆壳加厚过程且该构造体系影响的空间范围主要

在松辽盆地以西(可能包括松辽盆地的西部斜坡区)以及华北板块北缘(张允平,2011)。同时新的研究资料显示,黑龙江杂岩中存在160~220Ma的变质年龄(赵英利等,2010;Li *et al.*, 2010;Wu *et al.*, 2007),暗示佳木斯地体西缘在晚三叠世-中侏罗世经历了一次重要的构造热事件,同时吉黑东部还存在着173~190Ma钙碱性火山岩(许文良等,2008),166~220Ma的变质年龄及吉黑东部同时代的钙碱性火山岩的存在表明环太平洋构造体系在中侏罗世已经开始对吉黑东部地区进行俯冲。

尽管古亚洲洋在晚二叠世-早三叠世前已经沿西拉木伦-长春-延吉一线闭合(彭玉鲸等,2012;Wu *et al.*, 2011;孙德有等,2004;刘永江等,2010),但近年来的研究资料表明古亚洲洋闭合之后,华北板块与西伯利亚板块仍在持续碰撞,且一直持续到晚侏罗世(任战利等,2010;张允平,2011;张连昌等,2010;刘红涛等,2002;葛肖虹,1997;刘先文和申宁华,1994;邵济安等,1997;王五力和郭胜哲,2012)。在研究区西北侧的獐项到长仁一带发育了标志着造山带地壳进一步挤压和加厚的一系列相向倾斜的逆冲断层和糜棱岩的剪切滑动面(唐克东等,2004),其糜棱岩的年龄资料为183.4~143.3Ma(姚大全,1988)。东北西部地区在早-中侏罗世发育一系列近东西向展布的山间陆相沉积盆地,也暗示其在早-中侏罗世处于南北向挤压的地壳增厚构造背景(张兴洲等,2012)。

中侏罗世期间是南北大陆陆-陆碰撞汇聚、地壳岩石圈加厚时期,同时环太平洋构造体系在中侏罗世也已经开始对欧亚大陆俯冲。因此中生代期间华北板块北缘的吉林东部不仅受到环太平洋构造体系俯冲的作用,也可能受到南北大陆陆陆碰撞挤压的影响。吉黑地区的棉田、东清、朱敦店、大蒲柴河(165Ma)(刘葵等,2009)、大黑山、团结沟等地 adakite 岩的发现(张炯飞等,2004),暗示吉黑地区侏罗纪期间可能存在地壳加厚的地质现象。

位于吉林东部延边地区的高岭岩体,其侵位时代为中侏罗世,地球化学特点类似于加厚下地壳基性岩石部分熔融的形成的埃达克岩特点。结合区域构造演化,高岭岩体可能形成于地壳加厚的构造环境中,其侵位时的构造背景可能受到环太平洋构造体系俯冲和南北大陆持续汇聚的叠加影响。

6 结论

(1)高精度 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示, YH04 和 N-5 的锆石 U-Pb 加权平均年龄为 172.25 ± 0.97 Ma 和 170.9 ± 0.68 Ma,其侵位时代为中侏罗世。

(2)高岭岩体具有的高 Si 富 Al、Sr 和低 Y、Yb 及低 MgO 含量和 Mg# 的特点,与埃达克岩特征类似;同时具有较低的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和较年轻的 Nd 模式年龄。岩石地球化学特征表明高岭岩体岩浆可能起源于加厚下地壳基性岩石的部分熔融;且研究区新元古代时期存在地壳增生事件。

(3) 中侏罗世高岭岩体侵位构造环境受到了环太平洋构造域体系和南北大陆板块持续碰撞的叠加影响。在中侏罗世期间华北板块与西伯利亚板块的持续碰撞仍在继续, 且环太平洋构造体系在中侏罗世已经对中国东部开始影响。

