

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.021>



# 阿尔卑斯古近纪火山活动的沉积记录及其地质意义

芦 刚<sup>1</sup>, 高 亮<sup>2\*</sup>, 王长城<sup>1</sup>, 陈兴聪<sup>1</sup>, 卢喜和<sup>1</sup>, Wilfried Winkler<sup>3</sup>

1. 成都理工大学能源学院, 四川成都 610059

2. 山东石油化工学院石油工程学院, 山东东营 257061

3. 瑞士苏黎世联邦理工大学, 瑞士苏黎世 8092

**摘要:** 在始新世中期至渐新世早期, 欧洲板块和亚得里亚板块发生碰撞, 导致了阿尔卑斯造山带的大规模岩浆活动, 由于后期隆升剥蚀无法保存, 而弧后盆地中同时期的沉积火山碎屑岩记录了这一构造事件。针对该套沉积火山碎屑岩, 开展了地质年代学与地球化学等方面的研究, 揭示了阿尔卑斯造山带的火山活动和构造演化特征。研究表明火山碎屑岩中的锆石年龄峰值主要集中在~47 Ma、40 Ma 和 37 Ma, 并且锆石的 Hf 同位素呈现负值, 说明其主要形成于板块俯冲过程中部分地壳熔融的岩浆中。此外, 通过对岩浆锆石同位素计算地壳厚度的变化, 说明了阿尔卑斯造山带不仅存在由于板块俯冲碰撞引起的地壳垂直挤压增厚, 还存在俯冲板片拉伸引起的地壳伸展变薄。

**关键词:** 火山碎屑岩; 岩浆锆石; U-Pb 年龄; Eu 值; 地壳厚度; 地质年代学; 地球化学。

中图分类号: P58

文章编号: 1000-2383(2025)01-077-11

收稿日期: 2023-10-22

## Sedimentary Records of Volcanic Activity in Paleogene of Alps and Geological Significance

Lu Gang<sup>1</sup>, Gao Liang<sup>2\*</sup>, Wang Changcheng<sup>1</sup>, Chen Xingcong<sup>1</sup>, Lu Xihe<sup>1</sup>, Wilfried Winkler<sup>3</sup>

1. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. School of Petroleum Engineering, Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, Dongying 257061, China

3. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich 8092, Switzerland

**Abstract:** During the Middle Eocene to Early Oligocene, the collision between the European and Adriatic plates led to large-scale magmatic activity in the Alpine orogenic belt, and pyroclastic rocks were recorded in the back arc basin. This study focuses on the geochronology and geochemistry of pyroclastic rocks, and reveals the volcanic activity and structural evolution characteristics of the Alpine orogenic belt. The results indicate that the peak ages of zircons in pyroclastic rocks are mainly concentrated at ~47 Ma, 40 Ma, and 37 Ma. The Hf isotopes of zircons show negative values. It indicates that they were mainly formed in magma with partially melted crust during plate subduction. In addition, the crustal thickness was calculated by using magmatic zircon isotopes. It is demonstrated that the Alpine orogenic belt experienced not only vertical crustal compression thickening caused by plate subduction and collision, but also crustal extension thinning caused by plate stretching.

**Key words:** volcanic clastic rock; magmatic zircon; U-Pb age; Eu value; crustal thickness; geochronology; geochemistry.

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目(No.ZR2022MD117); 留学基金委项目(No.201406400047)。

**作者简介:** 芦刚(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要从事含油气盆地研究。ORCID: 0000-0002-6272-4181. E-mail: lugang19@cdut.edu.cn

\* 通讯作者: 高亮, E-mail: 000168@sdpct.edu.cn

**引用格式:** 芦刚, 高亮, 王长城, 陈兴聪, 卢喜和, Wilfried Winkler, 2025. 阿尔卑斯古近纪火山活动的沉积记录及其地质意义. 地球科学, 50(1): 77—87.

**Citation:** Lu Gang, Gao Liang, Wang Changcheng, Chen Xingcong, Lu Xihe, Wilfried Winkler, 2025. Sedimentary Records of Volcanic Activity in Paleogene of Alps and Geological Significance. *Earth Science*, 50(1): 77—87.

## 0 引言

阿尔卑斯山是欧洲中南部的一个大型造山带(图1),主要由华力西造山旋回的大陆地壳组成(Pfeifer *et al.*, 1993; Bütler *et al.*, 2011).阿尔卑斯山造山带是由亚德里亚板块与欧洲板块碰撞隆升形成(Pfiffner, 2014),因此成为研究陆陆板块碰撞演化的理想实验室.为了明确阿尔卑斯山造山带的形成时代,前人对北侧的前陆盆地进行了详细分析(Winkler, 1993; 米建红和柳梅青, 1996; Sinclair *et al.*, 1998).前人研究认为,板块俯冲碰撞起始于晚白垩世( $\sim 65$  Ma),并持续到渐新世( $\sim 28$  Ma)(Ford *et al.*, 2004; Handy *et al.*, 2010).

阿尔卑斯造山带在古近纪经历了连续的板块俯冲碰撞作用,在板块碰撞过程中是否经历了短暂的拉伸作用,一直是备受关注的科学问题(彭希龄等,2006;李江海等,2013)。部分学者认为在38~34 Ma左右,南北向(垂直造山带)碰撞导致岩石圈规模的逆冲叠瓦作用,形成了中高压和超高压矿物组合,构造模式转换大约发生在34 Ma,标志着东西

向伸展的开始(Beltrando *et al.*, 2010). 在此次拉伸过程中,阿尔卑斯造山带内的地壳总体呈东西向拉伸,导致其厚度变薄. 而其他学者则认为,在始新世早期,特提斯洋壳开始以低角度俯冲到亚德里亚板块之下,导致上覆板块变形增厚(Bergomi *et al.*, 2015);在始新世末期,俯冲板块开始拉伸与后撤,导致了俯冲极性的反转;在渐新世时期,俯冲板片的断裂和沉降导致了深部岩浆的上侵,从而引发了同碰撞过程中的火山活动(Neubauer *et al.*, 1993).

阿尔卑斯造山带南北两侧逆冲带的不对称发育,导致了北侧较宽的前陆盆地和南侧较窄的弧后盆地(许靖华和何起祥,1980;雍自权和邓宾,2018).阿尔卑斯造山带的火山活动记录保存在两侧盆地的同沉积火山碎屑岩中.在北侧Taveyannaz组的浊积沉积物中,发现了大量火山碎屑物质(Lu et al., 2018).而在南侧,对该火山碎屑沉积物的研究则非常缺乏.为了更精确地厘定阿尔卑斯造山带火山活动的时代,本次研究采集并分析了南弧后盆地的火山碎屑岩样品,以期对阿尔卑斯造山带火山活动及其地质意义进行更深入的分析.

