

中亚造山带东段南缘早志留世岩体锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义*

白新会¹ 徐仲元^{1**} 刘正宏¹ 辛后田² 王挽琼³ 王新¹ 雷聪聪¹

BAI XinHui¹, XU ZhongYuan^{1**}, LIU ZhengHong¹, XIN HouTian², WANG WanQiong³, WANG Xin¹ and LEI CongCong¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

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

2. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2014-03-01 收稿, 2014-11-15 改回.

Bai XH, Xu ZY, Liu ZH, Xin HT, Wang WQ, Wang X and Lei CC. 2015. Zircon U-Pb dating, geochemistry and geological significance of the Early Silurian plutons from the southeastern margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1):67–79

Abstract We present the detailed petrography feature, geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the Early Silurian Taigushengmiao pluton and the Kulunhada pluton from the central-southern margin of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB). The zircon U-Pb ages of 442.6 ± 2.4 Ma and 434.2 ± 2.2 Ma have been obtained from the Taigushengmiao tonalite and the Kulunhada quartz diorite, respectively, indicating that these plutons formed in Early Silurian. The geochemical characteristics of the Taigushengmiao tonalite are similar to those of typical adakites. For example, the tonalites have $\text{SiO}_2 > 56\%$ (70.02% ~ 70.51%), $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ (15.99% ~ 16.37%), $\text{MgO} < 3\%$ (0.56% ~ 0.83%), $\text{Na}_2\text{O} > 3\%$ (4.33% ~ 4.66%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 0.5$ (0.3 ~ 0.4), $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ (681×10^{-6} ~ 783×10^{-6}), $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ (0.6×10^{-6} ~ 0.9×10^{-6}), $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ (5.4×10^{-6} ~ 9.3×10^{-6}). Compared with the Taigushengmiao tonalites, the Kulunhada quartz diorites exhibit $\text{SiO}_2 = 57.92\% \sim 66.78\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.91\% \sim 18.26\%$, $\text{MgO} = 1.17\% \sim 2.31\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 3.29\% \sim 4.36\%$, $\text{K}_2\text{O} = 1.43\% \sim 3.09\%$. It suggests that the Taigushengmiao area occurred subduction event in the Early Silurian. The Taigushengmiao pluton may be the product of partial melting of oceanic crust, but the Kulunhada pluton may be the mixture product of partial melting oceanic crust which is earlier subduction and the partial melting mantle wedge.

Key words Adakitic rocks; Zircon U-Pb; Early Silurian; CAOB; Paleo-Asian Ocean

摘要 本文报道了分布于中亚造山带南缘苏尼特右旗太古生庙地区太古生庙岩体和库伦哈达岩体的岩相学、地球化学和年代学特征,以讨论该岩体的形成时代、岩石成因及其构造环境。锆石 U-Pb 定年结果显示,太古生庙英云闪长岩结晶年龄为 442.6 ± 2.4 Ma,库伦哈达石英闪长岩结晶年龄为 434.2 ± 2.2 Ma,说明太古生庙地区早古生代存在岩浆活动。其中太古生庙岩体地球化学特征类似于典型的埃达克岩,其 SiO_2 含量 $> 56\%$ (70.02% ~ 70.51%), Al_2O_3 含量 $\geq 15\%$ (15.99% ~ 16.37%), $\text{MgO} < 3\%$ (0.56% ~ 0.83%), $\text{Na}_2\text{O} > 3\%$ (4.33% ~ 4.66%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 < 0.5 (0.3 ~ 0.4);在微量元素特征方面, $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ (681×10^{-6} ~ 783×10^{-6}), $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ (0.6×10^{-6} ~ 0.9×10^{-6}), $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ (5.4×10^{-6} ~ 9.3×10^{-6}),无明显的 Eu 异常。库伦哈达岩体与太古生庙岩体相比, SiO_2 含量较低 (57.92% ~ 66.78%), Al_2O_3 为相当 (14.91% ~

* 本文受国家自然科学基金项目(41272223,41402169)和中国地质调查局项目(1212011120709,1212011220459,1212011085252)联合资助。

第一作者简介:白新会,男,1990年生,硕士生,构造地质学专业,E-mail: 996531881@qq.com

** 通讯作者:徐仲元,男,1963年生,教授,构造地质学专业,主要从事前寒武纪构造研究,E-mail: xuzhy@jlu.edu.cn

18.26%), MgO 含量为 1.17% ~ 2.31%, Na₂O 含量为 3.29% ~ 4.36%, K₂O 含量为 1.43% ~ 3.09%; 在微量元素判别图解中, 库伦哈达岩体的岩石样品投图位于埃达克岩和典型的岛弧型火山岩的叠加区域, 而太古生庙岩体样品全部落入埃达克岩区域内, 太古生庙岩体可能是洋壳部分熔融的产物, 而库伦哈达岩体可能是早期俯冲的洋壳部分熔融的产物混染了部分熔融的地幔楔之后形成了这种具有正常岛弧岩浆特征的岩石, 其形成的环境为岛弧环境。

关键词 埃达克质岩石; 锆石 U-Pb; 早志留世; 中亚造山带; 古亚洲洋

中图法分类号 P588.122; P597.3

1 引言

造山带是地球上构造活动最剧烈的地区, 因此也一直是地质学界关注的焦点。中亚造山带作为世界上最大的显生宙造山带之一, 因其复杂的多期次俯冲碰撞一直为地质学家所关注(Tang, 1990; 邵济安, 1991; 唐克东和张允平, 1991; 陈斌和徐备, 1996; 徐备等, 2001; Xiao *et al.*, 2003; Jian *et al.*, 2008, 2010, 2012; 李锦轶等, 2009; 张拴宏等, 2010; 赵越等, 2010; Zhang *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2013)。古亚洲洋的消减闭合, 致使西伯利亚板块南缘与华北板块北缘碰撞拼贴形成了兴蒙造山带, 即中亚造山带的中段, 因此从古亚洲洋的消减入手研究中亚造山带和华北板块北缘的演化不失为一条有效途径。

前人研究认为, 晚元古代开始, 古亚洲洋向南北两侧俯冲, 直至古亚洲洋海盆大部分闭合, 导致西伯利亚板块同中朝板块发生碰撞。大多数学者(王玉净和樊志勇, 1997; 李锦轶等, 2007, 2009; Jian *et al.*, 2008; 童英等, 2010; 王挽琼等, 2013)认为碰撞位置在索伦山-西拉木伦一线, 但对于古亚洲洋俯冲的时限问题存在较大争议: 唐克东和邵济安(1996)根据古亚洲洋区蛇绿岩的特征, 认为古亚洲洋的俯冲活动发生在寒武纪-奥陶纪, 在泥盆纪-早石炭世初, 大洋闭合; Jian *et al.* (2010)认为中亚造山带中南部的演化可分为早古生代的俯冲碰撞和二叠纪的俯冲碰撞两个独立事件; 很多学者(Chen *et al.*, 2000, 2009; Li, 2006; 李锦轶等, 2007; Jian *et al.*, 2008, 2010; Xiao *et al.*, 2009)均认为古亚洲洋闭合于二叠纪-三叠纪; 研究区内(或附近)存在早古生代俯冲事件是不争的事实(陈斌和徐备, 1996; 许立权等, 2003; 陶继雄等, 2005; 刘敦一等, 2003; 秦亚等, 2013), 但研究区内与俯冲相关的早古生代岩体的分布范围、岩石类型、成岩机制及构造背景都需要进一步研究。

本文研究区位于中亚造山带东段南缘, 在 1:25 万苏尼特右旗幅(吉林大学地质调查院, 2012^①)区调修测过程中, 在太古生庙地区发现了一套以英云闪长岩和石英闪长岩为主的早志留世岩体, 以其出露的地理位置, 将英云闪长岩岩体命名为太古生庙岩体, 将石英闪长岩岩体命名为库伦哈达岩体。内蒙古自治区地质局区域地质测量队(1976^②)据野外地质体接触关系将其时代划为 γ_0s^1 , 之后尚未报道过其详细的年代学和地球化学特征, 研究该套岩体对讨论中亚造山带和华北克拉通北缘构造演化有一定的制约。因此本文结

合太古生庙岩体和库伦哈达岩体的岩相学、地球化学和年代学特征, 对其构造意义进行讨论。

2 区域地质背景

研究区位于中亚造山带南缘、白乃庙岛弧带西段(Xiao *et al.*, 2003), 紧邻华北克拉通北部边缘, 北侧为温都尔庙增生杂岩带(图 1a); 研究区内发育两条东西向的大断裂: 徐尼乌苏断裂和温都尔庙断裂, 据此将研究区划分为三个构造单元, 徐尼乌苏断裂以南为中新元古代大陆边缘裂谷带; 徐尼乌苏断裂和温都尔庙断裂之间为早古生代造山带; 温都尔庙断裂以北为温都尔庙大洋岩石圈残片(陈琦等, 1993)。

中新元古代大陆边缘裂谷带内出露的地层主要有白云鄂博群白音宝拉格组、呼吉尔图组和志留系西别河组: 白云鄂博群地层并非原地沉积, 而是由白乃庙逆冲推覆构造形成(李刚等, 2012); 西别河组为一套砂岩、粉砂岩组合; 未见早古生代岩体出露。

早古生代造山带内发育的地层有早古生代白乃庙群、志留系徐尼乌苏组和西别河组: 白乃庙群为一套原岩由中基性-酸性火山岩夹泥岩组成的弧后火山沉积建造; 徐尼乌苏组角度不整合覆盖于白乃庙群之上, 为一套浅变质的碎屑岩; 西别河组为一套滨浅海相磨拉石沉积, 发育大量动植物化石, 其广泛不整合在蛇绿杂岩和岛弧火山岩之上(张允平等, 2010)。侵入岩发育有奥陶纪的奥长花岗岩、石榴石白云母花岗岩、片麻状石英闪长岩、辉长岩以及蛇纹石化橄辉岩等, 岩性较为丰富, 主要分布在白乃庙以北以及温都尔庙地区附近, 侵入岩还包括志留纪的太古生庙英云闪长岩和库伦哈达石英闪长岩, 该套志留纪的岩体呈近东西向沿敦达乌苏-那日图-太古生庙-古神庙一带分布, 其侵入到奥陶纪的花岗岩之中, 之后被二叠纪的多期花岗岩类侵入。

