

现代地质

*Geoscience*

ISSN 1000-8527, CN 11-2035/P

## 《现代地质》网络首发论文

- 题目：准噶尔盆地西北缘中拐凸起石炭纪安山岩年代学、地球化学特征及其构造意义
- 作者：邵龙飞，于福生，王丹丹，李超
- DOI：10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.024
- 收稿日期：2021-10-17
- 网络首发日期：2022-06-07
- 引用格式：邵龙飞, 于福生, 王丹丹, 李超. 准噶尔盆地西北缘中拐凸起石炭纪安山岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J/OL]. 现代地质.  
<https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.024>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.024.

# 准噶尔盆地西北缘中拐凸起石炭纪安山岩年代学、地球化学特征及其构造意义

邵龙飞<sup>1</sup>, 于福生<sup>1</sup>, 王丹丹<sup>2</sup>, 李超<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 2. 河北省地质矿产勘查局第五地质大队 海洋地质调查所, 河北 唐山 063000;  
 3. 中国石油集团 东方地球物理勘探公司乌鲁木齐分院, 新疆 乌鲁木齐 830016)

**摘要:** 为加深对中亚造山带西段石炭纪构造背景的认识, 对准噶尔盆地西北缘中拐凸起金龙 10 井区石炭纪安山岩岩心样品开展岩相学、年代学和地球化学研究。安山岩的 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 定年结果显示, 其结晶的年龄为  $(322.4 \pm 1.1)$  Ma, 属中石炭世。地球化学分析结果表明, 研究区安山岩属于低钾 - 中钾钙碱性岩石系列, 其稀土元素配分曲线均略向右倾, 具微弱的 Eu 负异常; 原始地幔标准化蛛网图显示整体相对富集 Pb 和大离子亲石元素 Rb、Ba 等, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr 等, 具有消减带弧火山岩的特征。安山岩的 Th/La、Th/Ce 和 Lu/Yb 值均低于大陆地壳的平均值, 而接近幔源岩浆的比值。研究区安山岩属于正常的岛弧火山岩, 源于富水地幔楔, 是由俯冲板片脱水产生的流体交代地幔楔发生部分熔融所形成的。结合区域地质背景并对比相近时期岩浆岩, 综合认为研究区安山岩形成于大陆弧环境, 为西准噶尔残余洋盆俯冲消减作用的产物, 且残余洋盆在  $(322.4 \pm 1.1)$  Ma 时还未完全关闭。

**关键词:** 准噶尔盆地西北缘; 中拐凸起; 石炭纪; 安山岩; 年代学; 地球化学

中图分类号: P588.1; P597 文献标志码: A

## Geochronology, Geochemistry, and Tectonic Significance of Carboniferous Andesite in the Zhongguai Uplift, Northwestern Margin of the Junggar Basin

SHAO Longfei<sup>1</sup>, YU Fusheng<sup>1</sup>, WANG Dandan<sup>2</sup>, LI Chao<sup>3</sup>

(1. School of Earth Sciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Marine Geological Survey

Institute of the Fifth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Tangshan, Hebei 063000, China;

3. Urumqi Branch of CNPC Oriental Geophysical Exploration Company, Urumqi, Xinjiang 830016, China)

**Abstract:** To deepen our understanding in the Carboniferous tectonic background in the western Central Asian Orogenic Belt, drill-core and samples of andesite in Jinlong 10 well area of Zhongguai uplift (northwestern margin of Junggar basin) were studied via petrography, chronology and geochemistry. The results show that our andesite samples are low-K to medium-K calc-alkaline, with slightly right-inclining REE diagram and weakly negative Eu anomaly. In the primitive mantle-normalized spider diagram, the rocks have Pb and LILE (Rb, Ba) enrichments and HFSE (Nb, Ta, Zr) depletions, resembling those of typical subduction-related arc volcanic rocks. The Th/La, Th/Ce and Lu/Yb ratios of andesite are below those of the average continental crust,

收稿日期: 2021-10-17; 改回日期: 2022-05-02; 责任编辑: 潘令枝。

作者简介: 邵龙飞, 男, 硕士研究生, 1996 年出生, 地质学专业, 主要从事构造地质学研究。Email: 569504887@qq.com。

通讯作者: 于福生, 男, 教授, 博士生导师, 1969 年出生, 矿产普查与勘探专业, 主要从事构造地质学、盆地构造解析与三维模拟、构造物理模拟、数值模拟研究。Email: fushengyu@cup.edu.cn。

引用格式: 邵龙飞, 于福生, 王丹丹, 等. 准噶尔盆地西北缘中拐凸起石炭纪安山岩年代学、地球化学特征及其构造意义 [J]. 现代地质, 2022, 36(3). DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.024.

SHAO Longfei, YU Fusheng, WANG Dandan, et al. Geochronology, Geochemistry, and Tectonic Significance of Carboniferous Andesite in the Zhongguai Uplift, Northwestern Margin of the Junggar Basin [J]. Geoscience, 2022, 36(3).

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.024.

but similar to those of typical mantle-derived magmas. The andesite samples belong to the normal island arc volcanic rocks, which are derived from the water-rich mantle wedge and by partial melting of the fluid-metasomatized mantle wedge (produced by subducting-slab dehydration). LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the andesite yielded Middle Carboniferous age of ( $322.4 \pm 1.1$ ) Ma. Combined with regional geological background and compared with coeval magmatism, we considered that the andesite in the Zhongguai uplift was formed in a continental arc setting, and was the subduction product of residual oceanic basin in West Junggar, which was not completely closed at ( $322.4 \pm 1.1$ ) Ma.

**Key words:** northwestern margin of Junggar Basin; Zhongguai uplift; Carboniferous; andesite; chronology; geochemistry

## 0 引言

中亚造山带形成于西伯利亚古陆与中朝、塔里木板块之间古亚洲洋的俯冲消减作用<sup>[1-3]</sup>。准噶尔盆地地处中亚造山带西段，位于我国新疆北部，周边被中、高山地环绕，西北邻准噶尔山系，东北邻阿尔泰山系，南邻天山山脉，总体呈现为三角形态，经历了多阶段不同性质的演化和变革<sup>[4-7]</sup>，并伴随有强烈的多旋回的岩浆喷发运动，形成了大面积的火山岩。火山岩包含了大量的地球化学信息，其研究对于分析大地构造背景、揭示盆地演化特征有着重要的意义。

前人对准噶尔盆地火山岩的研究认为，准噶尔盆地腹部、西北部、东部和南部的石炭系火山岩的形成皆与洋壳俯冲密切相关<sup>[8-16]</sup>。为加深对中亚造山带西段石炭纪构造背景的认识，笔者将针对准噶尔盆地西北缘中拐凸起金龙 10 井区石炭纪安山岩岩心样品开展岩相学、年代学和地球化学研究，据此探讨安山岩的成因类型、源区和构造环境，为中亚造山带西段石炭纪构造演化提供依据；在此基础上，结合前人研究成果，为备受争议的西准噶尔残余洋盆的闭合时限<sup>[17-20]</sup>进一步提供约束条件。

## 1 区域地质概况

准噶尔盆地处于哈萨克斯坦古板块、塔里木古板块和西伯利亚古板块交汇处的造山带，属于大型陆内叠合盆地<sup>[5,12]</sup>。自石炭纪—新近纪以来，准噶尔盆地先后经历了华力西期、印支期、燕山期及喜马拉雅期等多期构造运动<sup>[4,6]</sup>。在准噶尔盆地演化的过程中伴随着强烈的火山运动，经历了多次开合旋回，形成了以超基性岩为主的蛇绿岩岩浆岩带、以辉绿岩为主的基性岩岩浆岩带及及

