

文章编号: 1006-6616 (2017) 03-0382-15

内蒙古狼山乌和尔图花岗岩岩体锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征

王文龙, 滕学建, 刘洋, 滕飞, 郭硕, 何鹏, 田健, 段霄龙

(中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

摘要: 乌和尔图花岗岩岩体位于华北板块北缘, 内蒙古狼山地区, 岩石类型主要为正长花岗岩及二长花岗岩。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $236.1 \pm 1.0\text{Ma}$, 晚三叠世。岩石高硅 (SiO_2 为 $71.94 \sim 73.91\%$)、富碱 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 $8.34 \sim 8.88\%$)、弱过铝 (A/CNK 为 $0.98 \sim 1.07$), 贫钙、镁。在 SiO_2 - K_2O 图中, 样品点落入高钾钙碱性系列-钾玄系列的过渡区域。在原始地幔标准化蛛网图上, 不同程度富集 Rb、Th、K、Nd、Zr、Hf、Sm, 亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti, 具中等-弱的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.47 - 0.66$)。主量元素、稀土元素和微量元素特征表明, 乌和尔图花岗岩岩体形成于由挤压体制向拉张体制转换的构造背景, 属后碰撞花岗岩类。锆石 Hf 同位素显示, 乌和尔图花岗岩岩体的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 为 $-20.6 \sim 7.6$, 二阶模式年龄为 $780 \sim 2559\text{Ma}$, 变化范围较大, 反映源区物质以古老地壳为主, 可能有年轻组分的参与。对该岩体的综合研究有助于进一步认识和探讨华北板块北缘二叠纪末-三叠纪的构造-岩浆演化过程。

关键词: 内蒙古; 狼山地区; 三叠纪花岗岩; 后碰撞; 地球化学

中图分类号: P595 P588.121

文献标识码: A

0 引言

中亚造山带位于西伯利亚板块东南, 塔里木板块及华北板块以北 (见图 1a), 是显生宙陆壳增生与改造最显著的大陆造山带^[1-5]。中亚造山带在漫长的陆壳演化过程中, 经历了陆缘增生、后碰撞和陆内造山作用三个阶段。其复杂的增生-碰撞过程与古亚洲洋的构造演化过程有着密切关系^[3, 6-9]。对于古亚洲的最终闭合时限目前主要有两种观点, 一种观点认为最终碰撞拼合时限为晚泥盆世-早石炭世^[6, 10-14]; 另一种观点认为拼合时限为二叠纪末-三叠纪初^[3, 15-24]。其较大的争议在于俯冲作用的持续时间及伸展作用的开始时间。“后碰撞”作为由造山向非造山 (板内) 的过渡阶段, 对于区域构造背景的转换具有重要的指示意义^[25]。

狼山构造带位于华北板块北缘, 处于华北板块与中亚造山带东段 (兴蒙造山带) 的交汇处, 是研究中亚造山带南部构造演化的重要地区之一。前人在区域上做了大量的工作, 主要集中在古生代岩浆作用^[26-31]。大量的古生代俯冲相关的岩浆岩及少量同碰撞岩浆岩已被发现, 相比而言三叠纪构造-岩浆演化过程并没有引起足够的重视。而对于狼山地区乌和尔图花岗岩岩体的研究仅限于 1:20 万乌拉特后旗幅区域地质调查及 1:25 万乌拉特后旗修测过程中, 二者对于岩体的形成时代、岩石组成均存在分歧, 并且研究程度不高, 因此有必要对该岩体进行系统详细的研究。

本研究立足于内蒙古狼山地区查干呼舒庙等六幅 1:5 万区域地质调查, 以岩石学、岩相学为基础, 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学、锆石 Hf 同位素原位分析为研究方法, 对狼山中段乌和尔图花岗岩岩体进行系统研究, 确定了岩体的形成时

收稿日期: 2016-09-24

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目《内蒙古 1:5 万查干呼舒庙、楚鲁庙、潮格、哈尔木格台、那仁宝力格公社、居力格台幅区域地质矿产调查》(编号: 12120113056300)

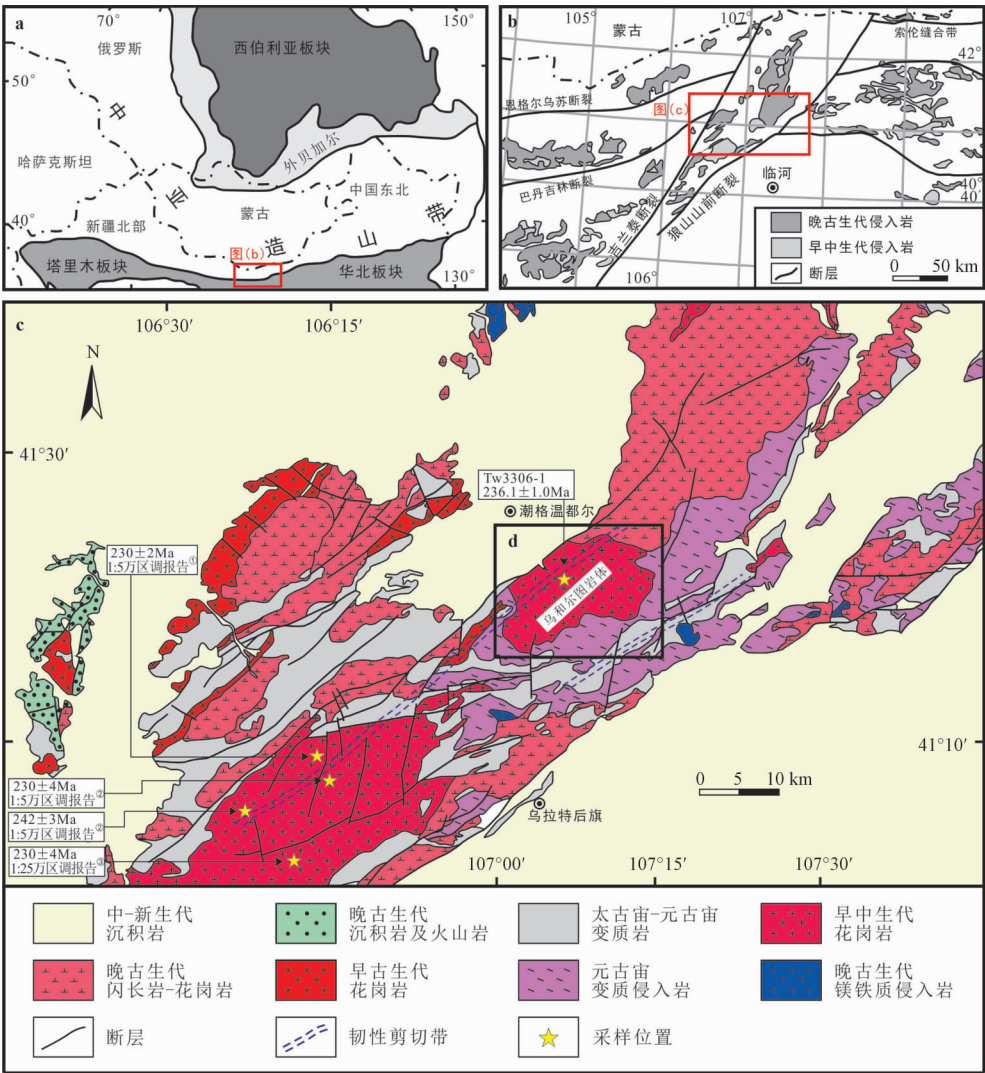
作者简介: 王文龙 (1988-), 男, 硕士, 助理工程师, 从事区域地质及岩石地球化学研究。E-mail: 499692710@qq.com

代, 提出了该岩体的成因模式, 探讨了源区特征及构造背景, 为解释华北板块北缘二叠纪末-三叠纪构造-岩浆演化及古亚洲洋的最终闭合时限提供新的证据。

1 区域地质背景

狼山地区地处内蒙古中西部, 构造位置处于

华北板块北缘, 位于索伦缝合带以南约 100 km (见图 1b), 东接阴山-燕山构造带, 西临阿拉善地块, 向南与鄂尔多斯西缘逆冲推覆构造带相连, 是鄂尔多斯盆地西北缘的一条北东向构造带。在狼山南北两侧发育有两条 NE-NNE 深大断裂, 分别为吉兰泰断裂和狼山山前断裂 (见图 1b)。研究区内脆性断裂十分发育, 并且发育多期 NE-NNE 向韧性剪切带^[32-33] (见图 1c)。



a—中亚造山带构造纲要图 (据^[5, 34]修改); b—华北北缘晚古生代-早中生代侵入岩分布图 (据^[26, 35]修改); c—狼山地区地质简图; d—乌和尔图花岗岩岩体大比例尺地质图位置

图 1 不同比例尺地质图
Fig. 1 Geological maps in different scales

新太古代片麻岩仅出现在狼山南段, 花岗片麻岩限定的锆石 U-Pb 年龄为 2619 ± 18 Ma, 2563 ± 21 Ma^[36]; 元古代片岩、千枚岩、板岩、变质砂岩广泛分布于狼山地区, 本项目将其划分为变质程度相对较高的宝音图岩群及浅变质的渣尔泰山

群; 胡健民等^[37]测得变质火山岩锆石年龄为 804.1 ± 3.5 Ma; 彭润民等^[38]从狼山西南缘的中元古代酸性火山岩中获得了两个锆石 U-Pb 年龄, 分别为 816.9 ± 4.5 Ma 和 805.0 ± 5.0 Ma, 表明狼山地区存在一些新元古代变质火山岩; 上石炭统砂岩和

