

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.121>



大别山南缘翁门杂岩中太古代 TTG 和钾质花岗岩成因：对扬子陆块早期演化的约束

徐大良^{1,2}, 彭练红¹, 邓新^{1,2}, 童喜润^{1,2}, 徐扬^{1,2}, 金鑫鏢^{1,2}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北武汉 430205

2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北武汉 430205

摘要: 太古宙晚期(3.0~2.5 Ga)是全球大陆地壳性质发生显著变化、地球动力学过程发生根本性转变的关键时期。大别山造山带太古宙岩石出露稀少,在大别山南缘新发现的翁门杂岩为进一步揭示扬子陆块古老陆壳形成演化过程提供了新的制约信息。对翁门 TTG 质片麻岩和钾质花岗岩脉进行了锆石 U-Pb 定年、锆石 Hf 同位素和全岩主微量元素分析,揭示了其岩石成因,探讨了扬子陆块太古宙陆壳演化过程。锆石 U-Pb 定年结果显示,TTG 片麻岩和钾质花岗岩脉均形成于中太古代(2 927~2 917 Ma)。TTG 片麻岩可细分为低重稀土型和高重稀土型两类。与典型太古宙 TTG 相比,低重稀土型 TTG 具有中等的 SiO₂ 和 Na₂O 含量,其 Mg[#]、Ni、Cr 含量和 Sr/Y 比值偏低,显示出低压 TTG 特征;而高重稀土型 TTG 则具有更加偏低的 Mg[#]、Ni、Cr 含量和非常低的 Sr/Y 比值,应属于过渡型 TTG。钾质花岗岩脉则表现为高 SiO₂、富 K₂O 和富铁的特征,呈现出左倾“V 型”海鸥式稀土配分模式,为高分异花岗岩,其岩浆氧逸度和水含量与现代岛弧岩浆相似。锆石 Hf 同位素分析表明,TTG 片麻岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -3.7~+1.5,两阶段模式年龄为 3.56~3.23 Ga;而钾质花岗岩脉的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -4.3~+0.2,两阶段模式年龄为 3.58~3.31 Ga。大别山南缘翁门杂岩中 TTG 和富钾花岗岩的同时出现,标志着扬子陆块北缘在中太古代时期板块构造的发育、古老大陆地壳的逐步成熟和初始克拉通化。

关键词: 扬子陆块;大别山造山带;太古宙;TTG;钾质花岗岩;岩浆氧逸度;地质年代学。

中图分类号: P547;P597

文章编号: 1000-2383(2025)07-2628-15

收稿日期: 2024-09-06

Petrogenesis of Mesoarchean TTG and Potassic Granite Suit in Wengmen Complex, Southern Dabie Orogen: Implications for Early Crustal Evolution of Yangtze Block

Xu Daliang^{1,2}, Peng Lianhong¹, Deng Xin^{1,2}, Tong Xirun^{1,2}, Xu Yang^{1,2}, Jin Xinbiao^{1,2}

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, China

2. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

Abstract: The late Archean (3.0–2.5 Ga) is a pivotal period when the composition of the continental crust and the tectonics style significantly changed. Abundant Mesoarchean granitoids, including TTG gneisses and potassic granitoids, occur in the Wengmen

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (Nos. DD20242643, DD20190050); 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心开放基金课题 (No. PMGR202014)。

作者简介: 徐大良(1983—),男,正高级工程师,主要从事基础地质调查与研究。ORCID: 0000-0002-0540-2426。E-mail: xdl2003geo@163.com

引用格式: 徐大良,彭练红,邓新,童喜润,徐扬,金鑫鏢,2025.大别山南缘翁门杂岩中太古代 TTG 和钾质花岗岩成因:对扬子陆块早期演化的约束.地球科学,50(7):2628–2642.

Citation: Xu Daliang, Peng Lianhong, Deng Xin, Tong Xirun, Xu Yang, Jin Xinbiao, 2025. Petrogenesis of Mesoarchean TTG and Potassic Granite Suit in Wengmen Complex, Southern Dabie Orogen: Implications for Early Crustal Evolution of Yangtze Block. *Earth Science*, 50(7): 2628–2642.

complex within the southern Dabie Orogen, part of the North Yangtze Block. Here, it presents major and trace elements, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes of these granitoids, which were integrated to determine their petrogenesis and constrain the crustal evolution of the Yangtze Block. The TTG gneisses and potassium granite veins have similar emplacement ages from 2 927 Ma to 2 917 Ma. The TTG gneisses can be divided into two types: low-HREE type and high-HREE type. Compared with the typical Archean TTGs, the low-HREE TTGs have moderate SiO_2 and Na_2O content, lower $\text{Mg}^\#$, Ni, Cr contents and Sr/Y ratio, showing the characteristics of low pressure TTGs. The high-HREE TTGs have lower $\text{Mg}^\#$, Ni, Cr contents and a very low Sr/Y ratio, which should belong to the transitional TTGs. The potassic granite veins are characterized by high SiO_2 , K_2O , high $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (0.81–1.09) and iron-rich, exhibiting a left-leaning “V-type” seagull-type rare earth distribution pattern, indicative of highly differentiated granites. Their magmatic oxygen fugacity and water content resemble those of modern arc magmas. Zircons from the TTG gneisses gave $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -3.7 – $+1.5$ and Hf crustal model ages (T_{DM}^{C}) of 3.56–3.23 Ga, whereas those from the potassic granites show $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -4.3 – $+0.2$ and T_{DM}^{C} ages of 3.58–3.31 Ga. The coeval occurrence of TTGs and K-rich granitoids of the Wengmen complex within the southern Dabie Orogen marks the development of plate tectonics, the maturation of the continental crust and initial cratonization of the North Yangtze Block during the Mesoarchean.

Key words: Yangtze Block; Dabie Orogen; Archean; TTG; potassic granite; magmatic oxygen fugacity; geochronology.

0 引言

太古宙是地球早期陆壳形成和演化的重要阶段,70%以上的长英质大陆地壳形成于太古宙末期之前,这些长英质大陆的存在是地球区别于太阳系其他固体星球的重要标志(Garçon, 2021; 翟明国等, 2023; 赵国春等, 2023). 太古宙大陆地壳主要由英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩为主的TTG正片麻岩和超基性-基性-酸性火山岩及少量沉积岩变质的表壳岩(绿岩)组成. 其中,TTG岩套代表了大陆最古老的原始长英质陆壳成分,它的出现标志着早期地球从以镁铁质为主的地壳向更长英质的地壳过渡(Moyen and Martin, 2012; Smithies *et al.*, 2021). 值得注意的是,典型的早期太古宙TTG岩石在成分上因富钠、显著的重稀土(HREE)亏损而与相对钾质、HREE亏损较少的现今长英质上地壳明显不同(Moyen, 2011; Moyen and Martin, 2012; Laurent *et al.*, 2014). 因此,以TTG片麻岩为主的原始陆壳如何以及何时转变为具明显成分分层的现代类型成熟陆壳,对于深入理解大陆地壳的形成和演化至关重要.

大量研究表明,太古宙晚期(3.0~2.5 Ga)是全球大陆地壳发生重大变化的关键时期(Moyen and Martin, 2012; Laurent *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2022; 郑永飞, 2024). 该时期,太古宙克拉通的陆地面积增加、新生陆壳增厚、地壳再造速率增强,相应的地壳净生长速率降低(Dhuime *et al.*, 2012),这些变化暗示了全球地球动力学体制在太古宙晚期发生了根本性的转变. 同期,太古宙克拉通上地壳也

发生重要改造,表现为早期TTG岩石向晚期富钾花岗岩类(如赞岐岩、高钾花岗岩、碱性花岗岩和正长岩等)的重大转变(Laurent *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2022). 这种与现今陆壳类似的太古宙富钾花岗岩类是先存陆壳再造的产物,其形成是板块构造作用的产物,通常被认为与太古宙微陆块的拼合有关,并最终造就了太古宙克拉通的成熟与稳定(Laurent *et al.*, 2014; Zhai and Peng, 2020).

与全球其他古老克拉通相比,因后期构造强烈改造和巨厚沉积物覆盖,扬子陆块太古宙基底岩石零散分布且出露规模较小(Guo *et al.*, 2015; Qiu *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2020; 邱啸飞等, 2024),制约了对其早期陆壳形成、稳定和演化的深入理解. 通过大比例尺专题地质填图,笔者曾在扬子陆块北缘的大别山地区识别出具较大出露规模的早前寒武纪陆壳基底岩石,命名为翁门杂岩,并获得了较为丰富的中太古代-古元古代岩浆热事件年龄信息,为深入揭示扬子陆块早期陆壳的形成与演化提供了新的窗口(徐大良等, 2023a). 在此基础上,通过露头尺度精细解析和锆石U-Pb测年,进一步识别出系列多样性的中太古代花岗质岩石,为研究扬子陆块太古宙陆壳成分转变提供了良好素材. 本文旨在通过对翁门杂岩同一露头中的TTG片麻岩和钾质花岗岩脉进行岩石学、地球化学、锆石U-Pb年代学和原位Hf同位素研究,初步解析其岩石成因、源区性质及动力学机制,为进一步探讨大别山乃至扬子陆块太古宙地壳的形成和演化提供依据.

1 地质背景及样品特征

大别山是印支期华南陆块和华北陆块之间的陆陆碰撞造山带,以发育典型的超高压变质带而闻名于世.自北向南,大别山出露的构造-岩石单元依次为:北淮阳浅变质岩带、北大别高温超高压变质杂岩带、中大别中温超高压变质岩带、南大别低温榴辉岩带和宿松变质杂岩带(徐树桐等, 2002; Zheng *et al.*, 2005; Hou *et al.*, 2024),各构造单元间均以断层或韧性剪切带分割(图 1a).大别山南缘(即前人所称的宿松变质杂岩带)分布于北侧超高压变质岩带和南侧扬子陆块北缘前陆褶冲带之间,属于造山带俯冲板块的后缘部分(徐树桐等, 2002; 徐大良等, 2023a).该带内出露的岩石组合较为复杂,最古老的构造岩石组合为大别杂岩(曾被称为大别(岩)群或大别山(岩)群),主要由变质表壳岩组合、变质(超)镁铁质岩组合和片麻岩组合等组成,其物质组合划分方案和形成时代尚存在争论;中新元古代的宿松杂岩以发育一套含磷片岩系为特色,实际上亦为一套由变质磷块岩、大理岩、片岩、花岗质片麻岩和变质基性-超基性岩等组成的变质杂岩.大别山南缘经历了复杂多期的变质变形作用,变质作用主体表现为绿帘角闪岩相(石永红等, 2012),带内片理和片麻理总体倾向北东或南西,韧性剪切变形较为发育.

