

doi: 10.12029/gc20210107001

朱江, 陈超, 李占轲, 吴波, 王光洪, 彭练红. 2024. 西大别地区吕王—高桥混杂岩带石墨赋矿岩系碎屑锆石 U-Pb 年龄: 对中元古代海相沉积事件的约束[J]. 中国地质, 51(5): 1735-1747.

Zhu Jiang, Chen Chao, Li Zhanke, Wu Bo, Wang Guanghong, Peng Lianhong. 2024. Detrital zircon U-Pb age of graphite-hosting meta-sedimentary rocks in the Lüwang-Gaoqiao mélange belt, western Dabie area: Constraints on Mesoproterozoic marine sedimentary events[J]. Geology in China, 51(5): 1735-1747(in Chinese with English abstract).

## 西大别地区吕王—高桥混杂岩带石墨赋矿岩系碎屑 锆石 U-Pb 年龄: 对中元古代海相沉积事件的约束

朱江<sup>1,2,3</sup>, 陈超<sup>2,4</sup>, 李占轲<sup>3,5</sup>, 吴波<sup>4</sup>, 王光洪<sup>6</sup>, 彭练红<sup>7</sup>

(1. 长江大学资源与环境学院, 油气地球化学与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室(湖北省地质局), 湖北 武汉 430034; 3. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 4. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034; 5. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074; 6. 四川省冶金地质勘查局 605 大队, 四川 眉山 620860; 7. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205)

**摘要:**【研究目的】扬子陆块北缘大别山地区古元古代—中元古代的物质记录有限, 制约了前寒武纪地质构造演化认识。大别山核部吕王—高桥混杂岩带内“石墨片岩-石英岩夹大理岩”沉积岩系的年代学研究可为大别山地区中元古代古洋(海)盆演化提供新约束, 对区域前寒武纪成矿与找矿提供科学指导。【研究方法】在开展 1:10000 地质测量查明混杂岩带岩石组合特征的基础上, 本文重点利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱方法, 对赋石墨矿变沉积岩系的石英岩开展锆石原位 U-Pb 同位素测年。【研究结果】大别造山带核部发育中元古代“石墨片岩-石英岩夹大理岩”变沉积岩系, 为一套浅海相沉积、成熟度高的砂岩。石英岩原岩的碎屑锆石年龄峰值主要为 2.55 Ga、2.06 Ga、1.86 Ga 及 1.43 Ga, 最年轻峰值年龄 1.43 Ga 约束了原岩沉积时代下限。这套变沉积岩原岩沉积时代为中元古代晚期, 其沉积物源可能主要来自扬子陆块基底。【结论】吕王—高桥混杂岩带保留了大别山核部较早的海相沉积记录, 并为区域石墨成矿提供了物质基础。该变沉积岩系原岩可能形成于中元古代哥伦比亚超大陆裂解期的扬子陆块边缘海盆地。

**关键词:** 混杂岩带; 石墨矿; 沉积岩系; 年代学; 地质构造; 地质调查工程; 扬子陆块北缘

**创新点:** 新报道大别山核部吕王—高桥混杂岩带中元古代“石墨片岩-石英岩夹大理岩”变沉积岩系, 暗示大别山地区发育中元古代古洋(海)盆, 反映扬子陆块在哥伦比亚超大陆裂解期的伸展体系。中元古代海相沉积岩系是区域石墨成矿的物质基础。

中图分类号: P619.252 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)05-1735-13

## Detrital zircon U-Pb age of graphite-hosting meta-sedimentary rocks in the Lüwang-Gaoqiao mélange belt, western Dabie area: Constraints on Mesoproterozoic marine sedimentary events

ZHU Jiang<sup>1,2,3</sup>, CHEN Chao<sup>2,4</sup>, LI Zhanke<sup>3,5</sup>, WU Bo<sup>4</sup>, WANG Guanghong<sup>6</sup>, PENG Lianhong<sup>7</sup>

收稿日期: 2021-01-07; 改回日期: 2022-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172103)、湖北省自然科学基金项目(2023AFD206)、资源与生态环境地质湖北省重点实验室开放基金资助项目(HBREGKFJJ-202302)、地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费(GPMR202424)联合资助。

作者简介: 朱江, 男, 1985 年生, 高级工程师, 主要从事矿床学、地球化学研究; E-mail: zhujiang.01@foxmail.com。

(1. Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment, College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-environment Geology (Hubei Geological Bureau), Wuhan 430034, Hubei, China; 3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China; 5. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 6. No.605 of Sichuan Province Metallurgy Geological Bureau, Meishan 620860, Sichuan, China; 7. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China)

**Abstract:** This paper is the result of geological survey engineering.

**[Objective]** To better understand the Paleo–Mesoproterozoic tectonic evolution of the Dabie orogen in the northern margin of Yangtze Block, we demonstrated the geological and geochronological characteristics for sedimentary rocks in the Lüwang–Gaoqiao mélange. **[Methods]** Geological mapping for the mélange was conducted. LA–ICP–MS zircon U–Pb isotopic analyses were carried out on the graphite-bearing quartzite. **[Results]** The graphite-bearing sedimentary rocks in Lüwang–Gaoqiao mélange are dominated by sandstones with high maturity, siliceous argillaceous rock, and carbonaceous. U–Pb dating reveals that the graphite-bearing quartzite has original deposition age of ~1.43 Ga, displaying detrital zircon age peaks at 2.55 Ga, 2.06 Ga, 1.86 Ga and 1.43 Ga. The sedimentary materials mainly came from the basement of the Yangtze Block. **[Conclusions]** The Mesoproterozoic clastic sedimentary rocks and carbonates from the Lüwang–Gaoqiao mélange were formed in a continental margin setting. They recorded an extensional regime for the Dabie orogen in the northern margin of Yangtze Block, during the break-up of the Columbia supercontinent.

**Key words:** mélange; graphite deposit; sedimentary rocks; geochronology; tectonics; geological survey engineering; northern margin of the Yangtze Block

**Highlights:** Mesoproterozoic sedimentary rocks and carbonates in the Dabie orogen are newly identified. The Mesoproterozoic oceanic extensional regime was developed in the Dabie orogen during the break-up of the Columbia supercontinent. The Mesoproterozoic sedimentary rocks provided materials for the graphite ore-forming.

**About the first author:** ZHU Jiang, male, born in 1985, senior engineer, mainly engaged in the research of mineral deposit and geochemistry; E-mail: [zhujiang.01@foxmail.com](mailto:zhujiang.01@foxmail.com).

**Fund support:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42172103), Hubei Provincial Natural Science Foundation of China (No.2023AFD206), Open Fund of Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-Environment Geology (No.HBREGKFJJ–202302), Most Special Fund from State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences (No.GPMR202424).