致谢 感谢西北大学大陆动力学国家重点实验室、北京离子探针中心和天津地质矿产所同位素实验室在锆石制靶和 CL 图像采集以及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年中给予的支持; 衷心感谢给予帮助的王建教授。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Bi SY, Wang DR, Jia DC and Shao JB. 1995. The basic characteristics of the structure of the terrain in Jilin Province. *Jilin Geology*, 14(1): 1-14 (in Chinese with English abstract)
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry. Development in Geochemistry*. Amsterdam; Elsevier, 3-107
- Cao HH, Xu WL, Pei FP, Wang ZW, Wang F and Wang ZJ. 2013. Zircon U-Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusive rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block. *Lithos*, 170-171: 191-207
- Castillo PR, Janney PE and Solidum RU. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33-51
- Castillo PR. 2012. Adakite petrogenesis. *Lithos*, 134-135: 304-316
- Cui SQ and Li JR. 1983. On the Indosinian Movement of China's Peri-Pacific tectonic belt. *Acta Geologica Sinica*, 57(1): 51-61 (in Chinese with English abstract)
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665
- Dong SW, Zhang YQ, Chen XH, Long CX, Wang T, Yang ZY and Hu JM. 2008. The formation and deformational characteristics of East Asia multi-direction convergent tectonic system in Late Jurassic. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(3): 306-317 (in Chinese with English abstract)
- Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, Liu XM, Liu YS, Xu WL, Ling WL, Ayers J, Wang XC and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432(7019): 892-897
- Ge XH. 1990. Geotectonics and tectonic evolution of eastern Jilin Province. *Geoscience*, 4(1): 107-113 (in Chinese with English abstract)
- Geng SF, Liu P, Zheng HW, Wang ZY and Ju YJ. 2012. A tentative discussion and new recognition of Mesozoic geodynamic mechanism in eastern China. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1061-1068 (in Chinese with English abstract)
- Han YW. 2003. *Geochemistry*. Beijing: Geological Publishing House, 1-230 (in Chinese)
- Hong DW, Wang S, Xie XL and Zhang JS. 2000. Genesis of positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ granitoids in the Da Hinggan Mts.-Mongolia orogenic belt and growth continental crust. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441-456 (in Chinese with English abstract)
- Irvine TH and Baragar W. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523-548
- Jia LQ, Mo XX, Dong GW, Xu WY, Wang L, Guo XD, Wang ZH and Wei SG. 2013. Genesis of lamprophyres from Machangqing, western Yunnan: Constraints from geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1247-1260 (in Chinese with English abstract)
- Kay RW and Kay SM. 2002. Andean adakites: Three ways to make them. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 303-311
