

DOI:10.19657/j.geoscience.1000-8527.202602130054

闽西沙县盆地和泰宁盆地A型花岗岩的厘定及其构造意义

王汉滨¹, 付一航², 黎敦朋^{1,*}, 严梦莎¹

(1. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108; 2. 福州左海高铁有限公司, 福建 福州 350204)

摘要: 为探讨闽西地区晚中生代构造体制转化的岩石学记录, 本文对闽西沙县盆地、泰宁盆地中3个浅成侵位的石英正长斑岩体, 进行了系统主量元素、微量元素分析, 并开展了LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及Hf同位素分析。结果显示: 沙县盆地石英正长斑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 (96.86 ± 0.28) Ma, 泰宁盆地石英正长斑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 (98.70 ± 0.92) Ma和 (99.78 ± 0.87) Ma, 表明侵位时代为晚白垩世早期; 地球化学均具有中高硅、富碱、贫钙镁铝的特征, 且富集Rb、K、Nb、Ta、Zr、Hf等元素, 亏损Ba、Sr、P、Ti, δEu 呈弱-中等负异常, 显示出高分异铝质A型花岗岩特征; 沙县盆地石英正长斑岩锆石Hf同位素分析, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的变化范围为 $-5.71 \sim -2.46$, 对应二阶段Hf模式年龄(T_{DM2})为 $1.31 \sim 1.52$ Ga, 表明其源区以中元古代地壳物质部分熔融为主, 并有少量新生地壳物质的混入; 结合区域地质和构造环境分析, 沙县盆地、泰宁盆地石英正长斑岩均为A2型花岗岩, 形成于古太平洋板块俯冲后撤诱发的弧后伸展构造背景。闽西沙县盆地、泰宁盆地高分异铝质A2型花岗岩的厘定, 为闽西地区晚中生代由挤压向伸展体制转变的构造演化过程提供了重要的岩石学约束。

关键词: 闽西地区; A2型花岗岩; U-Pb测年; 地球化学; 伸展构造背景

中图分类号: P588.141; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)04-1048-27

Classification of A-type Granites in the Shaxian Basin and Taining Basin, Western Fujian, and Their Tectonic Significance

WANG Hanbin¹, FU Yihang², LI Dunpeng^{1,*}, YAN Mengsha¹

(1. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Fuzhou Zuohai High Speed Railway Co., Ltd, Fuzhou, Fujian 350204, China)

Abstract: To explore the petrological records of the tectonic system transformation in the Late Mesozoic of the western Fujian region, This study presents systematic analyses of major and trace elements for three shallowly emplaced quartz syenite porphyry bodies in the Shaxian and Taining basins of western Fujian Province. Additionally, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotope analysis were performed on these rocks. The key results are summarized as follows: The LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the quartz syenite porphyry in the Shaxian Basin is (96.86 ± 0.28) Ma, while the ages for the Taining quartz syenite porphyry are (98.70 ± 0.92) Ma

收稿日期: 2026-02-13; 修回日期: 2026-04-15; 编辑: 袁茂文。

基金项目: 福建省自然资源厅科研项目“闽西北地区钨矿成矿规律研究”(KY-060000-04-2023-003)。

作者简介: 王汉滨, 男, 硕士研究生, 2001年出生, 主要从事区域地质与矿山地质工程研究。Email: 648069350@qq.com。

*通信作者: 黎敦朋, 男, 博士, 教授, 1967年出生, 主要从事构造地质与区域成矿教学科研工作。

Email: 503831695@qq.com。

引用格式: 王汉滨, 付一航, 黎敦朋, 等. 闽西沙县盆地和泰宁盆地A型花岗岩的厘定及其构造意义 [J]. 现代地质, 2026, 40 (4): 1048-1074. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202602130054.

WANG Hanbin, FU Yihang, LI Dunpeng, et al. Classification of A-type Granites in the Shaxian Basin and Taining Basin, Western Fujian, and Their Tectonic Significance [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40 (4): 1048-1074. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202602130054.

and (99.78 ± 0.87) Ma, constraining its emplacement to the early Late Cretaceous; Geochemically, these porphyries are characterized by medium-to-high silica, alkali enrichment, and depletion in Ca, Mg, and Al. They are enriched in Rb, K, Nb, Ta, Zr, and Hf, depleted in Ba, Sr, P, and Ti, and display weak-to-moderate negative δEu anomalies—collectively indicating affinities with highly fractionated aluminous A-type granites; Zircon Hf isotope analysis of the Shaxian quartz syenite porphyry yields $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -5.71 to -2.46 , corresponding to two-stage Hf model ages ($T_{\text{DM}2}$) of $1.31 \sim 1.52$ Ga. These data suggest that the magma source was dominated by partial melting of Mesoproterozoic crustal materials, with minor involvement of mantle-derived components; Integrated with regional geological and tectonic setting analysis, the quartz syenite porphyries in both the Shaxian and Taining basins are classified as A2-type granites, formed in a back-arc extensional environment triggered by the rollback of the subducting Paleo-Pacific Plate. The identification of highly fractionated aluminous A2-type granites in the Shaxian and Taining basins provides critical petrological constraints on the late Mesozoic tectonic transition from compression to extension in western Fujian.

Key words: Western Fujian region; A2-type granite; U-Pb dating; geochemistry; extensional tectonic setting

0 引言

华南地区晚中生代处于滨太平洋构造域强烈活动带, 岩浆-构造事件频繁且剧烈, 其中A型花岗岩作为揭示区域构造演化与深部动力学过程的重要“岩石探针”, 一直是地质学研究的热点之一。A型花岗岩由 Loiselle 和 Wones 于 1979 年首次定义, 最初指碱性、贫水、非造山型花岗岩, 不涉及物质来源, 随着研究深入, 其范围已扩展至钾长花岗岩、石英正长岩等多种岩石类型, 涵盖碱钙性、弱碱准铝质、弱过铝及强过铝质岩石, 除 I 型、S 型花岗岩外的诸多花岗质岩石均可归入此类, 目前 A 型花岗岩存在多种亚类划分方案, 包括以构造环境为依据的非造山型 (A1) 和后造山型 (A2), 以及按成分划分的铝质 A 型花岗岩与碱性 A 型花岗岩^[1-8]。

浙闽沿海地区作为华南晚中生代构造-岩浆活动的关键地带, 发育规模宏大且呈北北东向展布的花岗岩带, 其岩石成因与构造背景的演化一直是研究的热点。前人已对这一地区的花岗岩体进行了大量的研究, 该带内典型 A 型花岗岩体 (如金刚山、太姥山、鼓山、天柱山及瑶坑等) 的侵位年龄主要集中于 $100 \sim 90$ Ma, 标志着华南岩浆演化的重大转折时期^[9-13]。而最新研究进一步在浙东南望州山破火山口、嵯泗列岛及南雁荡山厘定出 $98 \sim 90$ Ma 的碱性花岗岩与火山-侵入杂岩, 确定了晚白垩世早期剧烈的岩浆活动^[14-16]。岩石地球化学研究表明, 该带既发育含钠铁闪石等碱性矿物的碱性 A 型花岗岩, 也存在铝质 A 型及 I-A 型复合花岗岩, 普遍具有高硅、富碱、强 Eu 负异常及壳幔混合的成因特

征^[9, 12-17]。这一系列 A 型花岗岩的集中产出, 深刻记录了古太平洋板块俯冲后撤引发的弧后伸展动力学背景, 标志着区域构造体制由早期的挤压收缩向大规模陆内拉张的转换。然而, 尽管沿海地区的 A 型花岗岩研究已取得显著进展, 但针对该岩浆带向内陆盆地延伸的连续性以及从火山喷发到侵位的演化过程仍存在争议。一方面, 过去的研究多局限于狭窄的沿海地带, 对于向内陆延伸的沙县、泰宁等盆地内的侵入活动属性及其与沿海 A 型花岗岩带的构造联动性缺乏系统约束; 另一方面, 区域内早期火山活动与后期侵入活动之间的年代学衔接及其地球化学耦合关系尚不清晰, 制约了对华南晚中生代构造体制转折机制的深入探讨。

闽西地区位于华南东部武夷山隆起带中段, 地处政和-大埔断裂带西部的福建省内陆区域, 是晚中生代古太平洋板块俯冲作用下形成的陆缘岩浆带的重要组成部分, 晚中生代晚期发育了一系列近 NE 向、NNE 向断陷盆地, 如沙县盆地、泰宁盆地、禾口盆地、连城盆地、建瓯盆地、崇安盆地等。大部分盆地下部充填了不同厚度的早白垩世晚期—晚白垩世早期的火山岩, 盆地上部均为沙县组、崇安组红层沉积^[18]。近期野外地质调查对闽西沙县盆地、泰宁盆地多个浅成侵位的石英正长斑岩体的研究表明这些岩体具有铝质 A 型花岗岩的特征, 这为分析该区白垩纪构造演化提供了新的线索。为厘定分布于闽西地区断陷盆地内的石英正长斑岩体的岩石类型, 确定其形成时代、地球化学特征和构造环境, 在野外地质调查的基础上系统地采集了岩石地球化学和测年样品, 开

变质基底出露,而闽西南地区则广泛分布晚古生代至中生代的沉积盖层,显示出地壳块体结构不均一性。在此背景下,政和—大埔深大断裂及其次级NE、NW向断裂系统不仅构成了区域骨架,更直接控制了白垩纪断陷盆地的发育及其内部岩浆的侵位^[26-28]。

泰宁盆地与沙县盆地位于闽西构造带的中段,均表现为典型的白垩纪断陷盆地特征,盆地边界受北东向主干断裂及其次级构造的复合控制^[29]。泰宁盆地呈北东向至南北向展布,自北向南由朱口盆地、梅口盆地和龙安盆地3个子盆地组成,总面积约为215.2 km²^[18, 30]。其中朱口盆地与梅口盆地呈近北东向延伸,主要受盆地西侧的北东向断裂系统的控制,盆地基底主要出露新元古界大源片麻岩,盆地内出露的地层主要为崇安组,边缘出露沙县组,与基底呈不整合接触关系。而龙安盆地呈近南北向延伸,受盆地西侧的南北向断裂系统控制,盆地基底出露新元古界大源片麻岩、晚震旦世西溪组及早侏罗世梨山组,盆地内出露的地层主要为寨下组、沙县组和崇安组^[31]。龙安盆地内分布6个石英正长斑岩体(图2),岩体呈不规则状产出,岩体的侵入活动受近南北向构造控制而呈南北向展布,出露面积约为30 km²。

沙县盆地呈北东向展布,整体形态呈长轴近北东向的椭圆形,面积约150 km²,其区域地质构造主要受政和—大埔断裂带西侧的北东向褶皱隆起带及断裂控制,多属于中生代晚期以来形成的构造形迹。盆地的下伏地质体主要为早侏罗世梨山组,组成火山喷发盆地的地层主要为早白垩世石帽山群。根据区域上的地层对比,分别属于黄坑组及寨下组上段。该地层记录了盆地自断陷沉积—中性火山喷发—酸性火山喷发的3个演化阶段^[32-33]。沙县盆地东部主要出露沙县组、崇安组。沙县盆地西部分布寨下组火山岩和5个石英正长斑岩体(图3),岩体主要呈北东向展布,出露面积约为45 km²。

1.2 岩体地质与岩相学特征

泰宁盆地石英正长斑岩体分布于龙安盆地中,是闽西构造带燕山晚期岩浆响应的产物。本次研究沿县道X763以大布村东部大金湖区域出露的2处石英正长斑岩体为研究对象。为便于后续系统研究,笔者将东部规模较大的岩体命名为龙安1号岩体,而将西部规模相对较小的岩体命名为龙安

2号岩体,其它岩体分别命名为龙安3-6号岩体(图2)。泰宁盆地石英正长斑岩体的侵入受控于北东向政和—大埔断裂带的次级断裂—崇安—石城断裂带控制,呈长条状或不规则岩株状产出。岩体外围地层序列发育完整,其东北端及侧翼主要侵入于早白垩世寨下组中酸性火山岩系中,并与前寒武纪变质基底(新元古界大源片麻岩)及早中生代溪口组、梨山组含煤碎屑岩系呈侵入接触关系。岩体周边发育古火山口及韧性剪切带,记录了由早期挤压向晚期伸展转变的构造形迹。岩体产状与盆地主干断裂方向一致。龙安1号岩体出露宽度约为3 km,龙安2号岩体出露宽度约为0.3 km。龙安1号岩体和2号岩体岩性均为石英正长斑岩体,岩石呈灰白色,中粗粒花岗斑状结构,块状构造(图4a、c)。斑晶含量15%~30%,基质含量70%~85%。斑晶粒径2~7 mm,主要由石英(5%~10%)、斜长石(1%~5%)、钾长石(10%~15%)和黑云母(1%~3%)构成。石英为它形粒状,大小为1~3 mm。钾长石呈半自形板状,大小为2~7 mm,整体受高岭土化强烈蚀变,并见聚片双晶。基质为细粒花岗结构,粒度0.05~0.10 mm(图4b、d),矿物成分与斑晶一致。

沙县石英正长斑岩体分布于沙县盆地西部,是盆地内晚中生代岩浆活动的重要组成部分。受城市建设影响,沙县盆地中部的4处大型岩体位于市区,且城市交通情况复杂,难以开展系统的野外地质工作。因此,本次研究沿县道X742聚焦于盆地西北部边缘出露的石英正长斑岩体。鉴于该岩体地处灵元村北侧,为便于描述,将其命名为沙县1号岩体(灵元岩体),其它几个大型岩体分别命名为沙县2-5号岩体(图3)。沙县1号岩体受燕山晚期北东向及北西向断裂系统共同控制,沿盆地走向呈北东向展布。岩体在空间上紧邻古火山口发育,呈小岩株状产出,显示出强烈的“盆—岩”耦合及火山—侵入作用特征。在接触关系上,沙县1号岩体侵入于早白垩世寨下组火山岩系及早中生代地层(如漳平组、梨山组)中,局部与晚白垩世早期沉积的崇安组、沙县组红层呈不整合接触。其产状多表现为陡倾斜,反映了晚白垩世早期岩石圈强烈伸展背景下的岩浆快速就位过程。沙县1号岩体岩性为石英正长斑岩,岩石呈灰白色、粗粒花岗斑状结构,块状构造(图4e),斑晶粒径3~7 mm,含量20%~25%;基质粒度0.05~

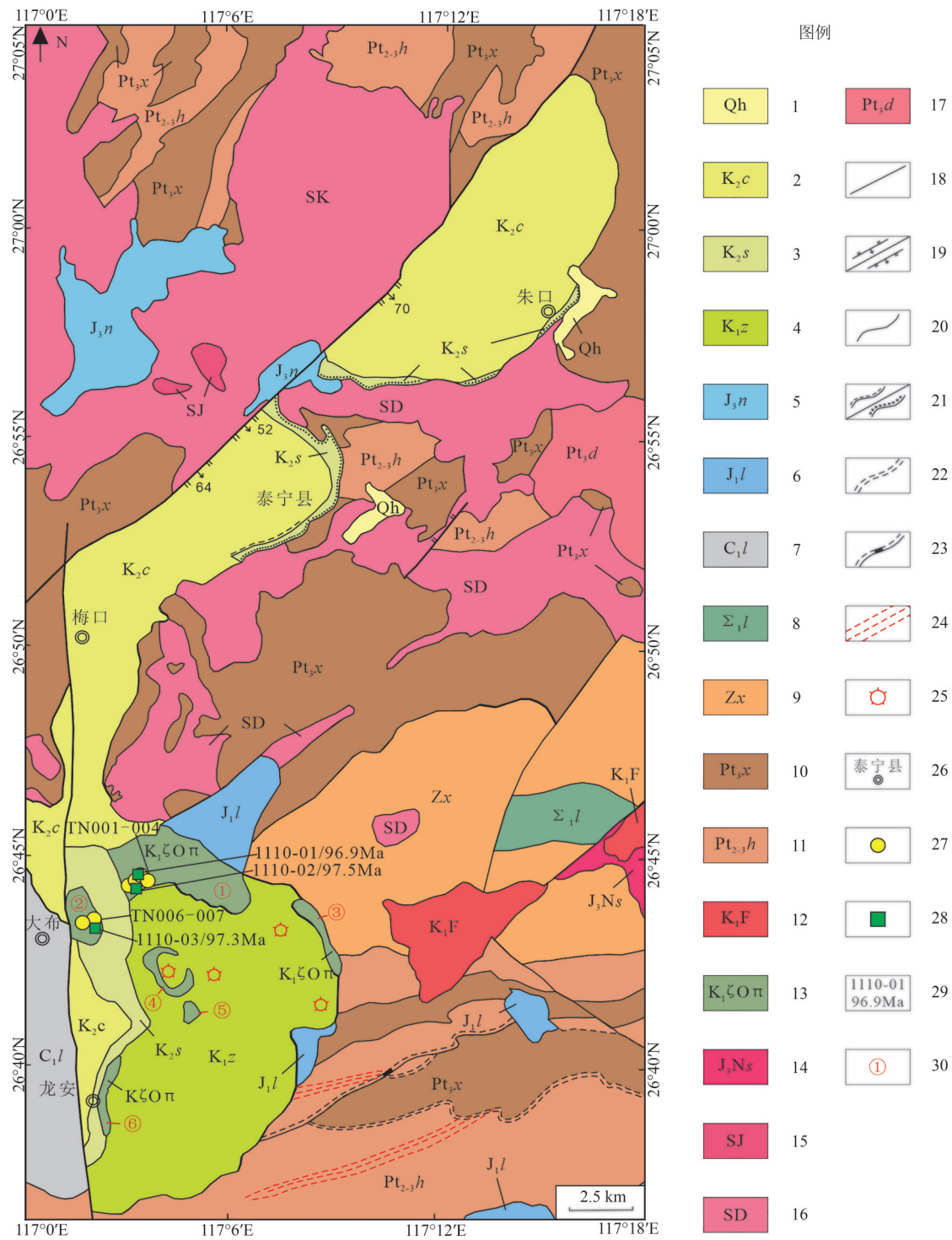
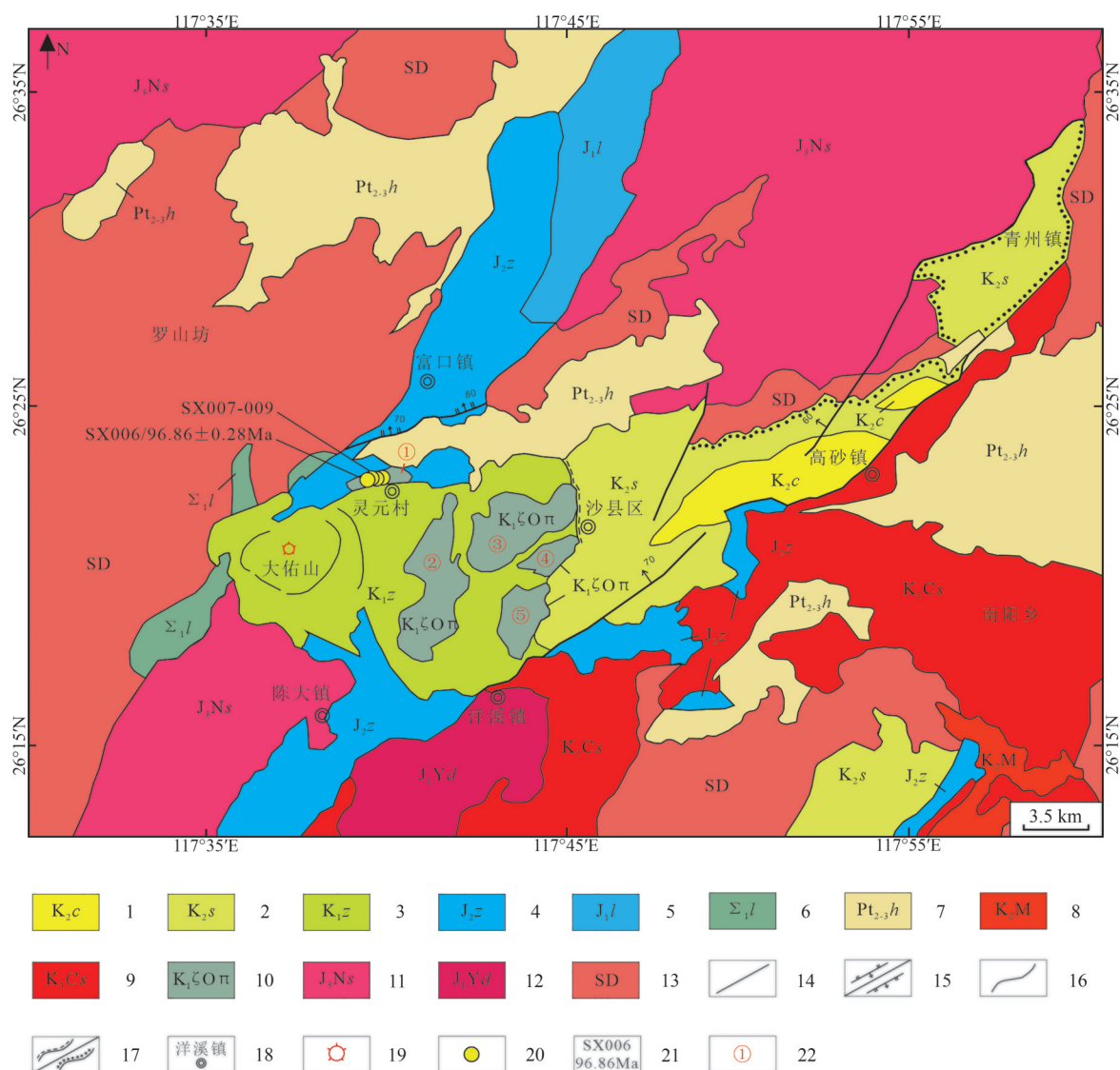


