

# 东海盆地宝云亭花岗岩潜山的形成与演化过程：来自锆石 U-Pb 同位素年代学与岩石地球化学的约束

刘建斌<sup>1</sup>，李宁<sup>1</sup>，刘彬<sup>2,3\*</sup>，赵洪<sup>1</sup>，周虎<sup>1</sup>，岳勇<sup>1</sup>

1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司，上海 200335
2. 长江大学地球科学学院，湖北 武汉 430100
3. 非常规油气地质与工程湖北省工程研究中心，湖北 武汉 430100

**摘要：**目前对于东海盆地宝云亭地区已钻遇花岗岩的形成时代、岩石成分、成因机制及其潜山演化历史仍缺乏深入的认识。本文通过宝云亭潜山两口关键探井中钻遇的花岗岩开展锆石 U-Pb 年代学与岩石地球化学的综合研究，确定宝云亭花岗岩的成因及其深部地球动力学背景，进而揭示宝云亭花岗岩潜山形成与演化过程。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年结果揭示，宝云亭潜山花岗岩的结晶年龄为 106.9~108.8 Ma，花岗岩上部火山碎屑岩的形成时代为 35.9~41.3 Ma。宝云亭花岗岩体主要由花岗岩和花岗闪长岩组成，总体具有与高 Sr/Y 花岗岩或者埃达克质岩石类似的成分特征。综合岩石学和地球化学研究数据，可以确定宝云亭花岗岩的成因应该与早白垩世时期增厚下地壳范围内玄武质岩石的部分熔融有关。综合本文及区域上已有的多学科研究成果，可以判断宝云亭花岗岩体应该形成于早白垩世末期古太平洋板块俯冲回撤的构造背景中，并且东海盆地宝云亭花岗岩潜山的形成与演化至少经历了岩体形成期、岩体隆升与剥蚀期、岩体沉降期三个不同阶段。

**关键词：**花岗岩潜山；锆石 U-Pb 年龄；岩石成因；宝云亭；东海盆地

---

基金项目：“十四五”重大科技项目“潜山油气成藏理论与勘探关键技术（KJGG-2022-0302）、国家自然科学基金项目（42572055）

第一作者：刘建斌，男，1983 年生，硕士，高级工程师，主要从事油气勘探、地震地质综合解释工作，邮箱：liujb4@cnooc.com.cn

通讯作者：刘彬，男，1987 年生，博士，教授，博士生导师，主要从事火成岩岩石学与地球化学、基岩潜山油气勘探等教学与研究工作，邮箱：[binliu@yangtzeu.edu.cn](mailto:binliu@yangtzeu.edu.cn)

# **Formation and Evolution Process of the Baoyunting Granite Buried Hill in the East China Sea Basin: Constraints from Zircon U-Pb Isotopic Geochronology and Petrogeochemistry**

Liu Jian-Bin<sup>1</sup>, Li Ning<sup>1</sup>, Liu Bin<sup>2,3\*</sup>, Zhao Hong<sup>1</sup>, Zhou Hu<sup>1</sup>, Yue Yong<sup>1</sup>

1. Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China

2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100 China

3. Hubei Engineering Research Center of Unconventional Petroleum Geology and Engineering, Wuhan 430100 China

**Abstract:** Current understanding remains limited regarding the formation age, petrological composition, genetic mechanisms, and tectonic evolution of the granite encountered in the Baoyunting buried hill within the East China Sea Basin. This study presents an integrated zircon U-Pb geochronological and petrogeochemical investigation on granites from two key exploration wells in the Baoyunting area. Our objectives are to determine the petrogenesis and deep-seated geodynamic setting of these granites, and to further unravel their formation and evolution processes. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating reveals crystallization ages of 106.9~108.8 Ma for the Baoyunting granites, while the overlying pyroclastic rocks yield younger ages of 35.9~41.3 Ma. The granitic pluton primarily comprises granite and granodiorite, exhibiting geochemical affinities to high-Sr/Y granites or adakitic rocks. Combined petrological and geochemical evidence suggests that the Baoyunting granites originated from partial melting of basaltic rocks within a thickened lower crust during the Early Cretaceous. Integrating our results with regional multidisciplinary data, we propose that these granites formed in a tectonic setting associated with the Paleo-Pacific Plate slab rollback during the late Early Cretaceous. The evolution of the Baoyunting granite buried hill involved three distinct stages: 1) pluton emplacement,

2) uplift-denudation, and 3) subsidence.

**Keywords:** Granite buried hill; Zircon U-Pb geochronology; Petrogenesis;

Baoyunting; East China Sea Basin

随着我国海域油气勘探程度的不断提高, 油气勘探目标逐渐向深层-超深层、非常规等新领域转变(谢玉洪等, 2020), 近年来在渤海湾(海域)、北部湾和珠江口等盆地前新生代基岩及潜山中陆续发现了大量的油气藏(徐长贵等, 2025), 证实我国海域深层基岩潜山油气藏具有巨大的勘探潜力。东海盆地是我国近海面积最大的中生代-新生代叠合含油气盆地(刘金水等, 2020; 周心怀等, 2019), 总体沿北东-南西方向展布, 分布面积约  $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该盆地是一个在基底构造层长期改造基础上发育形成的中生代-新生代陆架盆地。前新生界基底潜山岩系在东海盆地内部(例如丽水-椒江凹陷和西湖凹陷中西部)发育较为广泛。这些潜山形态多样, 涉及到底劈山、双断山、残丘山等多种不同潜山样式, 并且其岩性组成相对复杂, 包括元古代片麻岩, 中生代花岗岩、安山岩和凝灰岩等多种岩石类型。目前在灵峰潜山、仙桥潜山和宝云亭等多个潜山部署的探井均有较好的油气显示。尽管潜山油气藏已经被列为东海盆地当前乃至未来重点攻关的方向之一, 但潜山油气勘探仍然存在着钻遇潜山井数量少、潜山岩性岩相特征不明、分布规律不清、潜山储层评价难度大等众多难题, 其中不同类型潜山形成与演化规律仍是制约潜山油气成储-成藏研究中最薄弱的一环, 严重影响着东海盆地潜山勘探突破。最新的油气勘探与地质研究揭示, 东海盆地西湖凹陷宝云亭地区发育一个产出面积相对较大的白垩纪花岗岩潜山, 目前已有两口探井(A2和A7)钻遇到该潜山深部的花岗岩, 并且均发现较好的油气显示(李林致等, 2023)。然而, 目前对于宝云亭地区已钻遇花岗岩的形成时代、岩石成分、成因机制及其潜山形成与演化过程仍缺乏深入的认识。

因此, 本文以东海盆地宝云亭潜山两口关键探井中钻遇的花岗岩为研究对象, 通过开展锆石 U-Pb 同位素测年和 Lu-Hf 同位素分析, 结合岩石学与地球化学等综合研究, 深入剖析宝云亭花岗岩的结晶年龄、岩浆源区组成、岩石成因及其形成的深部地球动力学背景, 在此基础上结合区域上已有多学科研究成

果揭示宝云亭花岗岩潜山形成与演化过程，进而为认识东海盆地中生代构造演化以及后续开展基岩潜山油气藏勘探与开发提供重要依据。

## 1 区域地质背景与已钻遇花岗岩样品特征

东海盆地是中国东部以新生代沉积为主的大型中生代-新生代叠合盆地，在构造上处于欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块汇聚带位置，通常被认为是环太平洋构造活动带的关键组成部分（刘金水等, 2020；周心怀等, 2019）。该盆地总体上具有东西分带特征，从西向东依次由西部坳陷带、中央隆起带和东部坳陷带三个重要构造单元组成（张国华等, 2015）。