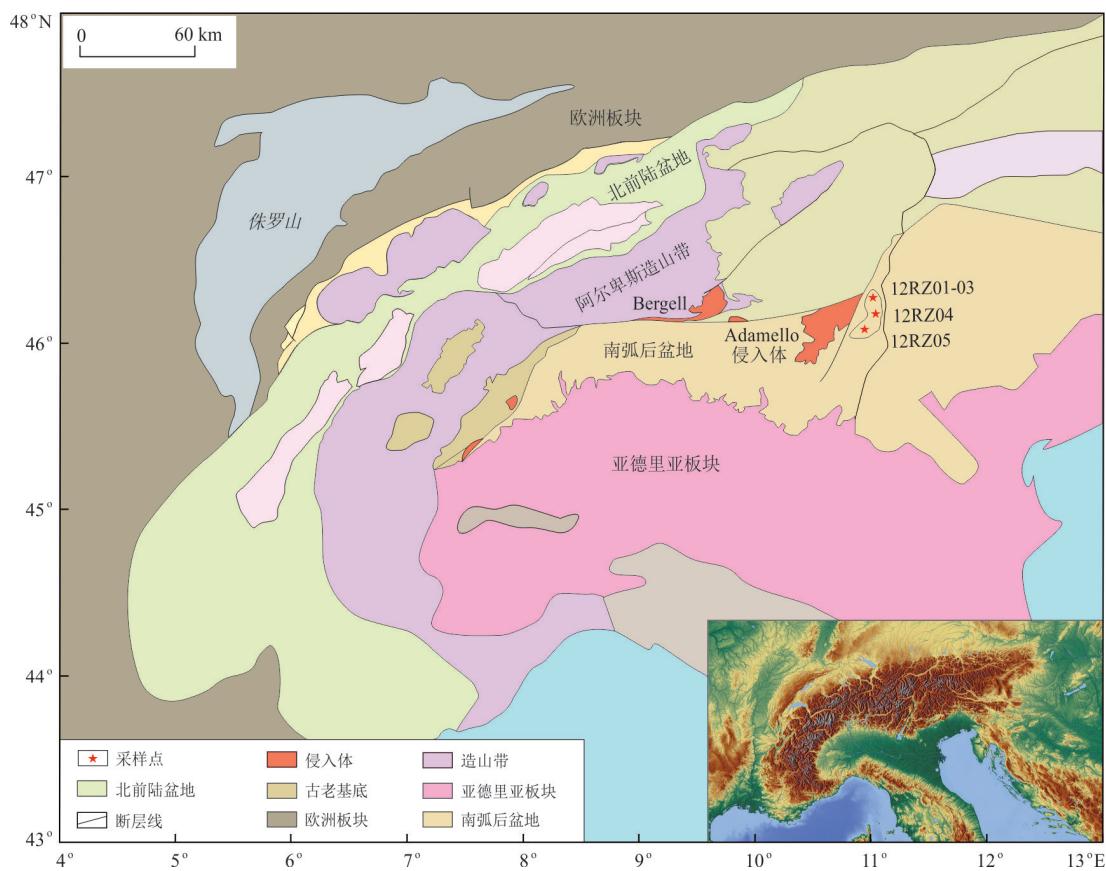


图1 阿尔卑斯造山带构造概图(红星为采样位置)

## 1 区域地质背景

阿尔卑斯山南弧后盆地古近系沉积环境为浅海至半深海相(Martin *et al.*, 2014)。古近系地层中沉积火山碎屑岩厚度约为数十厘米,不规则地嵌入泥灰岩中。根据浮游生物和有孔虫的组合特征,推断该地层的沉积时代为始新世时期(Martin *et al.*, 2014)。根据岩石学、地球化学和地质年代学数据,火山碎屑物质主要来源于Adamello岩浆侵入体(Lu *et al.*, 2018)。Adamello岩浆侵入体是阿尔卑斯造山带最大的侵入岩(Schaltegger, 1993)。侵入体内部被数个喷发后期形成的断裂带分割,岩浆上侵发生于始新世晚期至渐新世早期(Schaltegger *et al.*, 2019)。侵入体从东北到西南细分为4个单元:Presanella、Avio、Adamello和Re di Castello。这4个侵入岩体形成时代较长,整体跨度约为13 Ma,呈现出从南向北依次侵入的过程。从西南部最古老的侵入岩体(~42 Ma; Re di Castello)到东北部最年轻的侵入岩体(~29 Ma; Presanella, Avio单元)。侵入体周围众多侵入岩墙的年龄数据,也证明了阿尔卑斯山古近系发生了多期次的火山活动(Bergomi *et al.*, 2015)。

## 2 地层特征

### 2.1 剖面特征

阿尔卑斯山南弧后盆地古近系Ponte Pià组,主

要由层状灰岩、薄层火山碎屑岩和生物扰动的泥灰岩组成,其厚度最大约为200 m。根据生物地层时代,Ponte Pià组主要沉积于始新世时期(Martin *et al.*, 2014),地层岩性为浅灰色灰岩为主(厚10~25 cm),其厚度向上逐渐增大到数米。Ponte Pià组发育数套厚度不等(厘米到米级)的沉积火山碎屑岩层,成分主要为安山质火山碎屑。地层具有明显的沉积突变界面(从火山碎屑岩到灰岩),生物扰动痕迹较常见。

南弧后盆地古近系Ponte Pià组有3个典型的剖面(图2):Lago di Molveno剖面发育了两套沉积火山碎屑岩,其下部厚度较大,上部相对较薄。Ponte Pià剖面发育了数套薄层的沉积火山碎屑岩层,具有明显的岩性突变,见泥质撕裂屑与生物扰动特征。Rio Pongaiola剖面发育了多套层状灰岩与沉积火山碎屑岩互层,推测为高频次的火山活动事件。

### 2.2 岩石学特征

沉积火山碎屑岩呈深绿色,含灰色和黑色矿物,呈颗粒支撑,分选较差,颗粒呈棱角状,从细粒到中粒不等。沉积火山碎屑岩的主要组分是斜长石(50%~70%),颗粒内部呈环带状,推测其母岩主要来自安山岩,同时还发现了有孔虫的碎屑、带状黑云母、不透明矿物和泥屑。沉积火山碎屑岩中的石英颗粒较少,主要为火山玻屑。样品12RZ01含有大量风化严重的半自形斜长石,其粒径约为0.05~0.1 mm。斜长石部分转化为绿泥石,部分被方解石交代,样品呈颗粒支撑、分选较差,呈次圆状(图3a、3b)。样

