

# 华北板块北缘乌梁斯太 A 型花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及构造意义\*

罗红玲 吴泰然\*\* 赵磊

LUO HongLing, WU TaiRan\*\* and ZHAO Lei

教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学, 北京 100871

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

2008-10-08 收稿, 2009-01-09 改回.

Luo HL, Wu TR and Zhao L. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Wuliangsitai A-type granite on the northern margin of the North China Plate and tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 515–526

**Abstract** Wuliangsitai Pluton from Urad Zhongqi, central Inner Mongolia, is located on the middle segment of the northern margin of the North China Plate. The Pluton mainly consists of biotite monzogranites. All samples show chemical signatures of alkaline A-type granite and are characterized by high contents of  $\text{SiO}_2$  (74.69% ~ 76.16%),  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (8.63% ~ 9.62%) and Rb ( $173 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ ), high ratios of  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  (3.21 ~ 3.32), Rb/Sr (3.27 ~ 8.68) and alkaline index ( $\text{A. I.} = \text{mol}(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 0.90$ ), low contents of CaO, Ba and Sr. They invariably exhibit light rare earth elements (LREE) enrichment with significant negative Eu anomalies ( $\delta\text{Eu} = 0.03 \sim 0.06$ ) in the chondrite-normalized REE patterns, depletion of Ba, Sr, P, Nb, Ta, Ti and enrichment of Rb, K in the primitive mantle normalized spidergram, which are similar to the Permian A-type granitoids in northeastern China. In the discrimination diagrams, all the samples show geochemical characteristics of  $\text{A}_2$ -type (post-collisional) granitoid, which means that their formation may be associated with post-collisional slab break-off. Wuliangsitai Pluton may be produced by partial melting of middle or lower crust by heating via mantle-derived basaltic magma and decompression due to crustal extension, followed by fractional crystallisation and late-stage replacement. SHRIMP U-Pb zircon age of  $277 \pm 3\text{Ma}$  from Wuliangsitai Pluton implies it was emplaced during the late stage of Early Permian, not the Triassic as previously thought.

**Key words** The northern margin of the North China Plate; A-type granite; Post-collision; Permian

**摘要** 内蒙古乌拉特中旗乌梁斯太岩体位于华北板块北缘中段, 岩性以黑云二长花岗岩为主。它具有较高的  $\text{SiO}_2$  (74.69% ~ 76.16%)、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (8.63% ~ 9.62%)、Rb ( $73 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ ) 含量和  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  (3.21 ~ 3.32)、Rb/Sr (3.27 ~ 8.68) 比值, 较低的 CaO、Ba 和 Sr 含量, 碱性指数  $\text{AI} = \text{mol}(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 0.90$ , 属于碱性 A 型花岗岩。稀土球粒陨石标准化图解上, 轻稀土相对富集, Eu 负异常较为明显,  $\delta\text{Eu} = 0.03 \sim 0.06$ ; 在原始地幔标准化蛛网图上, 亏损 Ba、Sr、P、Nb、Ta 和 Ti, 富集 Rb、K; 这些特征类似中国东北二叠纪 A 型花岗岩。在判别图解上, 所有样品均显示了  $\text{A}_2$  型(后碰撞)花岗岩特征。其形成可能与后碰撞板块断离作用有关。乌梁斯太岩体的形成过程可能为, 俯冲板片断离导致软流圈物质上涌, 发生底侵作用, 底侵的玄武质岩浆的加热作用以及地壳伸展的减压效应导致中下地壳的脱水部分熔融, 随后经历了分离结晶和晚期的交代作用。乌梁斯太岩体中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $277 \pm 3\text{Ma}$ , 表明其形成时代并非原来认为的三叠纪, 而是早二叠世晚期。

**关键词** 华北板块北缘; A 型花岗岩; 后碰撞; 二叠纪

**中图法分类号** P597.3; P588.121

\* 本文受国家自然科学基金项目(40672146)资助。

第一作者简介: 罗红玲, 女, 1978 年生, 博士, 构造地质学专业, E-mail: honglingl@pku.edu.cn

\*\* 通讯作者: 吴泰然, E-mail: twu@pku.edu.cn

# 1 引言

Loiselle and Wones (1979) 提出 A 型花岗岩为无水的、非造山环境形成的一类花岗岩。Collins *et al.* (1982) 提出可以通过 A 型花岗岩的高 Ga/Al 特征进行识别。Pearce *et al.* (1984) 将 A 型花岗岩等同于板内花岗岩, 即在 Rb-Y + Nb 判别图解上, 多位于板内环境的区域。Whalen *et al.* (1987) 总结了 A 型花岗岩特征, 并提出了 A 型花岗岩的判别图解。Sylvester (1989) 提出后碰撞碱性花岗岩。Eby (1990, 1992) 提出了将 A 型花岗岩划分为 A<sub>1</sub> 型(非造山)和 A<sub>2</sub> 型(后碰撞), 并提出了判别图解。Hong *et al.* (1996) 将 A 型花岗岩划分为 PA(非造山)和 AA(后碰撞), 与 Eby 的 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 型基本上对应。Liegeois (1998) 提出后碰撞阶段的剪切伸展作用过程较为有利于岩浆的侵位, 因此巨量花岗岩通常侵位于后碰撞阶段。后碰撞花岗岩的类型具有多样性特征, 后碰撞的 A 型花岗岩可以作为后碰撞阶段的重要标志, 或者与钙碱性花岗岩同时代, 或者与同期的镁铁或超镁铁质岩石构成双峰式组合(韩宝福, 2007)。

在索伦-贺根山蛇绿岩带以北的西伯利亚板块南缘, 发现了大量早二叠世碱性花岗岩体(洪大卫等, 1994; Hong *et al.*, 1996; Kovalenko *et al.*, 2006, 2007), 贺根山蛇绿岩带南边也出现了具有 A 型花岗岩特征的花岗岩和流纹岩(Shi *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2008), 但是, 索伦蛇绿岩带以南的二叠纪碱性 A 型花岗岩鲜见报道。是否存在同时代的 A

型花岗岩对研究古亚洲洋的演化和古板块之间碰撞作用的方式至关重要。华北板块北缘存在许多碱性花岗岩-碱性岩, 但这些碱性岩类通常被认为是形成于三叠纪(内蒙古自治区地质矿产局, 1991; 阎国翰等, 2000, 2001; 许立权等, 2004), 并且缺少这类花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年。它们的时代和成因影响了学者们对华北板块北缘构造岩浆演化问题的认识, 尤其是二叠纪的岩浆成因, 一部分学者认为是后碰撞阶段的底侵作用或者裂谷作用形成的(邵济安, 1991; 洪大卫等, 1994; Shi *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2008), 而另外一部分认为是俯冲作用形成的岛弧岩浆(Chen *et al.*, 2000, 2009; Miao *et al.*, 2008)。

乌拉斯太岩体位于乌拉特中旗南边, 构造位置上处于华北板块北缘中段, 索伦山蛇绿岩带以南, 原来曾被认为是印支期具有代表性的碱性花岗岩体(内蒙古自治区地质矿产局, 1991)。该岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果表明其侵位于早二叠世。这一发现为华北板块北缘的构造岩浆作用、古亚洲洋两侧构造单元对比和区域构造演化研究提供了新的依据。

# 2 地质背景和岩体特征

华北板块北缘中段二叠纪构造岩浆活动强烈, 发育了东升庙至太仆寺旗巨大的花岗岩带。这条花岗岩带位于赤峰—白云鄂博断裂带与察右中旗-固阳断裂带之间; 南依古元古代花岗岩带(钟长汀, 2006), 北临兴安造山带; 东部出露

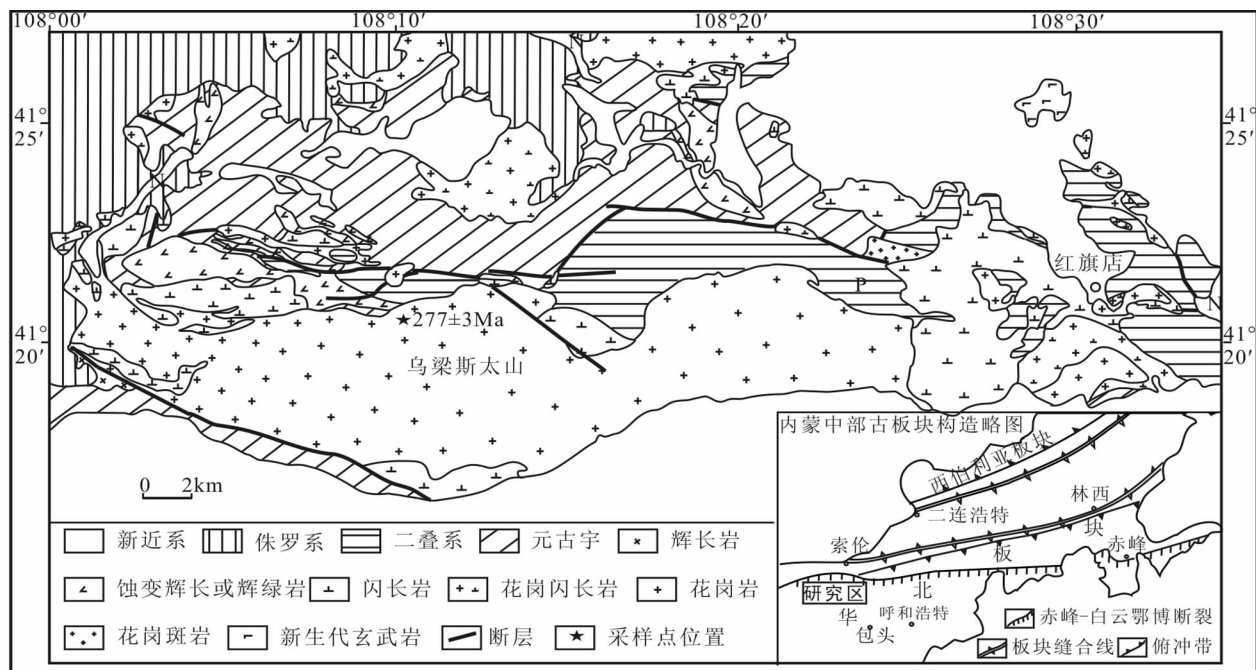


图1 乌拉特中旗乌拉斯太岩体地质简图(大图据内蒙古自治区地质局, 1972<sup>①</sup>; 小图据内蒙古自治区地质矿产局, 1991)  
Fig. 1 Simplified geological map of Wuliangtsitai Pluton from Urad Zhongqi (after BGMIRM, 1991)

