

文章编号: 1004—5589 (2025) 01—0035—21

李翱鹏, 王春阳, 吕鹏, 等. 吉林中部大口钦地区杨家沟组物源分析: 来自地球化学特征及碎屑锆石 U-Pb 年代学证据 [J]. 世界地质, 2025, 44 (1): 35–55. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.003.

LI A P, WANG C Y, LÜ P, et al. Provenance analysis of Yangjiagou Formation in Dakouqin area, central Jilin Province: evidence from geochemistry and detrital zircon U-Pb geochronology [J]. World Geology, 2025, 44 (1): 35–55. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.003.

## 吉林中部大口钦地区杨家沟组物源分析: 来自地球化学特征及碎屑锆石 U-Pb 年代学证据

李翱鹏<sup>1,2</sup>, 王春阳<sup>3</sup>, 吕鹏<sup>1\*</sup>, 刘万臻<sup>1,2</sup>, 王福亮<sup>1</sup>, 苏斌<sup>1</sup>

1. 吉林省地质调查院, 长春 130102;
2. 中国地质调查局 东北地质科技创新中心, 沈阳 110034;
3. 吉林省第四地质调查所, 吉林 通化 134000

**摘要:** 关于古亚洲洋最终闭合的时间一直是地学界争论的热点问题之一, 吉林中部地区在古生代期间主要受古亚洲洋构造体系的控制, 是研究上述问题的理想场所。笔者对吉林中部大口钦地区杨家沟组岩屑杂砂岩和粉砂质板岩开展了系统的锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究, 确定了杨家沟组的沉积时限和物源特征。地层最大沉积年龄采用最年轻的碎屑锆石加权平均年龄进行限定, 杨家沟组的 2 个岩屑杂砂岩样品 (PM001-38-TW1 和 PM001-135-TW1) 的沉积下限年龄分别为  $(255 \pm 5)$  Ma 和  $(251 \pm 2)$  Ma, 与二叠系—三叠系沉积界限年龄  $(251.902 \pm 0.024)$  Ma 相符合。结合捕获自周围晚三叠世二长花岗岩 [  $(235 \sim 227)$  Ma ] 锆石的年龄和侵入到杨家沟组中二长花岗岩的年龄  $(223 \pm 2)$  Ma, 认为研究区杨家沟组应形成于晚二叠世。全岩主、微量元素数据表明杨家沟组岩屑杂砂岩和粉砂质板岩的  $w(\text{SiO}_2)$  为 65.13% ~ 70.73%,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 14.75% ~ 17.29%,  $w(\text{K}_2\text{O})$  为 2.43% ~ 3.87%,  $w(\text{Na}_2\text{O})$  为 1.59% ~ 3.26%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  为 0.75 ~ 2.34, 相对富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素,  $\text{LREE}/\text{HREE} = 6.98 \sim 9.09$ ,  $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.56 \sim 0.70$ 。CIA-ICV 图解、物源区属性图解以及构造背景判别图解表明, 杨家沟组物源沉积物经历了中等程度的风化作用, 成熟度相对较高, 其物源主要以长英质岩石为主, 形成于活动大陆边缘或大陆岛弧背景下。杨家沟组的碎屑锆石年龄可划分为 5 组: 古元古代 (1 819 ~ 1 785 Ma)、中—新元古代 (1 491 ~ 561 Ma)、寒武纪—石炭纪 (522 ~ 301 Ma)、早—中二叠世 (295 ~ 259 Ma) 和晚二叠世—中三叠世 (258 ~ 238 Ma)。结合前人对区域上岩浆作用的研究表明, 杨家沟组具有双向物源特征 (华北板块和兴蒙造山带)。杨家沟组的源区性质及古生物学证据表明其形成于碰撞造山向构造稳定环境转化的阶段。综合研究区的岩浆作用特征, 认为古亚洲洋在吉林中部的最终闭合发生在晚二叠世—中三叠世。

**关键词:** 物源分析; 地球化学特征; 锆石 U-Pb 年代学; 杨家沟组; 大口钦地区; 吉林省中部

**中图分类号:** P595; P597

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.003

收稿日期/Received: 2024-02-28; 修订日期/Revised: 2024-11-28; 出版日期/Published: 2025-02-25

基金项目: 中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基基金项目 (QCJ2022-18)

第一作者: 李翱鹏 (1985—), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质调查和地质矿产方面研究工作。E-mail: 394426276@qq.com

\* 通信作者: 吕鹏 (1968—), 男, 正高级工程师, 主要从事区域地质调查工作。E-mail: 1351303517@qq.com

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

# Provenance analysis of Yangjiagou Formation in Dakouqin area, central Jilin Province: evidence from geochemistry and detrital zircon U-Pb geochronology

LI Aopeng<sup>1,2</sup>, WANG Chunyang<sup>3</sup>, LÜ Peng<sup>1\*</sup>, LIU Wanzhen<sup>1,2</sup>, WANG Fuliang<sup>1</sup>, SU Bin<sup>1</sup>

1. Geological Survey Institute of Jilin Province, Changchun 130102, China;

2. Northeast Geological Science & Technology Innovation Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, China

3. The Fourth Geologic Survey of Jilin Province, Tonghua 134000, Jilin, China

**Abstract:** The timing of the final closure of the Paleo-Asian Ocean is one of the controversial issues in the field of geoscience. The central Jilin Province, which was controlled by the evolution of the Paleo-Asian tectonic regime during the Paleozoic, is an ideal place to resolve the above issue. The authors conducted systematic zircon U-Pb geochronological and geochemical studies on lithic sandstones and silty slates from Yangjiagou Formation in the Dakouqin area, central Jilin Province, and determined the deposition time and provenance characteristics of Yangjiagou Formation. The maximum depositional age of the formation can be constrained by the youngest weighted average age of detrital zircons, and therefore the lower depositional ages of the two lithic sandstones samples (PM001-38-TW1 and PM001-135-TW1) from Yangjiagou Formation were determined to be  $(255 \pm 5)$  Ma and  $(251 \pm 2)$  Ma, which are consistent to the Permian and Triassic boundary  $(251.902 \pm 0.024)$  Ma. Combined with the ages of zircons that captured from the surrounding Late Triassic monzogranite dated  $(235 - 227)$  Ma, and the timing of the monzogranite aged  $(232 \pm 2)$  Ma which intruded in, the Yangjiagou Formation in the study area would deposit during the Late Permian. Whole rock major and trace element geochemical data of the lithic sandstones and silty slates from Yangjiagou Formation indicate that  $w(\text{SiO}_2)$  ranges from 65.13% to 70.73%,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  from 14.75% to 17.29%,  $w(\text{K}_2\text{O})$  from 2.43% to 3.87%,  $w(\text{Na}_2\text{O})$  from 1.59% to 3.26%, and the ratio of  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  is from 0.75 to 2.34. The light rare earth elements are relatively enriched, while the heavy rare earth elements are depleted, with LREE/HREE and  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  ratios of 6.98–9.09 and 0.56–0.70, respectively. Based on the CIA-ICV diagram, the source composition discrimination diagram and the tectonic setting discrimination diagram, the sedimentary provenance of Yangjiagou Formation has experienced a relatively moderate weathering with a high maturity. The Yangjiagou Formation whose source rocks are mainly felsic, were deposited in active continental margin or continental island arc. Detrital zircon age distributions of Yangjiagou Formation can be divided into five groups: Paleoproterozoic (1 819–1 785 Ma), Meso-Neoproterozoic (1 491–561 Ma), Cambrian–Carboniferous (522–301 Ma), Early and Middle Permian (295–259 Ma), and Late Permian to Middle Triassic (258–238 Ma). Based on previous studies of regional magmatism, Yangjiagou Formation has bidirectional provenance characteristics (North China Plate and Xing'an–Mongolian Orogenic Belt). The provenance attribute and paleontological evidence of Yangjiagou Formation show a tectonic transition from collisional orogeny to a stable tectonic environment. Combined with the characteristics of magmatism in the study area, the final closure of the Paleo-Asian Ocean in central Jilin Province is considered to happen in the Late Permian–Middle Triassic.

**Keywords:** provenance analysis; geochemistry characteristics; zircon U-Pb geochronology; Yangjiagou Formation; Dakouqin area; central Jilin Province

## 0 引言

吉林中部地区位于兴蒙造山带东南段, 经历了

极其复杂的地质构造演化, 在古生代期间, 主要受古亚洲洋构造体系控制<sup>[1-2]</sup>。中生代以来, 主要受环太平洋构造域控制, 并经历蒙古—鄂霍茨克构造

域的叠加改造<sup>[3-7]</sup>。长期以来, 关于古亚洲洋最终闭合时间和位置, 不同学者看法不一。目前, 绝大多数学者认为古亚洲洋沿索伦—西拉木伦—长春一线最终闭合<sup>[1,8-11]</sup>, 然而对于这一缝合带在吉林中部最终闭合的具体时间仍存在争议, 主要有 3 种不同认识: 早—中二叠世<sup>[12]</sup>; 晚二叠世末期—早中三叠世<sup>[10-11,13-14]</sup>; 晚三叠世早期<sup>[15]</sup>。

碎屑沉积物中不仅蕴含丰富的源区信息, 还反映沉积物源和构造背景, 其碎屑锆石的年龄分布可以精确判别沉积物的源区性质、限定沉积岩形成时代、探讨区域构造演化等, 是研究沉积盆地与周围造山带及盆山耦合事件的重要手段<sup>[16-18]</sup>。近年来对吉林省中部地区构造背景的研究大多集中在火成岩以及泥盆系—上二叠统的碎屑锆石上<sup>[17-19]</sup>, 缺乏对晚古生代—早中生代沉积岩碎屑锆石的研究。

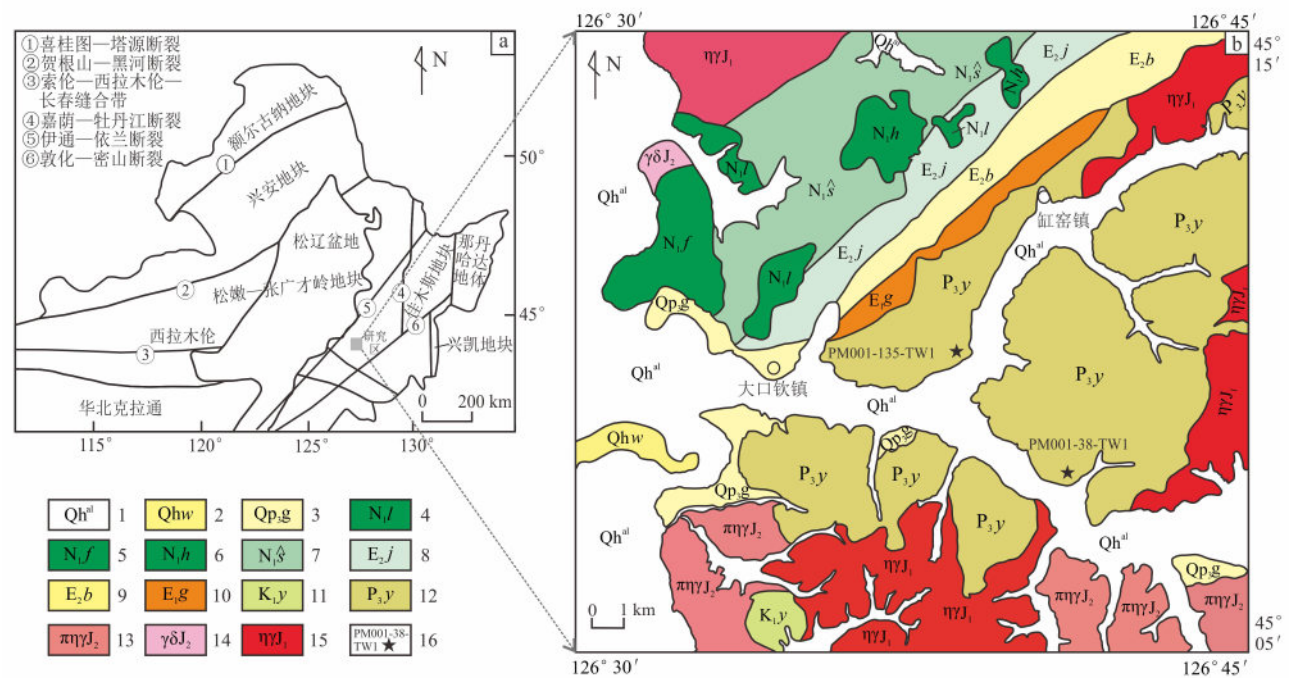
杨家沟组于 1973 年在波泥河地区创建, 前人<sup>[20]</sup>对该组的地层学及古生物学方面开展了研究, 但缺乏精确的锆石年代学资料。

为解决上述问题, 笔者选择吉林省中部大口钦地区杨家沟组岩屑杂砂岩和粉砂质板岩进行了年代学和地球化学研究, 以确定杨家沟组形成的时代及构造环境, 为探讨吉林中部晚古生代—早中生代构造演化提供参考。

## 1 地质背景及样品描述

### 1.1 地质背景

研究区在大地构造位置上处于西拉木伦—长春缝合带以北的区域范围内<sup>[21]</sup>, 是研究古亚洲洋构造域与环太平洋构造域叠加演化的理想地段(图 1a)。研究区出露的地质单元包括: 上二叠统杨家沟组( $P_3y$ )为一套以变中—细粒岩屑杂砂岩、粉砂质板岩、变质粉砂岩为主的岩石组合; 下白垩统营城组( $K_1y$ )为一套陆相酸性火山岩; 古新统缸窑组( $E_1g$ )主要由复成分砾岩、杂砂岩夹泥岩组成; 始新统棒槌沟组( $E_2b$ )以含中细砾砂岩、粉砂质黏土岩、黏土岩夹薄煤层为特征; 始新统吉舒



1. 全新统河漫滩堆积物; 2. 全新统温泉组; 3. 上更新统顾乡屯组; 4. 中新统老岭玄武岩; 5. 中新统凤凰山玄武岩; 6. 中新统黑背山玄武岩; 7. 中新统水曲柳组; 8. 始新统吉舒组; 9. 始新统棒槌沟组; 10. 古新统缸窑组; 11. 下白垩统营城组; 12. 上二叠统杨家沟组; 13. 中侏罗世斑状二长花岗岩; 14. 中侏罗世花岗岩; 15. 早侏罗世二长花岗岩; 16. 年龄样品采样位置及编号。

a. 据文献 [4] 修改。

图 1 大地构造简图 (a) 和大口钦地区地质略图 (b)  
Fig. 1 Tectonic sketch map (a) and simplified geological map of Dakouqin area (b)