灰岩、早二叠世火山地层和砂岩仅出露在狼山西部地区；白垩纪地层及第四纪沉积物在全区广泛分布。

研究区广泛发育早古生代—早中生代侵入岩，岩石类型多样，基性岩、中性岩、酸性岩均有出露（见图 1c）。其中早古生代主要为一套石英闪长岩、花岗闪长岩及二长花岗岩的岩石组合，出露于研究区的西北部^[27]，主要为志留纪及少量奥陶纪侵入岩；晚古生代岩石类型包括辉长岩、石英闪长岩及花岗岩，出露面积较大，主要分布于研究区中部，时代以二叠纪及石炭纪为主^[17, 26, 29, 39-40]，泥盆纪侵入岩少见；早中生代以酸性侵入岩为主，包括正长花岗岩、二长花岗岩及少量花岗闪长岩，时代主要为三叠纪。岩体主要分布于狼山主脊，包括乌和尔图花岗岩岩体及其南部大面积三叠纪侵入岩。本文通过对乌和尔

图花岗岩岩体系统详细的研究来探讨狼山地区二叠纪末—三叠纪构造—岩浆演化过程。

2 岩体地质及岩相学特征

乌和尔图花岗岩岩体位于狼山中段，潮格温都尔镇以南约 10 km，呈不规则的椭圆状，长轴方向为北东向，出露面积约 169.7 km²（见图 1d，图 2）。该岩体西侧被中-新生代地层角度不整合覆盖，北侧侵入到二叠纪花岗岩中，南部及东部侵入到太古宙片麻岩中。岩体整体呈浅肉红色，具球状-块状风化，原生流动构造不发育，次生节理较为发育。岩体受糜棱岩化改造明显，石英拔丝拉长，长石呈眼球状，岩石中包体少见，脉体不发育，局部见小规模石英脉。

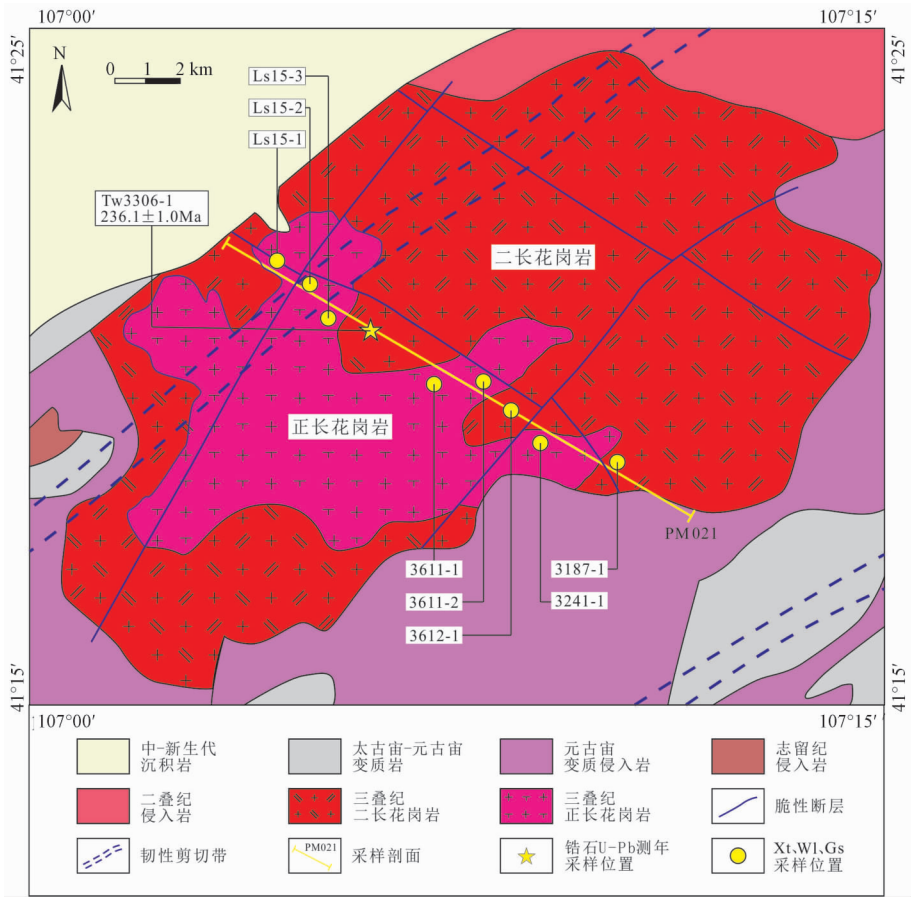


图 2 乌和尔图花岗岩岩体大比例尺地质图

Fig. 2 A large scaled geological maps of the WuherErtu granite mass

岩体主要由二长花岗岩及正长花岗岩组成（见图 3a），二长花岗岩位于岩体的四周，约占岩体总面积的 2/3；正长花岗岩位于岩体的中心偏

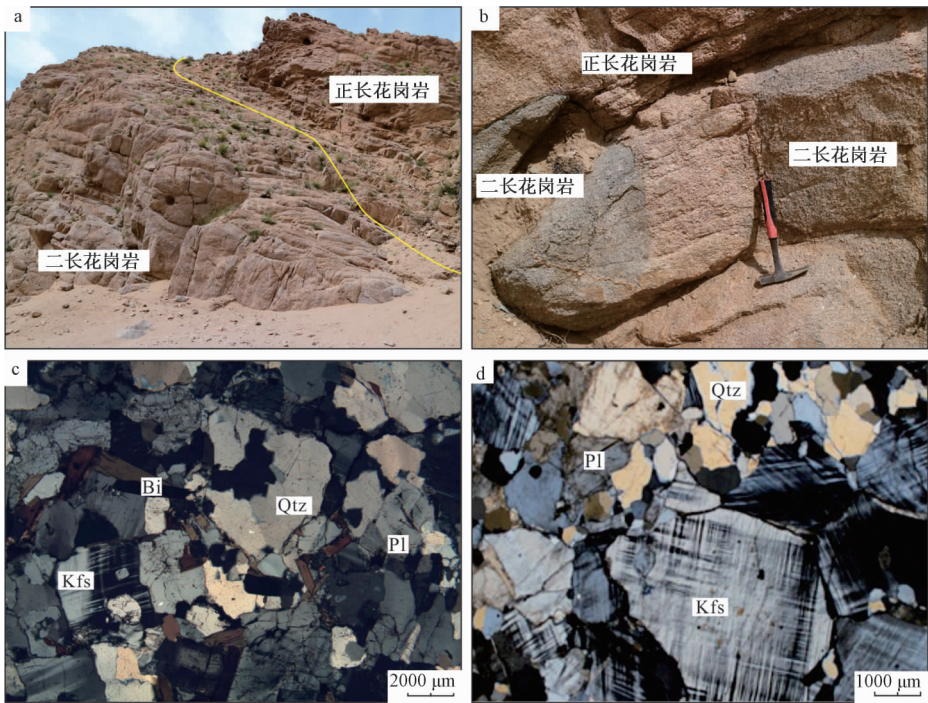
南，约占总面积的 1/3，二者为侵入接触关系，正长花岗岩侵入到二长花岗岩之中（见图 3b）。详细岩性描述如下：

二长花岗岩: 浅肉红色, 具花岗结构、二长结构, 块状构造。岩石由钾长石 (微斜长石、条纹长石)、斜长石、石英、黑云母组成, 钾长石含量约 35 ~ 45%, 具格子双晶, 微纹构造, 他形粒状, 斜长石含量约 25 ~ 30%, 呈板条状, 部分具泥化、绢云母化且钠长双晶发育; 石英 25 ~ 30%, 半自形粒状; 黑云母 5 ~ 10%, 片状, 部分绿泥石化, 有的褪色渐变为白云母。岩石局部发育有蠕英结构, 粒度 0.5 ~ 3 mm (见图 3c)。

正长花岗岩: 浅肉红色, 具花岗结构, 块状

构造。由钾长石 (微斜长石)、斜长石、石英、黑云母组成。钾长石大部分为微斜长石, 未见条纹长石, 具不发育的格状双晶, 他形粒状, 含量 45 ~ 50%; 斜长石为板条状, 有的泥化、绢云母化, 表面污浊, 含量 10 ~ 15% 左右; 石英为他形粒状, 含量为 30 ~ 35%; 黑云母片状, 有轻微的绿泥石化, 含量 5 ~ 10% (见图 3d)。

岩石副矿物包括锆石、磷灰石、磷钇矿、钛铁矿、独居石、绿帘石等。



a—乌和尔图花岗岩岩体岩貌特征; b—正长花岗岩侵入二长花岗岩;

c—二长花岗岩镜下特征; d—正长花岗岩镜下特征

Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qtz—石英; Bi—黑云母

图 3 乌和尔图花岗岩岩体宏观及显微照片

Fig. 3 Photographs and photomicrographs of the WuherErtu granite mass

3 分析方法

本次工作采集同位素样品 1 件 (41°20'08"、107°5'39"E)、全岩分析样品 9 件。全岩分析样品严格去除表皮, 清洗干净, 然后手工粗碎后进行缩分, 在玛瑙研钵内磨至 200 目后, 进行主量、微量和稀土元素分析。锆石按照常规方法分选, 并在双目镜下挑纯, 挑选晶形完好, 有代表性的颗粒进行制靶, 然后完成透反射及阴极发光照相, 并在锆石 U-Pb 定年的基础上进行原位 Hf 同位

素分析。

3.1 全岩分析

主量、微量和稀土元素分析在天津地质矿产研究所元素分析实验室完成。将样品溶制成玻璃饼, 然后采用 X 射线荧光光谱仪 XRF-1500 进行主量元素测定, 分析精度优于 1%。称取 40mg 样品于 Tenon 罐中, 加入 HNO₃ 和 HF 充分溶解后, 用 1% 的 HNO₃ 稀释后, 在 Finigan MAT 公司生产的双聚焦电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) ELEMENT 上测定微量和稀土元素, 分析精度优于 5%。

