

· 专题研究 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2024.0101

# 秘鲁北部奇克拉约地区始新世-渐新世侵入岩时代、成因和构造环境

姚春彦, 郭维民, 刘君安, 李汉武, 王天刚

(中国地质调查局 南京地质调查中心, 江苏南京 210016)

**摘要:** 为充分认识秘鲁北部海岸岩基带始新世以来的构造岩浆演化特征, 探讨侵入岩形成时代、岩石成因及其构造环境, 在海岸岩基带自西向东系统采集侵入岩样品。锆石 U-Pb 年代学数据显示侵入岩时代分两期, 分别为 52~47 Ma 和 36~28 Ma, 具有自西向东逐渐变新的特征。样品岩石地球化学具有钙碱性-高钾钙碱性特征, 明显富集 Rb、Ba、K、U 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、P 和 Ti 高场强元素; 球粒陨石标准化稀土元素配分模式均表现为轻稀土元素富集的右倾型, 具有弱的 Eu 负异常。Sr/Y-Y 图解和 Rb-(Y+Nb) 图解显示岛弧岩浆岩的组成; Rb/Sr 值和 Th/U 值接近壳源岩浆组成; Nb/Ta 值和 Zr/Hf 值均接近平均陆壳组成; La/Ba-La/Nb 图解指示具有岩石圈地幔源区的特征; A/MF-C/MF 图解中多数样品落入基性岩的部分熔融区域。结合 Nazca 板块向南美大陆板块俯冲的构造背景及样品地球化学和年代学数据特征, 认为两期侵入岩的岩浆具有同源特征, 岩浆源区可能源于基性下地壳的部分熔融, 并有岩石圈地幔物质混染; 秘鲁北部在 Nazca 板块低角度平板俯冲作用下, 岩浆弧向东迁移, 同时地壳隆升和增厚时限较中南部地区的 30 Ma 时限稍晚(大约在 28 Ma 之后)。

**关键词:** 侵入岩; 岩石成因; 构造背景; 海岸岩基带; 奇克拉约地区; 秘鲁北部

中图分类号: P588.12; P581

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)01-0001-20

## Geochronology, petrogenesis and tectonic setting of the Eocene-Oligocene intrusive rocks in Chiclayo area, north of Peru

YAO Chun-yan, GUO Wei-min, LIU Jun-an, LI Han-wu and WANG Tian-gang

(Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to fully understand the tectono-magmatic evolution of the coastal batholiths of northern Peru since the Eocene, and to discuss the formation age, petrogenesis and tectonic environment of the intrusive rocks, typical samples were systematically collected from the coastal batholiths from west to east. The LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology dating results show that the intrusive rock age is divided into two periods, 52~47 Ma and 36~28 Ma, which gradually change new from west to east. The rock geochemistry of the sample has the characteristics of calc-alkaline and high-potassium calc-alkaline, with a clear enrichment of large ionic lithophilic elements such as Rb, Ba, K and U, and a relative lack of high field strength elements such as Nb, Ta, P and Ti. The pattern of the chondrite-normalized REE distribution shows a right-leaning type of LREE enrichment with a clear negative Eu anomaly. The Sr/Y-Y diagram and Rb-(Y+ Nb) diagram show the characteristics of island arc magmatic rocks. Both the Rb/Sr and Th/U ratios are close to those characteristics of crustal magma. The Nb/ Ta ratio and Zr /Hf

收稿日期: 2023-04-14; 接受日期: 2023-11-26; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2021YFC2901804); 中国地质调查局项目(DD20230129, DD20230051)

作者简介: 姚春彦(1980- ), 女, 博士, 正高级工程师, 从事矿床地质、地球化学调查工作, E-mail: yeyan@126.com; 通讯作者: 郭维民(1983- ), 男, 博士, 正高级工程师, 从事矿床地质、基础地质工作, E-mail: mwguo@163.com; 刘君安(1984- ), 男, 硕士, 高级工程师, 从事矿床地质、基础地质工作, E-mail: junan2003@qq.com。

ratio are close to the average continental crust composition. The La/Ba-La/Nb diagram indicates the characteristics of the lithospheric mantle source region. The A/MF-C/MF diagram shows that most of the samples fall into the partial melting zone of the basic rock. Combined with the tectonic background of the subduction of the Nazca plate to the South American continental plate and the characteristics of the geochemical and chronological data of the samples, it is considered that the magma of the two intrusive rocks have homologous characteristics, and the magma source area may be derived from the partial melting of the basic lower crust and the contamination of the lithospheric mantle material. Under the low-angle slab subduction of the Nazca plate, the magmatic arc migrated eastward, and the time period of the crustal uplift and thickening was slightly later than the 30 Ma in the central and southern areas (after about 28 Ma).

**Key words:** intrusive rocks; petrogenesis; tectonic setting; coastal batholith; Chiclayo area; north of Peru

**Fund support:** National Key R & D Program Project (2021YFC2901804); China Geological Survey Project (DD20230129, DD20230051)

大陆边缘岩浆弧以巨大的岩基和各种类型岩浆岩出露为主要特征,其在时间和空间上的演变反映了板块边缘俯冲带动力学机制的改变,研究大陆边缘岩浆弧体系对于揭示俯冲板片深部动力学过程、壳幔相互作用、岩浆演化过程等有着巨大的学术意义。南美洲西缘安第斯地区是全球研究中、新生代的热点地区,发育大量岛弧岩浆岩,并以巨型岩基的形式展布,包括秘鲁海岸岩基(Peruvian Coastal Batholith, 18°~6°S)、智利中部海岸岩基(Central Chilean Coastal Batholith, 35°~18°S)、巴塔哥尼亚岩基(Patagonian Batholith, 55°~42°S)等(Parada *et al.*, 1988, 1999, 2007; Herve *et al.*, 2007)。与南美洲西缘其他地区不同,秘鲁陆缘自俯冲作用开始之后,未受到地体增生作用的改造(Loewy *et al.*, 2004; Miskovic *et al.*, 2009),自550 Ma年左右即开始间歇性的岩浆活动(Cawood, 2005),被认为是一种长期活动的大陆边缘(Mukasa, 1986; Pindell and Tabbutt, 1995; Chew *et al.*, 2007),因而是研究和建立安第斯地区与俯冲有关的年代格架最为良好的研究场所之一。然而,该地区记录与俯冲有关的区域岩浆活动的精确地质历史(>30 Ma)仍然知之甚少(Mamani *et al.*, 2010)。本次研究通过对秘鲁海岸岩基北部奇克拉约地区开展系统的野外调查、岩石地球化学和年代学研究,探讨该地区岛弧岩浆岩的时空演化、岩石成因及其构造背景。

## 1 区域地质背景

秘鲁海岸岩基带位于南美洲西缘6°~18°S之间,总体属于中安第斯构造区,由1 000多个深成岩

体组成,出露长度约1 600 km,宽度约60 km,侵入时代主体介于侏罗纪至古新世之间(Pitcher *et al.*, 1985; Mukasa, 1986; Hildebrand and Whalen, 2014; 许志琴等, 2019)。根据岩石类型、岩石结构、相对侵入关系、捕虏体特征以及与不同时代岩脉群的关系等野外特征和岩石地球化学特征,秘鲁海岸岩基被划分为数个具有成因联系的岩套,常被称为“超单元”(Cobbing and Pitcher, 1972; Cobbing *et al.*, 1977; Atherton *et al.*, 1979; McCourt, 1981)。根据这些“超单元”分布特征,秘鲁海岸岩基带从北西至南东,被划分为5个不同的段,分别为Piura段、Trujillo段、Lima段、Arequipa段和Toquepala段(图1, Cobbing *et al.*, 1977; Cobbing and Pitcher, 1983)。

本文研究的奇克拉约(Chiclayo)地区位于秘鲁西北部海岸岩基Trujillo段最北端。研究区内最古老的地层为古生代变质岩基底(Salas组),广泛发育中生代—新生代火山-侵入杂岩。其中,火山岩以中基性熔岩、火山碎屑岩和凝灰质角砾熔岩为主,侵入岩以基性-中酸性钙碱性系列侵入岩为主。区域构造以断裂为主,构造线展布与科迪勒拉山脉走向一致,主要由北西-南东向断裂带组成。沿着北西走向断裂带发育一系列串珠状的穹窿和火山喷发机构(图2)。

## 2 研究区侵入岩及岩石特征

### 2.1 Patapo-La Cria 地区侵入岩

该地区位于Chongoyape镇西部,侵入岩侵入Oyotun组火山岩,在构造上以穹窿形式产出。侵入岩成分较为复杂,主体为中粗粒花岗岩,次为花岗斑

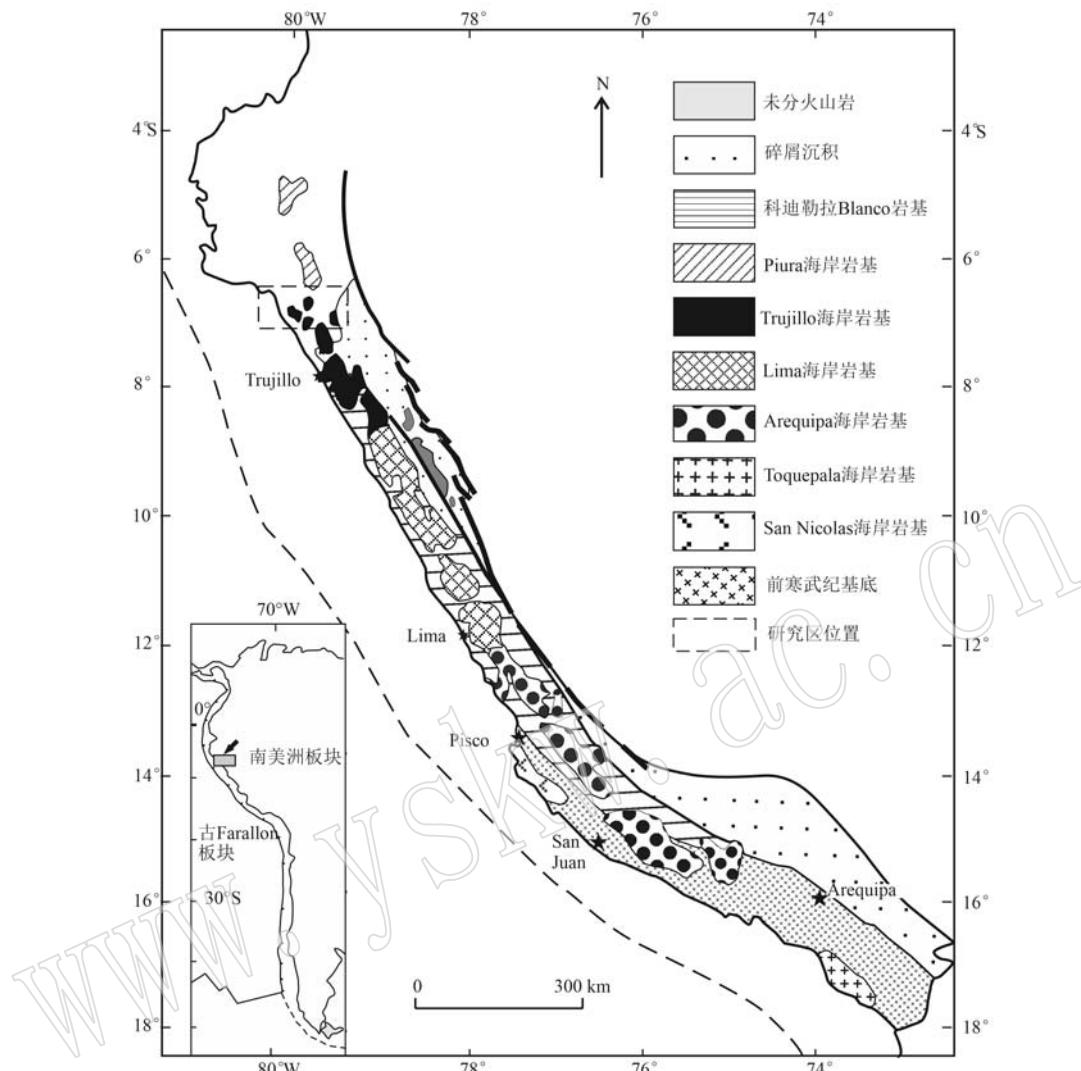


图1 秘鲁海岸岩基带“超单元”5个段分布示意图(修改自 Cobbing, 1976)

Fig. 1 The five compositional segments of the super-units in the Peruvian coastal batholith (after Cobbing, 1976)