① 内蒙古自治区地质局. 1972. 乌拉特中后联合旗幅 1/20 万地质图与说明书

了大量燕山期花岗岩(内蒙古自治区地质矿产局,1991)。这是一条由数十个岩体构成的,长 400km,宽约 30km,东西向展布的巨大花岗岩带。岩体以岩基状产出为主,岩株状产出为辅,岩体的长轴走向多为东西向(唐克东,1992)。岩石类型复杂,以酸性岩浆为主,并有少量同时代的基性、超基性岩体相伴产出。最近的研究获得岩带上岩浆岩的侵位时间为 249~291Ma(张宗清等,2003;罗红玲,2007;章永梅等,2008;赵磊,2008)。

乌梁斯太岩体属于东升庙-太仆寺旗花岗岩带上具代表性的岩基,位于乌拉特中旗南约 30km,呈东西向延长的岩基产出,出露面积约为 217km<sup>2</sup>,东西长 32km,南北宽 6~8km(图 1)。岩体北侧侵入下二叠统大红山组陆相火山-沉积岩层,大红山组火山岩主要由钙碱性安山岩、英安岩、流纹岩和凝灰岩组成(王荃等,1991)。岩体东侧侵入到二叠纪闪长岩中,测得东边的红旗店辉长闪长岩的锆石 La-ICPMS U-Pb 年龄为 273Ma(罗红玲,未发表数据)。岩体南侧侵入到中元古代渣尔泰群,西侧被中下侏罗统砂砾岩不整合覆盖。岩体北侧还出露了大量钙碱性 I 型花岗岩类,它们具有类似 TTG 花岗岩的地球化学性质,测得其代表性岩体-克布闪长岩体的 SHRIMP 年龄为 291Ma(罗红玲等,2007)。

乌梁斯太岩体主要出露内部相,外部相很窄。岩性为黑云母二长花岗岩,肉红色,中粒结构,含微斜长石 40%,钠长石 25%,石英 25%,黑云母 10%,蠕英石结构(石英与钠长石的微文相交生)十分普遍;副矿物为锆石、磷灰石、金红石和黄铁矿等。本次采样的坐标点为 108°11'13"E,41°20'33"N。

### 3 SHRIMP 年代学

锆石的透射光、反射光、阴极发光(CL)成像分析研究在中国地质科学院矿床地质研究所电子探针研究室完成。SHRIMP U-Pb 分析在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成,详细分析流程和原理见 Williams(1998)。应用标准锆石 Temora(417Ma)进行元素间的分馏校正,Pb/U 校正公式采用  $Pb/U = A(UO/U)^2$ (Caloué-Long *et al.*, 1995)。应用另一标准锆石 SL13(年龄 572Ma;U 含量  $238 \times 10^{-6}$ )标定所测样品的 U、Th 和 Pb 含量。以锆石阴极发光图像为依据,选择不同部位进行测试。测试过程中,每隔 3~4 个点插入一次 Temora 测定。数据处理采用 Ludwig SQUID 1.0 及 ISOPLOT 程序(Ludwig, 1999, 2001)。普通铅根据实测<sup>204</sup>Pb 校正。所列单个数据点的误差均为 1σ。采用<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄的加权平均值,误差为 2σ。

所测的 10 个点来自样品 ZQ05-06 的 10 颗锆石。所测的锆石都是透明的、柱状的,晶形较好,发育良好的岩浆型韵律环带结构,是岩浆成因的(图 2)。打点位置边部和核部均有分布,测试过程中未发现较老的锆石颗粒或核部的残留锆石。分析数据见表 1。Th/U 比值在 0.43~1.42 之间变化,Th、U 之间正相关性较好,表现出岩浆锆石的地球化学特征

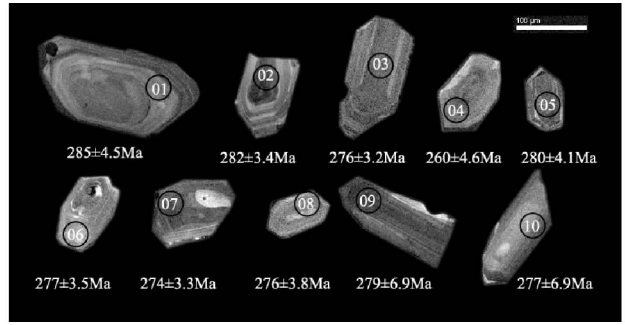


图 2 乌梁斯太岩体锆石特征和 SHRIMP 测点位置  
Fig. 2 Characteristics and dating spots of zircons of Wuliangsitai Pluton

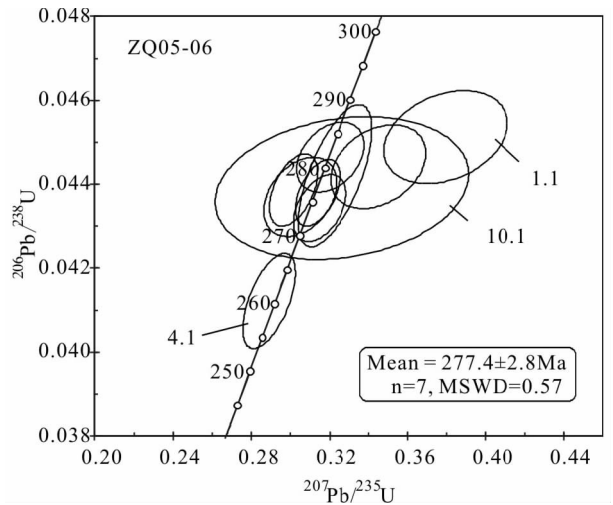


图 3 乌梁斯太岩体锆石 SHRIMP U-Pb 同位素协和图  
Fig. 3 Zircon SHRIMP U-Pb isotopic concordia diagram of Wuliangsitai Pluton

(Claesson *et al.*, 2000)。在传统协和图里,大多数锆石落在一致曲线上。点号 01 明显偏离一致曲线。点号 04 的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄值(260+5Ma)偏年轻,但是,接近本地区闪长岩类的黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄(罗红玲,2007),可能代表后期热事件时代。点号 10 的误差相对较大。除这三个点外,其余 7 个测试点获得<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄的加权平均值为 277+3Ma(图 3),代表锆石结晶年龄。这个年龄与岩体东边的红旗店岩体的锆石 La-ICPMS U-Pb 年龄在误差范围内一致,表明它们可能同期形成。

前人据绝对年龄值 215Ma(测试方法不详)和野外侵位接触关系,认为乌梁斯太岩体侵位于海西晚期(内蒙古自治区地质局,1972)或印支期(内蒙古自治区第 1 区调队,1980①),1984 年北京铀矿地质研究所在岩体东部的样品中测

① 内蒙古自治区第 1 区调队. 1980. 五原县幅 1/20 万地质图与说明书

表1 乌梁斯太岩体锆石 U-Pb SHRIMP 分析结果

Table 1 SHRIMP U-Pb data for zircons of the Wuliangsitai Pluton

点号	$^{206}\text{Pb}_c$ %	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm$ %	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm$ %	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm$ %	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	年龄 (Ma)
01	0.38	122	51	0.43	4.74	0.0610	5.3	0.380	5.5	0.04512	1.6	284.5	$\pm 4.5$
02	0.37	598	420	0.73	23.0	0.0521	3.3	0.320	3.6	0.04465	1.2	281.6	$\pm 3.4$
03	0.28	693	382	0.57	26.1	0.0520	2.1	0.314	2.4	0.04380	1.2	276.3	$\pm 3.2$
04	0.13	778	461	0.61	27.6	0.0508	2.5	0.289	3.1	0.04122	1.8	260.4	$\pm 4.6$
05	0.65	712	423	0.61	27.3	0.0563	4.4	0.345	4.7	0.04442	1.5	280.2	$\pm 4.1$
06	0.38	476	202	0.44	18.0	0.0499	2.4	0.302	2.7	0.04386	1.3	276.7	$\pm 3.5$
07	0.41	749	376	0.52	28.0	0.0526	2.5	0.315	2.8	0.04343	1.2	274.1	$\pm 3.3$
08	0.54	657	322	0.51	24.8	0.0506	3.8	0.305	4.0	0.04370	1.4	275.7	$\pm 3.8$
09	0.46	921	1268	1.42	35.2	0.0530	2.9	0.323	3.9	0.0442	2.5	278.8	$\pm 6.9$
10	1.85	306	272	0.92	11.8	0.0539	13	0.326	13	0.0439	2.6	277.0	$\pm 6.9$