组 ( $E_2j$ ) 主要岩性为粉砂岩、褐色砂质泥岩, 在下部夹多层工业煤层; 中新统水曲柳组 ( $N_1\hat{s}$ ) 岩性主要为灰绿色砂岩、页岩和砂质页岩互层, 偶夹不可采薄煤层和煤线; 见有中新统老爷岭玄武岩 ( $N_1l$ )、中新统凤凰山玄武岩 ( $N_1f$ ), 中新统黑背山玄武岩 ( $N_1h$ ); 第四系出露地层主要有: 上更新统顾乡屯组 ( $Qp_3g$ )、全新统温泉河组 ( $Qh_w$ )、全新统河漫滩堆积物 ( $Qh^{al}$ )。岩浆岩主要是中侏罗世斑状二长花岗岩 ( $\pi\eta\gamma J_2$ )、花岗闪长岩 ( $\gamma\delta J_2$ ) 和早侏罗世二长花岗岩 ( $\eta\gamma J_1$ ) (图 1b)。

## 1.2 样品描述

研究区杨家沟组出露在大口钦镇北东侧。笔者在杨家沟组实测地质剖面的同时, 共采集岩屑杂砂

岩全岩主量、微量和稀土测试样品 8 件 (图 2 中 GS4、GS6、GS7、GS8、GS10、GS11、GS12、GS13), 粉砂质板岩全岩主量、微量和稀土测试样品 5 件 (图 2 中 GS1、GS2、GS3、GS5、GS9)。岩屑杂砂岩碎屑锆石年龄样品 1 件 (图 1a、图 2 中 PM001-135-TW1), 另 1 件碎屑锆石年龄样品 PM001-38-TW1, 也为岩屑杂砂岩, 采自靠山屯村附近, 采样地理位置为  $126^{\circ}40'39.35''E$ 、 $44^{\circ}07'45.58''N$  (图 1a 中 PM001-38-TW1)。

杨家沟组岩石组合主要为粉砂质板岩、岩屑杂砂岩及变质粉砂岩等, 岩石遭受挤压和变质作用, 普遍发育片理构造。

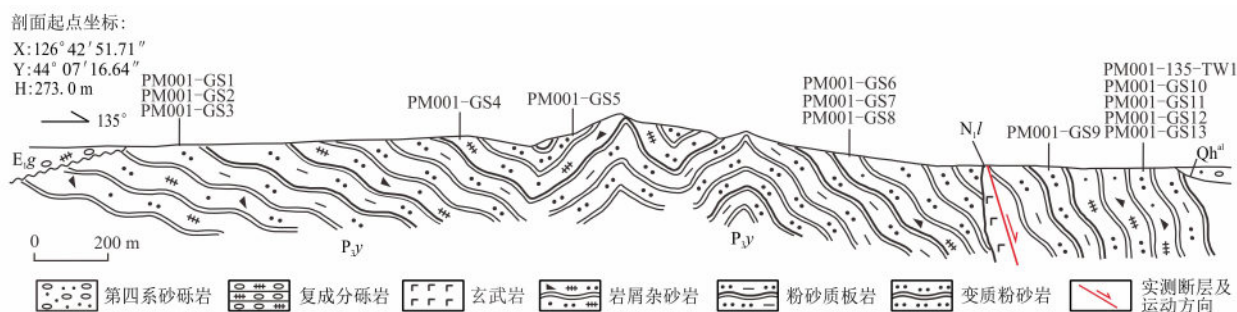


图2 吉林大口钦镇杨家沟组实测地质剖面

Fig. 2 Measured geological section of Yangjiagou Formation in Dakouqin Town of Jilin Province

粉砂质板岩 (图 3a、c): 岩石新鲜面呈灰黑色, 变余粉砂结构, 变余泥质结构, 板状构造。主要组成矿物石英 (约 30%)、斜长石 (约 25%)、粘土矿物 (约 25%) 及绢云母 (约 20%)。

岩屑杂砂岩 (图 3b、d): 岩石新鲜面呈浅灰色, 变余细粒砂状结构, 板状构造。岩石由石英、长石、岩屑及填隙物组成。石英 (约 6%) 和长石 (约 8%) 呈棱角状, 粒度 0.10 ~ 0.20 mm; 岩屑呈次棱角状-次圆状, 成分为中酸性火山岩及火山碎屑岩岩屑 (约 66%), 粒度 0.10 ~ 0.25 mm; 填隙物主要为杂基 (约 20%); 岩屑定向拉长。在碎屑平行板理方向上的两端, 见有须状绢云母集合体生长。

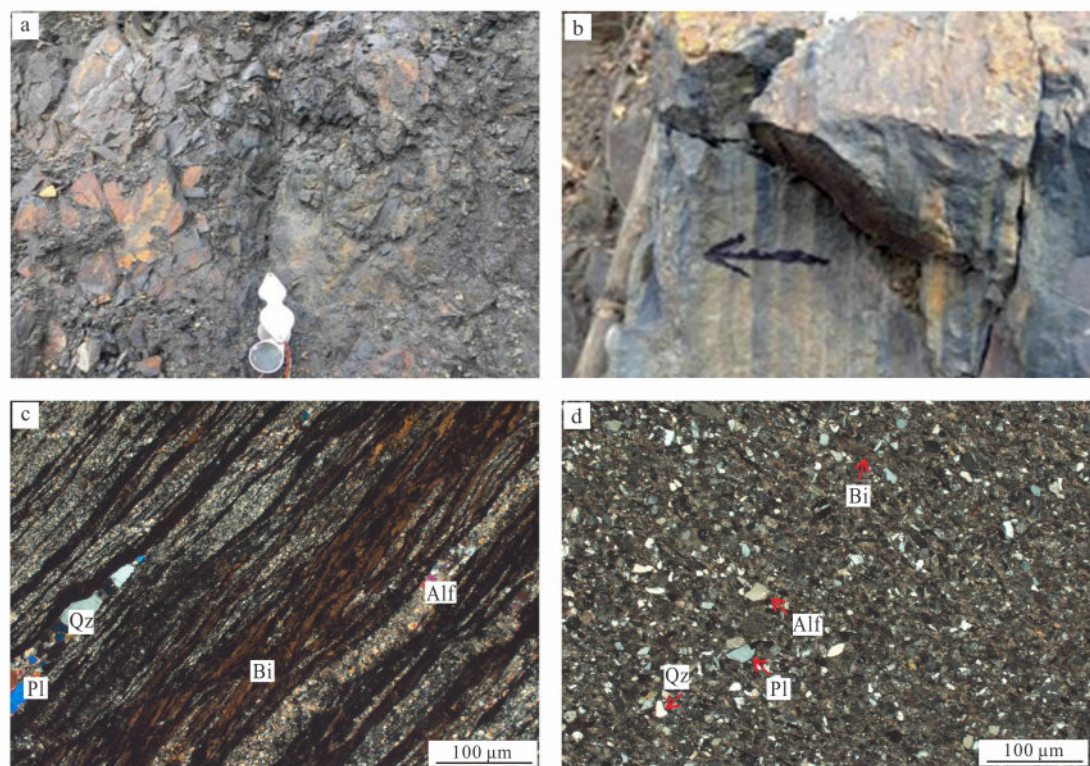
## 2 分析方法

### 2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

锆石样品挑选在河北省廊坊区域地质调查研究所实验室完成。对岩石样品进行常规机械粉碎至 80 ~ 100 目, 再进行重力分选和磁选, 在双目镜下将

不同特征的锆石粘在双面胶上, 待其固化后, 将表面打磨抛光。锆石样品的制靶、反射光、阴极发光图像采集以及锆石 U-Pb 年龄测定在北京科荟测试技术有限公司完成。锆石制靶过程中, 选择晶形和透明度较好、无裂缝和包裹体的锆石进行制靶, 将清洗完毕的靶先进行锆石反射光拍摄工作, 之后将靶镀膜进行阴极发光 CL 图像采集。仔细对比锆石反射光照片和锆石 CL 图像, 避开锆石内部包裹体和裂隙选择锆石中最佳的测试点。本次测试采用激光器对锆石样品进行剥蚀, 深度为 20 ~ 40  $\mu m$ , 激光剥蚀束斑直径为 30  $\mu m$ , 激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。锆石 U-Pb 同位素定年微量元素含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标, 分别进行同位素和微量元素分馏校正;<sup>29</sup>Si 作为内标元素。对分析数据的离线处理 (包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算) 采用软件 ICPMSDataCal 完成。锆石样





Qz. 石英; Pl. 斜长石; Bi. 黑云母; Alf. 碱性长石。

图 3 杨家沟组岩屑杂砂岩及粉砂质板岩野外照片 (a、b) 和显微照片 (c、d)

Fig. 3 Field (a, b) and microscope (c, d) photos of lithic sandstones and silty slate from Yangjiagou Formation

品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和加权平均年龄计算采用 Isoplot 完成, 单个分析点的同位素比值和同位素年龄的误差为  $1\sigma$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄表示 95% 的置信度。实验原理和流程见文献 [22-23]。具体分析步骤和数据处理过程见文献 [24-25]。

## 2.2 岩石地球化学测试

本次实验主量及微量元素的分析测试均在国土资源部长春矿产资源监督检测中心完成。主量元素采用 X 荧光光谱仪 (XRF-1800) 分析, 主量元素分析精度及准确度优于 5%, 微量元素分析精度和准确度优于 10%。微量元素采用离子光谱质谱法 (ICP-MS) 分析。分析原理见文献 [26]。

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 LA-ICP-MS 定年结果

(1) 样品 PM001-38-TW1 (岩屑杂砂岩)

该样品共测试了 120 个点, 对 LA-ICP-MS 测试

数据处理后, 剔除谐和度低于 85% 以及元素含量曲线振荡大的点, 共获得有效数据 108 个, 分析结果见表 1。该样品中的碎屑锆石 CL 图像 (图 4) 显示锆石颗粒粒径分布介于  $70 \sim 120 \mu\text{m}$  之间, 以半自形-他形为主, 绝大部分锆石不同程度地保留明显的岩浆振荡生长环带, 极少部分具有扇形或面状分带结构特征。Th/U 比值为  $0.14 \sim 1.36$  ( $>0.1$ ), 具有典型岩浆成因锆石特点。U-Pb 年龄集中分布在  $1819 \sim 228 \text{ Ma}$  之间 (图 5a、b), 表面年龄按分布频率可分为 6 组: ①  $295 \sim 228 \text{ Ma}$ ; ②  $392 \sim 301 \text{ Ma}$ ; ③  $522 \sim 411 \text{ Ma}$ ; ④  $582 \sim 561 \text{ Ma}$ ; ⑤  $944 \sim 744 \text{ Ma}$ ; ⑥  $1819 \sim 1785 \text{ Ma}$ 。对应加权平均年龄值分别为:  $(255 \pm 5) \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD} = 6.9, n = 46$ );  $(330 \pm 10) \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD} = 9.8, n = 28$ );  $(461 \pm 16) \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD} = 8.5, n = 19$ );  $(566 \pm 22) \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD} = 0.11, n = 3$ );  $(848 \pm 91) \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD} = 14, n = 5$ );  $(1796 \pm 51) \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD} = 0.12, n = 3$ ), 其中最小年龄组的加权平均年龄为  $(255 \pm 5) \text{ Ma}$ ,

表 1 大口钦地区杨家沟组锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon U-Pb dating results of Yangjiagou Formation in Dakouqin area