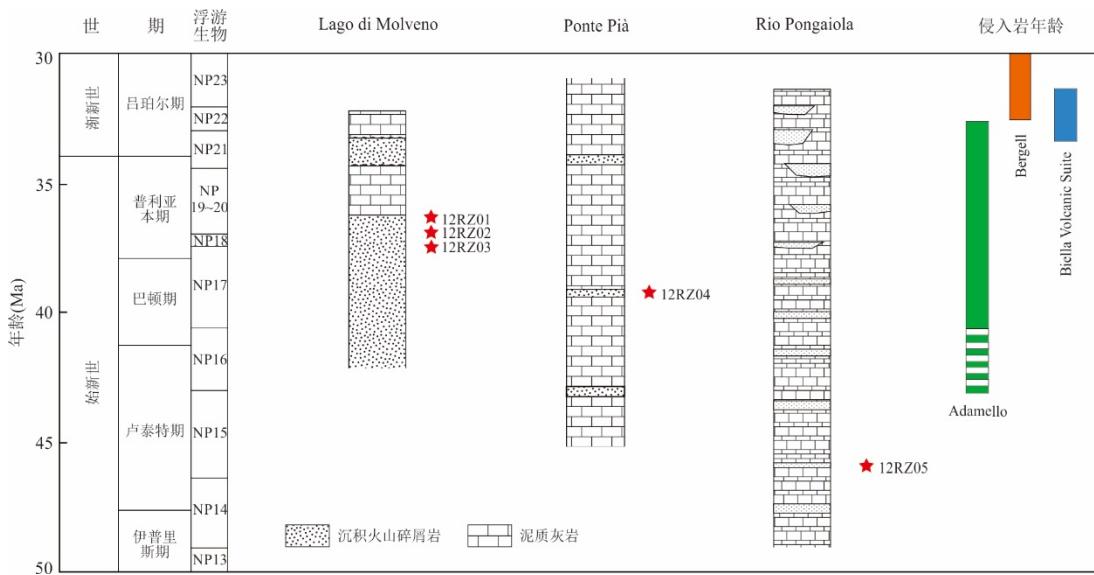


图2 阿尔卑斯山(南弧后盆地)古近系典型剖面地层综合柱状图

Fig.2 Composite stratigraphy of the Paleogene sections studied in the Alps (southern arc back basin)

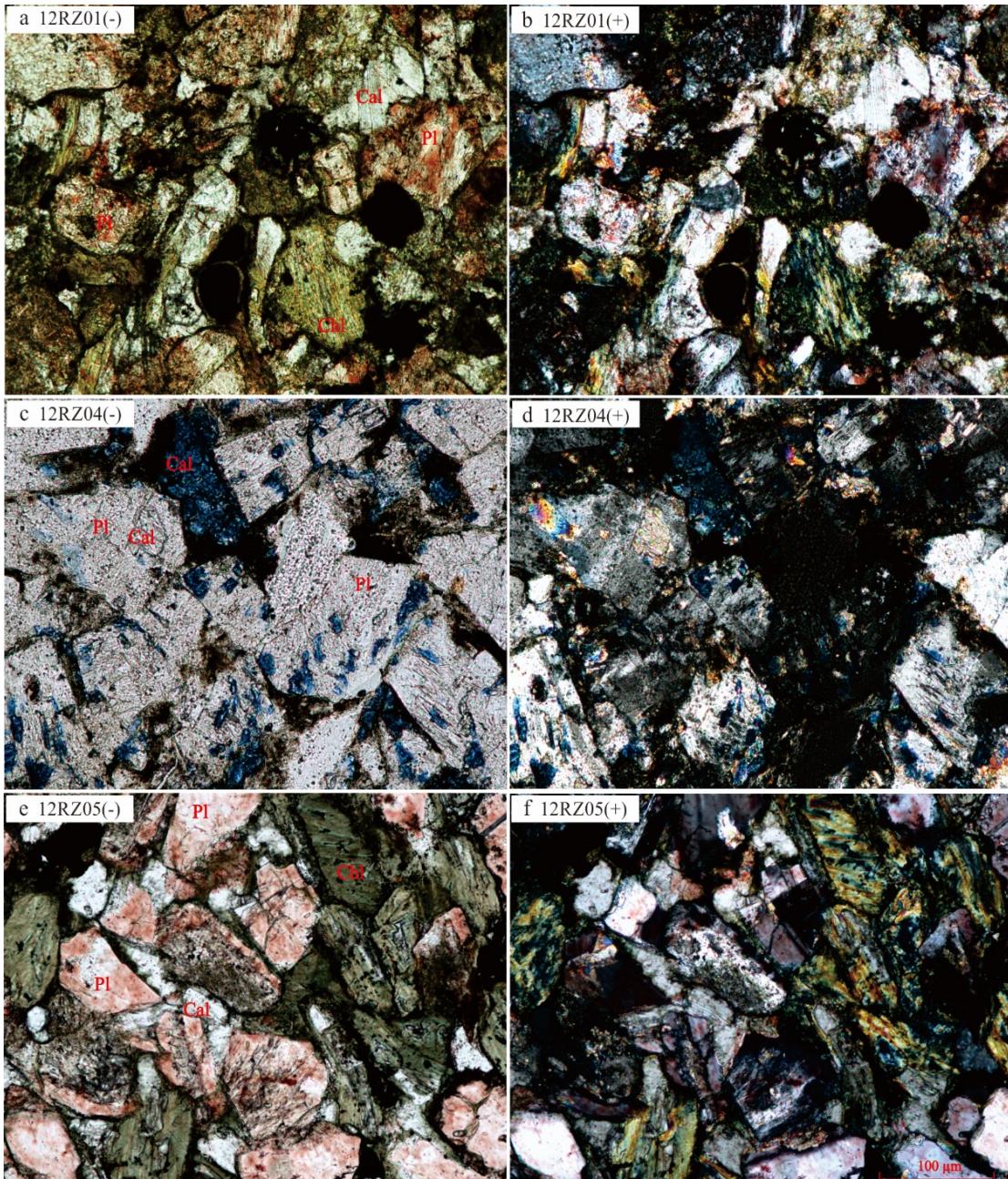


图3 南弧后盆地中火山碎屑岩镜下照片

Fig.3 Photographs showing samples of the plagioclase arenites in the southern arc back basin  
Chl.绿泥石;Pl.斜长石;Cal.方解石

品 12RZ04 几乎全为斜长石,其粒径约为 0.1~0.2 mm,以泥质胶结为主(图 3c、3d),黑云母和绿泥石较少,部分斜长石内部被方解石交代,具有颗粒支撑的结构,分选较差且呈次棱角状。样品 12RZ05 主要由斜长石和绿泥石组成,粒径约为 0.1~0.15 mm(图 3e、3f);样品中绿泥石含量较高,主要由斜长石和角闪石蚀变而成;样品中石英含量极少,呈颗粒支撑、次棱角状,且分选较差。

### 3 测试方法

#### 3.1 样品采集

样品 12RZ01-03 采自 Lago di Molveno 剖面,坐标为  $46^{\circ}07'50.52''\text{N}$ 、 $10^{\circ}58'21.39''\text{E}$ ; 样品 12RZ04 采自 Ponte Pià 剖面, 坐标为  $46^{\circ}02'45.79''\text{N}$ 、 $10^{\circ}50'54.42''\text{E}$ ; 样品 12RZ05 采自 Rio Pongaiola 剖面, 坐标为  $46^{\circ}16'21.58''\text{N}$ 、 $11^{\circ}03'56.79''\text{E}$ , 岩石基本无蚀变或弱蚀变, 岩性均为沉积火山碎屑岩。

### 3.2 重矿物分析

首先将样品切割成小块,再通过 SelFrag 仪器(高压脉冲粉碎)将其破碎成细小颗粒,并筛选出粒径 $>0.063\text{ mm}$ 的颗粒,烘干后再筛选出粒径 $<2\text{ mm}$ 的部分进行重矿物分选;通过 Frantz 磁选机分离出磁性矿物与非磁性矿物,再利用碘甲烷( $d=3.32\text{ g/cm}^3$ )进行重液分选。最后,对选出的重矿物并进行镜下鉴定。