岩、中细粒花岗岩和英云闪长岩，并有少量的闪长玢岩。中粗粒花岗岩，新鲜面颜色为肉红色，主要由钾长石(35%~45%)、石英(约30%)、斜长石(20%~25%)组成，有少量角闪石、黑云母暗色矿物。花岗斑岩主要分布于靠近接触带的部位，主要由钾长石、石英、斜长石以及角闪石组成，斑晶主要为石英(约20%)、钾长石(15%)和少量斜长石，基质主要由隐晶质物质组成(图3)。花岗斑岩成分与中粗粒花岗岩相似，为其边缘相。中细粒花岗岩主要出露岩体边部，中细粒结构，浅灰色、灰白色，主要由石英、钾长石、斜长石组成，暗色矿物含量很少，小于5%，以黑云母为主，岩体中含有大量由角闪石和斜长石组成的闪长质包体，包体中不规则分布有石英、斜长石晶体。本次研究的花岗斑岩(D3170)、二长花岗岩

(D3230)和花岗岩(D3243)样品采于该穹窿。

## 2.2 Las Delicias-Mocupe 地区侵入岩

该地区位于奇克拉约东南部，侵入岩体以穹窿构造产出，侵入岩体中岩浆岩主要有二长闪长岩和二长花岗岩两类，两者侵入到白垩纪灰岩之中，野外可见二长花岗岩侵入到二长闪长岩之中，侵入界限清楚。二长花岗岩中可见有大量的闪长质暗色包体，主要由角闪石和斜长石组成，多为椭球状，少量具有棱角状(图4a~4d)。本次研究的二长花岗岩(D3213)样品采自该穹窿。

## 2.3 Chonta Cruz 地区侵入岩

Chonta Cruz 地区侵入岩以巨大的岩基形式产出，岩性以英云闪长岩为主，主要矿物为石英(约30%)、斜长石(60%)、角闪石(2%~3%)、黑云母

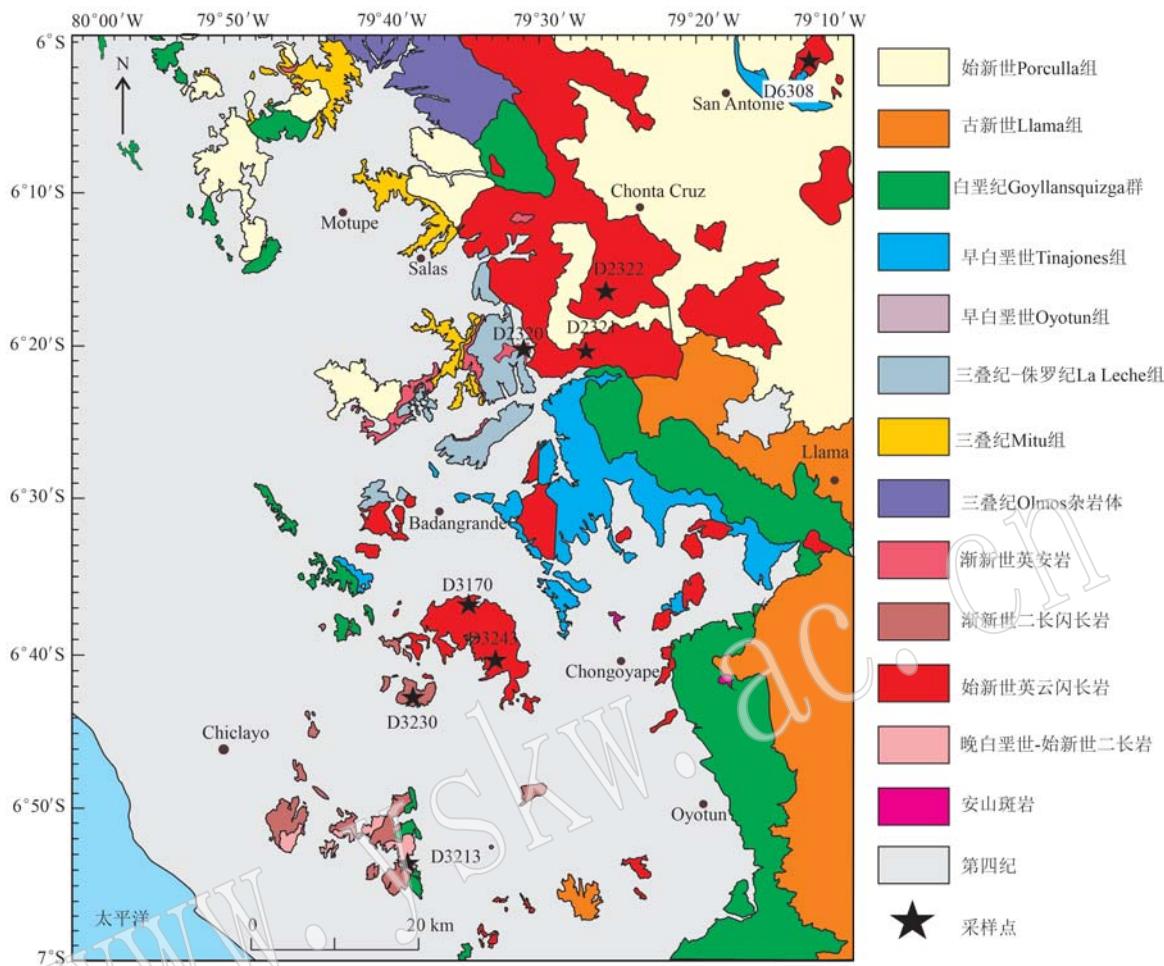


图2 秘鲁北部奇克拉约地区区域地质图及采样位置图(底图据郭维民等, 2016)<sup>①</sup>

Fig. 2 Geologic sketch map of Chicalyo area in northwestern Peru and the sampling site (modified after Guo Weimin et al., 2016)<sup>①</sup>

(7%~8%), 中粒结构, 块状构造, 岩石较新鲜。局部可见有少量花岗岩产出。本次研究的花岗岩(D2320)、英云闪长岩(D2321)、花岗闪长岩(D2322)样品(图4e)采自 Chonta Cruz 镇南部, 英云闪长岩(D6308)采自 Chonta Cruz 镇东北部。

### 3 分析方法

样品锆石分选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成, CL(阴极发光)图像分析在 JSM-6510 型扫描电子显微镜和 Gatan Mini CL 型阴极荧光光

谱仪上完成。锆石制靶在北京锆年领航科技有限公司完成, 锆石 U-Pb 同位素测年在中国地质大学(武汉)LA- ICP-MS 实验室完成。样品处理方法、测试方法和数据处理过程及质量要求等参照文献(Liu et al., 2008, 2010)。

全岩主量、微量元素分析在自然资源部华东矿产资源监督检测中心完成。主量元素采用 XFD-1500 测定, 分析精度一般优于 2%~3%; 微量和稀土元素在 Tenon 熔样罐熔样, 用 Finnigan MAT 公司生产的双聚焦高分辨 ICP-MS 测定, 检测限优于  $0.5 \times 10^{-9}$ , 相对标准偏差小于 5%(陈鹏国, 2017)。

<sup>①</sup> 郭维民等. 2016. 中秘地质填图合作项目“中秘合作秘鲁北部奇克拉约地区 1:25 万地质矿产调查”成果(未公开发表).

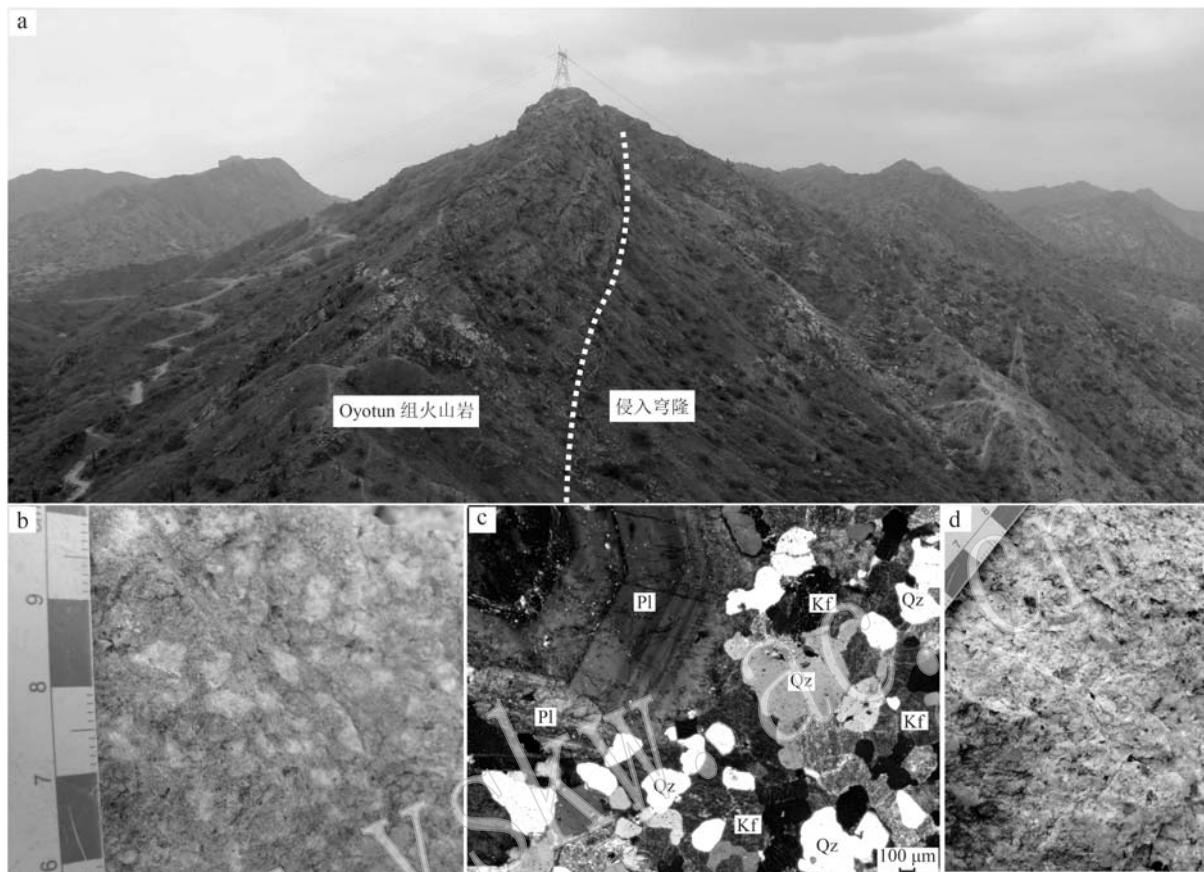


图 3 Patapo-La Cria 地区侵入穹窿野外及镜下照片

Fig. 3 Field and microscopic images of intrusions into the fornix in the Patapo-La Cria area

a—侵入穹窿与 Oyotun 组接触界线; b—花岗斑岩的斑状结构, 手标本; c—花岗斑岩主要矿物组成为斜长石(Pl)、石英(Qz)和钾长石(Kf), 正交偏光; d—中粗粒花岗岩呈灰白色, 具花岗结构, 手标本

a—invasion of the contact boundary between the vault and the Oyotun Formation; b—porphyritic texture of granitic porphyry, specimen; c—the main mineral compositions of granitic porphyry are plagioclase (Pl), quartz (Qz) and K-feldspar (Kf), crossed nicols; d—medium-coarse-grained granite, grey white, granite structure, specimen

## 4 分析结果

### 4.1 锆石 U-Pb 年代学

本文对采自 Patapo-La Cria 穹窿的花岗闪长斑岩(D3170)、二长花岗岩(D3230)和花岗岩(D3243)、Las Delicias-Mocupe 穹窿的花岗岩(D3213)和 Chonta Cruz 地区花岗岩(D2320)、英云闪长岩(D2321)、花岗闪长岩(D2322)和英云闪长岩(D6308)共 8 件侵入岩样品进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年。样品锆石呈无色、淡黄色, 透明-半透明, 自形程度较高, 多数为柱状晶体。锆石具有清晰的内部结构和典型岩浆成因的震荡环带, 表明其属于岩浆成因锆石, 锆石年龄可代表结晶年龄。锆石 U-Pb 年龄测试结果见表 1、

表 2 和表 3, 锆石 U-Pb 年龄谱见图 5 和图 6。Patapo-La Cria 穹窿和 Las Delicias-Mocupe 穹窿侵入岩的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  加权平均年龄为 53~47 Ma, Chonta Cruz 地区侵入岩的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  加权平均年龄为 36~28 Ma。