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值								年龄/Ma									
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$						
PM001-38-TW1-63	49	109	0.45	0.054	37	0.005	58	0.271	24	0.030	73	0.036	07	0.001	18	387	206	244	25	228	7
PM001-38-TW1-106	276	382	0.72	0.054	57	0.001	90	0.273	05	0.012	05	0.036	31	0.001	02	394	75	245	10	230	6
PM001-38-TW1-43	150	268	0.56	0.051	74	0.002	61	0.260	13	0.012	96	0.036	50	0.000	60	272	117	235	10	231	4
PM001-38-TW1-73	248	665	0.37	0.049	83	0.001	21	0.253	21	0.007	63	0.036	93	0.000	96	187	57	229	6	234	6
PM001-38-TW1-92	130	366	0.36	0.050	51	0.002	03	0.258	22	0.012	22	0.037	07	0.000	84	217	93	233	10	235	5
PM001-38-TW1-36	338	735	0.46	0.055	22	0.001	65	0.285	65	0.007	76	0.037	62	0.000	76	420	67	255	6	238	5
PM001-38-TW1-20	124	372	0.33	0.051	71	0.001	75	0.269	58	0.010	78	0.037	72	0.000	87	272	78	242	9	239	5
PM001-38-TW1-13	123	203	0.61	0.061	58	0.004	72	0.319	46	0.022	18	0.037	83	0.000	85	661	165	281	17	239	5
PM001-38-TW1-59	178	541	0.33	0.051	61	0.001	21	0.271	33	0.009	93	0.038	04	0.000	97	333	54	244	8	241	6
PM001-38-TW1-12	158	467	0.34	0.054	52	0.001	91	0.288	58	0.011	32	0.038	40	0.000	89	394	78	257	9	243	6
PM001-38-TW1-84	312	993	0.31	0.055	70	0.001	45	0.299	41	0.013	65	0.038	68	0.000	96	439	55	266	11	245	6
PM001-38-TW1-70	123	215	0.57	0.051	02	0.001	73	0.274	05	0.013	19	0.038	85	0.001	02	243	78	246	11	246	6
PM001-38-TW1-09	267	417	0.64	0.064	48	0.003	55	0.344	12	0.016	73	0.038	87	0.001	42	767	121	300	13	246	9
PM001-38-TW1-104	222	368	0.60	0.054	09	0.001	46	0.293	25	0.010	77	0.039	39	0.001	04	376	56	261	8	249	6
PM001-38-TW1-112	121	331	0.37	0.056	73	0.001	74	0.305	49	0.009	40	0.039	39	0.001	12	480	67	271	7	249	7
PM001-38-TW1-97	95	176	0.54	0.053	89	0.001	50	0.294	97	0.012	23	0.039	62	0.001	06	365	63	262	10	250	7
PM001-38-TW1-29	209	382	0.55	0.051	64	0.001	21	0.282	07	0.009	02	0.039	62	0.000	79	333	54	252	7	251	5
PM001-38-TW1-60	245	620	0.40	0.050	65	0.001	05	0.279	02	0.008	52	0.039	96	0.001	09	233	48	250	7	253	7
PM001-38-TW1-56	181	254	0.71	0.052	51	0.001	39	0.293	59	0.012	56	0.040	43	0.000	92	309	56	261	10	255	6
PM001-38-TW1-55	357	868	0.41	0.054	34	0.000	97	0.303	43	0.009	14	0.040	47	0.001	01	387	44	269	7	256	6
PM001-38-TW1-82	101	196	0.52	0.050	85	0.001	99	0.282	64	0.013	67	0.040	47	0.001	38	235	89	253	11	256	9
PM001-38-TW1-109	277	511	0.54	0.051	24	0.001	32	0.285	62	0.008	96	0.040	57	0.001	03	250	59	255	7	256	6
PM001-38-TW1-15	516	404	1.28	0.051	46	0.001	33	0.286	53	0.009	21	0.040	58	0.001	12	261	55	256	7	256	7
PM001-38-TW1-102	250	264	0.95	0.053	44	0.001	80	0.298	11	0.013	11	0.040	70	0.001	25	346	44	265	10	257	8
PM001-38-TW1-100	174	251	0.69	0.051	76	0.001	79	0.291	08	0.016	04	0.040	82	0.001	59	276	80	259	13	258	10
PM001-38-TW1-105	146	278	0.53	0.053	12	0.001	47	0.299	81	0.011	36	0.040	97	0.001	04	345	31	266	9	259	6
PM001-38-TW1-25	164	259	0.63	0.060	42	0.002	57	0.349	37	0.021	92	0.041	36	0.001	32	618	93	304	16	261	8
PM001-38-TW1-45	112	242	0.46	0.054	72	0.001	80	0.314	62	0.015	85	0.041	45	0.001	21	467	74	278	12	262	8
PM001-38-TW1-108	262	367	0.71	0.049	53	0.001	31	0.283	78	0.012	17	0.041	45	0.001	21	172	63	254	10	262	7
PM001-38-TW1-61	132	149	0.89	0.055	48	0.002	05	0.320	80	0.016	96	0.041	66	0.001	34	432	88	283	13	263	8
PM001-38-TW1-38	89	218	0.41	0.054	41	0.001	69	0.310	95	0.011	57	0.041	69	0.001	15	387	70	275	9	263	7
PM001-38-TW1-71	188	270	0.70	0.055	66	0.002	84	0.323	42	0.024	62	0.041	72	0.001	65	439	115	285	19	263	10
PM001-38-TW1-116	101	244	0.41	0.057	41	0.002	38	0.331	63	0.016	52	0.041	75	0.000	94	506	91	291	13	264	6
PM001-38-TW1-50	265	391	0.68	0.051	54	0.001	60	0.296	47	0.009	96	0.041	86	0.001	02	265	77	264	8	264	6
PM001-38-TW1-83	561	713	0.79	0.055	69	0.001	50	0.323	09	0.011	52	0.042	02	0.000	94	439	55	284	9	265	6
PM001-38-TW1-65	165	290	0.57	0.053	63	0.001	80	0.316	75	0.020	12	0.042	05	0.001	57	367	76	279	16	266	10
PM001-38-TW1-04	216	486	0.44	0.051	11	0.001	11	0.297	27	0.008	72	0.042	10	0.000	89	256	50	264	7	266	5

续表 1

Continued table 1

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$
PM001-38-TW1-01	176	359	0.49	0.051 37	0.002 40	0.295 55	0.017 50	0.042 11	0.001 46	257	107	263	14	266	9
PM001-38-TW1-08	336	497	0.68	0.05150	0.002 11	0.303 95	0.018 36	0.042 19	0.001 00	265	94	269	14	266	6
PM001-38-TW1-44	113	235	0.48	0.054 79	0.002 14	0.326 72	0.021 10	0.042 45	0.001 41	467	82	287	16	268	9
PM001-38-TW1-37	198	365	0.54	0.052 84	0.001 33	0.310 36	0.011 02	0.042 60	0.001 09	320	62	274	9	269	7
PM001-38-TW1-49	326	408	0.80	0.052 85	0.002 40	0.314 93	0.015 16	0.043 27	0.000 92	324	108	278	12	273	6
PM001-38-TW1-32	66	137	0.48	0.057 48	0.002 41	0.352 35	0.019 68	0.043 98	0.001 09	509	91	306	15	277	7
PM001-38-TW1-85	163	214	0.76	0.055 22	0.001 90	0.338 63	0.012 73	0.044 50	0.000 91	420	76	296	10	281	6
PM001-38-TW1-90	237	407	0.58	0.054 09	0.001 60	0.333 90	0.009 92	0.045 00	0.001 16	376	67	293	8	284	7
PM001-38-TW1-101	312	301	1.04	0.052 26	0.001 58	0.325 91	0.011 62	0.045 41	0.001 15	298	66	286	9	286	7
PM001-38-TW1-114	94	186	0.51	0.052 15	0.001 40	0.326 81	0.008 69	0.045 80	0.001 08	300	63	287	7	289	7
PM001-38-TW1-30	81	165	0.49	0.052 18	0.001 96	0.331 66	0.013 89	0.046 38	0.001 27	295	85	291	11	292	8
PM001-38-TW1-48	435	321	1.36	0.053 79	0.001 32	0.347 95	0.012 77	0.046 84	0.001 19	361	56	303	10	295	7
PM001-38-TW1-53	176	444	0.40	0.054 66	0.001 23	0.361 84	0.017 56	0.047 84	0.001 90	398	55	314	13	301	12
PM001-38-TW1-11	678	811	0.84	0.051 45	0.001 50	0.340 28	0.013 20	0.047 88	0.001 22	261	67	297	10	302	7
PM001-38-TW1-115	117	224	0.52	0.050 39	0.001 55	0.335 14	0.015 07	0.048 18	0.001 44	213	72	293	11	303	9
PM001-38-TW1-64	87	200	0.44	0.058 74	0.004 84	0.390 64	0.030 44	0.048 35	0.000 79	567	180	335	22	304	5
PM001-38-TW1-87	65	196	0.33	0.050 75	0.001 50	0.340 90	0.013 98	0.048 79	0.001 57	228	64	298	11	307	10
PM001-38-TW1-75	51	54	0.94	0.050 81	0.003 55	0.346 13	0.034 74	0.049 07	0.002 58	232	163	302	26	309	16
PM001-38-TW1-34	106	175	0.61	0.053 67	0.001 81	0.363 69	0.015 49	0.049 24	0.001 29	367	76	315	12	310	8
PM001-38-TW1-98	101	204	0.50	0.052 75	0.001 74	0.362 49	0.015 69	0.049 99	0.001 53	317	74	314	12	314	9
PM001-38-TW1-93	67	164	0.41	0.050 73	0.001 59	0.349 17	0.012 15	0.050 00	0.001 09	228	72	304	9	315	7
PM001-38-TW1-14	100	243	0.41	0.051 98	0.001 66	0.359 45	0.014 61	0.050 08	0.001 30	283	79	312	11	315	8
PM001-38-TW1-54	38	105	0.36	0.054 88	0.003 01	0.376 58	0.019 72	0.050 12	0.001 23	406	122	325	15	315	8
PM001-38-TW1-113	711	881	0.81	0.053 42	0.000 92	0.371 44	0.008 44	0.050 47	0.000 99	346	39	321	6	317	6
PM001-38-TW1-67	107	119	0.90	0.052 96	0.003 11	0.367 48	0.018 75	0.050 59	0.001 13	328	133	318	14	318	7
PM001-38-TW1-33	153	346	0.44	0.053 51	0.001 20	0.378 24	0.015 67	0.051 16	0.001 59	350	84	326	12	322	10
PM001-38-TW1-69	217	212	1.02	0.053 33	0.002 84	0.385 67	0.021 23	0.052 63	0.001 18	343	120	331	16	331	7
PM001-38-TW1-16	457	779	0.59	0.056 64	0.001 53	0.412 19	0.014 79	0.052 83	0.001 48	476	92	350	11	332	9
PM001-38-TW1-88	267	327	0.82	0.055 25	0.001 46	0.401 63	0.012 32	0.052 87	0.001 34	433	59	343	9	332	8
PM001-38-TW1-46	175	342	0.51	0.057 14	0.001 45	0.428 71	0.019 15	0.054 12	0.001 62	498	56	362	14	340	10
PM001-38-TW1-96	147	192	0.77	0.054 19	0.001 75	0.413 45	0.015 12	0.055 61	0.001 51	389	72	351	11	349	9
PM001-38-TW1-28	78	114	0.68	0.052 52	0.002 43	0.408 67	0.022 12	0.056 41	0.001 46	309	106	348	16	354	9
PM001-38-TW1-107	162	202	0.80	0.054 93	0.001 57	0.432 57	0.018 95	0.056 90	0.001 69	409	65	365	13	357	10
PM001-38-TW1-68	93	161	0.58	0.053 69	0.001 38	0.430 30	0.017 08	0.057 96	0.001 53	367	57	363	12	363	9
PM001-38-TW1-99	119	260	0.46	0.053 50	0.001 32	0.428 73	0.020 56	0.058 03	0.002 05	350	53	362	15	364	12
PM001-38-TW1-79	275	544	0.51	0.053 55	0.002 34	0.429 71	0.014 52	0.058 41	0.001 35	354	103	363	10	366	8
PM001-38-TW1-86	182	411	0.44	0.052 95	0.000 96	0.427 15	0.011 43	0.058 50	0.001 26	328	43	361	8	366	8

续表 1

Continued table 1

测点号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$
PM001-38-TW1-94	103	159	0.65	0.052 59	0.001 09	0.426 60	0.013 64	0.058 79	0.001 35	322	51	361	10	368	8
PM001-38-TW1-66	314	366	0.86	0.058 71	0.001 43	0.498 51	0.016 33	0.061 60	0.001 36	567	54	411	11	385	8
PM001-38-TW1-27	99	241	0.41	0.060 41	0.002 29	0.520 92	0.020 11	0.062 72	0.002 09	618	49	426	13	392	13
PM001-38-TW1-47	158	289	0.55	0.052 89	0.001 10	0.478 11	0.016 64	0.065 78	0.002 08	324	48	397	11	411	13
PM001-38-TW1-89	84	258	0.33	0.056 57	0.001 44	0.514 26	0.018 60	0.065 80	0.001 61	476	57	421	12	411	10
PM001-38-TW1-119	112	359	0.31	0.056 70	0.001 26	0.533 07	0.018 38	0.068 06	0.001 41	480	48	434	12	424	9
PM001-38-TW1-17	138	291	0.47	0.058 05	0.001 76	0.549 29	0.020 65	0.068 54	0.001 69	532	67	445	14	427	10
PM001-38-TW1-120	302	729	0.41	0.056 17	0.000 98	0.546 30	0.016 02	0.070 60	0.001 65	457	39	443	11	440	10
PM001-38-TW1-58	129	241	0.54	0.060 65	0.001 73	0.609 94	0.029 96	0.072 67	0.002 60	628	61	484	19	452	16
PM001-38-TW1-26	113	303	0.37	0.057 17	0.000 98	0.581 92	0.017 00	0.073 76	0.001 72	498	69	466	11	459	10
PM001-38-TW1-117	191	498	0.38	0.058 30	0.001 03	0.595 94	0.016 35	0.074 36	0.001 88	543	44	475	10	462	11
PM001-38-TW1-07	338	764	0.44	0.059 79	0.001 64	0.619 60	0.019 56	0.075 39	0.001 66	594	27	490	12	469	10
PM001-38-TW1-06	155	352	0.44	0.057 23	0.001 58	0.593 98	0.017 34	0.075 91	0.001 94	502	61	473	11	472	12
PM001-38-TW1-118	151	334	0.45	0.061 38	0.001 65	0.645 58	0.020 87	0.076 32	0.001 43	654	57	506	13	474	9
PM001-38-TW1-23	74	169	0.44	0.058 29	0.001 80	0.613 70	0.019 74	0.077 37	0.002 36	539	67	486	12	480	14
PM001-38-TW1-76	254	510	0.50	0.059 79	0.001 10	0.660 15	0.021 96	0.079 79	0.001 93	594	41	515	13	495	12
PM001-38-TW1-21	129	200	0.65	0.056 34	0.001 43	0.628 24	0.023 14	0.080 58	0.002 08	465	56	495	14	500	12
PM001-38-TW1-57	206	210	0.98	0.057 40	0.001 03	0.645 25	0.021 30	0.081 68	0.002 56	506	34	506	13	506	15
PM001-38-TW1-52	73	527	0.14	0.060 42	0.001 28	0.689 44	0.035 41	0.081 74	0.002 96	620	46	532	21	506	18
PM001-38-TW1-41	255	494	0.52	0.056 48	0.000 81	0.640 64	0.021 38	0.082 31	0.002 59	472	31	503	13	510	15
PM001-38-TW1-103	124	228	0.54	0.057 54	0.001 21	0.659 23	0.024 84	0.083 20	0.002 64	522	51	514	15	515	16
PM001-38-TW1-39	214	295	0.73	0.063 24	0.001 89	0.732 81	0.023 68	0.084 39	0.002 63	717	69	558	14	522	16
PM001-38-TW1-78	96	269	0.36	0.063 14	0.001 38	0.787 09	0.025 01	0.091 00	0.002 88	722	51	590	14	561	17
PM001-38-TW1-95	72	225	0.32	0.058 58	0.001 37	0.747 90	0.031 76	0.092 30	0.002 74	550	56	567	18	569	16
PM001-38-TW1-81	118	539	0.22	0.061 76	0.004 00	0.805 42	0.083 88	0.094 45	0.007 77	665	139	600	47	582	46
PM001-38-TW1-91	100	204	0.49	0.071 46	0.001 79	1.256 27	0.038 00	0.127 72	0.003 07	972	50	826	17	775	18
PM001-38-TW1-62	113	124	0.91	0.067 30	0.001 48	1.190 05	0.038 38	0.128 76	0.003 86	856	-154	796	18	781	22
PM001-38-TW1-40	154	274	0.56	0.069 00	0.001 03	1.343 66	0.043 88	0.140 79	0.003 58	898	26	865	19	849	20
PM001-38-TW1-35	58	279	0.21	0.073 29	0.001 32	1.513 59	0.037 00	0.150 16	0.003 20	1 022	36	936	15	902	18
PM001-38-TW1-31	182	444	0.41	0.070 45	0.001 29	1.529 97	0.047 05	0.157 87	0.003 90	943	43	942	19	945	22
PM001-38-TW1-05	53	89	0.60	0.095 71	0.001 98	2.966 63	0.072 16	0.224 64	0.004 14	1543	39	1 399	18	1 306	22
PM001-38-TW1-110	237	436	0.54	0.112 31	0.001 44	4.928 27	0.123 99	0.318 95	0.007 88	1 839	24	1 807	21	1 785	39
PM001-38-TW1-22	77	188	0.41	0.108 57	0.001 38	4.807 79	0.136 39	0.321 30	0.009 06	1 776	22	1 786	24	1 796	44
PM001-38-TW1-19	40	69	0.58	0.109 17	0.002 22	4.899 33	0.201 21	0.326 08	0.011 93	1 787	43	1 802	35	1 819	58
PM001-135-TW1-17	145	205	0.71	0.049 21	0.003 80	0.245 26	0.020 05	0.035 78	0.000 82	167	161	223	16	227	5
PM001-135-TW1-71	93	172	0.54	0.052 76	0.005 41	0.277 30	0.029 54	0.038 32	0.001 19	317	268	249	23	242	7
PM001-135-TW1-72	103	183	0.56	0.051 99	0.004 11	0.275 23	0.021 41	0.038 49	0.001 04	283	179	247	17	243	6