3.2 锆石挑选及 LA-ICP-MS 年龄测定

样品无污染碎样和锆石挑选的工作由河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成。并由锆石粘贴制成环氧树脂样品靶，经过打磨抛光使锆石露出中心后进行透射光、反射光和阴极发光（CL）显微照相。锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素分析在天津地质矿产研究所实验室的 193 nm 激光剥蚀系统（New Wave）和多接受器电感耦合等离子质谱仪（MC-ICP-MS，Neptune）上完成。U-Pb 年代学测试方法见文献^[41]。采用 GJ-1 作为外部标准校正锆石的 U、Th 和 Pb 同位素分馏；采用 NIST610 玻璃作为标样计算锆石中 U、Th 和 Pb 含量；利用 ICP-MS DataCal 程序^[42]和 Isoplot 程序^[43]进行数据处理。

3.3 锆石原位 Hf 同位素分析

Lu-Hf 同位素分析方法和同位素分馏校正参见参考文献^[44, 45]。实验过程中 91500 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 测定结果分别为 0.282303 ± 37（2δ_n，n = 35）和 0.00030，该值与目前用溶液法获得的值在误差范围内一致^[46]。在 εHf（t）值计算中，采用 Bliechert-Toft 和 Albarede^[47]所推荐的球粒陨石值，亏损地幔模式年龄（TDM）计算采用 Griffin 等^[48]的推荐值。

4 分析结果

4.1 形成时代

样品（TW3306-1）LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果见表 1。

表 1 乌和尔图花岗岩岩体 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析数据
Table 1 LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb isotope analysis data of the WuherErtu granite mass

样品号	含量（×10 ⁻⁶ ）		同位素比值								年龄（Ma）			
	Pb	U	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	
3306.1.1	62	1630	0.256	0.0379	0.0002	0.2963	0.003	0.0567	0.0006	240	2	263	4	
3306.1.2	64	1790	0.138	0.0374	0.0002	0.2660	0.004	0.0516	0.0010	237	2	240	3	
3306.1.3	44	1112	0.520	0.0372	0.0002	0.2611	0.010	0.0509	0.0028	235	2	236	3	
3306.1.4	78	1990	0.117	0.0413	0.0003	0.3021	0.009	0.0531	0.0023	261	3	268	4	
3306.1.5	82	2040	0.578	0.0373	0.0003	0.2936	0.027	0.0570	0.0076	236	2	261	4	
3306.1.6	52	1234	0.805	0.0372	0.0002	0.2616	0.004	0.0510	0.0010	236	2	236	3	
3306.1.7	47	1214	0.478	0.0375	0.0003	0.2636	0.009	0.0509	0.0024	238	2	238	3	
3306.1.8	58	1425	0.800	0.0373	0.0002	0.2622	0.004	0.0510	0.0010	236	2	236	3	
3306.1.9	81	2080	0.533	0.0374	0.0002	0.2637	0.004	0.0511	0.0013	237	2	238	3	
3306.1.10	176	4774	0.207	0.0372	0.0002	0.3251	0.004	0.0634	0.0011	236	2	286	4	
3306.1.11	15	406	0.322	0.0374	0.0002	0.2840	0.003	0.0551	0.0008	237	2	254	5	
3306.1.12	84	2130	0.592	0.0371	0.0002	0.2673	0.007	0.0523	0.0018	235	3	241	3	
3306.1.13	51	1375	0.321	0.0371	0.0002	0.2656	0.002	0.0519	0.0005	235	2	239	3	
3306.1.14	53	1449	0.247	0.0372	0.0002	0.2623	0.003	0.0511	0.0006	236	2	236	3	
3306.1.15	42	1000	0.780	0.0374	0.0002	0.2629	0.003	0.0509	0.0007	237	2	237	3	
3306.1.16	43	1153	0.356	0.0372	0.0002	0.2649	0.003	0.0516	0.0007	235	2	239	3	
3306.1.17	32	787	0.608	0.0373	0.0002	0.2717	0.007	0.0528	0.0020	236	2	244	4	
3306.1.18	78	2095	0.323	0.0374	0.0002	0.2722	0.005	0.0528	0.0012	237	2	244	3	
3306.1.19	34	882	0.452	0.0373	0.0002	0.2634	0.006	0.0512	0.0018	236	2	237	4	
3306.1.20	62	1592	0.608	0.0372	0.0003	0.2609	0.008	0.0509	0.0017	235	2	235	3	
3306.1.21	101	3400	0.410	0.0230	0.0002	0.5061	0.005	0.1594	0.0012	147	2	416	6	
3306.1.22	14	339	0.833	0.0373	0.0002	0.3126	0.002	0.0608	0.0005	236	2	276	5	
3306.1.23	96	2615	0.252	0.0372	0.0002	0.3226	0.003	0.0630	0.0008	235	2	284	4	
3306.1.24	53	1358	0.635	0.0371	0.0002	0.2695	0.004	0.0526	0.0010	235	2	242	4	
3306.1.25	67	1778	0.455	0.0374	0.0003	0.2625	0.003	0.0509	0.0010	237	2	237	3	
3306.1.26	33	973	0.066	0.0372	0.0002	0.2616	0.003	0.0510	0.0007	235	3	236	4	
3306.1.27	37	902	0.890	0.0371	0.0002	0.2605	0.006	0.0509	0.0017	235	2	235	3	
3306.1.28	27	776	0.166	0.0373	0.0002	0.2648	0.002	0.0515	0.0007	236	3	239	4	
3306.1.29	72	2035	0.183	0.0372	0.0002	0.2615	0.002	0.0510	0.0005	235	2	236	3	
3306.1.30	57	1505	0.421	0.0375	0.0002	0.2657	0.005	0.0514	0.0015	237	2	239	3	
3306.1.31	48	1304	0.294	0.0376	0.0003	0.2671	0.013	0.0516	0.0035	238	2	240	3	
3306.1.32	59	1539	0.480	0.0374	0.0004	0.2650	0.004	0.0514	0.0010	237	2	239	3	

同位素样品 (TW3306-1) 岩性为肉红色中细粒黑云母正长花岗岩, 锆石自形程度较高, 发育较为清晰的震荡环带 (见图 4a), 长轴在 100 ~ 200 μm 之间, Tu/U 为 0.12 ~ 0.89, 显示锆石为岩浆成因。32 颗锆石中 25 颗锆石位于谐和线上或谐和线附近, 其余点均偏离了谐和线, 未参与平均年龄计算。 $^{236}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄集中在 235 ~ 238 Ma 之

间, 仅有一点的 $^{236}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄为 261 Ma, 属岩体侵位时捕获的围岩年龄, 也未参与平均年龄计算。测得最终 $^{236}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 236.1 ± 1.0 Ma, 代表了岩浆的结晶年龄 (见图 4b)。所以, 乌和尔图花岗岩岩体的形成时代为晚三叠世。

4.2 岩石地球化学

样品主量、微量及稀土元素分析结果见表 2。

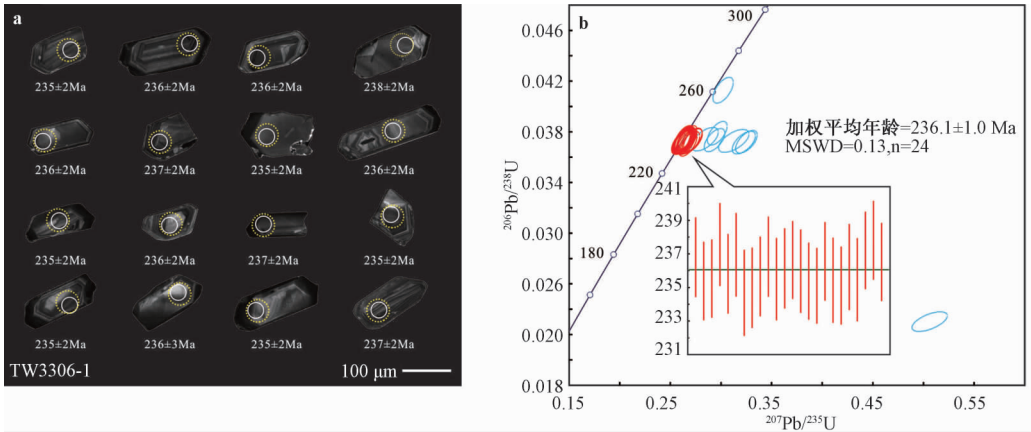


图 4 乌和尔图二长花岗岩部分锆石 CL 图像 (a) 和锆石 U-Pb 年龄谐和图 (b); 白色小圈代表锆石 U-Pb 测年位置; 黄色大圈代表 Hf 同位素分析位置

Fig. 4 Zircon CL imaging of the WuherErtu monzobiorites (a) and Zircon U-Pb age concordia diagram plots of zircons in the WuherErtu monzobiorites (b)