翁门杂岩位于大别山南缘的中部蕲春地区,是近年来通过大比例尺专题填图识别并确立的一套具较大出露规模的早前寒武纪基底杂岩(图 1b; 徐大良等, 2023a).翁门杂岩的物质组成主要包括变花岗质岩、变镁铁质岩和变质表壳岩等,这些岩石单元间的物质成分及岩性横向变化较大,剖面结构上表现为强变形带与弱变形块体的拼贴和叠置特征,并遭受了强烈的后期构造叠加和改造.变花岗质岩的岩石类型多样,包括奥长花岗质片麻岩、英云闪长质片麻岩、花岗闪长质片麻岩、二长花岗质片麻岩、钾长花岗质片麻岩和眼球状花岗质片麻岩等,其形成时代跨度大,已测定的岩石形成年龄主要有中太古代(2.91~2.87 Ga)、新太古代(2.67~2.64 Ga)、古元古代早期(2.45 Ga)和古元古代中期(2.01 Ga),部分太古宙岩石中亦记录了古元古代(2.0 Ga)变质事件,证实了大别山南缘存在太古宙-古元古代早期陆壳基底(徐大良等, 2023a).尽管捕获/继承锆石年龄指示该地区可能存在更古老

(3.5~3.0 Ga)的大陆地壳岩石,但迄今为止,在区内并未发现确切的>3.0 Ga 的岩石记录.

本次研究的样品采自 S205 省道大田湾一带的公路旁采场(图 1c).因人工开挖,在露头中保存了两个相向的近东西向截切面,两侧岩石较好对应,反映其延伸相对稳定.基于露头尺度解析,识别出英云闪长质片麻岩、花岗闪长质片麻岩和钾质花岗岩脉,后期新元古代变基性岩脉的侵入破坏了岩体的整体性(图 2a~2c).英云闪长质片麻岩出露于南侧露头的下部,岩石中局部可见浅色条带发育肠状褶皱或受构造应力变形而成石香肠构造(图 2a).岩石新鲜面呈灰色至深灰色,主要由斜长石(55%~60%)、石英(25%~30%)和黑云母(5%~10%)组成,副矿物包括锆石、磷灰石和少量暗色矿物(图 2d);其中,石英呈它形粒状,具波状消光现象;斜长石表面强烈绢云母化,颗粒长轴趋于定向;黑云母呈细小鳞片状定向分布.花岗闪长质片麻岩较广泛出露,因堆积物覆盖,未见到其与英云闪长质片麻岩间明显的接触关系(图 2a),岩石片麻状构造较发育,主体片麻理产状为 $170^{\circ}\angle 17^{\circ}$ (图 2c).该组岩石的主要矿物组成为斜长石(45%~55%)、石英(15%~25%)、钾长石(10%~15%)和黑云母(5%~10%),副矿物由锆石、磷灰石等组成(图 2e).钾质花岗岩脉侵入到英云闪长质片麻岩(图 2c, 南侧露头)和花岗闪长质片麻岩(北侧露头)中,岩性为黑云母二长花岗岩,岩石呈浅肉红色,主要矿物包括斜长石(25%~35%)、钾长石(35%~45%)、石英(15%~20%)和黑云母(2%~5%),副矿物主要由锆石、磷灰石、磁铁矿等组成(图 2f).

2 分析方法

本文涉及的岩石光薄片和单矿物锆石分选均在廊坊宇能矿岩技术服务有限公司完成;锆石制靶、透反光及阴极发光照相均在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成;锆石 U-Pb 定年和原位 Lu-Hf 同位素分析,以及全岩粉末制备和主微量元素分析均在自然资源部中南矿产资源监督检测中心完成.

锆石分选采用常规方法对新鲜样品进行粉碎,并使用重选和磁选技术进行初步分选,然后在双目镜中挑选出透明度好且没有明显包体和裂隙的自形锆石颗粒.将锆石粘在环氧树脂上制靶、打磨抛光,然后拍摄透射光、反射光和阴极发光图像(CL).

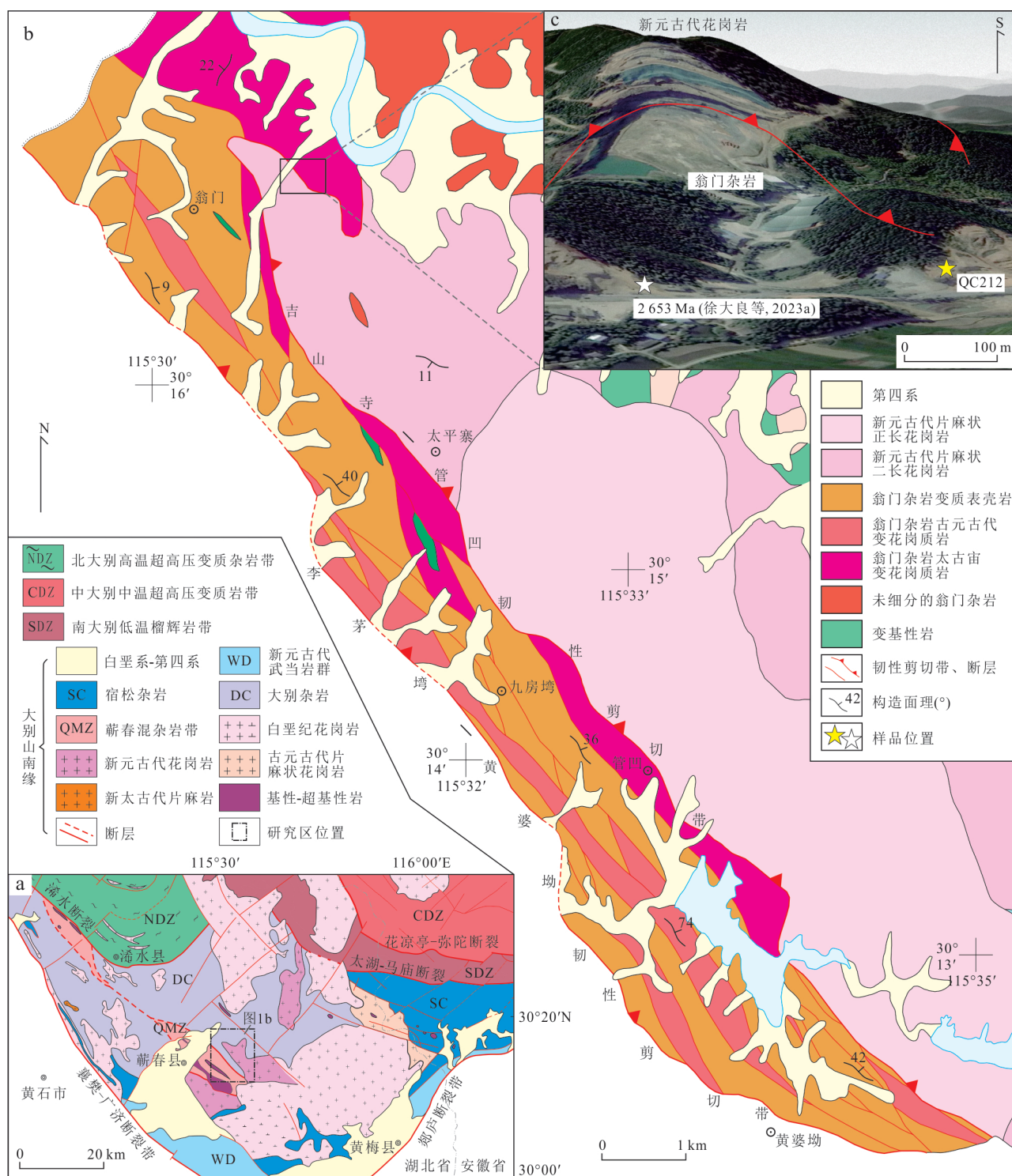


图 1 大别山南缘翁门杂岩地质简图(据徐大良等, 2023a 修改)

Fig.1 Geological map of the Wengmen complex within the southern Dabie Orogen (modified after Xu *et al.*, 2023a)

锆石 U-Pb 定年和微量元素含量分析仪器为 RESOLUTION LR/S155 193nm ARF 准分子激光剥蚀系统和 iCAP-Q 型电感耦合等离子体质谱的联用装置 (LA-ICP-MS). 实验中采用氦气作为剥蚀物质载气, 激光束斑直径为 29 μm . 采用国际锆石标准

91500 作为外部标准进行同位素分馏校正, 同时将 NIST 610 作为元素含量测定标准. 样品中锆石的 U-Pb 年龄组成和元素含量采用 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008) 进行数据处理分析, 锆石 U-Pb 年龄图件绘制及加权平均值计算均采用 IsoplotR 软件

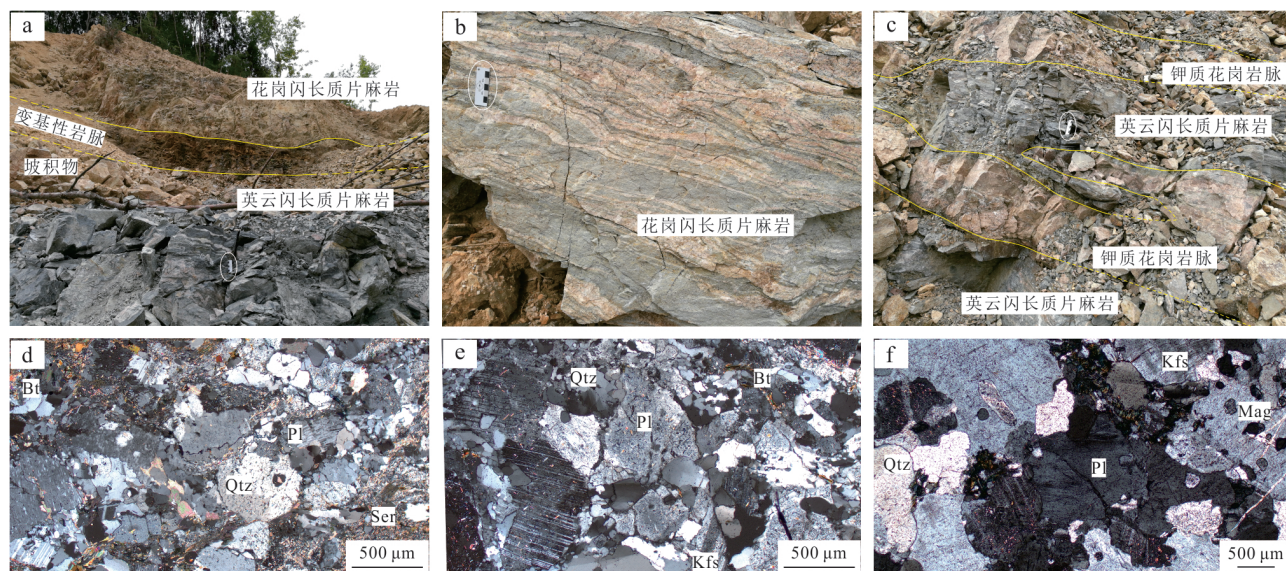


图2 翁门杂岩中太古代花岗质岩的野外和镜下特征

Fig.2 Field and microscopic photos of the Mesoarchean meta-granitic rocks from the Wengmen complex

a. 变基性岩脉侵入翁门杂岩花岗质片麻岩中; b. 花岗闪长质片麻岩; c. 钾质花岗岩呈脉状侵入英云闪长质片麻岩; d. 英云闪长质片麻岩, 矿物多呈断续条带状定向排列, 斜长石表面绢云母化明显; e. 花岗闪长质片麻岩; f. 钾质花岗岩 (黑云母二长花岗岩). 镜下照片均为正交偏光. 矿物缩写: Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Qtz. 石英; Bt. 黑云母; Ser. 绢云母; Mag. 磁铁矿

完成. 数据分析时, 将谐和度在 $>90\%$ 的年龄数据视为有效数据, 由于所有定年锆石年龄都大于 1.5 Ga, 均采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值.