续表 1

Continued table 1

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$
PM001-135-TW1-81	247	244	1.01	0.050 47	0.003 87	0.269 71	0.020 85	0.038 50	0.001 02	217	180	242	17	244	6
PM001-135-TW1-110	57	108	0.53	0.054 84	0.012 83	0.275 24	0.053 10	0.038 51	0.003 05	406	452	247	42	244	19
PM001-135-TW1-43	197	334	0.59	0.051 13	0.002 57	0.268 88	0.010 98	0.038 52	0.001 33	256	119	242	9	244	8
PM001-135-TW1-40	173	258	0.67	0.051 04	0.004 08	0.266 19	0.015 97	0.038 53	0.001 89	243	181	240	13	244	12
PM001-135-TW1-94	454	292	1.55	0.052 71	0.003 96	0.278 54	0.021 21	0.038 63	0.000 90	317	140	249	17	244	6
PM001-135-TW1-102	285	401	0.71	0.051 96	0.003 38	0.276 01	0.018 44	0.038 66	0.001 18	283	153	247	15	245	7
PM001-135-TW1-85	67	134	0.5	0.049 96	0.004 64	0.269 27	0.026 59	0.038 70	0.001 04	195	200	242	21	245	6
PM001-135-TW1-78	170	539	0.32	0.051 46	0.002 26	0.272 76	0.011 08	0.038 74	0.001 10	261	100	245	9	245	7
PM001-135-TW1-44	149	237	0.63	0.051 56	0.003 96	0.276 38	0.021 65	0.038 77	0.001 36	265	176	248	17	245	8
PM001-135-TW1-23	59	120	0.49	0.051 37	0.005 27	0.277 67	0.029 49	0.038 80	0.000 95	257	40	249	23	245	6
PM001-135-TW1-76	149	358	0.42	0.051 93	0.002 49	0.277 34	0.011 04	0.038 81	0.001 08	283	109	249	9	245	7
PM001-135-TW1-11	86	207	0.42	0.050 99	0.005 22	0.277 42	0.029 21	0.038 87	0.001 14	239	222	249	23	246	7
PM001-135-TW1-37	214	240	0.89	0.052 71	0.003 61	0.278 28	0.018 54	0.038 88	0.000 86	317	156	249	15	246	5
PM001-135-TW1-13	108	206	0.52	0.051 62	0.005 11	0.280 09	0.031 82	0.038 96	0.001 56	333	223	251	25	246	10
PM001-135-TW1-53	107	181	0.59	0.050 85	0.004 64	0.271 05	0.023 57	0.038 98	0.001 03	235	211	244	19	247	6
PM001-135-TW1-14	508	1 448	0.35	0.059 71	0.002 62	0.319 93	0.012 51	0.038 98	0.001 50	594	96	282	10	247	9
PM001-135-TW1-118	214	363	0.59	0.050 76	0.003 32	0.274 00	0.018 88	0.039 02	0.001 16	232	149	246	15	247	7
PM001-135-TW1-41	149	301	0.5	0.050 66	0.002 32	0.274 56	0.013 98	0.039 07	0.000 95	233	106	246	11	247	6
PM001-135-TW1-67	91	186	0.49	0.050 52	0.003 93	0.273 19	0.021 79	0.039 07	0.001 05	220	181	245	17	247	7
PM001-135-TW1-64	125	208	0.6	0.051 88	0.003 77	0.280 09	0.020 67	0.039 11	0.000 87	280	167	251	16	247	5
PM001-135-TW1-08	107	220	0.49	0.051 09	0.002 81	0.277 22	0.015 82	0.039 12	0.000 89	256	123	248	13	247	6
PM001-135-TW1-32	485	405	1.2	0.051 32	0.002 86	0.278 18	0.017 08	0.039 12	0.001 25	254	134	249	14	247	8
PM001-135-TW1-69	195	367	0.53	0.051 75	0.002 92	0.281 30	0.017 47	0.039 17	0.000 90	276	130	252	14	248	6
PM001-135-TW1-116	137	158	0.87	0.051 12	0.005 87	0.277 14	0.034 99	0.039 18	0.002 09	256	244	248	28	248	13
PM001-135-TW1-105	73	143	0.51	0.052 83	0.004 93	0.281 70	0.023 76	0.039 22	0.000 92	320	213	252	19	248	6
PM001-135-TW1-113	277	524	0.53	0.052 34	0.002 88	0.284 41	0.017 87	0.039 32	0.001 25	302	126	254	14	249	8
PM001-135-TW1-16	75	227	0.33	0.053 55	0.013 58	0.282 82	0.062 86	0.039 35	0.001 42	354	489	253	50	249	9
PM001-135-TW1-88	97	224	0.43	0.051 96	0.003 15	0.283 63	0.024 55	0.039 39	0.002 68	283	139	254	19	249	17
PM001-135-TW1-107	107	235	0.46	0.050 93	0.004 18	0.278 41	0.023 15	0.039 49	0.001 35	239	191	249	18	250	8
PM001-135-TW1-31	517	1 012	0.51	0.058 09	0.005 13	0.322 23	0.040 22	0.039 52	0.002 29	532	194	284	31	250	14
PM001-135-TW1-55	154	288	0.53	0.050 61	0.002 77	0.278 32	0.016 43	0.039 53	0.001 12	233	123	249	13	250	7
PM001-135-TW1-09	151	259	0.58	0.052 28	0.005 29	0.287 86	0.030 89	0.039 57	0.001 47	298	233	257	24	250	9
PM001-135-TW1-103	197	364	0.54	0.052 02	0.002 35	0.285 38	0.014 55	0.039 64	0.000 98	287	99	255	11	251	6
PM001-135-TW1-83	193	418	0.46	0.051 49	0.002 75	0.281 70	0.015 48	0.039 65	0.001 10	261	94	252	12	251	7
PM001-135-TW1-95	171	286	0.60	0.053 26	0.003 76	0.291 64	0.020 33	0.039 73	0.000 89	339	164	260	16	251	6
PM001-135-TW1-111	391	786	0.50	0.051 89	0.002 21	0.282 33	0.010 48	0.039 74	0.000 89	280	94	253	8	251	6

续表 1  
Continued table 1

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值								年龄/Ma							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$				
PM001-135-TW1-48	102	278	0.37	0.052 12	0.002 93	0.286 94	0.016 31	0.039 80	0.001 01	300	123	256	13	252	6				
PM001-135-TW1-50	291	400	0.73	0.051 69	0.002 77	0.285 14	0.014 75	0.039 81	0.000 92	272	124	255	12	252	6				
PM001-135-TW1-96	261	349	0.75	0.050 35	0.003 40	0.276 60	0.019 59	0.039 82	0.001 13	209	153	248	16	252	7				
PM001-135-TW1-61	82	167	0.49	0.050 82	0.004 14	0.280 30	0.021 53	0.039 85	0.001 01	232	189	251	17	252	6				
PM001-135-TW1-63	731	894	0.82	0.051 23	0.001 76	0.282 41	0.009 93	0.039 87	0.000 90	250	80	253	8	252	6				
PM001-135-TW1-117	118	181	0.65	0.051 02	0.005 92	0.280 45	0.033 72	0.039 91	0.001 21	243	257	251	27	252	8				
PM001-135-TW1-114	564	625	0.90	0.051 55	0.002 18	0.287 31	0.016 24	0.039 98	0.001 07	265	101	256	13	253	7				
PM001-135-TW1-65	212	301	0.70	0.052 32	0.002 22	0.288 69	0.012 61	0.040 08	0.000 94	298	98	258	10	253	6				
PM001-135-TW1-84	157	211	0.74	0.051 59	0.003 62	0.286 90	0.021 27	0.040 12	0.001 15	333	161	256	17	254	7				
PM001-135-TW1-106	251	540	0.46	0.051 42	0.002 81	0.284 34	0.016 79	0.040 12	0.001 17	261	131	254	13	254	7				
PM001-135-TW1-34	1 295	1 092	1.19	0.051 22	0.001 58	0.282 79	0.009 45	0.040 17	0.001 04	250	66	253	7	254	6				
PM001-135-TW1-77	163	246	0.66	0.051 63	0.008 99	0.281 89	0.037 52	0.040 23	0.002 33	333	300	252	30	254	14				
PM001-135-TW1-21	258	356	0.72	0.051 66	0.002 94	0.283 08	0.015 04	0.040 23	0.001 11	333	97	253	12	254	7				
PM001-135-TW1-80	83	117	0.71	0.051 85	0.004 11	0.286 04	0.021 81	0.040 26	0.001 12	280	181	255	17	254	7				
PM001-135-TW1-58	65	102	0.64	0.052 31	0.005 10	0.285 76	0.027 11	0.040 26	0.000 91	298	222	255	21	254	6				
PM001-135-TW1-93	203	527	0.39	0.051 53	0.002 92	0.289 01	0.020 05	0.040 26	0.001 45	265	131	258	16	254	9				
PM001-135-TW1-108	316	586	0.54	0.051 88	0.002 33	0.289 28	0.014 20	0.040 32	0.001 05	280	108	258	11	255	7				
PM001-135-TW1-04	626	1 058	0.59	0.052 14	0.002 03	0.289 47	0.011 37	0.040 35	0.001 06	300	95	258	9	255	7				
PM001-135-TW1-03	361	511	0.71	0.051 51	0.002 34	0.286 84	0.012 85	0.040 40	0.000 94	265	99	256	10	255	6				
PM001-135-TW1-120	186	505	0.37	0.051 83	0.002 44	0.291 70	0.015 87	0.040 44	0.001 05	280	109	260	12	256	6				
PM001-135-TW1-70	25	58	0.43	0.052 47	0.006 73	0.289 70	0.036 76	0.040 47	0.001 24	306	270	258	29	256	8				
PM001-135-TW1-05	328	469	0.70	0.050 68	0.002 15	0.285 98	0.014 71	0.040 48	0.001 06	233	98	255	12	256	7				
PM001-135-TW1-101	455	576	0.79	0.051 58	0.001 76	0.289 47	0.011 26	0.040 49	0.000 79	265	78	258	9	256	5				
PM001-135-TW1-86	96	163	0.59	0.051 37	0.009 83	0.285 25	0.051 50	0.040 58	0.001 33	257	398	255	41	256	8				
PM001-135-TW1-29	308	457	0.67	0.051 75	0.001 56	0.290 16	0.009 60	0.040 58	0.000 91	276	66	259	8	256	6				
PM001-135-TW1-57	372	563	0.66	0.049 31	0.002 27	0.278 51	0.014 48	0.040 62	0.001 08	161	142	249	11	257	7				
PM001-135-TW1-104	150	292	0.51	0.052 84	0.003 18	0.295 79	0.018 22	0.040 62	0.000 92	320	132	263	14	257	6				
PM001-135-TW1-46	246	302	0.81	0.050 26	0.005 99	0.286 39	0.036 19	0.040 65	0.000 98	206	256	256	29	257	6				
PM001-135-TW1-59	248	398	0.62	0.051 41	0.002 31	0.286 42	0.011 13	0.040 66	0.001 00	257	106	256	9	257	6				
PM001-135-TW1-99	146	282	0.52	0.049 71	0.002 53	0.281 85	0.016 18	0.040 67	0.000 89	189	119	252	13	257	6				
PM001-135-TW1-87	470	905	0.52	0.052 26	0.001 58	0.293 93	0.008 48	0.040 74	0.000 75	298	66	262	7	257	5				
PM001-135-TW1-39	571	1 164	0.49	0.050 78	0.001 37	0.285 77	0.009 80	0.040 75	0.001 03	232	66	255	8	257	6				
PM001-135-TW1-66	378	607	0.62	0.052 38	0.004 46	0.295 64	0.025 45	0.040 85	0.001 48	302	196	263	20	258	9				
PM001-135-TW1-24	47	132	0.36	0.050 18	0.004 86	0.285 80	0.027 66	0.040 87	0.000 74	211	202	255	22	258	5				
PM001-135-TW1-20	249	487	0.51	0.050 23	0.002 01	0.285 11	0.012 73	0.040 88	0.000 95	206	93	255	10	258	6				
PM001-135-TW1-18	89	170	0.52	0.051 98	0.003 56	0.348 23	0.022 89	0.048 60	0.001 20	283	157	303	17	306	7				