以火山岩—花岗岩为主的岩浆岩带。多旋回的构造发展在准噶尔盆地的西北缘表现尤为突出，包括震旦纪—中泥盆世的古亚洲洋伸展—聚敛旋回运动以及晚泥盆世—晚二叠世造山后两次伸展—聚敛旋回运动<sup>[21]</sup>。准噶尔盆地西北缘发育有晚古生代的泥盆纪火山岩、石炭纪火山岩以及二叠纪火山岩，其中石炭纪火山岩在西北缘出露最广，多位于深大断裂带附近，火山活动剧烈<sup>[22]</sup>。早石炭世末—中石炭世随着达尔布特—喀拉麦里洋盆的关闭，盆地开始由开放型海相盆地转化为封闭的内陆盆地，在其蛇绿岩带的北部喷发有大面积的以安山岩为主的中性和酸性火山岩；中晚石炭世在准噶尔盆地的局部喷发有较少的中基性火山岩。晚石炭世，准噶尔盆地由挤压环境转为伸展环境<sup>[23]</sup>。

准噶尔盆地被划分为 6 个一级构造单元和 44 个二级构造单元<sup>[4]</sup>。研究区金龙 10 井区（图 1 (b)）位于其中的中拐凸起构造单元上。中拐凸起是位于准噶尔盆地西北缘的克百断裂带和红车断裂带的转换部位，呈宽缓鼻状隆起<sup>[24-26]</sup>，经历了基底隆升、挤压变形、构造转换、伸展改造和构造定型 5 个演化阶段<sup>[27]</sup>。

## 2 岩石学特征

首先以岩心观察和薄片鉴定相结合的方法研究金龙 10 井区安山岩的岩石学特征。研究表明，安山岩岩心多为褐灰色、灰绿色和深灰色，可见气孔和杏仁孔，发育构造缝，岩心出筒油气味较淡—较浓，裂缝面可见少量干沥青和黑褐色原油，含油面积约为 10%，呈星点—斑点状不均匀分布（图 2(a)—(c)）。镜下观察可见，安山岩薄片样品的基质为细小的长条状、粒状斜长石微晶，具斑状交织结构（图 2(d)）。斑晶主要为自形—半自

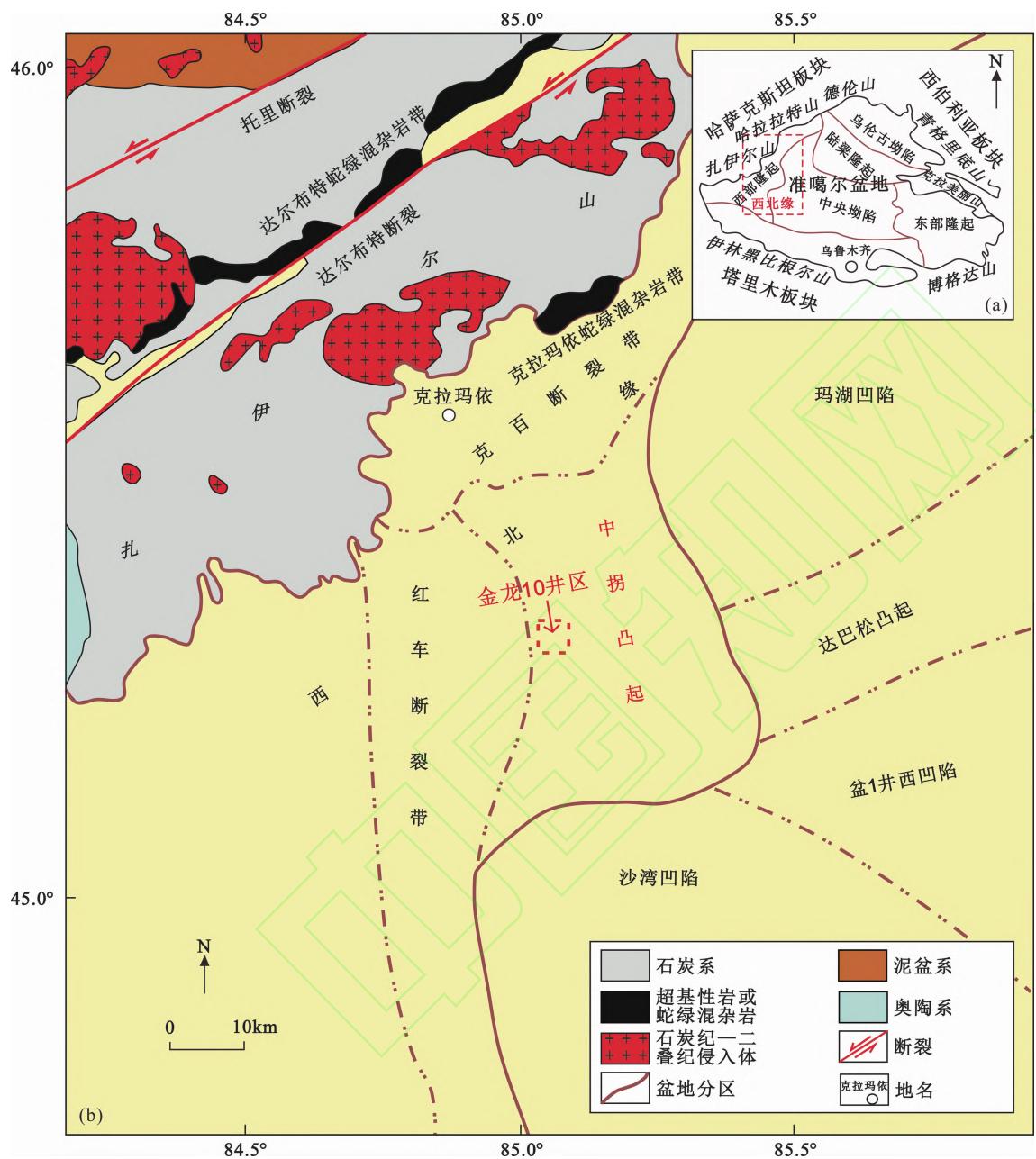


图1 准噶尔盆地构造单元(a)及其西北缘中拐凸起构造背景(b)(据文献[28])

Fig. 1 Tectonic unit of Junggar Basin (a) and tectonic map of Zhongguai uplift in the northwestern margin of Junggar Basin (b) (after reference [28])

形板状斜长石，粒径介于0.1~1.5 mm之间，可见聚片双晶结构(图2(e))。此外含有少部分由石英充填的杏仁体状的斑晶，自形-半自形，粒径介于0.1~0.5 mm之间(图2(f))。次要矿物还存在角闪石、辉石、磁铁矿等。

### 3 样品分析方法

#### 3.1 锆石U-Pb测年

U-Pb测年法在同位素测年方法中占有重要的地位，是最早用来测定地质年龄的放射性方法

之一<sup>[29]</sup>，目前也成为火山岩研究中的常用手段之一<sup>[8,30~32]</sup>。本文用U-Pb法中的LA-ICP-MS激光剥蚀法对准噶尔盆地西北缘金龙10井区安山岩中的锆石进行了年龄测定。本次锆石年龄测定由武汉上谱分析科技有限责任公司完成，主要检测设备为安捷伦电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7900)和193 nm准分子激光剥蚀系统(GeoLasHd)，处理软件为ICPMSPACAL 10.0。测定分析中，使用的激光剥蚀系统(GeoLasHd)的激光能量为80 mJ，频率5 Hz，激光束斑直径32 μm。具体分析