图2 泰宁盆地地质简图及花岗岩采样点^[34-35]

Fig. 2 Geological Sketch Map of the Taining Basin and Granit Sampling Points^[34-35]

1. 第四系;2. 崇安组;3. 沙县组;4. 寨下组;5. 南园组;6. 梨山组;7. 林地组;8. 林田组;9. 西溪组;10. 下峰岩组;11. 黄潭岩组;12. 白垩纪花岗岩;13. 早白垩世石英正长斑岩;14. 侏罗纪花岗岩;15. 志留纪花岗岩(细粒);16. 志留纪花岗岩(似斑状中细粒);17. 新元古代大源花岗岩片麻岩;18. 性质不明断层;19. 逆断层/正断层;20. 地质体界线;21. 平行不整合/不整合界线;22. 韧性剪切断层;23. 韧性剪切逆冲断层;24. 韧性剪切带;25. 古火山口;26. 地名;27. 采样点及编号;28. 前人研究成果;29. 样品号及U-Pb年龄值;30. 岩体编号。

0. 10 mm, 含量70%~75%。斑晶主要矿物有石英状, 粒径3~7 mm; 石英无色透明, 为它形粒状, (5%~8%)、斜长石(1%~3%)、钾长石(10%~15%)和黑云母(1%~2%), 钾长石为半自形板状, 粒径1~3 mm; 黑云母, 粒径1~3 mm。基质成分与斑晶一致(图4f)。

图3 沙县盆地地质简图及花岗岩采样点^[35]Fig. 3 Geological Sketch Map of the Shaxian Basin and Granite Sampling Points^[35]

1. 崇安组; 2. 沙县组; 3. 寨下组; 4. 漳平组; 5. 梨山组; 6. 林地组; 7. 黄潭岩组; 8. 晚白垩世花岗岩; 9. 早白垩世花岗岩; 10. 早白垩世石英正长斑岩; 11. 晚侏罗世花岗岩; 12. 早侏罗世花岗岩; 13. 志留纪花岗岩; 14. 性质不明断层; 15. 逆断层/正断层; 16. 地质体界限; 17. 平行不整合/不整合界线; 18. 地名; 19. 古火山口; 20. 采样点; 21. 样品号及U-Pb年龄值; 22. 岩体编号。

泰宁盆地和沙县盆地石英正长斑岩样品具体采样位置详见表1和图2-3。

2 测试分析方法

2.1 锆石U-Pb测年及Hf同位素分析

野外采集新鲜的岩石2~3 kg, 破碎至40~60目, 经淘洗在双目镜下挑选出锆石单矿物, 然后制靶。锆石在实验前先进行透射光、反射光显微观察及阴极发光(CL)显微结构表征, 以系统解析其内部结构, 筛选具岩浆韵律环带且无裂隙、无包体的区域作为测试靶区。锆石U-Pb定年及Lu-Hf同位素测试在武汉上谱分析科技有限公司完

成。实验平台采用Coherent GeoLasHD 193 nm准分子激光剥蚀系统与Agilent 7900电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)联用。实验参数: 激光剥蚀束斑直径设定为32 μm, 频率为5 Hz, 激光能量强度为80 mJ。具体分析条件及流程详见文献[36-37]。同位素比值采用国际标准锆石91500作为外标进行同位素分馏校正, 并以标准锆石GJ-1作为监控样; 微量元素分析采用NIST 610为外标, Si为内标。原始数据处理采用ICP-MS-DataCal10.8软件, 年龄计算及谐和图绘制采用/Ex_Ver3软件, 测试数据的标准误差为1σ。

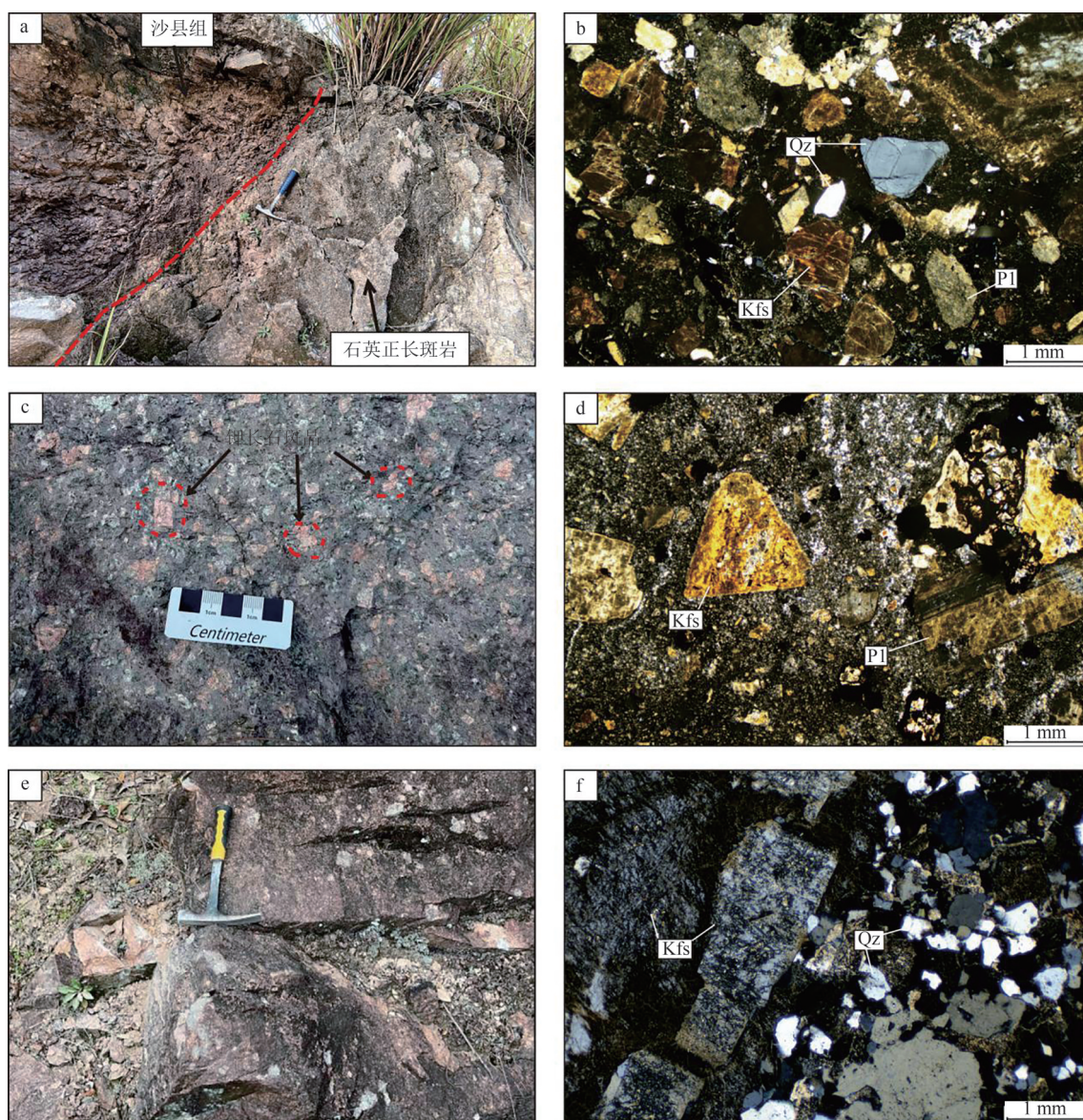


图4 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩野外照片及显微照片

Fig. 4 Field and microscopic photos of quartz monzonite porphyry in the Taining and Shaxian Basins

a, c-泰宁盆地花岗岩的野外露头照片; e-沙县盆地花岗岩的野外露头照片; b, d-泰宁盆地花岗岩的显微照片; f-沙县盆地花岗岩的显微照片。Pl-斜长石; Kfs-钾长石; Qz-石英

2.2 主量元素分析

全岩主量元素分析在澳实分析检测(广州)有限公司实施。样品经破碎、玛瑙球磨机粉碎至200目后制备成型。采用ME-XRF26熔融法X射线荧光光谱(XRF)进行分析。称取试样与含硝酸锂的硼酸锂熔融助熔剂混合,于1025℃以上高温熔融成扁平玻璃片后上机测试。主要检测设备为荷兰帕纳科PANalytical PW5400 X射线荧光光谱仪。通过测量烧失量(LOI)并与氧化物结果相加进行加和检查,分析准确度及精密度相对误差(RE/RD)均严格控制在5%以内。

2.3 微量元素分析

全岩微量元素及稀土元素(REE)分析同样依托澳实分析检测(广州)有限公司完成。对超痕量元素采用ME-MS61r四酸消解法,利用高氯酸、硝酸、氢氟酸和盐酸消解试样,通过电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。稀土及难熔元素则采用ME-MS81g锂硼酸盐熔融法,以确保锆、钨、铌、钽等难熔元素消解完全,随后利用ICP-MS进行分析。检测仪器包括安捷伦Agilent 7900电感耦合等离子体质谱仪。实验过程中插入空白样、重复样及标准物质进行质量监控,分析精密度与准确度控制在10%。

表1 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩样品信息

Table 1 Information on quartz monzonite porphyry samples from the Taining and Shaxian Basins

样品编号	岩体编号	室内定名	采样位置		高程(m)
			纬度(N)	经度(E)	
TN001	龙安1号岩体	灰白色中粗粒石英正长斑岩	26°43'25"	117°2'59"	306
TN002		灰白色中粗粒石英正长斑岩	26°43'53"	117°2'34"	323
TN003		灰白色中粗粒石英正长斑岩	26°43'34"	117°2'11"	332
TN004		灰白色中粗粒石英正长斑岩	26°43'19"	117°1'53"	360
TN006	龙安2号岩体	灰白色中细粒石英正长斑岩	26°42'55"	117°1'31"	343
TN007		灰白色中细粒石英正长斑岩	26°42'50"	117°1'25"	332
SX006	沙县1号岩体	灰白色中粗粒石英正长斑岩	26°24'45"	117°38'50"	271
SX007		灰白色中粗粒石英正长斑岩	26°24'38"	117°38'52"	262
SX008		灰白色中粗粒石英正长斑岩	26°24'25"	117°38'51"	250
SX009		灰白色中粗粒石英正长斑岩	26°24'13"	117°38'50"	248

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 测年

本次研究对沙县盆地1号石英正长斑岩SX006样品及泰宁盆地龙安1号石英正长斑岩TN003和龙安2号石英正长斑岩TN007样品进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb测年,共进行了56颗锆石测试,结果见(表2)。样品锆石大部分呈透明和自形一半自形晶,少数为它形粒状、柱状,粒径长轴大小变化范围为50~150 μm,短轴为30~80 μm,从CL图像(图5a)上可以看出多数锆石具有清晰的内部结构和典型岩浆成因的振荡环带^[38],少部分具有核边结构,边部颜色较深,呈现黑色,中部颜色较浅。SX006样品的16个测试点²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄介于94~99 Ma之间,有1颗锆石年龄不谐和(06号测点),其余15颗锆石U-Pb测年结果位于年龄谐和线附近(图5b);TN003样品的20个测试点²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄介于95~102 Ma之间,有3颗锆石年龄不谐和(01、12、20号测点),其余17颗锆石U-Pb测年结果位于年龄谐和线附近(图5c);TN007样品的20个测试点²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄介于96~104 Ma之间,有2颗锆石年龄不谐和(03、05号测点),其余18颗锆石U-Pb测年结果位于年龄谐和线附近(图5d),

表明这些锆石形成后其U-Pb同位素体系保持封闭状态。剔除不谐和的年龄后,获得SX006样品的²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(96.86 ± 0.28) Ma (MSWD = 2.0; n = 15);获得TN003样品的²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(98.70 ± 0.92) Ma (MSWD = 1.4; n = 17);获得TN007样品的²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(99.78 ± 0.87) Ma (MSWD = 1.9; n = 18)。锆石微量元素分析与U-Pb定年同步完成,分析数据见(表3)。这些锆石具有相似的球粒陨石标准化稀土元素(REE)配分模式(图5e),其特征为重稀土元素(HREE)富集,轻稀土元素(LREE)亏损以及强烈的Eu负异常(0.05~0.09)。锆石中Th、U含量分别为29 × 10⁻⁶~313 × 10⁻⁶和36 × 10⁻⁶~536 × 10⁻⁶,Th/U比值介于0.47和1.11之间(均值0.68),与同心振荡带特征一起证实了它们的岩浆成因^[39]。因此,锆石U-Pb年龄代表了花岗岩的结晶年龄。此外,锆石U/Yb-Y构造环境判别图解(图5f)显示^[41],样品集中分布于大陆锆石区域,显著区别于洋壳源区锆石分布区域,表明研究区花岗质岩浆具有典型陆壳熔融成因属性。根据锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄,结合CL图像特征,这些岩体的成岩时代为晚白垩世,是燕山晚期岩浆活动的产物。

表2 沙县盆地及泰宁盆地石英正长斑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb分析结果

Table 2 LA-ICP-MS Zircon U-Pb Analysis Results of quartz monzonite porphyry in the Shaxian and Taining Basins

测点号	元素含量/10 ⁻⁶				同位素比值						年龄/Ma					
				Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	Pb	Th	U		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
SX006-01	5.99	175.42	340.29	0.52	0.0462	0.0023	0.0980	0.0049	0.0153	0.0002	9.36	111.10	94.95	4.53	97.87	1.07
SX006-02	9.47	312.99	536.20	0.58	0.0493	0.0017	0.1017	0.0037	0.0149	0.0001	164.90	81.47	98.33	3.40	95.37	0.93

(续)表2 沙县盆地及泰宁盆地石英正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
(Continued) Table 2 LA-ICP-MS Zircon U-Pb Analysis Results of quartz monzonite porphyry in the Shaxian and Taining Basins