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析所用仪器为 RESOLUTION LR 193 nm 激光剥蚀系统和 Neptune plus 多接收电感耦合等离子体质谱的联用装置 (LA-ICP-MS). 分析点选在锆石 U-Pb 年龄测试点上或附近. 激光束斑直径为 $43\text{ }\mu\text{m}$, 激光剥蚀时间 60 s, 激光频率 6~8 Hz, 激光能量密度为 $5\text{ J}/\text{cm}^2$. 分析过程中采用锆石标准物质 91500、PLE 作为监控样, ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的干扰采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.026\ 56$ 进行校正. ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的干扰采用实测无干扰 ^{173}Yb 进行校正, 同时设定 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}$ 比值为 0.786 96 来进行计算. 计算初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 采用 ^{176}Lu 的衰变常数为 $1.865\times 10^{-11}\text{ a}^{-1}$, 球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 0.033 2 和 0.282 772, 现今亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.283 25, 两阶段模式年龄 ($T_{\text{DM}2}(\text{Hf})$) 假定平均大陆地壳的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.015.

全岩分析需首先将样品无污染粉碎至 200 目干燥备用. 主量元素采用 X 荧光光谱法 (XRF) 测定, 仪器为 Panalytical 公司生产的 AXIOS 型 X 射线荧光光谱仪, 精度优于 5%, FeO 含量采用滴定法单独测量. 微量元素分析仪器为 Thermofisher 公司生产的电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS),

数据质量通过国家标准物质监测, 多数元素分析精度优于 5%, 部分过渡族元素精度优于 10%.

3 分析结果

3.1 全岩主微量元素

样品的主、微量元素分析结果见附表 S3. TTG 片麻岩具有富 SiO_2 (68.45%~75.19%)、高 Na_2O (3.51%~4.45%) 的特点. 在 TAS 图解中, 样品点主要落在花岗岩范围内 (图 3a). 在标准化 An-Ab-Or 图解中, 样品点落在奥长花岗岩-花岗闪长岩区域内 (图 3b), 显示富钠的趋势. 在 SiO_2 - K_2O 图解中, 样品全部落在中钾钙碱性岩石系列区域内 (图 3c). 样品的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.44~0.68, 部分样品钾含量偏高, 不属于典型的太古宙 TTG ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}<0.5$). 岩石的铝饱和指数 A/CNK 在 0.95~1.13 之间, 属富钠弱过铝质系列岩石 (图 3d). 样品具有中等的铁镁指数 ($F/(F+M)$), 图 3e 和 MgO 含量 (图 3f), 其 $\text{Mg}^\#$ 值 (32.5~41.4) 低于典型太古宙 TTG 的平均值 (43; Martin *et al.*, 2005). 钾质花岗岩则表现为高 SiO_2 (74.99%~75.88%)、富 K_2O (3.85%~4.48%) 和高 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (0.81~1.09) 的特征. 在 TAS 分类图和 An-Ab-Or 分类图上均落在花岗岩范围内 (图 3a, 3b), 属于高钾钙碱性系列 (图 3c). 铝饱和指数 A/CNK 相对集中 (1.02~1.04), 表现为富钾过铝质

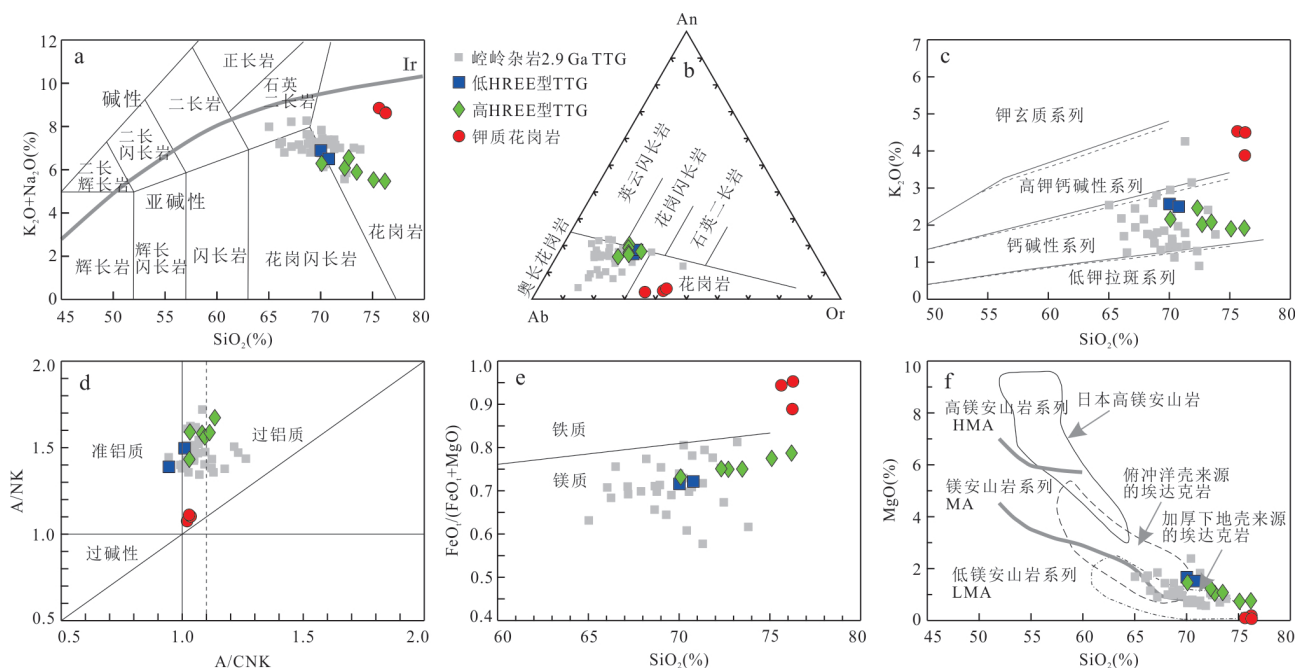


图 3 翁门杂岩中太古代花岗质岩的岩石类型地球化学判别图

Fig.3 Geochemical discrimination diagrams for the Mesoarchean granites in the Wengmen complex

底图据文献 Middlemost, 1994; Frost *et al.*, 2001; Martin *et al.*, 2005; Frost and Frost, 2008. 崆岭杂岩数据引自 Guo *et al.*, 2015; Qiu *et al.*, 2018. 图 4、图 8 数据来源同此图

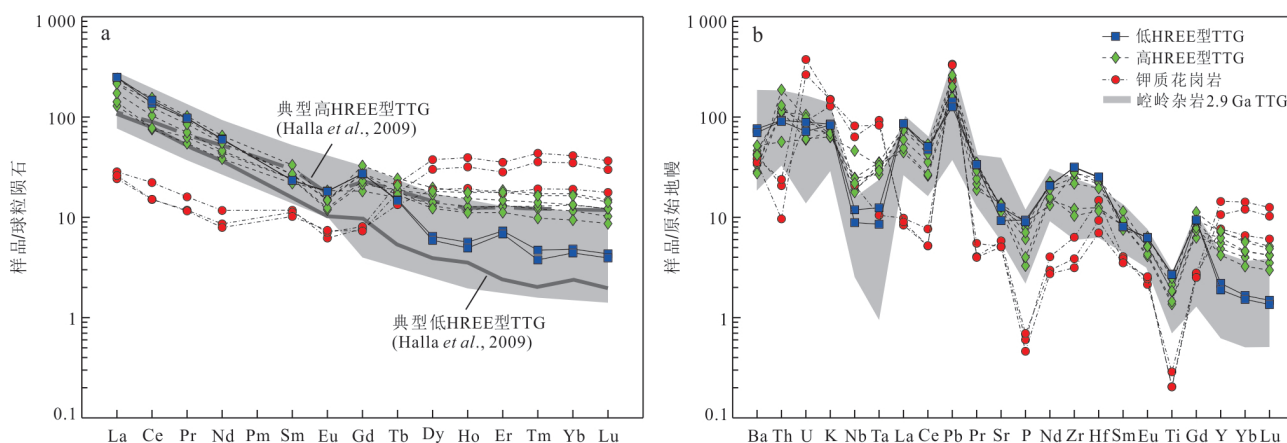


图 4 翁门杂岩中太古代花岗质岩的球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.4 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (b) for Mesoarchean granites in the Wengmen complex (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

花岗岩特征(图 3d). 与 TTG 片麻岩相比, 这些岩石具有明显偏低的 TiO_2 (0.04%~0.06%)、 CaO (0.36%~0.52%) 和 P_2O_5 (0.01%~0.02%) 含量, 较高的铁镁指数使其落在铁质花岗岩范围内(图 3e), 而 MgO (0.07%~0.19%) 和 $\text{Mg}^\#$ 值 (8.1~18.2) 普遍低于加厚下地壳来源的埃达克岩(图 3f).