温都尔庙断裂以北发育的主要为温都尔庙群: 为由枕状变玄武岩、绿泥蓝闪石片岩、石英岩和绿泥石英片岩等组成的一套包含大洋洋壳、洋内弧等不同时代和成因的增生杂岩(李承东等, 2012)。

太古生庙岩体出露于太古生庙地区(图 1b), 出露面积 195km², 其主体岩性为英云闪长岩, 见有侵入其中的二叠纪

① 吉林大学地质调查院. 2012. 苏尼特右旗幅 1:25 万地质图

② 内蒙古自治区地质局区域地质测量队. 1976. 镶黄旗幅 1:20 万区域地质调查报告

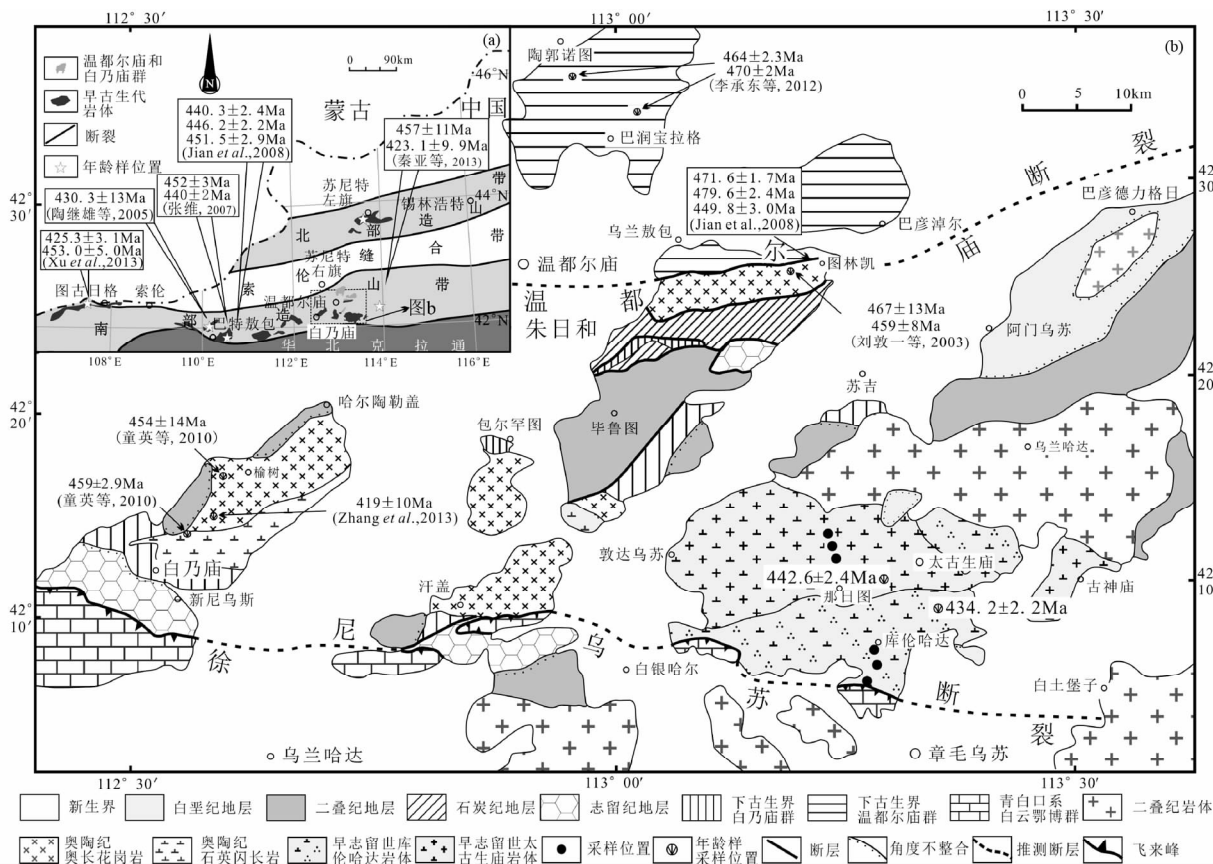


图1 太古生庙地区地质略图(b)和大地构造位置(a,据 Zhang *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2013 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Taigushengmiao area (b) and tectonic position (a, modified after Zhang *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2013)

花岗质小岩枝或岩株;库伦哈达岩体与太古生庙岩体伴生, 裸露面积为 123km²,分布集中,在英云闪长岩中见有石英闪长岩岩株,其主体岩性为石英闪长岩,其岩性不均匀,局部为黑云母石英闪长岩,且岩石蚀变较强。在库伦哈达岩体南端见有呈飞来峰出露的白云鄂博群地层。

3 岩相学特征

太古生庙岩体的岩性为英云闪长岩(图 2a-d),其风化面灰白色-浅黄褐色(图 2b),新鲜面灰色,中粗粒花岗结构,块状构造。主要矿物为斜长石(60%~65%,绢云母化)、碱性长石(条纹长石、微斜长石等,5%)、石英(25%)和黑云母(5%~10%,绿泥石化),见少量角闪石,副矿物主要为自形锆石和磁铁矿。

库伦哈达岩体的岩性主要为石英闪长岩(图 2e-g),其风化面多为深灰色,部分为灰色,新鲜面为灰绿色(图 2e),中粒-中细粒花岗结构,块状构造。主要矿物为斜长石(70%~75%,不同程度的绢云母化和钠黝帘石化)、普通角闪石(约 15%~20%,绿泥石化和绿帘石化)和石英(5%~10%),局部含黑云母(5%左右),副矿物主要为锆石和磷灰石,有少量

的磁铁矿。

4 分析方法

采集了 8 块新鲜的岩石样品(图 1b),其中包括 4 块太古生庙岩体的样品和 4 块库伦哈达岩体的样品,选取太古生庙岩体和库伦哈达岩体的各一块样品进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年。

锆石的分选工作在河北省廊坊市区域地质调查研究所实验室完成,之后在中国地质科学研究所北京离子探针中心完成了锆石制靶、反射光、透射光和阴极发光(CL)的显微照相。锆石 U-Pb 年龄分析在天津地质矿产研究所进行,采用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)进行 U-Pb 同位素测定,利用 193nm FX 激光器对锆石进行剥蚀,激光斑束直径为 50μm,频率为 10Hz,采用 He 作为激光剥蚀物质的载气,利用动态变焦扩大色散使质量数相差很大的 U-Pb 同位素可以同时接收。具体仪器配置和实验流程参照有关文献(李怀坤等,2009,2010)。采用 GJ-1 作为外部锆石年龄标准进行 U-Pb 同位素分馏校正(Jackson *et al.*, 2004),采用中国地质大学刘勇胜研发的 ICPMSDataCal 程序(Liu

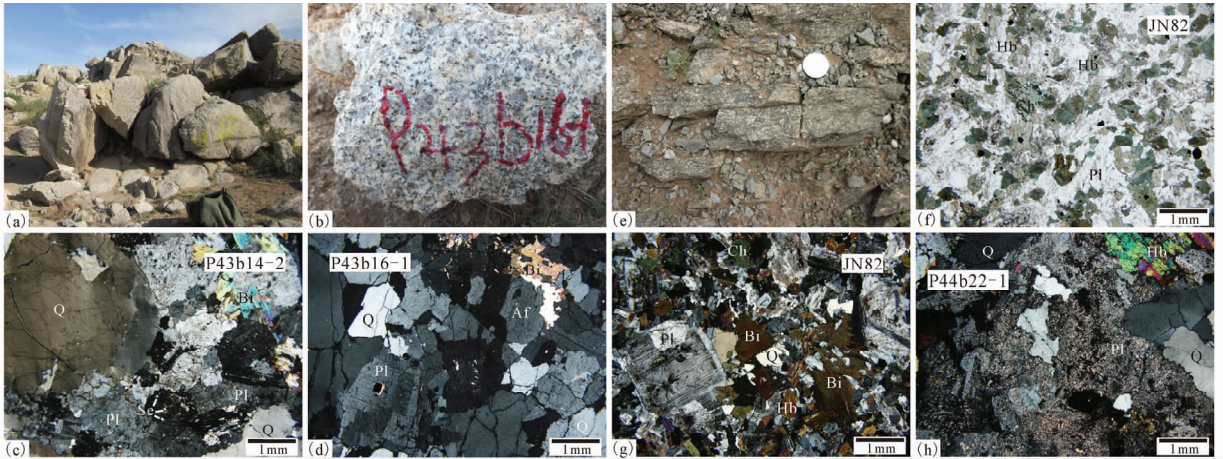


图2 太古生庙英云闪长岩和库伦哈达石英闪长岩的宏观特征及显微特征

(a) 太古生庙岩体宏观特征;(b) 英云闪长岩;(c,d) 英云闪长岩,正交偏光;(e) 石英闪长岩;(f) 黑云石英闪长岩,单偏光;(g) 黑云石英闪长岩,正交偏光;(h) 石英闪长岩,正交偏光。Q-石英;Pl-斜长石;Bi-黑云母;Se-绢云母;Af-碱性长石;Hb-普通角闪石;Ch-绿泥石

Fig. 2 The petrography feature of the rocks for tonalite of Taigushengmiao and quartz diorite of Kulunhada