注: (1)  $^{206}\text{Pb}_c$  为普通  $^{206}\text{Pb}$  占总 Pb 的百分比,  $\text{Pb}^*$  为放射成因 Pb; (2) 标准校正值的误差是 0.33%; (3) 普通 Pb 用测量的  $^{204}\text{Pb}$  校正

得锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄为 160.5 ~ 175.5 Ma (内蒙古自治区第 1 地质大队, 1985<sup>①</sup>)。内蒙古自治区地质矿产局 (1991) 测得 K-Ar 年龄为 205 Ma。这些年龄均偏年轻。锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为确定乌梁斯太岩体的侵位时间提供了准确的依据, 表明乌梁斯太岩体侵位于早二叠世晚期, 而非三叠纪, 与野外接触关系基本一致。

## 4 地球化学特征

乌梁斯太花岗岩具有较高的  $\text{SiO}_2$  (74.69% ~ 76.16%)、 $\text{K}_2\text{O}$  (4.38% ~ 5.09%)、 $\text{Na}_2\text{O}$  (4.25% ~ 4.77%)、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (8.63% ~ 9.62%)、Rb ( $173 \times 10^{-6}$  ~  $200 \times 10^{-6}$ ) 和  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  (3.21 ~ 3.32)、Rb/Sr (3.27 ~ 8.68)、K/Rb (207 ~ 230), 后三个比值与 A 型花岗岩的平均值接近 (表 2), 较低的 CaO (0.34% ~ 0.62%)、Ba ( $44 \times 10^{-6}$  ~  $133 \times 10^{-6}$ ) 和 Sr ( $20 \times 10^{-6}$  ~  $61 \times 10^{-6}$ ), 碱性指数 A. I. 多数大于 0.90, 为 0.89 ~ 1.01 (表 2)。在  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$  图解上, 落入 A 型花岗岩的范围 (图 4), 在 Y + Nb-Rb 图解上, 落入板内或后碰撞的范围 (图 5), 属于碱性 A 型花岗岩。在 I、S、M、A 型花岗岩判别图解上, 也显示了 A 型花岗岩的特征 (图 6)。

乌梁斯太岩体具有中等的总稀土含量, 为  $154 \times 10^{-6}$  ~  $219 \times 10^{-6}$ , 明显高于岩体以北的克布闪长岩体稀土总含量 ( $81 \times 10^{-6}$  ~  $95 \times 10^{-6}$ ) (罗红玲等, 2007), 但与相邻的红旗店辉长闪长岩体的稀土总含量相当 ( $67 \times 10^{-6}$  ~  $218 \times 10^{-6}$ ) (罗红玲等, 未发表数据), ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> = 4.6 ~ 6.2, LREE/HREE = 7.6 ~ 9.4, 轻稀土相对重稀土富集。 $\delta\text{Eu} = 0.03$  ~ 0.06, Eu 为极大负异常, 可能与斜长石的分离作用有关 (Turner *et al.*, 1992; Eby, 1992)。在稀土元素球粒陨石标准化图解上, 呈现出“海鸥式”稀土模式图 (图 7)。在原始地幔标准化蛛网图上 (图 8), Ba, Sr, P, Nb, Ta 和 Ti 出现较大的亏损, Rb、K 为明显的正异常。所有样品的稀土模式图和原

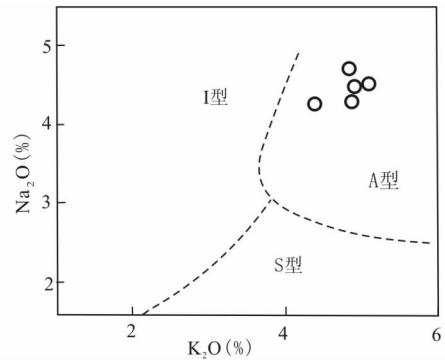
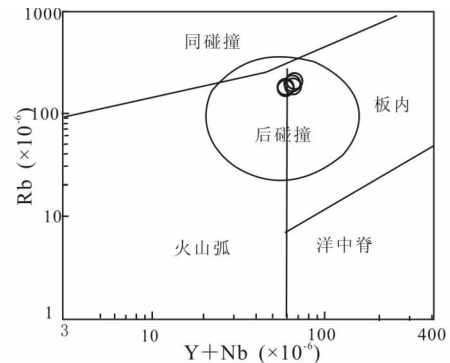
图4  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$  图解 (据 Collins *et al.*, 1982)Fig. 4 Diagram of  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$  (after Collins *et al.*, 1982)

图5 Y + Nb-Rb 图解 (据 Pearce, 1996)

Fig. 5 Diagram of Y + Nb-Rb (after Pearce, 1996)

① 内蒙古自治区第 1 地质大队. 1985. 得令淖尔幅、满达苏木幅、新忽热公社幅、哈尼河幅、图公社幅和石哈河公社幅 1/5 万地质图与说明书

表 2 乌梁斯太花岗岩的主量元素 (wt%) 和稀土、微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 化学分析数据

Table 2 Analysis result of major element (wt%) and trace element ( $\times 10^{-6}$ ) data of the Wuliangstitai granite

样品号	ZQ05-01	ZQ05-02	ZQ05-04	ZQ05-05	ZQ05-06	ZQ05-01*	A 型花岗岩平均值
SiO <sub>2</sub>	76.16	75.33	75.16	74.69	75.87		73.81
TiO <sub>2</sub>	0.054	0.082	0.077	0.080	0.073		0.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.70	12.83	13.05	13.21	13.18		12.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	1.01	0.93	1.30	1.40	1.09		1.76
MnO	0.025	0.037	0.029	0.035	0.039		0.06
MgO	0.08	0.14	0.11	0.13	0.03		0.20
CaO	0.34	0.62	0.39	0.41	0.46		0.75
Na <sub>2</sub> O	4.33	4.53	4.53	4.77	4.25		4.07
K <sub>2</sub> O	4.88	5.09	4.90	4.85	4.38		4.65
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.012	0.014	0.008	0.011	0.006		0.04
烧失量	0.40	0.39	0.43	0.41	0.56		
总量	99.98	99.98	99.99	99.98	99.93		
A. I.	0.98	1.01	0.98	0.99	0.89		0.95
Sc	1.12	1.44	0.98	1.96	0.93	1.05	
Cr	10.72	9.91	7.04	3.32	4.60	7.38	
Co	0.94	1.16	1.07	1.22	1.08	0.93	
Ni	0.74	1.00	0.15	0.05	0.79	0.13	
Cu	0.94	1.33	1.10	1.20	1.80	0.72	
Zn	27.21	28.45	35.09	37.48	35.37	21.09	120
Ga	22.35	22.38	22.56	22.46	22.53	22.08	24.6
Rb	172.7	199.9	177.3	194.5	183.6	175.4	169
Sr	19.89	61.03	24.52	27.16	26.35	19.87	48
Y	36.35	44.37	38.93	43.89	42.43	36.85	75
Zr	164.3	186.0	208.9	209.4	169.4	163.3	528
Nb	23.94	23.02	22.02	22.09	23.59	23.82	37
Cs	2.26	1.98	3.62	3.62	3.98	2.29	
Ba	52.29	132.9	43.91	48.04	47.82	53.13	352
Hf	6.51	7.20	7.95	7.88	7.02	6.56	
Ta	1.62	1.43	1.66	1.46	1.64	1.58	
Pb	14.76	30.44	23.43	23.78	25.34	15.94	24
Th	21.14	22.41	19.54	18.03	21.72	20.21	23
U	3.50	3.15	4.23	3.61	4.93	3.52	5
Ga/Al $\times 10^4$	3.32	3.3	3.27	3.21	3.23		3.75
Rb/Sr	8.68	3.27	7.23	7.16	6.97		3.52
K/Rb	207	212	230	207	209		229
La	26.35	35.17	33.79	40.70	32.95	27.91	
Ce	60.41	76.72	75.00	88.56	73.93	62.89	
Pr	7.86	9.31	9.08	10.97	9.59	7.97	
Nd	28.66	35.11	33.54	41.26	36.54	29.32	
Sm	6.82	7.65	7.40	8.80	8.50	6.90	
Eu	0.081	0.142	0.076	0.132	0.074	0.081	
Gd	5.93	7.01	6.60	7.33	7.59	6.03	
Tb	1.04	1.27	1.13	1.29	1.30	1.06	
Dy	6.51	7.61	7.03	7.80	8.02	6.54	
Ho	1.38	1.65	1.49	1.63	1.66	1.41	
Er	3.89	4.71	4.20	4.50	4.59	3.98	
Tm	0.59	0.75	0.67	0.70	0.73	0.61	
Yb	3.84	5.00	4.49	4.42	4.75	3.88	
Lu	0.58	0.75	0.68	0.68	0.71	0.58	
REE	153.9	192.8	185.2	218.8	190.9		
$\delta$ Eu	0.04	0.06	0.03	0.05	0.03		