- Li CW, Guo F, Fan WM and Gao XF. 2007. Ar/Ar geochronological framework and tectonic significance of the Late Mesozoic volcanic rocks. *Science in China (Series D)*, 37(3): 319-330 (in Chinese)
- Li HK, Zhu SX, Xiang ZQ, Su WB, Lu SN, Zhou HY, Geng JZ, Li S and Yang FJ. 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131-2140 (in Chinese with English abstract)
- Li WM, Takasu A, Liu YJ and Guo XZ. 2010. Newly discovered garnet-barroisite schists from the Heilongjiang Complex in the Jiamusi Massif, northeastern China. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 105(2): 86-91
- Liu HT, Zhai MG, Liu JM and Sun SH. 2002. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Evolution from post-collisional to anorogenic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 433-448 (in Chinese with English abstract)
- Liu S, Hu RZ, Feng CX, Feng GY, Yu XF, Li C, Jia DC, Qi YQ and Wang T. 2009. Zircon U-Pb age, Hf isotopic compositions of Dapuchaihe adakites in eastern Jilin Province and their significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3153-3164 (in Chinese with English abstract)
- Liu XQ, Peng YJ, Yin CJ, Qi CD and Zhou XD. 2010. Three genetic-tectonic types and their mineral prospecting significances of Late Triassic-Early Cretaceous granites in Jilin Province. *Jilin Geology*, 24(1): 1-4 (in Chinese with English abstract)
- Liu XW and Shen NH. 1994. Mesozoic collision tectonics in eastern Jilin and Heilongjiang Provinces, Northeast China. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(1): 385-389 (in Chinese with English abstract)
- Liu YJ, Zhang XZ, Jin W, Chi XG, Wang CW, Ma ZH, Han GQ, Wen QB, Li W, Wang WD and Zhao XF. 2010. Late Paleozoic tectonic evolution in Northeast China. *Geology in China*, 37(4): 943-951 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. *Users manual for Isoplot/EX (Rev. 2.49)*: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1-55
- Meng QL and Zhou YC. 1996. The formation and evolution of magma for J_2 - K_1 volcanic-intrusive complex in eastern Yanbian, Jilin Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(1): 30-39 (in Chinese with English abstract)
- Pei FP, Xu WL and Jin K. 2004. Petro-geochemical characteristics and tectonic significance of Late Triassic volcanic rocks in Yanbian area, northeastern China. *Global Geology*, 23(1): 6-13 (in Chinese with English abstract)
- Peng YJ, Qi CD, Zhou XD, Lu XZ, Dong HC and Li Z. 2012. Transition from Paleo-Asian ocean domain to circum-pacific ocean domain for the Jihei composite orogenic belt: Time mark and relationship to global tectonics. *Geology and Resources*, 21(3): 261-265 (in Chinese with English abstract)
- Pupin JP. 1980. Zircon and granite petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73(3): 207-220
- Ren ZL, Cui JP, Shi Z, Bai FF and Li H. 2010. The Late Paleozoic tectonic evolution and later transformation in Northeast China. *Oil*