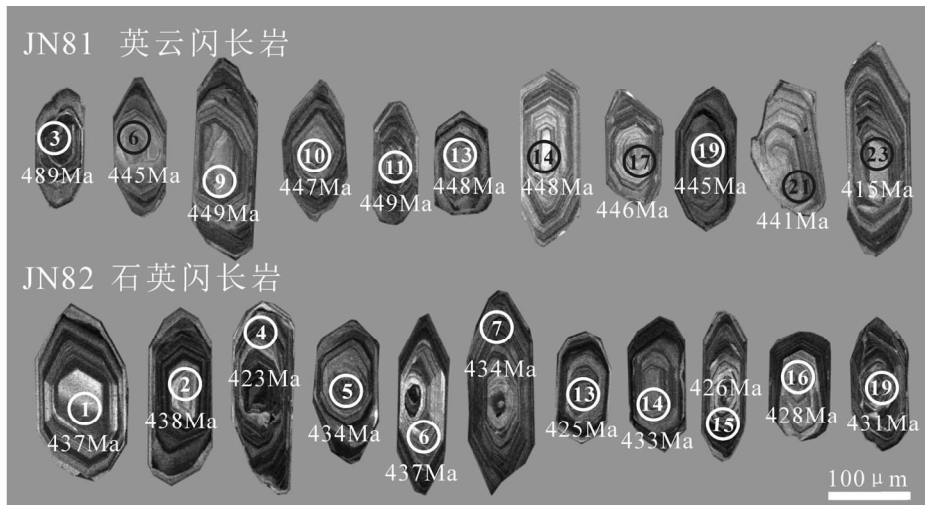


图3 太古生庙岩体(JN81)和库伦哈达岩体(JN82)部分锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of selected zircons for the Taigushengmiao pluton and Kulunhada pluton

et al., 2009) 和 Ludwig 的 Isoplot 程序 (Ludwig, 2003) 进行数据处理,应用 ^{208}Pb 校正法对普通铅进行校正 (Andersen, 2002),利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量,测试分析结果见表 1、表 2。

化学分析样品的主量元素、微量元素和稀土元素的测定均在天津地质矿产研究所实验室完成。主量元素采用 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 测定,微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪 (TJA-PQ-ExCell ICP-MS) 测定,分析结果见表 3。

5 年代学特征

样品 JN81 岩性为英云闪长岩,其中锆石呈长柱状,自形

晶,岩浆振荡环带清晰可见(图 3),结合较高的 Th/U 比值(多集中在 0.37 ~ 0.65),表明锆石属岩浆成因 (Koschek, 1993)。在除 3 号、18 号和 23 号锆石以外的锆石年龄分布集中在 434 ~ 449Ma 范围之内,其加权平均年龄为 $442.6 \pm 2.4\text{Ma}$ (图 4),该年龄代表了英云闪长岩的侵位年龄;3 号锆石具明显的核边结构,其核部年龄 489Ma 可能为捕获锆石的年龄;18 号锆石的年龄为 421Ma,23 号锆石的年龄为 415Ma,其 Pb 含量明显异常,可能受到后期热扰动。

样品 JN82 岩性为石英闪长岩,其中锆石呈长柱状,全部自形晶,岩浆振荡环带清晰可见(图 3),结合较高的 Th/U 比值(0.24 ~ 0.90),表明锆石属岩浆成因 (Koschek, 1993),其年龄值非常一致,其加权平均年龄为 $434.2 \pm 2.2\text{Ma}$ (图 4),代表石英闪长岩的侵位年龄。

表 1 太古生庙岩体 JN81 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for tonalite (JN81)

测点号	含量 ($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	Pb	U		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ
JN81.1	28	391	0.47	0.0710	0.0004	0.5524	0.0112	0.0564	0.0011	442	3	447	9	470	44
JN81.2	9	127	0.47	0.0698	0.0005	0.5982	0.0491	0.0622	0.0044	435	3	476	39	680	151
JN81.3	60	766	0.37	0.0788	0.0005	0.6084	0.0077	0.0560	0.0007	489	3	483	6	453	28
JN81.4	19	262	0.56	0.0706	0.0004	0.5522	0.0125	0.0567	0.0013	440	3	446	10	480	50
JN81.5	26	360	0.47	0.0713	0.0004	0.5461	0.0104	0.0556	0.0010	444	3	442	8	436	41
JN81.6	19	256	0.49	0.0714	0.0004	0.5511	0.0136	0.0560	0.0014	445	3	446	11	452	54
JN81.7	34	490	0.37	0.0706	0.0004	0.5262	0.0097	0.0540	0.0010	440	3	429	8	372	40
JN81.8	22	302	0.51	0.0722	0.0005	0.5512	0.0106	0.0554	0.0011	449	3	446	9	427	43
JN81.9	22	308	0.38	0.0721	0.0005	0.5266	0.0116	0.0530	0.0011	449	3	430	9	327	49
JN81.10	19	257	0.65	0.0718	0.0004	0.5548	0.0121	0.0560	0.0012	447	3	448	10	453	47
JN81.11	55	747	0.59	0.0721	0.0004	0.5585	0.0073	0.0562	0.0007	449	3	451	6	461	28
JN81.12	36	489	0.57	0.0716	0.0004	0.5545	0.0083	0.0562	0.0008	446	3	448	7	459	33
JN81.13	17	236	0.60	0.0720	0.0004	0.5465	0.0134	0.0551	0.0013	448	3	443	11	416	54
JN81.14	18	237	0.60	0.0719	0.0004	0.5717	0.0122	0.0577	0.0012	448	3	459	10	517	46
JN81.15	10	149	0.47	0.0696	0.0004	0.5706	0.0214	0.0594	0.0022	434	3	458	17	583	80
JN81.16	12	170	0.49	0.0699	0.0005	0.5773	0.0230	0.0599	0.0024	436	3	463	18	599	85
JN81.17	19	263	0.54	0.0717	0.0004	0.5404	0.0118	0.0547	0.0012	446	3	439	10	399	49
JN81.18	16	222	1.09	0.0675	0.0006	0.6842	0.0484	0.0736	0.0048	421	4	529	37	1029	133

表 2 库伦哈达岩体 JN82 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for quartz diorite (JN82)

测点号	含量 ($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	Pb	U		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ
JN82.1	13	182	0.90	0.0701	0.0006	0.5575	0.0203	0.0571	0.0020	437	4	450	16	497	78
JN82.2	11	152	0.87	0.0703	0.0007	0.5684	0.0373	0.0562	0.0037	438	4	457	30	461	144
JN82.3	22	304	0.79	0.0707	0.0006	0.5707	0.0135	0.0569	0.0013	440	4	458	11	488	51
JN82.4	41	627	0.77	0.0678	0.0006	0.5269	0.0068	0.0563	0.0007	423	4	430	6	465	28
JN82.5	13	188	0.71	0.0696	0.0006	0.5673	0.0197	0.0591	0.0020	434	4	456	16	572	74
JN82.6	24	345	0.62	0.0701	0.0006	0.5482	0.0119	0.0559	0.0012	437	4	444	10	449	47
JN82.7	33	474	0.61	0.0697	0.0006	0.5446	0.0082	0.0567	0.0008	434	4	441	7	479	32
JN82.8	14	189	0.55	0.0697	0.0006	0.5202	0.0181	0.0603	0.0019	435	4	425	15	616	67
JN82.9	30	427	0.55	0.0702	0.0006	0.5712	0.0089	0.0581	0.0009	438	4	459	7	535	33
JN82.10	35	449	0.53	0.0710	0.0006	0.5507	0.0083	0.0554	0.0008	442	4	445	7	430	32
JN82.11	14	186	0.49	0.0704	0.0007	0.5443	0.0145	0.0548	0.0014	438	4	441	12	405	58
JN82.12	15	215	0.49	0.0705	0.0006	0.5528	0.0136	0.0569	0.0014	439	4	447	11	486	53
JN82.13	31	451	0.47	0.0682	0.0006	0.5161	0.0096	0.0549	0.0010	425	3	423	8	409	40
JN82.14	18	253	0.46	0.0694	0.0006	0.5393	0.0123	0.0563	0.0012	433	4	438	10	465	49
JN82.15	94	1380	0.46	0.0682	0.0006	0.5258	0.0058	0.0559	0.0006	426	3	429	5	448	24
JN82.16	23	323	0.45	0.0686	0.0006	0.5483	0.0107	0.0580	0.0011	428	3	444	9	528	42
JN82.17	20	290	0.43	0.0691	0.0006	0.5409	0.0108	0.0568	0.0011	431	3	439	9	483	42
JN82.18	23	300	0.43	0.0687	0.0006	0.5386	0.0146	0.0569	0.0015	428	3	438	12	487	59
JN82.19	36	566	0.42	0.0691	0.0005	0.5211	0.0085	0.0547	0.0009	431	3	426	7	399	36
JN82.20	29	395	0.42	0.0698	0.0006	0.5648	0.0097	0.0587	0.0010	435	3	455	8	554	37
JN82.21	49	672	0.32	0.0697	0.0006	0.5616	0.0072	0.0585	0.0007	434	4	453	6	547	27
JN82.22	23	315	0.24	0.0703	0.0006	0.5477	0.0105	0.0557	0.0010	438	4	444	8	441	41
JN82.23	41	528	0.06	0.0703	0.0006	0.5284	0.0090	0.0538	0.0009	438	4	431	7	361	37

表3 太古生庙地区花岗岩类的主量元素(wt%)、微量元素和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 3 Major (wt%), rare earth and trace element ($\times 10^{-6}$) for the granitoid of the Taigushengmiao area