### 4.2 全岩地球化学

侵入岩样品的主量元素、微量元素和稀土元素分析结果见表 4。

#### 4.2.1 主量元素特征

本次 8 件侵入岩样品均显示高硅特征 ( $\text{SiO}_2$  含量为 63.87%~76.36%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 12.23%~15.42%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 2.48%~4.91%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 3.20%~4.16%, 除 2 个样品  $\text{Na}_2\text{O}$  含量略低于  $\text{K}_2\text{O}$  含量外 ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=0.74\sim0.80$ ), 其余样品  $\text{Na}_2\text{O}$  含量

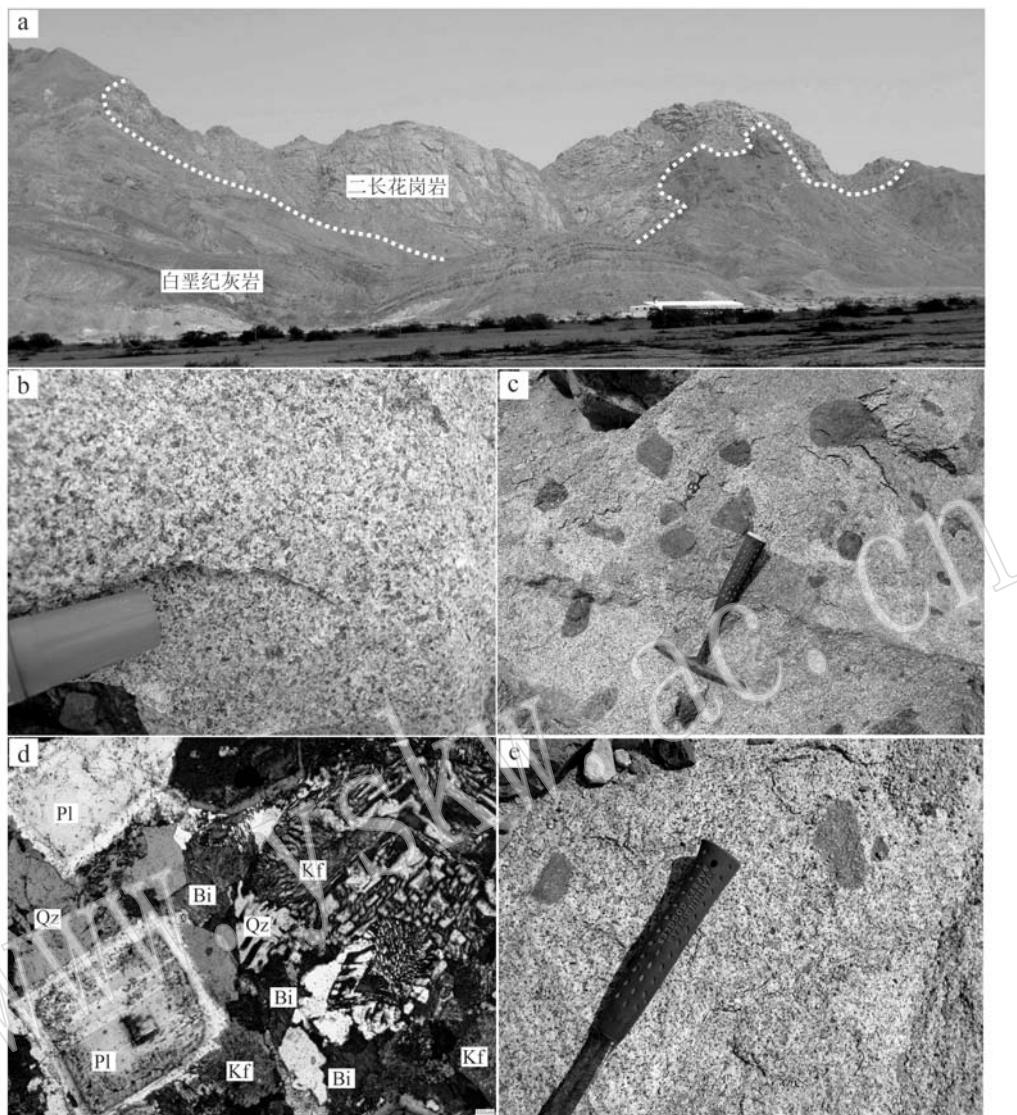


图 4 Las Delicias-Mocupe 地区和 Chonta Cruz 地区侵入岩野外及镜下照片

Fig. 4 Field and microscopic images of the intrusive rocks in Las Delicias-Mocupe area and Chonta Cruz area

a—Las Delicias-Mocupe 地区二长花岗岩侵入于白垩纪灰岩之中；b—Las Delicias-Mocupe 地区二长花岗岩标本；c—Las Delicias-Mocupe 地区二长闪长岩及其中的闪长质包体；d—Las Delicias-Mocupe 地区二长花岗岩主要矿物组成为钾长石(Kf)、斜长石(Pl)、石英(Qz)和黑云母(Bi)；e—Chonta Cruz 地区花岗闪长岩中的闪长质包体

a—monzogranite intruded into Cretaceous limestone in Las Delicias-Mocupe area; b—monzogranite in Las Delicias-Mocupe area; c—monzodiorite and diorite enclaves in Las Delicias-Mocupe area; d—granodiorite in Delicias-Mocupe area, the main mineral compositions of monzogranite are K-feldspar (kf), plagioclase (Pl), quartz (Qz) and biotite (Bi); e—dioritic enclaves in the granodiorite of Chonta Cruz area

均高于  $K_2O$  含量 ( $Na_2O/K_2O = 1.10 \sim 1.58$ )，相对富钠； $CaO$  含量为  $0.59\% \sim 4.94\%$ ，属钙碱性系列（图 7a）；铝饱和指数 ( $A/CNK = 0.89 \sim 1.07$ ) 均在 1.00 附近，属于准铝质（图 7b）。

在岩石分类图解中，采自 Patapo-La Cria 和 Las Delicias-Mocupe 地区穹窿的侵入岩样品投点多落在花岗岩区域，Chonta Cruz 地区样品多落入石英闪长

岩区域（图 8）。

#### 4.2.2 微量元素特征

在微量元素地幔标准化蛛网图上，两期侵入岩均相对富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K、U，亏损高场强元素 Nb、Ta、P 和 Ti（图 9a），表明其成因与板块俯冲作用有关（Kelemen *et al.*, 2007; 李奋其等, 2012; 李中会等, 2021）。 $Rb/Sr$  值平均为  $0.77 (0.29 \sim$

表 1 Patapo-La Cria穹窿侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析数据  
 Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating data of Patapo-La Cria dome intrusive rocks

续表1  
Continued Table 1

分析点号	$w_{\text{Bi}}/10^{-6}$			同位素比值						同位素年龄/Ma						
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	
TW3230-0-1-13	10.99	1 348.47	879.69	1.53	0.049 3	0.055 0	0.002 9	0.008 1	0.000 1	54	3	52	1	48	2	
TW3230-0-1-14	9.66	1 158.09	741.56	1.56	0.079 0	0.007 2	0.098 3	0.011 0	0.008 3	95	10	53	1	53	4	
TW3230-0-1-15	9.74	1 050.74	809.45	1.30	0.048 1	0.002 4	0.052 2	0.002 8	0.008 1	52	3	52	1	41	1	
TW3230-0-1-16	9.00	851.98	678.49	1.26	0.102 9	0.007 8	0.121 4	0.011 1	0.008 3	116	10	53	1	57	3	
TW3230-0-1-17	11.03	1 153.55	911.72	1.27	0.046 3	0.002 0	0.053 9	0.003 0	0.008 3	53	3	54	1	43	1	
TW3230-0-1-18	8.30	875.34	639.60	1.37	0.053 4	0.002 7	0.061 3	0.003 3	0.008 5	60	3	54	1	44	1	
TW3230-0-1-19	6.84	620.34	537.28	1.15	0.053 7	0.004 6	0.064 4	0.005 8	0.008 8	63	6	57	2	46	3	
TW3230-0-1-20	10.56	578.22	813.86	0.71	0.093 9	0.007 8	0.117 6	0.013 0	0.008 2	113	12	53	1	89	7	
TW3230-0-1-21	9.68	1 215.62	785.59	1.55	0.052 0	0.002 9	0.057 7	0.003 5	0.008 1	57	3	52	1	55	2	
TW3230-0-1-22	9.64	1 087.12	761.80	1.43	0.061 5	0.003 4	0.068 8	0.003 9	0.008 2	68	4	53	1	51	2	
TW3230-0-1-23	13.34	1 734.78	1 045.68	1.66	0.045 3	0.001 8	0.049 9	0.002 0	0.008 0	49	2	52	1	45	1	
TW3230-0-1-24	7.28	758.65	589.31	1.29	0.061 1	0.003 0	0.068 8	0.003 6	0.008 2	68	3	52	1	54	2	
花岗岩																
TW3243-0-1-01	15.34	243.48	639.37	0.38	0.230 8	0.026 4	1.784 2	0.298 7	0.023 9	0.003 0	1 040	109	152	19	1 882	297
TW3243-0-1-02	4.57	268.10	502.45	0.53	0.058 0	0.006 3	0.054 9	0.006 9	0.007 2	0.000 3	54	7	46	2	54	5
TW3243-0-1-03	6.24	254.25	761.40	0.33	0.054 0	0.003 3	0.054 5	0.003 2	0.007 5	0.000 2	54	3	48	1	73	5
TW3243-0-1-04	9.83	366.35	1 175.71	0.31	0.049 0	0.002 0	0.050 5	0.002 1	0.007 5	0.000 1	50	2	48	1	48	2
TW3243-0-1-05	9.54	391.81	1 076.91	0.36	0.049 6	0.002 4	0.053 7	0.002 7	0.007 9	0.000 2	53	3	51	1	50	3
TW3243-0-1-06	7.74	309.66	895.64	0.35	0.047 2	0.002 7	0.047 5	0.002 5	0.007 4	0.000 1	47	2	48	1	49	3
TW3243-0-1-07	16.59	812.90	1 961.46	0.41	0.049 8	0.002 6	0.051 7	0.003 3	0.007 4	0.000 2	51	3	48	1	51	3
TW3243-0-1-08	6.29	296.71	709.76	0.42	0.051 7	0.002 8	0.052 3	0.002 8	0.007 3	0.000 1	52	3	47	1	52	3
TW3243-0-1-09	3.63	137.72	423.42	0.33	0.054 3	0.003 9	0.051 7	0.003 3	0.007 2	0.000 2	51	3	46	1	59	5
TW3243-0-1-10	6.21	263.33	678.07	0.39	0.051 9	0.002 7	0.054 4	0.003 0	0.007 6	0.000 2	54	3	49	1	58	3
TW3243-0-1-11	4.41	129.49	510.67	0.25	0.052 2	0.003 0	0.055 3	0.003 2	0.007 9	0.000 2	55	3	51	1	59	4
TW3243-0-1-12	11.44	450.16	1 295.18	0.35	0.047 4	0.002 3	0.049 9	0.002 5	0.007 6	0.000 1	49	2	49	1	48	3
TW3243-0-1-13	3.40	168.50	363.55	0.46	0.067 0	0.006 7	0.069 5	0.008 0	0.007 4	0.000 3	68	8	47	2	70	8
TW3243-0-1-14	6.25	215.96	538.57	0.40	0.144 1	0.013 0	0.145 5	0.014 8	0.007 2	0.000 3	138	13	46	2	126	11
TW3243-0-1-15	4.26	185.60	447.97	0.41	0.051 3	0.003 1	0.055 7	0.003 5	0.007 9	0.000 2	55	3	51	1	62	4
TW3243-0-1-16	4.94	189.53	560.37	0.34	0.051 8	0.003 5	0.055 5	0.003 9	0.007 8	0.000 2	55	4	50	1	55	4
TW3243-0-1-17	8.47	335.98	910.59	0.37	0.047 4	0.002 4	0.050 8	0.002 7	0.007 8	0.000 2	50	3	50	1	52	3
TW3243-0-1-18	7.30	343.68	757.66	0.45	0.052 8	0.002 9	0.056 3	0.002 9	0.007 9	0.000 2	56	3	51	1	48	3
TW3243-0-1-19	7.55	320.27	832.39	0.38	0.054 7	0.002 5	0.056 1	0.002 6	0.007 5	0.000 2	55	3	48	1	52	3
TW3243-0-1-20	9.56	422.47	1 021.25	0.41	0.053 3	0.003 1	0.055 6	0.002 9	0.007 8	0.000 2	55	3	50	1	51	3
TW3243-0-1-21	5.63	235.74	616.07	0.38	0.055 0	0.003 0	0.057 2	0.003 2	0.007 6	0.000 1	56	3	49	1	56	3
TW3243-0-1-22	2.71	147.94	283.48	0.52	0.061 9	0.005 1	0.060 7	0.004 8	0.007 6	0.000 3	60	5	49	2	63	4
TW3243-0-1-23	4.75	182.02	510.38	0.36	0.074 7	0.004 3	0.076 1	0.004 5	0.007 5	0.000 2	74	4	48	1	69	5
TW3243-0-1-24	1.68	96.77	184.15	0.53	0.097 8	0.010 1	0.081 3	0.006 1	0.007 3	0.000 3	79	6	47	2	65	5