## 1 引 言

混杂岩是由基质和块体组成的内部无序的岩石混杂体,属造山带内最常见的地质体和基本的大地构造相单元(闫臻等, 2018)。蛇绿混杂岩和增生杂岩的结构、组成与时空配置记录了古大洋板块地层系统发展及大陆地壳侧向与垂向增生历史(Huang et al., 2018; 闫臻等, 2018; 李廷栋等, 2019; 陈柏林等, 2023; 张金明等, 2023),是大洋板块地质学的重要研究对象。大别造山带属于东秦岭造山带的东延部分,位于扬子板块与华北板块之间结合部位,经历了多期复合造山演化历史(张国伟等, 2001; Wu and Zheng, 2013)。区内广泛出露的中高

级变质岩系(如红安岩群、大别岩群和浒湾岩群等)可能记录了大别地区前寒武纪的地质演化。目前大别造山带前寒武纪地质研究一般聚焦于岩浆岩研究(Wu et al., 2008, 2014; Wu and Zheng, 2013; Zhu et al., 2019),对记录了沉积作用的副变质岩研究较为薄弱,制约了对大别地区古大洋板块地质演化与成矿的深入认识。

吕王—高桥混杂岩带是1:25万麻城市幅区域地质调查从红安岩群中新解体出的混杂岩带,呈近NNW走向贯穿西大别地区(彭练红等, 2003<sup>①</sup>)。该混杂岩带主要由一套经过强烈变质的变泥砂质深海相沉积岩(白云钠长片麻岩、白云石英片岩和浅粒岩等)和复杂岩块(超镁铁质岩岩块、镁铁质岩

岩块、硅泥质岩岩块和碳酸盐岩岩块)组成。关于其形成时限存在中元古代(吴波等, 2017<sup>②</sup>)、古生代(彭练红等, 2003<sup>①</sup>)及早中生代(徐扬等, 2021)的不同认识; 对其岩石结构特征、构造演化过程和古地理属性至今仍不清楚。本文报道了吕王—高桥混杂岩带赋石墨矿变沉积岩系原岩的岩石组合特征和沉积时限, 为揭示大别地区中元古代海相沉积事件提供了新证据, 对深入认识大别造山带前寒武纪演化及石墨成矿具有科学意义。

## 2 地质背景

大别造山带地处中国中部, 大地构造上是东秦岭造山带的东延, 属华北和扬子两大板块拼合部位。从太古宙至早中生代, 该区域经历了多期次、多阶段的碰撞—扩张—聚合的演化过程(张国伟等, 2001; Wu and Zheng, 2013)。新元古代晚期—早中

生代初期板块俯冲—碰撞的构造体制造就了大别造山带的基本构造格局(张国伟等, 2001)。三叠纪后, 华北板块和华南板块拼合, 大别造山带进入陆内演化阶段。早白垩世, 大别地区先后发生了地壳加厚、下地壳垮塌拆沉和地壳强烈伸展, 导致了大规模的岩浆活动和强烈的成矿作用(张超和马昌前, 2008; Chen et al., 2016; Xu et al., 2016)。以桐柏—磨子潭断裂(商丹缝合带的东延)为界, 大别造山带可分为北淮阳构造带和大别构造带两个构造单元(张国伟等, 2001; 钟增球等, 2001)。以商麻断裂为界, 大别造山带又分为西大别地区和东大别地区。

西大别地区在形状上呈一个楔形体(图 1)。根据变质程度及原岩特征, 该区主要岩石构造单元由北向南分为: 泥盆系南湾组复理石带、新元古界定远组火山—沉积建造、肖家庙岩组、新县

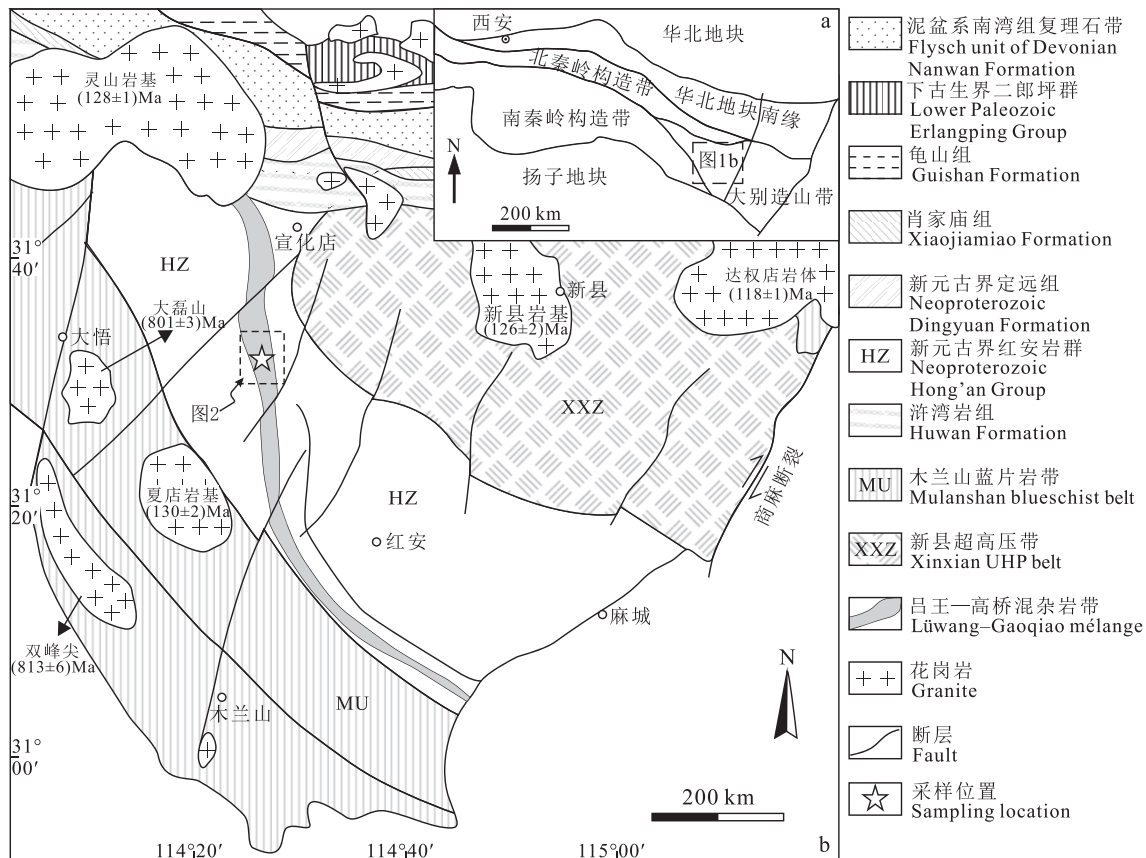


图 1 西大别地区大地构造位置图(a)和区域地质简图(b)(据 Liu et al., 2004 修改)

花岗岩体同位素年龄据 Xu et al. (2007), 张超和马昌前 (2008), Chen et al. (2016)。

Fig.1 Tectonic location (a) and geological sketch map (b) of the western Dabie area (modified from Liu et al., 2004)

The isotopic ages of granites from Xu et al. (2007), Zhang Chao and Ma Changqian (2008), Chen et al. (2016).

超高压带、红安岩群和木兰山蓝片岩-绿片岩带 (Liu et al., 2004)。区域主要岩石类型为各种类型片麻岩、片岩及混合岩,其次为榴辉岩、退变榴辉岩、超镁铁质岩及中酸性岩,呈透镜状或团块状产于片麻岩和片岩中。此外有少量大理岩团块出露,分布相对较局限(如双河、红安、浒湾、五庙等地)。区域在各个地质时期均发育不同程度的岩浆活动,并以新元古代和白垩纪中酸性侵入岩出露最为广泛(钟增球等, 2001; 张超和马昌前, 2008; Zhu et al., 2019)。

### 3 吕王—高桥混杂岩带的岩石组合特征

吕王—高桥混杂岩带出露于宣化店—高桥—永佳河一带,其西北端被早白垩纪灵山岩基截断,而东南端被麻城—新洲盆地公安寨组砂砾岩和第四系覆盖。该混杂岩带经历了多期次强烈剪切变形,可分为岩块和基质两个基本组成部分(图2, 图3)。基质与岩块间主要为构造接触,岩块延伸方向与基质片理基本一致。