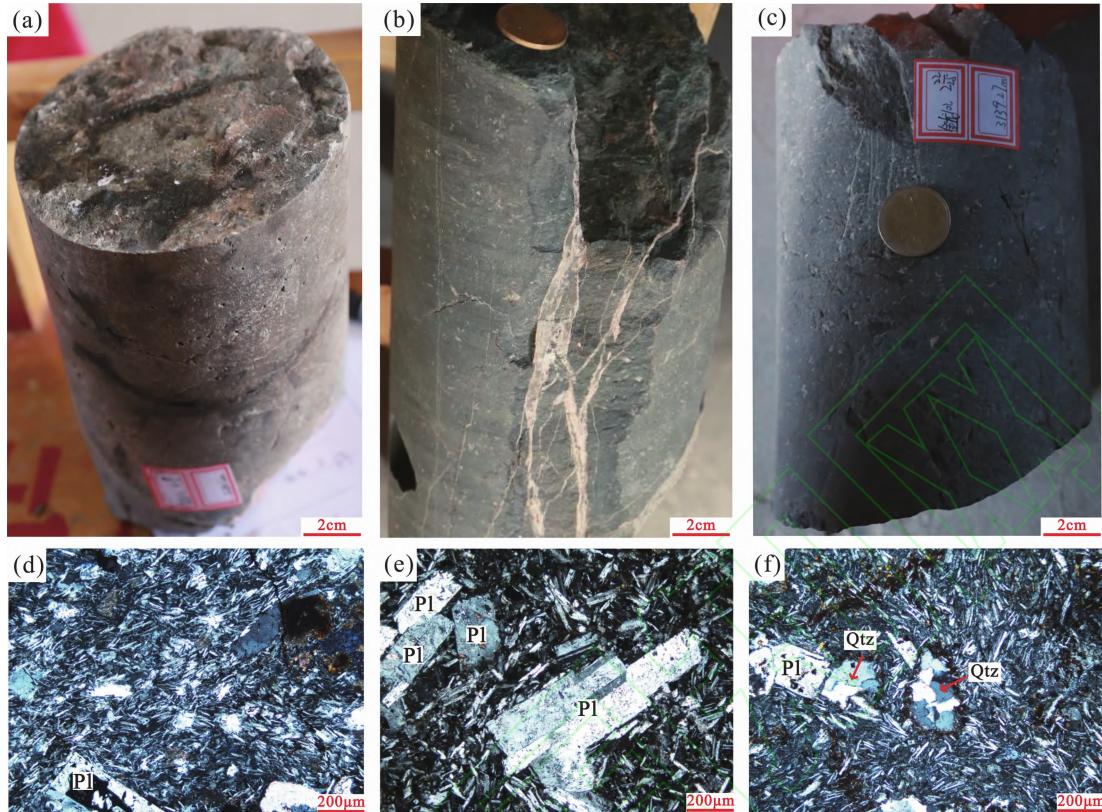


图2 中拐凸起安山岩岩心及显微照片

Fig. 2 Core photos and photomicrographs of andesite rocks from the Zhongguai uplift

(a) 褐灰色安山岩岩心; (b) 灰绿色安山岩岩心; (c) 深灰色安山岩岩心; (d) 斑状交织结构; (e) 斜长石斑晶; (f) 石英充填的杏仁体; Pl. 斜长石; Qtz. 石英

条件及流程详见文献 [33]。

### 3.2 地球化学分析

本次分析安山岩样品共6件，全部取样于准噶尔盆地西北缘中拐凸起的金龙10井区石炭系岩心，样品皆采集于岩体基本未经历风化的新鲜岩石部位，主量元素委托于中国科学院地质与地球物理研究所国家重点实验室进行分析，采用熔融玻璃片法。微量元素分析在核工业北京地质研究院分析测试中心完成，采用电感耦合NexION300D等离子体质谱仪进行测定。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石U-Pb年代学特征

从锆石阴极发光图像(图3)可见，样品中大部分的锆石颗粒自形程度较好，多为长柱状。锆石表面较为光洁，个别锆石颗粒中存在有不透明的包裹体，锆石整体较为粗大，长轴直径介于200~500 μm之间，长轴与短轴之比多介于2:1~3:1之间。阴极发光图像中，锆石晶体内部发育有显著的典型岩浆成因的振荡环带结构。本次分

析测点共25个，分析结果数据见表1。Th含量变化范围为 $27.3 \times 10^{-6} \sim 498.0 \times 10^{-6}$ ，平均含量为 $98.43 \times 10^{-6}$ ；U的含量介于 $67.9 \times 10^{-6} \sim 549.0 \times 10^{-6}$ 之间，平均含量为 $154.73 \times 10^{-6}$ ；Th/U比值介于0.24~1.00之间，平均值为0.59。锆石因其成因不同而具有不同的Th、U含量及Th/U比值，变质成因锆石的Th、U含量低且Th/U比值小，Th/U比值一般<0.1；而岩浆成因锆石的Th、U含量相对较高且Th/U比值相对较大，Th/U比值一般>0.4<sup>[8,34]</sup>。样品中所测定Th/U均值为0.59，>0.4，进一步确定样品中的锆石为岩浆成因锆石。在U-Pb年龄谐和图(图4)中，数据的投点落于谐和线附近且分布集中， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $(322.4 \pm 1.1)\text{ Ma}$  ( $\text{MSWD} = 1.6$ )，代表了矿物的结晶年龄，属中石炭世。

### 4.2 地球化学特征

#### 4.2.1 主量元素

研究区安山岩样品主量元素分析结果(表2)表明，在6件安山岩样品中， $\text{SiO}_2$ 含量介于54.3%~62.5%之间，平均含量为58.7%。 $\text{K}_2\text{O}$



图3 中拐凸起安山岩锆石阴极发光图像(CL)及年龄

Fig. 3 Representative zircon CL images and ages of andesite sample from the Zhongguai uplift

表1 中拐凸起安山岩 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of andesite sample from the Zhongguai uplift