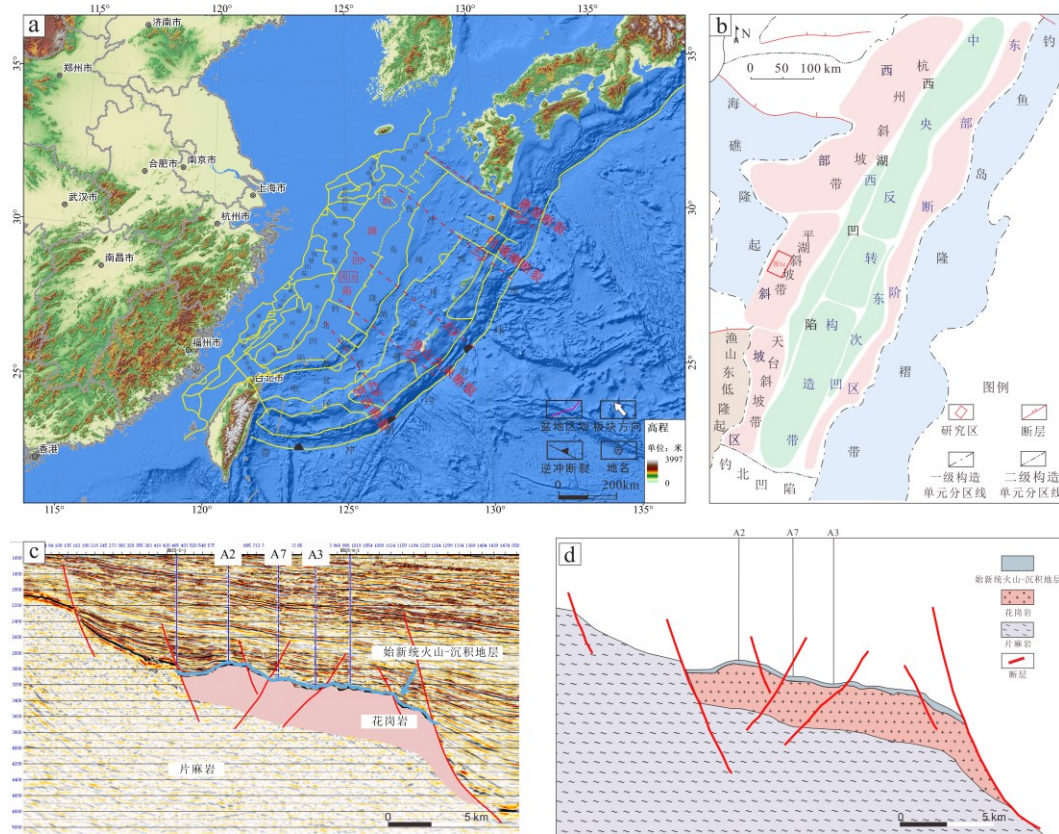


图 1 东海盆地构造单元图 (a)、西湖凹陷构造单元图 (b)、宝云亭潜山地震剖面 (c) 及其示意图 (d)

目前已钻遇的最古老基底片麻岩主要位于该盆地西南部丽水凹陷灵峰潜山内部，其 Rb-Sr 同位素和锆石 U-Pb 同位素年龄分别为~1806 Ma 和~1848 Ma（刘金水等, 2020）。这套片麻岩在变质年龄、岩石结构、矿物组成等多个方面

均可与华夏地块浙西南一带出露的八都群相类比，进一步指示东海盆地基底具有与华夏地块类似的结晶基底，很可能经历相似的构造演化过程。中生代-新生代时期，中国东部受到古太平洋（或太平洋）构造域、特提斯构造域、古亚洲洋构造域的联合作用，尤其是古太平洋（或者太平洋）构造域对东海盆地的形成与演化具有非常重要的影响（Zhu et al., 2019），进而形成不同时代和不同成分类型的火山岩和侵入岩。根据现有的岩相学、同位素年代学和地球化学等资料，可以将东海盆地中生代-新生代岩浆活动至少划分为三叠纪-侏罗纪、白垩纪、古新世-始新世和渐新世-中新世四个期次。其中，三叠纪-侏罗纪已钻遇火成岩大多分布在丽水-椒江凹陷及周缘的西次凹、灵峰凸起、东次凹、雁荡凸起四个不同构造单元内，以出露闪长质-花岗质侵入岩为特征（郭真等, 2015; Yuan et al., 2017）。少量出露在福州凹陷内，以发育安山质火山岩为特征。白垩纪以出露花岗质侵入岩和中酸性火山岩为特征，多分布在西湖凹陷斜坡带、丽水-椒江凹陷（丽水西次凹）、福州凹陷和海礁隆起内，以发育中酸性火山岩和花岗质侵入岩为特征（黄晓松等, 2024）。

本文研究的宝云亭潜山位于该盆地东部坳陷带西湖凹陷中，主要由花岗质侵入岩组成。目前有 A2、A7 两口探井钻遇到该潜山上部火山碎屑岩层和下部花岗质基底（图 2a-b），火山碎屑岩层上覆地层为始新统宝石组沉积岩层。其中，A2 井钻遇花岗质侵入岩样品多为肉红色，中细粒花岗结构，主要由石英（30~35%）、斜长石（15~20%）和碱性长石（30~35%）组成，含少量的黑云母（5~10%）以及不透明金属矿物（图 2a, 2c）。斜长石具有清晰的聚片双晶结构，碱性长石发育少量简单双晶和格子双晶（图 2a）。两种不同类型长石的表面均发生少量蚀变，被粘土矿物和绢云母所取代。黑云母多为褐色，片状晶形，具有较为鲜艳的干涉色（图 2c）。而 A7 井钻遇花岗质侵入岩样品多为浅灰白色，中细粒花岗结构，由石英（25~30%）、斜长石（30~35%）、碱性长石（20~25%）、黑云母（3~5%）和少量不透明矿物等组成（图 2d）。与 A2 井相比，A7 井长石类矿物发生了较为明显的蚀变，仅部分斜长石颗粒显示较显著的聚片双晶，黑云母矿物多被绿泥石和不透明矿物等所取代。两口井钻遇的火山碎屑岩层样品以酸性凝灰岩为主，显示特征的晶屑-角砾凝灰结构（图 2b, 2e, 2f），部分岩心段可见明显的层理构造。这些凝灰岩的晶屑成分主要为棱角

状石英以及少量的半自形板状碱性长石和斜长石，角砾成分相对复杂，涉及到火山岩、沉积岩和花岗岩等不同成分类型。其中，花岗岩角砾总体上可以与A2、A7井钻遇得的花岗岩成分类比。这些样品具有典型的中细粒花岗结构，主要由石英、斜长石、碱性长石组成，含有少量的黑云母和不透明矿物。斜长石聚片双晶相对发育，部分碱性长石发育较为明显的格子双晶和简单双晶（图2f）。