### 3.3 锆石年龄测定

在显微镜下随机挑选锆石颗粒并制成靶样,然后通过阴极发光成像检查锆石颗粒内部环带特征并判断其成因。锆石的激光剥蚀 U-Pb 定年是在苏黎世联邦理工大学同位素年代学实验室完成,激光直径为 $30\text{ }\mu\text{m}$ ,使用 Excimer 激光器( $\text{ArF}$  193 nm, 分辨率 155)与 Thermo Element XR 高精度扇形场质谱仪(Guillong *et al.*, 2014)。激光脉冲频率为 5 Hz, 能量密度约为 $2.0\text{ J/cm}^2$ 。背景时间为 25 s, 剥蚀持续时间为 35 s。外部标样包括 AUSZ7-5、Plesovice、Temora2、91500、NIST610。主要参考标准为 GJ-1, 内部标样为 NIST610。使用 IOLITE 2.5 计算比率、年龄和元素浓度。利用 ISOPLOT 4.0 处理计算的同位素比率和年龄,并制作 U-Pb 年龄分布图。本次研究只选取了协和年龄进行分析(协和度 90%~110%)。之后使用 Nu3 MC-ICP-MS 质谱仪进行原位 Hf 同位素分析。激光光斑尺寸为 $40\text{ }\mu\text{m}$ , 激光脉冲频率为 5 Hz。背景时间为 30 s, 剥蚀持续时间为 60 s。为了校正 $^{176}\text{Hf}$ 上的等压干扰, 使用 $^{173}\text{Yb}/^{176}\text{Yb}=0.796\text{ 18}$  和 $^{175}\text{Lu}/^{176}\text{Lu}=0.026\text{ 549}$ 。通过表征良好的 Temora-2 来监测所获得数据的准确性和精确度,数据误差为 $2\sigma$ 。

## 4 分析结果

### 4.1 重矿物分析

对重矿物的分析表明,样品 12RZ01 中不透明矿物占 48%,磷灰石含量占 25%,锆石和黑云母各占 10%,其他包括石榴石和角闪石等。样品 12RZ03 中不透明矿物占 31%,磷灰石含量占 50%,锆石占 12%,其他包括石榴石、黑云母和角闪石等。样品 12RZ04 中不透明矿物占 30%,磷灰石含量占 19%,重晶石含量占 44%,其他包括锆石和黑云母等。样品 12RZ05 中不透明矿物占 31%,磷灰石含量占 15%,重晶石含量占 30%,锆石和黑云母各占 12%(图 4)。样品属于典型的火山碎屑岩,其中最常见的

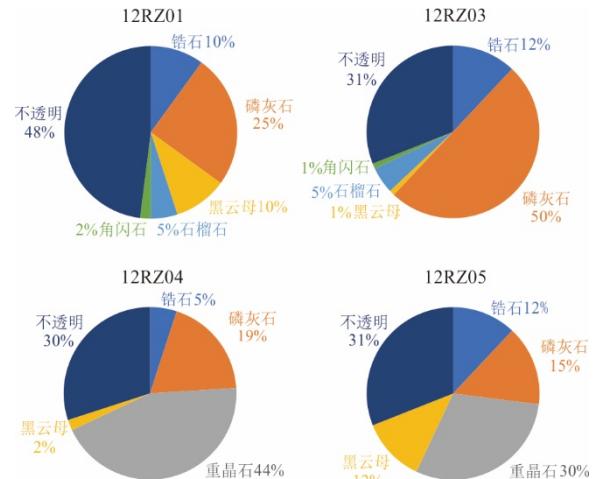


图 4 南弧后盆地中火山碎屑岩样品重矿物含量

Fig.4 Contents of heavy minerals in the samples of southern arc back basin

重矿物是磷灰石、重晶石、锆石、黑云母和不透明颗粒,大多数锆石颗粒呈透明状,自形且晶形完整,磷灰石在 Lago di Molveno 剖面较常见,重晶石在 Ponte Pià 与 Rio Pongaiola 剖面较常见,其主要形成于浅海沉积环境中;其他重矿物包括石榴石、黑云母、角闪石等,其母岩主要来自火成岩。

### 4.2 岩浆锆石测年

通过阴极发光照片分析,火山碎屑岩中的锆石主要是晶形较完整的长柱状颗粒,极少发现磨圆状或未分带的颗粒(图 5)。绝大多数锆石颗粒发育良好的振荡环带和继承性内核,这些内部特征表明其为岩浆锆石(Rubatto *et al.*, 2000; 刘佩雯等, 2023)。

火山碎屑岩中岩浆锆石(约 200 颗粒)的年龄范围从 $\sim 48\text{ Ma}$  到 $\sim 33\text{ Ma}$ 。5 个样品的岩浆锆石加权平均年龄集中在 $\sim 47\text{ Ma}$ 、 $40\text{ Ma}$  和 $37\text{ Ma}$ (图 6)。其中,Rio Pongaiola 剖面样品 12RZ05 的锆石年龄范围为 $43.4\text{--}48.2\text{ Ma}$ , Ponte Pià 剖面样品 12RZ04 的锆石年龄在 $38.5\text{--}42.1\text{ Ma}$ 之间,Lago di Molveno 剖面的 3 个样品的锆石年龄组相似,范围为 $39\text{--}33\text{ Ma}$ 。

### 4.3 锆石 Hf 与 Eu 同位素

在测试完锆石 U-Pb 年龄后,对样品 12RZ03、12RZ04、12RZ05 测量了 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值和 $\delta\text{Eu}$  值( $\text{Eu}_\text{N}/\text{Eu}^* = \text{Eu} \times 2 / (\text{Sm} + \text{Gd})$ ; 陈德潜和陈刚, 1990)。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值记录了锆石结晶时岩浆的来源及地壳的混染程度(Hawkesworth *et al.*, 2006),而 $\delta\text{Eu}$  代表了岩浆来源多样性的衡量标准,例如锆石结晶前岩浆中斜长石的含量。