测点号	含量/ $10^{-6}$			同位素比值			年龄/Ma			
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$
W19-01	6.57	51.2	108.0	0.47	0.052 2 ± 0.004 6	0.361 8 ± 0.028 5	0.051 3 ± 0.000 9	295 ± 202	314 ± 21.2	323 ± 5.8
W19-02	4.62	36.2	75.3	0.48	0.055 7 ± 0.005 9	0.371 9 ± 0.034 0	0.050 2 ± 0.001 3	439 ± 239	321 ± 25.2	315 ± 8.0
W19-03	15.65	234.0	235.0	1.00	0.053 2 ± 0.002 9	0.367 8 ± 0.020 4	0.049 9 ± 0.000 8	345 ± 124	318 ± 15.1	314 ± 4.8
W19-04	13.35	130.0	206.0	0.63	0.055 0 ± 0.003 4	0.393 3 ± 0.023 5	0.051 9 ± 0.000 7	413 ± 106	337 ± 17.1	326 ± 4.4
W19-05	4.79	48.4	73.7	0.66	0.056 6 ± 0.005 0	0.395 4 ± 0.030 9	0.051 5 ± 0.001 1	476 ± 164	338 ± 22.5	324 ± 6.7
W19-06	8.26	96.9	126.0	0.77	0.054 2 ± 0.003 8	0.376 9 ± 0.023 9	0.050 4 ± 0.000 9	389 ± 159	325 ± 17.6	317 ± 5.6
W19-07	12.60	95.0	208.0	0.46	0.051 9 ± 0.002 7	0.365 1 ± 0.018 4	0.050 7 ± 0.000 8	280 ± 114	316 ± 13.7	319 ± 4.7
W19-08	5.73	68.1	89.2	0.76	0.053 0 ± 0.006 4	0.364 1 ± 0.042 1	0.049 8 ± 0.001 3	332 ± 278	315 ± 31.4	313 ± 7.8
W19-09	11.31	105.0	177.0	0.59	0.052 8 ± 0.003 9	0.373 5 ± 0.026 3	0.051 0 ± 0.000 9	320 ± 167	322 ± 19.5	321 ± 5.4
W19-10	5.16	34.3	84.9	0.40	0.057 3 ± 0.005 1	0.387 4 ± 0.029 8	0.051 9 ± 0.001 1	502 ± 193	332 ± 21.8	326 ± 6.9
W19-11	5.62	56.2	90.5	0.62	0.051 7 ± 0.004 2	0.356 7 ± 0.024 3	0.050 5 ± 0.001 1	333 ± 192	310 ± 18.2	317 ± 6.9
W19-12	5.00	39.5	78.7	0.50	0.052 7 ± 0.004 9	0.371 5 ± 0.033 1	0.052 0 ± 0.001 0	322 ± 218	321 ± 24.5	327 ± 5.9
W19-13	8.21	61.3	130.0	0.47	0.056 6 ± 0.003 7	0.401 7 ± 0.023 6	0.052 0 ± 0.000 8	476 ± 143	343 ± 17.1	327 ± 4.9
W19-14	7.72	77.1	120.0	0.64	0.053 0 ± 0.003 7	0.377 4 ± 0.025 1	0.051 1 ± 0.000 9	332 ± 161	325 ± 18.5	321 ± 5.3
W19-15	4.12	27.3	67.9	0.40	0.053 6 ± 0.004 8	0.367 8 ± 0.026 9	0.051 7 ± 0.001 2	354 ± 202	318 ± 20.0	325 ± 7.7
W19-16	4.27	30.6	70.3	0.44	0.056 1 ± 0.005 3	0.378 4 ± 0.030 3	0.051 1 ± 0.001 2	454 ± 213	326 ± 22.3	321 ± 7.2
W19-17	17.76	175.0	274.0	0.64	0.054 8 ± 0.002 9	0.387 5 ± 0.018 9	0.051 5 ± 0.000 7	406 ± 120	333 ± 13.9	324 ± 4.1
W19-18	10.53	105.0	167.0	0.63	0.052 3 ± 0.003 0	0.366 7 ± 0.020 0	0.050 6 ± 0.000 7	298 ± 130	317 ± 14.9	318 ± 4.3
W19-19*	58.40	221.0	333.0	0.66	0.065 1 ± 0.001 9	1.267 7 ± 0.036 5	0.140 1 ± 0.001 4	789 ± 61	831 ± 16.4	845 ± 7.7
W19-20	4.54	43.5	69.0	0.63	0.056 8 ± 0.006 1	0.394 7 ± 0.039 0	0.052 2 ± 0.001 2	487 ± 241	338 ± 28.4	328 ± 7.6
W19-21	37.40	498.0	549.0	0.91	0.053 7 ± 0.002 0	0.384 0 ± 0.014 1	0.051 4 ± 0.000 6	367 ± 85	330 ± 10.4	323 ± 3.6
W19-22	14.06	56.7	239.0	0.24	0.056 4 ± 0.003 3	0.399 2 ± 0.022 7	0.051 7 ± 0.000 7	478 ± 130	341 ± 16.4	325 ± 4.3
W19-23	5.66	44.3	89.6	0.49	0.055 7 ± 0.005 0	0.378 3 ± 0.028 8	0.051 8 ± 0.001 0	443 ± 198	326 ± 21.2	325 ± 6.1
W19-24	4.87	47.0	75.9	0.62	0.054 2 ± 0.004 6	0.366 1 ± 0.026 3	0.050 3 ± 0.001 0	389 ± 194	317 ± 19.6	316 ± 6.1
W19-25	8.77	78.5	131.0	0.60	0.058 6 ± 0.004 5	0.413 1 ± 0.025 8	0.053 5 ± 0.000 9	554 ± 167	351 ± 19.0	336 ± 5.7

注: 加“\*”的测点为在计算加权平均年龄、谐和图成图时剔除的测点。

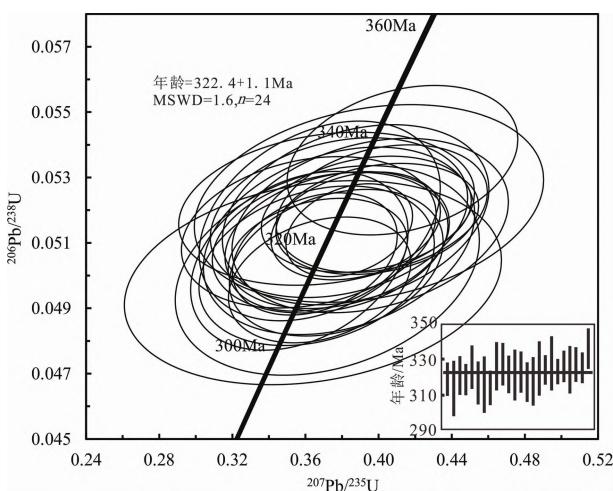


图4 中拐凸起安山岩锆石U-Pb谐和图及加权平均年龄图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram and weighted average age diagram of zircons from andesite in the Zhongguai uplift

+  $\text{Na}_2\text{O}$  含量介于 4.25% ~ 6.69% 之间，平均含量为 5.45%。 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量较低， $\text{K}_2\text{O}$  含量介于 0.40% ~ 2.19% 之间，平均含量为 1.00%。在 TAS 分类图解(图 5)中，4 个样品投点投入安山岩区域内，1 个样品投点落于玄武安山岩区域内，1 个样品投点落于粗面安山岩区域内，均属于亚碱性系列。利用 AFM 图解(图 6(a))进一步划分，均属于钙碱性系列。在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解(图 6(b))中，可见安山岩样品主要为低钾 - 中钾钙碱性岩石系列。 $\text{TiO}_2$  含量介于 0.63% ~ 1.48% 之间，平均含量为 1.11%； $\text{P}_2\text{O}_5$  含量介于 0.13% ~ 0.38% 之间，平均含量为 0.29%； $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高，介于 14.1% ~ 16.8% 之间，平均含量为 15.1%。其余氧化物中， $\text{MgO}$  含量介于 2.09% ~ 5.02% 之间，平均含量为 2.90%；

表2 中拐凸起安山岩样品主量元素(%)、微量元素( $10^{-6}$ )分析结果Table 2 Major element (%) and trace element ( $10^{-6}$ ) compositions of the andesite samples from the Zhongguai uplift

样品号	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TFe}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	烧矢量	总量
JL10-2	62.2	0.63	14.90	7.09	0.13	2.92	1.86	2.52	2.19	0.13	5.14	94.55
JL101-1	62.5	1.02	14.40	6.48	0.15	2.09	2.97	4.94	1.12	0.38	2.76	96.06
JL102-1	58.2	1.32	14.61	8.67	0.23	2.58	3.40	5.07	0.51	0.35	4.30	94.94
JL102-2	58.8	1.24	14.05	8.33	0.23	2.52	3.64	4.99	0.40	0.33	5.18	94.54
JL103-3	54.3	0.99	16.78	8.79	0.20	5.02	5.24	3.63	0.62	0.18	4.48	95.71
JL104-1	56.2	1.48	15.75	9.30	0.22	2.24	3.00	5.51	1.18	0.35	3.64	95.27
样品号	$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr
JL10-2	0.87	26.6	1.080	18.1	116.0	34.5	11.9	7.11	74.8	15.1	36.6	322
JL101-1	0.23	16.2	0.922	19.4	47.4	65.2	7.0	12.7	70.3	18.7	25.0	235
JL102-1	0.10	20.5	0.989	27.3	99.6	89.1	12.9	19.8	115.0	20.0	12.5	185
JL102-2	0.08	19.6	0.834	25.1	91.2	91.7	12.0	15.1	112.0	18.7	9.3	180
JL103-3	0.17	19.8	0.552	31.7	226.0	137.0	30.7	112.0	86.8	20.2	10.6	370
JL104-1	0.21	28.6	1.050	32.3	98.7	66.7	12.8	13.7	125.0	22.8	23.5	333
样品号	Y	Cs	Ba	Pb	Th	U	Nb	Ta	Zr	Hf	La	Ce
JL10-2	36.4	0.983	604	3.95	1.43	0.512	2.75	0.238	106.0	3.64	11.6	26.8
JL101-1	42.3	0.348	419	3.30	1.32	0.469	3.37	0.223	95.0	3.06	11.7	27.1
JL102-1	42.9	0.276	123	4.23	1.16	0.455	2.89	0.212	94.4	3.25	11.9	28.7
JL102-2	37.8	0.192	108	3.97	1.05	0.402	2.73	0.194	84.2	2.94	11.0	26.4
JL103-3	26.7	0.359	349	3.63	1.13	0.381	2.37	0.218	96.2	2.99	8.0	18.2
JL104-1	47.9	0.791	338	4.26	1.41	0.473	3.24	0.221	148.0	4.52	12.2	30.1
样品号	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
JL10-2	3.89	18.8	4.94	1.20	4.59	0.95	5.94	1.27	3.5	0.642	3.96	0.580
JL101-1	4.23	21.6	5.86	1.79	5.67	1.17	7.34	1.53	4.19	0.728	4.38	0.587
JL102-1	4.57	23.5	6.31	1.83	6.07	1.26	7.69	1.59	4.09	0.669	4.05	0.537
JL102-2	4.15	21.2	5.62	1.68	5.42	1.12	6.81	1.39	3.57	0.622	3.58	0.497
JL103-3	2.74	13.7	3.70	1.10	3.39	0.70	4.46	0.97	2.58	0.463	2.90	0.427
JL104-1	4.71	24.1	6.52	1.95	6.24	1.31	8.27	1.73	4.61	0.815	4.96	0.709