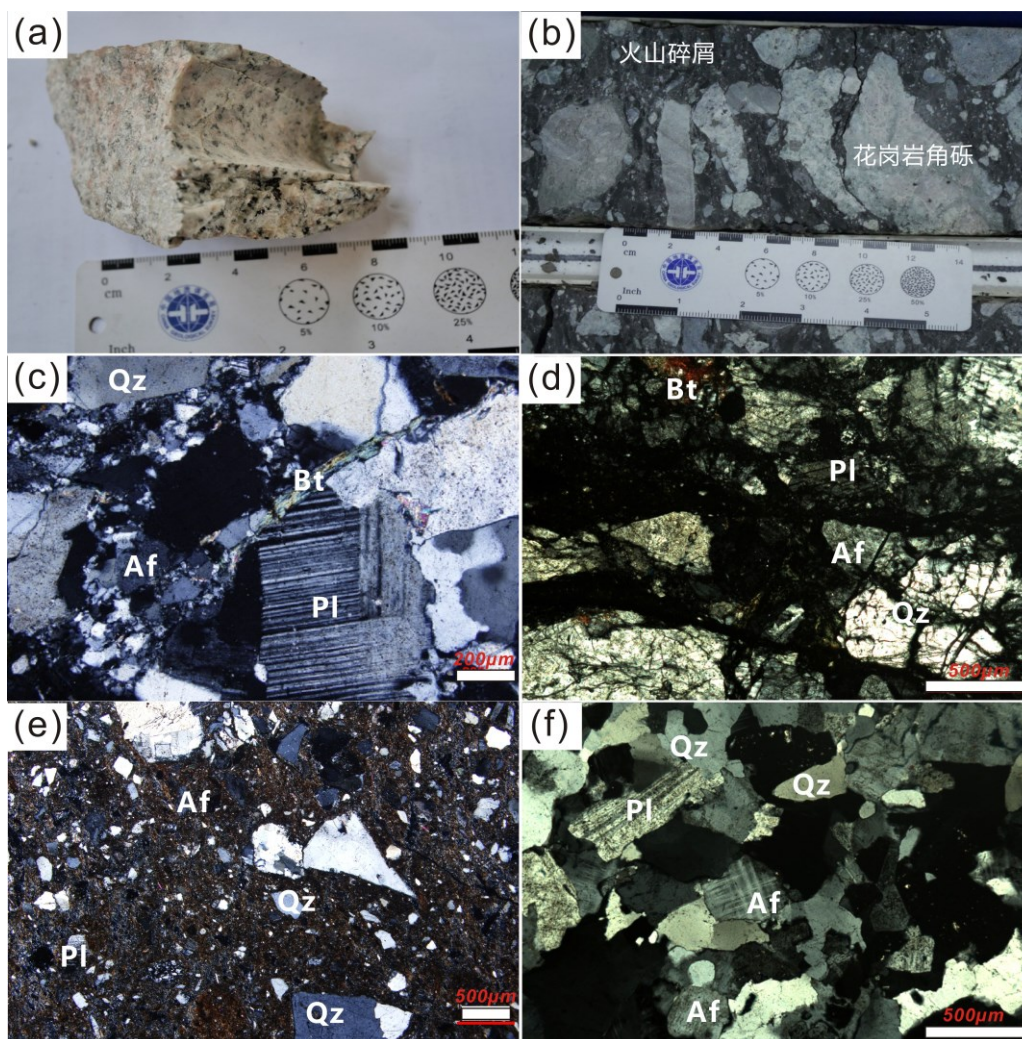


图2 宝云亭花岗岩潜山已钻遇火山岩和花岗岩手标本和显微镜下照片

图中，(a)-A2井钻遇的花岗岩手标本照片；(b)-A7井钻遇的上覆火山岩层，火山岩层中可见花岗岩角砾；(c)-A2井花岗岩的正交偏光镜下照片；(d)-A2井花岗岩的正交偏光镜下照片；(e)-已钻遇火山岩的正交偏光镜下照片；(f)-花岗岩角砾的正交偏光镜下照片；Af-碱性长石；Bt-黑云母；Pl-斜长石；Qz-石英。

## 2 测试方法

在详细的岩心观察编录和岩相学分析的基础上，选取相对新鲜、少蚀变的岩石样品用于锆石 U-Pb 测年和 Lu-Hf 同位素分析、全岩主量-稀土-微量元素分析等。

锆石矿物的挑选按照常规程序和标准规范来进行，采用机械粉碎、重磁电分选和双目镜下手工提纯等方法来完成。选取代表性锆石颗粒来制靶，使用锆石阴极发光（CL）、透-反射光照相等对锆石颗粒进行成因类型分析，进而圈定合适的测试点位。锆石 U-Pb 同位素测年主要是在武汉上谱分析测试公司采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪（LA-ICP-MS）完成。其中，实验系统由 Agilent 7900 型 ICP-MS 与 COMPexPro 102 ArF 准分子激光剥蚀装置联机构建。实验过程中采用氩气作为补偿气、氮气作为载气，进行激光剥蚀过程中的灵敏度调节。U-Th-Pb 同位素比值分析及其同位素年龄计算等数据处理使用 ICPMSDataCal 软件离线完成，具体数据处理方法与仪器工作参数详见 Liu et al. (2010)。本文中涉及到的锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图和加权平均年龄计算主要采用 ISOPLOT 软件完成。锆石 Lu-Hf 同位素实验采用 Neptune Plus 型多接收电感耦合等离子体质谱仪（MC-ICP-MS）与 Geolas HD 型准分子 ArF 激光剥蚀系统联合完成。为保障数据可靠性，实验全程使用 91500、GJ-1 和 Plešovice 三类锆石标准样品进行仪器状态监控，具体分析方法与实验条件参照 Hu et al. (2012)。

选取相对新鲜的岩石样品粉碎至 200 目以下，用于全岩主量元素和微量元素成分测试。其中，岩石常见主量元素对应氧化物含量分析采用 X 荧光光谱  $\alpha$  系数测定法完成，使用 GBW07103 和 GBW07107 等标样来监测实验测试的准确度。微量元素及稀土元素含量的测定使用 Agilent 7500a ICP-MS（Musashinoshi, Nakacho, Tokyo, Japan）等仪器完成。选取约 50mg 岩石粉末放入 Teflon 溶样弹中，并且使用  $\text{HNO}_3 + \text{HF}$  来消解样品（48 小时，195°C）。详细的实验流程和相数据计算与处理方法等详见 Liu et al.(2008)。

### 3 测试结果

#### 2.1 锆石 U-Pb 同位素年代学

本次针对两口探井中钻遇的 2 件花岗岩样品（A2-01 和 A7-01）和上部 2 件凝灰岩样品（A2-02 和 A7-02）分别开展了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年，其测试结果详见表 1。

A2-01 花岗岩样品中锆石颗粒多为无色透明，半自形-自形柱状晶，其长度多分布在 60~150 $\mu\text{m}$  范围内。本次共测定 25 颗锆石 25 个点。CL 图像和微量元素分析结果揭示，这些锆石颗粒多具有相对清晰的岩浆震荡环带，具有相对高的 Th/U 比值，多分布在 0.6~1.1 的范围内，与酸性岩浆结晶锆石的特征一致（Liu et al., 2025; 刘彬等, 2023）。所有这些测点给出相对一致的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄，集中分布在 104~115 Ma，其加权平均计算结果为  $106.9\pm 1.0$  Ma，代表了 A02 井钻遇花岗岩样品的结晶年龄。

A7-01 花岗岩样品中的锆石颗粒多为无色-淡黄色，透明，多具有半自形-自形的晶体形态特征，其长度多分布在 60~150 $\mu\text{m}$  范围内。本次针对 A7-02 样品共分析 24 颗锆石 25 个点。其中 4 颗锆石颗粒边部具有一定的磨圆度，在 CL 图像具有明显的继承核-边结构，并且其 Th/U 比值相对较低，为 0.2~0.4。这些锆石给出相对古老的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄，为 171~244 Ma，代表了从围岩中继承锆石的年龄。其余 21 个测点所在的锆石颗粒多为棱柱状，在 CL 图像上具有清晰的岩浆震荡环带，其 Th/U 比值相对较高，多分布在 0.8~1.4 之间，与酸性岩浆结晶锆石的特征一致（Liu et al., 2025; 刘彬等, 2023）。这些测点给出相对一致的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄，集中分布在 108~113 Ma，其加权平均计算结果为  $108.8\pm 0.6$  Ma，代表了 A07 井钻遇花岗岩样品的结晶年龄。