测点号	元素含量/ 10^{-6}				同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
SX006-03	6.50	191.22	381.65	0.50	0.0489	0.0019	0.0994	0.0040	0.0148	0.0002	142.68	87.95	96.23	3.72	94.56	1.06
SX006-04	7.89	226.41	446.73	0.51	0.0519	0.0024	0.1081	0.0049	0.0153	0.0001	279.69	107.39	104.23	4.45	97.58	0.94
SX006-05	7.58	214.87	435.55	0.49	0.0511	0.0022	0.1066	0.0047	0.0151	0.0002	255.62	99.99	102.81	4.29	96.82	1.06
*SX006-06	5.29	161.22	283.40	0.57	0.0629	0.0035	0.1339	0.0076	0.0154	0.0002	705.57	118.51	127.57	6.80	98.43	1.31
SX006-07	7.34	206.37	420.33	0.49	0.0489	0.0021	0.1017	0.0042	0.0151	0.0002	146.38	99.99	98.30	3.85	96.70	1.03
SX006-08	5.89	165.79	346.60	0.48	0.0500	0.0023	0.1013	0.0045	0.0148	0.0002	194.53	107.39	98.01	4.17	94.47	1.14
SX006-09	7.40	210.20	432.94	0.49	0.0490	0.0019	0.1004	0.0038	0.0149	0.0002	150.09	92.58	97.13	3.49	95.59	1.13
SX006-10	8.14	242.09	460.93	0.53	0.0513	0.0022	0.1076	0.0045	0.0154	0.0002	253.77	99.99	103.75	4.16	98.23	1.16
SX006-11	6.81	197.75	402.32	0.49	0.0495	0.0019	0.1018	0.0039	0.0149	0.0002	172.31	88.88	98.39	3.61	95.15	1.05
SX006-12	5.79	161.20	337.65	0.48	0.0509	0.0029	0.1070	0.0061	0.0152	0.0002	238.96	133.32	103.19	5.62	97.36	1.12
SX006-13	6.76	192.84	386.91	0.50	0.0473	0.0025	0.0994	0.0050	0.0154	0.0002	64.91	122.21	96.26	4.60	98.39	1.07
SX006-14	7.44	229.82	420.65	0.55	0.0481	0.0022	0.1020	0.0045	0.0155	0.0002	105.65	103.69	98.65	4.16	98.84	1.03
SX006-15	7.87	298.98	441.52	0.68	0.0487	0.0027	0.1026	0.0061	0.0152	0.0002	200.08	61.10	99.14	5.63	97.29	1.06
SX006-16	6.65	186.96	383.88	0.49	0.0472	0.0022	0.1009	0.0047	0.0155	0.0002	61.21	107.40	97.60	4.30	99.04	1.14
*TN003-01	1.87	50.53	93.57	0.54	0.0997	0.0119	0.2103	0.0266	0.0149	0.0004	1618.21	218.05	193.78	22.35	95.39	2.60
TN003-02	1.21	50.88	58.68	0.87	0.0508	0.0050	0.1130	0.0103	0.0160	0.0004	231.55	211.09	108.71	9.36	102.30	2.39
TN003-03	2.28	83.75	122.54	0.68	0.0494	0.0034	0.1016	0.0057	0.0150	0.0003	164.90	151.83	98.26	5.27	95.80	1.66
TN003-04	1.68	55.28	92.72	0.60	0.0463	0.0043	0.0978	0.0083	0.0154	0.0003	13.06	207.38	94.74	7.71	98.65	1.99
TN003-05	1.70	79.44	84.42	0.94	0.0482	0.0051	0.0987	0.0105	0.0151	0.0003	109.35	233.30	95.56	9.70	96.36	2.06
TN003-06	1.56	61.20	78.66	0.78	0.0491	0.0042	0.1070	0.0085	0.0159	0.0004	153.79	188.86	103.18	7.84	101.90	2.35
TN003-07	2.40	93.05	122.83	0.76	0.0500	0.0031	0.1067	0.0059	0.0157	0.0003	198.23	144.43	102.92	5.43	100.59	1.63
TN003-08	1.20	50.87	62.27	0.82	0.0513	0.0048	0.1021	0.0077	0.0153	0.0004	253.77	212.01	98.75	7.09	97.69	2.44
TN003-09	1.50	70.87	73.13	0.97	0.0531	0.0045	0.1130	0.0077	0.0156	0.0003	331.54	197.20	108.70	7.02	100.10	1.87
TN003-10	1.73	61.26	90.64	0.68	0.0467	0.0043	0.0981	0.0083	0.0154	0.0003	31.58	207.38	95.00	7.69	98.29	1.81
TN003-11	3.65	129.26	198.28	0.65	0.0470	0.0028	0.0962	0.0054	0.0150	0.0002	55.65	131.47	93.30	5.01	96.21	1.21
*TN003-12	1.03	44.73	49.03	0.91	0.0951	0.0094	0.1817	0.0159	0.0151	0.0004	1529.33	187.04	169.55	13.70	96.87	2.76
TN003-13	2.37	114.15	116.04	0.98	0.0462	0.0033	0.0953	0.0062	0.0152	0.0002	9.36	162.95	92.42	5.70	97.24	1.58
TN003-14	1.48	59.45	74.36	0.80	0.0466	0.0044	0.0988	0.0081	0.0160	0.0004	31.58	211.08	95.65	7.49	102.49	2.23
TN003-15	1.36	55.84	68.05	0.82	0.0479	0.0035	0.1026	0.0063	0.0155	0.0003	94.54	166.64	99.20	5.79	99.39	2.12
TN003-16	1.26	43.88	65.05	0.67	0.0486	0.0052	0.1038	0.0098	0.0160	0.0004	127.87	237.01	100.32	9.06	102.22	2.49
TN003-17	1.37	44.55	71.28	0.62	0.0486	0.0040	0.1014	0.0061	0.0157	0.0003	127.87	181.46	98.10	5.58	100.58	1.96
TN003-18	0.93	34.73	47.49	0.73	0.0556	0.0058	0.1143	0.0098	0.0157	0.0004	438.94	233.30	109.90	8.96	100.43	2.50
TN003-19	1.46	47.47	74.16	0.64	0.0499	0.0051	0.1028	0.0086	0.0158	0.0004	190.82	218.49	99.35	7.89	100.93	2.25
*TN003-20	1.37	61.42	68.74	0.89	0.1010	0.0070	0.2007	0.0131	0.0149	0.0004	1642.90	127.93	185.74	11.04	95.56	2.46
TN007-01	0.84	35.80	42.70	0.84	0.0466	0.0047	0.0946	0.0072	0.0156	0.0004	31.58	225.89	91.76	6.65	99.48	2.34
TN007-02	3.02	82.31	169.18	0.49	0.0532	0.0033	0.1095	0.0065	0.0151	0.0002	338.95	138.87	105.50	5.95	96.50	1.49
*TN007-03	2.23	100.33	101.67	0.99	0.0778	0.0092	0.1759	0.0246	0.0153	0.0004	1142.60	237.04	164.52	21.21	98.16	2.30
TN007-04	0.91	34.19	47.76	0.72	0.0465	0.0050	0.1010	0.0085	0.0158	0.0004	33.43	231.45	97.69	7.86	101.18	2.78
*TN007-05	1.53	52.13	70.24	0.74	0.0850	0.0063	0.1894	0.0130	0.0160	0.0003	1316.67	144.60	176.11	11.08	102.60	1.94

表2 沙县盆地及泰宁盆地石英正长斑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb分析结果
(Continued) Table 2 LA-ICP-MS Zircon U-Pb Analysis Results of quartz monzonite porphyry in the Shaxian and Taining Basins

测点号	元素含量/ 10^{-6}				同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
TN007-06	1.86	96.10	86.68	1.11	0.0512	0.0047	0.1137	0.0101	0.0161	0.0003	250.07	211.09	109.33	9.20	103.02	2.14
TN007-07	0.72	29.56	35.88	0.82	0.0566	0.0091	0.1103	0.0154	0.0161	0.0006	475.97	361.07	106.25	14.11	103.23	3.64
TN007-08	1.24	39.12	64.99	0.60	0.0506	0.0056	0.1090	0.0103	0.0160	0.0003	220.44	237.01	105.08	9.46	102.36	2.19
TN007-09	1.89	58.03	97.09	0.60	0.0503	0.0040	0.1122	0.0082	0.0162	0.0003	209.33	187.02	107.97	7.52	103.52	2.02
TN007-10	3.26	108.26	167.29	0.65	0.0500	0.0029	0.1090	0.0060	0.0159	0.0002	194.53	135.17	105.03	5.50	101.76	1.23
TN007-11	1.62	65.08	83.16	0.78	0.0516	0.0046	0.1051	0.0070	0.0151	0.0003	264.88	203.68	101.47	6.43	96.36	1.92
TN007-12	1.05	43.26	54.21	0.80	0.0537	0.0060	0.1066	0.0096	0.0154	0.0004	366.72	253.67	102.84	8.79	98.77	2.46
TN007-13	0.83	29.57	42.45	0.70	0.0547	0.0060	0.1086	0.0093	0.0151	0.0004	466.71	249.97	104.66	8.52	96.53	2.44
TN007-14	4.11	110.93	220.03	0.50	0.0466	0.0027	0.0995	0.0054	0.0158	0.0002	33.43	127.77	96.31	4.98	101.11	1.28
TN007-15	1.03	42.17	52.44	0.80	0.0513	0.0050	0.1044	0.0075	0.0152	0.0004	253.77	225.90	100.83	6.91	96.98	2.38
TN007-16	0.98	36.21	47.97	0.75	0.0592	0.0074	0.1166	0.0105	0.0163	0.0005	575.96	274.81	111.95	9.58	104.36	3.14
TN007-17	2.49	115.82	121.81	0.95	0.0523	0.0035	0.1078	0.0064	0.0152	0.0002	298.21	151.83	103.96	5.91	97.35	1.51
TN007-18	1.05	37.50	56.78	0.66	0.0552	0.0063	0.1071	0.0104	0.0150	0.0004	420.42	257.37	103.28	9.58	96.16	2.36
TN007-19	1.20	37.05	62.14	0.60	0.0526	0.0053	0.1103	0.0083	0.0157	0.0004	309.32	231.45	106.22	7.56	100.42	2.25
TN007-20	1.51	63.20	71.44	0.88	0.0462	0.0041	0.0993	0.0074	0.0160	0.0003	5.66	203.68	96.15	6.81	102.28	1.88

注: 表中“*”表示谐和度 < 90% 的锆石年龄数据。

3.2 岩石地球化学特征

沙县盆地1号岩体、泰宁盆地龙安1号和龙安2号岩体的主量元素、稀土与微量元素分析数据见表5。研究区石英正长斑岩样品的主量元素具有如下特征: $w(\text{SiO}_2)$ 的变化为 65.97% ~ 77.25%, 平均为 71.64%; $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 的变化为 7.8% ~ 9.4%, 明显富碱, 且 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1.0$, 相对富钾; 在全碱-硅 (TAS) 图解中, 样品点落入亚碱性系列和花岗岩区域 (图 6a), 与矿物和结构定名结果一致; 在 SiO_2 - K_2O 图解 (图 6b) 中, 多表现出钾玄岩系列或钾玄岩系列和高钾钙碱性系列特征; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 的变化范围为 11.78% ~ 15.31%, A/NK 的变化范围为 1.08 ~ 1.35, A/CNK 的变化范围为 0.95 ~ 1.3, 在 A/CNK - A/NK 相关图解中 (图 6c), 落入准铝质-过铝质范围, 在 SiO_2 -A. R. 图解 (图 6d) 上, 均落入到碱性区域, 这与前人在浙闽沿海白垩纪典型碱性花岗岩的特征是一致的^[3, 9-15]。在哈克图解中 (图 10), SiO_2 和 TFe_2O_3 , CaO , MgO , P_2O_5 和 TiO_2 呈现明显的负相关关系, 其中与 Al_2O_3 具弱负相关性。另外, 样品具有较低的 $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ (1.56% ~ 4.21%)、 $w(\text{CaO})$ (0.07% ~ 2.59%)、 $w(\text{MgO})$ (0.13% ~ 0.55%)、 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ (0.01% ~

0.19%)、 $w(\text{MnO})$ (0.01% ~ 0.09%) 和 $w(\text{TiO}_2)$ (0.14% ~ 0.74%)。上述特征表明, 岩石发生了一定程度的分异演化, 总体上具有酸性、富碱、低镁、贫钙磷的特征。

沙县盆地1号岩体、泰宁盆地龙安1号和龙安2号岩体的稀土总量 $\Sigma\text{REE}=275.3 \times 10^{-6} \sim 496.1 \times 10^{-6}$, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 的变化为 9.91 ~ 19.14, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 的变化为 11.32 ~ 28.84。另外, LREE 和 HREE 分异相对明显。在稀土元素球粒陨石标准化图上, 总体呈右倾型配分曲线 (图 7a), δEu 呈弱-中等负异常 (δEu 为 0.25 ~ 0.89), Ce 无明显异常 (δCe 为 0.91 ~ 1.07)。Eu 负异常表明岩石在形成过程中存在斜长石的分离结晶。沙县盆地与泰宁盆地的石英正长斑岩样品的稀土配分曲线总体协调, 但 Eu 负异常较弱, 可能与其具有钾玄岩性质和岩浆的分异程度有关。从微量元素蛛网图 (图 7b) 上可看出, Ba 和 Sr 与 P 和 Ti 明显亏损, 而 Rb 和 K 和 Th, Ce, Zr, Hf, Y, La, Nd 和 Sm 相对富集。鉴于大多不相容元素富集的条件, 导致 Ba, Sr, P, Ti 等的负异常, 而相邻的 Rb, Th, REE, Zr, Hf 等则出现正异常。

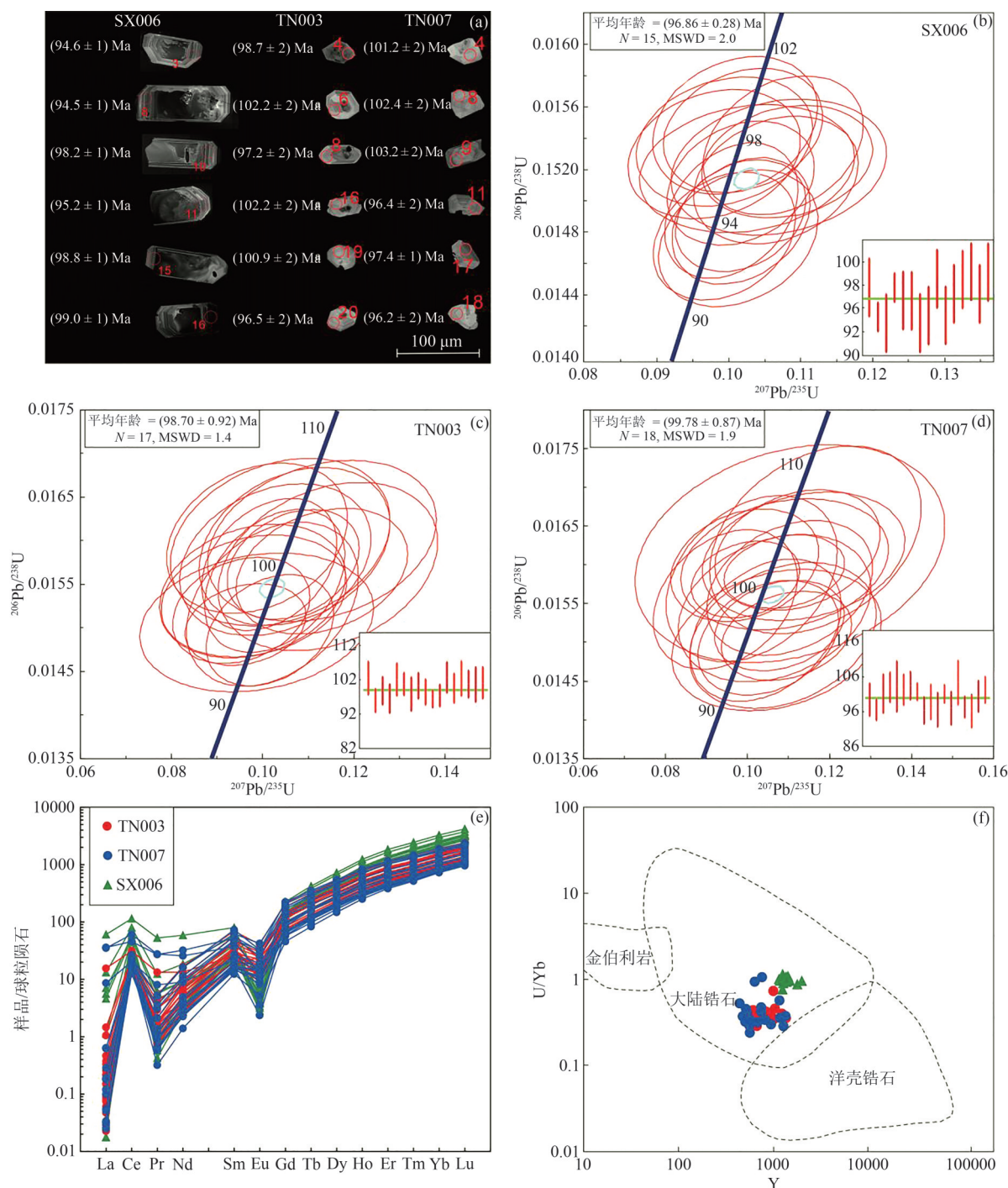


图5 沙县盆地及泰宁盆地石英正长斑岩岩锆石 CL 图像 (a)、U-Pb 年龄谐和图 (b-d)、球粒陨石标准化 REE 模式图 (e) [40] 和锆石微量元素判别图 (f) [41]

Fig. 5 CL images of zircon from quartz monzonite porphyry in the Shaxian Basin and Taining Basin (a), U-Pb concordia diagram (b-d), REE pattern standardized to chondrite (e) (after reference [40]), and zircon trace element discrimination diagram (f) (after reference [41])

(a) 沙县盆地及泰宁盆地石英正长斑岩(SX006、TN003、TN007)锆石颗粒 CL 图像、分析位置及 U-Pb 年龄; (b-d) 锆石 U-Pb 谐和图的谐和年龄; (e) 锆石中稀土元素(REE)球粒陨石标准化模式图(标准化值据文献[40]); (f) Y-U/Yb 图解(据文献[41])

3.3 锆石的 Hf 同位素分析结果

对沙县盆地中 1 号岩体样品 (SX006) 的 10 颗锆石进行 Lu-Hf 同位素分析, 结果见表 4。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比

值为 $0.282552 \sim 0.282644$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的变化范围为 $-5.71 \sim -2.46$, 对应二阶段 Hf 模式年龄 ($T_{\text{DM}2}$) 的变化范围为 $1.31 \sim 1.52$ Ga (均值 1.44 Ga; 图 8)。