#### 3.1 基质

基质物质主要包括白云钠长片麻岩、白云石英片岩和浅粒岩等,主要矿物组合为钠长石+石英+白云母。由于钠长石变质结晶能力较石英强,细小钠长石颗粒在变质作用改造过程中容易形成粗大钠长石变斑晶,同时包裹大量细粒石英。基质原岩主体为泥质深水沉积岩。

#### 3.2 岩块

岩块组成复杂,主要有榴辉岩(榴闪岩)、斜长

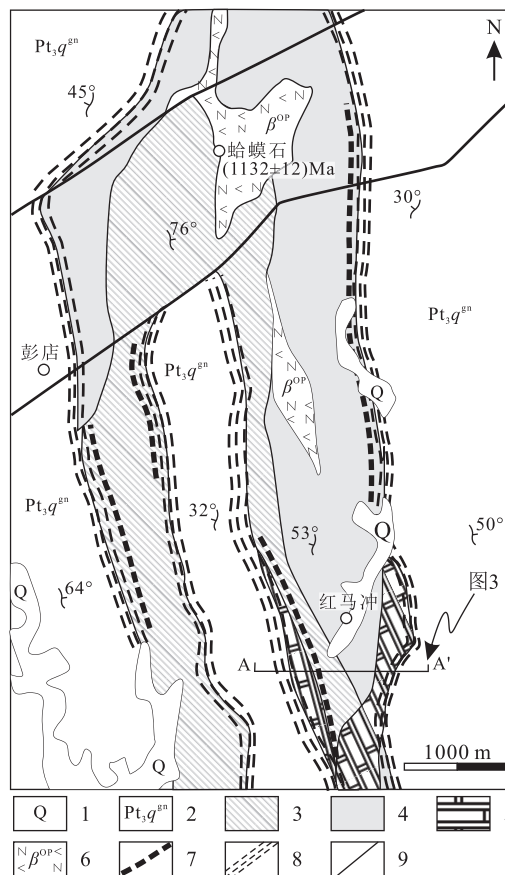


图2 吕王—高桥混杂岩带及红马冲石墨矿区地质图  
1—第四系; 2—红安岩群; 3—基质, 白云石英片岩; 4—硅泥质岩岩块; 5—碳酸盐岩岩块; 6—变基性岩岩块; 7—石墨片岩; 8—韧性剪切带; 9—断裂; 蛤蟆石变基性岩( $\beta^{OP}$ )原岩同位素 U-Pb 年龄据吴波等(2017)。

Fig.2 Geological map of the Hongmashong graphite deposit in the Lüwang-Gaoqiao mélangé belt  
1-Quaternary; 2-Hong'an Group; 3-Matrix, mica-quartz schist; 4-Siliceous argillaceous rock; 5-Carbonaceous; 6-Meta-mafic rock; 7-Graphite schist; 8-Ductile shear zone; 9-Fault; Protoliths U-Pb age of the Hamashi meta-mafic rock ( $\beta^{OP}$ ) after Wu Bo et al. (2017)。

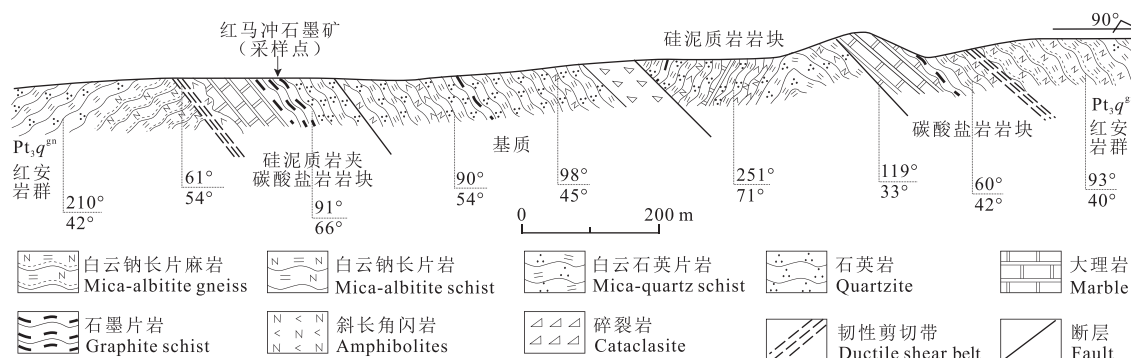


图3 湖北省大悟县吕王—高桥混杂岩带剖面图

Fig.3 Profile map of the Lüwang-Gaoqiao mélangé belt, Dawu County, Hubei Province



角闪岩、蛇纹石化橄榄岩、大理岩、变硅泥质岩等, 岩块与基质之间呈片理化平行接触。

榴辉(闪)岩块呈透镜状、脉状、带状及豆荚状等形式产出, 大多数与围岩呈片理化平行接触, 常具片理化, 其围岩多为绿片岩。斜(钠)长角闪岩块呈黑色, 主要由斜(钠)长石和角闪石组成, 偶含石榴石, 原岩为基性火山岩。

蛇纹石化橄榄岩和蛇纹岩岩块局部出露面积较大, 一般长 30~300 m, 宽 5~50 m。主要矿物为橄榄石、蛇纹石, 原岩为超基性岩。

硅泥质岩岩块(图 4a)主要岩性为含石墨白云片岩、石墨白云石英片岩、石墨片岩、条带状硅质岩等, 原岩为含钙质、碳质及泥砂质浅海相陆源碎屑沉积岩。

大理岩岩块(图 4b)呈北西向分布, 在吕王镇一带出露良好, 局部达到石材矿点规模。其主要岩性

为方解石大理岩、少量白云石大理岩, 呈白—灰白色, 具变晶结构, 块状构造, 局部呈条带状。

#### 4 红马冲矿区及含石墨岩系地质特征

在吕王—高桥混杂岩带的硅泥质岩和大理岩块中产有沉积变质型石墨矿。新发现的红马冲石墨矿区圈定矿体 6 处, 受岩层控制, 呈条带状或似层状, 发育于仙居顶复式背斜西翼。矿体走向为北西或近南北向。矿石岩性为石墨片岩, 与大理岩和石英岩空间关系密切。中酸性侵入岩在矿区附近未见出露。

石墨矿体沿走向延伸 300~850 m, 平均厚度为 1.20~3.89 m。以Ⅲ号矿体为例: 矿体倾向约为 71°, 倾角约为 60°, 控制厚度为 0.78 m, 捡块样固定碳平均品位为 6.18%。其含矿层沿走向长约 1 km, 有膨大或缩小现象, 厚薄不均匀。石墨呈鳞片状, 片径