(续) 表2 中拐凸起安山岩样品主量元素(%)、微量元素( $10^{-6}$ )分析结果

(Continued) Table 2 Major element (%) and trace element ( $10^{-6}$ ) compositions of the andesite samples from the Zhongguai uplift

样品号	REE	LREE	HREE	$\delta$ Eu	Th/La	Th/Ce	Lu/Yb	Nb/La	Ta/Yb	La/Sm	Th/Yb	$\tau$
JL10-2	88.7	67.2	21.4	0.76	0.12	0.05	0.15	0.24	0.06	2.35	0.36	19.73
JL101-1	97.9	72.3	25.6	0.94	0.11	0.05	0.13	0.29	0.05	2.00	0.30	9.31
JL102-1	102.8	76.8	26.0	0.89	0.10	0.04	0.13	0.24	0.05	1.89	0.29	7.23
JL102-2	93.1	70.1	23.0	0.92	0.10	0.04	0.14	0.25	0.05	1.96	0.29	7.32
JL103-3	63.3	47.4	15.9	0.93	0.14	0.06	0.15	0.30	0.08	2.16	0.39	13.26
JL104-1	108.0	79.6	28.6	0.92	0.12	0.05	0.14	0.27	0.04	1.87	0.28	6.93

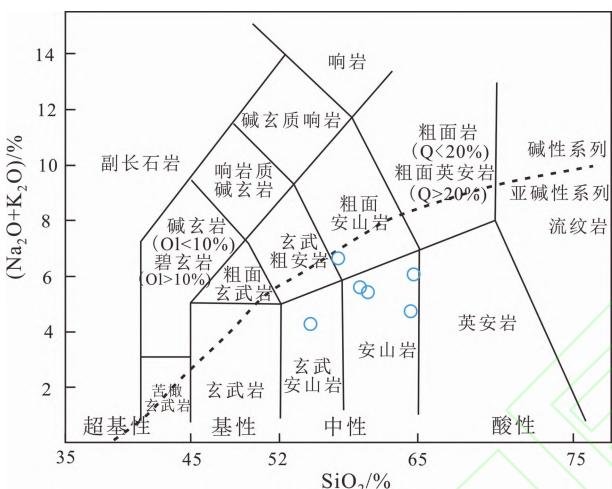


图 5 中拐凸起安山岩 TAS 图解(底图据文献 [35])

Fig. 5 TAS diagram of andesite in the Zhongguai uplift (base map after reference [35])

CaO 含量介于 1.86% ~ 5.24% 之间，平均含量 3.35%；Na<sub>2</sub>O 含量介于 2.52% ~ 5.51% 之间，平均含量为 4.44%；K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 的值介于 0.08 ~ 0.87 之间，平均为 0.28。可见安山岩样品具较高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、低的 TiO<sub>2</sub>，相对于 SiO<sub>2</sub> 而言，K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的含量低，绝大部分样品 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O < 0.8。这些特征均符合弧火山岩的特征<sup>[38]</sup>。

## 4.2.2 微量元素

安山岩样品的微量元素分析结果(表2)显示,样品REE介于 $63.3 \times 10^{-6} \sim 108.0 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 $92.3 \times 10^{-6}$ 。其稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图7(a))为略向右倾斜的曲线,分异程度较低,总体较平缓,具微弱的Eu负异常,显示轻稀土元素(LREE)较重稀土元素(HREE)略富集的特征。LREE/HREE的值介于2.78~3.14之间,平均值为2.95,也可看出轻稀土元素(LREE)相对富集的特征。 $\delta\text{Eu}$ 的值介于0.76~0.94之间,平均值为0.89,微弱的Eu负异常可能与岩浆在演化过程中斜长石的结晶分异较弱有关。在其微量

元素原始地幔标准化蛛网图(图 7(b))中可见, 相对富集 Pb 和大离子亲石元素 Rb、Ba 等, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr 等, 显示出俯冲消减带弧火山岩的特征<sup>[38, 41-42]</sup>。

## 5 讨论

5.1 源区及成因

在微量元素的分析中，安山岩样品富集大离子亲石元素和轻稀土元素亏损高场强元素的特点，呈现出消减带岩浆的特征<sup>[38, 41-43]</sup>。而俯冲消减带弧岩浆岩的来源有3种<sup>[44-46]</sup>：(1)下部俯冲的洋壳；(2)俯冲带上覆的地幔楔；(3)地幔楔上覆的陆壳或洋壳，且三种源区的岩浆皆经历了部分熔融作用。安山岩样品 Th/La 的值介于 0.10 ~ 0.14 之间，平均值为 0.11；Th/Ce 的值介于 0.04 ~ 0.06 之间，平均值为 0.05，大部分样品的值均低于大陆地壳的 Th/La、Th/Ce 的平均值（分别为 0.30 和 0.15）<sup>[47-48]</sup>，而接近于幔源岩浆的 Th/La、Th/Ce 的值（分别为 0.12 和 0.02 ~ 0.05）<sup>[40]</sup>。安山岩样品 Lu/Yb 的值介于 0.13 ~ 0.15 之间，平均值为 0.14，同样该比值低于大陆地壳 Lu/Yb 的值（0.16 ~ 0.18）<sup>[47]</sup>，而更接近幔源岩浆岩 Lu/Yb 的值（0.14 ~ 0.15）<sup>[40]</sup>。据此，可见研究区安山岩可能与第二种来源的幔源岩浆关系更为紧密。

通过  $Y - Sr/Y$  图解(图 8(a))可见研究区安山岩属于正常的岛弧岩石而非典型的埃达克岩。岛弧火山岩由岛弧岩浆作用产出，该岩浆作用主要起因于板块俯冲。由  $Th/Zr - Nb/Zr$  图解(图 8(b))可知，研究区安山岩主要形成于与流体相关的富集作用。而大洋板块正富含流体，大洋板块的俯冲通常会造成规模较大的地幔交代和岛弧岩浆活动<sup>[51]</sup>。俯冲洋壳脱水，产生富集大离子亲石元素(Rb、Sr、U、Th 等)和REE 等元素的流体进入俯冲带上覆的地幔楔并与之发生交代作用，进