TTG 片麻岩具较低的 REE 总量 ($143 \times 10^{-6} \sim 249 \times 10^{-6}$), 且在球粒陨石标准化的稀土元素图解

上表现为轻稀土强烈富集的配分型式. 根据微量元素和稀土元素的特征, 明显可将其分成两组(附表 S3、图 4). 第一组为英云闪长质片麻岩, 具陡倾的右倾曲线, 且重稀土显著亏损, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 较高 (51.5~56.5), 较弱的 Eu 负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.71 \sim 0.73$), 形态上类似于经典低 HREE 型 TTG (图 4a; Halla *et al.*, 2009). 该组样品富集 K、Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素, 在原始地幔标准化图解上表现为 Nb、Ta、

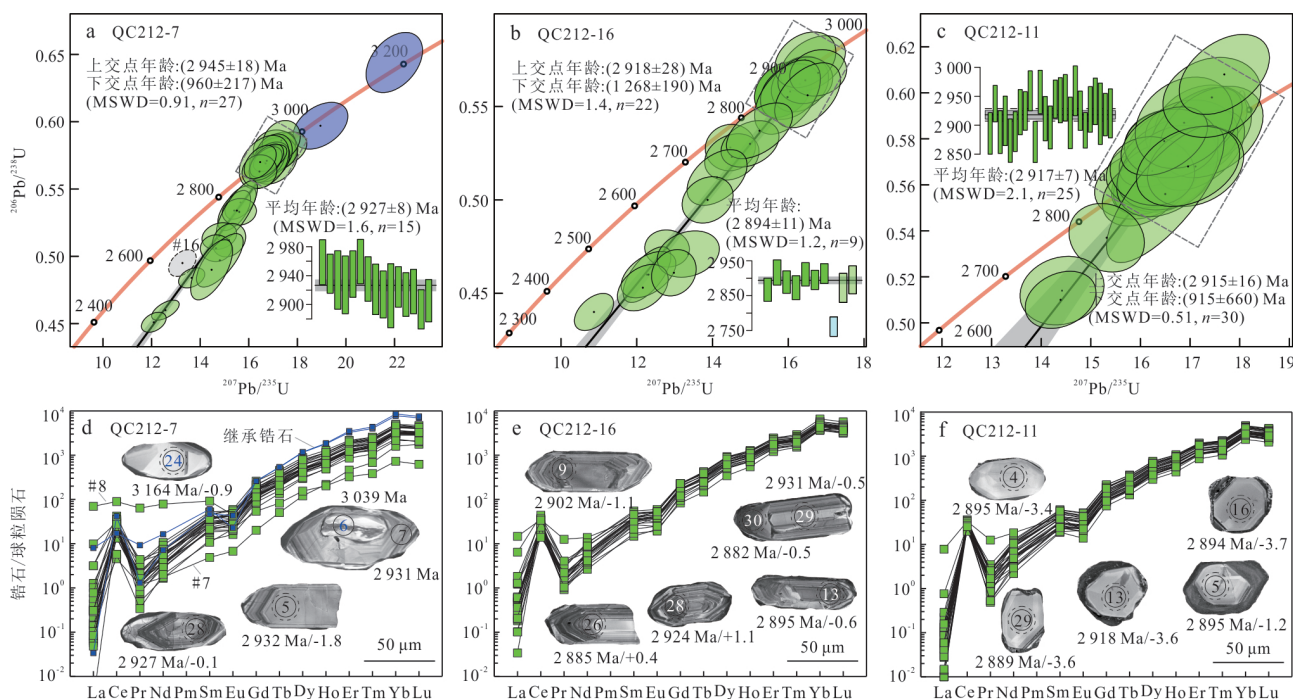


图5 翁门杂岩变花岗质岩锆石 CL、U-Pb 年龄和稀土元素球粒陨石标准化曲线

Fig.5 Cathodoluminescence (CL) images, U-Pb ages and chondrite-normalized REE patterns for zircons of the meta-granitic rocks from the Wengmen complex

锆石 CL 旁所标数字为 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

Ti、P 等明显的负异常 (图 4b), 其 Ni ($13.2 \times 10^{-6} \sim 14.5 \times 10^{-6}$)、Cr ($27.4 \times 10^{-6} \sim 36.8 \times 10^{-6}$) 含量低, 低 Sr ($196 \times 10^{-6} \sim 266 \times 10^{-6}$) 和 Sr/Y 比值 ($19.6 \sim 30.9$), 较典型太古宙 TTG 偏低. 第二组为花岗闪长质片麻岩, 具相对较为平缓的右倾曲线, 重稀土含量较高, 轻重稀土分异较弱 ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 9.8 \sim 18.9$), 明显的 Eu 负异常 ($0.45 \sim 0.92$), 与经典高 HREE 型 TTG 曲线基本一致 (图 4a; Halla *et al.*, 2009). 在原始地幔标准化图解上亦表现为富集 K、Ba、Th 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素的特征 (图 4b), 其具更加偏低的 Ni ($5.08 \times 10^{-6} \sim 13.7 \times 10^{-6}$)、Cr ($12 \times 10^{-6} \sim 32.5 \times 10^{-6}$) 含量, 较高的 Y ($241 \times 10^{-6} \sim 290 \times 10^{-6}$) 含量和非常低的 Sr/Y 比值 ($8.5 \sim 14.1$), 显著不同于典型太古宙 TTG.

钾质花岗岩具非常低的 REE 总量 ($79 \times 10^{-6} \sim 117 \times 10^{-6}$) (附表 S3、图 4). 在球粒陨石标准化配分图中, 轻稀土元素相对亏损 ($\Sigma\text{LREE} = 22.2 \times 10^{-6} \sim 29.5 \times 10^{-6}$), 重稀土元素相对富集 ($\Sigma\text{HREE} = 49.9 \times 10^{-6} \sim 94.7 \times 10^{-6}$), $\text{LREE}/\text{HREE} = 0.2 \sim 0.6$, 呈现出左倾“V 型”海鸥式配分模式, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.6 \sim 1.5$, Eu 负异常较为明显 ($0.64 \sim 0.85$) (图

4a). 在原始地幔标准化微量元素蛛网图解中, 样品不同程度富集大离子亲石元素 Ba、U 和 K, 亏损高场强元素 Ta、Ti 和 P (图 4b).

3.2 锆石 U-Pb 年龄

英云闪长质片麻岩样品 QC212-7 中锆石多呈柱状, 少量呈椭球状, 长短轴之比在 $1:1 \sim 5:1$ 之间. 锆石阴极发光图像显示, 几乎所有锆石都具有岩浆锆石特征的振荡生长环带, 其边部因受后期构造热事件影响而多发育窄的暗边, 少数锆石发育清晰的核边结构 (图 5d). 对样品 QC212-7 中 34 粒锆石进行了 35 个测点 U-Pb 同位素定年与原位微量元素分析, 共获得 30 组有效数据 (附表 S1、图 5a). 结果显示, 锆石 U、Th 含量分别为 $35 \times 10^{-6} \sim 507 \times 10^{-6}$ 和 $14 \times 10^{-6} \sim 249 \times 10^{-6}$, Th/U 比值在 $0.04 \sim 1.08$ 之间, 普遍大于 0.3, 稀土元素配分模式图中轻、重稀土元素分异明显, 普遍存在明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常, 显示岩浆锆石的特征 (图 5d). 在锆石 U-Pb 年龄谐和图中, 有 2 个测点具有较老的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄, 分别为 $(3164 \pm 34) \text{ Ma}$ 和 $(3039 \pm 37) \text{ Ma}$, 其 Th/U 比值为 $0.43 \sim 0.92$, 均落在锆石谐和线上或附近 (图 5a), 其中一粒锆石保留了继承锆石的内核 (#6, 图 5d 插图), 反映了源

区继承锆石年龄或捕获的围岩锆石年龄.其余锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于2 964~2 769 Ma之间,可拟合成不一致线,它与谐和线的上交点年龄为(2 945±18)Ma(MSWD=0.91);落在谐和线上15个测点的谐和年龄为(2 926±8)Ma(MSWD=0.93),其加权平均值为(2 927±8)Ma(MSWD=1.6)(图5a).三者误差范围内一致,共同约束该样品的岩浆结晶年龄为(2 927±8)Ma.

花岗闪长质片麻岩样品QC212-16锆石特征与前述英云闪长质片麻岩样品QC212-7相似,只是样品QC212-16少量锆石的边部偶见发育宽窄不等的溶蚀构造,少量未分析锆石因蜕晶化而成斑杂状(图5e插图).该样品的30个测点中,有7个测点亦具有明显较高的Th、U含量,其锆石U-Pb年龄的不谐和度显著超过10%(附表S1、图5b),明显遭受后期构造热事件的改造,不参与年龄计算和讨论.剩余锆石U、Th含量分别为 $255\times 10^{-6}\sim 562\times 10^{-6}$ 和 $101\times 10^{-6}\sim 279\times 10^{-6}$,Th/U比值在0.26~0.55之间,稀土元素配分模式图中的轻、重稀土元素分异明显,存在明显的Ce正异常和弱的Eu负异常,显示为岩浆锆石的特征(图5e).在锆石U-Pb年龄谐和图上,锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围为2 931~2 631 Ma,在谐和图中沿着不一致线分布(图5b),它与谐和线的上交点年龄为(2 918±28)Ma(MSWD=1.4),9个高谐和度的测点(测点#21因年龄明显偏年轻而删除)的谐和年龄为(2 893±11)Ma(MSWD=1.2),其加权平均值为(2 894±11)Ma(MSWD=1.2).三者误差范围内一致,由于花岗闪长质片麻岩被钾质花岗岩脉侵入,因此本文取上交点年龄(2 918±28)Ma代表该套岩石的岩浆结晶年龄.此外,测点#30位于具核边结构锆石的边部,阴极发光图像中显示无分带特征(图5e插图),具有较低的Th/U比值(0.07),获得其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄为(2 882±33)Ma(谐和度85%),应为稍晚期改造事件的年龄记录,其时代与区内捕获/继承锆石中峰值年龄为2.87 Ga变质事件(徐大良等,2023b)相一致,地质意义尚不明确.