表 2 乌和尔图花岗岩岩体主量元素、微量元素及稀土元素分析结果

Table 2 Analysis results of major elements, trace elements and rare earth elements of the WuherErtu granite mass									
编号	3306-1	3187-1	3611-1	3611-2	3612-1	3241-1	Ls15-1	Ls15-2	Ls15-3
样品名称	二长花岗岩	二长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩	二长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩
SiO2	72.41	73.84	72.34	71.94	72.56	73.91	72.8	72.85	72.89
TiO2	0.19	0.17	0.26	0.29	0.2	0.18	0.21	0.24	0.24
Al2O3	13.9	14.18	14.35	14.5	14.28	14.07	14.16	14.14	14.21
Fe2O3	1.33	0.43	0.57	0.4	0.48	0.54	0.47	0.53	0.6
FeO	0.91	0.68	1.17	1.45	0.96	0.65	0.97	1.05	1.01
MnO	0.05	0.019	0.032	0.025	0.03	0.024	0.028	0.027	0.028
MgO	0.38	0.28	0.45	0.52	0.35	0.29	0.33	0.35	0.38
CaO	1.76	1.44	1.44	1.24	1.48	1.2	1.36	1.19	1.12
Na2O	3.29	3.42	3.04	3.26	3.39	3.38	3.33	3.29	3.38
K2O	5.19	4.92	5.64	5.62	5.4	5.16	5.39	5.34	5.26
P ₂ O ₅	0.08	0.049	0.086	0.092	0.064	0.039	0.059	0.069	0.068
TOI	0.41	0.34	0.37	0.33	0.52	0.36	0.66	0.6	0.51
Total	99.90	99.77	99.75	99.67	99.71	99.80	99.77	99.68	99.70
Cs	8.66	2.63	5.03	18.3	3.94	5.41	8.64	7.3	10.6
Rb	261	179	211	235	190	205	225	198	212
Sr	154	132	171	185	151	139	139	150	153
Ba	690	785	1060	1230	844	687	842	878	871
Ga	17.4	18.2	18.4	18.6	18.6	17.7	20.1	19	19.6
Nb	20.2	13	16.1	18.6	11.9	12.8	16.5	15.5	16.6
Ta	2.43	0.82	1.04	1.25	0.85	1.49	1.7	1.28	1.48
Zr	154	116	239	229	162	136	159	191	190
Hf	4.76	3.89	7.54	7.07	5.58	4.9	5.35	6.51	6.54

续表 2

编号	3306-1	3187-1	3611-1	3611-2	3612-1	3241-1	Ls15-1	Ls15-2	Ls15-3
样品名称	二长花岗岩	二长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩	二长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩	正长花岗岩
Th	23. 2	27. 9	36. 2	39. 3	38. 8	37. 9	37. 1	43. 3	33. 2
V	15. 8	13. 6	22. 5	24. 9	15. 1	12. 1	15	17	17. 2
Cr	6. 38	3. 59	5. 37	5. 06	3. 62	3. 24	6. 55	4. 38	5. 14
Co	1. 57	1. 24	2. 12	2. 07	1. 54	1. 28	1. 56	1. 81	1. 8
Ni	3. 55	0. 74	1. 4	1. 45	1. 04	0. 9	1. 96	0. 85	1. 12
Li	81. 9	24. 8	30. 5	27. 5	24. 8	22. 8	64. 1	47. 9	72. 1
Sc	5. 55	2. 97	3. 33	3. 45	3. 65	3. 31	3. 79	3. 97	3. 64
U	2. 39	2. 77	2. 48	3. 52	4. 33	3. 3	3. 72	3. 51	2. 64
Pb	26	39. 1	35. 3	35. 7	43. 3	36	35. 5	37. 7	37. 6
Zn	36. 6	23. 9	33. 8	24. 5	33. 3	25	33. 9	36. 8	35. 2
Cu	12. 8	4. 23	8. 2	3. 67	5. 31	10. 1	6. 89	9. 43	9. 62
La	42. 6	35. 3	55. 9	73. 8	55. 5	47. 5	55. 6	63. 9	62. 6
Ce	73. 1	63. 1	97. 9	130	94. 8	78. 2	96. 3	111	110
Pr	7. 98	6. 99	10. 7	13. 9	10. 4	8. 68	10. 6	12. 3	12
Nd	26. 3	23. 3	35. 7	46. 4	34. 6	28. 8	35. 2	41. 2	40
Sm	3. 86	3. 36	5. 33	6. 39	4. 91	4. 21	4. 96	5. 76	5. 7
Eu	0. 6	0. 68	0. 94	0. 92	0. 82	0. 7	0. 8	0. 88	0. 86
Gd	2. 99	2. 82	4. 35	5. 21	3. 92	3. 31	4. 02	4. 49	4. 51
Tb	0. 39	0. 34	0. 51	0. 56	0. 44	0. 34	0. 51	0. 5	0. 5
Dy	1. 97	1. 74	2. 54	2. 66	2. 1	1. 51	2. 7	2. 33	2. 41
Ho	0. 38	0. 32	0. 45	0. 48	0. 38	0. 25	0. 54	0. 43	0. 44
Er	1. 04	0. 84	1. 21	1. 3	1. 02	0. 69	1. 5	1. 14	1. 2
Tm	0. 15	0. 12	0. 17	0. 18	0. 14	0. 099	0. 21	0. 16	0. 18
Yb	1. 01	0. 73	1. 09	1. 1	0. 9	0. 7	1. 35	1. 08	1. 16
Lu	0. 15	0. 11	0. 17	0. 17	0. 14	0. 11	0. 2	0. 17	0. 18
Y	9. 79	7. 5	10. 9	11. 5	9. 1	6	13. 9	10. 4	10. 8

全岩 SiO₂ 含量为 71.94 ~ 73.91%、Q'-F'-AnOr 图解中, 岩石落入二长花岗岩与正长花岗岩过渡区域 (见图 5a); Al₂O₃ 为 13.9 ~ 14.5%, A/CNK 为 0.98 ~ 1.07, 在 A/NK-A/CNK 中主体落入弱过铝质区域 (见图 5b); K₂O + Na₂O 为 8.34 ~ 8.88%, Na₂O/K₂O 为 0.54 ~ 0.70, 在 SiO₂-K₂O 图中, 样品点落入高钾钙碱性系列-钾玄系列的过渡区域 (见图 5c); P₂O₅ 含量 0.04 ~ 0.09%, 与 SiO₂ 具有明显的反相关线性关系 (见图 5d)。

微量元素蛛网图中 (见图 6a), 所有样品具有相似的分布型式, 不同程度富集 Rb、Th、K、Nd、Zr、Hf、Sm, 亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti、Rb、K 的富集与地壳物质的熔融有关。

稀土元素蛛网图中 (见图 6b), 不同样品的稀土配分型式也十分一致, 样品 ΣREE 为 147.25 × 10⁻⁶ ~ 294.57 × 10⁻⁶, 稀土配分曲线显示轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损的右倾曲线; (La/Sm) N = 6.94 ~ 8.47, 轻稀土分馏明显; LREE/HREE 值为 8.6 ~ 14.2, (La/Yb) N = 27.77 ~ 45.75, 轻重稀土分馏明显。δEu 为 0.47 ~ 0.66, 具中等-弱的负 Eu 异常。

4.3 锆石原位 Hf 同位素

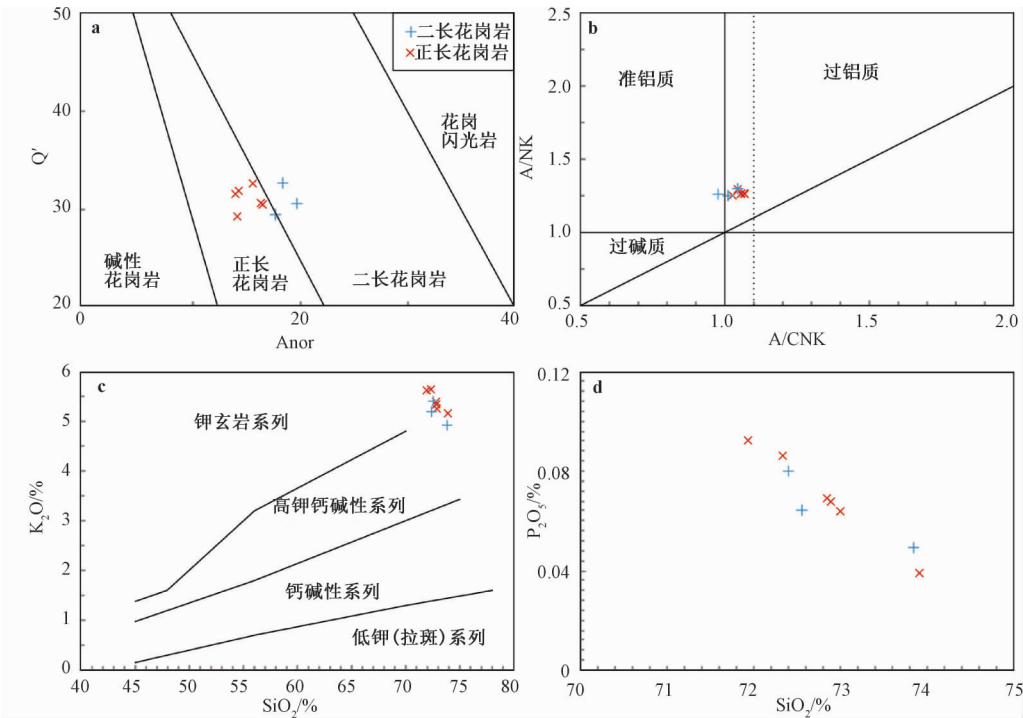
样品 TW3306-1 锆石原位 Hf 同位素分析结果见表 3。

数据分析结果表明, 16 颗锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 0.282045437 ~ 0.282843657, εHf (t) 值为 +7.6 ~ -20.6, 变化范围较大, 主要集中在 -2.3 ~ -8.4, 平均值为 -5.7。Hf 同位素二阶模式年龄 (TDM2) 为 780 ~ 2559Ma, 变化范围较大。