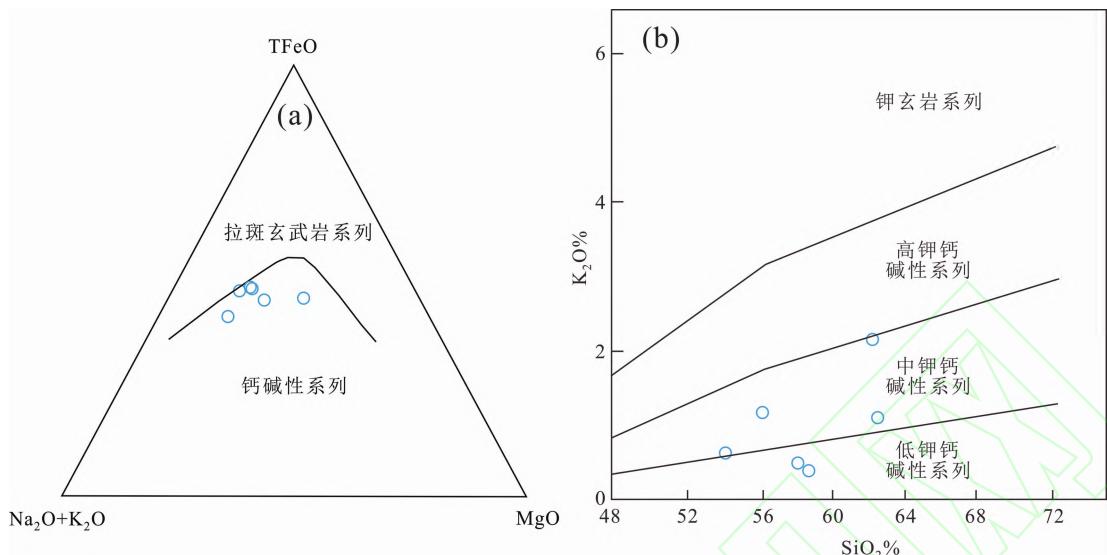


图6 中拐凸起安山岩 AFM 图解((a), 底图据文献 [36]) 和 SiO<sub>2</sub> – K<sub>2</sub>O 图解((b), 底图据文献 [37]))

Fig. 6 AFM ((a), base map after reference [36]) and SiO<sub>2</sub> – K<sub>2</sub>O ((b), base map after reference [37])) diagrams of andesite in the Zhongguai uplift

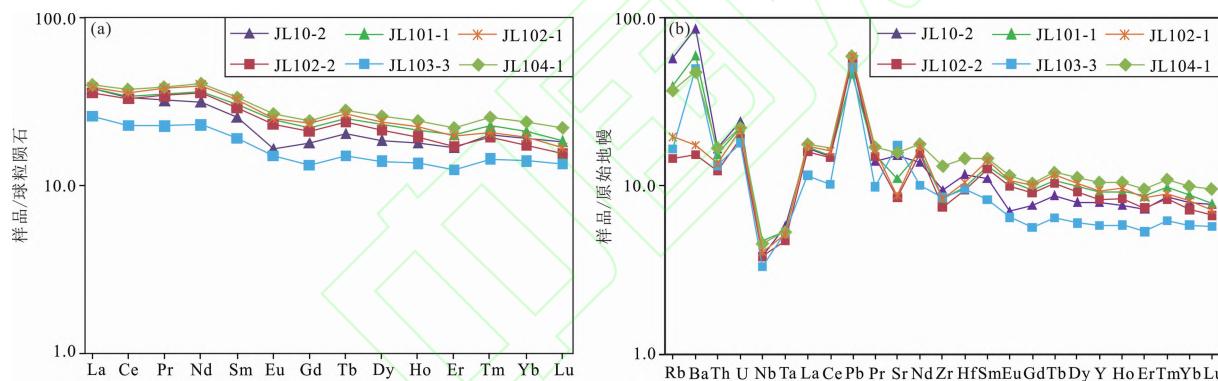


图7 中拐凸起安山岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石标准化值据文献 [39], 原始地幔标准化值据文献 [40])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized multi-element spider diagram (b) of andesite in the Zhongguai uplift (normalizing values of chondrite after reference [39], and primitive mantle after reference [40])

而致使地幔楔发生部分熔融而产生大洋弧玄武岩或大陆弧安山岩<sup>[51–53]</sup>。此过程中的富水流体会亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 等, 最终形成的正常岛弧火山岩中会出现显著的 Nb、Ta、Ti 负异常, 这是由于这些元素的流体/岩石分配系数很小 ( $\ll 1$ ) 所导致的结果。而这些元素在熔体中的分配系数明显大于流体, 因而若火山岩成因主要为与熔体相关的富集作用时, 会使 Nb、Ta、Ti、P 等增加, 导致形成的岛弧火山岩中 Nb 呈正异常或微弱的负异常<sup>[52]</sup>。微量元素分析中已述及, 安山岩样品相对富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素; 从原始地幔标准化蛛网图(图 7(b))中可见 Rb、

U、Th 呈较明显的正异常, 而 Nb、Ta 呈明显的负异常, 这一点也印证了研究区安山岩形成于与流体相关的富集作用而非熔体相关的富集作用。综上, 排除了上述弧岩浆岩的(1)、(3)来源, 笔者认为研究区安山岩源于富水地幔楔, 是由俯冲板片脱水产生的流体交代地幔楔发生部分熔融所形成的。

## 5.2 构造环境

钙碱性系列中性喷出岩以安山岩为代表, 广泛分布于活动大陆边缘、造山带及现代岛弧地区, 俯冲带是形成安山岩最重要的场所。安山岩样品的戈蒂尼指数  $\tau$  ( $\tau = (\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O})/\text{TiO}_2$ ) 的平均

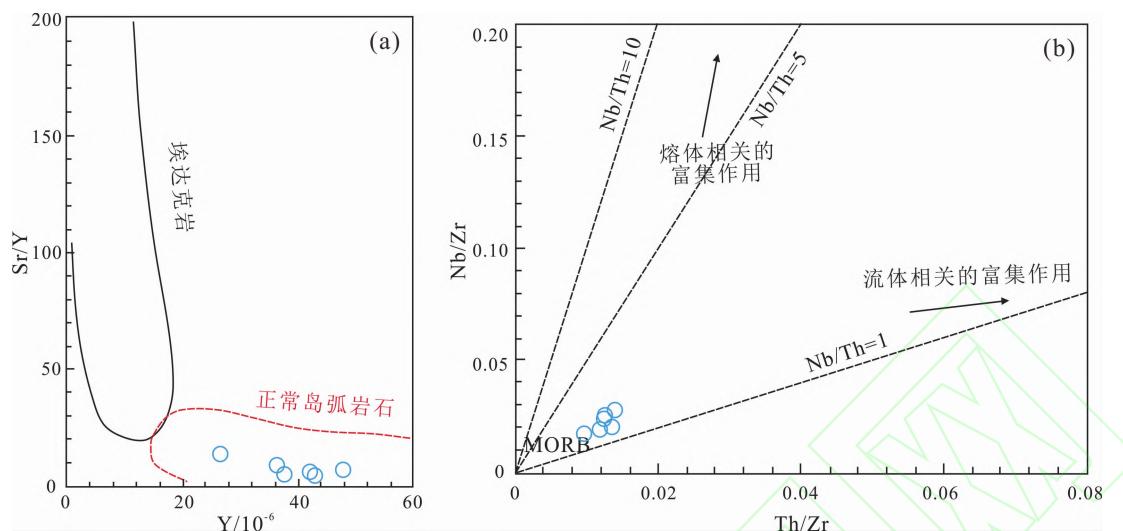


图8 中拐凸起安山岩源区及成因判别图解

Fig. 8 Magma source and process discrimination plots of andesite in the Zhongguai uplift

(a) Y - Sr/Y 图解, 底图据文献 [49]; (b) Th/Zr - Nb/Zr 图解, 底图据文献 [50]