钾质花岗岩脉样品QC212-11锆石呈短柱状或椭球状,长短轴之比一般为1:1~2:1,在反射光中多数锆石边部发育宽度不一的黑边,并将部分锆石溶蚀成港湾状.锆石阴极发光图像显示,大部分锆石均发育相对较宽的岩浆振荡环带或板状环带,其外围均发育相对较窄的暗化边,明显受到后期构造

热事件的改造(图5f插图).该样品中锆石具有相对较低的U、Th含量($(47\sim 166)\times 10^{-6}$ 和 $(34\sim 101)\times 10^{-6}$)和相对较高的Th/U比值(0.41~0.98,平均值为0.78)(附表S1、图5c),稀土元素配分模式图中轻、重稀土元素强烈分异,存在明显的Ce正异常和弱的Eu负异常,亦显示为岩浆锆石的特征(图5f).在锆石U-Pb年龄谐和图中,锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄范围为2 957~2 845 Ma,大多数落在谐和线上,仅少数锆石位于谐和线下方并沿着不一致线分布(图5c),形成的不一致线上交点年龄为(2 915±16)Ma(MSWD=0.51),而落在谐和线上25个测点的谐和年龄为(2 917±7)Ma(MSWD=1.4),其加权平均年龄为(2 917±7)Ma(MSWD=2.1).三者误差范围内一致,共同约束该样品的结晶年龄为(2 917±7)Ma.

3.3 锆石Lu-Hf同位素

对样品QC212-7、QC212-16和QC212-11分别进行了14、12和13个测点的原位锆石Lu-Hf同位素测试,分析结果见附表S2和图6.样品QC212-7的1粒继承锆石(#24)的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.280 727, $\epsilon_{\text{Hf}}(3\ 164\ \text{Ma})$ 值为-0.9,对应的两阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}$)范围为3.57 Ga;其他分析点具有相对均一的Hf同位素组成($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.280\ 805\sim 0.280\ 905$),其 $\epsilon_{\text{Hf}}(2\ 927\ \text{Ma})$ 值均为负值,范围为-3.7~-0.1,平均值为-1.5,对应的两阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}$)范围为3.56~3.34 Ga.样品QC212-16中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于0.280 854~0.280 958,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(2\ 918\ \text{Ma})$ 值

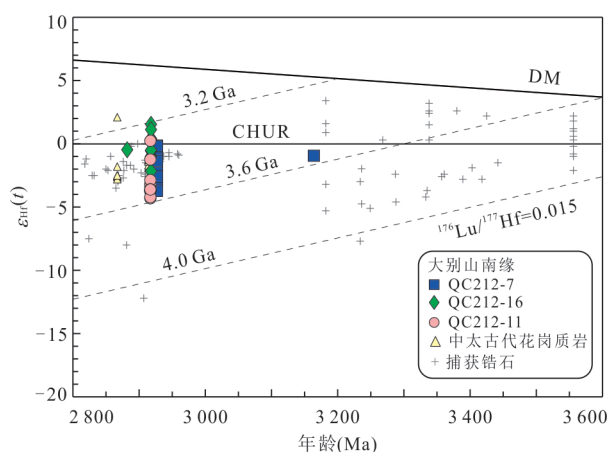


图6 翁门杂岩中太古代花岗岩锆石Hf同位素特征

Fig.6 Characteristics of zircon Hf isotopic composition for the Mesoproterozoic granites in the Wengmen complex

引用数据来源:大别山南缘中太古代花岗质岩(徐大良等,2023a),捕获/继承锆石(Xu *et al.*, 2023; 徐大良等, 2023b)

表 1 翁门杂岩中太古代花岗质岩锆石氧逸度和水含量
Table 1 Zircon oxybarometer-hygrometer for Mesoarchean granites in the Wengmen complex

样品名称	岩石类型	锆石饱和温度		水含量		fO_2	
		(°C)		(%)		(ΔFMQ)	
		数值	误差	数值	误差	数值	误差
QC212-7	低 HREE 型 TTG	796.42	27.29	2.21	0.65	-0.31	0.33
QC212-16	高 HREE 型 TTG	778.82	23.61	2.54	0.39	-0.15	0.2
QC212-11	钾质花岗岩	819.67	12.67	5.64	0.24	1.16	0.11

注:计算方法详见 Ge *et al.*, 2023.

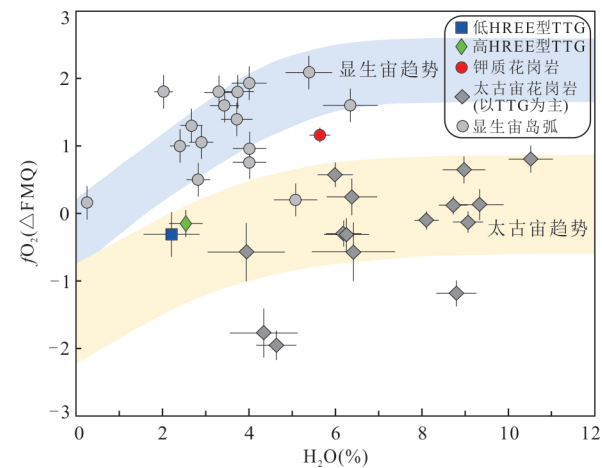


图 7 翁门杂岩中太古代花岗质岩锆石氧逸度-水含量
Fig.7 Zircon oxybarometer-hygrometer diagram for Mesoarchean granites in the Wengmen complex
底图、太古宙花岗岩、显生宙岛弧数据来自 Ge *et al.*, 2023

范围为 $-2.2 \sim +1.5$, 对应的两阶段模式年龄 (T_{DM2}) 范围为 $3.45 \sim 3.23$ Ga. 样品 QC212-11 中的分析点具有较一致的 Hf 同位素组成 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.280\,795 \sim 0.280\,922$), 其 ϵ_{Hf} ($2\,917$ Ma) 值多为负值, 范围为 $-4.3 \sim +0.2$, 平均值为 -3.2 , 对应的两阶段模式年龄 (T_{DM2}) 范围为 $3.58 \sim 3.31$ Ga.

3.4 岩浆氧逸度和水含量

岩浆氧逸度 (fO_2) 和 H_2O 含量是控制岩浆形成、分异和成矿过程的两个关键变量, 对于检验早期陆壳是如何形成的至关重要. 结合两种基于锆石微量元素氧逸度计, Ge *et al.* (2023) 创新性地提出了锆石氧逸度-湿度计, 该方法可以根据锆石结晶时的氧逸度, 计算平衡岩浆的水含量, 准确度在 1% 以内. 本文根据该方法对翁门杂岩中太古代花岗质岩的锆石结晶温度、岩浆氧逸度 (fO_2 (ΔFMQ)) 和水含量进行了计算 (表 1、图 7). 翁门杂岩各类中太古

代花岗质岩的锆石在球粒陨石标准化图中均具明显的 Eu 负异常及 Ce 正异常, 表现为一致的整体向左倾斜的重稀土富集而轻稀土亏损型 (图 5), 具典型的岩浆成因锆石稀土元素配分模式. 计算结果表明, 低 HREE 型样品 QC212-7 的锆石结晶温度为 $(796.42 \pm 27.29)^\circ\text{C}$, 岩浆氧逸度为 ΔFMQ -0.31 ± 0.33 , 水含量为 2.21 ± 0.65 ; 高 HREE 型样品 QC212-16 的锆石结晶温度为 $(778.82 \pm 23.61)^\circ\text{C}$, 岩浆氧逸度为 ΔFMQ -0.15 ± 0.2 , 水含量为 2.54 ± 0.39 ; 而钾质花岗岩样品 QC212-11 则具有相对高的锆石结晶温度 $(819.67 \pm 12.67)^\circ\text{C}$, 以及明显偏高的岩浆氧逸度 ΔFMQ $+1.16 \pm 0.11$ 和水含量 (5.64 ± 0.24) .

4 讨论

4.1 大别山南缘中太古代花岗质岩浆作用

大别山南缘翁门杂岩中同一露头的英云闪长质片麻岩、花岗闪长质片麻岩和钾质花岗岩脉的形成年龄分别为 $(2\,927 \pm 8)$ Ma、 $(2\,918 \pm 28)$ Ma 和 $(2\,917 \pm 7)$ Ma, 说明它们均形成于中太古代. 上述定年结果与已报道的翁门杂岩英云闪长质片麻岩的形成年龄较为接近 ($2\,914 \sim 2\,874$ Ma; 徐大良等, 2023a), 也与大别山南缘宿松地区花岗质片麻岩的测年结果相类似 ($(2\,874 \pm 11)$ Ma; Wang *et al.*, 2023), 指示中太古代岩浆热事件在大别山南缘具有广泛性. 该期岩浆事件也与扬子陆核崆岭杂岩中发育的 $3.0 \sim 2.9$ Ga 重要的构造-岩浆热事件相吻合 (Guo *et al.*, 2015; Qiu *et al.*, 2018), 它们共同约束扬子陆块在中太古代发育一期重要的岩浆作用. 此外, 1 件样品中还存在少量捕获/继承锆石年龄 ($3\,164 \sim 3\,039$ Ma), 区内亦记录有较多的类似捕获/继承锆石年龄信息 ($3.5 \sim 3.2$ Ga; Xu *et al.*, 2023; 徐大良等, 2023b), 表明大别山南缘可能还存在古太古代-中太古代早期的岩浆事件.

4.2 岩石成因

为避免热液蚀变和变质变形作用的影响, 本文在无明显蚀变和溶蚀作用的区域采集新鲜样品. 所有样品均显示出较低的烧失量 ($\text{LOI} < 1.91\%$) 和微弱的 Ce 异常 ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0.76 \sim 1.0$), 指示研究样品的原始地球化学特征在后期变质作用和热液蚀变过程中并未遭受明显改变 (Polat and Hofmann, 2003). 尽管本文各类样品的数量不多, 不足以对其元素活动性进行稳健的评估, 但它们在稀土和微量元素标准化图解中具有

相对一致的分布样式(图4),表明这些样品总体上依然保留原始侵位时的地球化学元素特征.

4.2.1 TTG片麻岩 翁门杂岩中太古代TTG片麻岩富硅、富钠、高钙和贫镁铁,富集轻稀土元素、亏损重稀土元素, Eu负异常明显,富集K、Ba、Th等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta、Ti、P等高场强元素,且Cr、Ni含量较低,符合太古宙TTG的特点(Martin *et al.*, 2005; Moyen and Martin, 2012). 不同于全球大多数太古宙TTG的高铝类型,翁门杂岩TTG片麻岩的 Al_2O_3 含量偏低(12.21%~14.25%),属低铝系列TTG(Halla *et al.*, 2009). 根据其HREE含量不同,翁门杂岩TTG片麻岩明显可分为低HREE型(a组)和高HREE型(b组)两组(图4). 不同于以崧岭杂岩为代表的典型太古宙TTG,部分样品钾含量偏高($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 0.5$),在 $(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})-(2 \times \text{A}/\text{CNK})-(2 \times \text{FMSB})((\text{FeO}_t + \text{MgO}) \times (\text{Ba} + \text{Sr}))$ 三角图解中主要落入TTG与黑云母/二云母花岗岩的重叠区域,位于混合花岗岩范围内(图8a);在 $3\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}_t + \text{MgO})-5\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 源区判别图解中,a组位于高钾镁铁质岩石熔体区域,而b组主要落在低钾镁铁质岩和高钾铁镁质岩的部分熔融区域(图8b),反映其源区物质较为复杂;样品的轻、重稀土元素分异相对不明显,具有高的HREE含量、Eu负异常(图4a)和非常高的Y含量,且在 $(\text{La}/\text{Yb})_N-\text{Yb}_N$ 图解中,a组基本落在太古宙TTG区域,而b组则落在后太古宙花岗岩(或典型岛弧岩浆岩)的区域内(图8c). 后者在岩石类型上应属于过渡型TTG或富集型TTG(Moyen and Martin, 2012).