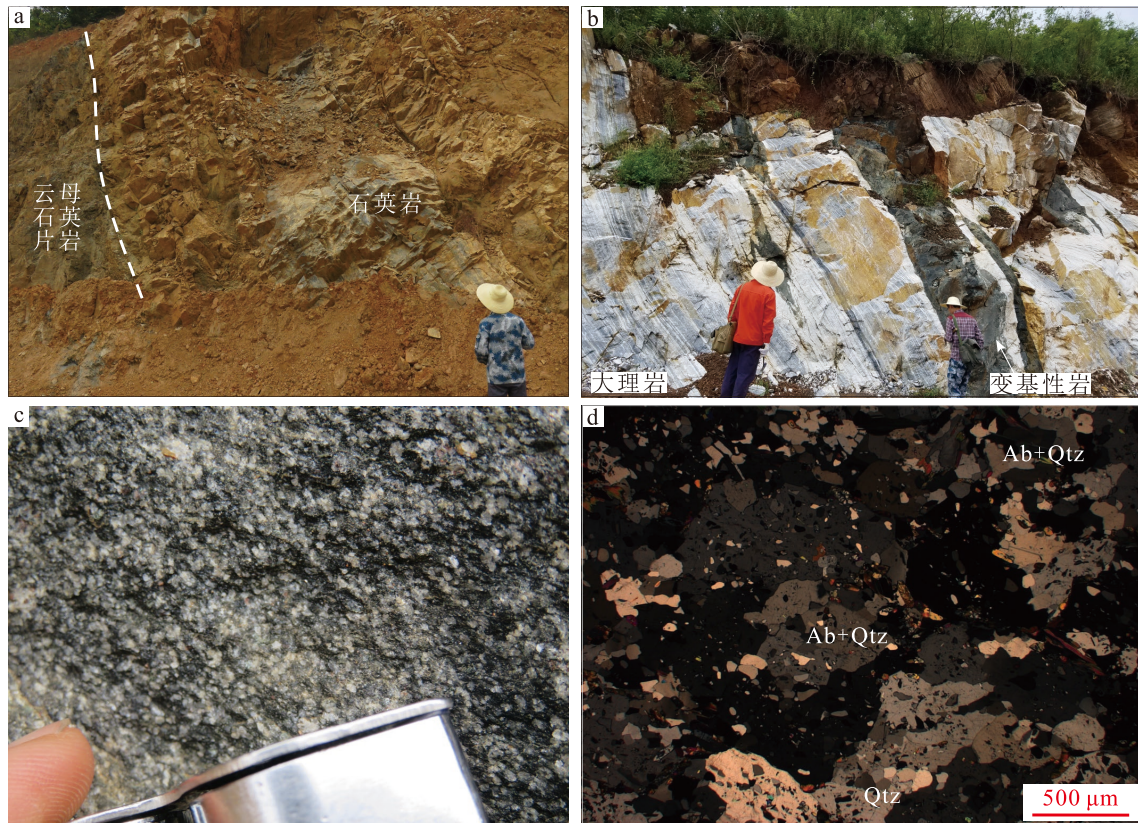


图 4 吕王—高桥混杂岩基质和岩块露头及镜下显微特征

a—硅泥质岩岩块露头; b—大理岩岩块露头; c—基质, 钠长石英变粒岩手标本; d—基质, 钠长石英变粒岩镜下特征; Ab—钠长石; Qtz—石英  
Fig.4 Outcrops and photomicrographs of the Lüwang-Gaoqiao mélange belt  
a—Outcrop of siliceous argillaceous rock; b—Outcrop of marble; c—Hand specimen of albite quartz granulite, showing petrology of the matrix;  
d—Photomicrograph of albite quartz granulite; Ab—Albite; Qtz—Quartz



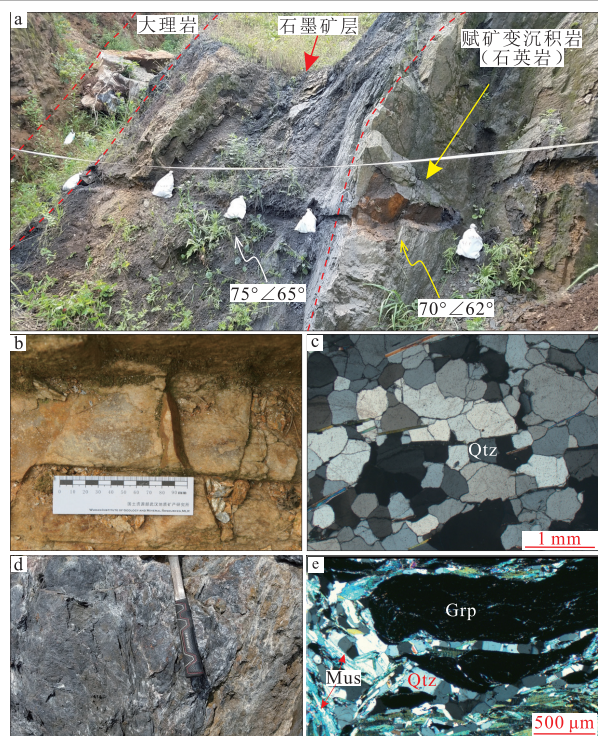


图 5 红马冲石墨矿区矿化露头及赋矿变沉积岩特征  
a—石墨矿层岩石组合特征; b—石墨矿底板石英岩; c—石英岩正交偏光镜下显微特征; d—石墨矿石, 固定碳含量为 5%; e—石墨矿石正交偏光镜下显微特征; Grp—石墨; Mus—白云母; Qtz—石英

Fig.5 Photographs and photomicrographs showing graphite ores and graphite-bearing rock series of the Hongmashong graphite deposit in the Lüwang-Gaoqiao mélange belt  
a—Rock association of the graphite ore seam; b—Quartzite in the graphite floor; c—Photomicrograph of quartzite; d—Graphite ore, with fixed carbon of 5%; e—Photomicrographs of graphite ore; Grp—Graphite; Mus—Muscovite; Qtz—Quartz

一般为 0.002~0.03 mm, 属细鳞片晶质石墨。矿石岩性主要为石墨片岩, 其次为含石墨白云石英片岩。矿体与石英岩和大理岩呈整合接触(图 5)。含矿建造为石英岩+石墨片岩+大理岩, 原岩为一套海相沉积岩系的组合。石英岩呈中—厚层状产出, 中细粒变晶结构, 原岩为成熟度较高的泥砂质沉积岩。

## 5 样品和分析方法

本研究选取吕王—高桥混杂岩带红马冲石墨矿区的赋矿石英岩用于锆石年代学研究。石英岩样品(TC32-Zr)采自红马冲石墨矿区, 与石墨片岩和大理岩空间关系密切, 为赋石墨矿变沉积岩系。岩石中石英含量高达 95% 以上, 重约 10 kg。

锆石分选在广州拓岩分析技术有限公司完成, 原岩样品经常规粉碎、磁选和重液分选, 得到纯度

较高的锆石, 然后在双目镜下经人工挑选出纯度在 99% 以上的锆石。在双目镜下对锆石进行分类, 挑选晶形完好、未蚀变的锆石颗粒制成样品靶, 对锆石进行了透射光、反射光和阴极发光照相。选择样品靶中环带结构发育较好、裂隙较少的锆石, 采用 LA-ICP-MS 技术进行 U-Pb 同位素测定。可见光显微照片和阴极发光图像在武汉上谱分析科技有限责任公司实验室完成, 锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 质谱仪为 Agilent 7500a。本次测试中采用的激光剥蚀束斑直径为 32  $\mu\text{m}$ , 能量密度为 10  $\text{J}/\text{cm}^2$ 。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度, 二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气, 以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密密度(Hu et al., 2008)。另外, 激光剥蚀系统配置了一个信号平滑装置(Hu et al., 2012)。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正, 每分析 5 个样品点, 分析 2 次 91500。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移, 利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行校正(Liu et al., 2010)。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据文献(Wiedenbeck et al., 2007)。详细的仪器操作条件和数据处理方法见 Liu et al.(2010)。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu et al., 2010)完成, 所给定的同位素比值和年龄的误差(标准偏差)在  $1\sigma$  水平。锆石 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算均利用 Isoplot(Ludwig, 2003)完成。

## 6 测试结果

样品 TC32-Zr 的锆石呈无色—浅褐色, 颗粒大小中等, 长度 80~150  $\mu\text{m}$ , 宽 50~80  $\mu\text{m}$ 。阴极发光图像(图 6a)显示, 锆石核部发育清晰的单期生长的同心环带特征, 边部具有弱分带的变质增生边。锆石核部呈浑圆状, 具有一定磨圆和搬运痕迹。所选择