表 2 Las Delicias-Mocupe穹窿二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析数据  
 Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating data of Las Delicias-Mocupe dome monzonitic granite

分析点号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$			同位素比值			同位素年龄/Ma					
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$
<b>二长花岗岩</b>												
TW3213-0-2-01	2.85	165.03	268.70	0.61	0.0624	0.0057	0.0629	0.0054	0.0077	0.0003	62	5
TW3213-0-2-02	2.42	126.90	232.97	0.54	0.0705	0.0060	0.0727	0.0055	0.0078	0.0002	71	5
TW3213-0-2-03	1.32	73.26	128.33	0.57	0.1025	0.0137	0.0902	0.0094	0.0075	0.0003	88	9
TW3213-0-2-04	1.91	100.13	197.51	0.51	0.0706	0.0078	0.0679	0.0050	0.0078	0.0003	67	5
TW3213-0-2-05	3.79	341.21	353.04	0.97	0.0659	0.0076	0.0631	0.0069	0.0073	0.0002	62	7
TW3213-0-2-06	25.07	255.87	405.29	0.63	0.4044	0.0353	212.0636	56.3631	1.8260	0.4989	5444	275
TW3213-0-2-07	2.74	165.23	266.56	0.62	0.0695	0.0047	0.0732	0.0054	0.0079	0.0003	72	6
TW3213-0-2-08	1.71	98.22	177.25	0.55	0.0775	0.0112	0.0686	0.0087	0.0072	0.0003	67	8
TW3213-0-2-09	2.82	183.59	283.01	0.65	0.0661	0.0058	0.0639	0.0047	0.0076	0.0002	63	4
TW3213-0-2-10	4.32	291.60	378.55	0.77	0.0712	0.0063	0.0727	0.0066	0.0075	0.0002	71	6
TW3213-0-2-11	2.15	128.89	212.49	0.61	0.0696	0.0086	0.0703	0.0076	0.0077	0.0003	69	7
TW3213-0-2-12	1.80	107.20	176.52	0.61	0.0831	0.0063	0.0839	0.0058	0.0077	0.0003	82	5
TW3213-0-2-13	1.17	59.95	115.92	0.52	0.1191	0.0148	0.1125	0.0107	0.0076	0.0003	108	10
TW3213-0-2-14	0.98	52.09	95.22	0.55	0.1830	0.0226	0.1677	0.0184	0.0076	0.0004	157	16
TW3213-0-2-15	3.49	258.64	339.34	0.76	0.0567	0.0039	0.0576	0.0037	0.0076	0.0002	57	4
TW3213-0-2-16	2.37	111.73	233.50	0.48	0.0595	0.0069	0.0577	0.0048	0.0077	0.0003	57	5
TW3213-0-2-17	1.56	75.93	155.71	0.49	0.1153	0.0205	0.1019	0.0107	0.0077	0.0003	99	10
TW3213-0-2-18	1.53	96.00	158.04	0.61	0.1062	0.0102	0.0949	0.0069	0.0075	0.0003	92	6
TW3213-0-2-19	2.49	159.75	249.09	0.64	0.0831	0.0093	0.0795	0.0088	0.0073	0.0002	78	8
TW3213-0-2-20	3.44	200.87	333.55	0.60	0.0586	0.0051	0.0589	0.0045	0.0077	0.0002	58	4
TW3213-0-2-21	2.54	129.48	208.33	0.62	0.1171	0.0104	0.1261	0.0117	0.0078	0.0003	121	11
TW3213-0-2-22	2.61	136.53	263.31	0.52	0.0734	0.0079	0.0717	0.0066	0.0076	0.0003	70	6
TW3213-0-2-23	5.20	406.98	477.90	0.85	0.0682	0.0049	0.0716	0.0055	0.0076	0.0002	70	5
TW3213-0-2-24	4.08	273.93	362.50	0.76	0.0724	0.0077	0.0760	0.0068	0.0075	0.0003	74	6

表3 Chonta Cruz 地区侵入岩 LA-ICP-MS 锌石 U-Th-Pb 分析数据  
Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating data of Chonta Cruz area intrusive rocks

分析点号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$			同位素比值						同位素年龄/Ma				
	Pb	Th	U	$\text{Th}/\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$
花岗岩														
TW2320-0-1-01	2.04	195.75	252.90	0.77	0.132 9	0.013 8	0.087 6	0.010 7	0.004 7	0.000 3	85	10	30	2
TW2320-0-1-02	2.58	317.93	363.04	0.88	0.093 0	0.012 8	0.053 3	0.006 1	0.004 5	0.000 2	53	6	29	1
TW2320-0-1-03	2.17	287.10	298.18	0.96	0.080 8	0.011 1	0.049 7	0.006 7	0.004 6	0.000 2	49	6	30	1
TW2320-0-1-04	2.34	327.95	362.98	0.90	0.086 0	0.009 0	0.048 4	0.006 0	0.004 4	0.000 2	48	6	28	1
TW2320-0-1-05	7.57	266.57	331.15	0.81	0.418 2	0.025 6	0.437 7	0.035 6	0.007 5	0.000 4	369	25	48	2
TW2320-0-1-06	1.80	131.32	226.33	0.58	0.170 9	0.039 6	0.083 8	0.011 0	0.004 6	0.000 3	82	10	29	2
TW2320-0-1-07	2.30	293.48	353.16	0.83	0.070 4	0.011 4	0.037 6	0.005 0	0.004 2	0.000 2	37	5	27	1
TW2320-0-1-08	1.87	210.46	289.94	0.73	0.103 4	0.022 4	0.055 8	0.012 7	0.004 1	0.000 2	55	12	27	2
TW2320-0-1-09	1.05	100.97	172.05	0.59	0.080 1	0.008 0	0.049 2	0.004 7	0.004 7	0.000 2	49	5	30	1
TW2320-0-1-10	1.71	203.59	282.11	0.72	0.072 9	0.008 3	0.036 8	0.003 3	0.004 2	0.000 2	37	3	27	1
TW2320-0-1-11	1.91	294.17	272.82	1.08	0.085 7	0.009 6	0.053 4	0.006 2	0.004 8	0.000 2	53	6	31	1
TW2320-0-1-12	1.50	165.40	237.07	0.70	0.097 7	0.010 8	0.061 1	0.006 9	0.004 6	0.000 2	60	7	30	1
TW2320-0-1-13	1.57	130.83	250.48	0.52	0.133 9	0.026 4	0.076 8	0.018 2	0.004 3	0.000 2	75	17	28	1
TW2320-0-1-14	5.81	1 001.34	807.86	1.24	0.050 3	0.005 8	0.031 0	0.003 5	0.004 6	0.000 1	31	3	30	1
TW2320-0-1-15	1.15	79.07	180.84	0.44	0.121 1	0.018 0	0.067 3	0.007 7	0.004 7	0.000 3	66	7	30	2
TW2320-0-1-16	3.97	490.57	539.26	0.91	0.121 7	0.020 4	0.076 6	0.015 2	0.004 6	0.000 4	75	14	30	2
TW2320-0-1-17	1.56	112.60	154.89	0.73	0.206 7	0.021 9	0.131 3	0.009 3	0.005 6	0.000 3	125	8	36	2
TW2320-0-1-18	81.19	15 371.74	8 329.02	1.85	0.152 3	0.015 2	0.089 2	0.011 9	0.004 1	0.000 2	87	11	27	2
TW2320-0-1-19	1.93	230.00	310.91	0.74	0.060 9	0.007 3	0.037 1	0.003 5	0.004 7	0.000 3	37	3	31	2
TW2320-0-1-20	3.41	421.10	484.17	0.87	0.084 5	0.008 1	0.052 9	0.005 0	0.004 7	0.000 2	52	5	30	1
TW2320-0-1-21	1.93	193.87	279.07	0.69	0.134 5	0.022 8	0.071 4	0.012 8	0.004 4	0.000 4	70	12	28	2
TW2320-0-1-22	1.52	120.69	213.81	0.56	0.190 3	0.048 7	0.093 7	0.011 5	0.004 3	0.000 3	91	11	28	2
TW2320-0-1-23	8.71	384.89	467.05	0.82	0.373 3	0.045 5	0.342 5	0.042 1	0.006 7	0.000 3	299	32	43	2
TW2320-0-1-24	57.50	17 649.26	6 226.63	2.83	0.133 0	0.030 1	0.089 3	0.028 3	0.004 3	0.000 2	87	26	27	1
英云闪长岩														
TW2321-0-1-01	0.91	82.86	110.93	0.75	0.20	0.03	0.09	0.01	0.00	0.00	89	6	32	2
TW2321-0-1-02	0.93	84.09	100.47	0.84	0.20	0.04	0.10	0.01	0.01	0.00	97	10	34	2
TW2321-0-1-03	0.70	71.50	85.74	0.83	0.22	0.03	0.10	0.01	0.01	0.00	98	8	33	2
TW2321-0-1-04	0.94	125.13	111.09	1.13	0.21	0.02	0.10	0.01	0.00	0.00	95	6	31	2
TW2321-0-1-05	1.31	154.07	136.51	1.13	0.16	0.04	0.10	0.02	0.01	0.00	96	15	33	2
TW2321-0-1-06	1.14	84.40	96.22	0.88	0.21	0.03	0.12	0.01	0.00	0.00	117	13	31	2
TW2321-0-1-07	1.34	87.49	114.36	0.76	0.31	0.03	0.21	0.02	0.01	0.00	193	18	34	1

续表 3-1  
Continued Table 3-1

分析点号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$			同位素比值						同位素年龄/Ma			
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$
TW2321-0-1-08	8.79	1537.33	757.31	2.03	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	31	2	32	1
TW2321-0-1-09	1.51	163.57	155.01	1.06	0.15	0.02	0.10	0.01	0.00	97	11	33	1
TW2321-0-1-10	0.98	112.84	112.51	1.00	0.23	0.06	0.10	0.01	0.00	96	10	31	2
TW2321-0-1-11	3.99	427.84	326.57	1.31	0.13	0.01	0.10	0.01	0.00	93	9	35	1
TW2321-0-1-12	1.61	154.52	150.92	1.02	0.13	0.01	0.09	0.01	0.00	91	7	36	1
TW2321-0-1-13	3.98	166.34	520.29	0.32	0.09	0.01	0.06	0.00	0.01	61	3	32	1
TW2321-0-1-14	1.75	195.12	174.09	1.12	0.18	0.02	0.10	0.01	0.00	93	8	30	1
TW2321-0-1-15	0.63	67.08	83.66	0.80	0.23	0.04	0.10	0.01	0.00	98	9	29	2
TW2321-0-1-16	0.51	58.26	68.93	0.85	0.19	0.03	0.10	0.01	0.00	96	11	33	2
花岗闪长岩													
TW2322-0-1-01	3.15	134.08	175.23	0.77	0.258	0.023	1	0.271	0.036	9	0.006	4	0.000
TW2322-0-1-02	2.39	192.14	217.34	0.88	0.236	0.020	2	0.182	0.016	9	0.005	2	0.000
TW2322-0-1-03	1.65	193.75	225.57	0.86	0.121	0.011	5	0.083	0.014	5	0.004	7	0.000
TW2322-0-1-04	1.81	258.41	265.62	0.97	0.088	0.008	0	0.048	0.004	1	0.004	4	0.000
TW2322-0-1-05	1.96	234.10	222.51	1.05	0.179	0.021	5	0.111	0.013	1	0.004	8	0.000
TW2322-0-1-06	3.16	283.61	372.76	0.76	0.144	0.010	4	0.086	0.005	3	0.004	8	0.000
TW2322-0-1-07	0.83	66.96	145.02	0.46	0.163	0.025	1	0.080	0.009	4	0.004	5	0.000
TW2322-0-1-08	1.17	128.35	169.44	0.76	0.127	0.013	7	0.065	0.006	7	0.004	5	0.000
TW2322-0-1-09	3.36	509.50	494.68	1.03	0.062	0.005	0	0.036	0.002	6	0.004	4	0.000
TW2322-0-1-10	1.08	92.97	102.10	0.91	0.304	0.060	3	0.156	0.013	5	0.005	0	0.000
TW2322-0-1-11	3.14	245.53	278.43	0.88	0.190	0.017	3	0.167	0.023	3	0.005	4	0.000
TW2322-0-1-12	0.89	138.56	130.56	1.06	0.205	0.032	8	0.103	0.010	2	0.004	4	0.000
TW2322-0-1-13	1.92	238.42	255.71	0.93	0.117	0.014	0	0.065	0.005	1	0.004	8	0.000
TW2322-0-1-14	1.63	189.46	212.39	0.89	0.107	0.012	9	0.055	0.004	0	0.004	7	0.000
TW2322-0-1-15	3.38	634.01	483.51	1.31	0.061	0.004	7	0.033	0.002	4	0.004	3	0.000
TW2322-0-1-16	1.58	169.19	224.58	0.75	0.111	0.013	4	0.062	0.005	2	0.004	6	0.000
TW2322-0-1-17	2.10	262.67	289.14	0.91	0.096	0.008	6	0.054	0.004	2	0.004	7	0.000
TW2322-0-1-18	2.75	361.81	293.66	1.23	0.167	0.020	9	0.109	0.013	4	0.005	0	0.000
TW2322-0-1-19	2.16	250.70	294.56	0.85	0.077	0.005	7	0.049	0.003	3	0.004	9	0.000
TW2322-0-1-20	2.47	407.75	318.54	1.28	0.078	0.006	2	0.048	0.003	3	0.004	7	0.000
TW2322-0-1-21	2.31	314.29	347.16	0.91	0.075	0.008	3	0.042	0.003	1	0.004	5	0.000
TW2322-0-1-22	2.25	324.93	301.87	1.08	0.074	0.007	4	0.043	0.003	9	0.004	7	0.000
TW2322-0-1-23	3.41	418.05	555.40	0.75	0.063	0.004	7	0.036	0	0.002	1	0.004	4
TW2322-0-1-24	1.57	88.38	271.78	0.33	0.094	0.011	1	0.055	0.005	7	0.004	6	0.000