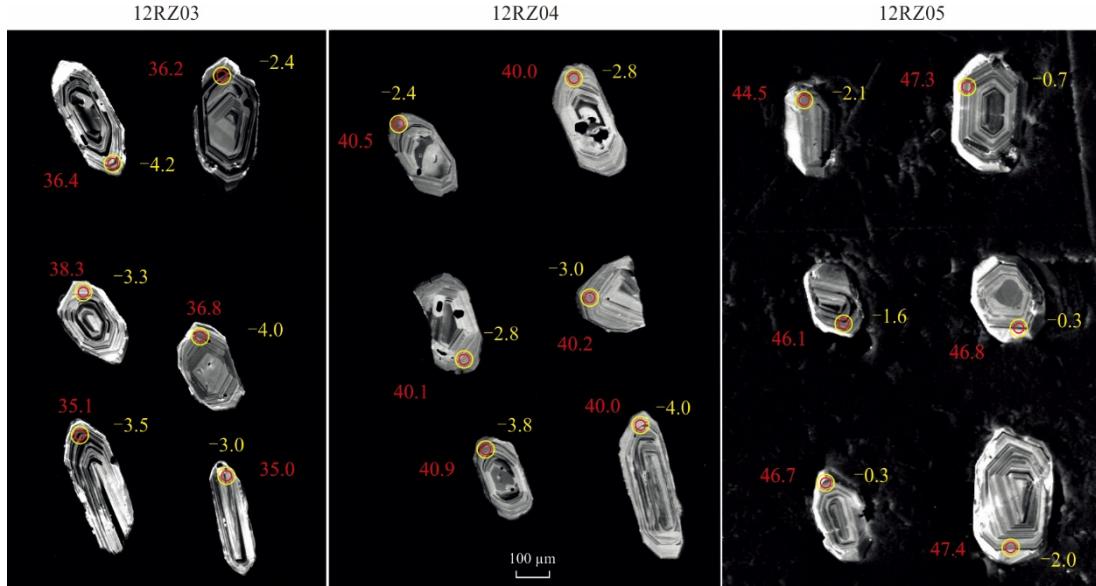


图 5 岩浆锆石颗粒阴极发光图像

Fig.5 Cathodoluminescence images of volcanic zircon grains in the samples

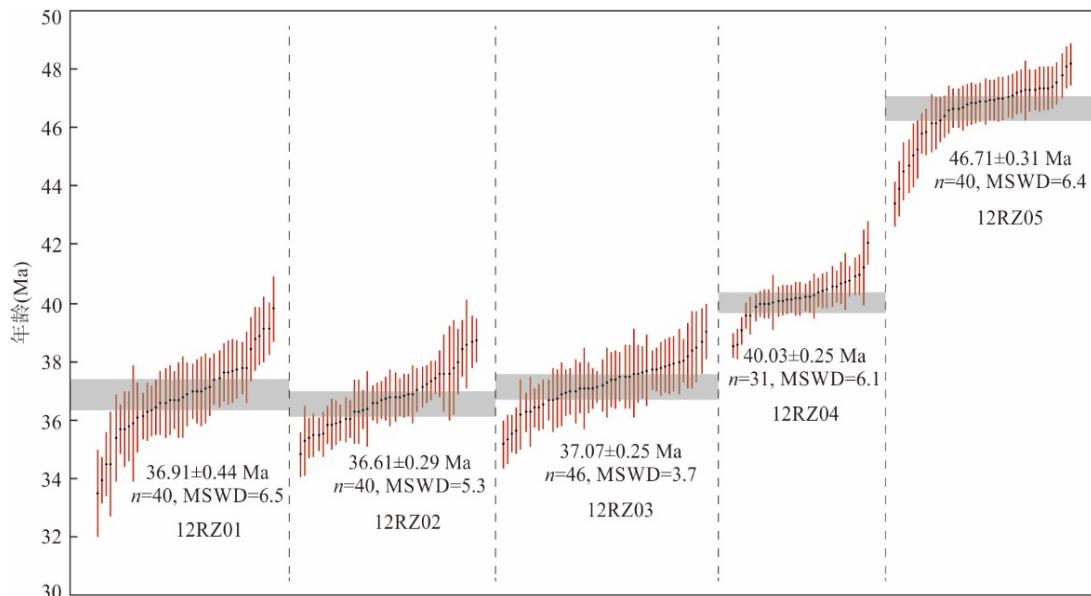
红色为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(Ma),黄色为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值图 6 南弧后盆地岩浆锆石 U-Pb 协和年龄曲线(部分数据来源 Lu *et al.*, 2018)

Fig.6 Probability U-Pb age curves of zircon ages from southern arc back basin

样品 12RZ05 的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为负值 ( $-2.9$  至  $-0.1$ , 图 7a), 样品 12RZ04 和样品 12RZ03 的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值也为负值 ( $-4.6$  至  $-1.7$ ), 这与 Adamello 侵入体的 3 个单元 (Avio、Western Adamello、Re di Castello) 的值一致; 而且测试数据也表明  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值随锆石年龄的减小而降低。岩浆锆石的  $\delta\text{Eu}$  值范围为  $0.2$ ~ $0.6$  (图 7b), 除了样品 12RZ05, 其余样品的  $\delta\text{Eu}$  值也与 Adamello 侵入体的范围重叠。此外, 样品中

$\delta\text{Eu}$  值的变化趋势也随锆石年龄的减小而降低。

#### 4.4 地壳厚度恢复

前人提出岩体全岩成份  $(\text{La/Yb})_N$  与地壳厚度的拟合关系 (Profeta *et al.*, 2015; 雷豪等, 2021):  $(\text{La/Yb})_N = (0.98 \pm 0.19) \times e^{(0.047 \pm 0.005) \times d_m}$ , 其中  $d_m$  为地壳厚度;  $(\text{La/Yb})_N$  为球粒陨石均一化后的比值。有学者认为全岩成份  $(\text{La/Yb})_N$  与岩石中锆石的  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  同样存在联系 (Tang *et al.*, 2021b), 进而