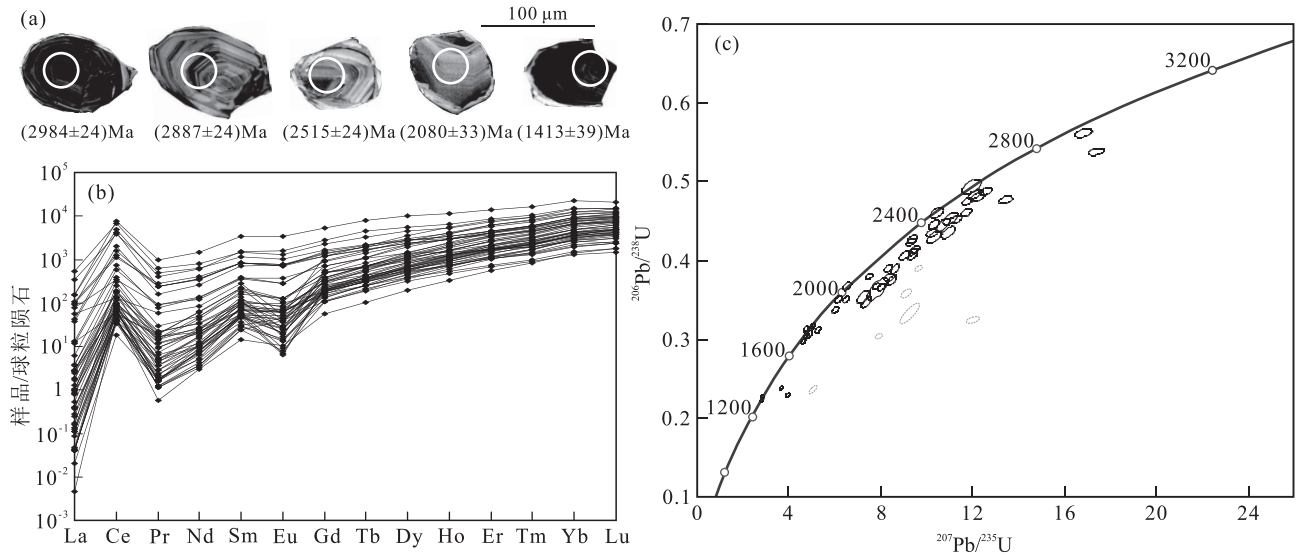


图 6 石墨赋矿石英岩代表性锆石阴极发光图像(a)、锆石稀土元素配分模式图(b)和锆石 U-Pb 年龄谐和图(c)  
Fig.6 Cathodoluminescence images (a) and chondrite-normalized REE patterns of zircons (b), zircon U-Pb Concordia diagram (c) of the graphite-bearing quartzite in the Lüwang-Gaoqiao mélange belt

激光分析测点均选在锆石核部,位于岩浆锆石韵律环带发育部位,其 Th/U 比值范围主要为 0.07~1.97,具有与岩浆锆石类似的稀土元素配分模式(图 6b)。

本次工作对 54 颗锆石进行了 54 个测点的 LA-ICP-MS 分析(表 1,图 6c)。对 6 个谐和度低于 93% 的锆石数据点剔除后,获得 48 个有效数据点的 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 表观年龄范围为 (3315±22)~(1413±39) Ma。其中 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄在 3105~2263 Ma 区间的数据点有 33 个,占 69%;年龄在 2150~1989 Ma 的数据点有 6 个,占 13%;年龄在 1900~1803 Ma 的数据点有 7 个,占 15%;年龄在 1433~1413 Ma 的数据点有 2 颗,占 4%,限定了最年轻的年龄峰值。在 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 表观年龄频谱图(图 7a),样品具有 4 组主要年龄峰值:2.55 Ga、2.06 Ga、1.86 Ga 和 1.43 Ga。

## 7 讨论

### 7.1 物源分析

石墨赋矿石英岩的碎屑锆石表现出 4 组主要 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄峰值,分别为 2.55 Ga、2.06 Ga、1.86 Ga 及 1.43 Ga。

3105~2263 Ma 年龄区间:样品中该年龄区间锆石有 33 颗,所占有效锆石总数比例为 69%,年龄峰值约为 2.55 Ga。该年龄区间与太古宙—古元古代早期全球古陆核形成阶段相对应,并与扬子陆块北缘崆岭杂岩深变质结晶基底的记录相吻合(Guo et

al., 2015)。西大别地区大别岩群和黄土岭麻粒岩也有太古宙—早元古代年龄记录( Wu et al., 2008, 2014; Hu et al., 2013),均暗示了在大别山地区太古宙—古元古界陆核基底的存在。

2150~1989 Ma 年龄区间:该年龄区间的锆石有 6 颗,占有有效锆石总数比例为 13%,年龄峰值为 2060 Ma。该年龄区间与全球范围内 2.1~1.95 Ga 与 Columbia 超大陆汇聚增生演化有关的构造岩浆事件时间相吻合(Zhao and Cawood, 2012)。在扬子陆块西北缘的黄陵地区黄梁河组及相关孔兹岩系均有一系列年代学记录(邱啸飞等, 2016)。

1900~1803 Ma 年龄区间:该年龄区间的锆石有 7 颗,占有有效锆石总数比例为 15%,年龄峰值约为 1856 Ma。该年龄区间的碎屑物质可能与古元古代扬子陆块造山后伸展—岩浆事件存在联系。扬子陆块北缘保留了广泛的 1.8~1.6 Ga 时期拉张岩浆—火山记录,如黄陵地区白竹坪火山岩((1852±16) Ma; 刘浩等, 2017)、A 型花岗岩及基性岩脉(1.85 Ga; Peng et al., 2009, 2012),解释为古元古代造山后伸展—岩浆事件,反映了扬子陆块对 Columbia 全球超大陆演化的响应(Peng et al., 2009, 2012)。西大别浒湾岩组也存在 1.86 Ga 伸展体系记录,暗示大别地块在该时期已接近扬子陆块,且经历该期造山后伸展—岩浆事件。

1433~1413 Ma 年龄区间:该年龄区间的锆石

表 1 吕王—高桥混杂岩带红马冲石墨矿赋矿石英岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon isotopic U-Pb data of the graphite-bearing quartzite from the Hongmachong graphite deposit in the Lüwang-Gaoqiao mélange belt