## 岩石矿物学杂志

续表 3-2  
Continued Table 3-2

分析点号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$			同位素比值			同位素年龄/Ma				
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$
英云闪长岩											
TW6308-0-1-01	7.22	366.40	1 107.15	0.33	0.049 5	0.002 5	0.036 1	0.001 7	0.005 4	0.000 1	36
TW6308-0-1-02	4.81	333.32	688.39	0.48	0.052 3	0.002 9	0.038 4	0.002 1	0.005 4	0.000 1	38
TW6308-0-1-03	4.49	199.26	674.62	0.30	0.058 4	0.003 6	0.042 3	0.002 4	0.005 4	0.000 1	42
TW6308-0-1-04	5.57	278.00	870.41	0.32	0.047 1	0.002 4	0.035 0	0.001 8	0.005 4	0.000 1	35
TW6308-0-1-05	4.12	233.71	573.77	0.41	0.055 8	0.003 4	0.042 4	0.002 5	0.005 6	0.000 1	42
TW6308-0-1-06	5.32	355.10	751.29	0.47	0.051 5	0.006 3	0.038 2	0.004 6	0.005 6	0.000 2	38
TW6308-0-1-07	6.01	383.09	828.37	0.46	0.062 7	0.003 5	0.047 6	0.002 7	0.005 6	0.000 1	47
TW6308-0-1-08	3.56	183.84	517.09	0.36	0.060 7	0.006 5	0.042 2	0.003 5	0.005 8	0.000 2	42
TW6308-0-1-09	3.87	155.62	578.03	0.27	0.054 7	0.003 5	0.043 1	0.002 7	0.006 0	0.000 2	43
TW6308-0-1-10	3.48	232.55	487.44	0.48	0.048 8	0.003 2	0.037 2	0.002 3	0.005 8	0.000 1	37
TW6308-0-1-11	11.11	619.83	1 674.70	0.37	0.045 4	0.001 9	0.035 1	0.001 5	0.005 7	0.000 1	35
TW6308-0-1-12	2.81	244.88	372.00	0.66	0.066 9	0.005 3	0.047 5	0.003 1	0.005 6	0.000 2	47
TW6308-0-1-13	7.67	590.69	1 114.63	0.53	0.050 2	0.003 0	0.036 7	0.001 8	0.005 6	0.000 2	37
TW6308-0-1-14	6.24	340.51	882.30	0.39	0.057 2	0.003 8	0.041 9	0.002 4	0.005 6	0.000 1	42
TW6308-0-1-15	7.98	679.95	1 117.53	0.61	0.053 8	0.002 6	0.041 2	0.002 1	0.005 6	0.000 1	41
TW6308-0-1-16	5.07	300.46	716.93	0.42	0.059 8	0.003 4	0.044 5	0.002 4	0.005 5	0.000 1	36
TW6308-0-1-17	15.95	788.35	2 399.61	0.33	0.043 9	0.001 7	0.034 0	0.001 4	0.005 6	0.000 1	34
TW6308-0-1-18	2.57	177.19	353.07	0.50	0.073 0	0.006 6	0.054 9	0.004 0	0.005 7	0.000 2	54
TW6308-0-1-19	5.42	284.11	791.70	0.36	0.055 3	0.003 4	0.043 4	0.002 8	0.005 6	0.000 1	43
TW6308-0-1-20	6.40	388.95	952.25	0.41	0.050 0	0.002 8	0.037 0	0.002 0	0.005 5	0.000 1	37
TW6308-0-1-21	6.22	480.18	845.40	0.57	0.050 2	0.002 9	0.038 9	0.002 1	0.005 8	0.000 1	39
TW6308-0-1-22	8.32	669.45	1 173.18	0.57	0.049 5	0.002 3	0.038 2	0.001 8	0.005 6	0.000 1	38
TW6308-0-1-23	5.69	264.22	824.56	0.32	0.060 1	0.003 5	0.046 1	0.002 6	0.005 6	0.000 1	46
TW6308-0-1-24	3.38	159.93	458.23	0.35	0.048 6	0.004 7	0.037 7	0.003 5	0.006 0	0.000 2	38

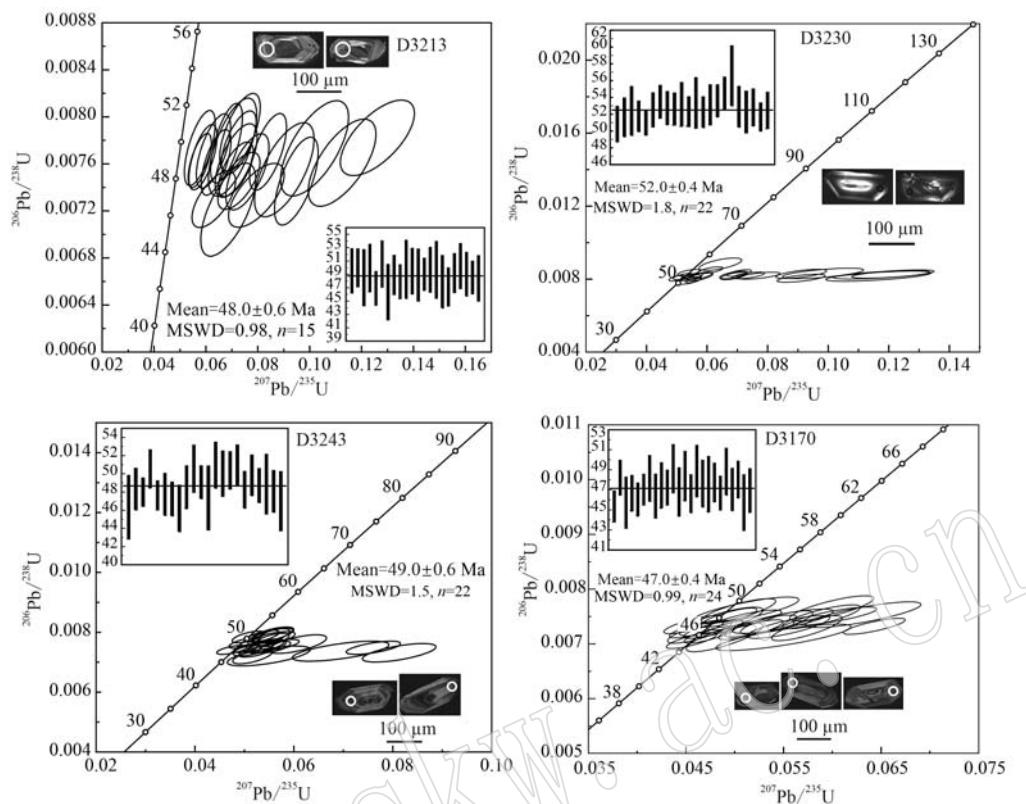


图 5 Patapo-La Cria 和 Las Delicias-Mocupe 穹窿侵入岩样品锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 U-Pb concordia diagram of the zircons from the intrusive rock in the Patapo-La Cria and Las Delicias-Mocupe areas

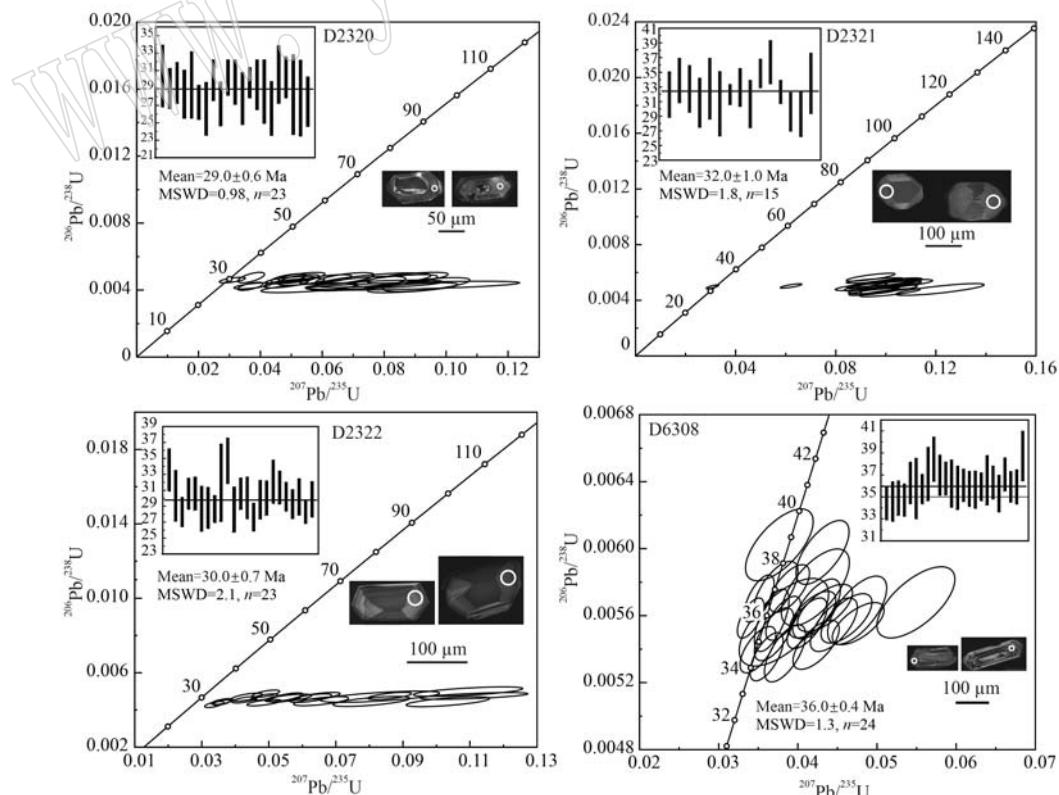


图 6 Chonta Cruz 地区侵入岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 U-Pb concordia diagram of the zircons from the intrusive rock in the Chonta Cruz area

表4 侵入岩的主量元素( $w_B/\%$ )、微量元素和稀土元素( $w_B/10^{-6}$ )分析结果Table 4 Major elements ( $w_B/\%$ ), rare elements and rare earth elements ( $w_B/10^{-6}$ ) analysis results of the intrusive rocks