样品号	JN81	P43b14 -2	P43b16 -1	P43b18 -1	JN82	P44b8 -1	P44b22 -1	P44b26 -1
岩体	太古生庙岩体				库伦哈达岩体			
SiO ₂	70.02	70.50	70.51	70.25	66.78	59.20	57.92	64.12
TiO ₂	0.30	0.19	0.17	0.24	0.42	0.54	0.65	0.36
Al ₂ O ₃	15.99	16.37	16.13	16.02	14.91	17.58	18.26	17.57
FeO ^T	2.42	1.95	2.24	2.29	4.22	5.48	5.79	3.36
MnO	0.06	0.04	0.05	0.05	0.09	0.12	0.13	0.05
MgO	0.83	0.56	0.57	0.67	2.13	2.11	2.31	1.17
CaO	3.03	3.17	3.31	3.66	3.80	5.79	5.85	4.32
Na ₂ O	4.55	4.53	4.66	4.33	3.29	3.67	3.78	4.36
K ₂ O	1.81	1.35	1.46	1.39	3.09	2.32	1.89	1.43
P ₂ O ₅	0.08	0.05	0.05	0.06	0.13	0.23	0.29	0.16
灼减量	0.55	0.72	0.42	0.44	0.55	2.15	1.96	2.18
总量	99.63	99.43	99.56	99.41	99.42	99.19	98.83	99.08
Mg [#]	38.2	34.1	31.4	34.5	47.6	40.9	41.8	38.5
里特曼指数 σ	1.50	1.26	1.36	1.20	1.71	2.21	2.15	1.59
A/CNK	1.07	1.11	1.06	1.05	0.95	0.92	0.96	1.06
Cr	3.04	20.00	20.00	20.00	32.00	30.00	20.00	20.00
Rb	24.7	50.2	56.1	48.1	103	83.9	85.9	52.9
Cs	1.92	2.40	2.48	1.81	4.69	1.40	2.36	7.51
Sr	681	783	745	760	308	615	838	875
Ba	912	743	682	604	843	667	716	323
V	28.0	21.0	20.0	27.0	90.1	123	124	58.0
Nb	8.95	5.00	5.00	4.60	9.03	5.40	6.60	4.50
Ta	0.48	0.30	0.30	0.30	0.81	0.30	0.40	0.30
Zr	154	120	110	140	80.30	110	130	130
Hf	4.47	3.00	2.90	3.70	2.61	2.90	3.10	3.20
Ga	—	16.70	16.60	17.50	—	19.60	20.60	18.90
U	0.75	0.77	0.97	0.67	0.69	1.03	0.75	0.85
Th	9.07	5.69	5.58	8.81	8.64	1.10	2.60	2.44
La	21.50	15.30	15.90	28.30	16.00	9.00	15.90	9.70
Ce	41.60	28.10	28.30	53.20	30.20	17.40	35.90	16.90
Pr	4.60	3.12	3.29	5.78	3.87	2.70	4.52	2.12
Nd	16.50	10.50	10.70	19.40	14.70	11.20	17.80	7.60
Sm	2.83	1.69	1.90	3.08	2.99	2.40	3.82	1.46
Eu	0.91	0.53	0.55	0.79	0.97	0.75	1.05	0.69
Gd	2.23	1.24	1.26	2.18	2.67	2.34	3.51	1.24
Tb	0.27	0.16	0.17	0.26	0.44	0.35	0.49	0.16
Dy	1.44	0.88	0.91	1.32	2.54	2.00	2.77	0.91
Ho	0.29	0.19	0.19	0.26	0.56	0.40	0.58	0.18
Er	0.86	0.56	0.58	0.77	1.55	1.20	1.59	0.54
Tm	0.13	0.10	0.10	0.11	0.23	0.18	0.23	0.09
Yb	0.86	0.69	0.68	0.63	1.58	1.14	1.52	0.53
Lu	0.13	0.11	0.12	0.12	0.23	0.19	0.21	0.09
Y	9.30	5.60	5.40	7.40	15.50	11.40	14.90	5.00
ΣREE	94.15	63.17	64.65	116.2	78.53	51.25	89.89	42.21
ΣLREE	87.94	59.24	60.64	110.6	68.73	43.45	78.99	38.47
ΣHREE	6.21	3.93	4.01	5.65	9.80	7.80	10.90	3.74
LREE/HREE	14.2	15.1	15.1	19.6	7.01	5.57	7.25	10.3
(La/Yb) _N	15.2	13.4	14.2	27.2	6.14	4.78	6.34	11.1
(La/Sm) _N	4.17	3.96	4.97	4.59	2.94	5.04	2.06	2.28
(Gd/Yb) _N	2.08	1.44	1.49	2.78	1.36	1.65	1.85	1.88
δEu	1.11	1.13	1.09	0.94	1.06	0.97	0.88	1.58

注: Mg[#] = $100 \times [MgO / (MgO + FeO^T)]$ (分子数); 里特曼指数 $\sigma = (K_2O + Na_2O) / (SiO_2 - 43)$; A/CNK = $mol [Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)]$; $(La/Yb)_N = (La/0.33) / (Yb/0.20)$; $\delta Eu = Eu_N / (Gd_N + Sm_N) / 2$

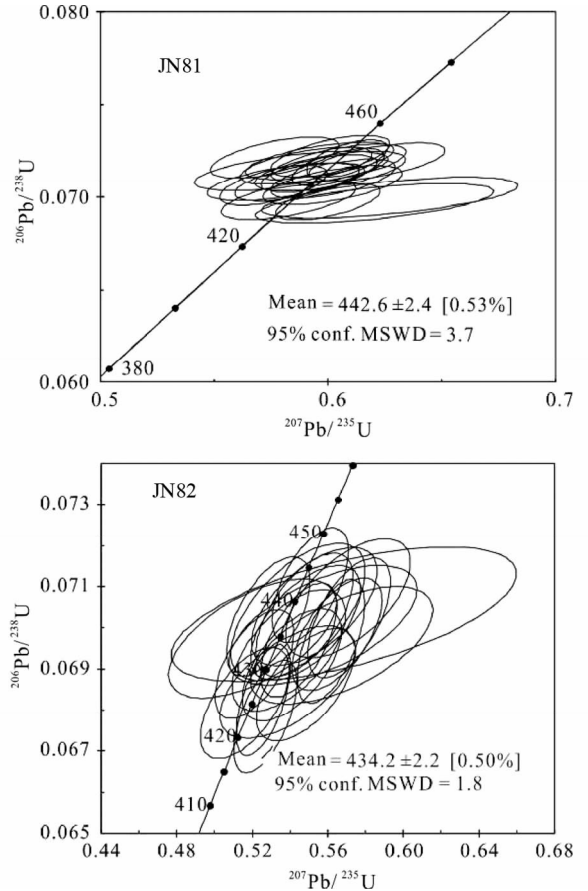


图4 太古生庙岩体和库伦哈达岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of zircon for the Taigushengmiao pluton and Kulunhada pluton

6 地球化学特征

6.1 主量元素特征

太古生庙岩体和库伦哈达岩体的全岩地球化学分析结果见表3。太古生庙英云闪长岩岩体具有高硅、低镁钾钨的特点,其主量元素含量分别为:SiO₂ = 70.02% ~ 70.51%、Al₂O₃ = 15.99% ~ 16.37%、MgO = 0.56% ~ 0.83%、Na₂O = 4.33% ~ 4.66%、K₂O = 1.35% ~ 1.81%、CaO = 3.03% ~ 3.66%、FeO^T = 1.95% ~ 2.42%。岩石样品在 TAS 图解(图5a)中,为亚碱性系列岩石,投于花岗闪长岩的区域中;里特曼指数 σ 为 1.20 ~ 1.50,属于钙碱性系列岩石,在 SiO₂-K₂O 图解(图5b)中,亦为钙碱性系列。Na₂O/K₂O 比值为 2.51 ~ 3.36,为富钠质的花岗岩类,其铝指数 A/CNK 为 1.05 ~ 1.11,表明其为过铝质岩石。镁质指数 (Mg[#]) 较低, Mg[#] = 31.4 ~ 38.2。

与太古生庙岩体相比,库伦哈达岩体更偏中性,其主量元素含量分别为:SiO₂ = 57.92% ~ 66.78%、Al₂O₃ = 14.91% ~ 18.26%、MgO = 1.17% ~ 2.31%、Na₂O = 3.29% ~ 4.36%、

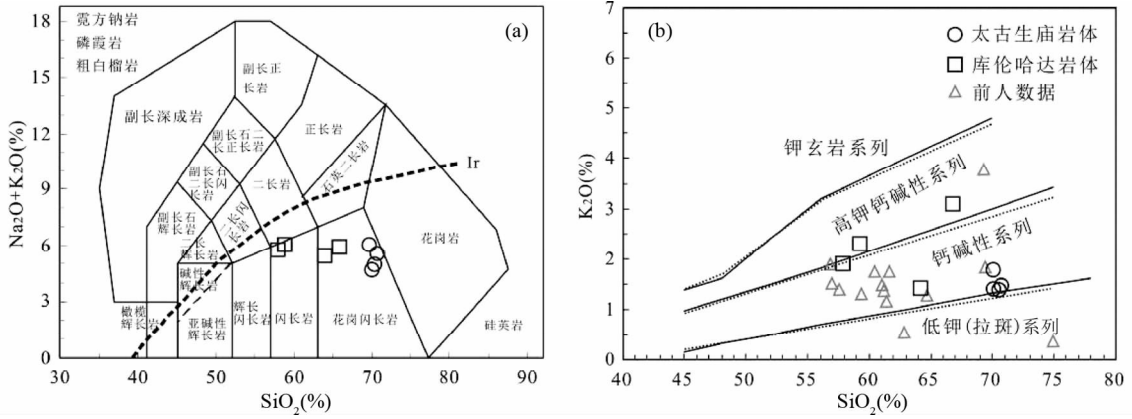


图5 太古生庙岩体和库伦哈达岩体的 TAS 图解(a)和 SiO_2 - K_2O 图解(b)

图 b 中实线据 Peccerillo and Taylor, 1976, 虚线据 Middlemost, 1985; 前人数据引自刘敦一等(2003)、石玉若等(2005)、许立权等(2003)和张维(2007), 图7、图8同

Fig. 5 TAS diagram (a) and SiO_2 vs. K_2O diagram (b) for the Taigushengmiao pluton and Kulunhada pluton