注：常量元素测试、微量和稀土元素的前处理在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成，微量和稀土元素测试由中科院地质与地球物理所 ICP-MS 法完成，大多数元素 RSD < 5%。A. I. = mol (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) / mol Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\delta$ Eu = Eu<sub>N</sub> /  $\sqrt{Sm_N \times Gd_N}$ 。带 \* 号的为重复样。A 型花岗岩平均值据 Whalen *et al.*, 1987

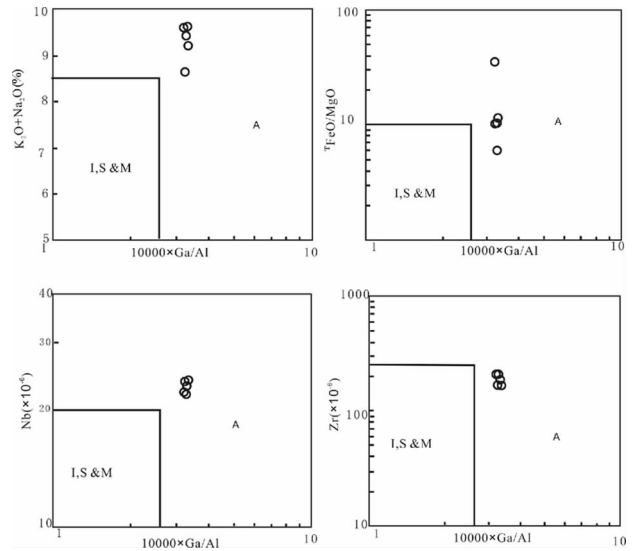


图 6 A 型花岗岩判别图解 (据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 6 Discriminant diagram of A-type granitoid (after Whalen *et al.*, 1987)

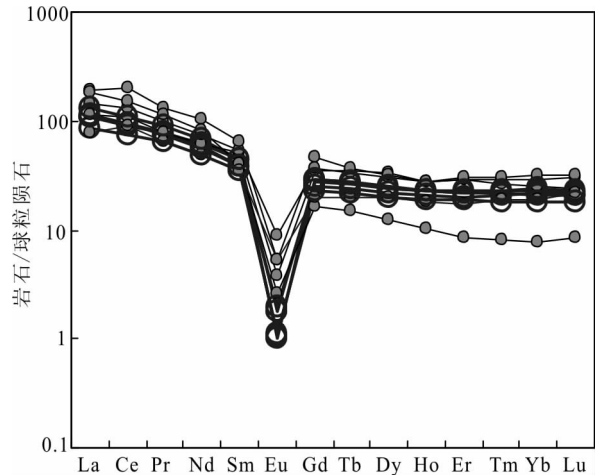


图 7 稀土元素球粒陨石标准化图解

标准化值据 Wakita *et al.*, 1971。粗线为本文数据, 细线为中国东北二叠纪 A 型花岗岩, 引自 Wu *et al.*, 2002

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns

Chondrite data from Wakita *et al.*, 1971. Other data from Wu *et al.*, 2002

始地幔标准化图基本平行, 显示了同源演化的特征, 与中国东北二叠纪 A 型花岗岩基本一致 (图 7 和 8)。

在 A 型花岗岩的判别图解上 (图 9 和 10), 均表现了 A<sub>2</sub> 型花岗岩特征。相对 A<sub>1</sub> 型花岗岩, 乌梁斯太花岗岩所有样品的 R1 变化范围窄 (R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti) = 2112 ~ 2490), Ga/Al  $\times 10000$  值偏低 (3.21 ~ 3.32), 样品的 Zr、Nb、Y 含量也低于 A 型花岗岩平均值 (表 2), 与 Hong *et al.* (1996) 提出的 PA (后碰撞) 花岗岩的特征基本一致。

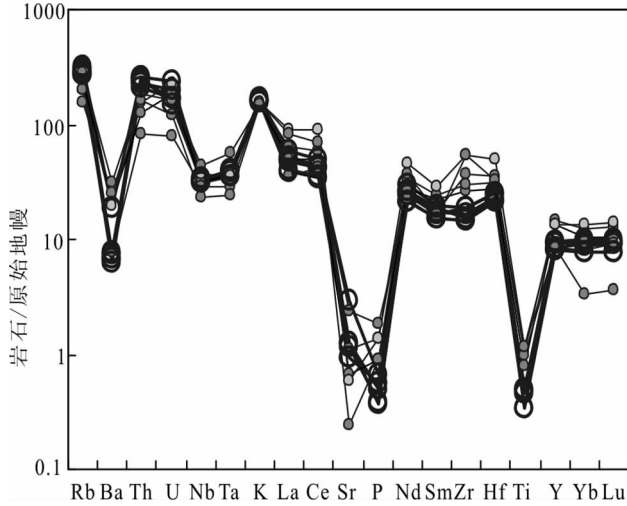


图8 微量元素原始地幔标准化图解  
 标准化值据 Sun and McDonough, 1989. 符号意义同图7  
 Fig. 8 Primitive mantle - normalized trace element spider diagram  
 Primitive mantle data from Sun and McDonough, 1989. Symbols are the same as those in Fig. 7

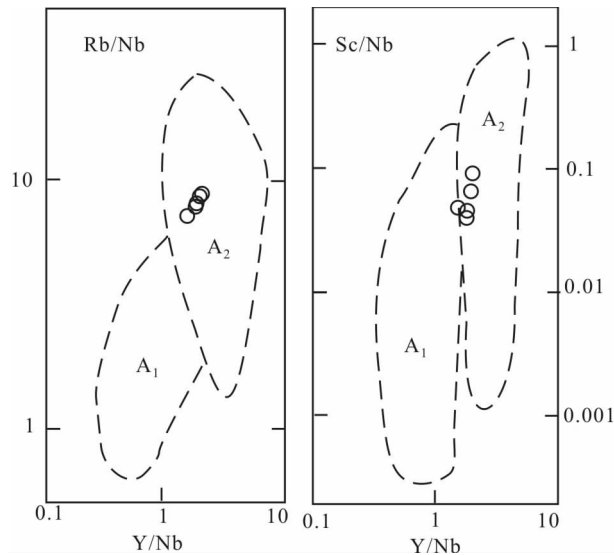


图9 Y/Nb-Rb/Nb 和 Y/Nb-Sc/Nb 图解 (据 Eby, 1992)  
 Fig. 9 Y/Nb-Rb/Nb and Y/Nb-Sc/Nb plots (after Eby, 1992)

## 5 成因及构造意义

### 5.1 成因

乌拉特中旗至白云鄂博一带二叠纪花岗岩类和辉长岩的 Sr、Nd、Pb 和锆石 Hf 同位素显示了下地壳或富集型地幔的同位素特征,与华北克拉通中生代的岩浆岩类似,而不同于兴蒙造山带具有亏损型地幔同位素特征的岩浆岩(张宗清等, 2003; 罗红玲, 2007; 赵磊, 2008; 罗红玲等, 未发表数据)。

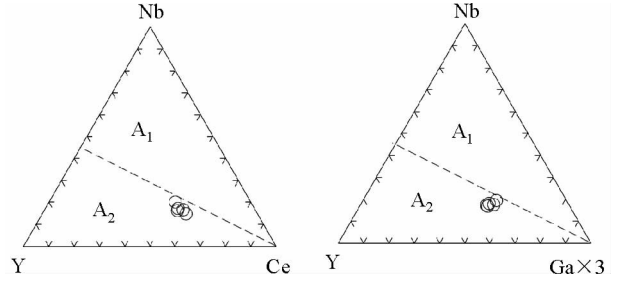


图10 A<sub>1</sub>和A<sub>2</sub>型花岗岩类的三角形判别图解(据 Eby, 1992)  
 Fig. 10 Triangular plots for distinguishing between A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> granitoids (after Eby, 1992)

由于现在还缺少富集地幔岩的锆石 Hf 同位素数据,以及地幔岩熔融不能直接形成花岗岩等原因,它们来自下地壳的可能性较大,但源区可能受到富集型地幔的影响。

乌梁斯太岩体具有 A 型花岗岩的地球化学特征。对于 A 型花岗岩的成因,大体上有如下几种观点:1)部分熔融, A 型花岗岩主要起源于中下地壳高钾、贫水的岩石的部分熔融 (Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Landenberger and Collins, 1996; Patino Douce, 1997); 2)分异模式,地幔来源的玄武质岩浆分异作用产生 A 型花岗岩;其化学成分变化通过碱性长石和斜长石的分异,以及少量辉石或者角闪石分异解释,斜长石的不断分离结晶作用可使残余岩浆中的 Sr、Eu 不断亏损;副矿物,像褐帘石的分离可能起了重要作用 (Loiselle and Wones, 1979; Eby, 1990, 1992; Turner *et al.*, 1992; King *et al.*, 2001); 3)交代模式,晚期碱性富 F、Cl 的熔体与残余岩浆或者先前存在的花岗岩交代作用产生 A 型花岗岩 (Taylor *et al.*, 1980; Harris *et al.*, 1986)。