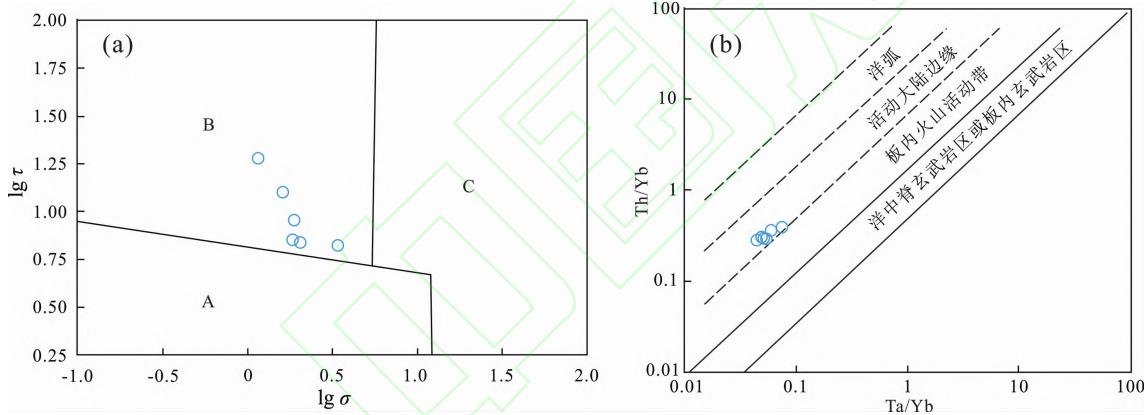


图9 中拐凸起安山岩构造环境判别图解

Fig. 9 Tectonic discrimination diagrams of andesite in the Zhongguai uplift

(a)  $\lg\sigma - \lg\tau$  图解, 底图据文献 [54]; (b)  $Ta/Yb - Th/Yb$  图解, 底图据文献 [55]; A. 板内稳定区火山岩; B. 消减带火山岩; C. A 和 B 区演化的碱性火山岩

值为 10.6, 为消减带火山岩数值范畴 ( $\tau > 10$ , 一般为消减带火山岩<sup>[54]</sup>)。上述研究表明, 中拐凸起石炭纪安山岩为钙碱性岩石系列; 据  $\lg\sigma - \lg\tau$  关系图解(图9(a))也可看出, 安山岩样品投点全部都落于消减带火山岩区域内。在  $Ta/Yb - Th/Yb$  图解(图9(b))中, 安山岩样品投点均落入活动大陆边缘区域内。

在主量元素分析中, 安山岩样品具有较高的  $Al_2O_3$ , 低的  $TiO_2$  和  $P_2O_5$  含量, 绝大多数样品  $K_2O/Na_2O < 0.8$ , 具有典型弧火山岩的特征。在微量元素分析中, 安山岩样品相对富集 Pb 和大离子亲石元素 Rb、Ba 等, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr 等, 同样显示出了俯冲消减带弧火山岩的特征。

可见研究区安山岩的形成环境与俯冲消减带关系密切。

准噶尔盆地西北缘自早古生代以来经历了 Rodinia 超大陆裂解、古亚洲洋形成到消亡演化过程<sup>[21]</sup>。中志留世到中泥盆世期间, 西准噶尔洋消减闭合, 哈萨克斯坦板块中西部地块—巴尔喀什—塔城地块和准噶尔地块发生碰撞, 沿达尔布特断裂带洋壳发生断离, 准噶尔古陆块从泥盆纪开始由被动大陆边缘为主转为以主动大陆边缘为主。中泥盆世—早石炭世, 准噶尔地块周缘洋盆全面消减闭合, 地块之间开始逐渐缝合焊接, 活动板块边缘发育大规模的岩浆活动。位于中拐凸起西北部的达尔布特蛇绿混杂岩带被证实是早—中泥盆世

古亚洲洋向准噶尔板块俯冲的产物和证据<sup>[56]</sup>。早石炭世是准噶尔地区洋壳俯冲的高潮时期，广泛发育弧盆系统，此时西准噶尔地区为弧后盆地环境<sup>[57~58]</sup>。洋盆主体于早石炭世晚期闭合，蛇绿岩套构造侵位，陆块开始碰撞隆升，发生造山运动，虽然洋盆主体消减关闭，但陆间仍存有残余洋盆<sup>[26]</sup>。在中拐凸起北部的克百构造带区域内发育有一条规模较大的蛇绿混杂岩带，徐新等<sup>[59]</sup>2006年对其辉长岩中的锆石定年得出的两组年龄为(411.4 ± 8.6) Ma 和(332 ± 14) Ma，前者年龄接近于古亚洲洋主体在早古生代末期的闭合时间，后者年龄反映出西准噶尔地区残余洋盆一直延续到了早石炭世早期。在匡立春等2013年拟定的新疆北部早石炭世原型盆地类型中，准噶尔盆地周缘主要包括4个残余洋盆，分别为东北缘的卡拉麦里残余洋盆、东南缘的博格达残余洋盆、西南缘的北天山残余洋盆以及距研究区最近的西北缘的达尔布特残余洋盆<sup>[60]</sup>。西准噶尔残余洋盆的消亡经历了329~320 Ma、310~295 Ma 及 290 Ma 三次构造-岩浆事件，造成大规模幔源岩浆上侵<sup>[61~62]</sup>。研究区安山岩锆石定年结果为(322.4 ± 1.1) Ma，在第一次构造-岩浆事件时间范围内，并且时间接近徐新等<sup>[59]</sup>测得的克拉玛依蛇绿混杂岩带的第二组年龄(332 ± 14) Ma，意味着两者可能存在内在的联系。综上所述，笔者认为中拐凸起金龙10井区安山岩形成于大陆弧环境，为西准噶尔残余洋盆俯冲消减作用的产物，同时也说明西准噶尔残余洋盆在(322.4 ± 1.1) Ma时并未完全关闭。

## 6 结 论

(1) 中拐凸起金龙10井区安山岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果显示，其结晶时代为(322.4 ± 1.1) Ma，表明安山岩形成于中石炭世。

(2) 中拐凸起金龙10井区安山岩属于低钾-中钾钙碱性岩石系列，轻稀土元素相对于重稀土元素富集，大离子亲石元素相对富集，高场强元素相对亏损，亏损Nb、Ta，相对富集Pb、Eu负异常较弱。

(3) 中拐凸起金龙10井区安山岩源于富水地幔楔，是由俯冲板片脱水产生的流体交代地幔楔发生部分熔融所形成的。

(4) 中拐凸起金龙10井区安山岩的构造环境为大陆弧环境，为西准噶尔残余洋盆俯冲消减作

用的产物，残余洋盆在(322.4 ± 1.1) Ma时并未完全关闭。

## 参 考 文 献：

- [1] 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): 1~8.
- [2] 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): 233~259.
- [3] 柳志华, 顾雪祥, 章永梅, 等. 内蒙古索伦山蛇绿岩锆石U-Pb年代学、地球化学特征及其地质意义 [J]. 现代地质, 2020, 34(3): 399~417.
- [4] 杨海波, 陈磊, 孔玉华. 准噶尔盆地构造单元划分新方案 [J]. 新疆石油地质, 2004, 25(6): 686~688.
- [5] 蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 准噶尔盆地的类型和构造演化 [J]. 地学前缘, 2000, 7(4): ?
- [6] 赵白. 准噶尔盆地的形成与演化 [J]. 新疆石油地质, 1992, 13(3): 192~196.
- [7] 陈业全, 王伟锋. 准噶尔盆地构造动力学过程 [J]. 地质力学学报, 2004, 10(2): 155~164.
- [8] 靳松, 张兆祎, 荣桂林, 等. 新疆西准噶尔玉什喀腊岩体的地球化学特征、锆石U-Pb年龄及Hf同位素: 对古亚洲洋闭合的制约 [J]. 中国地质, 2015, 42(3): 494~508.
- [9] 张杰, 史基安, 张顺存, 等. 准噶尔盆地西北缘晚石炭系—早二叠系火山岩岩石学和地球化学研究 [J]. 地质科学, 2012, 47(4): 980~992.
- [10] 张顺存, 石新璞, 孔玉华, 等. 准噶尔盆地腹部陆西地区二叠系—石炭系火山岩地球化学特征及构造背景分析 [J]. 矿物岩石, 2008, 28(2): 71~75.
- [11] 邹国庆, 余牛奔, 孙国庆, 等. 东准噶尔奥依托浪格地区石炭纪双峰式火山岩地球化学特征及其构造意义 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 455~472.
- [12] 毛治国, 邹才能, 朱如凯, 等. 准噶尔盆地石炭纪火山岩岩石地球化学特征及其构造环境意义 [J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 207~216.
- [13] 龙晓平, 孙敏, 袁超, 等. 东准噶尔石炭系火山岩的形成机制及其对准噶尔洋盆闭合时限的制约 [J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 31~40.
- [14] 曾广策, 王方正, 郑建平, 等. 准噶尔盆地基底火山岩中的辉石及其对盆地基底性质的示踪 [J]. 地球科学, 2002, 27(1): 13~18.
- [15] 孙国强, 姚卫江, 张顺存, 等. 准噶尔盆地中拐地区石炭—二叠系火山岩地球化学特征 [J]. 新疆石油地质, 2011, 32(6): 580~582.
- [16] 翁凯, 马中平, 张雪. 西准噶尔谢米斯台地区双峰式火山岩的发现及其地质意义 [J]. 现代地质, 2018, 32(4): 692~703.
- [17] 于志泉, 刘博, 洪阳百合. 新疆西准噶尔白布谢河花岗斑