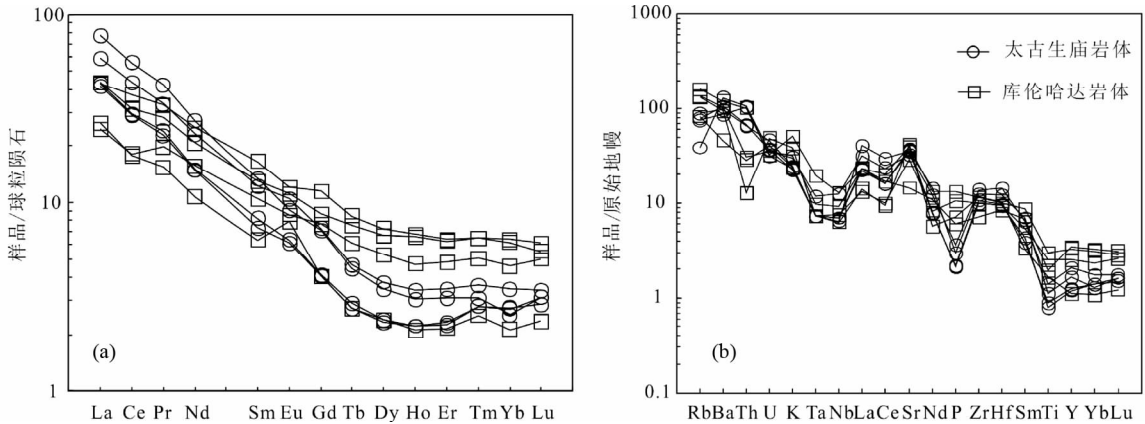


图6 早志留世太古生庙岩体和库伦哈达岩体的球粒陨石标准化稀土元素配分图(a, 标准化值据 Taylor and McLennan, 1985)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a, normalization values after Taylor and McLennan, 1985) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) for the Taigushengmiao pluton and Kulunhada pluton

$\text{K}_2\text{O} = 1.43\% \sim 3.09\%$ 、 $\text{CaO} = 3.80\% \sim 5.85\%$ 、 $\text{FeO}^T = 3.36\% \sim 5.79\%$ 。岩石样品在 TAS 图解(图 5a)中, 为亚碱性系列岩石, 投于花岗闪长岩-闪长岩的区域中; 里特曼指数 σ 为 1.59 ~ 2.21, 属于钙碱性岩石, 在 SiO_2 - K_2O 图解(图 5b)中, 亦为钙碱性系列。 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 1.06 ~ 3.05, 为钠质-富钠质花岗岩类, 其铝指数 A/CNK 为 0.92 ~ 1.06, 表明其为偏铝质-弱过铝质岩石。镁质指数 $\text{Mg}^\# = 38.5 \sim 47.6$ 。

在 SiO_2 - K_2O 图中(图 5b), 将研究区附近前人的埃达克岩数据(刘敦一等, 2003; 石玉若等, 2005; 许立权等, 2003; 张维, 2007)投入图中进行对比, 太古生庙岩体均落入钙碱性系列中, 库伦哈达岩体部分投入高钾钙碱性系列中, 前人数据中有多数样品落入钙碱性系列中; 在球粒陨石标准化稀土元素配分图中, 研究区附近前人埃达克岩的稀土元素数据与本

文研究的岩石样品稀土元素的曲线较为一致。

6.2 微量元素特征

太古生庙岩体相比, 库伦哈达岩体的稀土元素总量较低, $\sum \text{REE} = 42.21 \times 10^{-6} \sim 89.89 \times 10^{-6}$, 轻稀土总量为 $\sum \text{LREE} = 38.47 \times 10^{-6} \sim 78.99 \times 10^{-6}$, 重稀土总量为 $\sum \text{HREE} = 3.74 \times 10^{-6} \sim 10.90 \times 10^{-6}$, 表现为右倾的稀土元素配分图(图 6a), 轻重稀土分异较弱 ($\text{LREE}/\text{HREE} = 5.57 \sim 10.3$), $(\text{La}/\text{Yb})_N = 4.78 \sim 11.1$, 重稀土曲线较为平缓 ($(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.36 \sim 1.88$), Eu 异常不明显, 仅一个岩石样品的 δEu 为 1.58; 库伦哈达岩体较太古生庙岩体更富集 HREE 和 K、Rb、Ba、Cs 等大离子亲石元素。

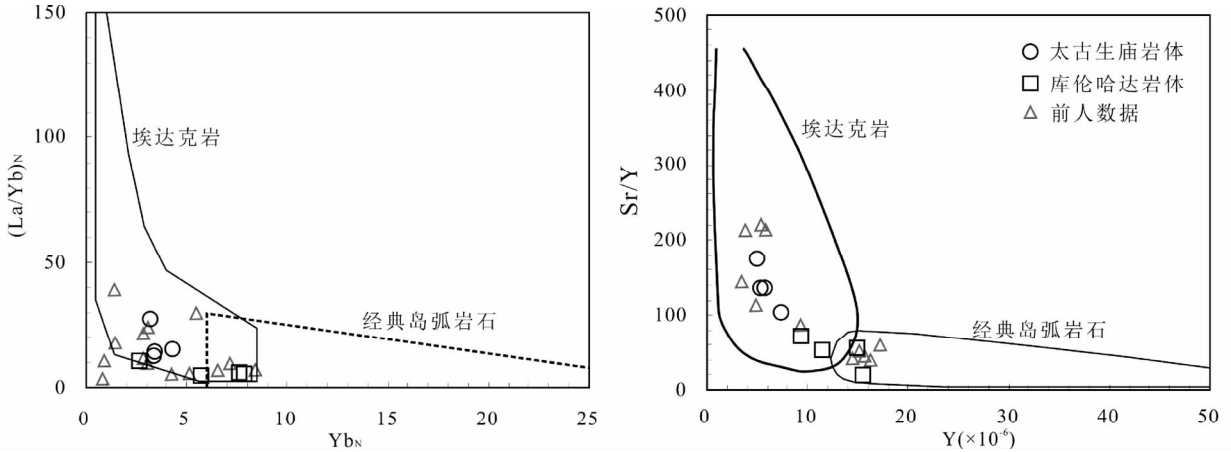


图7 太古生庙岩体和库伦哈达岩体的 $Yb_N-(La/Yb)_N$ 和 $Y-Sr/Y$ 图解 (据 Defant and Drummond, 1990)

Fig.7 Yb_N vs. $(La/Yb)_N$ and Y vs. Sr/Y diagrams for the Taigushengmiao pluton and Kulunhada pluton (after Defant and Drummond, 1990)

7 讨论

7.1 岩体的形成时代

内蒙古自治区地质局区域地质测量队(1976)据野外地质体接触关系将太古生庙地区的岩体定为印支期岩体(内蒙古自治区地质矿产局,1991),仅根据接触关系往往难以有效推断地质体的形成时代。本次研究中使用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年以确定其形成时代。太古生庙岩体和库伦哈达岩体的锆石均呈长柱状,自形晶,岩浆振荡环带清晰可见(图6),结合较高的 Th/U 比值,表明锆石属岩浆成因。定年结果显示, JN81 英云闪长岩的加权平均年龄为 442.6 ± 2.4 Ma, 该年龄代表了太古生庙岩体侵位结晶年龄; JN82 石英闪长岩的加权平均年龄为 434.2 ± 2.2 Ma, 代表库伦哈达岩体侵位结晶年龄, 在野外接触关系中, 见有在太古生庙英云闪长岩中呈小岩枝外露的石英闪长岩, 与测年结果相一致。

Jian *et al.* (2008) 测得图林凯奥长花岗岩的年龄为 471.6 ± 1.7 Ma; 童英等(2010)精确厘定了白乃庙北部片麻状石英闪长岩的年龄, 为 459 ± 2.9 Ma 和 454 ± 14 Ma; 刘敦一等(2003)对图林凯地区的埃达克岩进行了 SHRIMP U-Pb 测年, 测得石英闪长岩的年龄为 467 Ma, 奥长花岗岩的年龄为 451 ± 7 Ma; 张维(2007)测得包尔汗图-白乃庙岛弧带西段达茂旗北部埃达克岩的形成年龄为 440 ~ 452 Ma; 本次研究中测得的年龄均可与这些年龄对比, 且与出露的地理位置呈现一定的规律性, 表现为从北向南埃达克岩的年龄逐渐年轻(图 1a, b), 表明本文测得的年龄数据具有较高的可信度, 因此将太古生庙岩体和库伦哈达岩体的形成时代归为早志留世是比较可靠的。

7.2 源区性质

太古生庙岩体的 SiO_2 含量 $\geq 56\%$ ($70.02\% \sim$

70.51%), Al_2O_3 含量 $\geq 15\%$ ($15.99\% \sim 16.37\%$), $MgO < 3\%$ ($0.56\% \sim 0.83\%$), $Na_2O > 3\%$ ($4.33\% \sim 4.66\%$), K_2O/Na_2O 比值 < 0.5 ($0.3 \sim 0.4$), 属于富钠质的花岗岩类, 在微量元素特征方面, 高 Sr 低 Y、Yb 和 HREE, $Sr > 400 \times 10^{-6}$ ($681 \times 10^{-6} \sim 783 \times 10^{-6}$), $Yb \times 10^{-6} < 1.9$ ($0.6 \times 10^{-6} \sim 0.9 \times 10^{-6}$), $Y \times 10^{-6} < 18$ ($5.4 \times 10^{-6} \sim 9.3 \times 10^{-6}$), 无明显的 Eu 异常。这些主量元素和微量元素特征完全符合 Defant 和 Drummond 关于埃达克岩的描述 (Defant and Drummond, 1990), 表 4 中清晰对比了本文研究的岩石样品和典型埃达克岩的主量元素和微量元素特征, 并且在 $Yb_N-(La/Yb)_N$ 和 $Y-Sr/Y$ 图解(图 7)中, 太古生庙英云闪长岩岩体和库伦哈达石英闪长岩岩体的岩石样品均投入埃达克岩的区域中, 这些特征都说明其都具有埃达克岩的特征。埃达克岩的发现表明, 俯冲到深处的具洋中脊玄武岩性质的板片在合适的物理化学条件下可以部分熔融形成中酸性的岩浆(张旗等, 2002), 并且部分学者将埃达克岩理解为形成于岛弧环境的高铝高铈而贫重稀土的一种特殊类型的中酸性岩浆(钱青等, 2002), 这种定义与本文研究的岩体相符。