续表 1

Continued table 1

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$
PM001-135-TW1-62	178	286	0.62	0.053 93	0.003 12	0.362 06	0.017 63	0.049 45	0.001 45	369	131	314	13	311	9
PM001-135-TW1-92	344	512	0.67	0.053 18	0.001 85	0.366 06	0.012 70	0.050 01	0.001 16	345	78	317	9	315	7
PM001-135-TW1-60	157	128	1.23	0.053 89	0.004 46	0.377 42	0.030 63	0.050 95	0.001 09	365	187	325	23	320	7
PM001-135-TW1-112	150	198	0.76	0.053 81	0.004 56	0.397 58	0.035 99	0.053 49	0.001 54	361	188	340	26	336	9
PM001-135-TW1-01	184	208	0.88	0.053 46	0.002 58	0.442 02	0.021 60	0.060 13	0.001 72	350	109	372	15	376	10
PM001-135-TW1-02	224	201	1.11	0.054 84	0.002 99	0.466 29	0.023 36	0.062 22	0.001 59	406	122	389	16	389	10
PM001-135-TW1-74	119	155	0.77	0.053 58	0.002 87	0.491 18	0.027 74	0.065 96	0.001 44	354	125	406	19	412	9
PM001-135-TW1-47	130	147	0.88	0.055 20	0.004 44	0.543 03	0.044 81	0.070 80	0.001 91	420	180	440	29	441	11
PM001-135-TW1-54	97	144	0.67	0.055 11	0.002 65	0.545 92	0.026 53	0.071 58	0.001 77	417	107	442	17	446	11
PM001-135-TW1-79	60	167	0.36	0.056 22	0.002 28	0.571 61	0.026 95	0.073 30	0.001 96	461	91	459	17	456	12
PM001-135-TW1-12	190	290	0.66	0.056 39	0.002 10	0.575 47	0.022 89	0.073 70	0.001 65	478	81	462	15	458	10
PM001-135-TW1-115	240	277	0.87	0.057 04	0.001 99	0.585 17	0.022 33	0.074 39	0.001 84	494	78	468	14	463	11
PM001-135-TW1-25	301	437	0.69	0.055 63	0.001 70	0.577 97	0.020 51	0.075 20	0.002 01	439	69	463	13	467	12
PM001-135-TW1-90	144	230	0.63	0.050 93	0.002 58	0.534 11	0.028 21	0.075 61	0.001 72	239	114	435	19	470	10
PM001-135-TW1-26	55	102	0.54	0.057 05	0.003 41	0.600 51	0.036 63	0.076 33	0.001 64	494	127	478	23	474	10
PM001-135-TW1-27	293	273	1.07	0.056 11	0.002 99	0.593 50	0.034 23	0.076 72	0.002 72	457	114	473	22	477	16
PM001-135-TW1-49	214	382	0.56	0.060 34	0.002 18	0.648 55	0.022 40	0.077 75	0.001 86	617	50	508	14	483	11
PM001-135-TW1-56	197	417	0.47	0.056 40	0.004 22	0.617 77	0.042 43	0.079 23	0.002 68	478	163	488	27	492	16
PM001-135-TW1-51	42	172	0.24	0.057 28	0.003 29	0.640 25	0.032 20	0.081 38	0.002 53	502	132	502	20	504	15
PM001-135-TW1-52	88	257	0.34	0.057 29	0.002 32	0.650 18	0.028 28	0.081 76	0.002 23	502	91	509	17	507	13
PM001-135-TW1-07	11	257	0.04	0.063 75	0.002 16	1.037 94	0.038 21	0.117 85	0.002 96	733	71	723	19	718	17
PM001-135-TW1-15	374	237	1.58	0.063 89	0.001 84	1.068 75	0.039 71	0.120 84	0.003 67	739	61	738	19	735	21
PM001-135-TW1-38	102	160	0.64	0.064 83	0.002 77	1.100 63	0.057 53	0.122 75	0.004 03	769	91	754	28	746	23
PM001-135-TW1-98	144	471	0.31	0.068 54	0.001 89	1.282 18	0.037 75	0.135 65	0.002 82	885	57	838	17	820	16
PM001-135-TW1-36	50	485	0.10	0.067 43	0.001 62	1.284 18	0.030 81	0.138 04	0.002 69	850	-149	839	14	834	15
PM001-135-TW1-82	93	376	0.25	0.073 88	0.002 21	1.414 70	0.048 20	0.138 69	0.004 10	1 039	61	895	20	837	23
PM001-135-TW1-73	179	291	0.62	0.069 94	0.001 91	1.379 32	0.037 31	0.143 09	0.003 34	928	53	880	16	862	19
PM001-135-TW1-75	63	405	0.16	0.071 31	0.001 60	1.452 35	0.041 43	0.146 81	0.003 23	966	46	911	17	883	18
PM001-135-TW1-89	45	109	0.41	0.070 06	0.002 60	1.477 68	0.055 04	0.153 35	0.003 96	931	76	921	23	920	22
PM001-135-TW1-109	74	89	0.83	0.074 42	0.003 50	1.773 85	0.071 35	0.174 80	0.004 38	1 054	96	1 036	26	1 038	24
PM001-135-TW1-30	70	231	0.30	0.080 21	0.002 31	2.102 81	0.086 32	0.188 65	0.005 83	1 267	57	1 150	28	1 114	32
PM001-135-TW1-28	97	378	0.26	0.083 10	0.002 03	2.192 47	0.064 40	0.190 46	0.004 08	1 272	42	1 179	20	1 124	22
PM001-135-TW1-119	135	649	0.21	0.084 82	0.001 85	2.264 07	0.072 49	0.193 15	0.005 57	1 322	38	1 201	23	1 138	30
PM001-135-TW1-68	350	420	0.83	0.085 67	0.002 28	2.862 18	0.083 72	0.242 17	0.005 82	1 331	51	1 372	22	1 398	30
PM001-135-TW1-10	117	107	1.09	0.093 67	0.003 16	3.394 09	0.156 90	0.260 20	0.006 94	1 502	64	1 503	36	1 491	35

注: 测试单位为北京科荃测试技术有限公司; 测试时间为 2017 年 10 月。

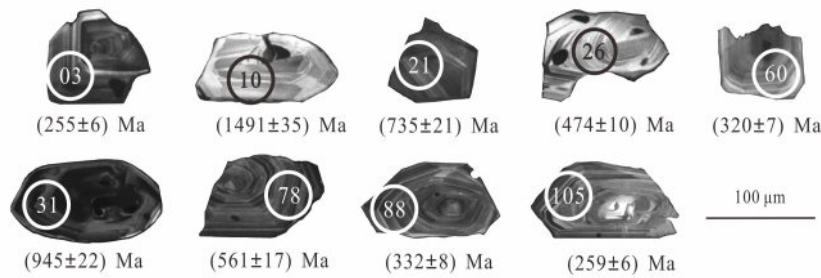


图 4 大口钦地区杨家沟组岩屑杂砂岩部分碎屑锆石阴极发光图像

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of detrital zircons of lithic sandstone samples of Yangjiagou Formation in Dakouqin area

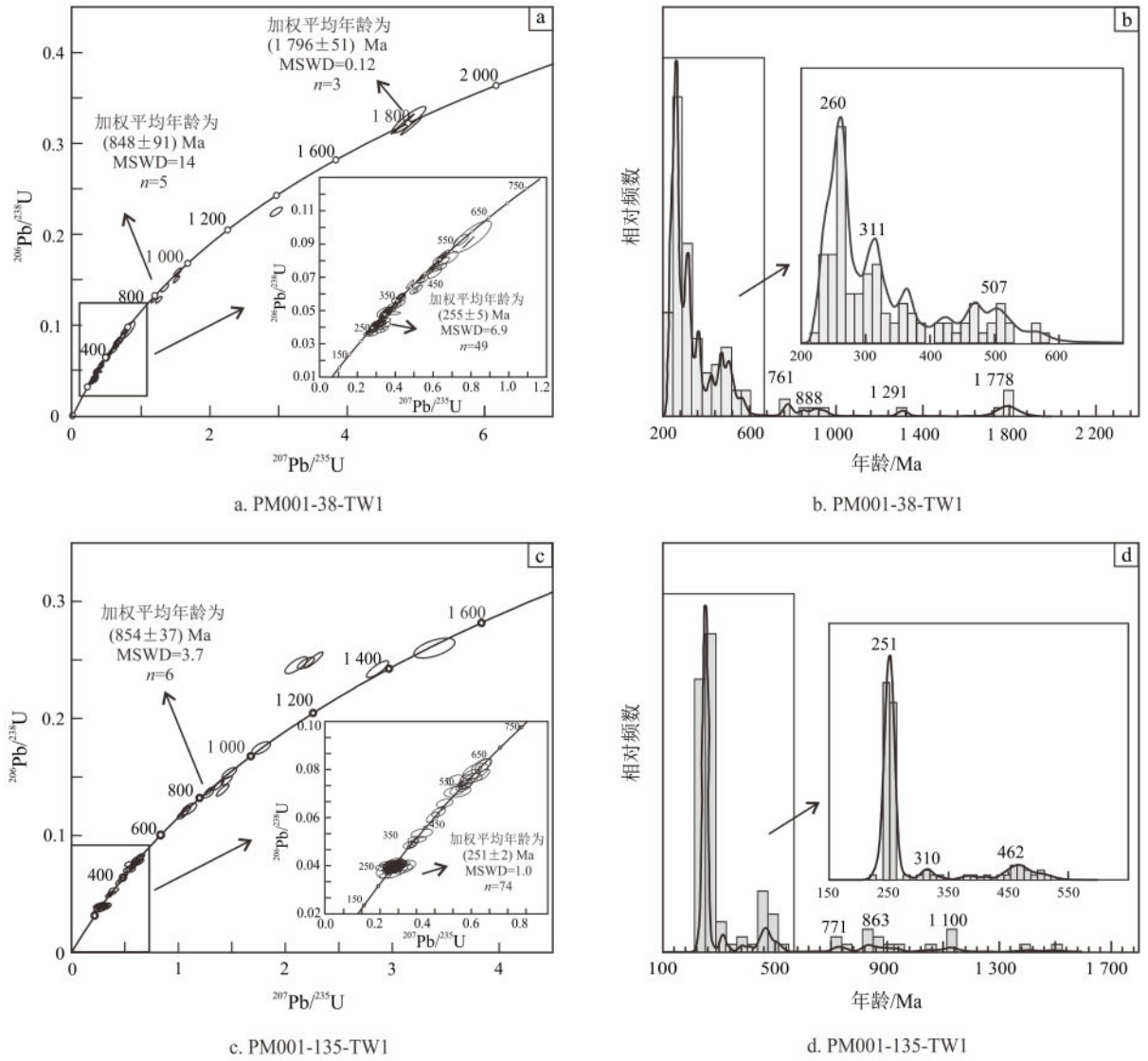


图 5 大口钦地区杨家沟组碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图 (a、c) 和年龄分布频率图 (b、d)

Fig. 5 U-Pb age concordia diagrams (a, c) and age distribution frequency diagrams (b, d) of detrital zircons from Yangjiagou Formation in Dakouqin area

指示样品 PM001-38-TW1 岩屑杂砂岩沉积时代应晚于 255 Ma。

(2) 样品 PM001-135-TW1 (岩屑杂砂岩)

该样品共测试了 120 个点, 对 LA-ICP-MS 测试数据处理后, 剔除谐和度低于 85% 以及元素含量曲线振荡大的点, 共获得有效数据 110 个, 分析结果见表 1。该样品中的碎屑锆石 CL 图像 (图 4) 显示锆石颗粒粒径分布于 70 ~ 200 μm 之间, 以半自形-他形为主, 大部分锆石保留岩浆振荡生长环带, 少部分具有扇形或面状分带结构特征。Th/U 比值为 0.04 ~ 1.58, 只有一个测点的 Th/U 比值 < 0.10, 其他均 > 0.10, 表明其为岩浆成因。U-Pb 年龄集中分布在 1 491 ~ 227 Ma 之间 (图 5c、d), 表面年龄按分布频率可分为 4 组: ① 258 ~ 227 Ma; ② 412 ~ 306 Ma; ③ 507 ~ 440 Ma; ④ 920 ~ 718 Ma。对应加权平均年龄值分别为: (251 ± 2) Ma (MSWD = 1.0, n = 74); (317 ± 13) Ma (MSWD = 1.8, n = 5); (446 ± 11) Ma (MSWD = 2.6, n = 13); (854 ± 37) Ma (MSWD = 3.7, n = 6), 其中最小年龄组的加权平均年龄为 (251 ± 2) Ma, 指示样品 PM001-135-TW1 岩屑杂砂岩沉积时代应晚于 251 Ma。

3.2 岩石地球化学特征

3.2.1 主量元素

杨家沟组样品分析结果显示 (表 2),  $w(\text{SiO}_2)$  介于 65.13% ~ 70.73% 之间 (均值 67.23%),  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 14.75% ~ 17.29% (均值 16.20%),  $w(\text{K}_2\text{O})$  为 2.43% ~ 3.87% (均值 3.25%),  $w(\text{Na}_2\text{O})$  为 1.59% ~ 3.26% (均值 3.25%),  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值为 0.75 ~ 2.34 (均值 1.35),  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  比值为 0.43 ~ 1.34 (均值 0.82), 样品化学成分接近上地壳平均值 (UCC), 结合野外地质特征及镜下特征显示, 其主量元素含量与典型杂砂岩较一致, 与裂谷砂岩或长石砂岩明显不同<sup>[29]</sup>。在  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)-\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  图解中 (图 6a), 样品大多数落入杂砂岩区域内, 仅两个样品落入岩屑砂岩区域内, 与野外及镜下观察一致。由主量元素计算出的化学蚀变指数 (CIA) 可以反映源区的风化程度, 成分分异指数 (ICV) 则可以反映碎屑岩的成分成熟度<sup>[30]</sup>, 在 CIA-ICV 图解中 (图 6b), 样品多数落入成熟中等风化区域内, 仅 2 个样品落入成熟弱风化区域内。综上分析, 杨家沟组样品属于成熟的岩屑杂砂岩, 并且源区可能经历了中等风化作用。

表 2 大口钦地区杨家沟组陆源碎屑岩主量和微量元素分析结果

Table 2 Analysis results for major and trace elements of terrestrial clastic rocks from Yangjiagou Formation in Dakouqin area