- 岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义 [J]. 高校地质学报, 2021, 27(1): 80–93.
- [18] 徐新, 周可法, 王煜. 西准噶尔晚古生代残余洋盆消亡时间与构造背景研究 [J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3206–3214.
- [19] 张海祥, 牛贺才, SATO H, 等. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铌玄武岩组合: 古亚洲洋板块南向俯冲的证据 [J]. 高校地质学报, 2004, 10(1): 106–113.
- [20] 许继峰, 梅厚钧, 于学元, 等. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 Adakite 火山岩: 消减板片部分熔融的产物 [J]. 科学通报, 2001, 46(8): 684–688.
- [21] 陈新发, 杨学文, 薛新克, 等. 准噶尔盆地西北缘复式油气成藏理论与精细勘探实践 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 49–53.
- [22] 李伟, 何生, 谭开俊, 等. 准噶尔盆地西北缘火山岩储层特征及成岩演化特征 [J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 909–916.
- [23] 李丕龙, 冯建辉, 陆永潮, 等. 准噶尔盆地构造沉积与成藏 [M]. 北京: 地质出版社, 2010: 7–8.
- [24] 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 845–861.
- [25] 姚卫江, 范存辉, 党玉芳, 等. 准噶尔盆地西北缘中拐凸起石炭系火山岩储层特征及主控因素 [J]. 石油天然气学报, 2011, 33(9): 32–36, 165.
- [26] 刘波. 中拐凸起构造特征及其形成与演化 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- [27] 张欣欣, 高凤琳, 张旺, 等. 准噶尔盆地西北缘中拐凸起断裂发育特征及构造变形过程 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(10): 6–11.
- [28] 吴孔友, 刘波, 刘寅, 等. 准噶尔盆地中拐凸起断裂体系特征及形成演化 [J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(3): 406–418.
- [29] 陈文, 万渝生, 李华芹, 等. 同位素地质年龄测定技术及应用 [J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1917–1947.
- [30] 高睿, 肖龙, 王绘清, 等. 新疆南天山开都河火山岩地球化学特征、锆石 LA-ICP-MS 年代学及其意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(4): 541–553.
- [31] 李平, 徐学义, 王洪亮, 等. 中天山南缘那拉提碱性花岗岩岩石成因——来自锆石微量元素和 Hf 同位素的证据 [J]. 地质通报, 2012, 31(12): 1949–1964.
- [32] 靳松, 荣桂林, 张兆祎, 等. 新疆西准噶尔玛依勒山地区阔依塔斯杂岩体地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄 [J]. 中国地质, 2016, 43(1): 99–110.
- [33] LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34–43.
- [34] WU Y B, ZHENG Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49: 1554–1569.
- [35] BAS M J, MAITRE R W, STRECKEISEN A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. Journal of Petrology, 1986, 27: 745–750.
- [36] IRVINE T N, BARAGAR W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. Canadian Journal of Earth Science, 1971, 8: 523–548.
- [37] 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: 63–81.
- [38] 李伍平, 路凤香. 钙碱性火山岩构造背景的研究进展 [J]. 地质科技情报, 1999, 18(2): 16–19.
- [39] BOYNTON W W. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [M] // Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry: Developments in Geochemistry 2. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63–114.
- [40] SUN S S, McDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society of London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- [41] 黄岗, 牛广智, 王新录, 等. 新疆东准噶尔早志留世弧岩浆岩: 来自姜格尔库都克石英二长闪长岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据 [J]. 现代地质, 2016, 30(6): 1219–1233.
- [42] 李远友, 刘国仁, 于秀斌, 等. 新疆准噶尔北缘加玛特金铜矿区辉长岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及地质意义 [J]. 现代地质, 2017, 31(4): 651–661.
- [43] HOLE M J, SAUNDERS A D, MARRIENER G F, et al. Subduction of pelagic sediments: Implications for the origin of Ce anomalous basalts from the Mariana Islands [J]. Journal of the Geological Society, 1984, 141(3): 453–472.
- [44] 张云, 孙立新, 张天福, 等. 内蒙古狼山地区乌花辉长岩的年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成: 对地幔源区特征和岩石成因的约束 [J]. 现代地质, 2020, 34(3): 450–465.
- [45] WYLLIE P J, OSMATON M F, MORRISON M A. Constraints imposed by experimental petrology on possible and impossible magma sources and products [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science, 1984, 310: 439–456.
- [46] 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换 [J]. 地质论评, 2015, 61(3): 473–484.
- [47] RUDNICK R, SHAN G. Composition of the Continental Crust: Treatise on Geochemistry [M]. Oxford: Elsevier, 2003: 1–64.
- [48] PLANK T. Constraints from thorium / lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents [J]. Journal of Petrology, 2005, 46(5): 921–944.
- [49] CHENG Z, ZHANG Z, CHAI F, et al. Carboniferous porphyry Cu-Au deposits in the Almalyk orefield, Uzbekistan: the Sarycheku and Kalmakyr examples [J]. International Geology Review, 2017, 60(1): 1–20.
- [50] ZHAO J H, ZHOU M F. Geochemistry of Neoproterozoic mafic

- intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle [J]. *Precambrian Research*, 2007, 152(1): 27–47.
- [51] 郑永飞, 陈伊翔. 大陆俯冲带壳幔相互作用 [J]. 地球科学, 2019, 44(12): 3961–3983.
- [52] 赵振华, 王强, 熊小林. 俯冲带复杂的壳幔相互作用 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, (4): 277–284.
- [53] ZHENG Y F. Subduction zone geochemistry [J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(4): 1223–1254.
- [54] RITTMANN A. Stable Mineral Assemblages of Igneous Rocks [M]. London: Blackwell Scientific Publication, 1973: 1–64.
- [55] GORTON M P, SCHANDL E S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks [J]. *Canadian Mineralogist*, 2000, 38(5): 1065–1073.
- [56] 辜平阳, 李永军, 张兵, 等. 西准噶尔布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年 [J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1364–1372.
- [57] 杨忆, 沈远超. 新疆西准地区古生界火山岩岩石特征及其与金矿化的关系 [J]. 中国科学院研究生院学报, 1992(1): 61–72.
- [58] 翁凯, 徐学义, 马中平, 等. 西准噶尔马拉苏早泥盆世火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其大地构造意义 [J]. 地质通报, 2015, 34(2): 374–384.
- [59] 徐新, 何国琦, 李华芹, 等. 克拉玛依蛇绿混杂岩带的基本特征和锆石 SHRIMP 年龄信息 [J]. 中国地质, 2006, 33(3): 470–475.
- [60] 匡立春, 张越迁, 查明, 等. 新疆北部石炭纪构造背景及演化 [J]. 地质学报, 2013, 87(3): 311–320.
- [61] 徐新, 周可法, 王煜. 西准噶尔晚古生代残余洋盆消亡时间与构造背景研究 [J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3206–3214.
- [62] LANG M D, CHENG Z G, ZHANG Z C, et al. Hisingerite in trachydacite from Tarim: Implications for voluminous felsic rocks in transitional large igneous province [J]. *Journal of Earth Science*, 2000, 31(5): 875–883.