太古生庙岩体为富钠质的花岗岩类, 符合与板块消减作用或玄武岩底侵作用有关的 O 型花岗岩的特征(张旗等, 2001), O 型埃达克岩的出现标志着大洋萎缩消减的开始(朱弟成等, 2003), 从构造地质学的角度, O 型埃达克岩可以作为鉴别消减带的一项岩浆岩标志 (Bourdon *et al.*, 2003)。因此, 太古生庙岩体应该为洋壳板片或 MORB 板片俯冲部分熔融的产物 (Defant and Drummond, 1990, 1993; Sajona *et al.*, 1993; Samaniego *et al.*, 2002)。太古生庙英云闪长岩岩体亏损 HREE、高 Sr 低 Yb、Eu 无明显异常或轻微正异常, 高 Sr 和轻微 Eu 正异常表明基性源岩中的斜长石已进入熔体, 这些特征暗示该岩体的源区由石榴石 + 辉石组成, 残留相为榴辉岩(张旗等, 2006), 埃达克岩的这种地球化学特点要求该岩石是基性的壳源岩石在较高压力情况下形成的(肖庆辉等,

表 4 苏尼特右旗太古生庙岩体和库伦哈达岩体与典型的埃达克岩的地球化学对比

Table 4 The comparison of geochemical characteristics between the Taigushengmiao pluton, Kulunhada pluton and the adakitic rocks

特征	埃达克岩	太古生庙岩体				库伦哈达岩体			
		JN81	P43b14-2	P43b16-1	P43b18-1	JN82	P44b8-1	P44b22-1	P44b26-1
SiO ₂ (wt%)	>56	70.0	70.5	70.5	70.3	66.8	59.2	57.9	64.1
Al ₂ O ₃ (wt%)	>15	16.0	16.4	16.1	16.0	14.9	17.6	18.3	17.6
MgO (wt%)	<3	0.83	0.56	0.57	0.67	2.13	2.11	2.31	1.17
Na ₂ O (wt%)	3.5 ~ 7.5	4.6	4.5	4.7	4.3	3.3	3.7	3.8	4.4
K ₂ O/Na ₂ O	<0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.9	0.6	0.5	0.3
Sr (×10 ⁻⁶)	>400	681	783	745	760	308	615	838	875
Yb (×10 ⁻⁶)	<1.9	0.9	0.7	0.7	0.6	1.6	1.1	1.5	0.5
Y (×10 ⁻⁶)	<18	9.3	5.6	5.4	7.4	15.5	11.4	14.9	5.0
Sr/Y	>40	73.2	140	138	103	19.9	54.0	56.2	175
La/Yb	>20	25.0	22.2	23.4	44.9	10.1	7.9	10.5	18.3
Zr/Sm	>50	54.4	71.0	57.9	45.5	26.9	45.8	34.0	89.0
Eu 异常	无	1.1	1.1	1.1	0.9	1.1	1.0	0.9	1.6
Sr 异常	正	正	正	正	正	正	正	正	正

注:埃达克岩据 Defant and Drummond(1990, 1993) 和 Martin(1999)

2002)。

O 型埃达克岩属于岛弧型岩浆钙碱性岩系,是俯冲板块和上覆地幔相互作用产生的杂化溶液通过结晶分异形成的, Mg[#]大小可以相当灵敏地反映基性岩熔融产物是否受到地幔物质的混染, MORB 部分熔融产生的熔体的 Mg[#]值一般不会超过 45, 而由洋中脊玄武岩产生的熔体如在上升过程中与地幔楔发生交代作用, 其 Mg[#]值会升高(肖庆辉等, 2002), 太古生庙英云闪长岩的 Mg[#]值较低(31.4 ~ 38.2), 其应该属于低 Mg[#]埃达克岩系, 即相当于俯冲板块(榴辉岩相)重熔, 与地幔的相互作用仅有轻微影响(董申保和田伟, 2004)。

详细对比太古生庙岩体和库伦哈达岩体的地球化学性质, 太古生庙岩体的 SiO₂ 含量(70.02% ~ 70.51%) 明显大于库伦哈达岩体的 SiO₂ 含量(57.92% ~ 66.78%), 而且太古生庙岩体的地球化学特征与典型的埃达克岩完全一致, 库伦哈达岩体的轻重稀土分异相对较弱, 说明在俯冲的后期, 洋壳部分熔融区的压力变小, 使进入石榴石相的重稀土元素含量相对变少, 或者岩浆受到了更多的上覆地幔的混染, 在微量元素判别图解上(图 7), 库伦哈达岩体的岩石样品投图位于埃达克岩和典型的岛弧型火山岩的叠加区域, 这种特征进一步说明库伦哈达岩体可能是早期俯冲的洋壳部分熔融的产物混染了部分熔融的地幔楔之后形成了这种具有较高 Mg[#]值的岩石(太古生庙岩体的 Mg[#]值平均为 34.5, 库伦哈达庙的 Mg[#]值平均为 42.2), 且年龄值进一步证实了这种推论(太古生庙岩体的年龄为 442Ma, 库伦哈达岩体的年龄值为 434Ma); 形成典型的正常火山岩的地幔部分熔融一般发生在 100 ~ 200km 深度范围内, 而埃达克岩岩浆一般形成在 MORB 部分熔融的 75 ~ 85km 深处(Gill *et al.*, 1981), 这一深度也是角闪岩-榴辉岩的过渡带, 结合库伦哈达岩体在 Yb_N-(La/Yb)_N 和 Y-Sr/Y 图解中的位置, 说明部分熔融的地幔占了库伦哈达岩体源岩很大比例, 且其源岩的深度应该大

于太古生庙源岩的深度, 即大于 85km。

埃达克质岩浆形成以后, 在向上运移过程中, 将与围岩物质发生不同程度的同化和混染作用(朱弟成等, 2003)。库伦哈达岩体 K₂O、Rb、Ba、Cs 等大离子亲石元素(LILE)含量均高于太古生庙岩体, 很可能都是受到围岩物质的影响。

7.3 构造环境

本文研究的岩体位于华北克拉通北侧, 属于早古生代造山带(陈琦等, 1993)或白乃庙岛弧岩带, 该岛弧岩带可能开始于早奥陶世或更早, 结束于晚志留世, 而早古生代华北克拉通北缘发育较为稳定的寒武纪-中奥陶世陆表海沉积(赵越等, 2010)。

在 Rb-Y + Nb 和 Nb-Y 构造环境判别图上(图 8a, b), 本文研究的太古生庙岩体和库伦哈达岩体的样品均投点于火山岛弧花岗岩和火山弧-同碰撞花岗岩区域; 太古生庙岩体和库伦哈达岩体在 R1-R2 图解中(图 8c), 均位于破坏性活动板块边缘花岗岩区域, 而在 Ta/Yb-Th/Yb 图解中(图 8d), 库伦哈达岩体全部位于活动大陆边缘的范围内, 而太古生庙岩体没有明确的意义, 因此认为该岩体花岗岩类具有岛弧花岗岩的性质, 其大地构造环境应该为岛弧环境。

因此, 研究区在早古生代的构造演化过程为: 晚前寒武纪末期-早寒武纪, 温都尔庙群形成, 之后伴随构造侵位产生蛇绿混杂体和蓝闪片岩(胡晓等, 1990); 最近的研究认为认为温都尔庙群不完全是蛇绿岩组合, 而是不同成因的增生杂岩(李承东等, 2012); 奥陶纪左右或更早白乃庙岛弧岩带开始出现, 且其下存在元古宙的古老基底(Zhang *et al.*, 2014); 本文研究的早志留世岩体即产于这种环境中, 为白乃庙岛弧岩带的组成部分。