样品	PM001- GS1	PM001- GS2	PM001- GS3	PM001- GS4	PM001- GS5	PM001- GS6	PM001- GS7	PM001- GS8	PM001- GS9	PM001- GS10	PM001- GS11	PM001- GS12	PM001- GS13
SiO <sub>2</sub>	66.71	66.04	66.95	70.73	65.13	66.81	66.14	66.28	65.88	66.23	69.33	70.00	67.75
TiO <sub>2</sub>	0.74	0.76	0.74	0.71	0.71	0.74	0.71	0.59	0.77	0.73	0.67	0.54	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.64	16.57	16.49	14.99	17.29	16.50	16.62	16.98	16.94	16.62	15.12	15.06	14.75
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.89	5.29	4.98	4.05	5.24	4.41	5.01	4.71	4.70	5.15	3.46	4.54	3.88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.47	2.11	1.80	1.79	3.56	2.89	3.10	2.40	2.42	2.44	1.12	2.94	0.61
FeO	2.18	2.86	2.86	2.03	1.51	1.37	1.72	2.08	2.05	2.44	2.11	1.44	2.94
MnO	0.07	0.07	0.07	0.07	0.03	0.07	0.06	0.06	0.04	0.07	0.08	0.06	0.08
MgO	1.44	1.47	1.43	1.13	1.23	1.36	1.39	1.25	1.43	1.35	0.92	1.02	1.18
CaO	0.35	0.31	0.31	0.38	0.27	0.40	0.40	0.39	0.34	0.43	1.41	0.45	1.19
Na <sub>2</sub> O	2.07	2.17	2.32	3.26	2.85	2.32	1.59	2.80	1.82	2.89	3.20	3.08	3.20
K <sub>2</sub> O	3.40	3.35	3.33	2.43	3.03	3.42	3.72	3.55	3.87	3.31	3.02	2.63	3.23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.15	0.15	0.15	0.13	0.14	0.15	0.17	0.15	0.19	0.14	0.14	0.13
LOI	3.76	3.85	3.73	2.44	4.38	4.05	4.45	3.33	4.41	3.43	2.95	2.85	3.98
Total	99.82	99.55	99.99	99.93	99.94	99.91	99.88	99.70	99.96	99.95	99.90	100.04	99.48
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	0.61	0.65	0.70	1.34	0.94	0.68	0.43	0.79	0.47	0.87	1.06	1.17	0.99
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.64	1.54	1.44	0.75	1.06	1.47	2.34	1.27	2.13	1.15	0.94	0.85	1.01



续表 2  
Continued table 2

样品	PM001- GS1	PM001- GS2	PM001- GS3	PM001- GS4	PM001- GS5	PM001- GS6	PM001- GS7	PM001- GS8	PM001- GS9	PM001- GS10	PM001- GS11	PM001- GS12	PM001- GS13
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.01	3.99	4.06	4.72	3.77	4.05	3.98	3.90	3.89	3.98	4.59	4.65	4.59
ICV	0.63	0.62	0.61	0.65	0.68	0.68	0.66	0.65	0.63	0.68	0.69	0.71	0.68
CIV	74.09	73.97	73.45	71.18	73.76	72.88	74.43	71.59	73.75	71.48	66.46	70.97	65.94
F1	-1.64	-1.37	-1.46	-0.95	0.19	-1.83	-2.03	-0.80	-2.35	-0.72	-1.05	-0.36	-1.63
F2	-0.18	-0.25	0.05	0.64	0.59	0.44	-0.40	1.35	0.21	0.97	2.22	0.62	1.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	22.49	21.80	22.28	21.11	24.35	22.30	23.41	28.78	22.00	22.77	22.57	27.89	24.18
Cr	47.05	46.78	50.58	42.10	46.50	54.70	44.60	29.39	50.12	42.55	39.91	31.23	36.09
Ga	24.07	23.87	22.94	22.18	24.58	23.65	22.36	23.32	23.58	21.46	20.53	21.03	20.94
Rb	88.79	100.14	103.45	62.48	97.67	111.38	112.19	95.09	88.31	96.89	81.57	94.98	92.09
Y	32.63	31.95	32.09	23.76	35.81	33.77	35.62	32.28	31.96	28.21	24.75	29.00	25.40
Sr	64.23	80.12	70.74	68.37	74.33	72.60	68.34	87.47	54.81	129.56	138.87	137.59	151.70
Zr	266.64	247.08	253.16	308.27	288.98	263.53	236.14	245.73	241.53	269.11	279.95	261.67	266.03
Nb	13.10	13.15	13.52	11.65	12.50	14.28	13.10	12.01	13.46	12.49	8.80	11.59	8.12
Ba	574.90	534.70	575.50	328.80	680.60	708.30	615.30	564.60	543.90	637.10	542.40	505.40	541.80
La	32.01	33.92	33.24	28.67	43.30	37.75	40.96	34.28	38.20	35.96	40.55	33.30	38.86
Ce	98.32	82.19	91.85	68.28	86.12	77.54	82.04	74.85	77.65	70.42	77.82	65.30	74.27
Pr	8.36	8.67	8.64	7.30	10.74	9.43	10.02	8.65	9.31	8.63	9.25	8.05	9.10
Nd	31.89	33.82	34.00	27.26	41.26	36.77	39.70	34.22	35.97	32.78	35.28	31.12	33.51
Sm	6.34	6.34	6.64	5.23	7.87	6.74	7.48	6.57	6.77	6.19	6.23	5.94	6.08
Eu	1.30	1.34	1.37	1.09	1.37	1.28	1.46	1.35	1.27	1.40	1.33	1.17	1.19
Gd	5.68	5.59	5.96	4.54	6.76	6.03	6.86	6.08	6.22	5.73	5.36	5.40	5.51
Tb	1.01	1.02	1.05	0.80	1.11	1.06	1.18	1.07	1.03	0.92	0.86	0.94	0.87
Dy	6.12	5.97	6.05	4.39	6.50	6.04	6.75	6.00	6.03	5.38	4.82	5.33	5.00
Ho	1.25	1.20	1.19	0.92	1.35	1.22	1.32	1.24	1.18	1.07	0.97	1.05	0.96
Er	3.69	3.49	3.42	2.64	3.89	3.70	3.79	3.54	3.42	3.15	2.80	3.08	2.69
Tm	0.60	0.57	0.57	0.43	0.62	0.59	0.59	0.56	0.54	0.52	0.45	0.49	0.44
Yb	3.95	3.64	3.80	3.03	4.18	3.92	4.07	3.84	3.45	3.39	3.02	3.42	3.05
Lu	0.62	0.56	0.58	0.46	0.66	0.61	0.63	0.59	0.56	0.54	0.48	0.52	0.48
Hf	5.36	5.99	6.60	5.61	5.22	5.63	4.39	3.75	5.39	7.39	5.54	4.96	4.31
Ta	1.00	0.97	0.99	0.85	0.98	1.06	0.98	0.97	0.99	0.93	0.64	1.00	0.64
Th	8.40	9.01	9.18	5.61	9.96	10.33	9.74	9.96	7.45	8.99	9.15	11.70	10.28
U	2.49	2.26	2.34	1.29	3.06	2.95	2.43	3.07	2.73	2.59	2.30	3.44	2.41
ΣREE	201.15	188.32	198.36	155.04	215.73	192.69	206.86	182.86	191.62	176.09	189.21	165.11	182.01
LREE	178.22	166.28	175.74	137.82	190.65	169.50	181.67	159.94	169.18	155.38	170.45	144.88	163.01
HREE	22.93	22.03	22.63	17.22	25.08	23.18	25.19	22.92	22.43	20.70	18.75	20.23	19.01
LREE/HREE	7.77	7.55	7.77	8.00	7.60	7.31	7.21	6.98	7.54	7.51	9.09	7.16	8.58
Eu/Eu *	0.65	0.67	0.65	0.67	0.56	0.60	0.61	0.64	0.59	0.70	0.69	0.62	0.62
(La/Yb) <sub>N</sub>	5.47	6.28	5.89	6.37	6.98	6.49	6.79	6.01	7.46	7.14	9.06	6.56	8.59
(La/Sm) <sub>N</sub>	3.18	3.37	3.15	3.45	3.46	3.52	3.45	3.28	3.55	3.65	4.09	3.53	4.02
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.16	1.24	1.26	1.21	1.30	1.24	1.36	1.28	1.45	1.36	1.43	1.27	1.46

注：主量元素质量分数单位为%，微量元素质量分数单位为10<sup>-6</sup>，其中Mg<sup>#</sup> = (MgO / 40.31) / (MgO / 40.31 + TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> × 2 / 159.7)；主量和微量元素测试单位均为国土资源部长春矿产资源监督检测中心；测试时间为2016年12月。

3.2.2 稀土元素

样品稀土元素分析结果显示 (表 2), 相对富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素 (图 7a),  $LREE/HREE = 6.98 \sim 9.09$ , 表现为明显的右倾,  $Eu/Eu^* = 0.56 \sim 0.70$ , 均值 0.64, 与上地壳平均值 0.65 相当; 样品  $Ce/Ce^* = 0.92 \sim 1.42$ , 均值 1.04 ( $>1.00$ ), 同时  $Sr/Ba = 0.11 \sim 0.28$  ( $<1$ ), 说明

杨家沟组沉积环境为陆相淡水还原环境 (典型陆相环境); 在  $w(SiO_2) - (K_2O/Na_2O)$  图解中 (图 7b), 样品落入活动大陆边缘环境内, 在构造环境判别图解 (图 8) 中样品落入活动大陆边缘或岛弧范围内。由此得出, 杨家沟组原始物源形成于活动大陆边缘或岛弧背景下。

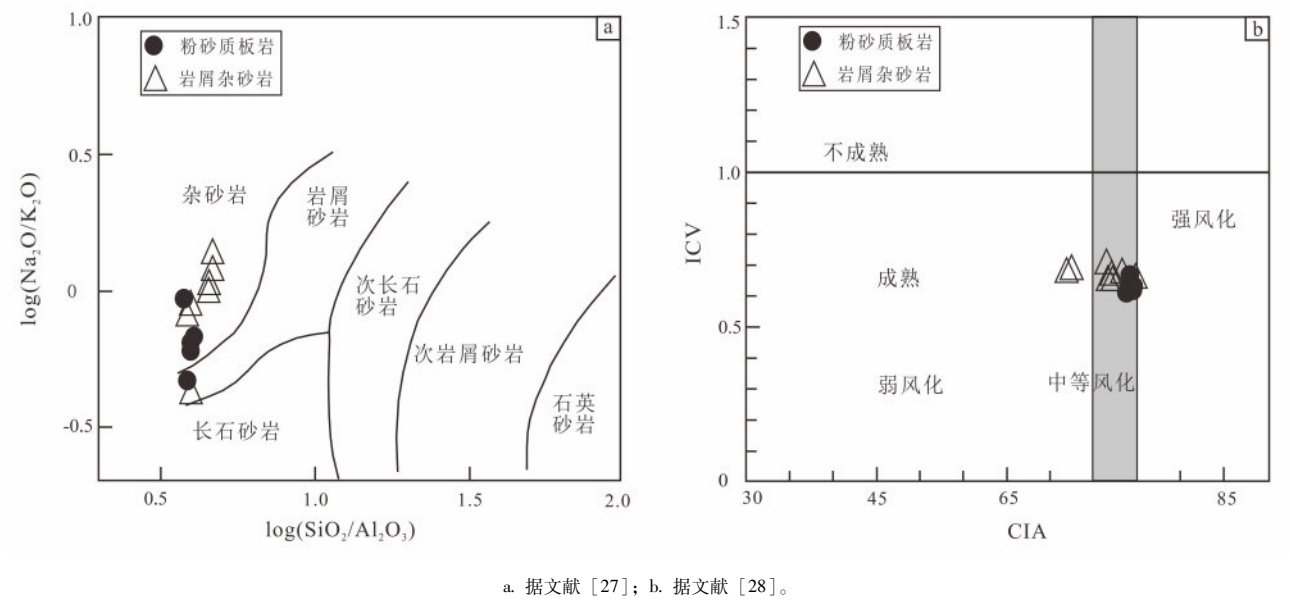


图 6 大口钦地区杨家沟组  $\log(SiO_2/Al_2O_3) - \log(Na_2O/K_2O)$  (a) 和 CIA-ICV (b) 图解

Fig. 6  $\log(SiO_2/Al_2O_3) - \log(Na_2O/K_2O)$  diagram (a) and CIA-ICV discrimination diagram (b) of Yangjiagou Formation in Dakouqin area