表 3 沙县盆地及泰宁盆地石英正长斑岩中的锆石微量元素含量 (10^{-6})Table 3 Trace element content of zircon in quartz monzonite from the Shaxian and Taining Basins (10^{-6})

测点号	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta
SX006-01	25.62	9.13	114.51	43.64	195.68	41.25	376.50	73.54	12387.35	3.78
SX006-02	46.17	15.79	183.67	69.81	303.99	62.31	558.25	106.50	12392.27	4.49
SX006-03	25.20	9.48	114.16	43.74	198.69	41.25	379.47	74.21	12514.43	4.30
SX006-04	30.65	10.55	129.82	49.67	222.24	46.85	420.79	82.44	12726.19	4.69
SX006-05	27.65	10.15	124.91	48.68	218.37	45.58	416.06	81.28	12804.68	4.68
SX006-06	26.92	9.46	112.07	42.95	191.29	40.24	369.21	72.69	11334.61	3.40
SX006-07	24.67	9.21	110.45	42.84	192.47	40.20	364.30	72.43	12848.26	4.24
SX006-08	22.39	8.25	102.11	38.98	175.57	37.05	343.50	67.46	12655.89	4.15
SX006-09	27.85	10.18	123.04	47.63	211.23	44.80	401.85	78.88	12929.98	4.82
SX006-10	29.17	10.62	130.12	49.59	223.71	46.76	423.62	82.27	12898.64	5.03
SX006-11	25.59	9.21	112.42	44.22	195.12	41.41	375.99	73.29	12930.69	4.28
SX006-12	23.16	8.54	104.53	40.04	180.51	38.51	348.61	69.69	13012.15	4.12
SX006-13	27.28	10.04	124.23	48.07	216.83	44.87	411.51	80.09	12832.42	4.60
SX006-14	30.47	11.29	134.66	52.32	230.20	48.61	436.26	85.62	12541.65	4.68
SX006-15	42.06	14.35	167.93	63.22	270.79	56.02	503.45	95.06	12112.05	4.13
SX006-16	25.89	9.27	112.89	43.26	195.24	40.75	373.57	72.37	12752.86	4.30
TN003-01	24.41	7.83	88.88	32.63	141.81	28.27	260.09	49.36	8121.31	0.65
TN003-02	13.87	4.37	49.64	18.12	76.35	15.85	140.79	28.03	7236.36	0.43
TN003-03	29.24	9.33	101.82	36.22	151.47	29.64	265.99	51.27	7694.41	0.81
TN003-04	20.64	6.46	72.84	26.80	116.13	23.72	212.30	42.10	7785.22	0.86
TN003-05	30.44	9.12	96.56	34.76	141.73	27.80	246.24	47.98	7272.37	0.52
TN003-06	24.93	7.52	82.13	29.59	121.88	23.71	211.06	40.34	7295.39	0.58
TN003-07	37.60	11.66	123.48	43.90	180.67	35.36	306.82	58.92	7446.40	0.70
TN003-08	15.53	4.90	55.93	20.29	88.02	17.81	159.84	31.41	7211.73	0.55
TN003-09	29.01	8.56	92.59	32.40	135.81	26.47	233.29	45.31	7222.59	0.48
TN003-10	23.63	7.28	82.70	29.15	121.24	24.43	215.92	42.75	7489.50	0.64
TN003-11	26.93	8.61	94.03	34.09	146.60	29.63	269.52	52.79	7867.45	1.23
TN003-12	17.06	5.29	59.21	21.00	87.96	17.60	155.66	30.60	7078.48	0.40
TN003-13	44.58	13.22	137.69	47.61	195.46	37.49	324.47	61.41	7181.53	0.65
TN003-14	20.09	6.24	70.83	24.94	103.91	21.08	192.71	38.56	7207.00	0.46
TN003-15	18.79	5.99	65.44	23.48	98.36	19.86	180.44	35.45	6923.93	0.51
TN003-16	15.39	4.91	55.00	20.63	90.39	18.90	172.83	33.93	7709.40	0.65
TN003-17	15.28	4.87	54.23	20.08	87.75	17.94	161.56	31.93	7511.04	0.60
TN003-18	19.33	5.93	63.10	22.41	93.57	18.75	164.33	32.20	6970.68	0.37
TN003-19	19.78	6.37	69.95	25.51	107.25	21.80	198.25	38.33	7180.33	0.71
TN003-20	15.21	4.90	55.65	20.06	85.08	17.13	156.79	30.47	7624.65	0.49
TN007-01	14.27	4.53	50.98	18.43	78.62	16.10	145.88	28.15	6481.60	0.40
TN007-02	13.64	4.74	55.63	20.82	93.07	19.58	179.51	34.44	8528.66	1.37
TN007-03	37.34	11.30	120.12	40.88	168.70	32.99	283.13	52.65	7133.71	0.48
TN007-04	11.67	3.64	42.30	15.75	67.03	13.74	127.80	25.14	7183.04	0.38
TN007-05	26.29	7.53	78.47	27.88	115.46	22.80	206.76	39.25	6979.09	0.52
TN007-06	42.63	12.34	131.17	45.17	182.94	35.13	301.53	57.12	6812.76	0.43
TN007-07	14.25	4.69	52.54	18.78	79.20	16.33	148.47	29.31	6748.55	0.33
TN007-08	9.35	3.10	37.27	14.17	63.30	13.14	122.84	24.32	7559.83	0.53
TN007-09	17.32	6.01	67.14	24.94	107.14	21.90	203.89	38.61	7834.45	0.89
TN007-10	34.46	10.56	115.69	41.23	169.89	33.59	291.98	55.54	7843.44	0.84
TN007-11	20.30	6.43	69.91	25.28	107.45	21.63	197.05	38.51	6628.41	0.55
TN007-12	19.02	5.98	64.69	22.82	95.57	19.03	169.69	33.23	6912.77	0.41
TN007-13	13.01	4.26	46.24	16.52	69.80	14.14	130.82	25.52	6639.15	0.32
TN007-14	19.30	6.44	70.12	26.02	111.66	22.45	206.63	38.99	8569.67	1.59
TN007-15	13.74	4.40	49.64	18.92	80.20	16.62	152.16	29.59	6786.08	0.40

(续)表3 沙县盆地及泰宁盆地石英正长斑岩中的锆石微量元素含量 (10^{-6})(Continued) Table 3 Trace element content of zircon in quartz monzonite from the Shaxian and Taining Basins (10^{-6})

测点号	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta
TN007-16	14.01	4.50	49.86	17.89	74.81	15.12	137.20	26.57	6684.89	0.34
TN007-17	45.88	13.16	137.49	47.63	193.28	37.43	323.64	60.31	6942.68	0.61
TN007-18	13.79	4.16	47.81	17.52	73.93	15.11	138.16	26.88	6842.51	0.41
TN007-19	11.97	4.07	45.88	16.64	71.59	14.97	136.66	26.97	7069.26	0.46
TN007-20	28.37	8.96	93.90	32.68	134.14	26.43	236.50	45.03	6470.47	0.46
测点号	P	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
SX006-01	522.95	5.36	1257.65	10.26	0.00	32.28	0.07	1.59	4.23	0.31
SX006-02	679.71	4.76	2014.23	13.35	14.30	70.09	4.99	27.34	12.22	0.46
SX006-03	548.41	3.94	1271.30	11.47	0.00	29.89	0.07	1.66	4.17	0.26
SX006-04	527.06	3.62	1433.52	14.00	0.05	30.58	0.09	1.62	4.93	0.29
SX006-05	546.60	4.28	1400.85	13.27	0.01	31.50	0.08	2.02	4.43	0.18
SX006-06	555.86	11.50	1231.80	9.42	0.27	31.55	0.12	2.18	4.34	0.40
SX006-07	518.58	4.83	1236.61	11.56	0.01	28.82	0.05	1.25	4.00	0.16
SX006-08	538.36	5.17	1126.61	10.74	0.00	28.49	0.04	1.30	3.42	0.26
SX006-09	547.86	4.41	1348.52	12.91	0.01	30.29	0.06	1.57	4.46	0.20
SX006-10	547.82	3.95	1418.69	13.38	0.05	32.72	0.10	2.39	4.68	0.23
SX006-11	542.37	3.45	1255.59	11.85	1.67	32.36	0.58	4.21	4.45	0.24
SX006-12	507.99	3.64	1151.38	10.36	0.04	27.54	0.07	1.28	3.72	0.22
SX006-13	564.49	5.42	1367.23	11.53	1.09	31.34	0.44	3.22	5.16	0.22
SX006-14	577.42	4.12	1493.58	12.90	1.32	36.00	0.53	4.29	5.93	0.31
SX006-15	645.42	6.48	1798.51	12.36	3.12	48.47	1.18	8.56	8.78	0.54
SX006-16	568.95	3.32	1239.81	11.71	0.01	28.52	0.07	1.55	4.14	0.23
TN003-01	456.83	11.92	947.45	1.36	0.25	13.85	0.30	3.10	4.88	1.07
TN003-02	284.33	13.88	517.54	1.16	0.02	12.19	0.09	1.49	2.58	0.73
TN003-03	323.69	9.06	1018.21	1.79	0.03	13.04	0.20	3.65	6.58	0.79
TN003-04	327.50	11.27	766.22	1.83	0.06	12.82	0.12	2.06	4.11	0.64
TN003-05	391.18	12.56	972.05	1.16	0.34	14.34	0.39	4.43	6.55	1.48
TN003-06	298.73	14.96	820.82	1.14	0.01	10.20	0.17	3.40	5.48	1.44
TN003-07	390.18	10.08	1220.91	1.56	0.05	12.91	0.34	5.28	8.74	1.28
TN003-08	297.58	13.11	584.64	1.15	0.02	11.99	0.08	1.26	2.72	0.76
TN003-09	319.44	14.36	920.41	1.07	0.04	11.97	0.28	4.12	7.03	1.73
TN003-10	334.08	11.45	822.42	1.42	0.02	11.09	0.16	2.67	5.00	0.77
TN003-11	386.32	10.28	972.46	2.61	0.01	15.93	0.15	2.74	5.21	0.57
TN003-12	324.38	23.05	602.47	1.00	0.11	14.38	0.15	2.01	3.16	1.35
TN003-13	331.19	13.12	1344.11	1.15	0.05	14.47	0.51	7.80	10.58	2.35
TN003-14	355.55	16.19	710.09	1.17	0.01	11.59	0.11	1.88	4.08	1.00
TN003-15	344.01	15.01	670.41	1.12	0.09	11.00	0.12	2.41	4.01	0.87
TN003-16	528.18	10.07	600.01	1.32	3.68	19.09	1.26	6.22	3.94	0.69
TN003-17	275.63	11.25	583.53	1.34	0.01	10.16	0.07	1.29	2.68	0.53
TN003-18	311.36	16.69	639.65	0.80	0.02	7.78	0.17	2.73	4.31	1.30
TN003-19	351.05	10.22	726.58	1.29	0.01	9.53	0.09	2.05	4.03	0.66
TN003-20	276.98	15.14	577.15	1.31	0.08	13.34	0.18	1.89	3.04	0.88
TN007-01	299.55	16.91	528.52	0.91	0.01	8.80	0.09	1.57	2.58	0.85
TN007-02	214.75	8.08	606.29	3.39	0.04	16.26	0.06	1.06	2.50	0.14
TN007-03	287.86	13.14	1157.36	1.09	0.07	12.40	0.34	5.28	8.50	1.79
TN007-04	273.88	14.33	447.61	0.85	0.00	8.77	0.06	1.08	2.18	0.63
TN007-05	960.04	15.39	790.31	0.90	8.52	27.79	2.57	14.96	7.95	1.46
TN007-06	328.44	20.26	1261.55	0.90	0.15	12.74	0.50	7.56	9.52	2.44

(续)表 3 沙县盆地及泰宁盆地石英正长斑岩中的锆石微量元素含量 (10^{-6})(Continued) Table 3 Trace element content of zircon in quartz monzonite from the Shaxian and Taining Basins (10^{-6})

测点号	P	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
TN007-07	333.07	16.87	534.40	0.69	0.01	7.68	0.09	1.58	3.15	0.99
TN007-08	229.45	8.18	412.80	1.25	0.01	10.51	0.03	0.65	1.88	0.30
TN007-09	307.59	7.85	714.46	1.81	0.02	14.13	0.08	1.39	2.86	0.54
TN007-10	303.82	6.84	1140.68	2.05	0.03	13.66	0.20	4.14	7.08	0.72
TN007-11	353.86	14.34	716.10	1.27	0.01	11.99	0.13	2.28	3.98	0.88
TN007-12	280.42	11.94	653.62	0.86	0.01	9.17	0.13	2.00	4.11	1.09
TN007-13	427.46	16.37	476.72	0.78	2.04	12.45	0.76	4.17	3.31	0.83
TN007-14	451.51	4.11	731.45	3.92	8.30	37.05	2.61	11.94	5.69	0.21
TN007-15	279.48	13.58	535.09	1.07	0.03	9.61	0.10	1.10	2.54	0.61
TN007-16	289.58	14.97	504.82	0.85	0.15	8.13	0.11	1.69	2.58	0.80
TN007-17	329.16	10.83	1329.82	1.13	0.05	14.97	0.48	7.42	11.18	1.89
TN007-18	287.49	15.41	497.82	1.08	0.01	8.46	0.06	1.20	2.37	0.66
TN007-19	271.44	11.22	486.28	1.14	0.01	8.65	0.06	1.05	2.33	0.48
TN007-20	332.25	17.39	920.95	1.04	0.02	10.52	0.29	4.67	7.35	1.89

表 4 沙县盆地石英正长斑岩锆石的 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 4 Lu-Hf isotope analysis results of zircons from quartz monzonite porphyry in the Shaxian Basins

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	年龄/Ma
SX006-01	0.282591	0.000012	0.001172	0.000003	0.052451	0.000329	97.9
SX006-03	0.282586	0.000011	0.001076	0.000004	0.045844	0.000345	94.6
SX006-04	0.282644	0.000013	0.001229	0.000001	0.054505	0.000191	97.6
SX006-05	0.22578	0.000010	0.001234	0.000003	0.053791	0.000229	96.8
SX006-07	0.22552	0.000010	0.001049	0.000002	0.045105	0.000174	96.7
SX006-08	0.282578	0.000011	0.001038	0.000007	0.045153	0.000144	94.5
SX006-09	0.22587	0.000011	0.001170	0.000001	0.050691	0.000195	95.6
SX006-10	0.282592	0.000011	0.001327	0.000011	0.058057	0.000255	98.2
SX006-11	0.282588	0.000010	0.001126	0.000007	0.048186	0.000251	95.2
SX006-12	0.282579	0.000011	0.000984	0.000003	0.04078	0.000162	97.4
测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	T_{DM1}	$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$\text{Hf}_{\text{DM}}(t)$
SX006-01	0.282589163	-4.32177	0.409533	940.4279	1434.571	-0.96469	0.28318
SX006-03	0.282584049	-4.57534	0.387065	945.5737	1447.998	-0.9676	0.283182
SX006-04	0.282641694	-2.47011	0.442101	867.2023	1317.214	-0.96298	0.28318
SX006-05	0.282575912	-4.81366	0.362007	960.6344	1464.816	-0.96283	0.283181
SX006-07	0.282550535	-5.71388	0.356844	992.1691	1521.542	-0.9684	0.283181
SX006-08	0.282575988	-4.86249	0.381515	956.0926	1466.061	-0.96873	0.283182
SX006-09	0.28258455	-4.53511	0.386043	946.982	1446.261	-0.96475	0.283181
SX006-10	0.282589473	-4.30303	0.369284	943.4664	1433.664	-0.96002	0.28318
SX006-11	0.28258619	-4.4866	0.357205	943.6692	1442.857	-0.96609	0.283182
SX006-12	0.282577533	-4.74443	0.385101	952.6027	1460.868	-0.97037	0.28318

表 5 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩全岩主量元素 (10^{-2}) 和微量元素 (10^{-6}) 分析结果Table 5 Analysis results of major (10^{-2}) and trace elements (10^{-6}) in whole rock of quartz monzonite porphyry from the Taining and Shaxian Basins

样品编号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
TN001	77.25	0.01	11.78	1.56	0.01	0.14	0.18	2.00	5.83	0.01
TN002	71.62	0.02	14.98	2.59	0.01	0.15	0.07	2.31	6.95	0.02
TN003	65.97	0.19	15.15	4.21	0.09	0.40	2.59	3.42	5.11	0.19
TN004	68.49	0.19	15.31	3.99	0.04	0.15	0.47	4.49	4.58	0.19
TN006	73.31	0.08	13.18	2.66	0.03	0.13	0.24	2.49	6.35	0.08
TN007	72.02	0.08	13.98	2.63	0.03	0.13	0.26	3.08	6.32	0.08

(续)表5 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩全岩主量元素 (10^{-2}) 和微量元素 (10^{-6}) 分析结果
(Continued) Table 5 Analysis results of major (10^{-2}) and trace elements (10^{-6}) in whole rock of quartz monzonite porphyry from the Taining and Shaxian Basins