大量研究表明,太古宙TTG岩石可能通过加厚镁铁质下地壳或俯冲大洋板块镁铁质岩石的部分熔融,或由地幔岩浆的分离结晶所形成(Martin *et al.*, 2005; Halla *et al.*, 2009; Moyen and Martin, 2012; Laurent *et al.*, 2014; Smithies *et al.*, 2021). 通常来说,高度不相容元素(CH)和中等不相容元素(CM)的地球化学指标是鉴别花岗岩质岩石成因的有效手段. 在 $(\text{La}/\text{Sm})-\text{La}$ 岩石成因判别图解中所有TTG样品均沿着部分熔融的趋势线分布,表明其化学成分的变化主要受控于部分熔融过程(图8d; Schiano *et al.*, 2010). 翁门杂岩中太古代两类TTG片麻岩均具有相对较低的 MgO 、 $\text{Mg}^\#$ 值,样品点主要落在加厚下地壳部分熔融区域(图3f). 较低的相容元素(如Cr、Co和Ni)含量同样指示其原始岩浆中没有明显

的地幔物质的添加. 此外,两类TTG岩石具有基本一致的锆石Hf同位素特征,两阶段Hf模式年龄分别为3.56~3.34 Ga和3.45~3.23 Ga(图6),表明二者岩石具有相似的源区,主要来源于古太古代基性下地壳部分熔融,而非年轻的俯冲熔体的熔融.

根据岩浆起源的深度,可将TTG岩石划分为高压(压力 ≥ 1.6 GPa)、中压和低压(压力 ≤ 0.8 GPa)三个系列(Moyen, 2011),高压系列表现为HREE非常亏损,低Nb、Ta和高Sr含量的特征,指示其残留相中含有大量石榴石、少量金红石、但不含斜长石;而低压系列显示出HREE相对富集,Nb、Ta含量较高,Sr含量相对较低的特征,指示其残留相中存在斜长石,石榴石含量不高(或不存在),且一定没有金红石;中压系列的地球化学特征介于二者之间. 翁门杂岩中太古代两类TTG片麻岩具有相对较低的Sr丰度和Sr/Y比值,均属于低压型TTG(图8e),表明其形成深度相对较浅. 低HREE型TTG样品(a组)具有相对较低的Sr含量和明显的Eu负异常(图4),说明源区部分熔融残留相中有斜长石;该组样品具有中等的Nb/Ta比值(16.6~18.1),大致分布于球粒陨石线附近,指示TTG熔体可能与不含金红石的榴辉岩残留相平衡(图8f),以及高的Zr/Sm比值(98.9~99.2)可能指示源区含有少量的角闪石残留(Martin *et al.*, 2005). 在 $(\text{La}/\text{Yb})_N-\text{Yb}_N$ 图解中,熔融模拟实验结果进一步显示其源岩对应含10%石榴石的角闪岩(图8c). 与低HREE型TTG相比,高HREE型TTG样品(b组)不仅具有高的Y、Yb含量,低的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值,同时还具有较低的Sr含量和更加明显的Eu负异常(图4),表明源区部分熔融残留相中含有斜长石,而不含石榴石(图8c),其形成深度更浅. 此外,该组样品主体具有相对低的Nb/Ta、Zr/Sm比值,在图8f中沿残留相为角闪岩的演化线分布,进一步表明其主要源于不含石榴石角闪岩的部分熔融.

综上所述,本研究推测翁门杂岩中太古代TTG片麻岩是古太古代基性下地壳在相对低压条件下部分熔融形成的,低HREE型TTG残留相中有斜长石、石榴石、角闪石,没有金红石;而高HREE型TTG源区有斜长石残留,不含石榴石. 多样化的岩石类型反映的是熔融条件的变化(如源区、深度、压力),而非分离结晶或熔融程度的变化.

4.2.2 钾质花岗岩的成分特殊性 钾质花岗岩具有高 SiO_2 、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$,低 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 ,

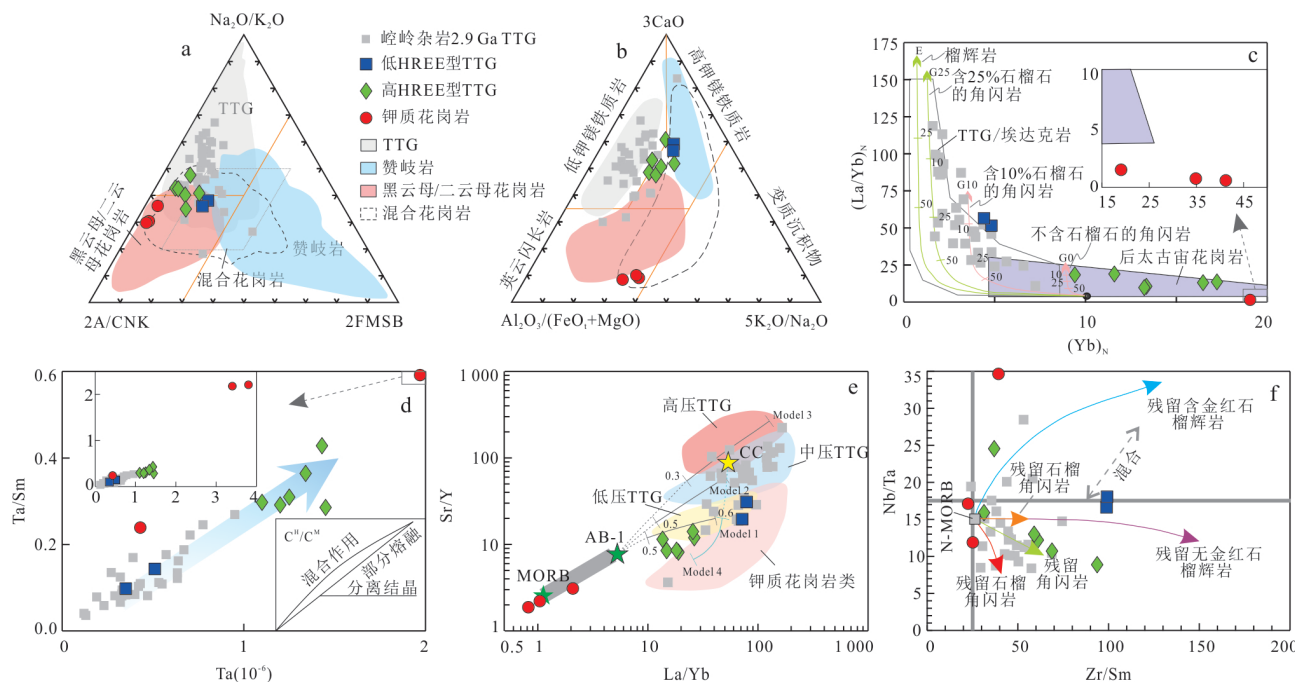


图8 翁门杂岩中太古代花岗岩的岩石成因判别图

Fig.8 Petrogenesis discrimination diagrams for the Mesoproterozoic granites in the Wengmen complex

底图据 Martin *et al.*, 2005; Schiano *et al.*, 2010; Moye, 2011; Laurent *et al.*, 2014

以及富铁($\text{FeO}_i/(\text{FeO}_i+\text{MgO})>0.8$)等特征,指示样品经历了高分化的分异演化作用,属于高演化或高分异钙碱性花岗岩(图9a).与A型花岗岩通常具有较高的锆石饱和温度(平均温度 $883\text{ }^{\circ}\text{C}$; Wu *et al.*, 2017)不同,钾质花岗岩显示出明显偏低的全岩成分锆石饱和温度($697\sim754\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均值为 $722\text{ }^{\circ}\text{C}$,附表S3),在 $\text{Zr}-10\,000\times\text{Ga}/\text{Al}$ 判别图解中落入分异型花岗岩区域(图9b).结合其较低的稀土元素含量、轻重稀土比值和较强的Eu负异常特征,共同指示了翁门杂岩钾质花岗岩的岩石类型为高分异花岗岩.

翁门杂岩钾质花岗岩属于岩浆分异体系的晚期组分,具有明显的成分特殊性.由于岩浆性质的明显改变,高分异花岗岩常出现一些双胞胎元素(如 Zr/Hf 、 Nb/Ta 、 Y/Ho 、 K/Rb)比值的显著变化(Wu *et al.*, 2017),如 $\text{Zr}/\text{Hf}=26$ 和 $\text{Nb}/\text{Ta}=5$ 被作为正常分异成因和岩浆-热液相互作用成因的分界.翁门杂岩钾质花岗岩的 Zr/Hf 比值($15.0\sim16.3$)、 Nb/Ta 比值($11.9\sim34.7$)表现出不同的微量元素比值异常特征,这种无规律的变化可能反映了岩浆演化晚期经历了强烈的矿物分离结晶作用和岩浆-流体相互作用并产生了较大的 Nb/Ta 和 Zr/Hf 分异,使得地球化学特征变得复杂.高分异花岗岩的出现通常与它的富挥发分(F 、 Cl 、 CO_2 、 H_2O 和 B 等)有关(Wu *et al.*, 2017).挥发分的加入能降低岩浆的粘