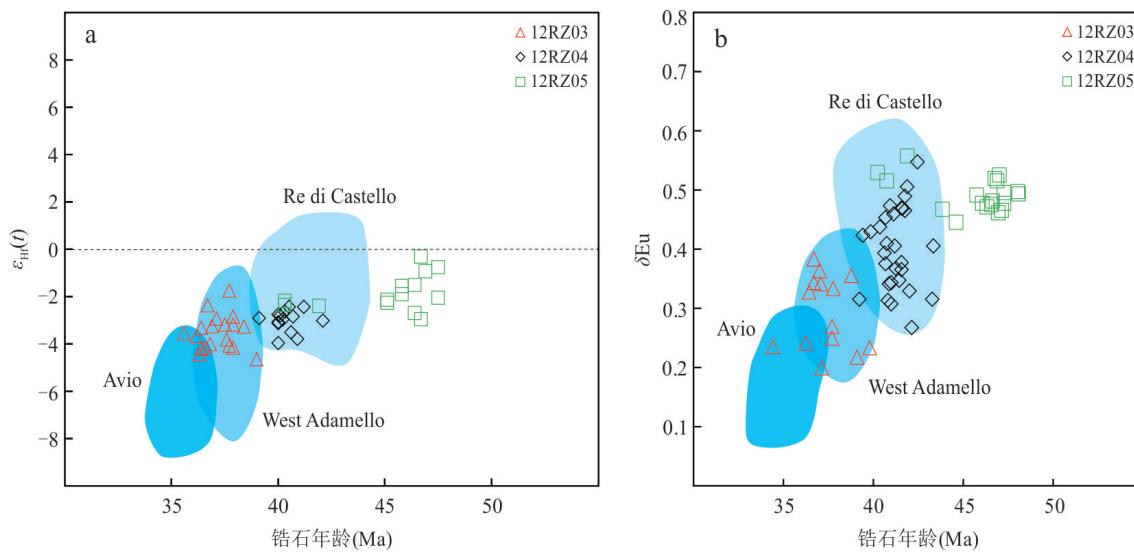
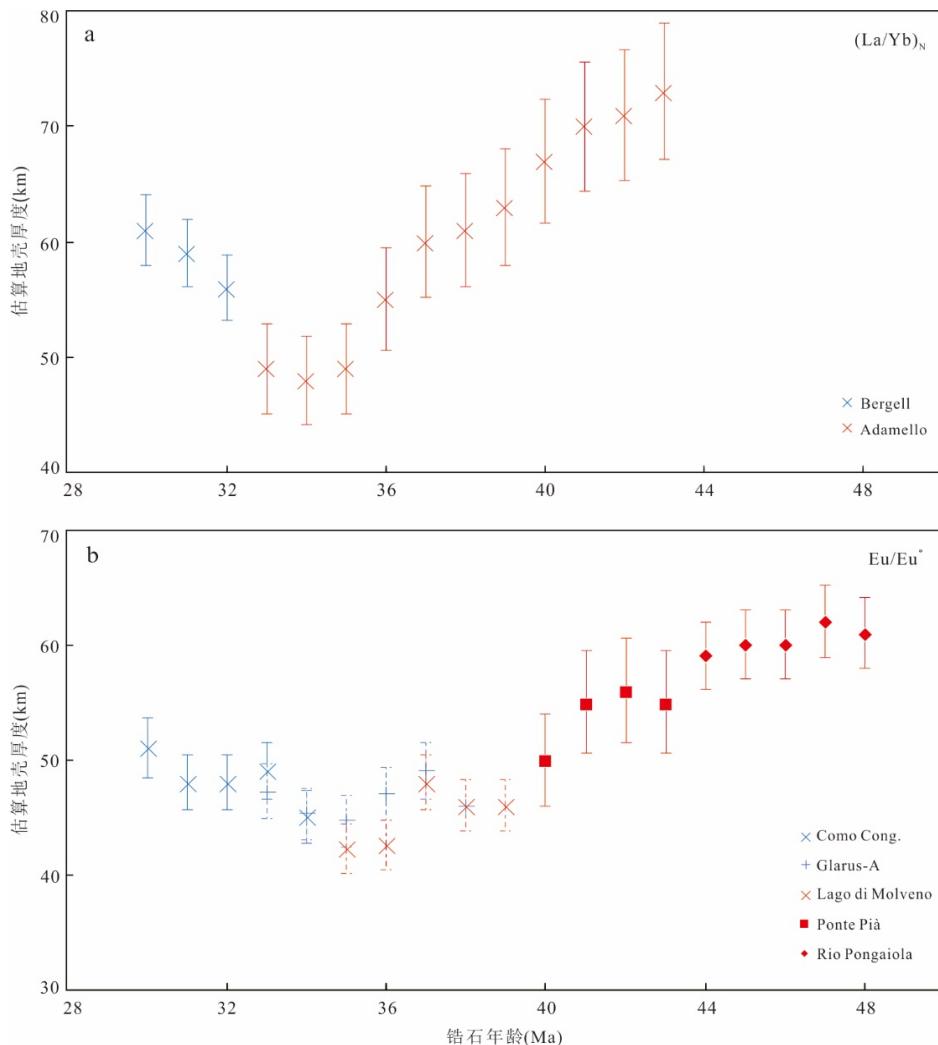
图7 南弧后盆地岩浆锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与 $\delta\text{Eu}$ 值(蓝色区域为Adamello侵入体)Fig.7  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  and  $\delta\text{Eu}$  values of magmatic zircons in the southern arc back basin (blue area represents Adamello intrusion)

图8 阿尔卑斯造山带地壳厚度演化示意图

Fig.8 Schematic diagrams of crustal thickness evolution of the Alps

a.由 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 计算的地壳厚度演化曲线;b.由 $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ 计算的地壳演化曲线

提出锆石中  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  与地壳厚度之间的拟合关系： $Z = (84.2 \pm 9.2) \times \text{Eu}/\text{Eu}^* + (24.5 \pm 3.3)$ ,  $Z$  为地壳厚度 (km). 该方法需要对  $\text{La} > 1 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Th}/\text{U} < 0.1$ 、全岩  $\text{SiO}_2 > 75\%$  或 S 型花岗岩等不符合要求的锆石予以剔除 (Zhu *et al.*, 2020; Tang *et al.*, 2021a). 本次研究针对符合上述要求的岩浆锆石数据, 估算得到从始新世到渐新世每百万年 (1 Ma) 的地壳厚度 (图 8). 前人研究认为, 阿尔卑斯造山带在始新世时期经历了一次明显的地壳减薄过程 (Beltrando *et al.*, 2010); 通过计算得出, 研究区在 36 Ma 时, 地壳厚度从 ~60 km 减薄至 ~45 km, 并持续到 32 Ma. 这一地壳厚度减薄过程说明了阿尔卑斯造山带在 36~32 Ma 期间存在与伸展作用有关的岩浆活动.

## 5 讨论

### 5.1 阿尔卑斯造山带的火山活动

阿尔卑斯造山带古近纪的火山活动记录在

同时期的沉积火山碎屑岩中. 沉积火山碎屑岩包含大量蚀变的斜长石, 大多数是钠长石或拉长石, 颗粒边缘强烈绿泥石化. 由于斜长石的分带性, 部分颗粒内部被方解石交代, 少数颗粒状方解石可能是成岩阶段形成的, 由富钙的斜长石颗粒蚀变而成, 这种现象在中性岩浆岩中较为常见, 分析其母岩主要为安山质火成岩. 尽管本次研究获得的岩浆锆石年龄数据有限, 但它证明了阿尔卑斯造山带火山活动的起始时代, 比之前认为的 32 Ma 提前了 16 Ma. 在 48~33 Ma 之间, 阿尔卑斯南弧后盆地发育了安山质沉积火山碎屑岩, 其火山碎屑主要来源于 Adamello 地区的岩浆活动. 盆内沉积物从海相灰岩到火山碎屑岩的交替沉积, 表明该地区火山活动频繁. 火山碎屑岩中未发现年龄更老的碎屑锆石, 表明该时期阿尔卑斯造山带的古老基底尚未抬升与剥蚀.