- and Gas Geology, 31(6): 734 – 742 (in Chinese with English abstract)
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247 – 263
- Rooney TO, Franceschi P and Hall CM. 2011. Water-saturated magmas in the Panama Canal region: A precursor to adakite-like magma generation? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(3): 373 – 388
- Shao JA, Mu BL, He GQ and Zhang LQ. 1997. Geological processes of the process of structural overlapping between Paleo-Asia domain and Paleo-Pacific domain in northern part of North China. *Science in China (Series D)*, 27(3): 390 – 394 (in Chinese)
- Shao JA, Liu FT, Chen H and Han QJ. 2001. Relationship between Mesozoic magmatism and subduction in Da Hinggan-Yanshan area. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 56 – 63 (in Chinese with English abstract)
- Sheppard S, Griffin TJ, Tyler IM and Page RW. 2001. High- and low-K granites and adakites at a Palaeoproterozoic plate boundary in northwestern Australia. *Journal of the Geological Society*, 158(3): 547 – 560
- Sun DY, Wu FY, Gao S and Lu XP. 2005. Confirmation of two episodes of A-type granite emplacement during Late Triassic and Early Jurassic in the central Jilin Province, and their constraints on the structural pattern of eastern Jilin-Heilongjiang area, China. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 263 – 275 (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 Ocean Basins: Geological Society of Special Publication*, London, 42(1): 313 – 345
- Sun WD, Ling MX, Wang FY, Ding X, Hu YH, Zhou JB and Yang XY. 2008. Pacific plate subduction and Mesozoic geological event in Eastern China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(3): 218 – 225 (in Chinese with English abstract)
- Tang KD, Shao JA, Li JC and Kang Z. 2004. Nature of the Yanbian suture zone and structure of Northeast Asia. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 885 – 891 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Derek AW, Zhao ZH, Xu JF, Bai ZH, Xiong XL, Dai TM, Li CF and Chu ZY. 2007. Petrogenesis of Carboniferous adakites and Nb-enriched, northern Tianshan Range (western China): Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia orogenic belt. *Chemical Geology*, 236: 42 – 46
- Wang WL and Guo SZ. 2010. The evolution and transformation of Paleo-Asia and Paleo-Pacific tectonic domain of Northeast China. *Geology and Resources*, 21(6): 27 – 34 (in Chinese with English abstract)
- Wang XA, Xu ZY, Liu ZH and Zhu K. 2012. 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)
- 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, Jahn BM, Wilde SA and Sun DY. 2000. Phanerozoic continental crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1–2): 89 – 113
- 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, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217 – 1238 (in Chinese with English abstract)
- 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
- Wu LR. 1985. Mesozoic granitoids in East China. *Acta Petrologica Sinica*, 1(1): 1 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genetic mineralogy of zircons and constraints about explains of U-Pb age of zircons. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589 – 1604 (in Chinese)
- Xiao QH, Li Y, Feng YF, Qiu RZ and Zhang Y. 2010. A preliminary study of the relationship between Mesozoic lithosphere evolution in eastern China and the subduction of the Pacific plate. *Geology in China*, 37(4): 1092 – 1101 (in Chinese with English abstract)
- Xiong XL, Adam J and Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218(3–4): 339 – 359
- Xu GY. 1993. The tectonic evolution of Paleo-Asiatic Ocean in the Northeast Asia area. *Jilin Geology*, 12(3): 1 – 8 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Shinjo R, Defant MJ, Wang Q and Rapp RP. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of East China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30(12): 1111 – 1114
- 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, Wang QH, Wang DY, Guo JH and Pei FP. 2006. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(4): 454 – 464
- Xu WL, Ge WC, Pei FP, Meng E, Yu Y and Yang DB. 2008. Geochronology frame and tectonic implications for Mesozoic volcanism in Northeast China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(Suppl. 1): 286 – 287 (in Chinese with English abstract)
- 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)
- Yao DQ. 1988. The research of early-middle displacement and deformation in Mesozoic in southwestern Mi-Fu Fault. *Liaoning Geological Journal*, 1(1): 16 – 34 (in Chinese)
- Yu JJ, Wang F, Xu WL, Gao FH and Pei FP. 2012. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an-Zhanguangcai Range, NE China, and its tectonic implications: Constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry. *Lithos*, 142: 256 – 266
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Günther D and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353 – 370
- Zhai MG, Zhu RX, Liu JM, Meng QR, Hou QL, Hu SB, Li Z, Zhang HF and Liu W. 2003. The key time limit about Transformation of the tectonic regime in eastern North China. *Science in China (Series D)*, 33(10): 913 – 920 (in Chinese)
- Zhang C, Ma CQ and Francois H. 2012. Partial melting of hydrous lower continental crust: Discussion on the petrogenesis of C-type adakites