5 讨论

5.1 花岗岩成因类型

从岩相学角度来看, 乌和尔图花岗岩岩体不含有典型 S 型花岗岩所含有的特征性富铝矿物, 如堇青石、石榴石、原生白云母等^[52]。大量实验研究表明, 在准铝质/弱过铝质岩浆中, 典型的 S 型花岗岩中的 P₂O₅ 含量会随着 SiO₂ 含量的增加而增加, 而 I 型和 A 型花岗岩的 P₂O₅ 将随着 SiO₂ 的增高而降低, 并导致强分异 I 型和 A 型花岗岩的 P₂O₅ 含量非常低^[52], 乌和尔图岩花岗岩体 P₂O₅



a— $Q' = Q \times 100 / (Q + Or + Ab + An)$, $Anor = An \times 100 / (An + Or)$; b— $A/CNK-A/NK$ 分类图解^[49];
c— K_2O-SiO_2 图解^[50]; d— $P_2O_5-SiO_2$ 地球化学散点图

图 5 乌和尔图花岗岩岩体主量元素图解;

Fig. 5 $Q'-Anor$ standard mineral diagram of the WuherErtu granite mass

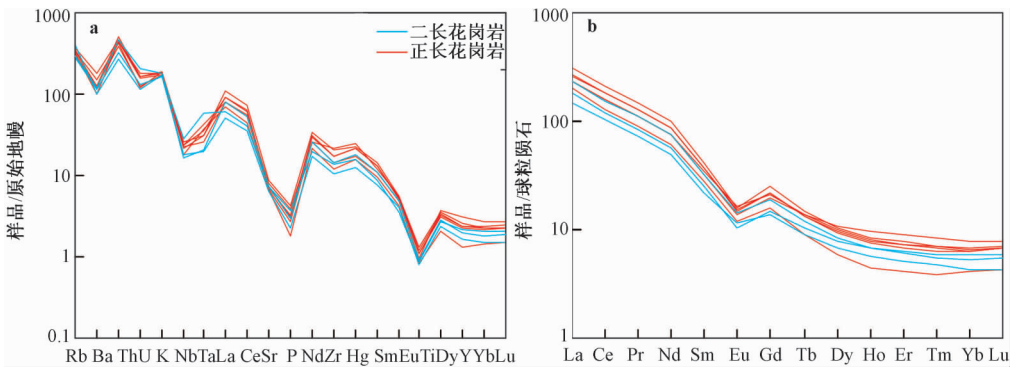


图 6 原始地幔标准化蛛网图 (a) 和球粒陨石标准化稀土元素配分模式图 (b)^[51]

Fig. 6 primitive mantle-normalized trace element spider diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b)

含量为 0.04 ~ 0.09%, 与 SiO_2 显示出较好的负相关性 (见图 5d), 表明其不可能是 S 型花岗岩。

在微量元素上, 乌和尔图岩体的 Th、Ta、La、Ce、Nd、Zr、Hf 相对略富集, Nb、P、Ti 弱亏损, 与一般的岛弧花岗岩相似, 但 Nb、P、Ti 的亏损程度比典型岛弧花岗岩的低; 稀土元素上, LREE 富集, 轻重稀土分馏明显, LREE/HREE 比值或 (La/Yb) N 比值较大, 具中等-弱的负铕异常, 不同于典型的 A 型花岗岩。在 10000Ga/Al 及 Zr + Nb + Ce + Y 相关图解中 (见图 7a, 7b), 样品主要落

入 A 型花岗岩与 I、S 或高分异花岗岩的边界处, 显示其具有过渡型花岗岩的特点。

这些地球化学特征表明, 乌和尔图岩体虽然不具有典型的 A 型花岗岩的特征, 也不同于典型的 I 型花岗岩, 而是显示了两者的过渡特点。

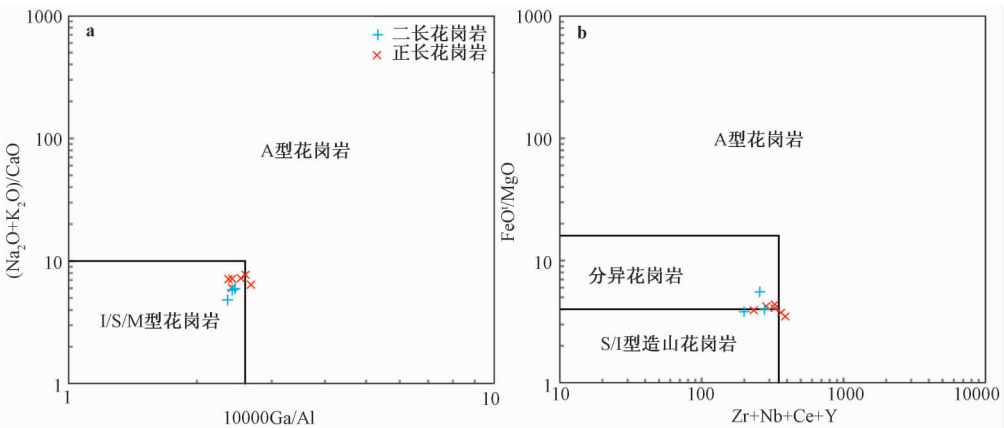
5.2 源区特征

乌和尔图花岗岩岩体具有相对较高的 SiO_2 、 K_2O 、 $Na_2O + K_2O$, 较低的 FeO^I 、 MgO , 在原始地幔标准化蛛网图上, LREE 相对富集, 中等-弱的负 Eu 异常, Rb、Th、K 相对富集, Ba、Nb、Ta、

表 3 乌和尔图花岗岩岩体 LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素分析数据

Table 3 LA-MC-ICP-MS zircon Hf isotope analysis date of the WuherErtu granite mass

Sample number	Age (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf (corr)	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf f (corr)	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf (corr)	2σ	εHf (0)	εHf (t)	2s	TDM1 (Ma)	2s	fLu/Hf	TDM2 (Ma)
3306.1.1	235	0.06032	0.00118	0.28252	0.000023	-8.8	-3.8	0.8	1038	66	-0.96	1506
3306.1.2	236	0.07091	0.00139	0.28240	0.000019	-13.3	-8.4	0.7	1224	53	-0.96	1793
3306.1.3	236	0.06697	0.00131	0.28245	0.000022	-11.5	-6.5	0.8	1148	63	-0.96	1676
3306.1.4	238	0.04772	0.00084	0.28284	0.000028	2.5	7.6	1.0	577	80	-0.97	780
3306.1.5	236	0.05095	0.00117	0.28242	0.000020	-12.5	-7.5	0.7	1183	56	-0.96	1737
3306.1.6	237	0.05790	0.00137	0.28250	0.000021	-9.8	-4.8	0.7	1081	59	-0.96	1567
3306.1.7	236	0.05788	0.00136	0.28247	0.000017	-10.8	-5.8	0.6	1120	47	-0.96	1630
3306.1.8	235	0.04618	0.00110	0.28244	0.000019	-11.7	-6.7	0.7	1149	53	-0.97	1686
3306.1.9	235	0.04757	0.00115	0.28248	0.000018	-10.3	-5.3	0.7	1096	52	-0.97	1599
3306.1.10	236	0.04250	0.00101	0.28246	0.000016	-11.0	-6.0	0.6	1121	46	-0.97	1644
3306.1.11	237	0.03138	0.00075	0.28256	0.000015	-7.4	-2.3	0.5	969	41	-0.98	1410
3306.1.12	235	0.03725	0.00092	0.28245	0.000014	-11.3	-6.3	0.5	1128	38	-0.97	1659
3306.1.13	235	0.04494	0.00109	0.28244	0.000018	-11.6	-6.6	0.6	1146	51	-0.97	1681
3306.1.14	237	0.04976	0.00118	0.28245	0.000018	-11.5	-6.5	0.7	1146	52	-0.96	1676
3306.1.15	235	0.05675	0.00133	0.28255	0.000017	-7.9	-3.0	0.6	1006	48	-0.96	1451
3306.1.16	236	0.01323	0.00036	0.28205	0.000020	-25.7	-20.6	0.7	1672	53	-0.99	2559



a— $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{CaO} - 10000\text{Ga}/\text{Al}$; b— $\text{FeO}/\text{MgO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ [37]

图 7 乌和尔图花岗岩类岩石成因判别图解

Fig7 Discrimination diagrams of the petrogenesis of the WuherErtu granitic rocks

Sr、P、Ti 相对亏损，暗示其源区为壳源。

乌和尔图花岗岩岩体 $\epsilon\text{Hf}(\text{t})$ 值为 $+7.6 \sim -20.6$ ，变化范围较大。“ $+7.6$ ”与“ -20.6 ”可能代表了源区的两个端元（见图 8），二阶模式年龄（TDM2）为 $780 \sim 2559 \text{ Ma}$ ，说明源区以古老地壳为主，可能有少量年轻组分参与。在 $\epsilon\text{Hf}(\text{t}) - \text{t}$ 图解中，样品点主要落在燕山地区及燕山与兴蒙造山带结合处，仅有一点落在兴蒙造山带东段，显示了其源区主要来自华北板块。

5.3 构造演化及地质意义

近年来的研究表明^[25, 54~57]，板块在发生挤压碰撞之后，进入板内伸展演化之前还经历了一段相当长的仍然与碰撞作用有关的汇聚作用，Liegeois^[58]将