### 5.2 火山活动对板块碰撞的指示意义

前人提出过阿尔卑斯造山带同碰撞岩浆作

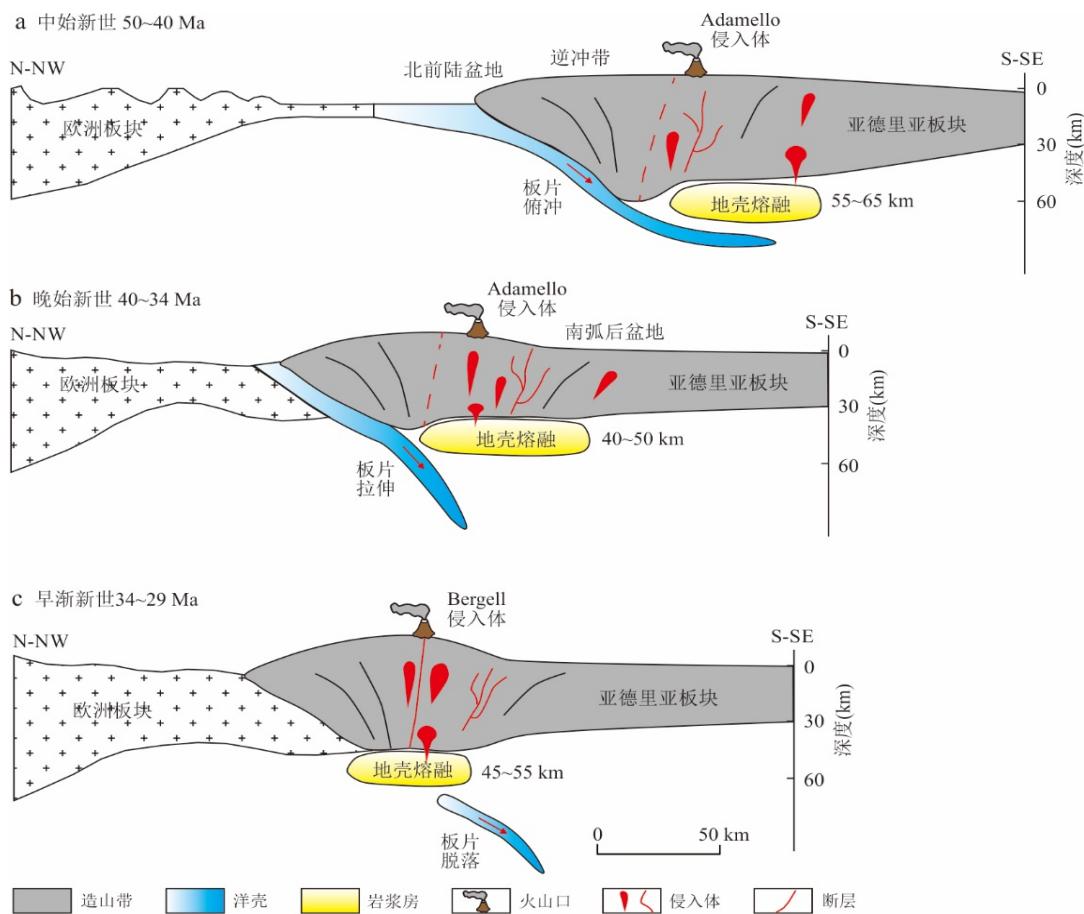


图 9 阿尔卑斯造山带古近纪构造演化示意图

Fig.9 Simplified tectonic reconstruction of the Alps in the paleogene

用的构造演化模式(Von Blanckenburg 和王强, 1996), 认为在大陆碰撞期间俯冲的大洋岩石圈发生板片脱落, 在浮力驱动下同一起俯冲的较轻大陆岩石圈拆离。阿尔卑斯造山带的火山活动是在洋壳板块俯冲导致特提斯洋盆封闭之后发生的, 主要发生在始新世到渐新世期间(Schaltegger *et al.*, 2019)。结合前人研究成果, 本次研究表明阿尔卑斯南弧后盆地的岩浆锆石形成于板块俯冲碰撞过程, 其形成时代为48~30 Ma; 同时, 岩浆锆石中的Hf同位素呈负值, 表明岩浆活动中包含了地壳物质的参与, 即地幔岩浆的上涌过程伴随着下地壳的部分熔融(蔺新望等, 2023)。通过Eu/Eu<sup>\*</sup>经验公式计算, 阿尔卑斯造山带地壳的初始厚度为55~65 km, 在40~34 Ma期间发生了俯冲板片拉伸, 导致了构造水平伸展, 深部岩浆进一步上侵, 与地壳物质混染并结晶分异, 该时期的地壳厚度为40~50 km; 到34~29 Ma期间, 由于俯冲板片脱落, 在地壳受热弱化处形成岩浆活动断裂带, 该时期的地壳厚度为45~55 km。上述数据精确地约束了阿尔卑斯造山带古近系岩浆活动的演化过程, 也验证了阿尔卑斯造山带不仅存在俯冲碰撞导致的垂向挤压增厚, 也存在俯冲板片拉伸导致的水平伸展变薄(图9)。

## 6 结论

本次研究致力于长期争论的阿尔卑斯造山带火山活动问题, 通过岩石学分析、岩浆锆石U-Pb年龄及同位素数据的分析, 推断从始新世至渐新世, 欧洲板块和亚得里亚板块的碰撞引发了阿尔卑斯造山带的火山活动, 而南弧后盆地的火山碎屑岩限定了这一岩浆事件的持续时间。通过岩浆锆石同位素的推算, 发现阿尔卑斯造山带的地壳厚度伴随着火山活动与板块碰撞发生了减薄与增厚。

**致谢:**感谢苏黎世联邦理工大学地质系的Marcel Guillong、Raphael Zurfluh、Vincenzo Picotti及其他同事, 在项目开展期间给予的大力帮助; 感谢编辑老师和两位匿名审稿专家对文章提出了诸多建设性的修改意见与宝贵建议, 收益匪浅, 在此一并表示衷心的感谢!

## References

- Beltrando, M., Lister, G. S., Rosenbaum, G., et al., 2010. Recognizing Episodic Lithospheric Thinning along a Convergent Plate Margin: The Example of the Early Oligocene Alps. *Earth-Science Reviews*, 103(3–4): 81–98. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.09.001>
- Bergomi, M. A., Zanchetta, S., Tunesi, A., 2015. The Tertiary Dike Magmatism in the Southern Alps: Geochronological Data and Geodynamic Significance. *International Journal of Earth Sciences*, 104(2): 449–473. <https://doi.org/10.1007/s00531-014-1087-5>
- Bütlér, E., Winkler, W., Guillong, M., 2011. Laser Ablation U/Pb Age Patterns of Detrital Zircons in the Schlieren Flysch (Central Switzerland): New Evidence on the Detrital Sources. *Swiss Journal of Geosciences*, 104(2): 225–236. <https://doi.org/10.1007/s00015-011-0065-1>
- Chen, D. Q., Chen G., 1990. Practical Rare Earth Element Geochemistry. Metallurgical Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Ford, M., Lickorish, W. H., 2004. Foreland Basin Evolution around the Western Alpine Arc. *Geological Society, London, Special Publications*, 221(1): 39–63. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2004.221.01.04>
- Guillong, M., von Quadt, A., Sakata, S., et al., 2014. LA-ICP-MS Pb-U Dating of Young Zircons from the Kos-Nisyros Volcanic Centre, SE Aegean Arc. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 29(6): 963–970. <https://doi.org/10.1039/c4ja0009a>
- Handy, M. R., Schmid, S. M., Bousquet, R., et al., 2010. Reconciling Plate-Tectonic Reconstructions of Alpine Tethys with the Geological-Geophysical Record of Spreading and Subduction in the Alps. *Earth-Science Reviews*, 102(3–4): 121–158. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.002>
- Hawkesworth, C. J., Kemp, A. I. S., 2006. Using Hafnium and Oxygen Isotopes in Zircons to Unravel the Record of Crustal Evolution. *Chemical Geology*, 226(3–4): 144–162. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.09.018>
- Lei, H., Zhang, G.B., Xu, B., 2021. The Late Paleozoic Extending and Thinning Processes of the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt: Geochemical Evidence from the Plutons in Linxi Area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 37(7): 2029–2050 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. H., Yang, J. Y., Cheng, Y. L., et al., 2013. Global Sedimentary Basin Structure and Tectonic Evolution Background—Comparison of Intercontinental Meridional Ultra-Long Structural Profiles. *Geological Journal of China*, 49(1): 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11565-013-0341-2>