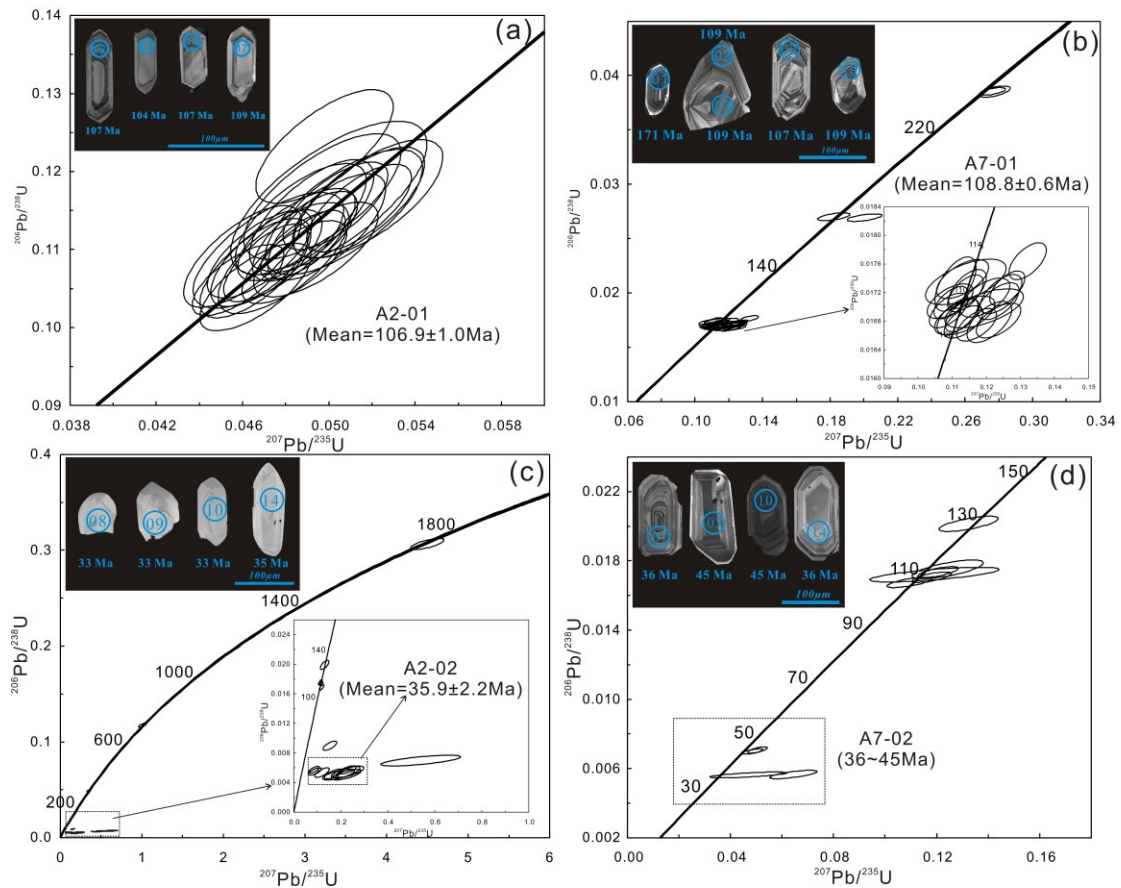


图3 宝云亭潜山 A2 和 A7 井中钻遇花岗岩与凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图以及代表性锆石颗粒 CL 图像

A02-2 凝灰岩样品的锆石颗粒多为无色-淡黄色，透明，多为半自形晶。本次针对该样品共测定 18 颗锆石 18 个测点。其中 8 颗结构相对复杂，既有继承核-边结构，也显示较为清晰的岩浆震荡环带特征，其年龄相对较老，为 715~1724 Ma、~308 Ma、~127 Ma、108~112 Ma、~58 Ma。其中 108~112 Ma 的锆石颗粒结构以及 Th、U 含量等可与花岗岩中岩浆结晶锆石的特征类比（表 1）。以上这些相对古老锆石年龄很可能代表了从围岩中继承锆石的年龄或者污染了花岗岩中的锆石年龄。其余 10 个测点所在锆石大多具有相对明亮的 CL 图像特征和较为清晰的岩浆震荡环带，具有相对高的 Th/U 比值，集中分布在 1.0~1.5 之间。这些测点给出相对年轻的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄，分布在 33~45 Ma 之间，其加权平均计算结果为  $35.9 \pm 2 \text{ Ma}$ ，应该代表了凝灰岩对应的岩浆结晶锆石的年龄。

A07-02 凝灰岩样品的锆石颗粒多为无色透明，具有半自形-自形柱状晶体形态特征。本次共测定 19 颗锆石 19 个测点。其中 15 颗锆石与 A02-2 火山碎屑岩中年龄偏老的锆石特征相似，均具有相对复杂的结构和成分，测点给出相对古老的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄，分布在~1886Ma、~256Ma、156~167Ma、123~137Ma、106~114 Ma。其中 106~114Ma 这组锆石的结构和成分（例如 Th、U 含量；表 1）均可与花岗岩中岩浆结晶锆石特征类比。其余 5 个测点对应的锆石具有相对清晰的岩浆震荡环带和高 Th/U 比值，年龄分布在 36~45.4 Ma 之间，其加权平均计算结果为  $41.3\pm 8$  Ma，很可能代表了凝灰岩对应的岩浆结晶锆石的年龄。

从上述测试结果可以得出，宝云亭潜山花岗质侵入体的形成时代（106.9~108.8 Ma）要明显早于上覆凝灰岩的形成时代（35.9~41.3Ma）。

## 2.2 岩石地球化学成分

本次针对 A2 和 A7 两口探井中钻遇的 17 件花岗岩样品和 5 件上覆凝灰岩样品开展主量-微量元素地球化学分析，具体测试结果以及计算的相关参数详见表 2 和表 3。

研究结果显示，A2 井花岗岩样品具有相对高的  $\text{SiO}_2$ （72.07~78.92%），相对低的 FeOt（0.67~1.74%）、MgO（0.20~0.46%）、Mg#（32~35）和  $\text{P}_2\text{O}_5$ （0.03~0.08%），样品在侵入岩 TAS 图解中投影均落在花岗岩成分范围内。这些样品具有中等程度的  $\text{K}_2\text{O}$ （2.55~3.37%），在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图中投影落在中钾钙碱性系列成分范围内。样品具有相对高的 A/CNK 值（0.93~1.09），显示准铝质-弱过铝质成分特征；而 A7 井花岗岩样品具有相对低的  $\text{SiO}_2$ （72.07~78.92%），相对高的 FeOt（1.84~2.53%）、MgO（0.61~0.96%）、Mg#（36~44）和  $\text{P}_2\text{O}_5$ （0.07~0.11），样品在侵入岩 TAS 分类图解中投影均落在花岗闪长岩成分范围内。A7 井样品具有相对高的  $\text{K}_2\text{O}$ ，在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图中投影落在中钾-高钾钙碱性的范围内。A7 井花岗岩样品具有相对低的 A/CNK 值（0.87~0.98），具有准铝质成分特征。两套花岗岩样品相对球粒陨石都显著富集轻稀土元素，亏损重稀土元素，并且绝大多数样品具有 Eu 正异常的特征，但是 A7 井样品的  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  比值（1.0~1.7）要明显高于 A2 井样品的相应比值



上覆凝灰岩样品具有变化范围相对较大的  $\text{SiO}_2$  (68.1~68.8%)、 $\text{FeO}_t$  (0.99~1.72%)、 $\text{MgO}$  (0.45~2.08%) 和  $\text{K}_2\text{O}$  (2.21~3.71%)。岩石样品相对球粒陨石富集轻稀土，亏损重稀土，并且具有较为明显的 Eu 负异常 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  为 0.7~0.9)。与下部花岗岩样品相比，凝灰岩样品具有相对低的 Sr (104~144ppm)、Sr/Y (分别为 55.64~130.87 和 24.02~89.62) 和  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  (4.5~6.3ppm)，相对高的 Y (19.4~28.1ppm) 和 Yb (2~2.67ppm)。