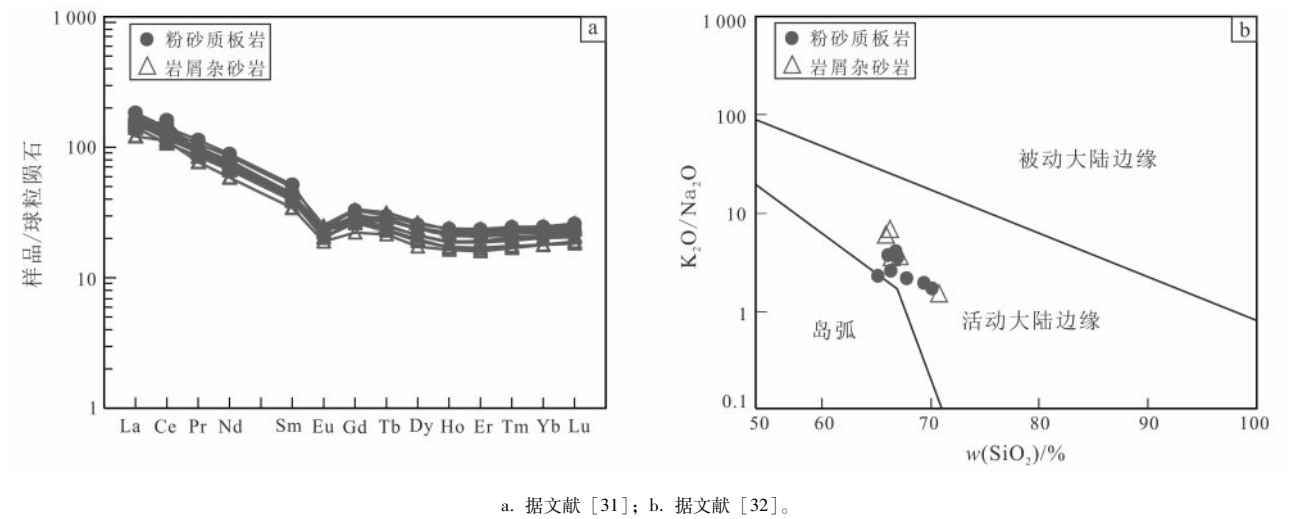
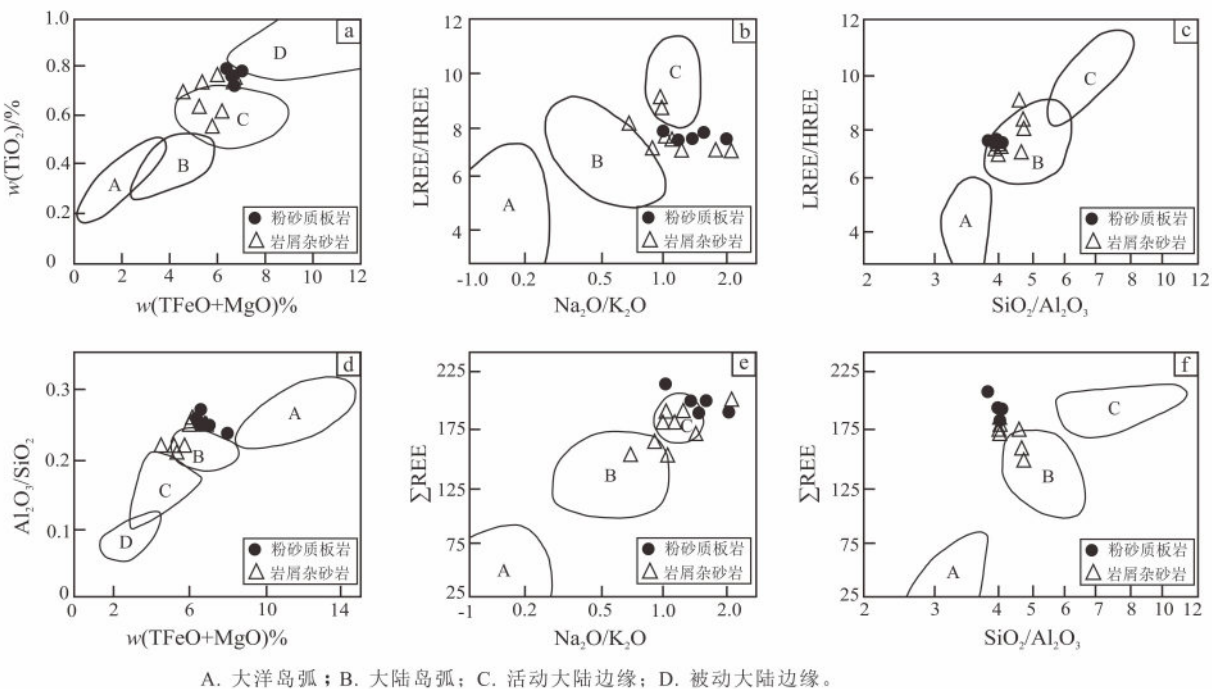


图 7 大口钦地区杨家沟组稀土元素球粒陨石标准化配分图 (a)  $w(SiO_2) - (K_2O/Na_2O)$  图解 (b)

Fig. 7 Chondrite normalized REE distribution patterns (a) and  $w(SiO_2) - (K_2O/Na_2O)$  diagram (b) of Yangjiagou Formation in Dakouqin area



A. 大洋岛弧；B. 大陆岛弧；C. 活动大陆边缘；D. 被动大陆边缘。

a.  $w(\text{Fe} + \text{MgO}) - w(\text{TiO}_2)$  图解；b.  $(\text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O}) - (\text{LREE} / \text{HREE})$  图解；c.  $(\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3) - (\text{LREE} / \text{HREE})$  图解；d.  $w(\text{FeO} + \text{MgO}) - (\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2)$  图解；e.  $(\text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O}) - \Sigma\text{REE}$  图解；f.  $(\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3) - \Sigma\text{REE}$  图解。

据文献 [33]。

图 8 大口钦地区杨家沟组构造环境判断图解  
Fig. 8 Discrimination diagrams for tectonic environment of Yangjiagou Formation in Dakouqin area

4 讨论

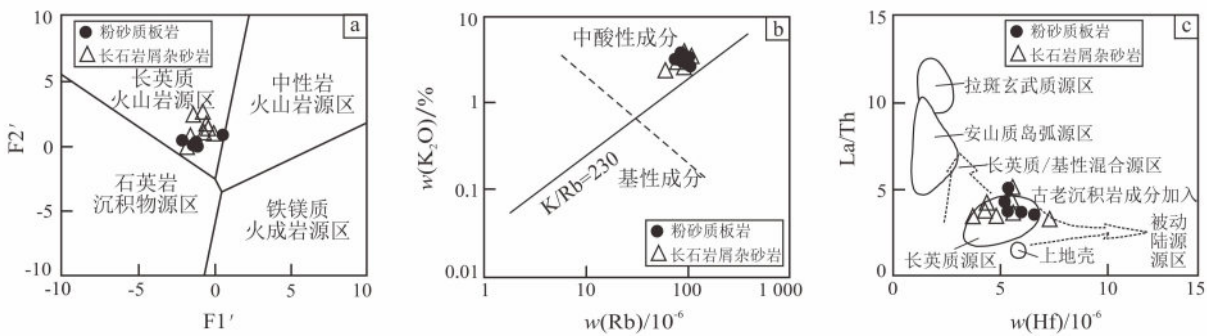
4.1 杨家沟组沉积时代的限定

本文采用最年轻一组碎屑锆石的加权平均年龄来限定沉积时代。虽然由于 Pb 丢失或者数据分析误差会导致计算出的最小年龄有些偏差，但是运用最小年龄组的加权平均年龄能有效地减少误差<sup>[34]</sup>。基于这一原则，限定杨家沟组样品 PM001-38-TW1 和 PM001-35-TW1 的最小年龄组的加权平均年龄分别为  $(255 \pm 5)$  Ma 和  $(251 \pm 2)$  Ma，与二叠系—三叠系沉积界线  $(251.902 \pm 0.024)$  Ma 较一致。2 组碎屑锆石样品内，还存在晚三叠世锆石年龄  $[(235 \sim 227) \text{ Ma}, 6 \text{ 粒}]$ ，其来源可能为周围晚三叠世二长花岗岩结晶锆石年龄。结合侵入到杨家沟组的二长花岗岩年龄  $(223 \pm 2) \text{ Ma}$ <sup>①</sup>，认为研究区杨家沟组形成时代为  $(255 \sim 251) \text{ Ma}$ ，属于晚二叠世。

4.2 源区物质组成

杨家沟组杂砂岩相对富集轻稀土元素，亏损重稀土元素， $\text{LREE} / \text{HREE} = 6.98 \sim 9.09$ ， $\text{Eu} / \text{Eu}^* = 0.56 \sim 0.70$ ，具有明显的 Eu 负异常，表明沉积物物源主要来自上地壳；在  $\text{F1}'\text{-F2}'$  图解和  $w(\text{Hf}) - (\text{La} / \text{Th})$  图解中（图 9a、c），绝大多数样品落入长英质火山岩源区的范围内，仅 1 个样品落入被动陆源范围内，说明源区物质组成以长英质火山岩为主，并可能有来自被动陆缘的古老沉积岩成分加入；在  $w(\text{Rb}) - w(\text{K}_2\text{O})$  图解中（图 9b），样品落入中酸性成分范围内，此外，岩石  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2$  比值为  $21.11 \sim 28.78$ ，平均值为  $23.53 (> 14)$ ，进一步说明沉积物源区来自于长英质岩石<sup>[37]</sup>。

① 张学海，刘学生，李延锋，等. 吉林 1:5 万缸窑镇等 3 幅地质矿产综合调查报告. 长春：吉林省地质调查院，2017.



a. 据文献 [35]; b、c. 据文献 [36]。

图 9 大口钦地区杨家沟组 F1'-F2'图解 (a),  $w(\text{Rb})-w(\text{K}_2\text{O})$  图解 (b) 和  $w(\text{Hf})-(\text{La}/\text{Th})$  图解 (c)

Fig. 9 F1'-F2' diagram (a),  $w(\text{Rb})-w(\text{K}_2\text{O})$  diagram (b) and  $w(\text{Hf})-(\text{La}/\text{Th})$  diagram (c) of Yangjiagou Formation in Dakouqin area

4.3 物源示踪

杨家沟组样品中的碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究显示其碎屑年龄组成时代跨度非常大, 暗示了沉积物源区物质组成的复杂性和多样性。杨家沟组 2 个样品 218 粒碎屑锆石 (谐和度 > 85%) 在碎屑锆石 U-Pb 年龄分布图上出现 4 个峰值: ~252 Ma、~308 Ma、~455 Ma 以及 ~833 Ma (图 10)。根据碎屑锆石年龄分布, 将杨家沟组碎屑锆石年龄划分为 5 组: 第 1 组古元古代 (1 819 ~ 1 785 Ma, 3 粒); 第 2 组中-新元古代 (1 491 ~ 561 Ma, 24 粒); 第 3 组寒武纪-石炭纪 (522 ~ 301 Ma, 68 粒); 第 4 组早-中二叠世 (295 ~ 259 Ma, 24 粒); 第 5 组晚二叠世-中三叠世 (258 ~ 238 Ma, 93 粒); 同时还存在晚三叠世年龄 (235 ~ 227 Ma, 6 粒), 其可能为来自周围晚三叠世二长花岗岩, 该年龄物源本次不予讨论。

古元古代 (1 819 ~ 1 785 Ma) 碎屑锆石呈圆状-次圆状, 暗示经历了长距离搬运, 其与华北板块 1.8 Ga 和 2.4 Ga 的峰期年龄吻合<sup>[38]</sup>, 证明了其与华北板块的亲缘性。

中-新元古代 (1 491 ~ 561 Ma) 碎屑锆石大多数呈半自形-自形, 暗示未经历长距离搬运, 峰值为 833 Ma, 与松嫩-张广才岭地块中发现的新元古代 0.9 ~ 0.7 Ga 碎屑锆石相吻合<sup>[39]</sup>, 说明其主要来自于兴蒙造山带东段松嫩-张广才岭地块结晶基底。

寒武纪-石炭纪 (522 ~ 301 Ma) 碎屑锆石大

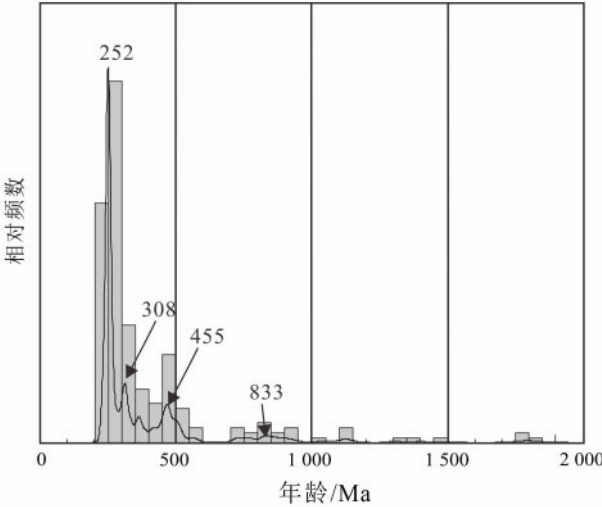


图 10 大口钦地区杨家沟组碎屑锆石 U-Pb 年龄相对频率图

Fig. 10 U-Pb ages relative probability of detrital zircons of Yangjiagou Formation in Dakouqin area

多数呈半自形-自形, 暗示未经历长距离搬运, 存在 2 组峰值, 分别为 455 Ma、308 Ma, 2 组峰值年龄在吉林中部地区和张广才岭均有广泛报道<sup>[40-43]</sup>, 说明碎屑锆石主要来源于兴蒙造山带东段吉中地区古生代变质和花岗质岩石。

早-中二叠世 (295 ~ 259 Ma) 碎屑锆石大多数呈半自形-自形, 暗示未经历长距离搬运, 在佳木斯地块上发现了一系列晚古生代二叠纪花岗岩 (278 ~ 254 Ma)<sup>[1,44]</sup>, 说明二叠纪碎屑锆石主要来源于兴蒙造山带东段花岗质岩石。

晚二叠世—中三叠世 (258 ~ 238 Ma) 碎屑锆石大多数呈半自形—自形, 峰值为 252 Ma (早三叠世), 在吉林中部地区与 252 Ma 年龄较为一致的地质体有 2 个, 分别为吉林大玉山花岗岩 (248 Ma) 和椅山二长花岗岩 (247 Ma)<sup>[45-48]</sup>, 说明晚二叠世到中三叠世碎屑锆石主要来源于兴蒙造山带东段吉中地区花岗质岩石。

上述表明, 杨家沟组具有双向物源的特点, 既含有大量来自盆地周围兴蒙造山带的物质, 又含有少量来自于研究区以北华北板块北缘的碎屑物质。

#### 4.4 构造环境

杨家沟组源区以长英质岩石火山岩为主, 并有被动陆缘的古老沉积岩成分加入, 具有活动大陆边缘和岛弧的双重特征, 且具有二元物源供给特点, 其岩石地球化学特征与磨拉石岩石地球化学成分特征一致。从岩性组合及微量元素特征来看, 为典型的陆相沉积, 结合 1:25 万区调报告<sup>①②</sup>在杨家沟组发现保存完好的三叶虫化石, 证实研究区晚二叠世海水并未完全退出, 区域上总体具有从残留海向湖相逐渐转变的趋势。以上分析表明, 杨家沟组可能形成于碰撞造山向构造稳定环境转化阶段。

此外, 吉林中部地区伊通石榴石白云母二长花岗岩 (244 Ma)、磐石—桦甸地区大玉山花岗岩 (248 Ma) 等具有埃达克质岩石地球化学属性的花岗岩的出现<sup>[44, 47-49]</sup>, 为古亚洲洋闭合碰撞造山过程中的岩浆响应; 而吉林中部地区早三叠世卢家屯组 (255 Ma)<sup>[50]</sup> 碰撞挤压磨拉石建造的出现正是海盆闭合与碰撞造山的转折点, 为古亚洲洋闭合的沉积响应。

综上所述, 古亚洲洋在吉中地区于晚二叠世—中三叠世期间最终闭合。

## 5 结论

(1) 吉林中部地区杨家沟组形成时代应为晚二叠世。

(2) 吉林中部地区杨家沟组物源大量来自于盆地周围兴蒙造山带, 少量来源于华北板块, 具有双向物源特征。

(3) 吉林中部地区杨家沟组可能形成于碰撞造山向构造稳定环境转化阶段; 古亚洲洋在吉中地区于晚二叠世—中三叠世期间最终闭合。

## 参考文献:

- [1] WU F Y, SUN D Y, GE W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41 (1): 1-30.
- [2] 牟芮霆, 裴福萍, 时玉芹, 等. 吉林省伊通地区早二叠世火山岩成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2023, 53 (4): 1117-1131.
- MU R T, PEI F P, SHI Y Q, et al. Genesis of Early Permian volcanic rocks in Yitong area, central Jilin Province: constraints from zircon U-Pb geochronology whole-rock geochemistry [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53 (4): 1117-1131.
- [3] XU W L, PEI F P, WANG F, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74 (18): 167-193.
- [4] JAHN B M, WU F Y, CHEN B. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. *Episodes*, 2000, 23: 82-92.
- [5] SONG Z W, LIANG C Y, FRANZ N, et al. Multistage evolution of the Keluo complex in the north DaHinggan Mountains: implications for the Mesozoic tectonic history of the eastern Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 2022, 107: 339-369.
- [6] 孔金贵, 张国宾, 张文东, 等. 大兴安岭北段呼玛地区晚侏罗世花岗岩闪长岩年代学和地球化学特征: 对蒙古—鄂霍茨克洋构造演化的制约 [J]. *世界地质*, 2024, 43 (2): 171-192.
- KONG J G, ZHANG G B, ZHANG W D, et al. Geochronology and geochemistry of Late Jurassic granodiorite in Huma area of northern segment of Da Hinggan Ling (Mts): constraints on tectonic evolution of Mongolia—Okhotsk Ocean [J]. *World Geology*, 2024, 43 (2): 171-192.
- [7] 叶希青, 孙立影, 徐智涛, 等. 吉林中部靠山地区早

① 张学海, 刘学生, 李延锋, 等. 吉林 1:5 万缸窑镇等 3 幅地质矿产综合调查报告. 长春: 吉林省地质调查院, 2017.