SX006	74.14	0.02	13.08	1.81	0.04	0.21	0.17	3.31	5.70	0.02
SX007	73.92	0.01	13.30	1.82	0.04	0.13	0.16	3.60	5.46	0.01
SX008	73.26	0.02	13.06	1.93	0.06	0.19	0.54	3.81	5.29	0.02
SX009	66.42	0.10	14.93	3.74	0.08	0.55	1.64	3.25	6.46	0.10
样品编号	总和	烧失量	Be	Li	Pb	Sc	Zn	Ba	Ce	Cr
TN001	98.77	1.23	3.80	72.70	30.40	2.70	43.00	206.0	178.00	20.00
TN002	98.72	1.28	3.06	13.00	29.70	5.60	55.00	1185.0	192.00	10.00
TN003	97.32	2.68	3.09	68.90	23.10	8.00	93.00	1570.0	129.50	10.00
TN004	97.90	2.10	3.25	140.50	26.30	7.70	57.00	1670.0	132.00	10.00
TN006	98.55	1.45	2.60	34.50	25.90	4.40	35.00	1180.0	133.50	10.00
TN007	98.61	1.39	2.38	20.20	24.10	6.40	44.00	1100.0	124.00	10.00
SX006	98.50	1.50	5.32	10.40	27.80	4.50	69.00	127.0	162.00	20.00
SX007	98.45	1.55	4.45	8.50	30.30	4.50	77.00	140.5	134.50	20.00
SX008	98.18	1.82	4.58	11.20	30.10	4.60	73.00	134.0	165.00	30.00
SX009	97.27	2.73	1.68	18.00	29.10	6.90	56.00	1750.0	226.00	10.00
样品编号	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Ho	La	Lu
TN001	4.94	5.30	2.79	0.68	16.70	6.84	6.10	1.01	90.30	0.41
TN002	6.66	7.11	3.69	2.31	19.50	9.38	11.00	1.34	114.50	0.52
TN003	7.98	5.56	3.08	2.33	19.00	7.09	11.40	1.11	64.20	0.43
TN004	6.93	5.56	3.13	2.30	18.20	7.02	11.30	1.10	65.50	0.41
TN006	5.51	5.37	3.00	1.69	15.60	6.49	10.20	1.04	73.30	0.42
TN007	2.95	4.35	2.50	1.57	15.80	5.61	9.50	0.88	64.00	0.37
SX006	2.92	9.29	5.05	1.16	22.20	9.97	10.00	1.73	86.10	0.76
SX007	3.06	7.66	4.41	0.99	22.30	7.78	9.30	1.48	68.00	0.72
SX008	2.60	9.41	5.30	1.13	22.50	9.79	9.60	1.78	83.30	0.81
SX009	2.75	6.34	3.19	2.91	18.40	8.85	13.70	1.20	117.00	0.47
样品编号	Nb	Nd	Pr	Rb	Sm	Sr	Ta	Tb	Th	Tm
TN001	18.60	62.00	18.45	235.00	9.97	68.70	1.40	1.02	23.10	0.42
TN002	20.70	81.90	23.20	270.00	13.30	77.00	1.40	1.36	20.10	0.53
TN003	18.40	51.50	14.15	156.50	9.00	265.00	1.20	1.08	14.80	0.43
TN004	20.00	53.60	14.60	120.50	9.10	254.00	1.30	1.03	15.55	0.42
TN006	18.40	55.70	15.70	215.00	9.17	119.50	1.30	0.96	17.40	0.43
TN007	16.80	47.40	13.55	183.50	7.57	122.00	1.20	0.85	15.20	0.36
SX006	35.00	67.70	19.60	262.00	13.00	25.10	2.60	1.53	27.50	0.76
SX007	34.70	51.70	15.05	247.00	10.15	33.80	2.60	1.24	27.30	0.70
SX008	34.70	66.10	18.85	239.00	12.80	36.80	2.60	1.56	27.00	0.81
SX009	18.40	87.90	24.10	203.00	13.60	87.60	1.10	1.22	20.90	0.45
样品编号	U	Y	Yb	Zr	A/CNK	A/NK	K ₂ O+Na ₂ O	K ₂ O/Na ₂ O		
TN001	4.18	25.60	2.79	204.00	1.18	1.22	7.83	2.92		
TN002	4.41	37.70	3.36	459.00	1.30	1.32	9.26	3.01		
TN003	3.10	30.00	2.79	516.00	0.95	1.35	8.53	1.49		
TN004	2.89	30.80	2.64	490.00	1.16	1.24	9.07	1.02		
TN006	2.99	28.60	2.78	437.00	1.15	1.20	8.84	2.55		
TN007	3.34	23.90	2.32	404.00	1.12	1.17	9.40	2.05		
SX006	4.77	48.90	4.61	358.00	1.09	1.12	9.01	1.72		
SX007	5.24	42.10	4.31	344.00	1.09	1.12	9.06	1.52		

(续)表5 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩全岩主量元素 (10^{-2}) 和微量元素 (10^{-6}) 分析结果
(Continued) Table 5 Analysis results of major (10^{-2}) and trace elements (10^{-6}) in whole rock of quartz monzonite porphyry from the Taining and Shaxian basins

SX008	5.86	52.70	4.99	352.00	1.00	1.08	9.10	1.39
SX009	3.60	32.10	2.91	668.00	0.97	1.20	9.71	1.99
样品编号	DI	$T_z/^\circ\text{C}$	Eu/Eu*	10000Ga/Al	ΣREE	LREE/HREE	$(\text{La/Yb})_N$	
TN001	94.92	828	0.08	2.67	379.98	17.46	23.22	
TN002	92.53	911	0.21	2.46	454.50	15.65	24.44	
TN003	81.49	876	0.29	2.37	292.25	12.55	16.51	
TN004	90.34	900	0.29	2.24	298.41	13.00	17.80	
TN006	93.46	896	0.22	2.23	309.55	14.11	18.91	
TN007	93.61	882	0.24	2.13	275.33	14.97	19.79	
SX006	95.17	870	0.10	3.20	383.26	10.37	13.40	
SX007	95.37	865	0.11	3.16	308.69	9.91	11.32	
SX008	94.25	857	0.10	3.25	381.63	10.08	11.97	
SX009	86.13	907	0.27	2.33	496.14	19.14	28.84	

注: (1) $A/CNK = \frac{n(\text{Al}_2\text{O}_3)}{n(\text{CaO}) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})}$; $A/NK = \frac{n(\text{Al}_2\text{O}_3)}{n(\text{Ca}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})}$; (2) 分异指数 ($\text{DI} = \text{石英} + \text{正长石} + \text{钠长石} + \text{霞石} + \text{白榴石} + \text{钾长石}$, 其值 (wt%) 根据 CIPW 标准计算); (3) REE 为稀土元素的英文缩写, 其英文全称为 Rare Earth Element, LREE 为轻稀土元素的英文缩写, 其英文全称为 Light Rare Earth Element, HREE 为重稀土元素的英文缩写, 其英文全称为 Heavy Rare Earth Element; (4) 表中 ΣREE 、HREE 不包括 Y; (5) $(\text{La/Yb})_N$ 、 δEu 、 δCe 均使用 CI 球粒陨石数据进行标准化; (6) $\delta\text{Eu} = \frac{\text{Eu}_N}{\sqrt{\text{Sm}_N \cdot \text{Gd}_N}}$,

$\delta\text{Ce} = \frac{\text{Ce}_N}{\sqrt{\text{La}_N \cdot \text{Pr}_N}}$; (7) 微量元素分析值的小数点保留位数代表该元素的测试精度; (8) $T_z/^\circ\text{C} = \frac{10108}{\left[0.32 + 1.16M + \ln \frac{500000}{w(\text{Zr}_{\text{melt}}/10^{-6})}\right]}$

273.15, $w(\text{Zr}_{\text{melt}})$ 为熔体中 Zr 的质量分数, 计算中以全岩的 Zr 的质量分数代替。

4 讨论

4.1 石英正长斑岩时代厘定

对闽西沙县盆地的 1 号岩体石英正长斑岩获得锆石 U-Pb 年龄为 (96.86 ± 0.28) Ma, 确认其为晚白垩世早期的岩浆作用产物。这一结果与前人在该区域获得的火山岩年代学数据具有良好的对应性和互补性, 同时也反映出不同同位素体系在记录岩浆演化信息上的差异: 何文兴通过全岩 Rb-Sr 等时线法, 测得沙县盆地西部大佑山盆地石帽山群黄坑组上火山岩段安山岩年龄为 123 Ma, 代表了该地区早白垩世中基性火山活动的早期阶段; 而其上部寨下组流纹岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 (99 ± 3) Ma^[33]; 李祥辉通过锆石 U-Pb 测年, 测得寨下组年龄为 133.9 ~ 99.0 Ma, 其岩性变化较大, 早期以凝灰岩为主, 晚期演化至粗面岩, 而沙县组凝灰岩年龄为 114.0 ~ 93.3 Ma^[21]。这种年龄分布范围的差异主要受控于同位素体系封闭温度及后期地质作用的共同影响: 锆石 U-Pb 体系封闭温度极高 ($>900^\circ\text{C}$), 能准确捕捉岩浆初

次的结晶时代, 记录了寨下组从早期凝灰岩 (约 134 Ma) 向晚期粗面岩 (约 99 Ma) 的长时期喷发序列; 相比之下, 全岩 Rb-Sr 体系封闭温度较低 (约 300 ~ 500 $^\circ\text{C}$), 且受本区强烈蚀变作用影响, 极易发生同位素重置^[46]。因此, 99 Ma 的 Rb-Sr 年龄并非代表岩浆结晶时代, 而是记录了叠加于原始年龄之上的后期热事件时代。本研究获得的石英正长斑岩结晶年龄 (约 96.9 Ma) 与前人测得的年龄在误差范围内一致, 且略晚于酸性火山喷发时代。这表明沙县盆地的岩浆活动从早白垩世中性岩喷发演化至晚白垩世早期的酸性岩喷发, 并最终在石英正长斑岩的侵位结束该阶段岩浆演化过程。

对闽西泰宁盆地的龙安 1 号及龙安 2 号岩体石英正长斑岩获得锆石 U-Pb 年龄分别为 (98.70 ± 0.92) Ma 和 (99.78 ± 0.87) Ma, 确认其为晚白垩世早期的岩浆作用产物。这一结果与前人在大布地区获得的年代学数据在误差范围内高度吻合。前人对泰宁大布地区开展的年代学研究显示, 样品 1110-01、1110-02 及 1110-03 的锆石 U-Pb 年龄分别为 (96.9 ± 1.0) Ma、 (97.5 ± 1.0) Ma 和

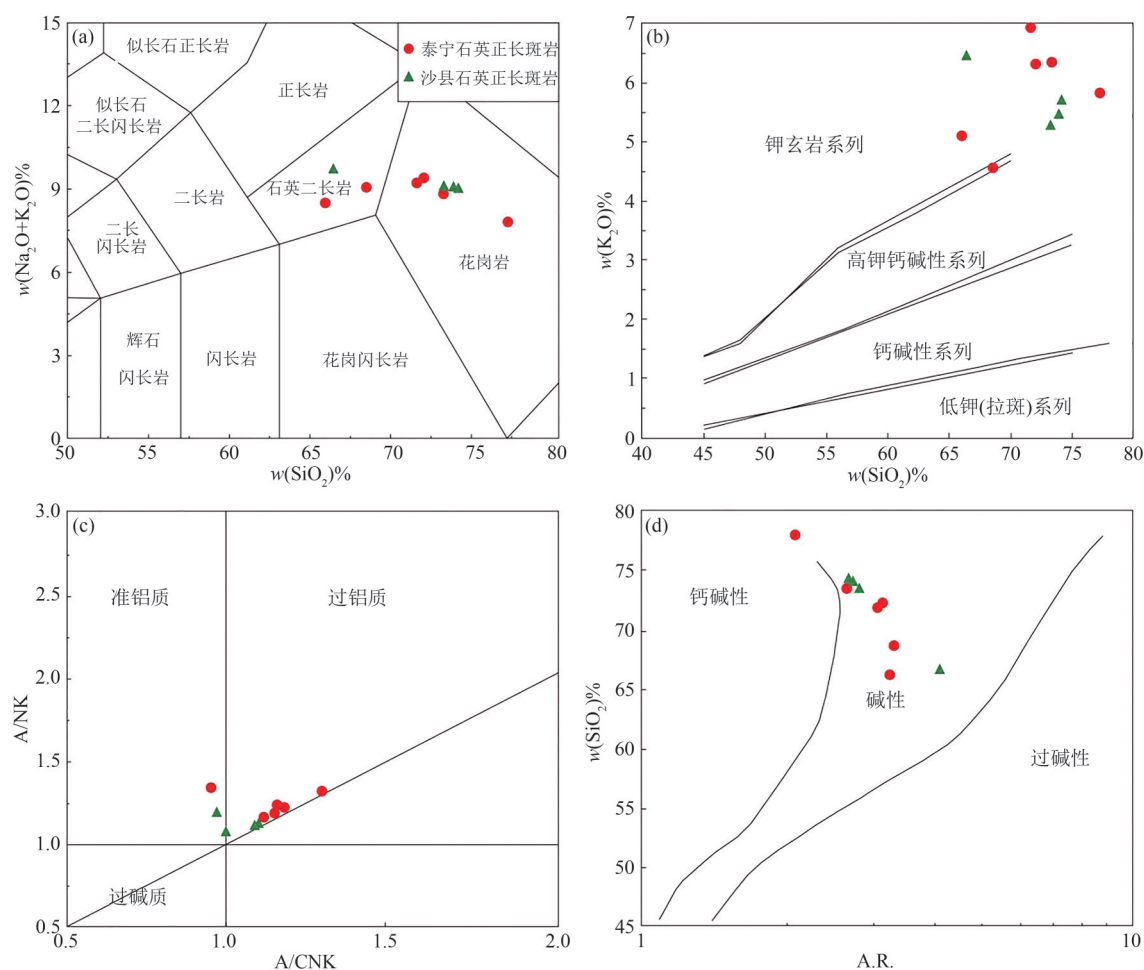


图6 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩 SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解 (a) SiO_2 - K_2O 图解 (b) A/CNK - A/NK 图解 (c) 及 SiO_2 -A. R. 图解 (d) (据文献 [42-44])

Fig. 6 Quartz monzonite in the Taining and Shaxian Basins: SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ diagram (a), SiO_2 - K_2O diagram (b), A/CNK - A/NK diagram (c), and SiO_2 -A. R. diagram (d) (After reference [42-44])

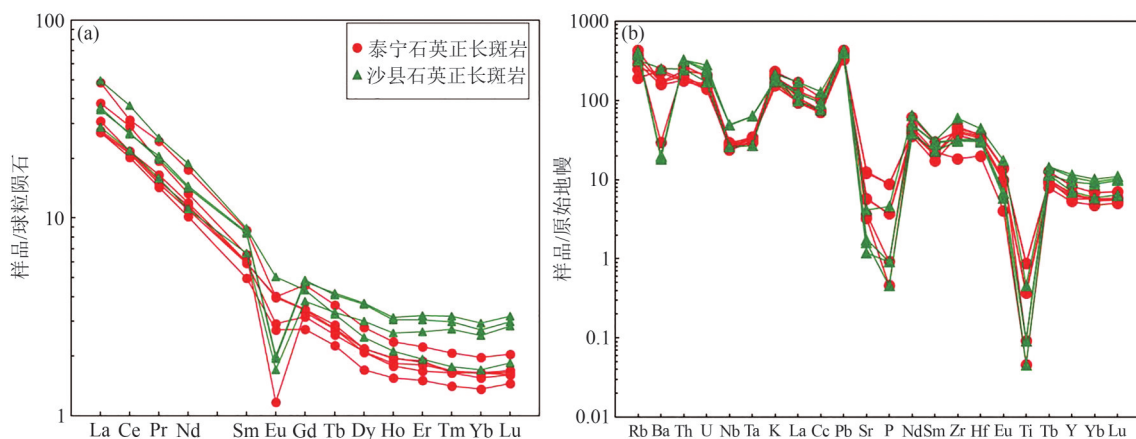


图7 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩球粒陨石标准化REE图 (a) 与原始地幔标准化微量元素模式图 (b)

Fig. 7 Standardized REE diagram of quartz monzonite granophyre meteorites from the Taining and Shaxian Basins (a) and primitive mantle-normalized trace element pattern diagram (b)

(97.3 ± 1.0) Ma, 年龄值集中于约 97 Ma^[21]。尽管前人将上述样品描述为粗面岩, 但结合采样点

经纬度坐标、本次野外调查和室内岩相学研究, 证实这些样品实际取自龙安1号岩体和龙安2号岩

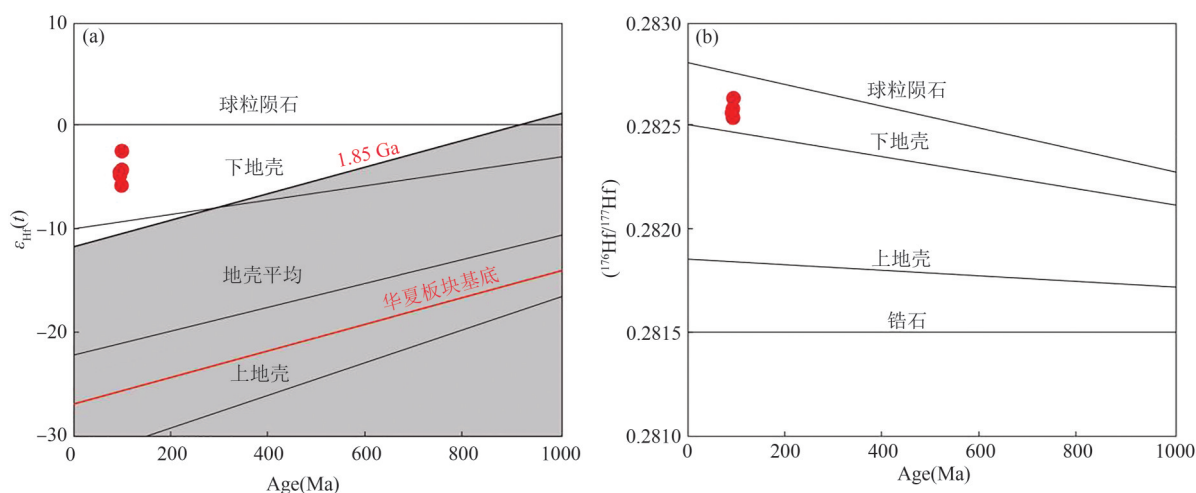


图8 沙县盆地石英正长斑岩中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t/Ma 图解 (a) 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ - t/Ma 图解 (b) (华夏板块基底数据据文献 [45])

Fig. 8 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t/Ma diagram (a) and $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ - t/Ma diagram (b) of zircons in quartz monzonite porphyry from the Shaxian Basin (basement data of the Huaxia Block according to reference [45])