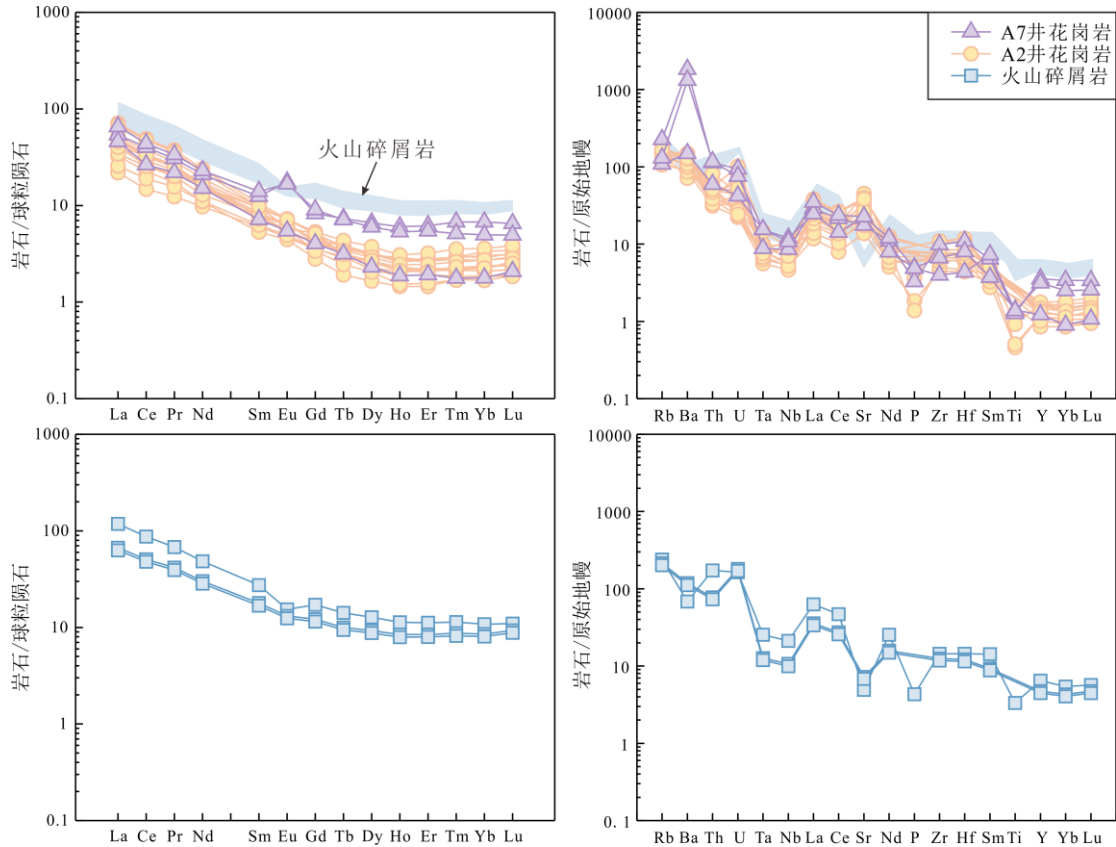


图 5 宝云亭潜山中岩石样品的稀土元素球粒陨石标准化分布图 (a)

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 Taylor et al. (1985); 原始地幔标准化值据 Sun et al. (1989)。

### 2.3 锆石 Lu-Hf 同位素组成

本次主要针对 A2 井花岗岩的锆石样品开展 Lu-Hf 同位素测定，其测定结果和计算得到的相关参数详见表 4。测试结果显示，花岗岩样品中的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为

-5.06~2.61，对应的二阶段模式年龄（ $T_{2DM}$ ）为 1.0~1.5Ga。这些锆石样品的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值要明显高于东海盆地起源于古元古代增厚下地壳源区的侏罗纪花岗岩的相应比值（图 6），并且其  $T_{2DM}$  模式年龄也明显年轻于侏罗纪花岗岩相应的模式年龄。此外，这些花岗岩样品的锆石 Hf 同位素数据大多投点位于华夏地块中元古代地壳演化范围内，反映了中元古代地壳物质对其源区的贡献相对较大。

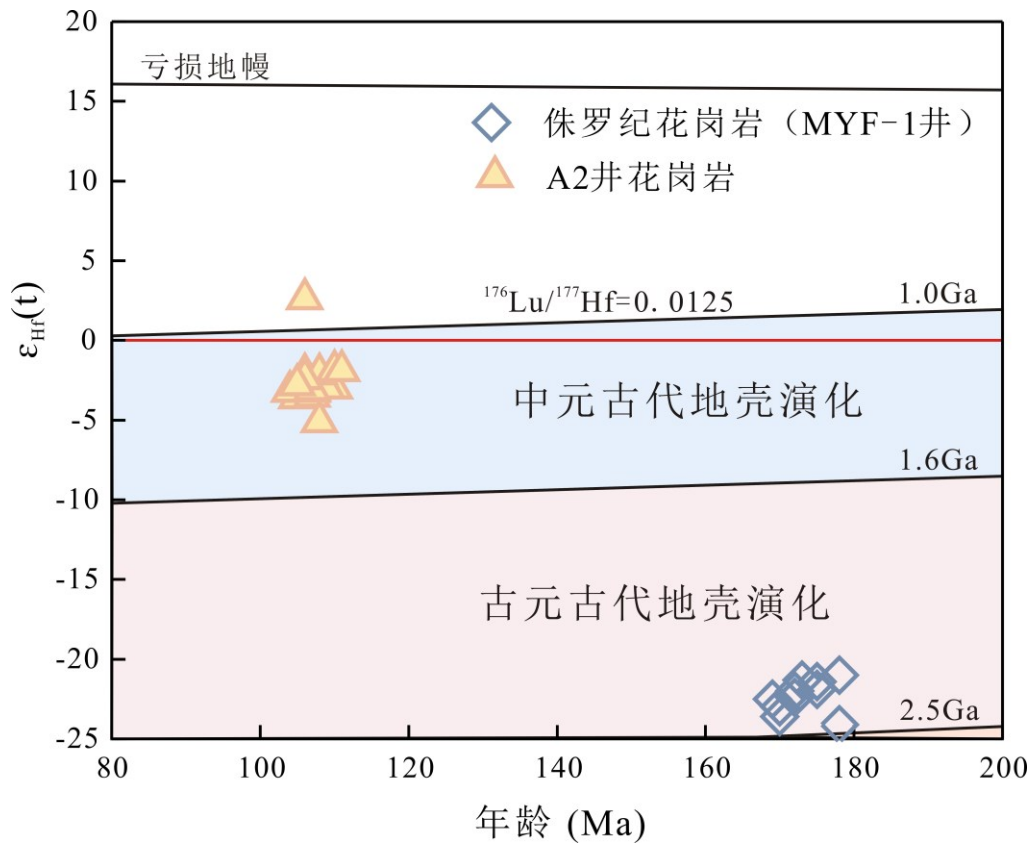


图 6 宝云亭花岗岩样品的锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$ -年龄 (Ma) 协变图

图中，东海盆地已钻遇的侏罗纪花岗岩（MYF-1 井）Hf 同位素数据据 Yuan et al.(2017)；华夏地块古元古代地壳演化与中元古代地壳演化趋势及其范围据贺振宇等(2025)。

## 4 讨论

### 4.1 已钻遇花岗岩岩石成因

本次研究的两口探井中钻遇的花岗质侵入岩样品均具有相对高的 Sr、Sr/Y

和 $(La/Yb)_N$ ，相对低的 Y 和 Yb，总体成分与世界上现已报道的高 Sr/Y 花岗岩或者埃达克质岩石的成分特征类似（Castillo et al., 2012; Defant and Drummond, 1990）。目前国内外学者对于高 Sr/Y 花岗岩或者埃达克质岩的成因机制的认识主要涉及到玄武质岩浆的分离结晶或者同化混染-分离结晶作用（FC 或 AFC; Li et al., 2013）、俯冲洋壳的部分熔融（Defant and Drummond, 1990; Yogodzinski and Kelemen, 1998）、增厚或者拆沉下地壳的部分熔融（Arculus et al., 1999; Wang et al., 2005）、地壳与地幔来源岩浆的混合作用（Streck et al., 2007）四种模式。