样品点号	元素含量/ $10^{-6}$			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
TC32-Zr@01	447	174	372	0.47	0.1838	0.0028	12.2248	0.1986	0.4806	0.0038	2688	26	2622	15	2530	16
TC32-Zr@02	529	238	432	0.55	0.1839	0.0026	11.7244	0.1639	0.4606	0.0033	2689	29	2583	13	2442	15
TC32-Zr@03	1094	564	585	0.96	0.1793	0.0025	11.7937	0.1515	0.4752	0.0031	2646	18	2588	12	2506	14
TC32-Zr@04	307	121	264	0.46	0.1807	0.0028	12.1086	0.1793	0.4840	0.0040	2661	25	2613	14	2545	17
TC32-Zr@05	756	314	759	0.41	0.1732	0.0028	10.3402	0.1985	0.4297	0.0052	2589	28	2466	18	2304	23
TC32-Zr@06	357	169	258	0.66	0.1757	0.0031	11.0495	0.2104	0.4530	0.0050	2613	30	2527	18	2409	22
TC32-Zr@07	93	43.2	52.4	0.82	0.1753	0.0039	11.9728	0.2732	0.4940	0.0062	2609	37	2602	21	2588	27
TC32-Zr@08	445	219	401	0.55	0.1653	0.0025	9.4196	0.1315	0.4112	0.0029	2511	26	2380	13	2221	13
TC32-Zr@09	796	326	1183	0.28	0.1589	0.0025	8.3790	0.1594	0.3784	0.0031	2444	28	2273	17	2069	15
TC32-Zr@10	436	196	424	0.46	0.1671	0.0026	10.3198	0.1610	0.4454	0.0036	2529	27	2464	14	2375	16
TC32-Zr@11	840	406	766	0.53	0.1801	0.0029	11.2765	0.1728	0.4519	0.0034	2653	26	2546	14	2403	15
TC32-Zr@12	675	387	508	0.76	0.1606	0.0025	9.0476	0.1505	0.4063	0.0036	2461	26	2343	15	2198	16
TC32-Zr@13	390	231	440	0.53	0.1339	0.0021	6.4915	0.0983	0.3504	0.0025	2150	26	2045	13	1936	12
TC32-Zr@14	502	314	520	0.60	0.1271	0.0020	6.1662	0.1007	0.3507	0.0029	2059	28	2000	14	1938	14
TC32-Zr@15	1078	560	612	0.91	0.2076	0.0031	13.5744	0.2030	0.4729	0.0032	2887	24	2720	14	2496	14
TC32-Zr@16	258	121	194	0.62	0.1643	0.0028	10.4576	0.1876	0.4607	0.0045	2502	28	2476	17	2443	20
TC32-Zr@17	291	227	266	0.85	0.1103	0.0019	4.7688	0.0832	0.3132	0.0026	1803	31	1779	15	1756	13
TC32-Zr@18	735	419	641	0.65	0.1602	0.0022	8.6314	0.1351	0.3894	0.0038	2458	23	2300	14	2120	18
TC32-Zr@19	732	610	442	1.38	0.1156	0.0018	5.0681	0.0757	0.3171	0.0022	1900	28	1831	13	1776	11
TC32-Zr@20	502	236	502	0.47	0.1594	0.0023	9.3390	0.1383	0.4237	0.0032	2450	25	2372	14	2277	15
TC32-Zr@21	1010	632	747	0.85	0.1548	0.0023	8.3479	0.1270	0.3898	0.0031	2400	24	2270	14	2122	14
TC32-Zr@22	303	155	237	0.65	0.1592	0.0025	9.3966	0.1467	0.4273	0.0035	2447	27	2377	14	2293	16
TC32-Zr@23	520	403	418	0.96	0.1159	0.0018	4.9137	0.0921	0.3061	0.0036	1894	27	1805	16	1721	18
TC32-Zr@24	405	179	254	0.71	0.1704	0.0028	10.2423	0.1682	0.4348	0.0033	2561	28	2457	15	2327	15
TC32-Zr@25	529	334	723	0.46	0.1140	0.0018	4.9420	0.0748	0.3137	0.0021	1865	29	1809	13	1759	10
TC32-Zr@26	263	200	334	0.60	0.1477	0.0027	7.2631	0.1835	0.3539	0.0056	2320	31	2144	23	1953	27
TC32-Zr@27	989	390	555	0.70	0.2205	0.0033	16.9669	0.2513	0.5564	0.0037	2984	24	2933	14	2852	15
TC32-Zr@28	731	457	572	0.80	0.1429	0.0022	7.4939	0.1119	0.3794	0.0026	2263	32	2172	13	2073	12
TC32-Zr@29	580	354	338	1.05	0.1740	0.0026	10.7121	0.1921	0.4450	0.0054	2598	25	2498	17	2373	24
TC32-Zr@30	650	316	356	0.89	0.1864	0.0027	12.5810	0.1792	0.4879	0.0032	2710	29	2649	13	2561	14
TC32-Zr@31	1055	439	602	0.73	0.2377	0.0033	17.5185	0.2297	0.5326	0.0029	3105	22	2964	13	2752	12
TC32-Zr@32	662	388	1017	0.38	0.1534	0.0021	7.8044	0.1100	0.3675	0.0028	2384	24	2209	13	2018	13
TC32-Zr@33	1302	876	1050	0.83	0.1586	0.0020	8.0541	0.1146	0.3667	0.0031	2443	21	2237	13	2014	14
TC32-Zr@34	557	583	767	0.76	0.0904	0.0015	2.7981	0.0460	0.2237	0.0017	1433	27	1355	12	1301	9
TC32-Zr@35	241	146	229	0.64	0.1287	0.0024	6.5433	0.1267	0.3673	0.0032	2080	33	2052	17	2017	15
TC32-Zr@36	601	390	681	0.57	0.1293	0.0021	6.0315	0.0923	0.3372	0.0025	2089	28	1980	13	1873	12
TC32-Zr@37	707	417	383	1.09	0.1816	0.0027	10.9645	0.1999	0.4357	0.0049	2733	25	2520	17	2331	22
TC32-Zr@38	439	168	566	0.30	0.1674	0.0025	9.3899	0.1326	0.4056	0.0030	2532	25	2377	13	2195	14
TC32-Zr@39	463	224	441	0.51	0.1657	0.0023	9.5131	0.1327	0.4147	0.0028	2515	24	2389	13	2236	13
TC32-Zr@40	502	97.4	1309	0.07	0.1222	0.0016	5.2861	0.0757	0.3121	0.0025	1989	24	1867	12	1751	12
TC32-Zr@41	432	443	578	0.77	0.0894	0.0016	2.8185	0.0486	0.2279	0.0018	1413	39	1360	13	1324	10
TC32-Zr@42	422	281	669	0.42	0.1130	0.0018	4.6446	0.0704	0.2972	0.0025	1848	28	1757	13	1677	12
TC32-Zr@43	459	353	391	0.90	0.1136	0.0019	4.7652	0.0778	0.3035	0.0026	1857	30	1779	14	1709	13
TC32-Zr@44	592	584	988	0.59	0.1252	0.0019	3.9571	0.0602	0.2287	0.0020	2032	23	1625	12	1328	10
TC32-Zr@45	1135	693	899	0.77	0.1636	0.0025	8.4855	0.1481	0.3749	0.0043	2493	23	2284	16	2052	20
TC32-Zr@46	45.3	18.0	65.9	0.27	0.1569	0.0072	7.8727	0.3014	0.3638	0.0093	2423	80	2217	34	2000	44
TC32-Zr@47	1183	883	1037	0.85	0.1777	0.0023	9.5934	0.1195	0.3900	0.0025	2631	18	2397	11	2123	12
TC32-Zr@48	656	370	882	0.42	0.1540	0.0022	7.3997	0.1448	0.3467	0.0048	2391	24	2161	18	1919	23
TC32-Zr@49	1212	1288	927	1.39	0.1839	0.0030	9.1221	0.1488	0.3589	0.0036	2688	22	2350	15	1977	17
TC32-Zr@50	1400	2556	1298	1.97	0.1649	0.0026	5.6473	0.1224	0.2469	0.0037	2506	27	1923	19	1422	19
TC32-Zr@51	1257	1616	1547	1.04	0.1885	0.0026	7.9220	0.1050	0.3035	0.0018	2729	20	2222	12	1709	9
TC32-Zr@52	735	1126	671	1.68	0.2007	0.0032	9.2502	0.2940	0.3321	0.0091	2832	27	2363	29	1849	44
TC32-Zr@53	1202	1406	1431	0.98	0.2667	0.0043	12.0093	0.1948	0.3246	0.0026	3287	23	2605	15	1812	13
TC32-Zr@54	637	911	1545	0.59	0.1121	0.0015	3.6978	0.0473	0.2389	0.0017	1834	20	1571	10	1381	9