结合前文讨论的岩体的形成时代和源区性质, 太古生庙岩体具有典型埃达克岩的性质, 产生于岛弧环境, 为古亚洲

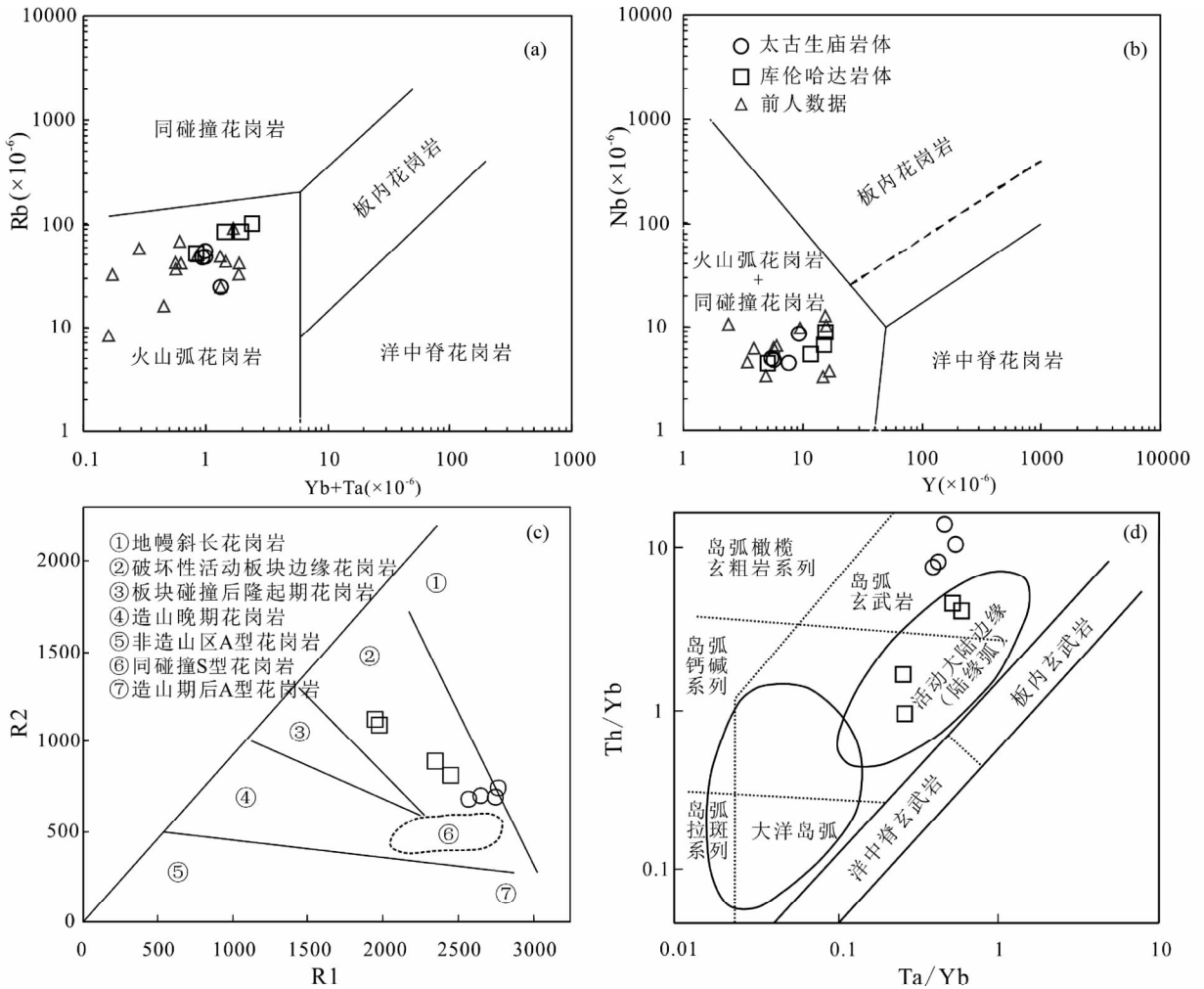


图8 太古生庙岩体和库伦哈达岩体的 Yb + Ta-Rb(a)、Y-Nb 图解(b)、R1-R2(c)和 Ta/Yb-Th/Yb(d)图解

Fig.8 Yb + Ta vs. Rb (a), Y vs. Nb diagrams (b), R1 vs. R2 (c) and Ta/Yb vs. Th/Yb (d) diagrams for the Taigushengmiao pluton and Kulunhada pluton

洋板块向北板块北缘俯冲时洋中脊玄武岩部分熔融的产物;库伦哈达岩体的源岩应该为洋中脊玄武岩和地幔部分熔融混染的产物,且在后期受到地壳物质的混入,致使其 Rb、K 含量升高。该套早志留世岩体形成于白乃庙岛弧岩带中,由洋壳俯冲作用造成的挤压环境中;Zhang *et al.* (2013)在白乃庙北部的石英闪长岩中测得年龄为 $419 \pm 10\text{Ma}$,并将其解释为区域碰撞时间;在本研究区以南 80km 处出露一套以霓辉正长岩为主的碱性花岗岩,其锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $408 \pm 4\text{Ma}$ 、 $409 \pm 2\text{Ma}$ (Zhang *et al.*, 2010),该泥盆纪的碱性岩石反映伸展构造背景特征,可能与志留纪俯冲碰撞后的伸展作用有关。

8 结论

(1)太古生庙岩体为高硅过铝质钙碱性花岗岩类,地球化学特征与典型的埃达克岩一致,说明其成因与洋壳的俯冲

消减有关,其受地幔的影响较小;库伦哈达岩体为钙碱性中酸性岩类, $Mg^\#$ 值和 LILE 高于太古生庙岩体,说明其为俯冲板块重熔且有地幔物质的加入。

(2)太古生庙岩体和库伦哈达岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果为 $442.6 \pm 2.4\text{Ma}$ 和 $434.2 \pm 2.2\text{Ma}$,表明太古生庙地区在早志留世发生了板块俯冲消减事件,对比、综合前人的研究成果(早古生代造山带在奥陶纪-志留纪发生了多次板块俯冲消减事件),研究区附近早古生代花岗岩类形成时代由北向南依次变新,暗示早古生代期间古亚洲洋在华北板块北缘以北地区的俯冲消减方向大体为从北向南。

(3)太古生庙岩体类似于典型的 O 型埃达克质岩石,为洋壳部分熔融的产物;库伦哈达岩体为俯冲板块和上覆地幔相互作用形成的。

(4)太古生庙地区太古生庙岩体和库伦哈达岩体形成的大地构造背景应为岛弧环境。

致谢 样品分析得到河北省廊坊区域地质调查研究所实验室和天津地质矿产研究所实验室的大力支持, 在此表示衷心感谢。感谢审稿人的修改意见。

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
- Bourdon E, Eissen JP, Gutscher MA, Monzier M, Hall ML and Cotten J. 2003. Magmatic response to early Aseismic ridge subduction: The Ecuadorian margin case (South America). *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3-4): 123-138
- Bureau Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region. 1991. *Regional Geology of Inner Mongolia Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 351-458 (in Chinese)
- Chen B and Xu B. 1996. The main characteristics and tectonic implications of two kinds of Paleozoic granitoids in Sumidzuqi, Central Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 12(4): 546-561 (in Chinese with English abstract)
- Chen B, Jahn BM, Wilde S and Xu B. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328(1-2): 157-182
- Chen B, Jahn BM and Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction and collision-related magmas and forearc sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 245-257
- Chen Q, Chou GL, Xue LF, Zou XM, Zhou HP and Du YS. 1993. Palaeoplate evolution in the southern part of the Inner Mongolian Orogenic Belt. *Geological Review*, 39(6): 477-483 (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
- Defant MJ and Drummond MS. 1993. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21(6): 547-550
- Dong SB and Tian W. 2004. The nomenclature, characteristics and petrogenesis of adakite. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 585-594 (in Chinese with English abstract)
- Gill JB. 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. New York: Springer-Verlag, 390
- Hu X, Xu CS and Niu SY. 1990. Evolution of the Early Paleozoic Continental Margin in Northern Margin of the North China Platform. Beijing: Peking University Press, 25-189 (in Chinese)
- Jackson SE, Pearson NJ, Griffin WL and Belousova EA. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1-2): 47-69
- Jian P, Liu DY, Kröner A, Windley BF, Shi YR, Zhang FQ, Shi GH, Miao LC, Zhang W, Zhang Q, Zhang LQ and Ren JS. 2008. Time scale of an Early to Mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth. *Lithos*, 101(3-4): 233-259
- Jian P, Liu DY, Kröner A, Windley BF, Shi YR, Zhang W, Zhang FQ, Miao LC, Zhang LQ and Tomurhuu D. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia. *Lithos*, 118(1-2): 169-190
- Jian P, Kröner A, Windley BF, Shi YR, Zhang W, Zhang LQ and Yang WR. 2012. Carboniferous and Cretaceous mafic-ultramafic massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP zircon and geochemical study of the previously presumed integral "Hegenshan ophiolite". *Lithos*, 142-143: 48-66
- Koschek G. 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon. *Journal of Microscopy*, 171(3): 223-232
- Li CD, Ran H, Zhao LG, Wang HC, Zhang K, Xu YW, Gu YC and Zhang YQ. 2012. LA-MC-ICPMS U-Pb geochronology of zircons from the Wenduermiao Group and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3705-3714 (in Chinese with English abstract)
- Li G, Liu ZH, Xu ZY, Peng XD, Dong XJ, Sha Q and Wang WQ. 2012. Components of the Bainaimiao thrust and its structural features. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(2): 309-319 (in Chinese with English abstract)
- Li HK, Geng JZ, Hao S, Zhang YQ and Li HM. 2009. Research on the dating zircon U-Pb age by LA-MC-ICPMS. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(Suppl.): 77 (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 JY. 2006. Permian geodynamic setting of northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3-4): 207-224
- Li JY, Gao LM, Sun GH, Li YP and Wang YB. 2007. Shuangjingzi Middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the East Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565-582 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, Zhang J, Yang TN, Li YP, Sun GH, Zhu ZX and Wang LJ. 2009. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the North Asian Orogenic Region and its adjacent areas. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(4): 584-606 (in Chinese with English abstract)
- Liu DY, Jian P, Zhang Q, Zhang FQ, Shi YR, Shi GH, Zhang LQ and Tao H. 2003. Shrimp dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 317-327 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gan CG, Zong KQ and Wang DB. 2009. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571
- Ludwig KR. 2003. *Isoplot/Ex, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel Version 3.00*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 4: 1-70
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411-429
- Middlemost EAK. 1985. *Magmas and Magmatic Rocks: An Introduction to Igneous Petrology*. London, New York: Longman
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58(1): 63-81
- Qian Q, Chung SL, Lee TY and Wen DJ. 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Badaling high Ba-Sr granitoids: A comparison of igneous rocks from North China and the Dabie-Sulu Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 275-292 (in Chinese with English abstract)
- Qin Y, Liang YH, Xing JL, Zhang QW and Liu CX. 2013. The identification of Early Paleozoic O-type adakitic rocks in Zhengxiangbaiqi area, Inner Mongolia and its significance. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 106-114 (in Chinese with English abstract)
- Sajona FG, Maury RC, Bellon H, Cotten J, Defant M and Pubellier M. 1993. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines. *Geology*, 21(11):