玄武质岩浆发生的 FC 或者 AFC 过程可以形成高 Sr/Y 岩浆熔体，这些熔体通常被认为是原生岩浆在上地幔顶部发生高压结晶分异的产物（Macpherson et al., 2006）。在这种成因背景下，花岗质侵入体的产出通常会伴生大规模的镁铁质-超镁铁质岩，并且玄武质高压分离结晶作用会使得这些花岗岩样品的 Sr/Y、La/Yb、Dy/Y、Gd/Yb 等与 SiO<sub>2</sub> 呈现明显的正相关关系。现有的地质勘探和井-震资料揭示，宝云亭潜山区域内明显缺乏与花岗质侵入体同期产出的大面积产出的镁铁质-超镁铁质侵入体，而且花岗岩样品的 Sr/Y 等特征微量元素比值与 SiO<sub>2</sub> 之间并不呈现明显的线性正相关关系。这些与玄武质岩浆 FC 或者 AFC 过程形成的高 Sr/Y 花岗岩特征存在显著的区别。俯冲洋壳熔融形成的高 Sr/Y 花岗岩通常具有相对高的 Mg#（大于 47）、相对低的 K<sub>2</sub>O 以及与 MORB 类似的同位素组成（Defant and Drummond, 1990）。本次研究的宝云亭潜山两套花岗岩样品（A2 和 A7 井）均具有相对低的 Mg#（分别为 32~35 和 36~44）、相对高的 K<sub>2</sub>O（分别为 2.55~3.37% 和 2.94~4.25%）。这些样品具有相对富集的 Hf 同位素组成，其  $\epsilon_{Hf}(t)$  为 -5.06~2.61，并且具有相对古老的 T<sub>2DM</sub> 模式年龄（1.0~1.5Ga）。因此，俯冲洋壳部分熔融模式不能用于解释宝云亭潜山花岗岩的成因。由地壳与地幔来源岩浆的混合作用形成的高 Sr/Y 花岗岩样品会出现辉石等特征矿物，并且具有显著高的 Mg#（大于 66）和 MgO（大于 4.5%; Streck et al., 2007）。研究区 A2 和 A7 两口探井中钻遇的花岗岩样品均没有发育辉石和暗色微粒包体，并且两类花岗岩样品都具有显著低的 Mg# 和 MgO，表明其形成与地壳与地幔来源岩浆的混合作用无关。增厚或者拆沉下地壳的部分熔融形成的高 Sr/Y 花岗岩往往具有富钾和低镁（Mg# 小于 45）的特征（Rapp et al.,

1999; Defant and Kepezhinskas, 2001)。由拆沉下地壳部分熔融形成的高 Sr/Y 花岗岩的 MgO、Cr、Ni 含量要明显高于由增厚下地壳熔融形成的高 Sr/Y 花岗岩特征。研究区 A2 和 A7 两口探井中钻遇的两套花岗岩样品在基于实验岩石学成果构建的多种花岗岩源区成分判别图解中均落在下地壳变玄武岩部分熔融的成分范围内。A2 井花岗岩的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 -5.06~2.61，绝大多数样品与华夏地块中元古代地壳成分特征类似（图 6）。由于 Sr 在斜长石中具有很强的相容性，而 Y 在部分熔融过程中进入石榴石，高 Sr/Y 比值通常用于指示大陆背景下增厚的下地壳的部分熔融，这种机制下石榴石在源区残留物中能够保持稳定，而斜长石不稳定。因此，中-酸性岩浆岩的 Sr/Y 比值常被用来量化古地壳厚度（Hu et al., 2017; Profeta et al., 2015）。本次主要利用 Chapman et al. (2015) 提出的方法进行估算，结果显示宝云亭花岗岩形成时期的古地壳厚度约为 35~47 km。此外，这两套花岗岩样品均具有低镁、高钾以及低 Cr 和 Ni 含量。这些特征共同表明宝云亭潜山高 Sr/Y 花岗岩的形成很可能与增厚下地壳物质的部分熔融关系密切。

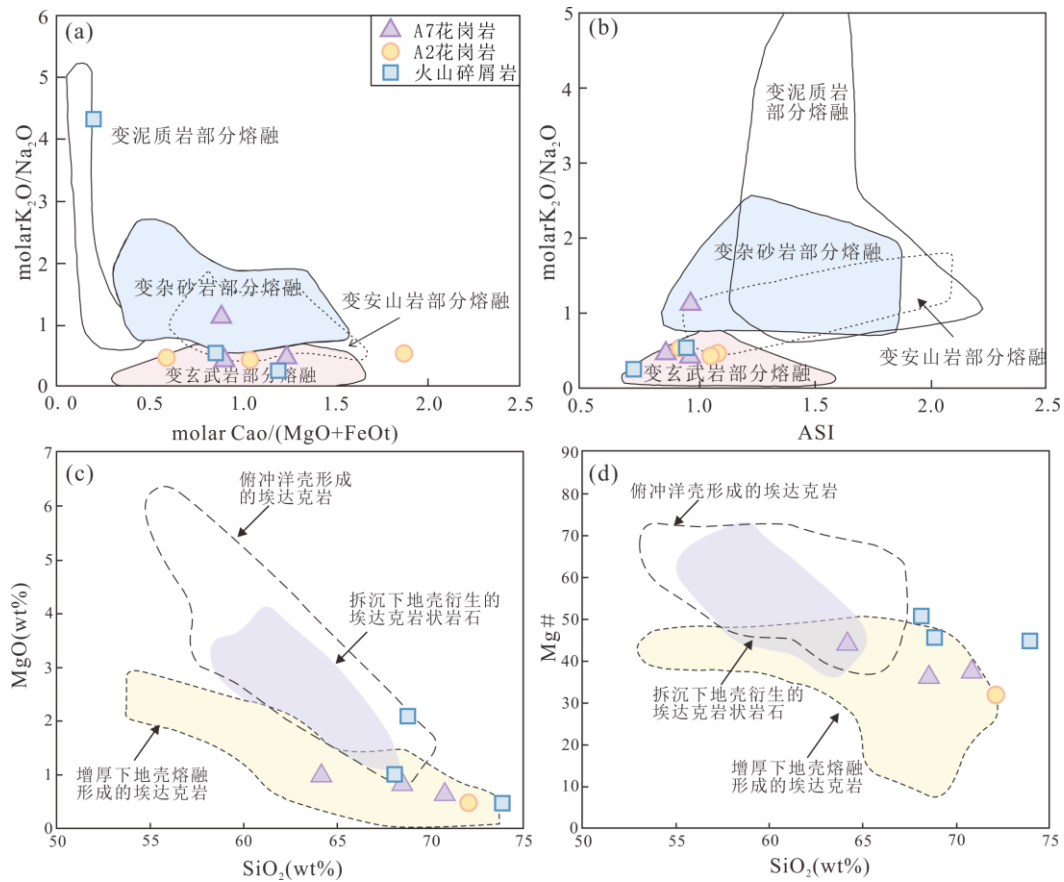


图 7 宝云亭潜山岩样品  $\text{molarK}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{molarCa}/(\text{MgO}$

+ $\text{FeO}$ )(a; 底图据 Kaygusuz et al., 2008)、 $\text{molarK}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ -ASI(b; 底图据 Pearce et al., 1984)、 $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ (c; 底图据 Wang et al., 2005)和  $\text{Mg}\#-\text{SiO}_2$ (d; 底图据 Rapp et al., 1999)图解

由于锆石往往是长英质岩浆在早期结晶的矿物相，其 Zr 元素分配系数对岩浆温度非常敏感 (Miller et al., 2003; Watson and Harrison, 1983)，因此可以利用基于全岩 Zr 含量的锆饱和温度计来评估花岗岩对应的初始熔体的温度。计算结果显示，A2 井花岗岩的锆饱和温度为 699~767°C，A7 井花岗岩样品的锆饱和温度为 674~745°C。最新研究显示，锆石  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值的变化明显受到锆石分异和残留石榴子石的控制，因此可以使用其平均值来估算岩浆结晶的压力或者所处地壳的深度范围 (Moreira et al., 2023)。基于 A2 井钻遇花岗岩样品的锆石  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值的估算结果揭示，宝云亭花岗岩体有关的岩浆结晶压力约为~0.5 Gpa，对应地壳深度为~18.9 km。

综上，本文认为东海盆地宝云亭潜山花岗岩的形成应该与早白垩世时期增厚下地壳范围内玄武质岩石的部分熔融有关。

#### 4.2 宝云亭花岗岩潜山形成与演化过程

中生代-新生代时期，中国东部总体处于古太平洋（或太平洋）构造域、特提斯构造域、古亚洲洋构造域的联合作用，尤其是古太平洋（或者太平洋）构造域对东海盆地的形成与演化具有非常重要的影响 (刘金水等, 2020)。由于古太平洋（或太平洋）并非纯粹的板块，内部非常复杂，加之部分古太平洋板块（例如伊泽奈崎板块）已俯冲沉没到深部，因此恢复中生代-新生代大洋板块的俯冲过程非常困难。基于最新古地磁、古板块重建和岩浆作用等最新研究结果 (Valer'evna et al., 2017; Müller et al., 2016; 李三忠等, 2019; 刘金水等, 2020)，可以判断东海盆地先后受到古太平洋板块（伊泽奈崎；250~65 Ma）、太平洋板块（65~32 Ma）和菲律宾洋板块（23 Ma~至今）演化的影响，并且相应的大洋板块演化经历了平坦俯冲 (Flat subduction)、俯冲角度改变和俯冲回撤 (Slab rollback) 等复杂的构造演化过程。东海盆地中生代的岩浆岩主要集中出