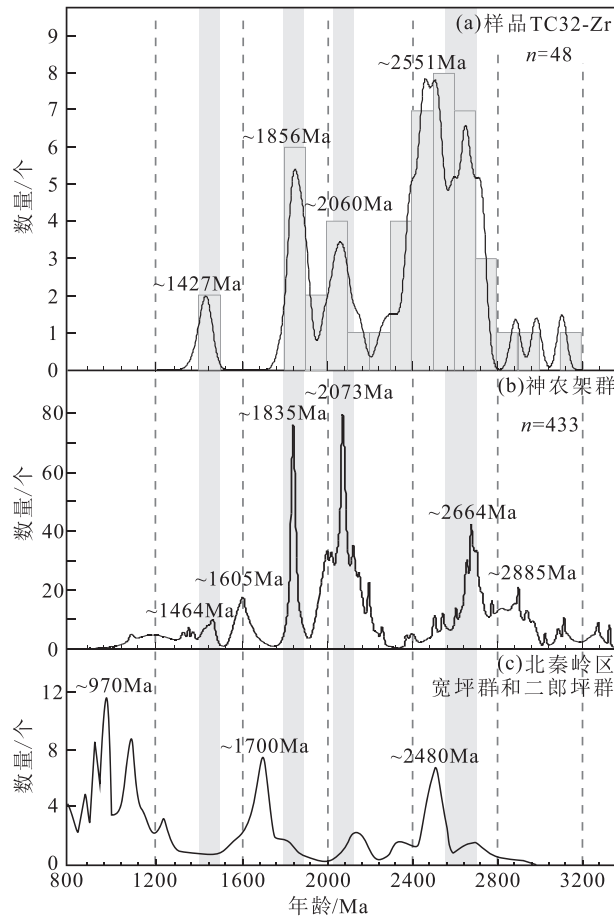


图 7 吕王—高桥混杂岩中石英岩的碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄频率直方图(a)及其与神农架群(b)、宽坪群和二郎坪群(c)年龄谱系特征对比

扬子陆块西北缘神农架群碎屑锆石年龄据肖志斌(2012)、Wang et al.(2013)、徐大良等(2016)、李怀坤等(2016);北秦岭地区宽坪群和二郎坪群碎屑锆石年龄据 Liu et al.(2013)

Fig.7  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ages histogram of detrital zircons of the graphite-bearing quartzite in the Lüwang-Gaoqiao mélange belt (a) and comparison with data of the Shennongjia Group (b), Kuanping and Erlangping Groups (c)

Detrital zircon ages of Shennongjia Group in northwestern Yangtze Block from Xiao Zhibin (2012), Wang et al. (2013), Xu Daliang et al. (2016) and Li Huaikun et al. (2016); The data of Kuanping Group and Erlangping Group in the North Qinling belt from Liu et al. (2013)

有 2 颗, 占有效锆石总数比例为 4%, 限定了样品最年轻的峰值 1427 Ma。中元古代晚期地层在扬子地块北缘及西北缘均有不同程度发育, 其中神农架群和打鼓石群形成于约 1.4~1.0 Ga(肖志斌, 2012; 李怀坤等, 2016; 耿元生等, 2017)。新元古界随县群低  $\delta^{18}\text{O}$  值的碎屑锆石中亦记录了约 1.39 Ga 的峰值年龄(Yang et al., 2016)。该年龄段碎屑物质可能与 Columbia 超大陆裂解事件相关。

综合对比碎屑锆石 U-Pb 年龄频率特征发现, 吕王—高桥混杂岩带石英岩的 2.55 Ga、2.06 Ga、1.86 Ga 及 1.43 Ga 碎屑锆石年龄峰谱特征与扬子陆块西北缘神农架群(肖志斌, 2012; Wang et al., 2013; 李怀坤等, 2016; 徐大良等, 2016)较为相似, 而与北秦岭区宽坪群和二郎坪群(Liu et al., 2013)表现差异。北秦岭地层区宽坪群、二郎坪群、龟山群碎屑锆石年龄谱中存在约 1.7 Ga 的明显峰值(Liu et al., 2013), 这与华北陆块南缘熊耳群火山-沉积岩形成时限(1800~1700 Ma; Wang et al., 2010)吻合, 并未出现在本次研究石英岩年龄谱系中。因此, 吕王—高桥混杂岩带含石墨沉积岩系原岩的物源主要由扬子陆块基底贡献。

## 7.2 对中元古代海相沉积事件约束

吕王—高桥混杂岩带的物质组成可分为岩块和基质两个部分。基质原岩主体为泥质沉积岩; 岩块组成复杂, 包括榴辉岩(榴闪岩)、斜长角闪岩、蛇纹石化橄榄岩、大理岩、变硅泥质岩等。大别造山带经历了强烈的多期构造和变质过程, 可能导致吕王—高桥混杂岩带发生了构造肢解或改造, 增加了其内部结构研究难度。对该混杂岩带的构造属性存在“蛇绿混杂岩带”(彭练红等, 2003<sup>①</sup>; 吴波等, 2017<sup>②</sup>)和“俯冲-折返带”(徐扬等, 2021)等不同认识。对该混杂带内物质组成和结构解剖, 有助于认识其构造演化历史。

U-Pb 年代学结果表明, 红马冲含石墨沉积建造的碎屑锆石最年轻年龄值为 1413 Ma, 提供了中元古代浅海相沉积事件的新证据。矿区附近硅泥质岩块中产出蛤蟆石变基性岩原岩年龄为  $(1132\pm 12)\text{Ma}$ (吴波等, 2017<sup>②</sup>), 限定了硅泥质岩块的最小沉积年龄。因此, 红马冲含石墨沉积建造的沉积时代为 1413~1132 Ma。

在吕王—高桥混杂岩带红马冲矿区附近变质(超)基性岩块(钠长角闪片岩、含榴斜长角闪岩及榴辉岩)原岩年龄分别为  $(1132\pm 12)\text{Ma}$ (吴波等, 2017<sup>②</sup>)、 $(1105\pm 13)\text{Ma}$ (徐扬等, 2021)和  $(1068\pm 23)\text{Ma}$ (汪晶等, 2009), 锆石 Hf 同位素特征表明其原岩起源于亏损地幔(汪晶等, 2009), 进一步暗示了中元古代洋壳形成和发育。区域硅泥质变质岩、石墨片岩、石英岩与大理岩空间关系密切, 局部出露(超)基性岩块, 共同反映了一套中元古代海相硅泥质沉

积岩、高成熟度砂岩、碳酸盐岩与(超)基性岩浆岩的组合,其形成时代约束为 1.4~1.1 Ga。另外,武当—随枣—大别地区广泛发育新元古代约 750 Ma 裂谷伸展背景的火山—沉积建造及侵入岩活动(Wu et al., 2008; Zhu et al., 2019; 朱江等, 2021),该期热事件的年龄记录在扬子陆块年龄谱系中有明显的峰值,但在吕王—高桥混杂岩带内硅泥质岩碎屑锆石年龄记录中缺少反映,进一步暗示本文揭示的中元古代海相沉积作用在新元古代中期前已经结束。

秦岭—大别地区在新元古代 960~900 Ma 期间发生了与 Rodinia 汇聚事件相关的陆块拼合作用,并保留了一系列同碰撞岩浆岩和沉积记录(周鼎武等, 1998; 王涛等, 2005; Chen et al., 2006; Jiang et al., 2016)。扬子地块西北缘庙湾蛇绿岩套所代表的古洋盆闭合(约 940 Ma; Deng et al., 2017)也发生在这一时期。综上,在中元古代中—晚期(约 1.43~1.13 Ga)大别山地区沿吕王—高桥—浠水—一线发育陆缘浅海相沉积以及(有限)洋盆,随后在新元古代早期发生微陆块拼贴和洋盆闭合。红马冲石墨矿石英岩碎屑锆石年龄谱系特征指示了其于扬子陆块亲缘性,暗示该古大别洋(海)盆发育于扬子陆缘区。