乌梁斯太岩体为巨大岩基, SiO<sub>2</sub> 含量极高并且变化范围窄,表明其不可能直接由分离结晶作用形成(张旗等, 2007)。而实验证明,钙碱性岩浆在地壳浅部的脱水熔融可以形成 A 型花岗岩 (Patino Douce, 1997)。因此,中下地壳的部分熔融可能是乌梁斯太岩浆形成的重要机制。斜长石的分离结晶作用以及源区大量斜长石残留可能造成岩浆中的低 Sr 和负 Eu 异常。与乌梁斯太岩体东侧的红旗店闪长岩体相比,随着 SiO<sub>2</sub> 含量增加,岩体的 Rb 变化不大,但是 Ba、Sr 含量显著降低(罗红玲等, 未发表数据),表明钾长石的分离结晶作用对乌梁斯太岩体的低 Ba、Sr 含量起了重要作用 (Klimm *et al.*, 2008)。乌梁斯太岩体发育蠕英石,目前在蠕英石的成因研究中,比较流行的观点为,直接结晶作用、交代作用和出溶作用 (Phillips, 1974; Castle and Lindsley, 2004)。显微镜下,蠕英石主要发育于微斜长石边部,斜长石的牌号较低 (An<sub>1</sub>-An<sub>3</sub>), 为钠长石,表明岩浆晚期可能发生过交代作用。

魏春生(2000)认为地幔物质的上涌底侵可能是将 A 型花岗岩构造-岩浆活动密切联系起来的桥梁和纽带。乌梁斯太岩体的地球化学性质与中国东部、内蒙古中部二叠纪 A 型

花岗岩类似。Wu *et al.* (2002) 认为中国东北部二叠纪 A 型花岗岩的形成与后碰撞阶段板块的断离作用有关。Jahn *et al.* (2000) 认为这些二叠纪后碰撞 A 型花岗岩的形成可能通过一系列过程, 包括大量玄武质岩浆底侵作用, 这些玄武质岩石部分熔融产生花岗质液体, 然后是伸展的分离结晶作用。洪大卫等(2000) 提出兴蒙造山带大面积的晚古生代—中生代花岗岩可能由于基性岩浆底侵作用导致 800 ~ 600Ma 前已俯冲的洋壳形成的新生大陆地壳在拉伸体制下部分熔融而成。

区域上, 乌梁斯太岩体北部的早二叠世克布岩体具有高 Sr、Sr/Y 和正 Eu 异常, 可能形成于底侵的玄武质岩浆的部分熔融(罗红玲等, 2007), 此时, 地壳具有相当的厚度。而 277Ma 左右侵位的乌梁斯太岩体具有较低的 Sr 和 Sr/Y, 较明显的 Eu 负异常, 表明地壳处于拉伸减薄阶段, 岩浆房的深度变浅。而板片断离作用可以导致软流圈地幔物质的上涌, 玄武质岩浆底侵以及地壳伸展减压作用导致中下地壳的部分熔融, 可能是乌梁斯太岩体的成因。

乌梁斯太岩体具有 Nb、Ta、Ti 的负异常, 目前关于 Nb、Ta、Ti 负异常主要有三种观点, 1) 代表俯冲背景, 地幔楔的物质受到大陆地壳的混染(赵振华, 2005); 2) 代表源区有金红石残留, 来源较深(Xiong *et al.*, 2005); 3) 代表源区特征, 源区为早先存在的岛弧或者地壳。同位素研究显示乌拉特中旗一带的花岗岩、辉长岩的源区以下地壳物质为主, 而在地壳伸展的背景下, 源区不可能太深。因此, 第三种情况可能性最大。

### 5.2 构造意义

乌梁斯太花岗岩具有极低的 Sr 含量 ( $20 \times 10^{-6} \sim 61 \times 10^{-6}$ ), 极高的 Yb 含量 ( $3.84 \times 10^{-6} \sim 5.00 \times 10^{-6}$ ), 以及极大的 Eu 负异常 (0.03 ~ 0.06), 张旗等(2008) 称这类花岗岩为南岭型花岗岩, 与南岭早中生代花岗岩相似, 形成于造山后地壳减薄阶段。

在花岗岩的各类判别图解上, 乌梁斯太岩体所有样品比较一致的显示了后碰撞花岗岩的特征(图 4, 图 9-13)。在 R1 和 R2 判别图解上, 所有样品均落入 Hong *et al.* (1996) 划分的后造山范围。在铝饱和指数图解上(图 12), 主要落入 POG(后造山) 花岗岩的范围。在常量元素的判别图解上(图 13), 均显示了 POG 花岗岩特征, 与前面所述的结论基本一致(图 5, 图 9-12)。

乌梁斯太岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $277 \pm 3$ Ma, 表明它侵位于早二叠世晚期, 与锡林浩特具有 A 型花岗岩地球化学特征的流纹岩、花岗岩的年龄基本上一致, 后两者的 SHRIMP 年龄分别为  $279 \pm 3$ Ma、 $276 \pm 2$ Ma(Shi *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2008)。乌梁斯太花岗岩与中国东北部、锡林浩特、西乌珠穆沁旗二叠纪 A 型花岗岩、流纹岩的地球化学特征基本一致(Wu *et al.*, 2002; Shi *et al.*, 2004; Hong *et al.*, 1996; Zhang *et al.*, 2008), 与索伦蛇绿岩带北侧的 Khan Bogd 碱性花岗岩的性质类似, 不同之处仅在于后者强烈富集

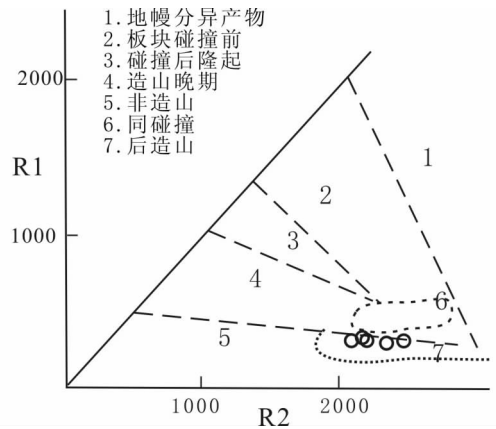


图 11 R2-R1 图解(据 Batchelor and Bowden, 1985; 后造山的范围据 Hong *et al.*, 1996)

$R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$ ,  $R2 = 6Ca + 2Mg + Al$   
Fig. 11 Plot of R2-R1 (after Batchelor and Bowden, 1985; Hong *et al.*, 1996)

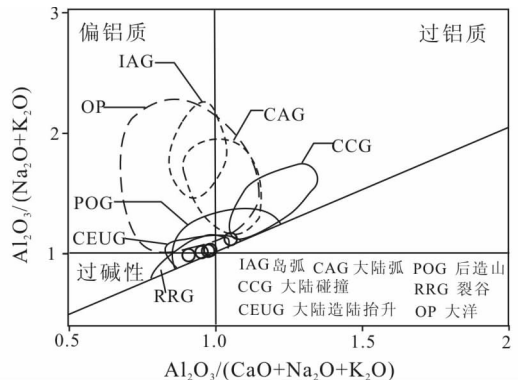


图 12 铝饱和指数图解(据 Maniar and Piccoli, 1989)  
Fig. 12 Shand's index (after Maniar and Piccoli, 1989)

稀有金属且  $\epsilon_{Nd}(t) > 0$ (Kovalenko *et al.*, 2006, 2007)。在构造位置上, 乌梁斯太岩体沿索伦蛇绿岩带与西伯利亚板块南缘的二叠纪 A 型花岗岩基本上呈对称分布, 它们可能同属于后碰撞阶段的产物。

除此之外, 乌梁斯太岩体东部的红旗店辉长闪长岩的锆石 La-ICPMS U-Pb 年龄为 273Ma(罗红玲, 未发表数据), 乌拉特中旗钙碱性闪长岩的黑云母  $^{40}Ar/^{39}Ar$  年龄为 260 ~ 258Ma, SHRIMP 年龄为 291Ma(罗红玲, 2007), 大青山石兰哈达、元恒永钙碱性闪长岩的 TIMS 年龄分别为 299、282Ma(袁桂邦和王惠初, 2006; 张玉清等, 2007); 大青山哈拉合少高钾钙碱性花岗岩 TIMS 年龄为 261Ma(赵庆英等, 2007); 东升庙地区强过铝质 S 型花岗岩的独居石 Th-U-Pb 年龄为 286 ~ 276Ma(王鑫琳, 2007), 康保地区强过铝质 S 型花岗岩的独居石 Th-U-Pb 年龄为 281 ~ 252Ma(王鑫琳等, 2007), 西乌珠穆沁旗南部的前进场强过铝质花岗岩的 SHRIMP 年龄为 281Ma(岳永君, 1994; 王万军等, 2005; 鲍庆中等, 2007), 四子