现在早-中侏罗世和早白垩世末期两个阶段，明显缺少晚侏罗世-早白垩世早期岩浆活动（黄晓松等, 2024）。早-中侏罗世已钻遇火成岩的形成时代分布在 187.1~171Ma 之间（Xu et al., 2017; Yuan et al., 2017），多分布在丽水-椒江凹陷及周缘的西次凹、灵峰凸起、东次凹、雁荡凸起四个不同构造单元内，以出露闪长质-花岗质侵入岩为特征。这些花岗岩样品具有高 Sr/Y 以及与弧岩浆岩类似的特征，通常被认为是古太平洋板块（伊泽奈崎）前进式俯冲背景下增厚下地壳发生部分熔融的产物，其源区成分以古元古代地壳物质为主（Yuan et al., 2017）。最新区域构造研究成果揭示，华北晚中生代以来岩浆活动显示一次较为明显的反转（Ma and Xu et al., 2020），其中，侏罗纪时期（185~145Ma）的岩浆岩年龄从沿海-内陆呈现逐渐变年轻的趋势，很可能反映了古太平洋板块的前进俯冲，而早白垩世早期（145Ma~）开始发育的岩浆岩年龄从内陆-沿海呈现逐渐变年轻的趋势，反映了古太平洋板块正在逐步回撤。华南地区晚中生代以来岩浆活动也同样出现一次明显的反转，至少从 135Ma 开始，岩浆岩的年龄从内陆到沿海逐渐变年轻（Li et al., 2019）。以上资料表明早白垩世早期古太平洋板块俯冲回撤效应从西逐渐向东进行传递，此时东海盆地区域仍然处于相对挤压的状态，地壳加厚，进而抑制岩浆熔融作用的产生，造成早白垩世早期岩浆间歇期的形成。本文研究的宝云亭潜山花岗岩形成于早白垩世末期（106.9~108.8 Ma），具有高 Sr/Y 的特征，其形成与增厚的中元古代下地壳的熔融作用有关，并且其岩浆熔体具有相对高温的特点（699~767°C），很可能反映这一时期古太平洋板块俯冲回撤已传递至东海盆地西湖凹陷地区。在早白垩世末期古太平洋俯冲回撤的背景下，软流圈地幔上涌供热导致原先增厚的下地壳发生熔融进而形成宝云亭地区高 Sr/Y 花岗岩。

值得注意的是，本次研究揭示宝云亭潜山花岗岩上覆火山碎屑岩具有更年轻的结晶年龄（35.9~41.3 Ma），为始新世岩浆活动产物。这些火山碎屑岩大多具有沉火山碎屑岩类的特征，具有类似沉积岩的层理构造，碎屑成分相对复杂，涉及到不同类型晶屑以及多种不同成分的岩屑（包括火山岩、沉积岩和花岗岩等）。这些样品在地球化学组成上与潜山花岗岩的成分存在显著的区别，例如，具有变化范围相对较大的 SiO<sub>2</sub>、FeO<sub>t</sub>、MgO 和 K<sub>2</sub>O，显著的 Eu 负异常和低 Sr/Y 的特征。正如上文所述，宝云亭花岗岩体有关的岩浆结晶压力约为

~0.5 Gpa，对应的地壳侵位深度为~18.9 km。这些反映了宝云亭花岗岩体形成后很可能经历了近 65Ma 的隆升-风化剥蚀过程。

综合本文及区域上已有的多学科研究成果，本文认为东海盆地宝云亭花岗岩潜山的形成与演化过程至少可以划分为如下三个阶段（图 8），具体包括：

（1）岩体形成期：早白垩纪末期（106.9~108.8 Ma），在古太平洋板块俯冲回撤的影响下增厚下地壳发生熔融形成高 Sr/Y 花岗岩，并且这些花岗岩侵入到八都群片麻岩中；（2）岩体隆升与剥蚀期：宝云亭花岗岩体发生抬升及后续风化剥蚀作用，该过程很可能持续约 65Ma；（3）岩体沉降期：宝云亭花岗岩所在区域发生显著的沉降作用，始新统火山-沉积碎屑地层披覆到宝云亭花岗岩体上方。

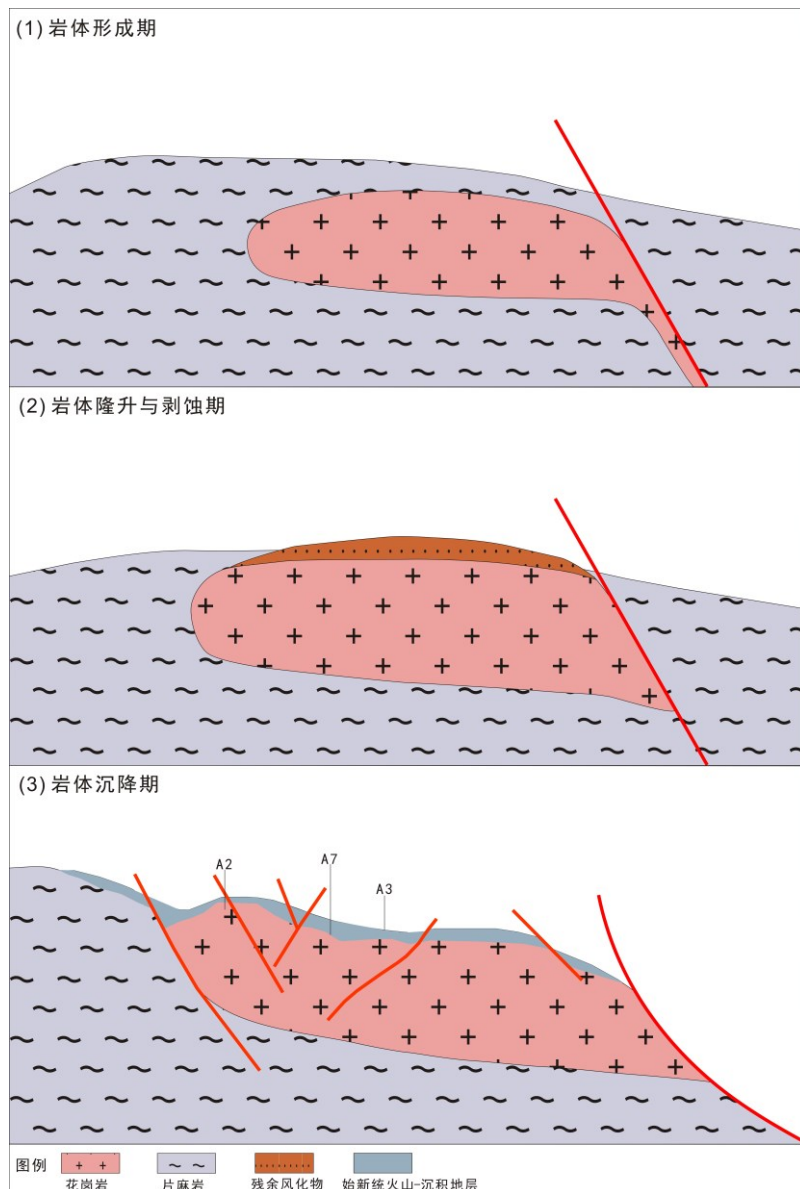


图 8 宝云亭潜山形成与演化模式图

## 5 结论

(1) 本次锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年结果揭示，东海盆地宝云亭潜山花岗岩的结晶年龄为 106.9~108.8 Ma，上部凝灰岩的形成时代为 35.9~41.3 Ma。