样品	YH2320	YH2321	YH2322	YH6308	YH3170	YH3213	YH3243	YH3230
岩石类型	花岗岩	英云闪长岩	花岗闪长岩	英云闪长岩	花岗斑岩	二长花岗岩	中细粒花岗岩	二长花岗岩
SiO <sub>2</sub>	76.02	65.85	63.87	68.11	74.609	70.82	76.36	66.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.23	14.72	15.12	15.42	13.12	13.81	12.40	14.72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	0.88	1.57	2.07	1.25	0.90	1.31	0.43	2.02
FeO	0.68	3.16	3.18	2.60	0.93	1.85	0.58	2.70
CaO	0.70	4.19	4.94	3.06	1.16	2.68	0.59	3.43
MgO	0.12	2.17	2.68	1.00	0.34	0.97	0.19	1.38
K <sub>2</sub> O	4.53	2.89	2.48	2.63	3.38	2.92	4.91	2.84
Na <sub>2</sub> O	3.66	3.20	3.24	4.16	3.97	3.98	3.66	4.18
TiO <sub>2</sub>	0.15	0.67	0.74	0.30	0.17	0.33	0.07	0.71
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.11	0.12	0.14	0.07	0.07	0.04	0.18
MnO	0.06	0.12	0.10	0.14	0.08	0.08	0.07	0.15
烧失量	0.44	0.86	0.96	0.69	0.72	0.70	0.23	0.67
总量	99.49	99.51	99.50	99.50	99.45	99.52	99.53	99.45
Cu	3.53	35.80	33.60	3.75	5.26	6.83	2.64	19.30
Pb	9.51	16.40	11.80	10.70	12.00	12.50	17.30	14.50
Zn	22.30	62.20	44.00	36.30	43.40	32.70	18.70	70.70
Cr	14.50	30.70	44.80	12.80	11.70	23.40	16.30	21.80
Ni	2.57	13.30	19.40	3.04	3.10	4.67	4.02	5.53
Co	2.76	12.90	14.00	5.56	2.43	8.10	2.14	7.47
Cd	0.10	0.12	0.05	0.01	0.16	0.13	0.27	0.14
Li	8.99	25.00	14.40	20.50	18.10	34.10	14.50	22.50
Rb	123.00	115.00	159.00	81.80	71.40	74.70	78.30	179.00
Cs	3.14	8.72	6.00	3.77	3.90	4.38	2.40	6.10
W	1.22	5.61	1.40	0.16	0.48	1.07	0.17	0.19
Mo	1.42	4.19	1.30	0.43	0.57	19.70	0.88	1.00
Bi	0.22	0.25	0.15	0.02	0.02	0.12	0.02	0.05
Sr	106.00	216.00	249.00	284.00	101.00	155.00	54.70	203.00
Ba	827.00	498.00	484.00	758.00	874.00	692.00	659.00	771.00
V	5.27	92.40	76.90	31.20	13.20	53.90	6.20	82.10
Sc	4.86	14.60	16.60	5.00	4.84	9.07	3.64	14.50
Nb	11.10	8.43	8.50	8.04	8.75	7.40	5.30	13.40
Ta	0.91	0.65	0.61	0.72	0.95	0.68	1.02	0.95
Zr	132.00	193.00	173.00	96.70	92.70	120.00	69.30	236.00
Hf	3.90	5.50	5.00	2.70	2.90	3.90	2.20	6.40
Be	1.90	1.13	1.00	1.75	2.09	1.34	1.63	1.65
Ga	14.00	15.60	15.60	14.70	13.50	14.10	11.10	16.40
Sn	3.14	2.57	2.10	1.52	1.47	1.55	0.64	2.40
U	2.79	2.47	2.50	1.69	2.63	3.83	2.22	2.58
Th	17.90	11.40	12.40	9.33	13.40	13.00	12.90	12.70
La	47.50	34.30	37.40	35.50	37.40	32.60	23.40	46.80
Ce	63.70	62.50	80.60	67.70	68.00	64.40	47.10	59.20
Pr	8.97	7.07	7.20	5.66	5.36	5.37	3.79	8.83
Nd	33.40	27.90	28.10	20.80	18.30	19.70	13.10	34.30
Sm	6.97	6.12	6.10	4.29	3.48	4.16	2.95	7.49
Eu	0.83	0.95	0.98	1.01	0.70	0.79	0.36	1.41
Gd	5.59	4.89	4.90	3.46	2.95	3.49	2.55	6.08
Tb	1.02	0.90	0.88	0.60	0.49	0.64	0.48	1.11
Dy	5.84	5.03	4.80	3.33	2.65	3.60	2.90	6.20
Ho	1.20	1.00	0.96	0.69	0.53	0.75	0.62	1.26
Er	3.46	2.79	2.70	2.01	1.57	2.17	1.85	3.53
Tm	0.58	0.46	0.42	0.35	0.27	0.38	0.34	0.57
Yb	3.83	3.01	2.80	2.39	1.85	2.58	2.37	3.81
Lu	0.55	0.44	0.40	0.38	0.30	0.39	0.38	0.56
Y	33.40	27.50	25.90	19.60	15.30	20.80	17.50	33.60

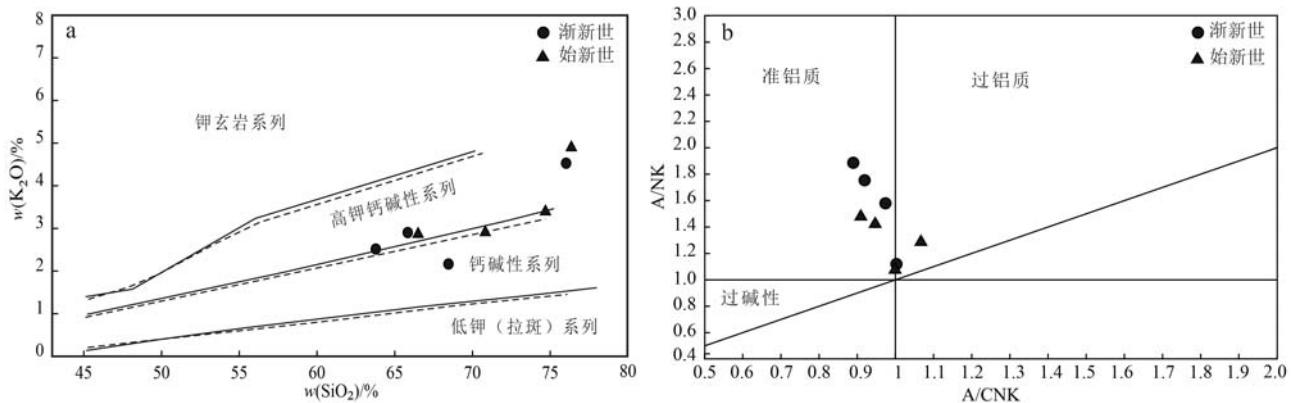
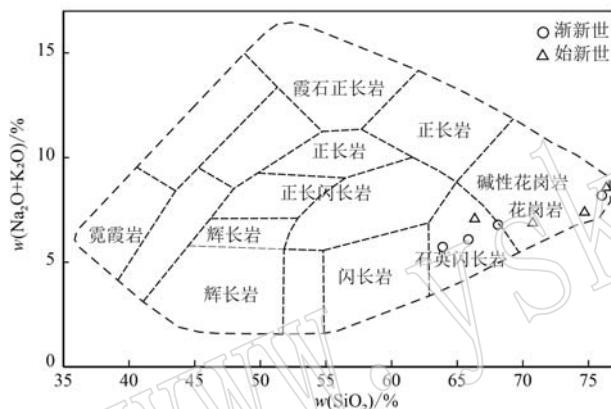
图 7 工作区侵入岩  $K_2O$ - $SiO_2$  图解(a)及  $A/NK$ - $A/CNK$  图解(b)Fig. 7  $K_2O$ - $SiO_2$  diagram (a) and  $A/NK$ - $A/CNK$  diagram (b) of the intrusive rocks

图 8 闪长岩岩石分类图解

Fig. 8 Rock classification diagram of diorite

1.43), 显著高于原始地幔 (0.03) 和 OIB (0.047) 的  $Rb/Sr$  值, 与壳源岩浆范围一致 ( $>0.5$ ) (Wu *et al.*, 2007), 其  $Th/U$  值为 3.39~6.42 (平均值为 5.09), 接近下地壳  $Th/U$  值 (约为 6) (Rudnick and Gao, 2004)。但样品较高的  $La/Nb$  值 (3.49~4.42)、 $La/Ta$  值 (22.94~61.31) 和低的  $La/Ba$  值 (0.04~0.08) 显示出受俯冲作用改造后的岩石圈地幔源区的特征 (图 10a, Saunders *et al.*, 1992)。A/MF-C/MF 图解中, 则多数样品落入基性岩的部分熔融区域 (图 10b)。

球粒陨石标准化稀土元素配分模式中, 总体轻微右倾, 轻重稀土元素比值 LREE/HREE 为 2.79~5.14, 表现出轻稀土元素较重稀土元素轻微富集, 轻稀土元素分馏程度强于重稀土元素,  $(La/Sm)_N = 3.53~6.76$ ,  $(Gd/Yb)_N = 0.87~1.41$ ; Eu 呈现弱负异常 ( $\delta Eu = 0.39~0.78$ ), Ce 轻微负异常至无明显异常 ( $\delta Ce = 0.66~1.11$ ) (图 9b)。

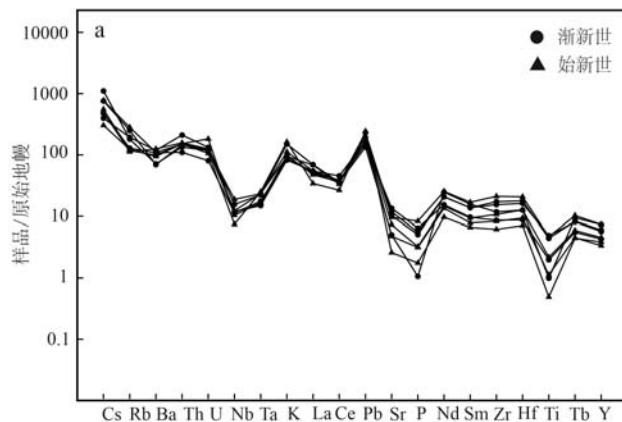
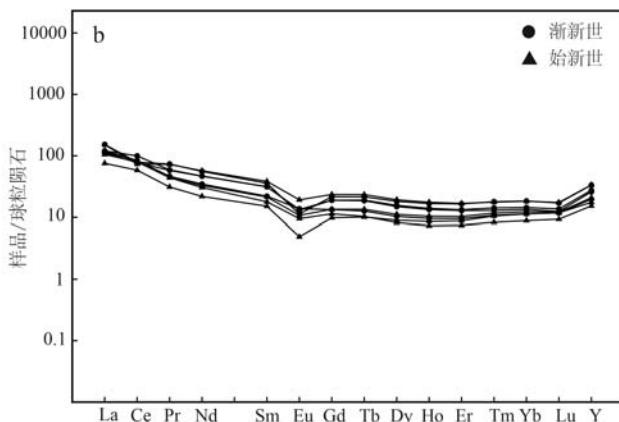


图 9 侵入岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(b)

Fig. 9 Primitive mantle-normalized trace element spidergram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) for the intrusive rocks



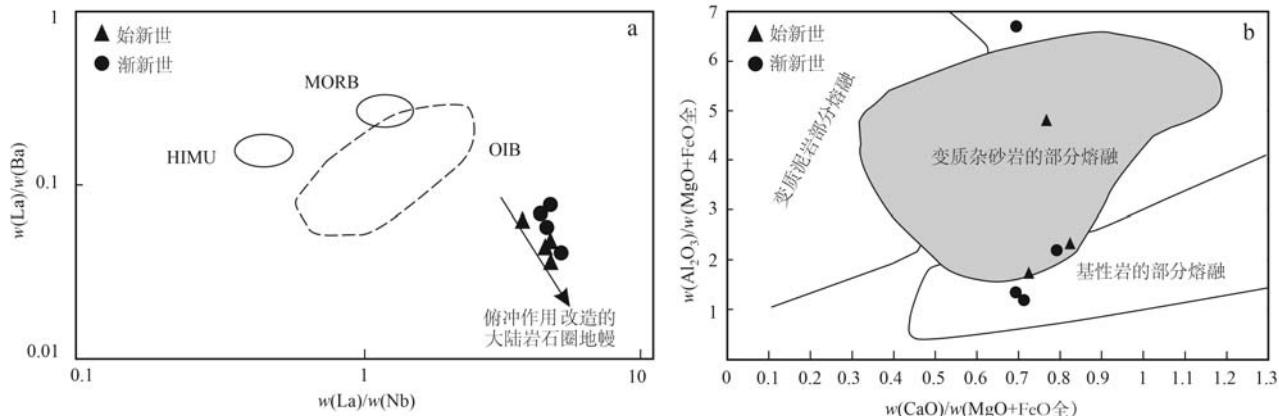


图 10 侵入岩 La/Ba-La/Nb 图解(a)和 A/MF-C/MF 图解(b)