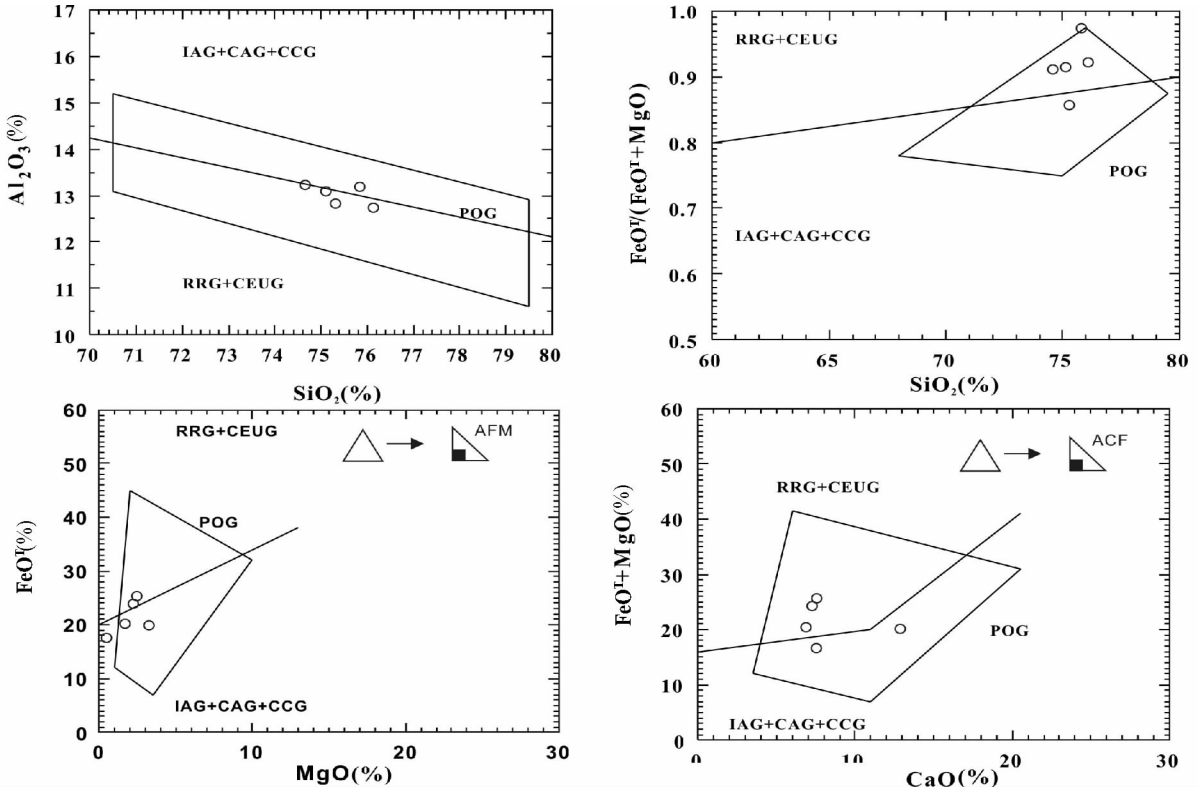


图 13 花岗岩类的构造环境判别图解 (据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 13 Tectonic discriminant diagram of granitoids (after Maniar and Piccoli, 1989)

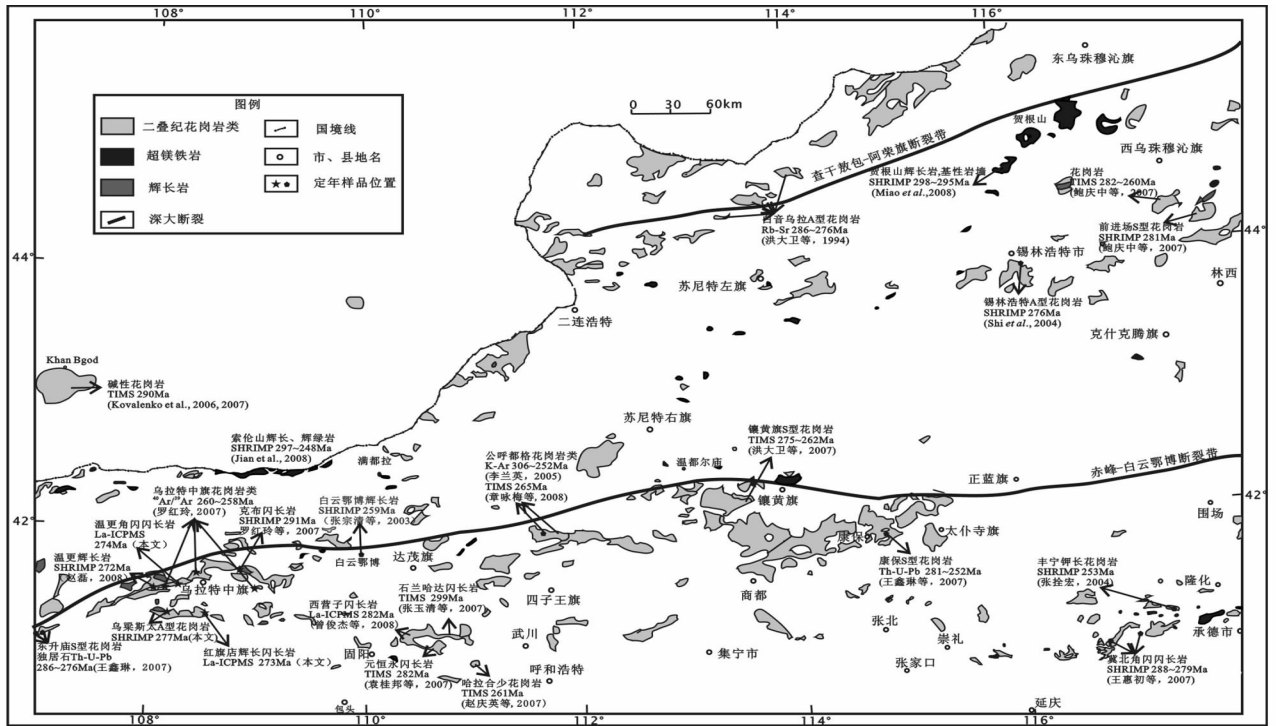


图 14 内蒙古中部二叠纪侵入岩分布图

底图据内蒙古自治区地质矿产局(1991)、河北省地质矿产局(1989)以及未公开发表的1/5万区调资料和定年数据;超镁铁岩和辉长岩为不同时代,断裂带的位置改自 Xiao *et al.* (2003)

Fig. 14 Geological map of central Inner Mongolia to show the distribution of Permian granitoids

Base map after BGMIRM (1991), BGMRH (1989) and Xiao *et al.* (2003)



王旗公呼都格强过铝质 S 型花岗岩的 K-Ar、Rb-Sr 和 TIMS 年龄的为 306 ~ 252Ma (李兰英, 2005; 章永梅等, 2008), Sylvester (1998) 提出强过铝质 S 型花岗岩形成于后碰撞环境; 镶黄旗一带具有后造山性质的 S 型花岗岩 TIMS 年龄为 275 ~ 262Ma (洪大卫等, 2007); 乌梁斯太北部的温更辉长岩、白云鄂博矿区辉长岩的 SHRIMP 年龄分别为 272、259Ma (赵磊, 2008; 张宗清等, 2003), 温更角闪闪长岩的锆石 La-ICPMS U-Pb 年龄为 277Ma (罗红玲, 未发表数据); 冀北角闪闪长岩的 SHRIMP 年龄为 288 ~ 279Ma (王惠初等, 2007); 东升庙地区二辉橄橄岩 TIMS 年龄为 270Ma (内蒙古自治区地质矿产勘查开发局, 1999<sup>①</sup>)。各岩体分布位置及年龄见图 14。岩性的差异可能与源区、源岩、残留物、岩浆熔融深度、成岩过程差异以及区域上间歇式的伸展作用等有关, 但这些岩浆岩基本上都是在 291 ~ 252Ma 这一相对短暂的时间内侵位的, 而与俯冲相关的岩浆岩往往有比较长的演化历史。这些证据表明, 乌梁斯太 A 型花岗岩与本地区钙碱性闪长岩、强过铝质 S 型花岗岩以及基性、超基性岩石属于同期侵位, 符合后碰撞演化阶段岩浆岩类型的多样性、巨量岩浆岩侵位以及岩石组合特征。

从构造作用上看, 交其尔推覆构造带中糜棱岩里的白云母的 K-Ar 年龄为 247Ma (张维杰等, 1995); 尚义-赤城-承德断裂带糜棱岩里的黑云母、角闪石 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 坪年龄为 280 ~ 211Ma (王瑜, 1996; 胡玲等, 2002; 崔盛芹等, 2002)。推覆构造变形作用最老的年龄接近碰撞的时代, 可代表碰撞事件的上限 (李继亮等, 1999)。这些构造作用与华北克拉通北缘硫化物矿床的形成基本上同期 (吕林素等, 2007), 接近包括乌梁斯太岩体在内的华北克拉通北缘大量二叠纪岩浆岩侵位的时代, 尤其是很多辉长岩或者闪长岩类与构造断层、断裂关系十分密切, 表明断层、断裂的活动对这些岩浆的形成具有重要意义, 而后碰撞阶段也正是这些断层、断裂活动高峰期。

## 6 结论

综上所述, 乌拉特中旗乌梁斯太岩体为 A<sub>2</sub> 型 (后碰撞) 花岗岩。其成因可能为, 后碰撞背景下, 板片的断离作用, 导致软流圈物质上涌, 发生玄武质岩浆底侵, 以及地壳拉张减薄效应共同造成了中下地壳脱水部分熔融, 熔体随后经历了分离结晶作用和交代作用。岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 277 ± 3Ma, 表明乌梁斯太岩体的侵位时代并非原来认为的三叠纪, 而是二叠纪, 此时, 华北板块北缘可能已经进入后碰撞的构造演化阶段。