(2) 宝云亭花岗岩体主要由花岗岩和花岗闪长岩组成，总体具有与高 Sr/Y 花岗岩或者埃达克质岩石类似的成分特征。

(3) 宝云亭花岗岩的成因应该与早白垩世时期增厚下地壳范围内玄武质岩石的部分熔融有关。

(4) 宝云亭花岗岩体应该形成于早白垩世末期古太平洋板块俯冲回撤的构造背景中。综合本文及区域上已有的多学科研究成果, 本文认为东海盆地宝云亭花岗岩潜山的形成与演化主要经历了岩体形成期、岩体隆升与剥蚀期、岩体沉降期三个不同阶段。

### 参考文献

- 郭真, 高顺莉, 王建强, 等. 2015. 东海丽水凹陷新生代基底岩体锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. 海洋通报, 34 (6): 675-687.
- 贺振宇, 孙立新, 毛玲娟, 等. 2015. 北山造山带南部片麻岩和花岗闪长岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素: 中元古代的岩浆作用与地壳生长 [J]. 科学通报, 60 (4): 389-399.
- 黄晓松, 张涛, 唐贤君, 等. 2024. 东海盆地西湖凹陷中央背斜带平湖组、花港组生物地层厘定及其沉积环境、古气候探讨 [J/OL]. 地层学杂志, 48 (4): 440-452.
- 李林致, 郭刚, 祁鹏, 等. 2023. 风化壳型花岗岩潜山有效储层预测——以平湖斜坡宝云亭地区为例 [J/OL]. 海洋地质与第四纪地质, 43 (2): 160-169.
- 李三忠, 曹现志, 王光增, 等. 2019. 太平洋板块中—新生代构造演化及板块重建 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 642-677.
- 刘彬, 徐雨, 马昌前, 等. 2023. 北羌塘宁多地区三叠纪过铝质花岗岩的成因及其地球动力学背景 [J]. 地球科学, 48 (9): 3296-3311.
- 刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等. 2020. 东海盆地中, 新生代盆架结构与构造演化 [J]. 地质学报, 94 (3): 675-691.
- 谢玉洪, 高阳东. 2020. 中国海油近期国内勘探进展与勘探方向 [J]. 中国石油勘探, 25 (1): 20-30.
- 徐长贵, 杨海风, 徐伟, 等. 2025. 渤海海域致密油气及页岩油勘探新领域及资源潜力 [J]. 石油学报, 46 (1): 173.
- 张国华, 张建培. 2015. 东海陆架盆地构造反转特征及成因机制探讨 [J/OL]. 地学前缘, 22 (1): 260-270.
- 周心怀, 高顺莉, 高伟中, 等. 2019. 东海陆架盆地西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测 [J]. 中国石油勘探, 24 (2): 153-164.

- Arculus R J, Lapiere H, Jaillard E. 1999. Geochemical window into subduction and accretion processes: Rapas metamorphic complex, Ecuador [J] . *Geology*, 27 (6) : 547-550.
- Castillo P R. 2012. Adakite petrogenesis [J] . *Lithos*, 134: 304-316.
- Chapman J B, Ducea M N, Decelles P G, et al. 2015. Tracking changes in crustal thickness during orogenic evolution with Sr/Y: An example from the North American Cordillera [J] . *Geology*, 43 (10) : 919-922.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J] . *Nature*, 347 (6294) : 662-665.
- Defant M J, Kepezhinskas P. 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas[J/OL]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82(6): 65-69.
- Haihong C, Juan X, Shan G, et al. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J] .
- Hu F Y, Ducea M N, Liu S W, Chapman J B. 2017. Quantifying crustal thickness in continental collisional belts: Global perspective and a geologic application [J] . *Scientific Reports*, 7(1) : 7058.
- Hugo Moreira, Anda Buzenchi, Chris J. Hawkesworth, et al. 2023. Plumbing the depths of magma crystallization using  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  in zircon as a pressure proxy. *Geology*, 51 (3): 233-237.
- Kaygusuz A, Siebel W, Sen C, et al. 2008. Petrochemistry and Petrology of I-Type Granitoids in an Arc Setting: The Composite Torul Pluton, Eastern Pontides, NE Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 97(4):739-764.
- Li S Z, Suo Y H, Li X Y, Zhou J, Santosh M, Wang P C, Wang G Z, Guo L L, Yu S Y, Lan H Y, Dai L M, Zhou Z Z, Cao X Z, Zhu J J, Liu B, Jiang S H, Wang G, Zhang G W. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate [J] . *Earth-Science Reviews*, 192: 91-137.
- Li W, Liu Y, Dong Y, et al. 2013. The geochemical characteristics, geochronology and tectonic significance of the Carboniferous volcanic rocks of the Santanghu area in northeastern Xinjiang, China [J] . *Science China Earth Sciences*, 56: 1318-1333.
- Liu B, Wu L, Ma C Q, et al. 2025. Volcanic-intrusive connections and crystal-melt segregation in the Dulan tilted crustal section: Insights from accessory mineral evolution [J] . *Chemical Geology*, 672: 122517.
- Liu Y, Zong K, 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 (1-2) :

133-153.

- Ma Q, Xu Y G. 2021. Magmatic perspective on subduction of Paleo-Pacific plate and initiation of big mantle wedge in East Asia [J] . *Earth-Science Reviews* 213, 103473.
- Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. 2006. Adakites without slab melting: high pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines [J] . *Earth and Planetary Science Letters*, 243 (3-4) : 581-593.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J] . *Geological society of America bulletin*, 101 (5) : 635-643.
- Middlemost E A. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J] . *Earth-science reviews*, 37 (3-4) : 215-224.
- Miller C F, Mcdowell S M, Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance [J] . *Geology*, 31 (6) : 529-532.
- Müller R D, Seton M, Zahirovic S, et al. 2016. Ocean Basin Evolution and Global-Scale Plate Reorganization Events Since Pangea Breakup[J/OL]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44(1): 107-138.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25:956-983.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J/OL]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81.
- Profeta L, Ducea M N, Chapman J B, et al. 2015. Quantifying crustal thickness over time in magmatic arcs [J] . *Scientific reports*, 5 (1) : 17786.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa [J] . *Chemical Geology*, 160 (4) : 335-356.
- Streck M J, Leeman W P, Chesley J. 2007. High-magnesian andesite from Mount Shasta: a product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt [J] . *Geology*, 35 (4) : 351-354.
- Sun S , Mcdonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J/OL]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345.
- Taylor S R, Mclennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution [J/OL] .

- Valer'Evna D, 王鹏程, 李三忠, 等. 2017. 东亚大汇聚与中—新生代地球表层系统演变 [J/OL]. 海洋地质与第四纪地质, 37 (4) : 33-64.
- Wang Y, Fan W, Peng T, et al. 2005. Elemental and Sr–Nd isotopic systematics of the early Mesozoic volcanic sequence in southern Jiangxi Province, South China: petrogenesis and tectonic implications [J]. International Journal of Earth Sciences, 94: 53-65.
- Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. 2005. Petrogenesis of Adakitic Porphyries in an Extensional Tectonic Setting, Dexing, South China: Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization. Journal of Petrology, 47(1): 119-144.
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. Earth and Planetary Science Letters, 64 (2) : 295-304.
- Xu C, Zhang L, Shi H, et al. 2017. Tracing an early Jurassic magmatic arc from South to East China Seas [J]. Tectonics, 36 (3) : 466-492.
- Yogodzinski G M, Kelemen P B. 1998. Slab melting in the Aleutians: implications of an ion probe study of clinopyroxene in primitive adakite and basalt [J]. Earth and Planetary Science Letters, 158 (1-2) : 53-65.
- Yuan W, Yang Z, Zhao X, et al. 2018. Early Jurassic granitoids from deep drill holes in the East China Sea Basin: implications for the initiation of Palaeo-Pacific tectono-magmatic cycle[J/OL]. International Geology Review, 60(7): 813-824.
- Zhu W L, Zhong K, Fu X W, Chen C F, Zhang M Q, Gao S L. 2019. The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: A new view [J]. Earth-Science Reviews, 190: 89-111.