体。因此, 这组年龄数据与龙安1号岩体和龙安2号岩体的形成时代在误差范围内基本一致, 反映其侵位于晚白垩世早期, 与闽东沿海及邻区A型花岗岩带的侵位时代基本一致, 显示出晚白垩世早期岩浆活动在空间上的联动性。对比区域内典型花岗岩体, 泰宁盆地石英正长斑岩的年龄与福建长泰天柱山晶洞花岗岩 ($97.50 \pm 0.69 \text{ Ma}$)、漳浦复式花岗岩体 (白石山、金刚山、乌山) ($92 \sim 86 \text{ Ma}$)、太姥山A型花岗岩 ($96.6 \pm 1.6 \text{ Ma}$)、鼓山A型花岗岩 (约 95 Ma) 以及福州魁岐岩体 ($96 \sim 94 \text{ Ma}$) 在误差范围内十分接近 [9, 11-13, 47-49]。此外, 泰宁盆地与沙县盆地的石英正长斑岩的成岩时代略早于浙东南地区的瑶坑碱性花岗岩 ($91.3 \pm 2.5 \text{ Ma}$) 和望州山碱性花岗岩 ($91.30 \sim 90.43 \text{ Ma}$), 并与南雁荡山地区白云山火山机构中的正长斑岩 ($94.0 \pm 1.4 \text{ Ma}$) 时代接近 [14-15, 50]。这种年代学上的集中分布特征 (图9), 确证了沙县盆地和泰宁盆地的石英正长斑岩体不仅是浙闽沿海A型花岗岩带向内陆延伸的重要组成部分, 也为华南晚中生代发育 $100 \sim 90 \text{ Ma}$ 这一大规模区域性岩浆事件提供了新资料。

4.2 A型花岗岩厘定

花岗岩成因类型的厘定对揭示岩浆演化机制与源区属性具有重要理论价值 [51-52]。目前普遍采用的ISMA分类体系将花岗质岩石划分为四个成因类型: I型源区以火成岩为主, 特征以含角闪石矿物组合; S型源自变沉积岩部分熔融, 发育富铝矿

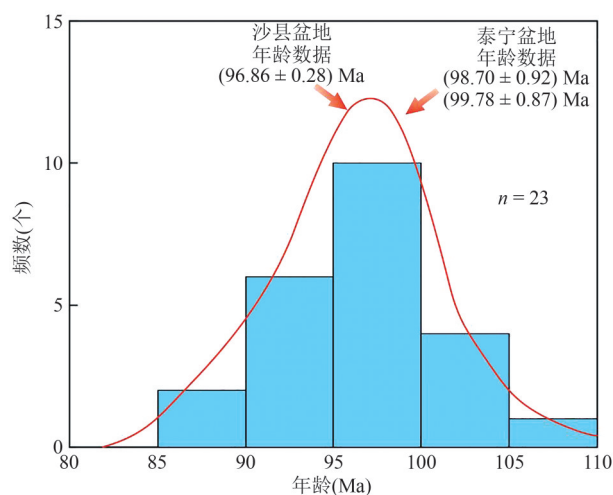


图9 浙闽沿海及邻区晚中生代A型花岗岩类锆石U-Pb年龄频率分布图 (年龄数据据文献 [48])

Fig. 9 Zircon U-Pb age frequency distribution of Late Mesozoic A-type granitoids in the Zhejiang-Fujian coastal and adjacent areas (Age data are from reference [48])

物如堇青石、白云母及石榴子石 [51]; M型直接起源于地幔物质分异; A型则形成于伸展构造环境, 以贫水、富碱及非造山属性为典型特征 [5, 7, 54]。

本文采集泰宁盆地、沙县盆地中的石英正长斑岩样品的地球化学特征显示其具有富碱高钾属性, 兼具高钾钙碱性与钾玄质特性。主量元素表现为中高硅、高碱、低钙和低镁的特征, 具有较高的 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 值和 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ 值, 这些特征与典型的A型花岗岩相似, 且样品中 P_2O_5 质量分数介于 $0.01\% \sim 0.19\%$ (均值 0.072%), 与S型花

岗岩特征显著不符 (S型花岗岩 $P_2O_5 > 0.20\%$), 且与分异程度正相关^[4, 55]。其全铁质量分数 ($TFe_2O_3 = 1.56\% \sim 4.21\%$, 均值 2.69%) 高于高分异 I 型花岗岩阈值 ($< 1\%$)^[56]。而在微量元素特征上表现为相对富集大离子亲石元素 (Rb、Th、U、K 和 Pb), 相对亏损高场强元素 (Nb、Ta、P、Ti) (图 7b), 其稀土元素球粒陨石标准化配分模式图呈明显右倾的“V”字形海鸥曲线, 表现为轻稀土元素 (LREE) 相对富集且分馏明显 (曲线较陡), 重稀土元素 (HREE) 相对亏损且平坦分布, 伴有弱—中等的负 Eu 异常, 样品中 $(Zr + Nb + Ce + Y)$ 总量达 $426.2 \times 10^{-6} \sim 944.5 \times 10^{-6}$ (均值 640×10^{-6}), $10000Ga/Al$ 值为 $2.13 \sim 3.25$ (均值 2.60),

也基本符合典型 A 型花岗岩判别标准 ($Zr + Nb + Ce + Y > 350 \times 10^{-6}$; $10000 Ga/Al > 2.6$)^[57]。在花岗岩类型判别图解中 (图 10), 所有样品均落入 A 型花岗岩区域。根据 Eby 对 A 型花岗岩的地球化学分类标准, A1 型通常被视为类洋岛地幔 (OIB) 的分异产物, 对应大陆裂谷或板内伸展环境; 而 A2 型则多起源于大陆地壳或经底侵改造的下地壳物质熔融, 与陆—陆碰撞后的伸展或岛弧造山作用关系密切^[2]。地球化学判别结果显示, 泰宁盆地与沙县盆地的石英正长斑岩在 Nb—Y—Ce、Nb—Y—3Ga、Ce/Nb—Y/Nb 和 Yb/Ta—Y/Nb 图解中 (图 11), 样点均表现出高度的趋同性, 集中投影于 A2 型区域。

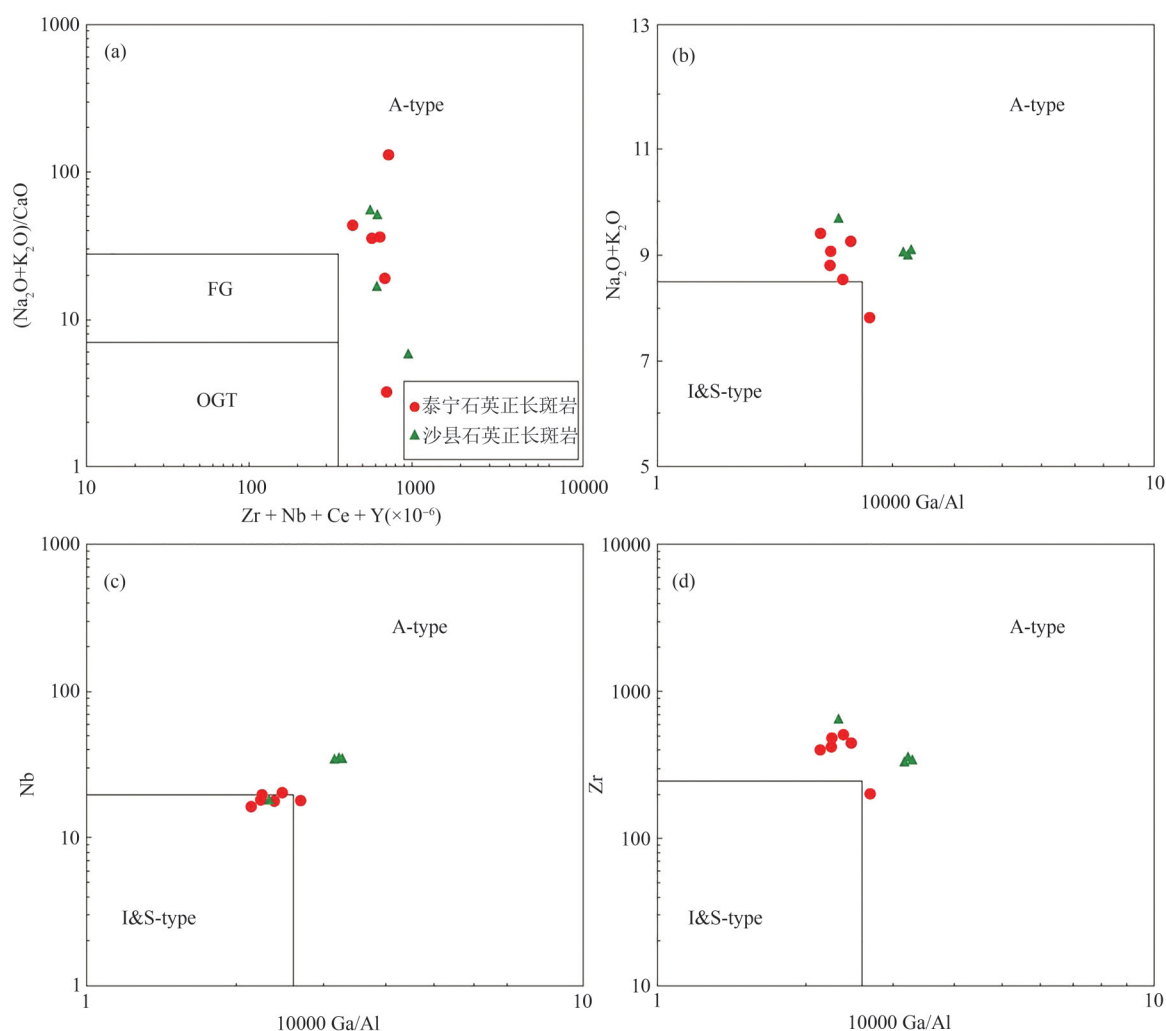


图 10 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩岩石类型判别图^[57]

Fig. 10 Classification diagram of quartz monzonite rock types in the Taining and Shaxian Basins^[57]

A-type-A 型花岗岩; I&S-type-I 型和 S 型花岗岩; FG-高分异花岗岩; OGT-未分异花岗岩

花岗质岩浆通常以绝热方式上升, 其早期结晶温度能够反映岩浆生成条件^[58]。依据锆石中 Zr

含量对温度的敏感特性, 可成为中酸性岩浆的温度计^[59]。当继承锆石贡献可忽略时, 全岩 Zr 含量

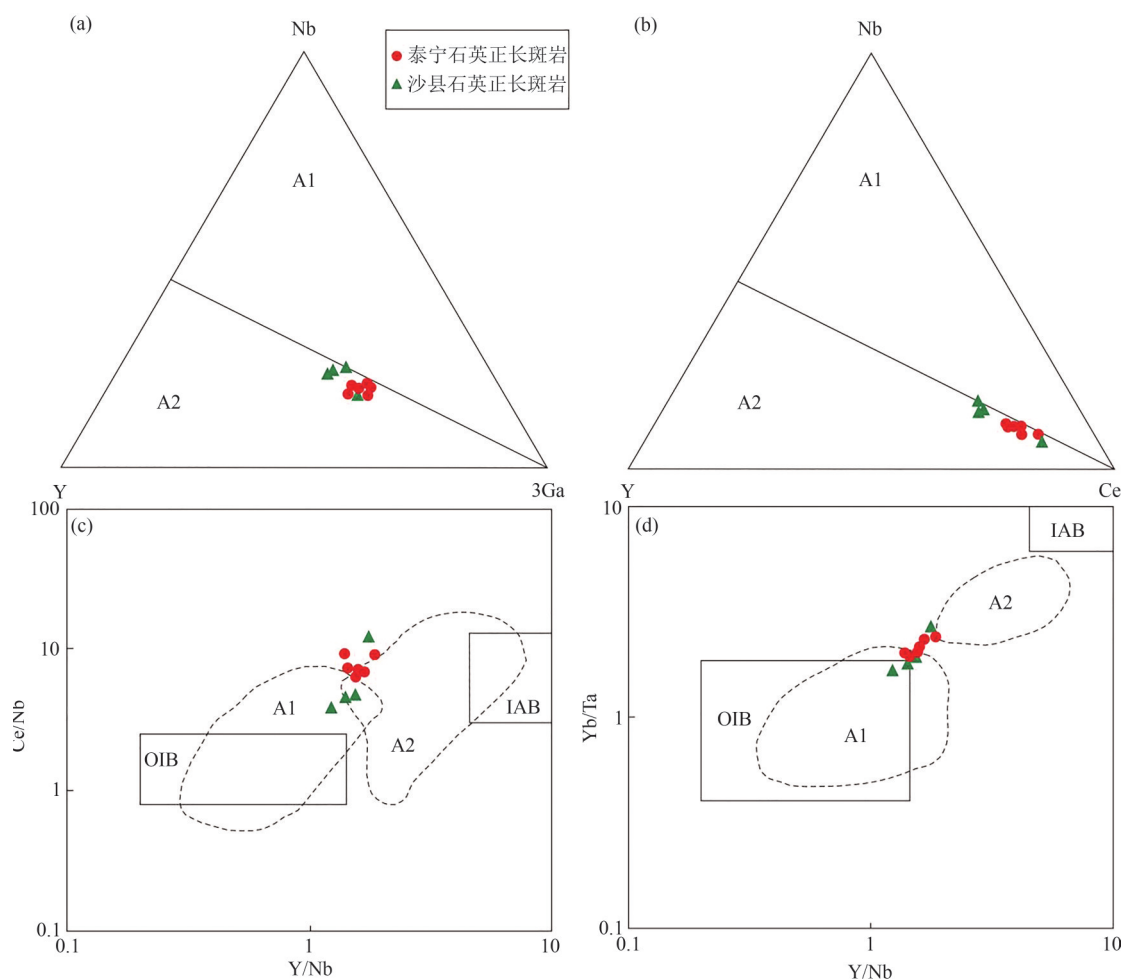


图11 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩Nb-Y-Ce (a)、Nb-Y-3Ga (b)、Ce/Nb-Y/Nb (c) 和Yb/Ta-Y/Nb (d) 图解^[2, 77]
Fig. 11 Diagrams of quartz monzonite of the Taining and Shaxian Basins: Nb-Y-Ce (a), Nb-Y-3Ga (b), Ce/Nb-Y/Nb (c), and Yb/Ta-Y/Nb (d) diagrams^[2, 77]

A1-非造山型花岗岩; A2-后造山型花岗岩; OIB-洋岛玄武岩; IAB-岛弧玄武岩

计算的锆石饱和温度 (T_z) 可代表岩浆生成温度。A型花岗岩通常具较高形成温度 ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[4]。泰宁及沙县盆地石英正长斑岩的 T_z 为 $828 \sim 911\text{ }^{\circ}\text{C}$ (均值 $879\text{ }^{\circ}\text{C}$; 表5)。泰宁盆地、沙县盆地晚燕山期岩浆经历了高程度岩浆分异作用, 这得到了地球化学特征的证实。原始地幔标准化图解显示Ba、Nb、Sr、P、Eu及Ti的显著亏损 (图7b), 与高度分异岩浆特征一致^[58]。P负异常表明在岩浆结晶分异过程中存在磷灰石的分离结晶, Ti负异常表明在岩浆结晶分异过程中存在钛铁矿物的分离结晶。斜长石的结晶分异导致Sr、Eu亏损, 钾长石的结晶分异加剧Eu、Ba贫化。 SiO_2 与大多数主量氧化物具有良好的负相关关系 (图12), 随 SiO_2 含量增加, TiO_2 、 TFe_2O_3 、CaO、MgO、 Al_2O_3 、 P_2O_5 均呈线性减少的趋势, 指示它们可能是岩浆房内不同部位岩浆经不同结晶分异程度的产物。通过

结晶分异作用, 泰宁盆地、沙县盆地晚燕山期岩浆向富硅、贫镁钙的方向演化。

前人针对A型花岗岩的岩石成因已开展了深入研究, 并提出了许多模型: (1) 上地壳钙碱性岩石低压熔融^[60]; (2) 特殊源岩的部分熔融^[4, 61-63]; (3) 壳源物质与幔源物质混合^[64-67]; (4) 幔源玄武质岩浆高度结晶分异^[68-72]。而泰宁盆地、沙县盆地石英正长斑岩体的Nd/Th值为 $1.89 \sim 4.20$, 平均为 3.10 , Nb/Ta值介于 $13.34 \sim 16.72$, 平均为 14.38 , 两组比值均显著低于幔源岩石标准 ($\text{Nd/Th} > 15$, $\text{Nb/Ta} \approx 17.5 \pm 2$), 而高度契合陆壳岩石的组成特征 ($\text{Nd/Th} \approx 3$, $\text{Nb/Ta} \approx 11$)。花岗岩主微量组成特征主要受源区属性与岩浆分异过程制约。泰宁盆地、沙县盆地石英正长斑岩样品在C/MF-A/MF成因判别图解 (图13a) 中, 地球化学投影点主要集中于变质泥岩端元及