- China Universities*, 19(4): 561—573 (in Chinese with English abstract).
- Lin, X.W., Zhang, Y.F., Chen, G.C., et al., 2023. Magmatic Mixing at the Southern Edge of the Altai Orogenic Belt: Evidence from the Petrology, Geochemistry, and Chronology of the Akbulak Pluton. *Earth Science*, 48 (10): 3597—3612 (in Chinese with English abstract).
- Liu, P.W., Zhang, J.B., Ding, X.Z., et al., 2023. Geochronology and Tectonic Significance of Neoproterozoic Volcanic Rocks from Yanbian Group in Western Yangtze Block. *Earth Science*, 48(12): 4508—4526 (in Chinese with English abstract).
- Lu, G., Winkler, W., Rahn, M., et al., 2018. Evaluating Igneous Sources of the Taveyannaz Formation in the Central Alps by Detrital Zircon U-Pb Age Dating and Geochemistry. *Swiss Journal of Geosciences*, 111(3): 399—416. <https://doi.org/10.1007/s00015-018-0302-y>
- Martin, S., Macera, P., 2014. Tertiary Volcanism in the Italian Alps (Giudicarie Fault Zone, NE Italy): Insight for Double Alpine Magmatic Arc. *Italian Journal of Geosciences*, 133(1): 63—84. <https://doi.org/10.3301/ijg.2013.14>
- Mi, J.H., Liu, M.Q., 1996. Identification of Unconformity in the Early Development of Foreland Basins: An Example of the North Alpine Foreland Basin. *Sichuan Petroleum Census*, (1): 111—128 (in Chinese).
- Neubauer, F., Von Raumer, J.F., Wang, Y.Q., 1993. The Base of the Alps is a Chain of the Hualixi Tectonic Belt and the Alps Mediterranean Mountain Range. *Global Geology*, 12(1): 92 (in Chinese).
- Peng, X.L., Liang, D.G., Wang, C.G., et al., 2006. Discussion on the Theory of Foreland Basin and Its Application in China. *Acta Petrolei Sinica*, 27(1): 132—144 (in Chinese with English abstract).
- Pfeifer, H. R., Biino, G., Ménot, R. P., et al., 1993. Ultramafic Rocks in the Pre-Mesozoic Basement of the Central and External Western Alps. In: Raumer, J. F., Neubauer, F., eds., Pre-Mesozoic Geology in the Alps. Springer, Heidelberg, 119—143. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-84640-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-84640-3_8)
- Pfiffner, O. A., 2014. Geology of the Alps. John Wiley & Sons, Chichester, 392.
- Profeta, L., Ducea, M. N., Chapman, J. B., et al., 2015. Quantifying Crustal Thickness over Time in Magmatic Arcs. *Scientific Reports*, 5: 17786. <https://doi.org/10.1038/srep17786>
- Rubatto, D., Gebauer, D., 2000. Use of Cathodoluminescence for U-Pb Zircon Dating by Ion Microprobe: Some Examples from the Western Alps. In: Pagel, M., Barbin, V., Blanc, P., et al., eds., *Cathodoluminescence in Geosciences*. Springer, Heidelberg, 373—400. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04086-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04086-7_15)
- Schaltegger, U., 1993. The Evolution of the Polymetamorphic Basement in the Central Alps Unravelled by Precise U-Pb Zircon Dating. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(4): 466—478. <https://doi.org/10.1007/BF00698316>
- Schaltegger, U., Nowak, A., Ulianov, A., et al., 2019. Zircon Petrochronology and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Thermochronology of the Adamello Intrusive Suite, N. Italy: Monitoring the Growth and Decay of an Incrementally Assembled Magmatic System. *Journal of Petrology*, 60(4): 701—722. <https://doi.org/10.1093/petrology/egz010>
- Sinclair, H.D., Hou, G.Q., Zhou, L.J., 1998. Transformation from Flysch to Molasse in Peripheral Foreland Basin: The Role of Passive Continental Margin in Plate Fracture. *Journal of Geoscience Translations*, (2): 32—34 (in Chinese).
- Tang, M., Chu, X., Hao, J., et al., 2021a. Orogenic Quiescence in Earth's Middle Age. *Science*, 371(6530): 728—731. <https://doi.org/10.1126/science.abf1876>
- Tang, M., Ji, W. Q., Chu, X., et al., 2021b. Reconstructing Crustal Thickness Evolution from Europium Anomalies in Detrital Zircons. *Geology*, 49(1): 76—80. <https://doi.org/10.1130/G47745.1>
- Von Blanckenburg, F., Wang, Q., 1996. Plate Detachment—Alpine Collisional Magmatism and Tectonic Patterns. *Journal of Geoscience Translations*, (1): 31—34 (in Chinese).
- Winkler, W., 1993. Control Factors on Turbidite Sedimentation in a Deep-Sea Trench Setting-The Example of the Schlieren Flysch (Upper Maastrichtian-Lower Eocene, Central Switzerland). *Geodinamica Acta*, 6(2): 81—102. <https://doi.org/10.1080/09853111.1993.11105240>
- Xu, J.H., He, Q.X., 1980. Structural Model of Thin-Shell Plate and Collision Orogeny. *Science in China (Series D)*, 10(11): 1081—1089 (in Chinese).
- Yong, Z. Q., Deng, B., 2018. Plate Tectonic and Oil and Gas Basins. Geological Publishing House, Beijing, 59 (in Chinese).
- Zhu, Z. Y., Campbell, I. H., Allen, C. M., et al., 2020. S-Type Granites: Their Origin and Distribution through Time as Determined from Detrital Zircons. *Earth and Planetary Science Letters*, 536: 116140. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116140>

**中文参考文献**

- 陈德潜,陈刚,1990.实用稀土元素地球化学.北京:冶金工业出版社.
- 雷豪,张贵宾,徐备,2021.兴蒙造山带晚古生代伸展减薄过程:来自内蒙林西地区岩体的地球化学证据.岩石学报,37(7): 2029—2050.
- 李江海,杨静懿,程雅琳,等,2013.全球沉积盆地结构与构造演化背景——洲际经向超长构造剖面对比.高校地质学报,19(4): 561—573.
- 蔺新望,张亚峰,陈国超,等,2023.阿尔泰造山带南缘岩浆混合作用:阿克布拉克岩体岩石学、地球化学和年代学证据.地球科学,48(10): 3597—3612.
- 刘佩雯,张继彪,丁孝忠,等,2023.扬子西缘新元古代盐边群火山岩年代学及大地构造背景.地球科学,48(12): 4508—4526.
- 米建红,柳梅青,1996.前陆盆地发育早期的前隆不整合识别:北阿尔卑斯前陆盆地实例.四川石油普查,(1): 111—128.
- Neubauer, F., Von Raumer, J.F., 王义强, 1993. 阿尔卑斯山脉的基底是华力西构造带和阿尔卑斯-地中海山系的连锁.世界地质, 12(1): 92.
- 彭希龄,梁狄刚,王昌桂,等,2006.前陆盆地理论及其在中国的应用.石油学报,27(1): 132—144.
- Sinclair, H.D., 侯贵卿, 周立君, 1998. 周缘前陆盆地中复理石向磨拉石的转换——被动大陆边缘对板块破裂的作用.地质科学译丛, (2): 32—34.
- Von Blanckenburg, F., 王强, 1996. 板片脱落——阿尔卑斯山脉同碰撞岩浆作用和构造模式.地质科学译丛, (1): 31—34.
- 许清华,何起祥,1980.薄壳板块构造模式与冲撞型造山运动.中国科学,10(11): 1081—1089.
- 雍自权,邓宾,2018.板块构造与含油气盆地.北京:地质出版社, 59.