度、密度和固相线的温度,并改变熔体结构(Wu *et al.*, 2017),如此便可显著延长岩浆分离结晶过程,导致岩浆高度分离结晶,同时加剧了熔流体相互作用,使得Nb、Ta等金属阳离子在硅酸盐熔体中的溶解度增加,从而导致Nb和Ta不同程度富集,进而导致本文样品中Nb/Ta比值在低温部位发生重大分异(图8f).由于高分异花岗岩中锆石属于晚结晶矿物,Zr含量在高度分异过程中将随锆石的晶出而显著降低,并导致全岩和锆石均具有较低的Zr/Hf比值(Wu *et al.*, 2017);本文样品的锆石CL图像明显不同于热液锆石(图5),样品表现出来的Zr/Hf比值偏低,更可能与高分异岩浆体系锆饱和有关,而不取决于流体参与作用.与TTG片麻岩相比,翁门杂岩中太古代高分异花岗岩的稀土元素含量降低、轻重稀土比值趋小、重稀土强烈富集而呈现罕见的特殊分布样式(图4a),这种异常可能与特殊的源区组成、复杂的熔融-分异过程等有关.研究表明岩浆中挥发分F的富集会导致熔体粘度和密度显著下降并促进岩浆分异,这种F含量的差异可能会造成不同的稀土四分组效应(Irberer, 1999);钾质花岗岩强烈亏损LREE的特征类似于显生宙淡色花岗岩,这种怪异的地球化学特征往往归结于岩浆后期副矿物(如独居石、磷灰石)分离结晶作用或在较深部熔融区副矿物(如石榴子石)的差异溶解作用.翁门

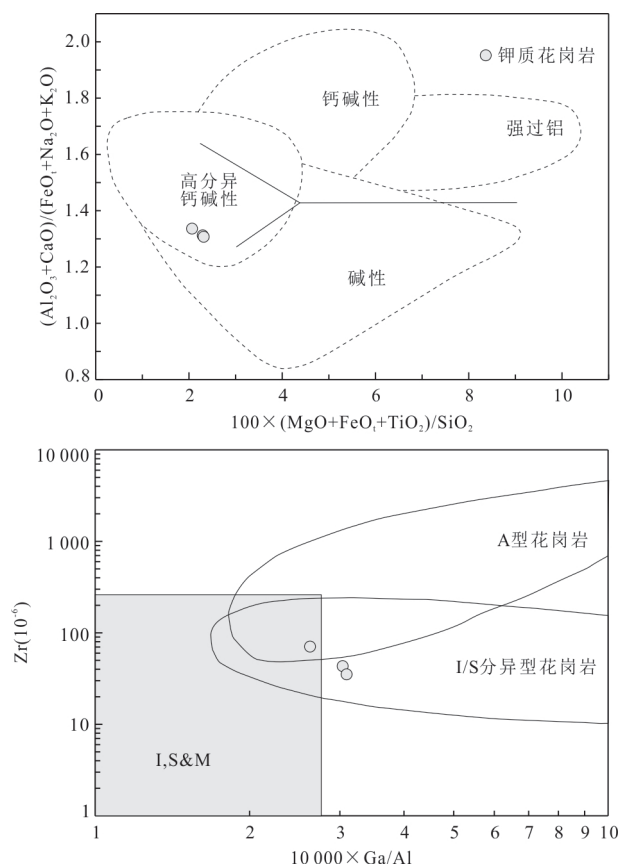


图9 翁门杂岩中太古代高分异钾质花岗岩的地球化学判别图

Fig.9 Geochemical discrimination diagrams for Mesoarchean highly fractionated potassic granites in the Wengmen complex

底图据 Sylvester, 1989; Wu *et al.*, 2017

杂岩高分异钾质花岗岩的成分特殊性表明其可能经历了复杂特殊的地质过程,目前尚缺乏原位矿物化学分析、同位素示踪和相平衡模拟等手段来提取其源区性质、熔融-分异条件和可能的流体活动记录等关键信息来约束其岩浆成因过程。

翁门杂岩中太古代高分异花岗岩具有较低且变化明显的MgO含量和 $Mg^{\#}$ 值,在相关图解中基本投入下地壳中(图3f),表明不可能源自地幔源区物质的部分熔融。样品的Rb/Sr比值非常高(0.61~0.91),而Nd/Th比值非常低(1.98~4.51),这些都反映了壳源花岗岩的特征。样品具有较为富集的Hf同位素组成和较老的两阶段模式年龄,明显大于其形成年龄,同样表明其源区可能为太古代的古老地壳(图6)。在源区判别图解中,样品基本落在英云闪长岩区域(图8b),进一步表明其岩浆源区可能主要为先存钠质TTG岩石(Laurent

et al., 2014)。综合以上证据,本次研究的高分异花岗岩可能归因于古老陆壳物质的部分熔融,随后在特殊的环境下发生强烈分离结晶作用所形成。

4.3 构造意义

太古宙晚期(3.0~2.5 Ga)被认为是全球地球动力学变化和大陆地壳形成的重要阶段,该时期地球经历了从早期停滞层盖构造或地幔柱构造向晚期活动层盖构造(板块构造)的系统性转变(Laurent *et al.*, 2014; Zhai and Peng, 2020; Zheng and Zhao, 2020; 赵国春等, 2023; 郑永飞, 2024)。中新太古代全球古老克拉通中富钠英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)岩套和富镁科马提岩的减少、多样性富钾花岗岩类(如赞岐岩、高钾花岗岩、碱性花岗岩和正长岩等)的快速发展、地壳再循环程度的增加以及新太古代双变质带的出现等进一步支持了这种规律性演变(Dhuime *et al.*, 2012; Laurent *et al.*, 2014)。与全球其他太古宙克拉通类似,崆岭杂岩3.0~2.9 Ga TTG片麻岩的地球化学特征指示扬子陆块在中太古代已存在板块构造(Guo *et al.*, 2015; Qiu *et al.*, 2018)。翁门杂岩中太古代显示出多样性花岗岩类特征,更可能是在板块构造体制下形成的,主要原因如下:(1)与典型太古宙TTG不同,翁门杂岩TTG片麻岩的大多数样品落在后太古宙花岗岩(或弧岩浆岩)的区域内(图8c),并富集K、Ba、Th等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta、Ti、P等高场强元素,且Cr、Ni含量较低,更加与显生宙形成于岛弧或俯冲环境的岩石成分类似;(2)时代相近的TTG片麻岩和钾质花岗岩形成于不同的压力条件(图8c、8e),显示出不同的成因机制,这种并存的成因机制及出现的岩石组合最有可能形成于大陆边缘弧构造环境;(3)钾质花岗岩具有显著偏高的岩浆氧逸度和水含量(图7),类似于现代岛弧岩浆,指示大量的水被从地表运输至深部地壳和地幔,这些特征难以用停滞层盖地球动力学机制来解释,而应是板块构造活动的产物(Ge *et al.*, 2023)。考虑到太古宙汇聚板块边缘,地幔温度较高(1450~1600℃)、洋壳厚度较大,俯冲早期阶段受到阻滞的玄武质洋壳会与大陆边缘直接发生硬碰撞形成加厚岩石圈地幔;而俯冲晚期阶段俯冲板片回卷导致与上覆岩石圈解耦,俯冲角度升高,对流地幔大规模加热作用引起大陆主动张裂,地幔楔中的交代岩发生加热熔融形成弧岩浆作用(Zheng and Zhao, 2020; 郑永飞, 2024)。锆石Hf同位素显示翁门杂岩

中太古代不同类型 TTG 和钾质花岗岩具有相同的源区,其形成机制不能用经典的洋壳俯冲模式(Halla *et al.*, 2009)来解释.翁门杂岩中太古代多样性岩石组合可能形成于太古宙板块暖俯冲/硬碰撞(Zheng and Zhao, 2020)的晚期阶段,由于大陆的主动张裂,在低压环境下引起加厚至榴辉岩相的下地壳部分熔融形成低 HREE 型 TTG,而软流圈上升、加热浅部残留下地壳则产生了高 HREE 型 TTG,而后特殊的地质过程显著促进了岩浆在地壳更浅部的分离结晶过程,从而形成了高钾的高分异花岗岩.

从全球范围来看,中新太古代花岗岩类的多样化在不同克拉通内发育的时间并不一致(Laurent *et al.*, 2014).太古宙富钾花岗岩大量出现最早发生在澳大利亚 Pilbara 克拉通(3.0~2.9 Ga),其次为巴西 Amazonian 克拉通(2.87~2.86 Ga)和非洲 Kaapvaal 克拉通(2.84~2.77 Ga);而大多发育在新太古代 2.7~2.6 Ga 期间,如加拿大 Superior 克拉通(2.7~2.68 Ga)、西澳 Yilgarn 克拉通(2.69~2.66 Ga)和东欧 Baltic 地盾(2.72~2.68 Ga)等;最晚期的富钾花岗岩大量出现在印度 Dharwar 克拉通和中国华北克拉通,时间在 2.6~2.5 Ga(Laurent *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2022).本文获得翁门杂岩中具高分异特征的钾质花岗岩形成年龄为(2 917±7)Ma,时代与扬子西南缘撮科杂岩中钾质花岗岩(2 920 Ma; Zhao *et al.*, 2020)基本一致,指示扬子陆块花岗岩类多样化的时间至少可追溯至中太古代约 2.92 Ga.一般认为,地球的初始陆壳来自于地幔的部分熔融,其进一步的分异作用使地壳不断向长英质方向演化,而地壳主要成分由 TTG 向富钾花岗岩的重大转变是大陆地壳成熟和稳定化的重要标志之一(Laurent *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2020).Hf 同位素指示翁门杂岩的地壳生长主要发生在古太古代 3.6~3.3 Ga,中太古代时期本质上是古老地壳物质再造的产物(图 6;徐大良等, 2023b),同时伴随有一定的新生地壳物质加入.这些再造的过渡型 TTG 和钾质花岗岩明显不同于典型太古宙 TTG,具有更高的 K₂O 含量和更少的 HREE 亏损而与现今大陆地壳相似.这些岩浆作用改变了扬子陆块北缘大陆地壳的组成,使其陆壳成熟度大大提高,特别是 2 917 Ma 高分异花岗岩的出现被视为地壳成分成熟度的重要标志(Wu *et al.*, 2017).与世界上许多其他太古宙克拉通类似,太古宙晚期岩浆及地壳成分转变反映的是克拉通岩石圈稳定化的过程,这与

早期大陆地壳厚度和热力学结构的演变有关(Laurent *et al.*, 2014).扬子陆块现今零星出露太古宙基底的大陆地壳成熟和稳定化时间并不一致(Zhao *et al.*, 2020),扬子陆块南缘撮科杂岩和大别山南缘翁门杂岩的陆壳在约 2.9 Ga 初始克拉通化,扬子陆块北缘崆岭杂岩和钟祥杂岩为 2.7~2.6 Ga,而扬子陆块北缘鱼洞子杂岩和浠水杂岩则为约 2.5 Ga.各基底杂岩的早期岩浆热事件和 Hf 同位素组成同样支持其早期演化历史存在差异(Zhao *et al.*, 2020; 邱啸飞等, 2024).太古宙结晶基底的形成通常经历了零星的 TTG 岩石、古陆核、微陆块、大陆块等几个阶段,并于太古宙末期形成超级克拉通(Zhai and Peng, 2020).扬子陆块内部不同基底由钠质 TTG 向富钾花岗岩转变时间的不一致,暗示其在太古宙时期经历了多阶段的微陆块拼合过程,最终于太古宙末期形成更大的、统一的、成熟稳定的太古宙克拉通(徐大良等, 2023a).