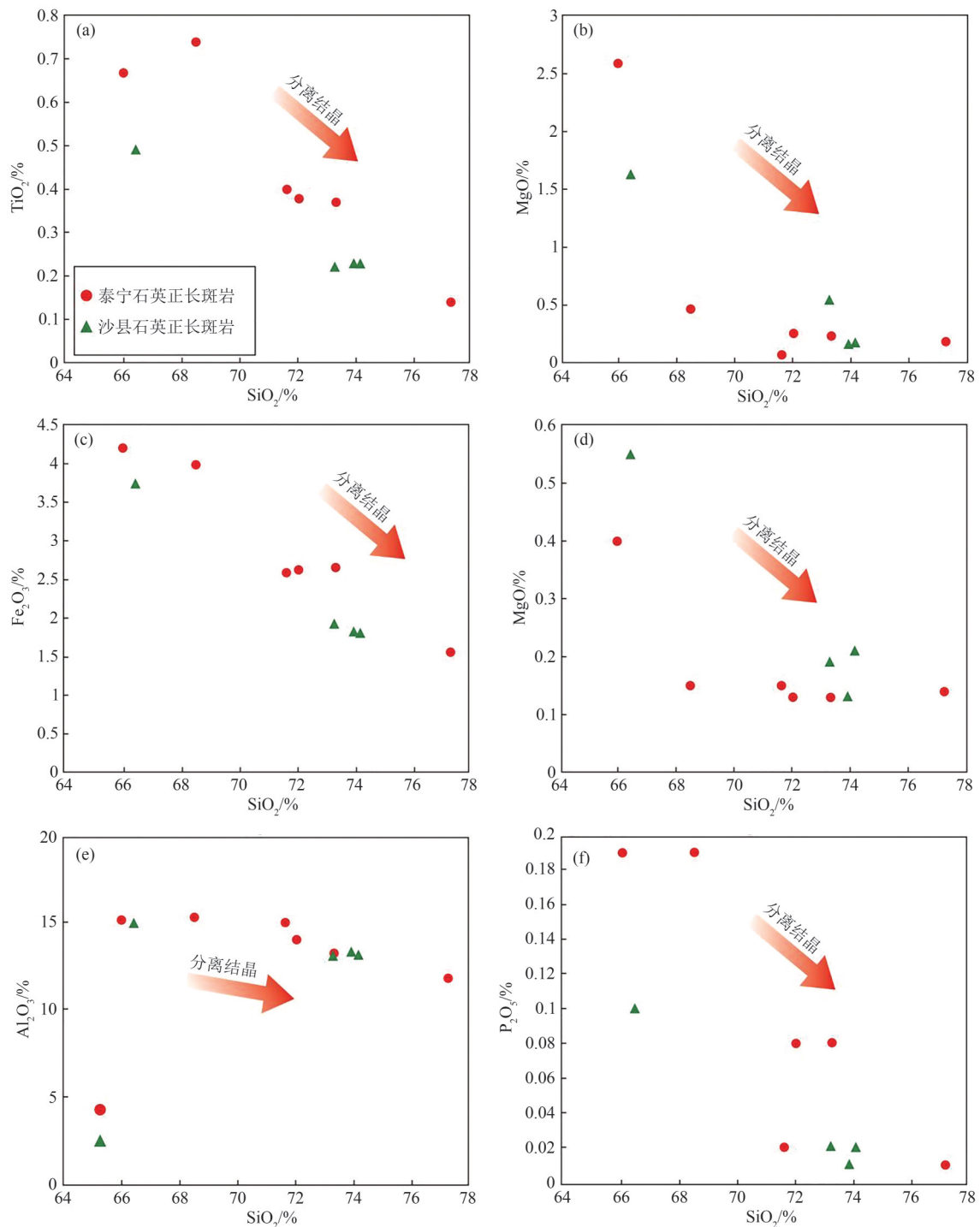
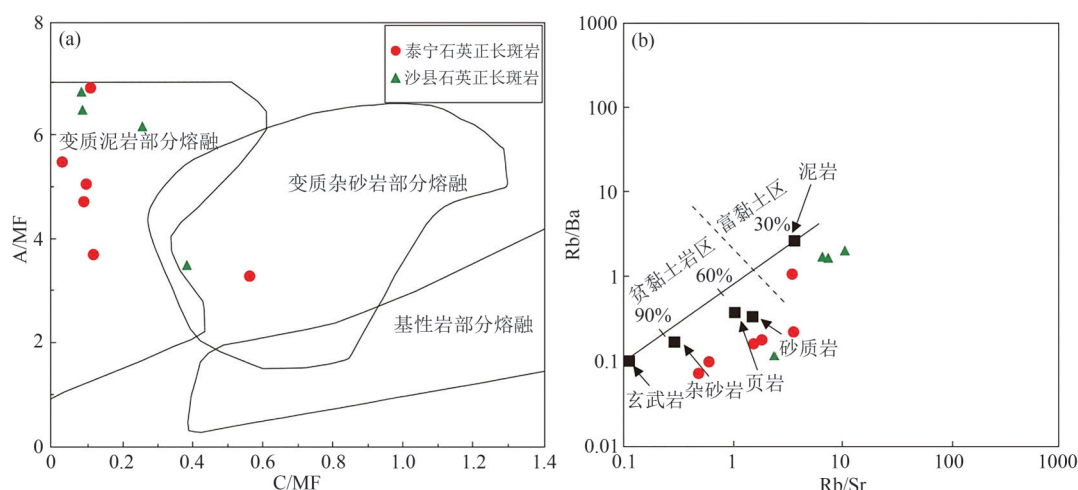


图 12 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩哈克图解 (引用数据同表 4)

Fig. 12 Harker diagram of quartz monzonite in the Taining and Shaxian Basins (data from Table 4)

变杂砂岩-泥质岩混合熔融过渡域, 揭示成岩物质具有多源混合属性, 以变质泥岩、变质杂砂岩部分熔融为主。鉴于 Rb、Sr、Ba 等元素对长石及黑云母矿物相的强亲和性, 其比值可有效示踪成岩物质来源^[73]。样品 Rb/Sr (0.47 ~ 7.30) 与 Rb/Ba (0.07 ~ 2.06) 比值显示强烈分异趋势, 在 Rb/Sr-Rb/Ba 成因判别图解中 (图 13b), 泰宁盆地样品点集中分布

于贫黏土岩区端元, 而沙县盆地样品点则集中分布在富黏土区, 进一步排除了幔源玄武质岩浆高度结晶分异的可能性。此外, 考虑到该岩体的中高硅、高碱的地球化学属性, 难以由亏损的麻粒岩相残留物质部分熔融产生。因此, 泰宁盆地、沙县盆地石英正长斑岩体应起源于大陆地壳物质的部分熔融, 而非地幔直接分异的产物。

图13 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩物质来源判别图解^[70, 84]Fig. 13 Diagram for determining the material sources of quartz monzonite in the Taining and Shaxian Basins^[70, 84]

a-A/MF-C/MF图解;b-Rb/Sr-Rb/Ba图解

Hf同位素体系判别标准表明, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值域指示岩浆源岩存在亏损地幔或新生陆壳, 负值域则反映古老地壳组分占主导或富集地幔熔融混入^[74]。石英正长斑岩样品SX006锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 $-5.71 \sim -2.46$ 间, 均为负值, 在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t/Ma 与 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ - t/Ma 相关图解(图8)中, 样品落在球粒陨石演化线下方(地壳范围内), 指示其岩浆源区主要为古老地壳物质的重熔。将该样品的二阶段模式年龄($T_{\text{DM}2} = 1.31 \sim 1.52 \text{ Ga}$)与研究区基底地壳的二阶段模式年龄进行对比发现, 其总体落入华夏块体中元古代地壳组分的演化区间之上(如武夷山地区普遍存在 $1.8 \sim 2.0 \text{ Ga}$ 或更古老的地壳基底)。 $T_{\text{DM}2}$ 值相对于该区典型古老基底组分呈现年轻化的趋势(图8), 这暗示在以古老地壳物质部分熔融为主的过程中, 可能有少量具有较高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的年轻地壳或幔源物质的混入^[44, 75]。综上所述, 泰宁盆地、沙县盆地晚燕山期石英正长斑岩为铝质、高分异的A2型花岗岩, 其成因主要受控于中元古代地壳物质的部分熔融, 并有少量新生地壳组分的混入。

4.3 构造意义

I型花岗岩通常与俯冲作用相关; S型花岗岩多形成于碰撞环境; M型花岗岩则与大洋玄武岩浆结晶分异过程有关; 而A型花岗岩主要产于板内构造环境。之后又进一步将花岗岩划分为同碰撞花岗岩(syn-COLG)、板内花岗岩(WPG)、火山弧型花岗岩(VAG)和洋脊花岗岩(ORG)四类^[78]。岛弧构造背景(含洋内岛弧、陆缘弧及

碰撞后弧)是钾玄质岩石主要赋存环境, 板内型钾玄岩仅占少数。典型岛弧钾玄岩以大离子亲石元素和轻稀土元素富集及显著的Ta-Nb-Ti负异常为特征^[79]; 而板内型则呈现地球化学多样性: 大洋板内型具洋岛玄武岩(OIB)型微量元素配分模式^[80], 大陆板内型既可呈现岛弧型元素特征^[81], 亦可显示OIB型地球化学特征^[82]。板内钾玄岩岩浆成因多与软流圈地幔上涌及岩石圈伸展减薄作用密切相关^[40, 83-84]。在构造环境判别上, 泰宁盆地、沙县盆地的石英正长斑岩表现出显著的板内伸展特征。前人研究表明, 中国东南部白垩纪发育的大规模北东向断陷盆地(如沙县盆地、泰宁盆地)是岩石圈减薄与陆内拉张的产物, 而同步侵位的A型花岗岩正是这一伸展动力学背景下的岩浆响应^[85-87]。两处盆地内石英正长斑岩的Y/Nb值为 $1.21 \sim 1.82$ (所有样品均大于1.2), 在Nb-Y-Ce和Nb-Y-3Ga三角图解中(图11a和图11b), 样品点均落入A2型花岗岩区域或附近, 指示其形成于后造山或板内伸展环境。尽管在Rb-(Y+Ta)、(Y+Nb)-Rb和Nb-Y构造判别图解中(图14), 样品点落在火山弧花岗岩(VAG)区域或其边缘, 但这并非暗示其形成于主动俯冲阶段, 而是反映了其岩浆源区曾受到早期俯冲流体的控制(如富集地壳物质或弧岩浆组分的混染)。结合R1-R2图解(图15), 样品点主要落入造山后期A型花岗岩区, 这不仅指示了岩石类型的归属, 显示具有造山期后A型花岗岩的特点, 更明确其形成于碰撞结束后的陆内后造山期拉张环境。

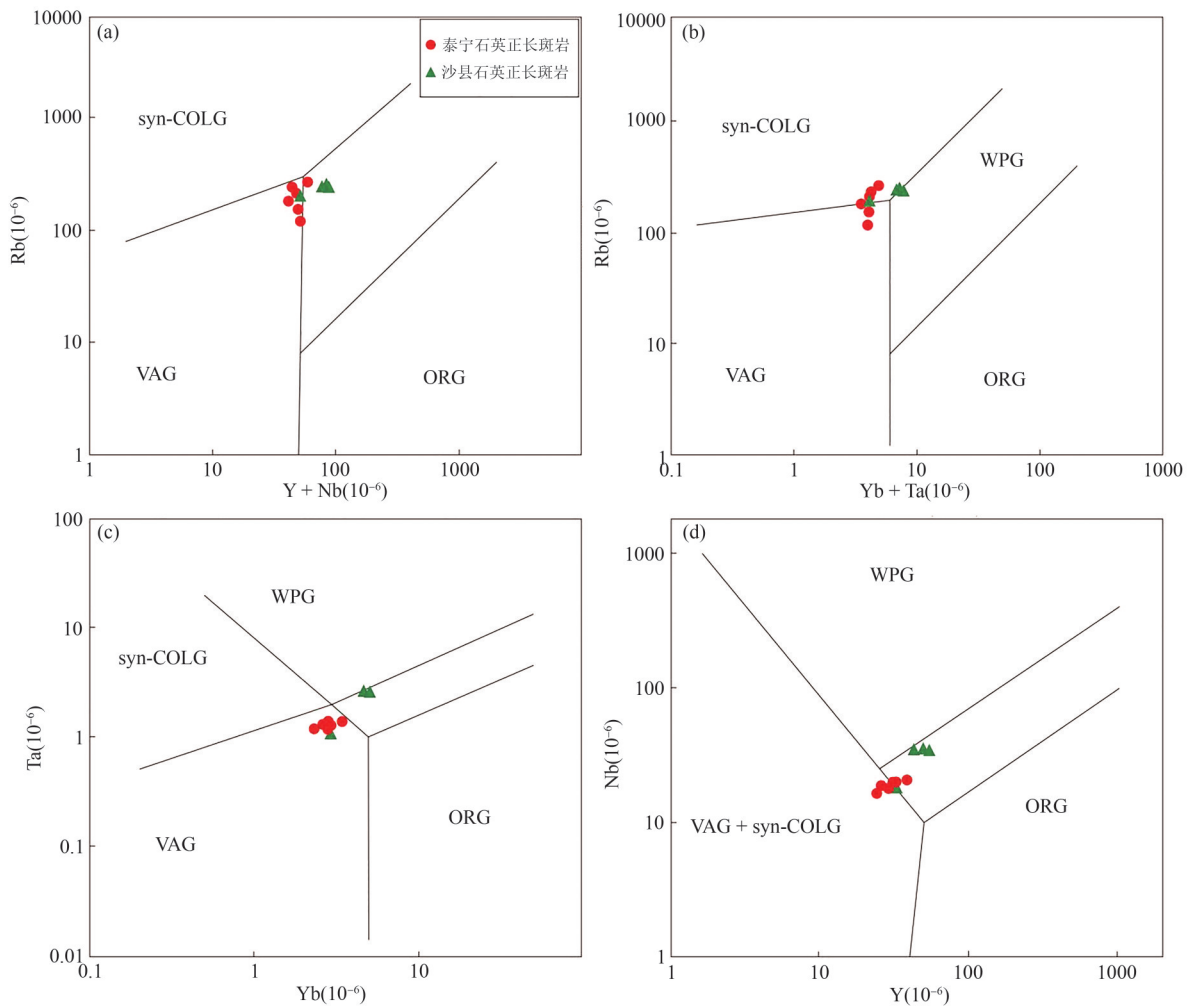


图 14 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩构造环境判别图解^[89]

Fig. 14 Diagram for identifying the structural environment of quartz orthoclase porphyry in the Taining and Shaxian Basins^[89]

Syn-COLG-同碰撞花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; WPG-板内花岗岩; ORG-洋脊花岗岩

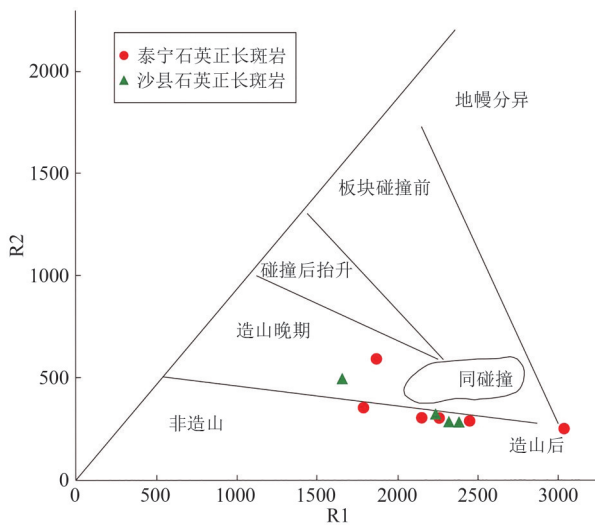


图 15 泰宁及沙县盆地石英正长斑岩岩石成因分类 R1-R2 图解^[87]

Fig. 15 Genetic classification of granitic rocks in the Taining and Shaxian Basins R1-R2 diagram^[87]

从空间展布来看, 沙县盆地、泰宁盆地均由 NE 向或 NE 向与 NS 向正断层控制的早白垩世晚期-晚白垩世的断陷盆地, 盆地发育早期均为石帽山群上部的寨下组火山岩沉积, 随后地壳小幅隆升; 盆地发育中期以湖相-河流相的沙县组红色薄层泥岩夹砂岩沉积为主的细碎屑红层沉积, 并与下部寨下组形成了平行不整合接触; 盆地发育晚期为河流相-洪积扇相的崇安组粗碎屑红层沉积。沙县盆地、泰宁盆地 NE 向或 NE 向与 NS 向控盆正断层的发育, 标志着早白垩世晚期区域伸展作用的开始; 盆地发育中期沙县组细碎屑红层沉积的出现代表伸展作用的加剧; 而盆地发育晚期的崇安组粗碎屑红层沉积暗示盆地的萎缩消亡和区域伸展变形的逐渐结束。空间上石英正长斑岩体侵入于沙县组或寨下组地层中, 这一地质特征揭示了“先构造伸展沉降、后岩浆侵位响应”的演化

序列，证明石英正长斑岩侵位是盆地演化至强烈拉张阶段的产物。

时间上看，沙县盆地、泰宁盆地石英正长斑岩体的锆石 U-Pb 年龄分别为 (96.86 ± 0.28) Ma 和 (98.70 ± 0.92) Ma、 (99.78 ± 0.87) Ma，石英正长斑岩体侵位时代晚于沙县组开始沉积时代，沙县组沉积期代表了区域的强烈伸展阶段。浙闽沿海 I 型花岗岩的时代呈现出从内陆向沿海逐渐年轻的趋势，这通常被解释为古太平洋板块俯冲带回撤导致的岩浆弧迁移^[90-92]。然而，本研究获得的闽西石英正长斑岩年龄（96.86 Ma、98.70 Ma 和 99.78 Ma）与东南沿海地区同时期的 A 型花岗岩年龄高度吻合。这种跨越内陆至沿海约 200 km 的“准同时性”爆发特征，暗示 A 型岩浆作用的触发机制并非局部的、线性的动力学过

程，而是响应了一次大规模的、区域性的构造事件。

从成因上看，这些 A 型花岗岩体直接产出于典型的晚中生代断陷盆地内部，这种“盆、岩”共生的空间格局是区域岩石圈强烈伸展的直接地质标志，A 型花岗岩作为“物质探针”与断陷盆地作为“构造容器”的高度时空耦合，共同确证了晚白垩世早期闽西地区处于强烈的伸展构造体制之下。结合区域地质背景，该时期太平洋板块的俯冲方向发生转折，板块后撤引发了强烈的弧后伸展，导致华南东南部岩石圈发生大规模拆沉与软流圈上涌。这种由“俯冲主导”向“板内伸展”的体制转变，不仅导致了闽西地区北东向断陷盆地的集群式发育，也促使了花岗质岩浆沿断裂带大规模侵位（图 16）。