Fig. 10 La/Ba-La/Nb and A/MF-C/MF diagrams of the intrusive rocks

## 5 讨论

### 5.1 岩浆侵位时代

秘鲁海岸岩基带中南部的 Lima 段、Arequipa 段和 Toquepala 段 50 个深成岩体的锆石 U-Pb 年龄测定,显示海岸岩基的岩浆活动时限范围非常长,从 188 Ma 持续至 37 Ma (Mukasa, 1986; Boekhout *et al.*, 2012; Demouy *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2019)。其中,侏罗纪的岩体主要分布在南部 Arequipa 段。对于 Arequipa 地区的岩体进行进一步解剖,将 Arequipa 段岩浆侵入活动分为 200~152 Ma 和 110~60 Ma 两个时期 (Boekhout *et al.*, 2012; Demouy *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2019)。与南部海岸岩基不同,中部 Lima 段岩浆活动主要集中在 3 个时期,分别为 105~101 Ma、91~82 Ma (Wilson, 1975; Mukasa, 1986) 和 73~62 Ma (Cobbing *et al.*, 1981; Mukasa, 1986),缺乏侏罗纪的岩浆活动记录。

本文研究区位于 Trujillo 段北部,侵入岩样品年龄自西向东呈现逐渐变新的特点,西部岩体以穹隆产出并侵入早白垩世 Oyotun 组 (139~131 Ma, Duan *et al.*, 2022) 中,样品锆石 U-Pb 年龄在 52~47 Ma 之间。东部侵入岩侵入于古新世 Llama 组火山岩和始新世 Porculla 组火山岩之中,其锆石 U-Pb 年龄在 36~28 Ma 之间。侵入岩出露位置及年龄特征显示出从始新世至渐新世,岩浆活动自西向东部发生了迁移。同时,与秘鲁海岸岩基带中部 Lima 段以及南部 Arequipa 段相比,Trujillo 段北部缺乏侏罗纪和晚白垩世的岩浆活动记录,反映出虽然秘鲁海岸岩基

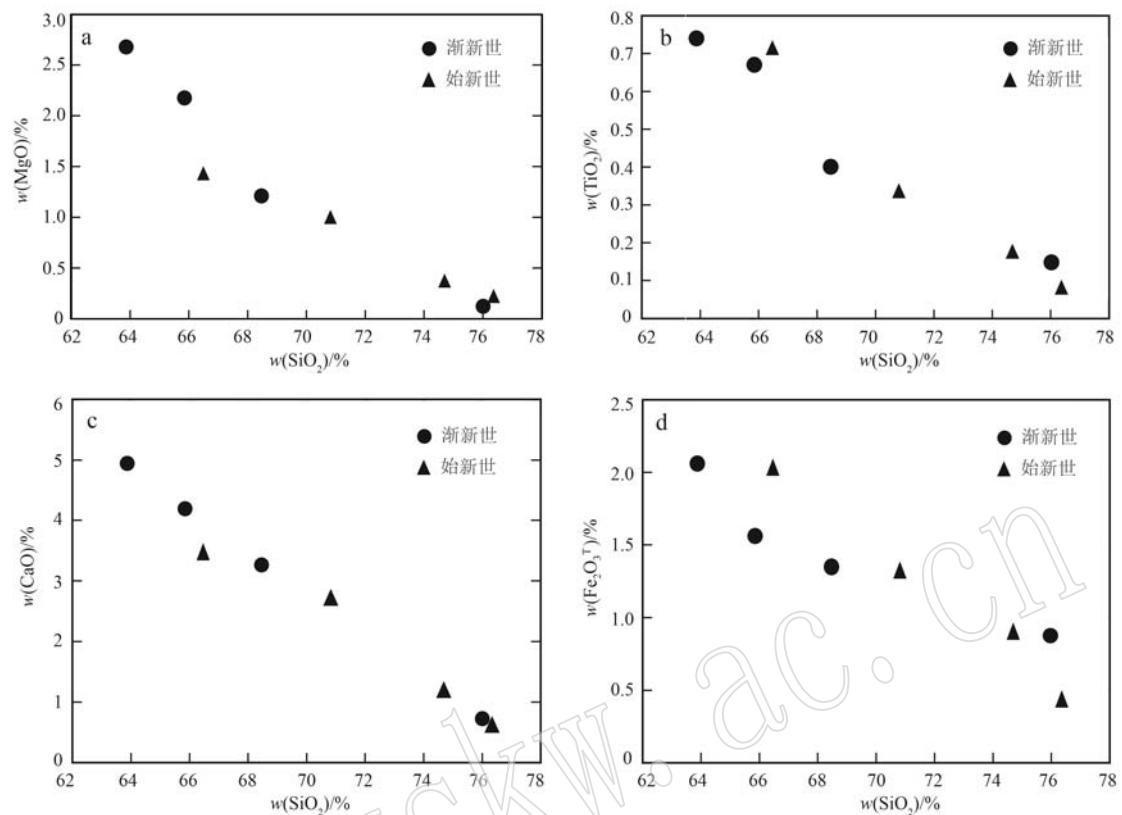
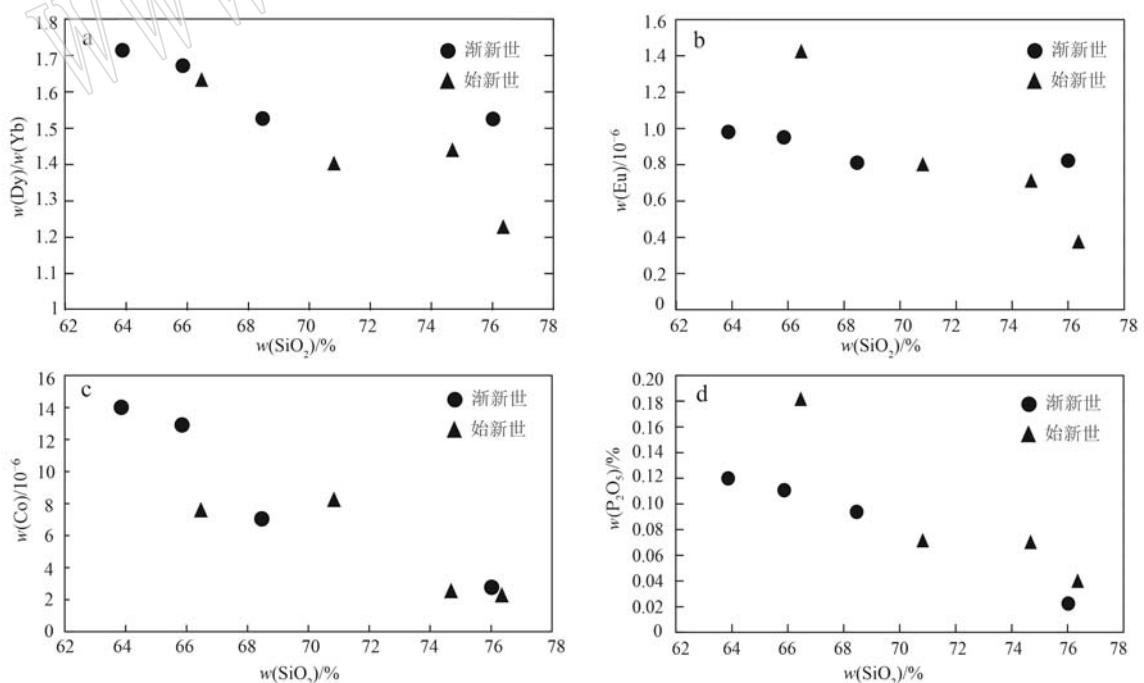
带呈北西-南东向平行于现代俯冲带分布,但在不同的地区,俯冲岩浆活动时空特征有着明显的不同。

### 5.2 岩石成因

研究区侵入岩样品的  $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^\text{T}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$  及  $\text{Co}$  与  $\text{SiO}_2$  含量都呈明显的负相关,说明岩浆演化过程中可能发生了辉石、角闪石等铁镁矿物的分离结晶(图 11、图 12)。随  $\text{SiO}_2$  含量的增加,  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值呈减小趋势也显示出角闪石发生了分离结晶。同时弱的 Eu 异常(图 9b)以及  $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{TiO}_2$  与  $\text{SiO}_2$  负相关则说明发生了含 P 和 Ti 副矿物相的分离结晶; Eu 随  $\text{SiO}_2$  含量的增加而明显减少,表明在岩浆演化过程中发生了一定的斜长石分离结晶(图 11、图 12)。

微量元素组成上,明显富集大离子亲石元素,相对亏损高场强元素以及具有 U、Hf、La 和 Ce 的正异常以及 Sr 负异常(图 9a)显示出壳幔混合源的特征。两期侵入岩体(Sr/Y)-Y 图解中样品落入经典岛弧岩石区域,Rb-(Y+Nb) 图解显示其构造环境为火山弧花岗岩,表明其具有俯冲带火山弧岩浆岩的特征(图 13)。

值得注意的是,样品 Nb/Ta 均 > 5 (5.2~14.11, 平均值为 11.21), 接近平均陆壳组成 (11~13) (Rudnick and Gao, 2004)。Zr/Hf 值变化于 30.77~36.88 之间,平均值为 33.81,类似于原始地幔和球粒陨石值 (34~36) (McDonough and Sun, 1995),也接近于平均陆壳值 (35.7) (Rudnick and Gao, 2004)。综合样品地球化学特征,侵入岩岩浆源区可能源于基性下地壳的部分熔融,并有岩石圈地幔物质混染。同时,花岗岩中可见暗色基性包体,说明上升过程中还存在岩浆的混合作用。

图 11  $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  及  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  与  $\text{SiO}_2$  含量离散关系图Fig. 11  $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}-\text{SiO}_2$  discrete diagrams of the intrusive rocks图 12 Dy/Yb 值、Eu、Co 和  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量与  $\text{SiO}_2$  含量离散关系图Fig. 12 Dy/Yb- $\text{SiO}_2$ , Eu- $\text{SiO}_2$ , Co- $\text{SiO}_2$  and  $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$  discrete diagrams of the intrusive rocks

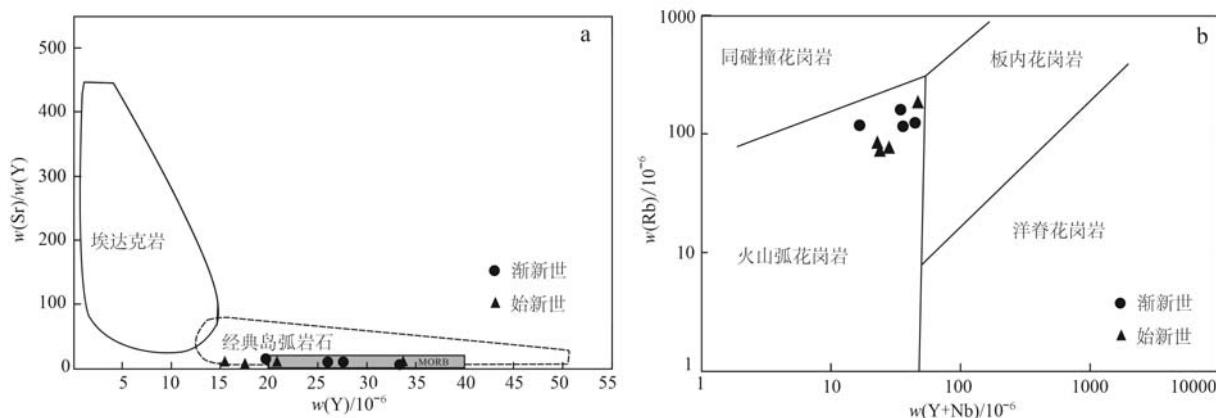


图 13 侵入岩 Sr/Y-Y(a) 和 Rb-(Y+Nb)(b) 图解

Fig. 13 Sr/Y-Y(a) and Rb-(Y+Nb)(b) diagrams of the intrusive rocks

### 5.3 构造背景

三叠纪南大西洋扩张触发大洋型 Nazca-Farallon 板块向南美大陆板块俯冲。安第斯山脉是 Nazca 板块向东俯冲造成南美洲板块西缘在新生代构造缩短而形成的(Sobolev and Babeyko, 2005; Chen *et al.*, 2019; 许志琴等, 2019)。已有研究表明, 中安第斯秘鲁段自晚白垩世以来共发生秘鲁期(84~79 Ma)、印加 I 期(59~55 Ma)、印加 II 期(43~42 Ma)、印加 III 期(30~27 Ma)、印加 IV 期(22 Ma)、盖丘亚 I 期(17 Ma)、盖丘亚 II 期(8~7 Ma)、盖丘亚 III 期(5~4 Ma)和盖丘亚 IV 期(早更新世)9 期造山事件(Benavides-Caceres, 1999)。这些造山事件中, 以印加 I 期和印加 II 期最为强烈, 以挤压为主, 形成了同期的印加褶皱带。在印加 I 期和印加 II 期间歇期(54~44 Ma), 以 Llama-Calipuy 火山旋回为代表的火山作用活跃。印加 II 期后至印加 IV 期构造旋回期间(41~23 Ma), 为一个新的由隆升、伸展构造和岩浆活动形成新的旋回, 该时期岩浆弧以始新世晚期和渐新世的 Tacaza 火山序列为代表(Benavides-Caceres, 1999)。在此期间发生的印加 III 期(30~27 Ma)则以挤压隆升为主。