## References

Bao QZ, Zhang CJ, Wu ZL *et al.* 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granitoids in a Late Paleozoic rift area, southeastern Inner Mongolia,

- and its implications. *Geology in China*, 34 (5): 790 - 798 (in Chinese with English abstract)
- Batchelor RA and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rocks series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48: 43 - 55
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province (BGMHRH). 1989. *Regional Geology of Hebei Province*, Beijing Municipality and Tianjin Municipality. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region (BGMHRIM). 1991. *Regional Geology of Inner Mongolia Autonomous Region*. Geological memoirs series 1, no. 25. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Castle RO and Lindsley DH. 2004. An exsolution silica-pump model for the origin of myrmekite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115 (1): 58 - 65
- Chen B, Jahn BM, Wilde SA *et al.* 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328: 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
- Claesson S, Vetrin V, Bayanova T *et al.* 2000. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola Peninsula, Russia; A record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic. *Lithos*, 51: 95 - 108
- Claoue-Long JC, Compston W, Roberts J *et al.* 1995. Two Carboniferous ages: A comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar analysis. In: Berggren WA, Kent DV *et al.* (eds.). *Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation*. SEPM Special Publication, 54: 3 - 21
- Collins WJ, Beams SD, White AJR *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189 - 200
- Cui SQ, Li JR, Wu ZH *et al.* 2002. Mesozoic and Cenozoic intracontinental orogenesis of the Yanshan area, China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Eby GN. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26: 115 - 134
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20: 641 - 644
- Han BF. 2007. Diverse post-collisional granitoids and their tectonic setting discrimination. *Earth Science Frontiers*, 14 (3): 64 - 72 (in Chinese with English abstract)
- Harris NBW, Tindle AG and Tindle AG. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 19: 67 - 81
- Hong DW, Huang HZ, Xiao YJ *et al.* 1994. The Permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance. *Acta Geologica Sinica*, 68 (3): 219 - 230 (in Chinese with English abstract)
- Hong DW, Wang SG, Han BF *et al.* 1996. Post-orogenic alkaline granites from China and comparisons with anorogenic alkaline granites elsewhere. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13 (1): 13 - 27
- Hong DW, Wang SG, Xie XL *et al.* 2000. Genesis of positive  $\epsilon_{Nd}(t)$  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)
- Hong DW, Wang T and Tong Y. 2007. An outline about granitoids in

① 内蒙古自治区地质矿产勘查开发局. 1999. 东升庙幅、团结二队幅、乌根高勒苏木幅和乌兰陶勒盖庙幅 1/5 万地质图与说明书

- China. Geological Reviews, 52(Supp. ): 9 – 16 ( in Chinese with English abstract)
- Hu L, Song HL, Yan DP *et al.* 2002.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of mylonites from Shangyi-Chicheng fault zones and its geological significance. Science in China (Ser. D), 32 (11): 908 – 913 ( in Chinese)
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. Episodes, 23: 82 – 92
- Jian P, Liu DY, Kroner A *et al.* 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
- Klimm K, Holtz F and King PL. 2008. Fractionation vs. magma mixing in the Wangrah Suite A-type granites, Lachlan Fold Belt, Australia: Experimental constraints. Lithos, 102(3 – 4): 415 – 434
- King PL, Chappell BW, Allen CM *et al.* 2001. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite. Australian Journal of Earth Sciences 48(4): 501 – 514
- Kovalenko VI, Yarmoluyk VV, Sal'nikova EB *et al.* 2006. Geology, geochronology and geodynamics of the Khan Bogd alkali granite pluton in southern Mongolia. Geotectonics, 40(6): 450 – 466
- Kovalenko VI, Yarmoluyk VV, Kozlovsky AM *et al.* 2007. Two types of magma sources of rare-metal alkali granites. Geology of Ore Deposits, 49(6): 442 – 446
- Landenberger B and Collins WJ. 1996. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelundi complex, eastern Australia. Journal of Petrology, 37: 145 – 170.
- Li JL, Sun S, Hao J *et al.* 1999. Time limit of collision event of collision orogens. Acta Petrologica Sinica, 15(2): 315 – 320 ( in Chinese with English abstract)
- Li LY. 2005. Geological characteristics and tectonic significance of Gonghude granite rock body in Siziwangqi, Inner Mongolia. Journal of Precious Metallic Geology, 14(2): 97 – 102 ( in Chinese with English abstract)
- Liegeois JP. 1998. Some words on the post-collisional magmatism. Lithos, 45: Xv – Xvii
- Loiselle MC and Wones DR. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. Geological Society of America Abstracts with Programs, 11: 468
- Luo HL, Wu TR and Li Y. 2007. Geochemistry and SHRIMP dating of the Kebu massif from Wulatezhongqi, Inner Mongolia; Evidence for the Early Permian underplating beneath the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 23(4): 755 – 766 ( in Chinese with English abstract)
- Luo HL. 2007. On the Permian magmatism of the middle segment of the northern margin of the North China Plate and its tectonic implication. Ph. D. Dissertation. Beijing: Peking University ( in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 1999. Using Isoplot/EX, version 2, a geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 1a: 47
- Ludwig KR. 2001. Squid 1.02: A user manual. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2: 19
- Lv LS, Mao JW, Liu J *et al.* 2007. Geological characteristics, geochronology and tectonic settings of typical magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in the northern margin of the North China Craton. Acta Geoscientia Sinica, 28(2): 148 – 166 ( in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Bulletin of the Geological Society of America, 101: 635 – 643
- Miao LC, Fan WM, Liu DY *et al.* 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex; Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. Journal of Asian Earth Sciences, 32(5 – 6): 348 – 370
- Patino Douce AE. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. Geology, 25: 743 – 746
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25: 956 – 983
- Pearce JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. Episodes, 19: 120 – 125
- Phillips ER. 1974. Myrmekite-one hundred years later. Lithos, 7: 181 – 194
- Shao JA. 1991. Crust evolution in the middle part of the northern margin of Sino-Korean plate. Beijing: Publishing House of Peking University ( in Chinese with abstract)
- Shi GH, Miao LC, Zhang FQ *et al.* 2004. Emplacement age and tectonic implications of the Xilinhot A-type granite in Inner Mongolia, China. Chinese Science Bulletin, 49(7): 723 – 729
- 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. Geol. Soc. Spec. Publ., 42: 313 – 345
- Sylvester PJ. 1989. Post-collisional alkaline granites. Journal of Geology, 97: 261 – 280
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. Lithos, 45: 29 – 44
- Taylor HP. 1980. The effects of assimilation of country rocks by magmas on  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  systematics in igneous rocks. Earth. Sci. Planet. Lett., 47: 243 – 254
- Tang KD. 1992. Tectonic Evolution and Minerogenetic Regularities of the Fold Belt along the Northern Margins of Sino-Korean plate. Beijing: Publishing House of Beijing University ( in Chinese with English abstract)
- Turner SP, Foden JD and Morrison RS. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma; An example from the Padthaway Ridge, South Australia. Lithos, 28(2): 151 – 179.
- Wakita H, Rey P and Schmitt RA. 1971. Abundances of the 14 rare-earth elements and 12 other trace elements in Apollo 12 samples: Five igneous and one breccia rocks and four soils. Proc. Lunar. Sci. Conf., 2nd: 1319 – 1329
- Wang HC, Zhao FQ, Li HM *et al.* 2007. Zircon SHRIMP U-Pb age of the dioritic rocks from northern Hebei: The geological records of Late Paleozoic magmatic arc. Acta Petrologica Sinica, 23(3): 597 – 604 ( in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Liu XY and Li JY. 1991. Plate Tectonics between Cathaysia and Angaraland in China. Beijing: Publishing House of Beijing University ( in Chinese with English abstract)
- Wang WJ, Sun ZJ and Hu XZ. 2005. Geological characters and tectonic setting of Qianjinchang Granite in Inner Mongolia. Geology and Prospecting, 41(2): 35 – 40 ( in Chinese with English abstract)
- Wang XL. 2007. Research of Dongshenmiao Granitoids of Permian. Master Degree Thesis. Beijing: Peking University ( in Chinese with English abstract)
- Wang XL, Zhang C, Liu SW *et al.* 2007. Electron microprobe dating of monazite in granite from Kanbao area, Hebei Province. Acta Petrologica Sinica, 23(4): 817 – 822 ( in Chinese with English abstract)
- Wang Y. 1996. Tectonic Evolutionary Processes of Inner Mongolia-Yanshan Orogenic Belt in Eastern China during the Late Paleozoic-Mesozoic. Beijing: Geological Publishing House ( in Chinese with English abstract)
- Wei CS. 2000. The genesis of A-type granitoids and its geological dynamic significance. Earth Science Frontiers, 7(2): 441 – 456 ( in Chinese)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407 – 419
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks WC and Ridley WI (eds.). Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology, 7: 1 – 35