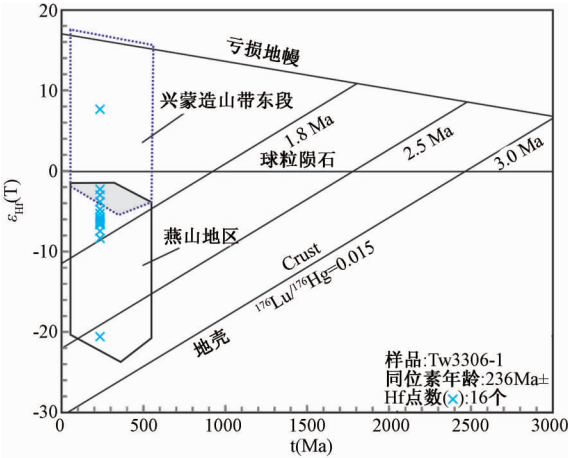


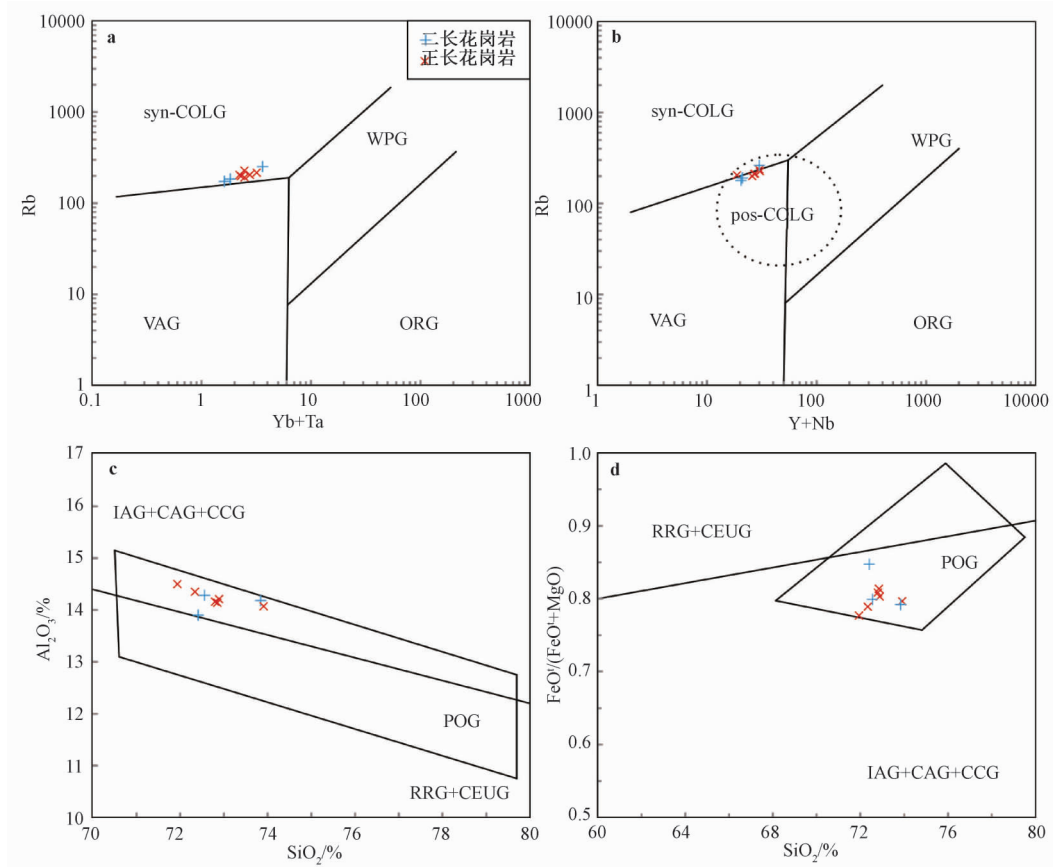
图 8 锆石 Hf 同位素特征^[53]

Fig. 8 Zircon Hf isotope characteristics^[53]

这一由挤压体制向伸展体制转换的过程称为“后碰撞作用”。并认为后碰撞花岗岩通常具有以下三个特点 1. 大部分后碰撞花岗岩以高钾钙碱性系列及一定量的钾玄系列岩石为特点。2. 后碰撞花岗岩通常与沿着主要韧性剪切带的大规模水平移动有关。3. 源区通常含有年轻组分, 或者是幔源的, 亦或是新生地壳。

乌和尔图花岗岩岩体为 I-A 型过渡花岗岩, 属高钾钙碱性-钾玄系列, 富集大离子亲石元素, 贫化高场强元素, 强烈亏损 Nb、Ta、P、Ti, 显示出后碰撞花岗岩的特征; 在 Rb-Yb + Ta 判别图解中 (见图 9a) 样品落在同碰撞区; 在 Rb-Y + Nb 判别

图解中 (见图 9b), 样品落在同碰撞与后碰撞的重叠区; 在 $\text{FeO}^1/(\text{MgO} + \text{FeO}^1) - \text{SiO}_2$ 及 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 的判别图解中 (见图 9c、9d), 样品点绝大部分落入后碰撞区域, 表明乌和尔图花岗岩岩体为造山晚期的产物。狼山山脉发育有 NE 向的近水平的韧性剪切带, 不同程度改造乌和尔图花岗岩岩体^[31~32]; 高洪雷^[32]测得韧性剪切带中次生白云母 Ar-Ar 同位素年龄为 213 ~ 237 Ma, 其高值与本文获得的结晶年龄 (236.1 ± 1.0 Ma) 一致, 说明该岩体的形成于韧性剪切作用相关, 为同构造侵位岩体。Hf 同位素显示乌和尔图花岗岩岩体源区为壳源与少量年轻组分混合而成。



a—Rb-Yb + Ta; b—Rb-Y + Nb 判别图 (底图据^[54]); c— $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$; d— $\text{FeO}^1/(\text{FeO}^1 + \text{MgO}) - \text{SiO}_2$ 图解 (底图据^[49]),
ORG-大洋脊花岗岩; WPG-板内花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; Syn-COLG-同碰撞花岗岩; Post-COLG-后碰撞花岗岩;
IAG-岛弧花岗岩类; CAG-大陆弧花岗岩类; CCG-大陆碰撞花岗岩类; POG-后造山花岗岩类; RRG-与裂谷有关的花岗岩类;
CEUG-与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类

图 9 乌和尔图花岗岩构造判别图

Fig. 9 Determinant diagram of the tectonic setting of the WuherErtu granite mass

综上, 我们认为狼山乌和尔图花岗岩岩体为晚三叠世形成, 具有高钾钙碱性-钾玄系列特点的 I-A 型过渡花岗岩岩体, 形成于后碰撞构造背景。其可能的形成机制为: 西伯利亚板块与华北板块

完成最终碰撞拼合之后, 岩石圈收缩增厚, 俯冲板片的断离和沉陷 (拆沉作用) 导致了软流圈上涌, 区域应力场由挤压转为伸展, 在此构造背景下发生近水平韧性剪切作用, 并伴随同时期大规

模的岩浆侵入。软流圈的上涌一方面为下地壳的熔融提供了热源,另一方面,底侵玄武质岩浆也

部分混入到下地壳中,共同构成乌和尔图花岗岩岩体的源区(见图10)。

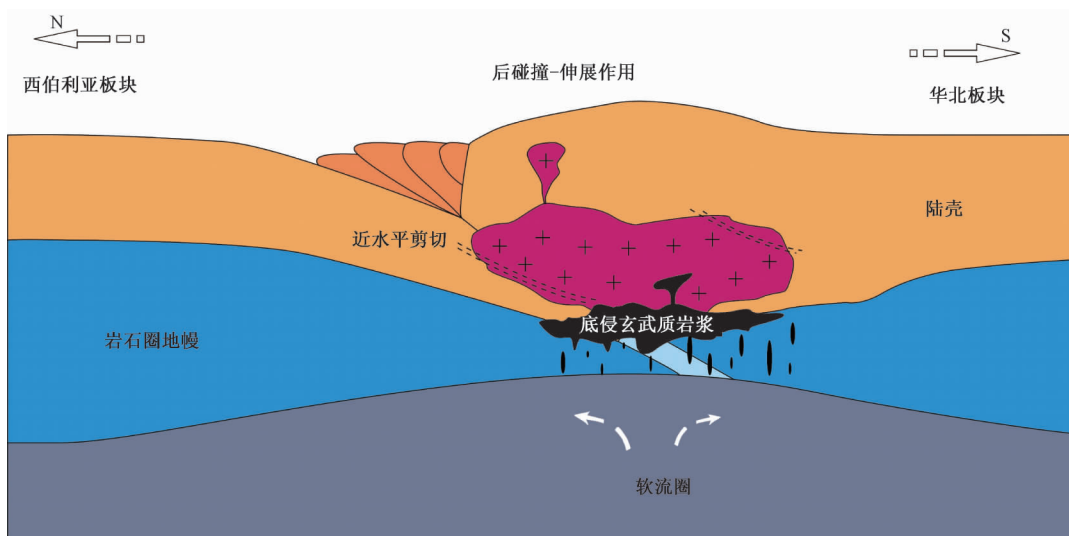


图 10 乌和尔图花岗岩岩体成因模式图

Fig. 10 Genesis mode chart of the WuheErtu granite mass

华北板块与西伯利亚板块的相互作用对于华北北缘地区印支期构造具有重要影响,古生代末-早中生代初,伴随着华北板块与西伯利亚板块之间的俯冲碰撞和最终焊接^[61],华北克拉通北缘及临区进入了后碰撞演化阶段。伴随着地壳均衡的调整或地应力的松弛,并逐渐传递到板块内部而发生拉张作用^[62]。

华北北缘大量发育的二叠纪具有岛弧性质的侵入岩^[20, 63~64]、火山岩^[15, 65],证明了俯冲挤压的构造背景,地层古生物方面也证明古亚洲洋于二叠纪尚未闭合^[66~68];早中生代大量出现的A型花岗岩、碱性杂岩及相伴生的碱性超镁铁岩则代表了古亚洲洋闭合之后进入了陆内伸展演化阶段^[69~74]。狼山地区晚三叠世乌和尔图后碰撞花岗岩的发现支持了古亚洲洋于二叠纪末-三叠纪闭合这一观点。

6 结论

(1) 乌和尔图花岗岩岩体为高钾钙碱性-钾玄系列,主要岩石类型为正长花岗岩及二长花岗岩,具I-A型过渡特点。测得锆石U-Pb年龄为 236.1 ± 1.0 Ma,代表了岩体的侵位时代。