- from the Dabie orogen. *Geological Journal of China Universities*, 18 (1): 41–51 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JF and Zhu HC. 2000. A preliminary study on the genetic types and tectonic setting of granites in Yanbian area. *Liaoning Geology*, 17(1): 25–33 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JF, Li ZT and Jin CZ. 2004. Adakites in northeastern China and their mineralized implications. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 361–368 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC, Wu HY, Xiang P, Zhang XJ, Chen ZG and Wan B. 2010. Ore-forming processes and mineralization of complex tectonic system during the Mesozoic: A case from Xilamulun Cu-Mo metallogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1351–1362 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qian Q, Wang EQ, Wang Y, Zhao TP, Hao J and Guo GJ. 2001. An east China Plateau in Middle-Late Yanshanian Period implication from adakites. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 248–255 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XZ, Ma YX, Chi XG, Zhang FX, Sun YW, Guo Y and Zeng Z. 2012. Discussion on Phanerozoic tectonic evolution in northeastern China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1269–1285 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YB, Wu FY, Wilde SA, Zhai MG, Lu XP and Sun DY. 2004. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of 'Early Paleozoic' granitoids at Yanbian, Jilin Province, Northeast China. *Island Arc*, 13(4): 484–505
- Zhang YP. 2011. Main characteristics of Late Jurassic-Cretaceous tectonic framework in Northeast Asia. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1267–1284 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Yang ZY and Ma XH. 1994. Geotectonic transition from Paleo-Asian system and Paleotethyan system to Paleo-Pacific active continental margin in eastern Asia. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 105–119 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YD, Chi XG, Che JY, Liu JF and Zhao Z. 2009. Geochemical characteristics and tectonic setting of Late Triassic granites in Yanbian-Dongning area. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(3): 425–434 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YL, Liu YJ, Li WM, Wen QB and Han GQ. 2010. High-pressure metamorphism in the Mudanjiang area, southern Jiamusi massif: Petrological and geochronological characteristics of the Heilongjiang complex, China. *Geological Bulletin of China*, 29(2–3): 243–253 (in Chinese with English abstract)
2013. 滇西马厂箐煌斑岩成因: 地球化学、年代学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素约束. *岩石学报*, 29(4): 1247–1260
- 李超文, 郭锋, 范蔚若, 高晓峰. 2007. 延吉地区晚中生代火山岩的 Ar-Ar 年代学格架及其大地构造意义. *中国科学(D 辑)*, 37(3): 319–330
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨锋杰. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束. *岩石学报*, 26(7): 2131–2140
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山. *岩石学报*, 18(4): 433–448
- 刘燊, 胡瑞忠, 冯彩霞, 冯光英, 于晓飞, 李才, 贾大成, 齐有强, 王涛. 2009. 吉林东部大蒲柴河 adakites 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其意义. *岩石学报*, 25(12): 3153–3164
- 刘先文, 申宁华. 1994. 吉黑东部中生代两种机制的碰撞构造. *长春地质学院学报*, 24(4): 385–389
- 刘兴桥, 彭玉鲸, 殷长建, 齐成栋, 周晓东. 2010. 吉林省晚三叠世-早白垩世花岗岩类三大成因构造类型及其地质找矿意义. *吉林地质*, 24(1): 1–4
- 刘永江, 张兴洲, 金巍, 迟效国, 王成文, 马志红, 韩国卿, 温泉波, 李伟, 王文弟, 赵喜峰. 2010. 东北地区晚古生代区域构造演化. *中国地质*, 37(4): 943–951
- 孟庆丽, 周永昶. 1996. 吉林延边东部 J₂-K₁ 火山-侵入杂岩岩浆的生成与演化. *岩石矿物学杂志*, 15(1): 30–39
- 裴福萍, 许文良, 靳克. 2004. 延边地区晚三叠世火山岩的岩石地球化学特征及其构造意义. *世界地质*, 23(1): 6–13
- 彭玉鲸, 齐成栋, 周晓东, 卢兴洲, 董辰辰, 李壮. 2012. 吉黑复合造山带古亚洲洋向滨太平洋构造域转换: 时间标志与全球构造的联系. *地质与资源*, 21(3): 261–265
- 任战利, 崔军平, 史政, 白奋飞, 李浩. 2010. 中国东北地区晚古生代构造演化及后期改造. *石油与天然气地质*, 31(6): 734–742
- 邵济安, 牟保磊, 何国琦, 张履桥. 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. *中国科学(D 辑)*, 27(5): 390–394
- 邵济安, 刘福田, 陈辉, 韩庆军. 2001. 大兴安岭-燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系. *地质学报*, 75(1): 56–63
- 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
- 孙德有, 吴福元, 高山, 路孝平. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约. *地学前缘*, 12(2): 263–275
- 孙卫东, 凌明星, 汪方跃, 丁兴, 胡艳华, 周继彬, 杨晓勇. 2008. 太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件. *矿物岩石地球化学通报*, 27(3): 218–225
- 唐克东, 邵济安, 李景春, 康庄. 2004. 吉林延边缝合带的性质与东北亚构造. *地质通报*, 23(9): 885–891
- 王五力, 郭胜哲. 2012. 中国东北古亚洲与古太平洋构造域演化与转换. *地质与资源*, 21(1): 27–34
- 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 同位素年