② 刘跃文, 于洪斌, 周凯, 等. 1:25 万榆树县幅区域地质调查报告. 长春: 吉林省地质矿产局区域地质矿产调查所, 2013.



- 侏罗世正长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其动力学意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2023, 53 (3): 964-983.
- YE X Q, SUN L Y, XU Z T, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geodynamic significance of the Early Jurassic syenogranite in Kaoshan area of central Jilin Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53 (3): 964-983.
- [8] 周建波, 曹嘉麟, 曾维顺, 等. 吉林-黑龙江高压变质带的确定及意义 [J]. 科学通报, 2013, 58 (23): 2266-2270.
- ZHOU J B, CAO J L, ZENG W S, et al. Confirming of the Jilin-Heilongjiang high-pressure metamorphic belt and its tectonic implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58 (23): 2266-2270.
- [9] TANG J, XU W L, WANG F, et al. Geochronology and geochemistry of Early-Middle Triassic magmatism in the Erguna Massif, NE China: constraints on the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean [J]. Lithos, 2014, 184/187 (1): 1-16.
- [10] 郑常青, 耿志忠, 段东, 等. 辽北开原地区晚古生代一早中生代混染岩的厘定及其地质意义 [J]. 世界地质, 2023, 42 (3): 444-460.
- ZHENG C Q, GENG Z Z, DUAN D, et al. Determination and geological significance of Late Paleozoic-Early Mesozoic mélanges in Kaiyuan area, northern Liaoning Province [J]. World Geology, 2023, 42 (3): 444-460.
- [11] 宋晨, 裴福萍, 魏敬洋, 等. 吉林中部地区余富屯组形成时代及构造意义 [J]. 世界地质, 2022, 41 (4): 675-688.
- SONG C, PEI F P, WEI J Y, et al. Geochronology and tectonic significance of Yufutun Formation in central Jilin Province [J]. World Geology, 2022, 41 (4): 675-688.
- [12] LIU S, HU R, GAO S, et al. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of Permian granodiorite and associated gabbro in the Songliao Block, NE China and implications for growth of juvenile crust [J]. Lithos, 2010a, 114 (3): 423-436.
- [13] WU F Y, ZHAO G C, SUN D Y, et al. The Hulan Group: its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 30: 542-556.
- [14] 唐杰, 许文良, 王枫, 等. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆记录 [J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48 (5): 549-583.
- TANG J, XU W L, WANG F, et al. Subduction history of the Paleo-Pacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic-Paleogene magmatic records in Northeast Asia [J]. Science China (Terrae), 2018, 48 (5): 549-583.
- [15] 辛玉莲, 任军丽, 彭玉鲸, 等. 中国东北兴蒙-吉黑造山带造山作用结束的标志: 来自晚三叠世磨拉石 (大地构造相) 的证据 [J]. 地质与资源, 2011, 20 (6): 413-419.
- XIN Y L, REN J L, PENG Y J, et al. Ending of the mountain-building movement of Xing'an-Mongolian-Ji-Hei Orogenic Belt in Northeast China: evidence from Late Triassic molasse (geotectonic phase) [J]. Geology and Resources, 2011, 20 (6): 413-419.
- [16] 张英利, 贾晓彤, 王坤明, 等. 扬子西缘蒙经地区三叠纪碎屑物源分析 [J]. 地质论评, 2021, 67 (3): 625-639.
- ZHANG Y L, JIA X T, WANG K M, et al. Provenance analysis of Triassic sediments in the Yinjing area on the western margin of the Yangtze Craton [J]. Geological Review, 2021, 67 (3): 625-639.
- [17] LI H Y, HE B, XU Y G, et al. U-Pb and Hf isotope analyses of detrital zircons from Late Paleozoic sediments: insights into interactions of the North China Craton with surrounding plates [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 39 (5): 335-346.
- [18] JU Y W, YU K, WANG G Z, et al. Coupling response of the Meso-Cenozoic differential evolution of the North China Craton to lithospheric structural transformation [J]. Earth-Science Reviews, 2021, 223: 103859.
- [19] 韩作振, 钟文建, 宋志刚, 等. 吉林中部地区小绥河组变质粉砂岩碎屑锆石 U-Pb 年代学研究及其地质意义 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2019, 38 (6): 11-22.
- HAN Z Z, ZHONG W J, SONG Z G, et al. U-Pb dating of detrital zircons of metamorphic siltstone from Xiaosuihe Formation in central Jilin Province and its geological significance [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38 (6): 11-22.
- [20] 吉林省地质矿产局. 吉林省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-205.
- Jilin Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Jilin Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1-205.

- [21] 孙洋, 胡平, 赵晓阳. 吉林大口钦—缸窑一带黏土岩成矿远景评价 [J]. 世界地质, 2023, 42 (1): 61–68.  
SUN Y, HU P, ZHAO X Y. Metallogenic prospect evaluation of clay mines in Dakouqin–Gangyao, Jilin City [J]. World Geology, 2023, 42 (1): 61–68.
- [22] LIU Y S, HU Z C, ZONG K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U–Pb isotope and trace element analyses by LA–ICP–MS [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (15): 1535–1546.
- [23] YUAN H L, GAO S, LIU X M, et al. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28 (3): 353–370.
- [24] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA–MC–ICP–MS 锆石微区原位 U–Pb 定年技术 [J]. 矿床地质, 2009, 28 (4): 481–492.  
HOU K J, LI Y H, TIAN Y R. In situ U–Pb zircon dating using Laser Ablation–Multi ion Counting–ICP–MS [J]. Mineral Deposits, 2009, 28 (4): 481–492.
- [25] ANDERSEN T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. Chemical Geology, 2002, 192 (1/2): 59–79.
- [26] 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜, 等. 岩石地球化学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000: 1–281.  
YANG X M, YANG X Y, CHEN S X, et al. A classic of rock geochemistry [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2000: 1–281.
- [27] LONG X, YUAN C, SUN M, et al. Geochemistry and Nd isotopic composition of the Early Paleozoic flysch sequence in the Chinese Altai, Central Asia: evidence for a northward-derived mafic source and insight into Nd model ages in accretionary orogeny [J]. Gondwana Research, 2012, 22 (2): 554–566.
- [28] PETTIJOHN F J, POTTER P E, SIEVER R. Sand and Sandstone [M]. New York: Springer–Verlag, 1972: 1–518.
- [29] BHATIA M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. Journal of Geology, 1983, 91 (6): 611–627.
- [30] COX R, LOWE D R, CULLERS R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59 (14): 2919–2940.
- [31] BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [M] // HENDERSON P. Rare earth element geochemistry. New York: Elsevier, 1984: 63–114.
- [32] 陈安霞, 周多, 张庆奎, 等. 兴安地块中部奥陶纪构造沉积环境 [J]. 现代地质, 2016, 30 (5): 1061–1071.  
CHEN A X, ZHOU D, ZHANG Q K, et al. Tectonic and sedimentary environment in the Ordovician period of central Xing'an Block [J]. Geoscience, 2016, 30 (5): 1061–1071.
- [33] BHATIA M R, CROOK K A W. Rare element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 92 (2): 181–193.
- [34] DICKINSON W R, GEHRELS G E. Use of U–Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: a test against a Colorado Plateau Mesozoic database [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 288 (12): 115–125.
- [35] ROSER B P, KORSCH R J. Provenance signatures of sandstone–mudstone suites determined using discriminant function analysis of major–element data [J]. Chemical Geology, 1988, 67 (1): 119–139.
- [36] 田光昊, 胡新苗, 侯红星, 等. 巴颜喀拉北部上三叠统清水河组构造环境与物源分析: 来自碎屑岩岩石地球化学、U–Pb 锆石测年的约束 [J]. 矿产勘查, 2022, 13 (10): 1413–1429.  
TIAN G H, HU X Z, HOU H X, et al. Tectonic environment and provenance analysis of the Late Triassic Qingshuihe Formation in northern Bayan Har: constraints from clastic rock geochemistry and U–Pb zircon dating [J]. Mineral Exploration, 2022, 13 (10): 1413–1429.
- [37] 王子进. 兴蒙造山带南缘东段晚古生代—三叠纪的构造演化: 碎屑锆石 U–Pb 年代学与火成岩组合证据 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.  
WANG Z J. Late Paleozoic–Triassic tectonic evolution of eastern segment of the southern margin of the Xing'an–Mongolia Orogenic Belt: evidence from detrital zircon U–Pb geochronology and igneous rock associations [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [38] 秦亚. 辽吉古元古裂谷带构造演化的年代学制约 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.  
QIN Y. Geochronological constraints on the tectonic evolution of the Liao–Ji Paleoproterozoic rift zone [D]. Changchun: Jilin University, 2013.

- [39] WANG F, XU W L, XU Y G, et al. Late Triassic bimodal igneous rocks in eastern Heilongjiang Province, NE China; implications for the initiation of subduction of the Paleo-Pacific Plate beneath Eurasia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 406–423.
- [40] WANG F, XU W L, MENG E, et al. Early Paleozoic amalgamation of the Songnen-Zhangguangcai Range and Jiamusi massifs in the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt: geochronological and geochemical evidence from granitoids and rhyolites [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49: 234–248.
- [41] GUAN Q B, LIU Z H, LIU Y J, et al. A tectonic transition from closure of the Paleo-Asian Ocean to subduction of the Paleo-Pacific Plate: insights from Early Mesozoic igneous rocks in eastern Jilin Province, NE China [J]. *Gondwana Research*, 2022, 102: 332–353.
- [42] 焦骥. 吉中地区早石炭世火山岩年代学、地球化学及其构造意义 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
JIAO J. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of Early Carboniferous volcanic rocks of central Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [43] 宋晨. 长春石头口门组沉积环境及物源: 硅质岩和碎屑锆石证据 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.  
SONG C. Sedimentary environment and provenance of Shitoukoumen Formation, Changchun: evidence from siliceous rocks and detrital zircons [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [44] 葛茂卉, 张进江, 刘恺, 等. 小兴安岭—张广才岭地区晚古生代至中生代花岗岩的成因及其地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2020, 39 (4): 385–405.  
GE M H, ZHANG J J, LIU K, et al. Petrogenesis of the Late Paleozoic to Mesozoic granite from the Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains and its geological implications [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2020, 39 (4): 385–405.
- [45] 孙德有, 吴福元, 张艳斌. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间: 来自吉林大玉山花岗岩体的证据 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2004, 34 (2): 174–181.
- SUN D Y, WU F Y, ZHANG Y B. The final closing time of Xiramuron-Changchun-Yanji Plate Suture Zone: evidence from the Dayushan granitic pluton of Jilin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2004, 34 (2): 174–181.
- [46] 李成强, 周建波, 王红燕, 等. 中国东北地区张广才岭中生代岩浆岩的性质与构造意义 [J]. *世界地质*, 2024, 43 (3): 336–352.  
LI C Q, ZHOU J B, WANG H Y, et al. Nature and tectonic implications of Mesozoic magmatic rocks in Zhangguangcai Ling (Mts.), Northeast China [J]. *World Geology*, 2024, 43 (3): 336–352.
- [47] CAO H H, XU W L, PEI F P, et al. Zircon U-Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusive rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block [J]. *Lithos*, 2013, 170/171 (6): 191–207.
- [48] 朱书宏, 袁鹏宇, 孔凡乾, 等. 吉林双阳石门水库早三叠世 C 型埃达克质岩的发现及其地质意义 [J]. *世界地质*, 2022, 41 (2): 272–282.  
ZHU S H, YUAN P Y, KONG F Q, et al. Discovery of Early Triassic C-type adakitic rocks in Shimen reservoir of Shuangyang, Jilin and its geological significance [J]. *World Geology*, 2022, 41 (2): 272–282.
- [49] TANG J, LI A P, XU W L. Geochronology and geochemistry of Late Carboniferous-Middle Jurassic magmatism in the Helong area, NE China: implications for the tectonic transition from the Paleo-Asian Oceanic to circum-Pacific regime [J]. *Geological Journal*, 2020, 55 (3): 1808–1825.
- [50] 聂立军, 于宏斌, 张建泽, 等. 吉林省下三叠统卢家屯组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2015, 45 (2): 453–470.  
NIE L J, YU H B, ZHANG J Z, et al. Zircons LA-ICP-MS U-Pb ages of the Lower Triassic Lujiatun Formation and its geological significance in Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45 (2): 453–470.