- Wu FY, Sun DY, Li HM *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chem. Geol.*, 187(1-2): 143-173
- Xiao WJ, Windley BF, Hao J *et al.* 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6): 1-20
- Xiong XL, Adam J and Green T. 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 LQ, Jia HY, Zhang YQ *et al.* 2004. The characters and significance of alkali syenites in Bayan Obo area, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 27(1): 43-47 (in Chinese with English abstract)
- Yan GH, Mu BL, Xu BL *et al.* 2000. Triassic alkaline intrusives in the Yanliao-Yinshan area: Their chronology, Sr, Nd and Pb isotopic characteristics and their implication. *Science in China (Series D)*, 30(4): 383-387 (in Chinese)
- Yan GH, Tan LK, Xu BL *et al.* 2001. Petrogeochemical characteristics of Indosinian alkaline intrusions in Yinshan area. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 281-292 (in Chinese with English abstract)
- Yuan GB and Wang HC. 2006. Magmatic activity and its tectonic implications; During the Early Permian in the northward of Wuchuan, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 29(4): 303-310 (in Chinese with English abstract)
- Yue YJ. 1994. A preliminary discussion on the genetic type and formation environment of the Qianjinchang batholith, southern Da Hinggan Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 4: 305-308 (in Chinese with English abstract)
- Zeng JJ, Zheng YY, Qi JH *et al.* 2008. Foundation and geological significance of adakitic granite at Guyang of Inner Mongolia. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 755-763 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Pan GQ, Li CD *et al.* 2007. Does fractional crystallization occur in granitic magma? Some crucial questions oil granite study (2). *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1239-1251 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang YL, Jin WJ *et al.* 2008. Criteria for the recognition of pre-, syn- and post-orogenic granitic rocks. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 1-18 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH. 2004. The Late Paleozoic-Early Mesozoic Tectonomagmatic Activities in the Eastern Segment of the Inner Mongolian Uplift in the Yanshan Tectonic Belt and Their Geological Significance. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract)
- Zhang XH, Zhang HF, Tang YJ *et al.* 2008. Geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from Central Inner Mongolia, North China: Implication for tectonic setting and Phanerozoic continental growth in Central Asian Orogenic Belt. *Chemical Geology*, 249(3-4): 262-281
- Zhang YM, Zhang HF, Zhou ZG *et al.* 2008. Genetic and tectonics significance of the Damiao granodiorite, Siziwangqi, Inner Mongolia. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(2): 28-38 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, He ZY, Zhang J *et al.* 2007. Discussion on tectonic setting of the quartz diorite in Shilanhada, northern Daqingshan Mountain in Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 30(1): 22-26 (in Chinese with English abstract)
- Zhang WJ, Li SJ and Xiao RG. 1995. Discovery of the Jiaoqier nappe structural zone in Sonid Zuoqi, Inner Mongolia and its geological significance. *Geoscience*, 9(2): 220-225 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Yuan ZX, Tang SH *et al.* 2003. Age and Geochemistry of the Bayan Obo Ore Deposit. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Zhao L. 2008. Geochemistry and Tectonic Implications of the Late Palaeozoic Mafic-ultramafic Rocks Belt on the Middle Segment of the Northern Margin of the North China Plate. Ph. D. Dissertation. Beijing: Peking University (in Chinese with English abstract)
- Zhao QY, Liu ZH, Wu XW *et al.* 2007. Characteristics and origin of Halahehao pluton in Daqingshan region, Inner Mongolia. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 27(1): 46-51 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH. 2005. Advances in geochemistry of trace element. In: Zhang BR and Fu JM (eds.). *Advances in Geochemistry*. Beijing: Chemical Industry Press, 199-248 (in Chinese)
- Zhong CT. 2006. Paleoproterozoic Granitoids from Central Segment of North China Craton: Geochemistry, Geochronology and Tectonic Significance. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

- 鲍庆中, 张长捷, 吴之理等. 2007. 内蒙古东南部晚古生代裂谷区花岗岩锆石锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *中国地质*, 34(5): 790-798
- 崔盛芹, 李锦蓉, 吴珍汉等. 2002. 燕山地区中生代陆内造山作用. 北京: 地质出版社
- 韩宝福. 2007. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性. *地学前缘*, 14(3): 64-72
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志. 北京: 地质出版社
- 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君等. 1994. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义. *地质学报*, 68(3): 219-230
- 洪大卫, 王式洗, 谢锡林等. 2000. 兴蒙造山带正  $\epsilon_{Nd}(t)$  值花岗岩的成因和大陆地壳生长. *地学前缘*, 7(2): 441-456
- 洪大卫, 王涛, 童英. 2007. 中国花岗岩概述. *地质评论*, 53(增刊): 9-16
- 胡玲, 宋鸿林, 颜丹平等. 2002. 尚义-赤城断裂带中糜棱岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄记录及地质意义. *中国科学(D辑)*, 32(11): 908-913
- 李兰英. 2005. 内蒙古四子王旗呼都格花岗岩体地质特征及构造意义. *地质与资源*, 14(2): 97-102
- 李继亮, 孙枢, 郝杰等. 1999. 碰撞造山带的碰撞事件时限的确定. *岩石学报*, 15(2): 315-320
- 吕林素, 毛景文, 刘珺等. 2007. 华北克拉通北缘岩浆 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床地质特征, 形成时代及其地球动力学背景. *地球学报*, 28(2): 148-166
- 罗红玲, 吴泰然, 李毅. 2007. 乌拉特中旗克布岩体的地球化学特征及 SHRIMP 定年: 早二叠世华北克拉通底侵作用的证据. *岩石学报*, 23(4): 755-766
- 罗红玲. 2007. 华北板块北缘中段二叠纪的岩浆作用及构造意义. 博士学位论文. 北京: 北京大学
- 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
- 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
- 唐克东. 1992. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律. 北京: 北京大学出版社
- 王惠初, 赵风清, 李惠民等. 2007. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 晚古生代岩浆弧的地质记录. *岩石学报*, 23(3): 597-604
- 王荃, 刘雪亚, 李锦轶. 1991. 中国华夏与安加拉古陆间的板块构造. 北京: 北京大学出版社

- 王万军,孙振家,胡祥昭. 2005. 内蒙古前进场花岗岩体的地质特征及其构造环境. 地质与勘探, 41(2): 36-41
- 王鑫琳. 2007. 东升庙地区二叠纪花岗岩研究. 硕士学位论文. 北京: 北京大学
- 王鑫琳, 张臣, 刘树文等. 2007. 河北康保地区花岗岩独居石电子探针定年. 岩石学报, 23(4): 817-822
- 王瑜. 1996. 中国东部内蒙古-燕山造山带晚古生代晚期-中生代的造山作用过程. 北京: 地质出版社
- 魏春生. 2000. A型花岗岩成因模式及其地球动力学意义. 地学前缘, 7(1): 239
- 许立权, 贾和义, 张玉清等. 2004. 白云鄂博地区碱性正长岩特征及其意义. 地质调查与研究, 27(1): 43-47
- 阎国翰, 牟保垒, 许保良等. 2000. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义. 中国科学(D辑), 30(4): 383-387
- 阎国翰, 谭林坤, 许保良等. 2001. 阴山地区印支期碱性侵入岩岩石地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 20(3): 281-292
- 袁桂邦, 王惠初. 2006. 内蒙古武川西北部早二叠世岩浆活动及其构造意义. 地质调查与研究, 29(4): 303-310
- 岳永君. 1994. 也谈大兴安岭南段前进场岩体成因类型和形成环境. 岩石矿物学杂志, 4: 305-308
- 曾俊杰, 郑有业, 齐建宏等. 2008. 内蒙古固阳地区埃达克质花岗岩的发现及其地质意义. 地球科学(中国地质大学学报), 33(6): 755-763
- 张旗, 潘国强, 李承东等. 2007. 花岗岩结晶分离作用问题——关于花岗岩研究的思考之二. 岩石学报, 23(6): 1239-1251
- 张旗, 王元龙, 金惟俊等. 2008. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别. 地质通报, 27(1): 1-18
- 张拴宏. 2004. 燕山构造带内蒙古隆起东段晚古生代—早中生代构造岩浆活动及其地质意义. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院
- 章永梅, 张华锋, 周志广等. 2008. 内蒙古四子王旗大庙花岗岩体的成因与构造意义. 矿物岩石, 28(2): 28-38
- 张玉清, 贺忠银, 张健等. 2007. 内蒙古大青山北石兰哈达石英闪长岩构造环境讨论. 地质调查与研究, 30(1): 22-26
- 张维杰, 李述清, 肖荣阁. 1995. 内蒙古苏尼特左旗交其尔推覆构造带的发现及其地质意义. 现代地质, 9(2): 220-225
- 张宗清, 袁忠信, 唐索寒等. 2003. 白云鄂博矿床年龄和地球化学. 北京: 地质出版社
- 赵磊. 2008. 华北板块北缘中段晚古生代镁铁-超镁铁岩的岩石地球化学特征及其构造意义. 博士学位论文. 北京: 北京大学
- 赵庆英, 刘正宏, 吴新伟等. 2007. 内蒙古大青山地区哈拉合少岩体特征及成因. 矿物岩石, 27(1): 46-51
- 赵振华. 2005. 微量元素地球化学研究进展. 见: 张本仁, 傅家谟编. 地球化学进展. 北京: 化学工业出版社, 199-248
- 钟长汀. 2006. 华北克拉通北缘中段古元古代花岗岩类地球化学、年代学与构造意义. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学