附中文参考文献

- 毕守业, 王德荣, 贾大成, 邵建波. 1995. 吉林省地体构造的基本特征. *吉林地质*, 14(1): 1–14
- 崔盛芹, 李锦蓉. 1983. 试论中国滨太平洋带的印支运动. *地质学报*, 57(1): 51–61
- 董树文, 张岳桥, 陈宣华, 龙长兴, 王涛, 杨振宇, 胡健民. 2008. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征. *地球学报*, 29(3): 306–317
- 葛肖虹. 1990. 吉林省东部的大地构造环境与构造演化轮廓. *现代地质*, 4(1): 107–113
- 耿树芳, 刘平, 郑洪伟, 王振洋, 尉远景. 2012. 对中国东部中生代动力学机制的新认识. *地质通报*, 31(7): 1061–1068
- 韩吟文. 2003. *地球化学*. 北京: 地质出版社, 1–230
- 洪大卫, 王式, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. *地学前缘*, 7(2): 441–456
- 贾丽琼, 莫宣学, 董国臣, 徐文艺, 王梁, 郭晓东, 王治华, 韦少港.

- 代学的制约. 岩石学报, 28(8): 2647-2655
- 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
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238
- 吴利仁. 1985. 中国东部中生代花岗岩类. 岩石学报, 1(1): 1-10
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589-1604
- 肖庆辉, 刘勇, 冯艳芳, 邱瑞照, 张昱. 2010. 中国东部中生代岩石圈演化与太平洋板块俯冲消减关系的讨论. 中国地质, 37(4): 1092-1101
- 徐公愉. 1993. 东北亚地区古亚洲洋的构造演化特点. 吉林地质, 12(3): 1-8
- 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质岩石的年代学与地球化学及其构造意义. 岩石学报, 29(2): 354-368
- 许文良, 葛文春, 裴福萍, 孟恩, 于洋, 杨德斌. 2008. 东北地区中生代火山作用的年代学格架及其构造意义. 矿物岩石地球化学通报, 27(S1): 286-287
- 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
- 姚大全. 1988. 密抚断裂带西南段中生代早中期变质与变形的研究. 辽宁地质学报, (1): 16-34
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学(D辑), 33(10): 913-920
- 张超, 马昌前, Francois H. 2012. 含水大陆下地壳的部分熔融: 大别山 C 型埃达克岩成因探讨. 高校地质学报, 18(1): 41-51
- 张炯飞, 祝洪臣. 2000. 延边地区花岗岩的成因类型及其形成的大地构造环境. 辽宁地质, 17(1): 25-33
- 张炯飞, 李之彤, 金成洙. 2004. 中国东北部地区埃达克岩及其成矿意义. 岩石学报, 20(2): 361-368
- 张连昌, 吴华英, 相鹏, 张晓静, 陈志广, 万博. 2010. 中生代复杂构造体系的成矿过程与成矿作用——以华北大陆北缘西拉木伦钼铜多金属成矿带为例. 岩石学报, 26(5): 1351-1362
- 张旗, 钱青, 王二七, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 2001. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. 地质科学, 36(2): 248-255
- 张兴洲, 马玉霞, 迟效国, 张凤旭, 孙跃武, 郭冶, 曾振. 2012. 东北及内蒙古东部地区显生宙构造演化的有关问题. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1269-1285
- 张允平. 2011. 东北亚地区晚侏罗-白垩纪构造格架主体特点. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5): 1267-1284
- 赵英利, 刘永江, 李伟民, 温泉波, 韩国卿. 2010. 佳木斯地块南缘牡丹江地区高压变质作用: 黑龙江杂岩的岩石学和地质年代学. 地质通报, 29(2-3): 243-253
- 赵院冬, 迟效国, 车继英, 刘建峰, 赵芝. 2009. 延边-东宁地区晚三叠世花岗岩地球化学特征及其大地构造背景. 吉林大学学报(地球科学版), 39(3): 425-434
- 赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, 29(2): 105-119