1007 – 1010

- Samaniego P, Martin H, Robin C and Monzier M. 2002. Transition from calc-alkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador: Insights into slab melts and mantle wedge interactions. *Geology*, 30 (11): 967 – 970
- Shao JA. 1991. *Crustal Evolution in the Middle Part of the Northern Margin of the Sino-Korean Plate*. Beijing: Peking University Press, 1 – 135 (in Chinese)
- Shi YR, Liu DY, Zhang Q, Jian P, Zhang FQ, Miao LC, Shi GH, Zhang LQ and Tao H. 2005. The petrogenesis and SHRIMP dating of the Baiyinbaolidao adakitic rocks in southern Suzuoqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 143 – 150 (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 Publications, 42(1): 313 – 345
- Tang KD. 1990. Tectonic development of Paleozoic fold belts at the north margin of the Sino-Korean craton. *Tectonics*, 9(2): 249 – 260
- Tang KD and Zhang YP. 1991. Tectonic evolution of the Inner Mongolia suture. In: Xiao XC and Tang YQ (eds.). *Tectonic Evolution of the Southern Margin of the Paleo-Asian Composite Megasuture*. Beijing: Scientific and Technical Publishing House, 30 – 54 (in Chinese)
- Tang KD and Shao JA. 1996. Some characteristics of ophiolites and ancient ocean evolution in paleoasia oceanic area. In: Zhang Q (ed.). *Symposium of Ophiolite and Geodynamics*. Beijing: Geological Publishing House, 108 – 111 (in Chinese)
- Tao JX, Xu LQ, He F and Su MR. 2005. Petrological evidence for subduction of the Early Paleozoic oceanic crust in Bart-Obo, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 28(1): 1 – 8 (in Chinese with English abstract)
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust; Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1 – 312
- Tong Y, Hong DW, Wang T, Shi XJ, Zhang JJ and Zeng T. 2010. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino-Mongolian border and its tectonic and metallogenic implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(3): 395 – 412 (in Chinese with English abstract)
- Wang WQ, Xu ZY, Liu ZH, Zhao QY and Jiang XJ. 2013. Early-Middle Permian tectonic evolution of the central-northern margin of the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb ages and geochemistry of the granitoids. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 2987 – 3003 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ and Fan ZY. 1997. Discovery of Permian radiolarians in ophiolite belt on northern side of Xar Moron River, Inner Mongolia and its geological significance. *Acta Palaeontologica Sinica*, 36(1): 58 – 69 (in Chinese with English abstract)
- Xiao QH, Deng JF, Ma DQ and Hong DW. 2002. *The Ways of Investigation on Granitoids*. Beijing: Geological Publishing House, 172 – 189 (in Chinese)
- Xiao WJ, Windly BF, Hao J and Zhai MG. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6): 1069 – 1089
- Xiao WJ, Windley BF, Huang BC, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Sun S and Li JL. 2009. End-Permian to Mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altai; Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. *Int. J. Earth Sci.*, 98(6): 1189 – 1217
- Xu B, Charvet J and Zhang FQ. 2001. Primary study on petrology and geochronology of blueschists in Sunitezuoqi, northern Inner Mongolia. *Chinese Journal of Geology*, 36(4): 424 – 434 (in Chinese with English abstract)
- Xu B, Charvet J, Chen Y, Zhao P and Shi GZ. 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 23(4): 1342 – 1364
- Xu LQ, Deng JF, Chen ZY and Tao JX. 2003. The identification of Ordovician adakites and its signification in northern Damao, Inner Mongolia. *Geoscience*, 17(4): 428 – 434 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang JH, Wang YL, Zhao TP and Guo GJ. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236 – 244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Liu W and Wang YL. 2002. Adakite: Its characteristics and implications. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 431 – 436 (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 SH, Zhao Y, Liu JM, Hu JM, Song B, Liu J and Wu H. 2010. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 824 – 842 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Ye H, Liu JM and Hu ZC. 2014. Origin and evolution of the Bainaimiao arc belt: Implications for crustal growth in the southern Central Asian orogenic belt. *Geological Society of America Bulletin*, 126(9 – 10): 1275 – 1300
- Zhang W. 2007. SHRIMP dating of Early Paleozoic and Early Mesozoic adakitic plutons from Damaoqi, Inner Mongolia. Master Degree Thesis. Beijing: Chinese Academy of Geological Science, 1 – 20 (in Chinese with English summary)
- Zhang W, Jian P, Kröner A and Shi YR. 2013. Magmatic and metamorphic development of an Early to Mid-Paleozoic continental margin arc in the southernmost Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 63 – 74
- Zhang XH, Zhang HF, Jiang N, Zhai MG and Zhang YB. 2010. Early Devonian alkaline intrusive complex from the northern North China Craton: A petrological monitor of post-collisional tectonics. *Journal of the Geological Society*, 167(4): 717 – 730
- Zhang YP, Su YZ and Li JC. 2010. Regional tectonics significance of the Late Silurian Xibiehe Formation in central Inner Mongolia, China. *Geological Bulletin of China*, 29(11): 1599 – 1605 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Chen B, Zhang SH, Liu JM, Hu JM, Liu J and Pei JL. 2010. Pre-Yanshanian geological events in the northern margin of North China Craton and its adjacent areas. *Geology in China*, 37(4): 900 – 915 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Pan GT, Duan LP, Xia L, Liao ZL and Wang LQ. 2003. Some problems in the research of adakite. *Northwestern Geology*, 36(2): 13 – 19 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈斌, 徐备. 1996. 内蒙古苏左旗地区古生代两类花岗岩类的基本特征和构造意义. *岩石学报*, 12(4): 546 – 561
- 陈琦, 仇甘霖, 薛林福, 邹新民, 周和平, 杜玉申. 1993. 内蒙造山带南部古板块构造演化. *地质论评*, 39(6): 477 – 483
- 董申保, 田伟. 2004. 埃达克岩的原义、特征与成因. *地学前缘*, 11(4): 585 – 594
- 胡晓, 许传诗, 牛树银. 1990. 华北地台北缘早古生代大陆边缘演化. 北京: 北京大学出版社, 25 – 189
- 李承东, 冉焱, 赵利刚, 王惠初, 张阔, 许雅雯, 谷永昌, 张永清. 2012. 温都尔庙群锆石的 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄及构造意义. *岩石学报*, 28(11): 3705 – 3714

- 李刚, 刘正宏, 徐仲元, 彭向东, 董晓杰, 沙茜, 王婉琼. 2012. 内蒙古白乃庙逆冲推覆构造的组成及其构造特征. 吉林大学学报(地球科学版), 42(2): 309-319
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. 矿物岩石地球化学通报, 28(增刊): 77
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨峰杰. 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
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23(3): 565-582
- 李锦轶, 张进, 杨天南, 李亚萍, 孙桂华, 朱志新, 王励嘉. 2009. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化. 吉林大学学报(地球科学版), 39(4): 584-606
- 刘敦一, 简平, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消滅的证据. 地质学报, 77(3): 317-327
- 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, 351-458
- 钱青, 钟孙霖, 李通艺, 温大任. 2002. 八达岭基性岩和高 Ba-Sr 花岗岩地球化学特征及成因探讨: 华北和大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比. 岩石学报, 18(3): 275-292
- 秦亚, 梁一鸿, 邢济麟, 张青伟, 刘城先. 2013. 内蒙古正镶白旗地区早古生代 O 型埃达克岩的厘定及其意义. 地学前缘, 20(5): 106-114
- 邵济安. 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化. 北京: 北京大学出版社, 1-135
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 简平, 张福勤, 苗来成, 施光海, 张履桥, 陶华. 2005. 内蒙古苏尼特左旗白音宝力道 Adakite 质岩类成因探讨及其 SHRIMP 年代学研究. 岩石学报, 21(1): 143-150
- 唐克东, 张允平. 1991. 内蒙古缝合带的构造演化. 见: 肖序常, 汤耀庆主编. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化. 北京: 北京科学技术出版社, 30-54
- 唐克东, 邵济安. 1996. 古亚洲洋区蛇绿岩的某些特征与古洋演化. 见: 张旗编. 蛇绿岩与地球动力学研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 108-111
- 陶继雄, 许立权, 贺锋, 苏茂荣. 2005. 内蒙古巴特敖包地区早古生代洋壳消滅的岩石证据. 地质调查与研究, 28(1): 1-8
- 童英, 洪大卫, 王涛, 史兴俊, 张建军, 曾涛. 2010. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义. 地球学报, 31(3): 395-412
- 王婉琼, 徐仲元, 刘正宏, 赵庆英, 蒋孝君. 2013. 华北板块北缘中段早中二叠世的构造属性: 来自花岗岩类锆石 U-Pb 年代学及地球化学的制约. 岩石学报, 29(9): 2987-3003
- 王玉净, 樊志勇. 1997. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义. 古生物学报, 36(1): 58-69
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 洪大卫. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 172-189
- 徐备, Charvet J, 张福勤. 2001. 内蒙古北部苏尼特左旗蓝片岩岩石学和年代学研究. 地质科学, 36(4): 424-434
- 许立权, 邓晋福, 陈志勇, 陶继雄. 2003. 内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义. 现代地质, 17(4): 428-434
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236-244
- 张旗, 王焰, 刘伟, 王元龙. 2002. 埃达克岩的特征及其意义. 地质通报, 21(7): 431-436
- 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
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 胡健民, 宋彪, 刘健, 吴海. 2010. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景. 岩石矿物学杂志, 29(6): 824-842
- 张维. 2007. 内蒙古达茂旗地区早古生代和早中生代埃达克深成岩 SHRIMP 年代学. 硕士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1-20
- 张允平, 苏养正, 李景春. 2010. 内蒙古中部地区晚志留世西别河组的区域构造学意义. 地质通报, 29(11): 1599-1605
- 赵越, 陈斌, 张拴宏, 刘建民, 胡健民, 刘健, 裴军令. 2010. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件. 中国地质, 37(4): 900-915
- 朱弟成, 潘桂堂, 段丽萍, 夏林, 廖忠礼, 王立全. 2003. 埃达克岩研究的几个问题. 西北地质, 36(2): 13-19