5 结论

(1)在大别山南缘翁门杂岩中识别出多样性的太古宙花岗质岩石,获得其中的 TTG 片麻岩和钾质花岗岩脉具有相似的形成时代(2 927~2 917 Ma),即它们均形成于中太古代.

(2)TTG 片麻岩可细分为低重稀土型(低 HREE 型)和高重稀土型(高 HREE 型)两类,二者具有显著不同的稀土配分模式.这类岩石组合可能形成于太古宙板块暖俯冲/硬碰撞的晚期阶段,低 HREE 型主要源于高钾镁铁质岩石在相对低压条件下的部分熔融;而高 HREE 型 TTG 主要源于不含石榴石角闪岩的部分熔融,其形成深度更浅.

(3)钾质花岗岩脉表现为高 SiO₂、富 K₂O、高 K₂O/Na₂O 和富铁的特征,呈现出左倾“V 型”海鸥式稀土配分模式,为高分异花岗岩.该套岩石具有明显的成分特殊性,以及较高的岩浆氧逸度和水含量.

(4)翁门杂岩中太古代 TTG 和富钾花岗岩的同时出现,是在板块构造体制下古老大陆地壳再造的产物,标志着扬子陆块北缘在中太古代时期古老大陆地壳的逐步成熟稳定和初始克拉通化.

致谢:三位匿名评审专家提出了宝贵的意见和修改建议,在此一并致以衷心感谢!

附表见 <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.121>.

References

- Chen, Y., Zhang, J., Gao, P., et al., 2022. Modern-Style Plate Tectonics Manifested by the Late Neoproterozoic TTG-Sanukitoid Suite from the Datong-Huai'an Complex, Trans-North China Orogen. *Lithos*, 430–431: 106843. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106843>
- Dhuime, B., Hawkesworth, C. J., Cawood, P. A., et al., 2012. A Change in the Geodynamics of Continental Growth 3 Billion Years Ago. *Science*, 335(6074): 1334–1336. <https://doi.org/10.1126/science.1216066>
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., et al., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>
- Frost, B. R., Frost, C. D., 2008. A Geochemical Classification for Feldspathic Igneous Rocks. *Journal of Petrology*, 49(11): 1955–1969. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn054>
- Garçon, M., 2021. Episodic Growth of Felsic Continents in the Past 3.7 Ga. *Science Advances*, 7(39): eabj1807. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abj1807>
- Ge, R. F., Wilde, S. A., Zhu, W. B., et al., 2023. Earth's Early Continental Crust Formed from Wet and Oxidizing Arc Magmas. *Nature*, 623(7986): 334–339. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06552-0>
- Guo, J. L., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2015. Episodic Paleoproterozoic (3.3–2.0 Ga) Granitoid Magmatism in Yangtze Craton, South China: Implications for Late Archean Tectonics. *Precambrian Research*, 270: 246–266. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.09.007>
- Halla, J., van Hunen, J., Heilimo, E., et al., 2009. Geochemical and Numerical Constraints on Neoproterozoic Plate Tectonics. *Precambrian Research*, 174(1–2): 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.07.008>
- Hou, X. G., Yu, Z. Q., Chen, S. F., et al., 2024. Trace Element Mobility in Subducted Marble and Associated Eclogite: Constraints from UHP Rocks in the Shuanghe Area, Central-East China. *Journal of Earth Science*, 35(1): 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1692-3>
- Irber, W., 1999. The Lanthanide Tetrad Effect and Its Correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of Evolving Peraluminous Granite Suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3–4): 489–508. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00027-7)
- Laurent, O., Martin, H., Moyen, J. F., et al., 2014. The Diversity and Evolution of Late-Archean Granitoids: Evidence for the Onset of “Modern-Style” Plate Tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, 205: 208–235. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.06.012>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., et al., 2005. An Overview of Adakite, Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG), and Sanukitoid: Relationships and Some Implications for Crustal Evolution. *Lithos*, 79(1–2): 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.048>
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Moyen, J. F., 2011. The Composite Archean Grey Gneisses: Petrological Significance, and Evidence for a Non-Unique Tectonic Setting for Archean Crustal Growth. *Lithos*, 123(1–4): 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.09.015>
- Moyen, J. F., Martin, H., 2012. Forty Years of TTG Research. *Lithos*, 148:312–336. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.010>
- Polat, A., Hofmann, A. W., 2003. Alteration and Geochemical Patterns in the 3.7–3.8 Ga Isua Greenstone Belt, West Greenland. *Precambrian Research*, 126(3–4): 197–218. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(03\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00095-0)
- Qiu, X. F., Ling, W. L., Liu, X. M., et al., 2018. Evolution of the Archean Continental Crust in the Nucleus of the Yangtze Block: Evidence from Geochemistry of 3.0 Ga TTG Gneisses in the Kongling High-Grade Metamorphic Terrane, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.12.026>
- Qiu, X. F., Peng, L. H., Kong, L. Y., et al., 2024. Discovery of Eoarchean Gneisses in Northern Dabie Belt. *Earth Science*, 49(11): 3960–3970 (in Chinese with English abstract).
- Schiano, P., Monzier, M., Eissen, J. P., et al., 2010. Simple Mixing as the Major Control of the Evolution of Volcanic Suites in the Ecuadorian Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(2): 297–312. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0478-2>
- Shi, Y. H., Wang, C. S., Kang, T., et al., 2012. Petrological Characteristics and Zircon U-Pb Age for Susong Met-

- amorphous Complex Rocks in Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3389–3402 (in Chinese with English abstract).
- Smithies, R.H., Lu, Y.J., Kirkland, C.L., et al., 2021. Oxygen Isotopes Trace the Origins of Earth's Earliest Continental Crust. *Nature*, 592(7852): 70–75. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03337-1>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Sylvester, P. J., 1989. Post-Collisional Alkaline Granites. *The Journal of Geology*, 97(3): 261–280. <https://doi.org/10.1086/629302>
- Wang, K., Zhao, T.Y., Zhang, S.H., 2023. Discovery of the Oldest (~2.87 Ga) Granitic Gneisses in the Qinling-Dabie Orogenic Belt: Direct Evidence for Mesoarchean Crust. *China Geology*, 6(3): 533–535. <https://doi.org/10.31035/cg2022084>
- Wu, F. Y., Liu, X. C., Ji, W. Q., et al., 2017. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1201–1219. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5139-1>
- Xu, D. L., Peng, L. H., Deng, X., et al., 2023a. Identification of Mesoarchean to Paleoproterozoic Magmatic Tectono-Thermal Events from Wengmen Complex in Southern Dabie Orogen and Its Geological Significance. *Earth Science*, 48(11): 4072–4087 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. L., Deng, X., Peng, L. H., et al., 2023b. The Components of the Subducted Continental Basement within the Dabieshan Orogenic Belt as Evidenced by Xenocrystic/Inherited Zircons from Cretaceous Dykes. *Earth Science Frontiers*, 30(4): 299–316 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D.L., Peng, L.H., Deng, X., et al., 2023. Zircon U-Pb Age Evidence of the Mesoarchean (2.9–3.2 Ga) Crustal Remnant in the Southern Dabie Orogen, South China. *China Geology*, 6(1): 174–176. <https://doi.org/10.31035/cg2022056>
- Xu, S.T., Liu, Y.C., Jiang, L.L., et al., 2002. Architecture and Kinematics of the Dabieshan Orogen. University of Science and Technology of China Press, Hefei, 53–68 (in Chinese).
- Zhai, M. G., Peng, P., 2020. Origin of Early Continents and Beginning of Plate Tectonics. *Science Bulletin*, 65(12): 970–973. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.03.022>
- Zhai, M. G., Zhao, G. C., Guo, J. H., 2023. Focus on Form and Evolution of Precambrian Continents. *Chinese Science Bulletin*, 68(18): 2281–2283 (in Chinese).
- Zhao, G.C., Zhang, J., Yin, C.Q., et al., 2023. Pre-plate Tectonics and Origin of Continents. *Chinese Science Bulletin*, 68(18): 2312–2323 (in Chinese).
- Zhao, T.Y., Li, J., Liu, G.C., et al., 2020. Petrogenesis of Archean TTGs and Potassic Granites in the Southern Yangtze Block: Constraints on the Early Formation of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 347:105848. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105848>
- Zheng, Y. F., 2024. Plate Tectonics in the Archean: Observations versus Interpretations. *Scientia Sinica Terrae*, 54(1): 1–30 (in Chinese).
- Zheng, Y. F., Zhao, G. C., 2020. Two Styles of Plate Tectonics in Earth's History. *Science Bulletin*, 65(4): 329–334. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.12.029>
- Zheng, Y.F., Zhou, J.B., Wu, Y.B., et al., 2005. Low-Grade Metamorphic Rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt: A Passive-Margin Accretionary Wedge Deformed during Continent Subduction. *International Geology Review*, 47(8): 851–871. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.8.851>

中文参考文献

- 邱啸飞, 彭练红, 孔令耀, 等, 2024. 北大别构造带始太古代片麻岩的发现. *地球科学*, 49(11): 3960–3970.
- 石永红, 王次松, 康涛, 等, 2012. 安徽省宿松变质杂岩岩石学特征和锆石 U-Pb 年龄研究. *岩石学报*, 28(10): 3389–3402.
- 徐大良, 彭练红, 邓新, 等, 2023a. 大别山南缘翁门杂岩中太古代古元古代岩浆构造热事件的识别及其地质意义. *地球科学*, 48(11):4072–4087.
- 徐大良, 邓新, 彭练红, 等, 2023b. 大别山碰撞造山带俯冲盘陆壳基底组成: 白垩纪脉岩捕获/继承锆石的证据. *地学前缘*, 30(4): 299–316.
- 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等, 2002. 大别山造山带的构造几何学和运动学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 53–68.
- 翟明国, 赵国春, 郭敬辉, 2023. 关注前寒武纪大陆形成演化研究. *科学通报*, 68(18): 2281–2283.
- 赵国春, 张健, 尹常青, 等, 2023. 前板块构造与大陆起源. *科学通报*, 68(18): 2312–2323.
- 郑永飞, 2024. 太古宙地质与板块构造: 观察与解释. *中国科学: 地球科学*, 54(1): 1–30.