由于 Nazca 板块自中生代以来俯冲不是完全连续的, 而是具有幕式俯冲的特点(Pfiffner and Gonzalez, 2013), 因此在秘鲁南部和北部地区, Nazca 板块的俯冲角度不尽相同。新生代早期(约 40 Ma)开始, 在秘鲁南部和智利北部俯冲角度在 25°~30°之间, 这些地区具有活跃的火山作用;而在秘鲁中部和北部地区以浅角度平俯冲下降到 100 km 的深度, 这期间缺乏火山活动(Jordan *et al.*, 1983; Ramos,

1999; Ramos and Folguera, 2009; Pfiffner and Gonzalez, 2013; 许志琴等, 2019)。同时, 有研究表明, 秘鲁中部地区(13°S~18°S)由于板块的俯冲主要的地壳增厚和隆升开始于渐新世中期(30 Ma)(Gregory-Wodzicki, 2000; Garzione *et al.*, 2008; Mamani *et al.*, 2010)。

本文采自岩基带西部的侵入岩年龄(52~47 Ma)晚于印加 I 期, 早于印加 II 期, 处于印加 I 期和印加 II 造山间歇期; 东部 Chonta Cruz 地区侵入岩侵位时限(36~28 Ma)略早于或在印加 III 期造山期内, 由于中安第斯地区印加 III 期(30~27 Ma)主要以挤压隆升为主, 说明在 Nazca 板块低角度平板俯冲作用下, 秘鲁北部岩浆弧向东迁移, 且在 36~28 Ma 时限间仍存在岩浆活动。对比秘鲁中南部地区在 30 Ma 以后即开始地壳的隆升和增厚, 秘鲁北部由于挤压事件引发的地壳隆升和增厚时限较中南部地区稍晚(大约在 28 Ma 之后)。

### 6 结论

(1) 秘鲁北部海岸岩基带侵入岩样品锆石 U-Pb 年代学数据显示岩浆活动主要发生在始新世(52~47 Ma)和渐新世(36~28 Ma)两期, 且具有自西向东逐渐变新的特征。

(2) 在 Nazca 板块向南美大陆板块俯冲的大地构造背景下, 两期侵入岩样品相似的地球化学组成, 主微量元素地球化学特征指示两期侵入岩的岩浆具有同源特征, 岩浆源区可能源于基性下地壳的部分熔融, 并有岩石圈地幔物质混染。

(3) 在俯冲构造背景下,秘鲁北部岩浆弧向东迁移,在28 Ma年有岩浆记录,说明北部对应印加Ⅲ期的地壳隆升和增厚时限较中南部地区的30 Ma稍晚(大约在28 Ma之后)。

## References

- Atherton M P, McCourt W J, Sanderson L M, et al. 1979. The geo-chemical character of the segmented Peruvian Coastal Batholith and associated volcanics [C]// Atherton M P and Tarney J. Origin of Granite Batholiths: Geochemical Evidence. Birkhäuser Boston, 45~64.
- Benavides-Caceres V. 1999. Orogenic evolution of the Peruvian Andes: The Andean cycle [J]. Society of Economic Geologists, 7: 61~107.
- Boekhout F, Spikings R, Sempere T, et al. 2012. Mesozoic arc magmatism along the southern Peruvian margin during Gondwana breakup and dispersal [J]. Lithos, 146: 48~64.
- Cawood P A. 2005. Terra Australis Orogen: Rodinia breakup and development of the Pacific and Iapetus margins of Gondwana during the Neo-proterozoic and Paleozoic [J]. Earth- Science Reviews, 69: 249~279.
- Chen Y W, Wu Jonny and Suppe J. 2019. Southward propagation of Nazca subduction along the Andes [J]. Nature, 565: 441~447.
- Chen Pengguo. 2017. Analysis and study of multiple trace elements in geological samples by ICP-MS [J]. World Nonferrous Metals, 9: 278~279 (in Chinese with English abstract).
- Chew D M, Schaltegger U, Kosler J, et al. 2007. U-Pb geochronologic evidence for the evolution of the Gondwanan margin of the north-central Andes [J]. Geological Society of America Bulletin, 119: 697~711.
- Cobbing E J. 1976. The geosyndinal pari at the continental margin of Peru [J]. Tectonophysics, 36: 157~165.
- Cobbing E J and Pitcher W S. 1972. The coastal batholith of central Peru [J]. Journal of the Geological Society, 128: 421~454.
- Cobbing E J and Pitcher W S. 1983. Andean plutonism in Peru and its relationship to volcanism and metallogenesis at a segmented plate edge [J]. Geological Society of America Memoir, 159: 277~291.
- Cobbing E J, Pitcher W S and Taylor W P. 1977. Segments and super-units in the coastal batholith of Peru [J]. Journal of Geology, 85: 625~631.
- Cobbing E J, Pitcher W S, Wilson J J, et al. 1981. The geology of the Western Cordillera of northern Peru [J]. London, Institute of Geological Sciences, Overseas Memoir, 5: 143.
- Demouy S, Paquette J, Saint B M, et al. 2012. Spatial and temporal evolution of Liassic to Paleocene arc activity in southern Peru unraveled by zircon U-Pb and Hf insitu data on plutonic rocks [J]. Lithos, 155: 183~200.
- Duan Z, Guo W M, Xiang H L, et al. 2022. Geochronology and geochemistry of Early Cretaceous volcanic sequences in Northwestern Peru: Implications for Farallon Plate subduction [J]. International Geology Review, 64(22): 3 171~3 194.
- Garzione C N, Hoke G D, Libarkin J C, et al. 2008. Rise of the Andes [J]. Science, 320: 1 304~1 307.
- Gregory-Wodzicki K M. 2000. Uplift history of the Central and Northern Andes: A review [J]. Geological Society of America Bulletin, 112: 1 091~1 105.
- Herve F, Pankhurst R J, Fanning C M, et al. 2007. The South Patagonian batholith: 150 my of granite magmatism on a plate margin [J]. Lithos, 97: 373~394.
- Hildebrand R S and Whalen J B. 2014. Arc and slab-failure magmatism in Cordilleran batholiths I—The Cretaceous coastal batholith of Peru and its role in South American Orogenesis and hemispheric subduction flip [J]. Geoscience Canada, 41: 255~282.
- Jordan T, Isacks B, Allmendiger R, et al. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate [J]. Geological Society of America Bulletin, 94: 341~361.
- Kelemen P B, Hanghoj K and Greene A R. 2007. One view of the geochemistry of subduction related magmatic arcs, with an emphasis on primitive Andesite and lower crust [J]. Treatise on Geochemistry, 138: 1~70.
- Li Fenqi, Liu Wei, Wang Baodi, et al. 2012. The continuation of the subduction of Paleo-Tethys Ocean within Lhasa block in Early-Middle Triassic: Evidence from volcanic rocks and HP metamorphic rocks [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 31(2): 119~132 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhonghui, Li Yang, Li Ruijie, et al. 2021. Determination and geological significance of Middle Jurassic intermediate-acidic volcanic rocks in central-north region of the Great Khingan Mountains volcanic belt [J]. East China Geology, 42(3): 270~278 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Zong K Q, Kelemen P B, et al. 2008. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates [J]. Chemical Geology, 247: 133~153.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. 2010. Reappraisal and refine-

- ment of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 55(15): 1 535~1 546.
- Loewy S L, Connelly J N and Dalziel I W D. 2004. An orphaned basement block: The Arequipa-Antofalla Basement of the central Andean margin of South America[J]. Geological Society of America Bulletin, 116: 171~187.
- Mamani M, Worner G and Sempere T. 2010. Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space [J]. Geological Society of America, 122: 162~182.
- McCourt W J. 1981. The geochemistry and petrography of the Coastal Batholith of Peru, Lima segment[J]. Journal of the Geological Society, 138: 407~420.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. Chemical Geology, 120: 223~253.
- Miskovic A, Spikings R A, Chew D M, et al. 2009. Tectonomagmatic evolution of Western Amazonia: Geochemical characterization and zircon U-Pb geochronologic constraints from the Peruvian Eastern Cordilleran granitites[J]. Geological Society of America Bulletin, 121: 1 298~1 324.
- Mukasa S B. 1986. Zircon U-Pb ages of super-units in the Coastal Batholith, Peru: Implications for magmatic and tectonic processes[J]. Geological Society of America Bulletin, 97(2): 241~254.
- Parada M A, Rivano S, Sepulveda P, et al. 1988. Mesozoic and Cenozoic plutonic development in the Andes of central Chile (30° 30' ~ 32° 30'S)[J]. Journal of South American Earth Sciences, 1: 249~260.
- Parada M A, Nystrom J O and Levi B. 1999. Multiple sources for the Coastal Batholith of central Chile (31° ~ 34°S): Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence and tectonic implications[J]. Lithos, 46: 505~521.
- Parada M A, López-Escobar L, Oliveros V, et al. 2007. Andean magmatism[C]//Moreno T and Gibson W. The Geology of Chile. The Geological Society of London, 115~146.
- Pfiffner O A and Gonzalez L. 2013. Mesozoic-Cenozoic evolution of the western margin of South America: Case study of the Peruvian Andes [J]. Geosciences, 3: 262~310.
- Pindell J L and Tabbutt K D. 1995. Mesozoic-Cenozoic Andean paleogeography and regional controls on hydro-carbon systems[C]//Tankard A J, Suárez R and Welsink H J. Petroleum basins of South America, 101~128.
- Pitcher W S, Atherton M P, Cobbing E J, et al. 1985. Magmatism at a Plate Edge, the Peruvian Andes[M]. New York: Blackie (Glasgow)/Halsted Press.
- Ramos V A. 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera[J]. Episodes, 22: 183~190.
- Ramos V A and Folguera A. 2009. Andean Flat-Slab Subduction through Time[J]. Geological Society of London Special Publication, 327: 31~54.
- Rudnick R L and Gao S. 2004. Composition of the continental crust[J]. Treatise of Geochemistry, 2: 1~38.
- Santos A, Guo W M, Rivera F, et al. 2019. Early Jurassic arc related magmatism associated with porphyry copper mineralization at Zafrañal, Southern Peru unraveled by zircon U-Pb ages[J]. Andean Geology, 46(3): 445~470.
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, et al. 1992. Consequences of plume lithosphere interactions[J]. Geological Society London Special Publications, 68(1): 41~60.
- Sobolev S V and Babeyko A Y. 2005. What drives orogeny in the Andes? [J]. Geology, 33(33): 617~620.
- Wilson P A. 1975. K-Ar Age Studies in Peru with Special Reference to the Emplacement of the Coastal Batholith[D]. Liverpool, England: University of Liverpool, 299.
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, et al. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185~220.
- Xu Zhiqin, Zhao Zhongbao, Ma Xuxuan, et al. 2019. From Andean orogeny to Gangdese orogeny: From ocean continent subduction to continent-continent collision[J]. Acta Geologica Sinica, 93(1): 1~11(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈鹏国. 2017. ICP-MS 对地质样品多种微量元素分析研究[J]. 世界有色金属, 9: 278~279.
- 李奋其, 刘伟, 王保弟, 等. 2012. 拉萨地块内部古特提斯洋造早中三叠世仍在俯冲——来自火山岩和高压变质岩的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 31(2): 119~132.
- 李中会, 李阳, 李睿杰, 等. 2021. 大兴安岭火山岩带中北部中侏罗世中酸性火山岩的厘定及其地质意义[J]. 华东地质, 42(3): 270~278.
- 许志琴, 赵中宝, 马绪宣, 等. 2019. 从安第斯到冈底斯: 从洋-陆俯冲到陆-陆碰撞[J]. 地质学报, 93(1): 1~11.