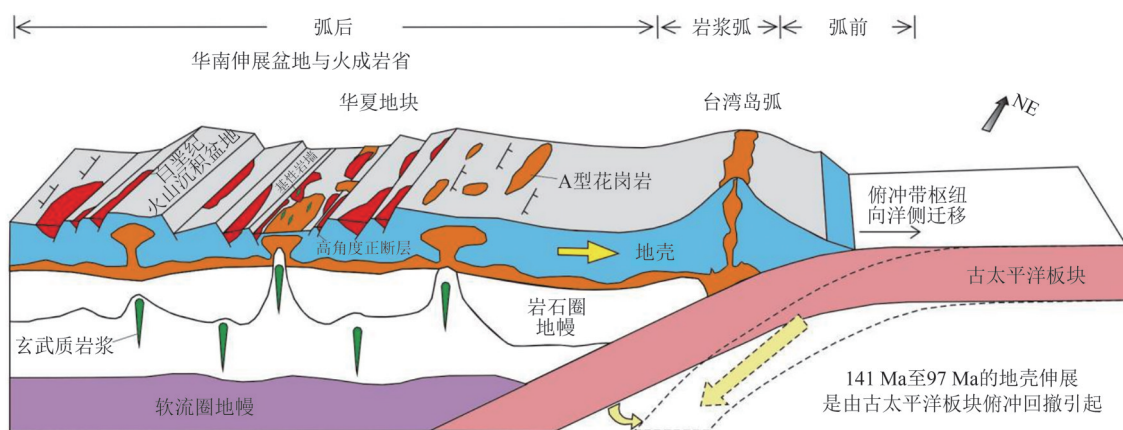


图 16 华南晚中生代古太平洋板块俯冲后撤背景下的弧后伸展及“盆-岩”演化模式图^[26]

Fig. 16 Schematic model of back-arc extension and basin-magma evolution triggered by the paleo-Pacific plate roll-back during the Late Mesozoic in South China^[26]

基于空间-时间-成因的综合分析，提出以下构造岩浆耦合机制：在晚白垩世早期（100 ~ 90 Ma），华南板块软流圈物质的大规模上涌不再局限于俯冲前缘，而是通过深大断裂带延伸至内陆区域。底侵作用产生的高热流跨越了从沿海到内陆（闽西）的空间范畴，诱发了中元古代下地壳物质的准同时性部分熔融。闽西作为这一机制向内陆延伸的关键节点，其 A 型花岗岩的数据有力地约束了这一大面积伸展事件的广度，确证了该时期华南东南部已处于统一的非差异性拉张体制之下。

5 结 论

(1) 沙县盆地石英正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石

U-Pb 定年结果为 (96.86 ± 0.28) Ma，泰宁龙安盆地石英正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果为 (98.70 ± 0.92) Ma 和 (99.78 ± 0.87) Ma，表明其侵位时代为晚白垩世早期；结合前人在泰宁龙安盆地中获得的锆石 U-Pb 年龄为 (96.9 ± 1.0) Ma、 (97.5 ± 1.0) Ma 和 (97.3 ± 1.0) Ma，确定泰宁龙安盆地石英正长斑岩体形成于 96 ~ 100 Ma，表明沙县盆地、泰宁盆地石英正长斑岩年龄与浙闽沿海典型的 A 型花岗岩带（100 ~ 90 Ma）时代同步。

(2) 岩石具有中高硅、富碱、高分异，以及高 $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值和 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ 含量的地球化学特征，结合较高的锆饱和温度（828 ~ 911 °C），确证其属于高分异的铝质 A2 型花岗岩。

锆石 Hf 同位素 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 $-5.71 \sim -2.46$, $T_{\text{DM2}} = 1.31 \sim 1.52 \text{ Ga}$) 显示其源区以中元古代地壳物质部分熔融为主, 并有少量新生地壳组分混入。

(3) 泰宁盆地、沙县盆地石英正长斑岩体产于沙县、泰宁两处晚白垩世断陷盆地内, 这种“盆、岩”共生的时空耦合格局, 结合 A2 型花岗岩的地球化学特征, 表明其形成于强烈的岩石圈伸展环境, 其动力学机制与古太平洋板块向华南板块下方的俯冲后撤及随后的软流圈物质上涌密切相关, 这为揭示华南晚中生代构造-岩浆演化从挤压向伸展体制的转换提供了重要依据。

致谢: 衷心感谢审稿专家提出的建设性意见和建议, 感谢武汉上谱分析科技有限责任公司、澳实分析检测(广州)有限公司在锆石 U-Pb 测年、全岩主微量及稀土元素分析和全岩 Lu-Hf 同位素分析中给予的技术支持。

参考文献:

- [1] EBY G N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 1990, 26(1): 115 - 134.
- [2] EBY G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. [J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641 - 644.
- [3] 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 等. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志[J]. *中国科学(B辑)*, 1995, 25(4): 418 - 427.
- [4] KING P L, WHITE A J R, CHAO O E L L B W, et al. Characterization and Origin of Aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(3): 371 - 391.
- [5] 许保良, 阎国翰, 张臣, 等. A 型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源[J]. *地学前缘*, 1998, 5(3): 113 - 125.
- [6] 王德滋, 周金城, 邱检生, 等. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩特征与成因[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(4): 487 - 498.
- [7] 吴锁平, 王梅英, 戚开静. A 型花岗岩研究现状及其述评[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1): 57 - 66.
- [8] BAI J, LING M, YANG X, et al. Yangshan A-Type Granites in the Lower Yangtze River Belt Formed by Ridge Subduction: Radiogenic Ca and Nd Isotopic Constraints[J]. *Journal of Earth Science*, 2022, 33(3): 581 - 590.
- [9] 李良林, 周汉文, 陈植华, 等. 福建太姥山地区和鼓山地区 A 型花岗岩对比及其地球动力学意义[J]. *现代地质*, 2013, 27(3): 509 - 524.
- [10] 赵蛟龙. 浙闽沿海晚中生代 I-A 型复合花岗岩体成因及其构造意义[D]. 南京: 南京大学出版社, 2016.
- [11] 钟锦辉. 福建长泰天柱山晶洞花岗岩锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征[J]. *福建地质*, 2020, 39(2): 96 - 107.
- [12] 陈鸿伟. 福建金刚山晶洞花岗岩年代学及其构造意义[J]. *福建地质*, 2021, 40(1): 1 - 12.
- [13] 邓心禾, 王力圆, 徐净, 等. 福州鼓山地区 A 型花岗岩中碱性暗色矿物特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2025, 41(1): 112 - 134.
- [14] 潘少军, 陈小友, 张建芳, 等. 浙江南雁荡山晚白垩世火山岩及地层厘定[J]. *现代地质*, 2025, 39(4): 964 - 980.
- [15] 张志, 褚平利, 赵凯, 等. 浙东南望州山破火山口中 A-型花岗岩的厘定及地质意义[J]. *地质论评*, 2025, 71(5): 1473 - 1494.
- [16] 潘少军, 张建芳, 陈小友, 等. 浙江嵊泗正长花岗岩的形成时代与成因: 来自锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Hf 同位素的证据[J]. *地学前缘*, 2025, 32(2): 430 - 444.
- [17] 薛琦琪. 福建沿海中生代花岗岩类岩石学与地球化学[D]. 北京: 中国地质大学(北京)出版社, 2018.
- [18] ZHOU X M, SUN T, SHEN W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes Journal of International Geoscience*, 2006, 29(1): 26 - 33.
- [19] 陈淑华, 林慈鉴, 徐维光, 等. 福建白垩纪红层火山岩夹层时代及构造意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(7): 2508 - 2523.
- [20] XU X S, ZHAO K, HE Z Y, et al. Cretaceous volcanic-plutonic magmatism in SE China and a genetic model [J]. *Lithos*, 2021, 402: 105728.
- [21] 李祥辉, 张朝凯, 王尹, 等. 华南晚中生代陆相地层年代及关系研究[J]. *地质学报*, 2018, 92(6): 1107-1130.
- [22] YAN D P, ZHOU M F, SONG H L, et al. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China) [J]. *Tectonophysics*, 2003, 361(3): 239 - 254.
- [23] LI J H, DONG S W, ZHAO G C, et al. An Andean-type retro-arc foreland system beneath northwest South China revealed by SINOPROBE profiling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 490(1): 170 - 179.
- [24] LI S Z, SUO Y H, LI X Y, et al. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate. [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 91 - 137.
- [25] DONG S W, LI J H, ZHANG Y Q, et al. Mantle influx compensates crustal thinning beneath the Cathaysia Block, South China: Evidence from SINOPROBE reflection profiling. [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 544: 116360.
- [26] LI J H, ZHANG Y Q, DONG S W, et al. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 134(1): 98 - 136.
- [27] LI X H, ZHANG C K, LI Y X, et al. Refined chronostratigraphy of the late Mesozoic terrestrial strata in South China and its tectono-stratigraphic evolution (Article) [J]. *Gondwana Research*, 2019, 66: 143 - 167.
- [28] LI J H, CAWOOD P A, YANG H, et al. Building Southeast China in the late Mesozoic: Insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan fault zone. [J].

- Earth-Science Reviews, 2020, 201: 103056.
- [29] 韦德光, 揭育金, 黄廷淦. 福建省区域地质构造特征[J]. 中国区域地质, 1997, 16(2): 162–171.
- [30] 邢光福, 郑剑波, 沈加林, 等. 福建泰宁世界地质公园丹霞红层研究[J]. 地层学杂志, 2013, 37(1): 18–24.
- [31] 福建省地质调查研究院. 中国区域地质志福建志[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 1–976.
- [32] 何文兴, 马金清. 福建沙县地区早白垩世火山岩成因及构造环境分析[J]. 福建地质, 1997, 16(1): 21–31.
- [33] 何文兴, 许美辉. 福建沙县大佑山火山喷发盆地基本特征[J]. 福建地质, 1998, 17(3): 147–152.
- [34] 福建省地质调查研究院. 邵武市幅(G50C001003)1:25万区域地质调查报告[R]. 三明: 福建省三明地质印刷厂, 2004.
- [35] 福建省地质调查研究院. 三明市幅(G50C002003)1:25万区域地质调查报告[R]. 三明: 福建省三明地质印刷厂, 2005.
- [36] CHEN H H, XU J, HU Z C, 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(1): 34–43.
- [37] LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt–Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U–Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1): 537–571.
- [38] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U–Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589–1604.
- [39] HOSKIN P W O, SCHALTEGGER U. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 27–62.
- [40] SUN, S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- [41] GRIMES C B., JOHN B E, Kelemen P B, et al. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance[J]. Geology, 2007, 35(7): 643–646.
- [42] GRUNSKY E, MASSEY N. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation [J]. Computers Geosciences, 1995, 21(3): 439–441.
- [43] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids. [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- [44] WRIGHT J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis [J]. Geological Magazine, 1969, 106(4): 370–384.
- [45] ZHAO L, ZHAI M G, ZHOU X W. Early Precambrian basement components of the Cathaysia Block in South China exhumed by Phanerozoic orogenic events [J]. Precambrian Research, 2023, 398: 107218.
- [46] DODSON M H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1973, 40(3): 259–274.
- [47] CHEN J Y, YANG J H, ZHANG J H, et al. Origin of Cretaceous aluminous and peralkaline A-type granitoids in northeastern Fujian, coastal region of southeastern China (Article) [J]. Lithos, 2019, 340–341: 223–238.
- [48] 高秦, 丁嘉林, 张延青, 等. 95Ma是华南晚中生代岩浆演化转折点吗?——来自浙闽典型花岗岩体的证据[J]. 地质论评, 2022, 68(5): 1760–1771.
- [49] ZHANG F, GUO F, ZHANG X B, et al. Magmatic degassing and fluid metasomatism promote compositional variation from I-type to peralkaline A-type granite in the late Cretaceous Fuzhou felsic complex, SE China [J]. American Mineralogist, 2024, 109(7): 1228–1247.
- [50] XIAO E, QIU J S, XU X S, et al. Geochronology and geochemistry of the Yaokeng alkaline granitic pluton in Zhejiang province: Petrogenetic and tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1431–1440.
- [51] YANG L Q, GAO X, SHU Q H, et al. Multiple Mesozoic porphyry–skarn Cu (Mo–W) systems in Yidun Terrane, east Tethys: Constraints from zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology (Article) [J]. Ore Geology Reviews, 2017, 90: 813–826.
- [52] DENG J, WANG C M, BAGAS L, et al. Crustal architecture and metallogensis in the south-eastern North China Craton [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 182(1): 251–272.
- [53] CHAPPELL B W, WHITE A J R. Two contrasting granite types: 25 years later [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2001, 48(4): 489–499.
- [54] LOISELLE M C, WONES D R. Characteristics and origin of anorogenic granites. [J]. Geological Society of America, Abstracts with Programs, 1979, 11: 468.
- [55] CHAPPELL B W. Aluminum saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. Lithos, 1999, 46(3): 535–551.
- [56] 舒徐洁, 陈志洪, 朱延辉, 等. 赣南兴国东固高分异花岗岩成因及地质意义[J]. 地质论评, 2018, 64(1): 108–126.
- [57] WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W, et al. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407–419.
- [58] XIE Z P, XUE X D, XIANG K, et al. Petrogenesis and geodynamic implications of Early Cretaceous highly fractionated leucogranites in the northern Lanping–Simao terrane, Eastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 197: 104340.
- [59] BOEHNKE P, WASTEN E B, TRAIL D, et al. Zircon saturation re-revisited [J]. Chemical Geology, 2013, 351: 324–334.
- [60] PATIO D A E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids [J]. Geology, 1997, 25(8): 743–746.
- [61] COLLINS W J, BEAMS S D, WHITE A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeast-

- ern Australia [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2): 189 – 200.
- [62] CREASER R A, PRICE R C, WORMALD R J, et al. A-type granites revisited: assessment of a residual-source model. Comments. [J]. Geology, 1991, 19(2): 163 – 166.
- [63] WU F Y, SUN D Y, LI H M, et al. A-type granites in north-eastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. Chemical Geology, 2002, 187(1): 143 – 173.
- [64] 邱检生, 王德滋. 浙闽沿海地区 I 型—A 型复合花岗岩体的地球化学及成因 [J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 237 – 246.
- [65] MINGRAM B, TRUMBULL R B. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components [J]. Lithos, 2000, 54(1): 1 – 22.
- [66] YANG J H, WU F Y, CHUNG S L, et al. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic evidence [J]. Lithos, 2006, 89(1–2): 89 – 106.
- [67] KONOPELKO D, BISKE G, SELTMANN R, et al. Hercynian post-collisional A-type granites of the Kokshaal Range, southern Tien Shan, Kyrgyzstan. [J]. Lithos, 2007, 97(1): 140 – 160.
- [68] TURNER S P, FODEN J D, MORRISON R S. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia [J]. Lithos, 1992, 28(2): 151 – 179.
- [69] BEYTH M, STERN R J, ALTHERR R, et al. The Late Precambrian Timna igneous complex, Southern Israel: Evidence for comagmatic-type sanukitoid monzodiorite and alkali granite magma [J]. Lithos, 1994, 31(3): 103 – 124.
- [70] HAN B I, WANG S G, JAHN B M, et al. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd–Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth [J]. Chemical Geology, 1997, 138(3): 135 – 160.
- [71] MUSHKIN A, NAYON O, HALICZ L, et al. The Petrogenesis of A-type Magmas from the Amram Massif, Southern Israel [J]. Journal of Petrology, 2003, 44(5): 815 – 832.
- [72] 肖庆辉, 刘勇, 李廷栋, 等. 中国东部陆缘中、新生代洋板块深地质作用追踪 [J]. 地学前缘, 2025, 32(6): 9 – 28.
- [73] SYLVESTER P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. Lithos, 1998, 45(1): 29 – 44.
- [74] VERVOORT J D, PATCHETT P J. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(19): 3717 – 3733.
- [75] YU J H, O'REILLY S Y, WANG L J, et al. Components and episodic growth of Precambrian crust in the Cathaysia Block, South China: Evidence from U–Pb ages and Hf isotopes of zircons in Neoproterozoic sediments [J]. Precambrian Research, 2010, 181(1): 97 – 114.
- [76] EL BOUSEILY A M, EL SOKKARY A A. The relation between Rb, Ba and Sr in granitic rocks [J]. Chemical Geology, 1975, 16(3): 207 – 219.
- [77] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G, et al. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956 – 983.
- [78] PIRAJNO F. Potassic Igneous Rocks and Associated Gold–Copper Mineralization. [J]. Ore Geology Reviews, 2019, 110: 102920.
- [79] WEAVER B L, WOOD D A, TARNEY J, et al. Geochemistry of ocean island basalts from the South Atlantic: Ascension, Bouvet, St. Helena, Gough and Tristan da Cunha [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1987, 30(1): 253 – 267.
- [80] LEAT P T, THOMPSON R N, MORRISON M A, et al. Silicic magmas derived by fractional crystallization from Miocene minette, Elkhead Mountains, Colorado. [J]. Mineral. Mag. 1988, 52(368): 577 – 585.
- [81] WYBORN D. The tectonic significance of Ordovician magmatism in the eastern Lachlan Fold Belt [J]. Tectonophysics, 1992, 214(1): 177 – 192.
- [82] 李献华. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征 [J]. 科学通报, 1999, 44(18): 1992 – 1998.
- [83] ALTHERR R, HOLL A, HEGNER E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. Lithos, 2000, 50(1): 51 – 73.
- [84] 舒良树, 周新民, 邓平, 等. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化 [J]. 地质通报, 2004, 23(9–10): 876 – 884.
- [85] 姜耀辉, 王国昌. 中国东南部晚中生代花岗岩成因与深部动力学机制——古太平洋板块反复俯冲–后退模式 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(6): 1073 – 1081, 1070 – 1071.
- [86] 夏炎, 刘磊, 徐夕生. 中国东南部晚中生代 A 型花岗岩类与古太平洋板块俯冲–后撤 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(6): 1109 – 1119, 1070 – 1071.
- [87] BATCHELOR R A, BOWDEN P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. Chemical Geology, 1985, 48(1): 43 – 55.
- [88] GRIFFIN W L, PEARSON N J, BELOUSOVA E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM–MC–ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta: Journal of the Geochemical Society and the Meteoritical Society, 2000, 64(1): 133 – 147.
- [89] ZHOU X M, SUN T, SHEN W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution [J]. Episodes Journal of International Geoscience, 2006, 29(1): 26 – 33.
- [90] LI Z X, LI X H. Formation of the 1300–km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model [J]. Geology, 2007, 35(2): 179 – 182.
- [91] 胡瑞忠, 高伟, 付山岭, 等. 华南中生代陆内成矿作用 [J]. 地学前缘, 2024, 31(1): 226 – 238.