(2) Hf同位素显示乌和尔图花岗岩岩体源区主要来自华北古老地壳,可能混有少量年轻组分。

(3) 乌和尔图花岗岩岩体形成于后碰撞构造

背景,为“古亚洲洋于早二叠世-晚三叠世闭合”这一观点提供新的证据。

致谢:野外工作期间,得到天津地质调查中心孙宏伟、肖鹏、孙大鹏的帮助;成文过程中得到天津地质调查中心刘永顺、王树庆、李敏(男)的指导建议,在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Cawood P A, Kröner A, Collins W J, et al. Accretionary orogens through Earth history [A]. Cawood P A, Kröner A. Earth Accretionary Systems in Space and Time [M]. Geological Society, London, Special Publications, 2009, 318 (1): 1~36.
- [2] Xiao W J, Windley B F, Yuan C, et al. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altai [J]. American Journal of Science, 2009, 309 (3): 221~270.
- [3] Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164 (1): 31~47.
- [4] Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, et al. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: Geological and isotopic evidence [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23 (5): 605~627.
- [5] Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. Episodes, 2000, 23 (2): 82~92.
- [6] Xu B, Charvet J, Chen Y, et al. Middle Paleozoic convergent

- orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23 (4): 1342 ~ 1364.
- [7] Zhang X, Gao Y, Wang Z, et al. Carboniferous appinitic intrusions from the northern North China craton: Geochemistry, petrogenesis and tectonic implications [J]. *Journal of the Geological Society*, 2012, 169 (3): 337 ~ 351.
- [8] Xu Z, Han B F, Ren R, et al. Ultramafic-mafic mélange, island arc and post-collisional intrusions in the Mayile Mountain, West Junggar, China: Implications for Paleozoic intra-oceanic subduction-accretion process [J]. *Lithos*, 2012, 132 ~ 133: 141 ~ 161.
- [9] Han B F, He G Q, Wang X C, et al. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili Terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 109 (3/4): 74 ~ 93.
- [10] Fu D, Huang B, Peng S B, et al. Geochronology and geochemistry of Late Carboniferous volcanic rocks from northern Inner Mongolia, North China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Gondwana Research*, 2016, 36: 545 ~ 560.
- [11] Zhang W, Wu T R, Zheng R G, et al. Post-collisional Southeastern Beishan granites: Geochemistry, geochronology, Sr-Nd-Hf isotopes and their implications for tectonic evolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 58: 51 ~ 63.
- [12] Luo H L, Wu T R, Zhao L, et al. Permian high Ba-Sr granitoids: Geochemistry, age and tectonic implications of Erlangshan Pluton, Urad Zhongqi, Inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2009, 83 (3): 603 ~ 614.
- [13] 罗红玲, 吴泰然, 赵磊. 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 [J]. *岩石学报*, 2009, 25 (3): 515 ~ 526.
- LUO Hong-ling, WU Tai-ran, ZHAO Lei. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Wuliangstitai A-type granite on the northern margin of the North China Plate and tectonic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (3): 515 ~ 526.
- [14] Tang K D. Tectonic development of Paleozoic foldbelts at the north margin of the Sino-Korean Craton [J]. *Tectonics*, 1990, 9 (2): 249 ~ 260.
- [15] Zhang S H, Zhao Y, Liu J M, et al. Different sources involved in generation of continental arc volcanism: The Carboniferous-Permian volcanic rocks in the northern margin of the North China block [J]. *Lithos*, 2016, 240 ~ 243: 382 ~ 401.
- [16] Wilde S A. Final amalgamation of the Central Asian Orogenic Belt in NE China: Paleo-Asian Ocean closure versus Paleo-Pacific plate subduction-A review of the evidence [J]. *Tectonophysics*, 2015, 662: 345 ~ 362.
- [17] Wang Z J, Xu W L, Pei F P, et al. Geochronology and geochemistry of middle Permian-Middle Triassic intrusive rocks from central-eastern Jilin Province, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern segment of the Paleo-Asian Ocean [J]. *Lithos*, 2015, 238: 13 ~ 25.
- [18] Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia [J]. *Lithos*, 2010, 118 (1/2): 169 ~ 190.
- [19] Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications [J]. *GSA Bulletin*, 2009, 121 (1/2): 181 ~ 200.
- [20] Zhang S H, Zhao Y, Kröner A, et al. Early Permian plutons from the northern North China Block: constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98 (6): 1441 ~ 1467.
- [21] Chen B, Jahn B M, Tian W. 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 [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34 (3): 245 ~ 257.
- [22] Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. 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 [J]. *Lithos*, 2008, 101 (3/4): 233 ~ 259.
- [23] Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 2003, 22 (6): 123 ~ 136.
- [24] Chen B, Jahn B M, Wilde S, et al. Two contrasting paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 2000, 328 (1/2): 1069.
- [25] Liégeois J P. Preface-some words on the post-collisional magmatism [J]. *Lithos*, 1998, 45: 15 ~ 18.
- [26] Liu M, Zhang D, Xiong G Q, et al. Zircon U-Pb age, Hf isotope and geochemistry of Carboniferous intrusions from the Langshan area, Inner Mongolia: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 120: 139 ~ 158.
- [27] Wang Z Z, Han B F, Feng L X, et al. Geochronology, geochemistry and origins of the Paleozoic-Triassic plutons in the Langshan area, western Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 337 ~ 351.
- [28] Lin L N, Xiao W J, Wan B, et al. Geochronologic and Geochemical evidence for persistence of South-dipping subduction to Late Permian time, Langshan area, Inner Mongolia (China): Significance for termination of accretionary orogenesis in the Southern Altaids [J]. *American Journal of Science*, 2014, 314 (2): 679-703.
- [29] 吴亚飞, 曾键年, 曹建劲, 等. 内蒙古东升庙海西期岩体锆

- 石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征 [J]. 地质科技情报, 2013, 32 (6): 22 ~ 29.
- WU Ya-fei, ZENG Jian-nian, CAO Jian-jin, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of hercynian intrusion in Dongshengmiao, Inner Mongolia [J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32 (6): 22 ~ 29.
- [30] 刘晔, 钱建强, 杨斌. 内蒙古东升庙一带花岗岩岩石体锆石年代学及其构造意义 [J]. 甘肃地质, 2013, 22 (4): 37 ~ 44.
- LIU Ye, QIAN Jian-qiang, YANG Bin. Zircon geochronology of granitic mass in Dongshengmiao of Inner Mongolia and tectonic significance [J]. Gansu Geology, 2013, 22 (4): 37 ~ 44.
- [31] 于延秋, 郭守钰, 王立峰. 内蒙古狼山浩日格山海西期花岗岩体特征与形成环境 [J]. 世界地质, 2011, 30 (3): 345 ~ 351.
- YU Yan-qiu, GUO Shou-yu, WANG Li-feng, et al. Characteristics and formation environment of Hercynian granites in Haorigeshan of Langshan, Inner Mongolia [J]. Global Geology, 2011, 30 (3): 345 ~ 351.
- [32] 鲁有朋, 俞胜, 张永全, 等. 内蒙狼山地区中生代构造演化及年代学特征 [J]. 甘肃地质, 2015, 24 (2): 24 ~ 29.
- LU You-peng, YU Sheng, ZHANG Yong-quan, et al. Tectonic evolution and chronology constrains of Langshan region in Inner Mongolia autonomous [J]. Gansu Geology, 2015, 24 (2): 24 ~ 29.
- [33] 高洪雷. 内蒙古狼山地区中生代构造演化与年代学约束 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2010.
- GAO Hong-lei. Structure evolution and chronology constrains of Lang Shan in Neimeng autonomous region [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [34] Sengör A M C, Natalin B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia [J]. Nature, 1993, 364 (6435): 299 ~ 307.
- [35] Shi X J, Wang T, Zhang L, et al. Timing, petrogenesis and tectonic setting of the Late Paleozoic gabbro-granodiorite-granite intrusions in the Shalazhashan of northern Alxa: Constraints on the southernmost boundary of the Central Asian Orogenic Belt [J]. Lithos, 2011, 208 ~ 209: 158 ~ 177.
- [36] 刘晔. 内蒙古东升庙 - 带花岗质片麻岩及侵入岩的地球化学、年代学特征及其构造意义 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- LIU Ye. Geochemical and chronological characteristics of the granitic gneisses and intrusive rocks in Dongshengmiao region, Inner Mongolia and their tectonic implications [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [37] Hu J M, Gong W B, Wu S J, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Langshan Group in the northeast margin of the Alxa block, with tectonic implications [J]. Precambrian Research, 2014, 255: 756 ~ 770.
- [38] 彭润民, 翟裕生, 王建平, 等. 内蒙狼山新元古代酸性火山岩的发现及其地质意义 [J]. 科学通报, 2010, 55 (26): 2611 ~ 2620.
- PENG Run-min, ZHAI Yu-sheng, WANG Jian-ping, et al. Discovery of Neoproterozoic acid volcanic rock in the south-western section of Langshan, Inner Mongolia [J]. Chinese Science Bulletin (Chinese Version), 2010, 55 (26): 2611 ~ 2620.
- [39] 赵勇, 蔡向民, 李亚林, 等. 内蒙古宝音图晚二叠世 - 晚三叠世花岗岩岩石化学特征及其构造环境 [J]. 矿物岩石, 2011, 31 (1): 49 ~ 55.
- ZHAO Yong, CAI Xiang-min, LI Ya-lin, et al. The petrochemical characteristics and tectonic setting of the Late Permian and the Late Triassic for the granitic batholith in Buyant area, Inner Mongolia [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2011, 31 (1): 49 ~ 55.
- [40] 皮桥辉, 刘长征, 陈岳龙, 等. 内蒙古霍各乞海西期侵入岩形成时代、成因及其与铜矿体的关系 [J]. 矿床地质, 2010, 29 (3): 437 ~ 451.
- PI Qiao-hui, LIU Chang-zheng, CHEN Yue-long, et al. Formation epoch and genesis of intrusive rocks in Huogeqi orefield of Inner Mongolia and their relationship with copper mineralization [J]. Mineral Deposits, 2010, 29 (3): 437 ~ 451.
- [41] 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 等. 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 [J]. 岩石学报, 2010, 26 (7): 2131 ~ 2140.
- LI Huai-kun, ZHU Shi-xing, XIANG Zhen-qun, et al. Zircon U-Pb dating on tuffbed from Gaoyuzhuang formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (7): 2131 ~ 2140.
- [42] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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 [J]. Journal of Petrology, 2010, 51 (1/2): 537 ~ 571.
- [43] Ludwig K R. Isoplot/Ex: A Geochronological toolkit for microsoft excel version 3. 00 [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003, 4: 1 ~ 70.
- [44] 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定 [J]. 地质通报, 2011, 30 (10): 1508-1513.
- GENG Jian-zhen, LI Huai-kun, ZHANG Jian, et al. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30 (10): 1508 ~ 1513.
- [45] Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. Chemical Geology, 2006, 234 (1/2): 105 ~ 126.
- [46] Woodhead J, Hergt J, Shelley M, et al. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries, and concomitant age estimation [J]. Chemical Geology, 2004, 209 (1/2): 121 ~ 135.
- [47] Blichert-Toft J, Albarède F. The Lu-Hf isotope geochemistry of

- chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148 (1/2): 243 ~ 258.
- [48] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64 (1): 133 ~ 147.
- [49] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *GSA Bulletin*, 1989, 101 (5): 635 ~ 643.
- [50] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58 (1): 63 ~ 81.
- [51] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D, Norry M J. *Magma-tism in the Ocean Basin* [M]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42 (1): 313 ~ 345.
- [52] 李献华, 李武显, 李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义 [J]. *科学通报*, 2007, 52 (9): 981 ~ 991.
- LI Xian-hua, LI Wu-xian, LI Zheng-xiang. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52 (14): 1873 ~ 1885.
- [53] Yang J H, Wu F Y, Shao J A, et al. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 246 (3/4): 336 ~ 352.
- [54] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25 (4): 956 ~ 983.
- [55] Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [J]. *Lithos*, 1999, 46 (3): 605 ~ 626.
- [56] Barbarin B. Granitoids: Main petrogenetic classifications in relation to origin and tectonic setting [J]. *Geological Journal*, 1990, 25 (3/4): 227 ~ 238.
- [57] Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism [A]. Coward MP, Ries AC. *Collision tectonics* [M]. Geological Society, London, Special Publications, 1986, 19 (1): 67 ~ 81.
- [58] 程裕淇. 中国区域地质概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- CHENG Yu-qi. *Regional geological survey China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [59] 张招崇, 王永强. 冀北印支期碱性岩浆活动及其地球动力学意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1997, 16 (4): 214 ~ 217.
- ZHANG Zhao-chong, WANG Yong-qiang. Indosinian alkaline magmatism in North Hebei Province and its geodynamic significance [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1997, 16 (4): 214 ~ 217.
- [60] 柳长峰, 刘文灿, 周志广. 内蒙古四子王旗地区古生代 - 早中生代侵入岩活动期次、特征及构造背景 [J]. *地质学报*, 2014, 88 (6): 992 ~ 1002.
- LIU Chang-feng, LIU Wen-can, ZHOU Zhi-guang. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Paleozoic-Early Mesozoic intrusive in Siziwangqi, Inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88 (6): 992 ~ 1002.
- [61] 张维, 简平. 华北北缘固阳二叠纪闪长岩 - 石英闪长岩 - 英云闪长岩套 SHRIMP 年代学 [J]. *中国地质*, 2012, 39 (6): 1593 ~ 1603.
- ZHANG Wei, JIAN Ping. SHRIMP dating of the Permian Guyang diorite-quartz diorite-tonalite suite in the northern margin of the North China Craton [J]. *Geology in China*, 2012, 39 (6): 1593 ~ 1603.
- [62] Yu Q, Ge W C, Zhang J, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implication of Late Paleozoic volcanic rocks from the Dashizhai Formation in Inner Mongolia, NE China [J]. *Gondwana Research*, 2017, 43: 164 ~ 177.
- [63] 尚庆华. 北方造山带内蒙古中、东部地区二叠纪放射虫的发现及意义 [J]. *科学通报*, 2004, 49 (24): 2574 ~ 2579.
- SHANG Qing-hua. Occurrences of Permian radiolarians in central and eastern Nei Mongol (Inner Mongolia) and their geological significance to the Northern China Orogen [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (24): 2613 ~ 2619.
- [64] 王玉净, 樊志勇. 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 [J]. *古生物学报*, 1997, 36 (1): 58 ~ 69.
- WANG Yu-jing, FAN Zhi-yong. Discovery of Permian radiolarians in ophiolite belt on northern side of XAR Moron River, Nei Mongol and its geological significance [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1997, 36 (1): 58 ~ 69.
- [65] 樊志勇. 内蒙古西拉木伦河北岸杏树洼一带石炭纪洋壳"残片"的发现及其构造意义 [J]. *中国区域地质*, 1996, 15 (4): 382.
- FAN Zhi-yong. Discovery of the carboniferous oceanic crust fragments and its tectonic in the north of the Xila Mu River, Inner Mongolia [J]. *Regional Geology of China*, 1996, 15 (4): 382.
- [66] 任荣, 牟保磊, 韩宝福, 等. 河北矾山钾质碱性超镁铁岩 - 正长岩杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 [J]. *岩石学报*, 2009, 25 (3): 588 ~ 594.
- REN Rong, MU Bao-lei, HAN Bao-fu, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Fanshan potassic alkaline ultramafite-syenite complex in Hebei Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (3): 588 ~ 594.
- [67] 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论 [J]. *岩石学报*, 2008, 24 (6): 1145 ~ 1174.
- WU Fu-yuan, XU Yi-gang, GAO Shan, et al. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (6): 1145 ~ 1174.

[68] 吕林素, 毛景文, 刘珺, 等. 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 [J]. 地球学报, 2007, 28 (2): 148 ~ 166.
LÜ Lin-su, MAO Jing-wen, LIU Jun, et al. Geological characteristics, geochronology and tectonic settings of typical magmatic Ni-Cu- (PGE) sulfide deposits in thenorthern margin of the North China Craton [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28 (2): 148 ~ 166.

[69] 田伟, 陈斌, 刘超群, 等. 冀北小张山口超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (3): 583 ~ 590.
TIAN Wei, CHEN Bin, LIU Chao-qun, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the Xiaozhangjiakou ultramafic pluton in northern Hebei [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (3): 583 ~ 590.

[70] 韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民. 河北平泉光头山碱性花岗岩的时代、Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意義 [J]. 岩石学报, 2004, 20 (6): 74 ~ 87.
HAN Bao-fu, Kagami H, LI Hui-min. Age and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Guangtoushan alkaline granite, Hebei province, China: Implications for early Mesozoic crust-mantle interaction in North China Block [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20 (6): 74 ~ 87.

[71] 牟保磊, 邵济安, 储著银, 等. 河北矾山钾质碱性超镁铁岩 - 正长岩杂岩体 Sm-Nd 年龄和 Sr、Nd 同位素特征 [J]. 岩石学报, 2001, 17 (3): 358 ~ 365.
MU Bao-lei, SHAO Ji-an, CHU Zhu-yin, et al. Sm-Nd age and Sr, Nd isotopic characteristics of the Fanshan potassic alkaline ultramafite-syenite complex in Hebei province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17 (3): 358 ~ 365.

ZIRCON U-PB CHRONOLOGY AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE WUHEERTU GRANITE MASS IN LANGSHAN, INNER MONGOLIA

WANG Wen-long, TENG Xue-jian, LIU Yang, TENG Fei, GUO Shuo, HE Peng, TIAN Jian, DUAN Xiao-long

(Tianjin Center of Geological Survey, CGS, Tianjin 300170, China)

Abstract: The WuheErtu granite mass, with the main rock types of syenogranite and monzogranite, are distributed in Langshan area, Inner Mongolia, northern margin of the North China Plate. Zircon U-Pb age is 236.1 ± 1.0 Ma, indicating the WuheErtu granite mass formed in late Triassic. Geochemical results show high content of SiO_2 (71.94 ~ 73.91%), $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (8.34 ~ 8.88%), low content of Ca and Mg, and weak content of aluminum ($0.98 < \text{A/CNK} < 1.07$). In SiO_2 - K_2O diagram, sample points fall into the transitional region between high-K calc-alkaline and Shoshonite series. In the primitive mantle-normalized spider diagram, the geochemical characteristics of the granite mass show in some degree enrichment in Rb, Th, K, Nd, Zr, Hf, Sm and depletion in Ba, Nb, Ta, Sr, P, Ti, with medium to negligible Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.47 \sim 0.66$), which indicate the WuheErtu granite mass belong to the post-collisional granite formed in the tectonic setting transformed from compression system to extension system. Zircon Hf isotopic displays that $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values vary from -20.6 to +7.6 and Hf model ages (TDM2) vary from 780 ~ 2559 Ma, which suggest a mixed magma source of old continental crust with a small involvement of juvenile components. The comprehensive study of this granite mass helps to further understand and explore the tectonic-magmatic evolution of the northern margin of the North China plate in late Permian-Triassic.

Key words: Inner Mongolia; Langshan area; the triassic granite; post-collision; geochemistry