此外,结合区域填图认识:吕王—高桥混杂岩带的主体物质为中元古代海相沉积—岩浆岩建造;新元古代中期裂解体系的岩浆—沉积建造物质应划归红安岩群七角山岩组,不纳入该混杂岩带组成物质。

### 7.3 对区域石墨找矿的指示

湖北省广水—红安地区是扬子陆块晶质石墨的重点找矿区域。前人对区域石墨矿成矿地层认识模糊,并暂定为红安岩群(易承生, 2019)。但红安岩群内部层序结构长期存在争议,存在不同地层划分方案,并在近年被不断解体(刘晓春等, 2005; 邓乾忠等, 2013)。这些制约了对区域晶质石墨成矿建造的厘定和形成时代认识。

红马冲石墨矿赋存于吕王—高桥混杂岩带硅泥质岩夹碳酸盐岩岩块中,矿体与石英岩和大理岩空间关系密切(可作为区域找矿标志层),成因属沉积—变质型矿床。其主要含矿建造为中元古界陆源碎屑沉积岩系。高成熟度砂岩反映了静水水体及较为稳定的沉积环境。在封闭还原性环境中,被搬

运到盆地的原始生物分解形成的有机碳,不易氧化成 CO<sub>2</sub> 气体逸出,从而在地层中保存下来,形成富含有机质的沉积岩,可能构成石墨成矿的炭质基础。1:5 万区域矿产地质调查工作显示,吕王—高桥混杂岩带产出多处石墨矿点,地质特征均与红马冲矿区类似,表明中元古界海相沉积岩系在西大别地区具有晶质石墨资源找矿潜力。

## 8 结 论

(1) 锆石 U—Pb 年代学表明,西大别地区吕王—高桥混杂岩带红马冲石墨矿区含矿建造石英岩碎屑锆石的主要年龄峰值为 2.55 Ga、2.06 Ga、1.86 Ga 及 1.43 Ga。其最年轻峰值为 1427 Ma,暗示石英岩主要沉积时代为中元古代。

(2) 红马冲石墨矿区含矿岩系为石墨片岩、石英岩夹大理岩的组合,提供了海相沉积作用及西大别地区中元古代古洋(海)盆构造体系的物质记录。该石英岩原岩为高成熟度砂岩,可能形成于静水、稳定的沉积环境,其碎屑锆石年龄谱系特征暗示沉积物源主要来自扬子陆壳基底。

(3) 西大别地区中元古界海相沉积岩系具有晶质石墨资源找矿潜力。

### 注 释

① 彭练红,魏运许,王志元,张义芳,张成楚. 2003. 麻城市幅 1:25 万区域地质调查报告[R]. 武汉:湖北省地质调查院,1-180.

② 吴波,万俊,刘万亮. 2017. 1:5 万大悟县、丰店、小河镇、四姑墩幅区域地质调查报告[R]. 武汉:湖北省地质调查院,1-90.

### References

- Chen Bailin, Li Songbin, Wang Yong, Chen Zhengle, Zhou Yonggui, Hao Ruixiang, Liu Mu. 2023. Geochemistry and geochronology of cumulated gabbro from Kaladawan area, Altun Mountains, NW China: Evidence for oceanic crust evolution[J]. *Geology in China*, 50(5): 1557-1572 (in Chinese with English abstract).
- Chen W, Xu Z W, Chen M H, Yu Y. 2016. Multiple sources for the origin of the Early Cretaceous Xinxian granitic batholith and its tectonic implications for the western Dabie orogen, eastern China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 110(1): 29-41.
- Chen Z, Lu S, Li H, Li H, Xiang Z, Zhou H, Song B. 2006. Constraining the role of the Qinling orogen in the assembly and break-up of Rodinia: Tectonic implications for Neoproterozoic granite occurrences[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(1): 99-115.

- Deng Ganzhong, Li Xiongwei, Deng Zhe, Li Rong. 2013. Further discussion on stratigraphic sequence of Hong'an Group and relevant problems[J]. *Resources Environment and Engineering*, 27(2): 125–132 (in Chinese with English abstract).
- Deng H, Peng S, Polat A, Kusky T, Jiang X, Han Q, Wang L, Huang Y, Wang J, Zeng W. 2017. Neoproterozoic IAT intrusion into Mesoproterozoic MOR Miaowan ophiolite, Yangtze Craton: Evidence for evolving tectonic settings[J]. *Precambrian Research*, 289: 75–94.
- Geng Yuansheng, Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Du Lilin. 2017. Subdivision and correlation of the Mesoproterozoic stratigraphy in the western and northern margins of Yangtze Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(10): 2151–2174 (in Chinese with English abstract).
- Guo J L, Wu Y B, Gao S, Jin Z M, Zong K Q, Hu Z C, Chen K, Chen H H, Liu Y S. 2015. Episodic Paleoproterozoic–Paleoproterozoic (3.3–2.0 Ga) granitoid magmatism in Yangtze Craton, South China: Implications for late Archean tectonics[J]. *Precambrian Research*, 270: 246–266.
- Hu J, Liu X C, Chen L Y, Qu W, Li H K, Geng J Z. 2013. A ~2.5 Ga magmatic event at the northern margin of the Yangtze craton: Evidence from U–Pb dating and Hf isotope analysis of zircons from the Douling Complex in the South Qinling orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(28): 3564–3579.
- Hu Z C, Gao S, Liu Y, Hu S, Chen H, Yuan H. 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP–MS by addition of nitrogen in the Central Channel gas[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093.
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, Xiao S, Zhao L, Günther D, Li M, Zhang W, Zong K. 2012. A “wire” signal smoothing device for laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 78: 50–57.
- Huang L, Geng W, Sun Z L. 2018. Origin of the serpentinites in the Lichi mélange, eastern Taiwan, China: Implication from petrology and geochronology[J]. *China Geology*, 1(4): 477–484.
- Jiang X, Peng S, Polat A, Kusky T, Wang L, Wu T, Lin M, Han Q. 2016. Geochemistry and geochronology of mylonitic metasedimentary rocks associated with the Proterozoic Miaowan Ophiolite Complex, Yangtze Craton, China: Implications for geodynamic events[J]. *Precambrian Research*, 279: 37–56.
- Li Huaikun, Tian Hui, Zhou Hongying, Zhang Jian, Liu Huan, Geng Jianzhen, Ye Lijuan, Xiang Zhenqun, Qu Lesheng. 2016. Correlation between the Dagushi Group in the Dahongshan area and the Shennongjia Group in the Shennongjia area on the northern margin of the Yangtze Craton: Constraints from zircon U–Pb ages and Lu–Hf isotopic systematic[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 186–201 (in Chinese with English abstract).
- Li Tingdong, Xiao Qinghui, Pan Guitang, Lu Songnian, Ding Xiaozhong, Liu Yong. 2019. A consideration about the development of ocean plate geology[J]. *Earth Science*, 44(5): 17–27 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hao, Xu Daliang, Wei Yunxu, Peng Lianhong, Deng Xin, Zhao Xiaoming, Chen Tielong, Ke Xianzhong. 2017. Zircon U–Pb age constraints on the chronostratigraphy of the Baizhuping Formation, northern Yangtze Block[J]. *Journal of Stratigraphy*, 41(3): 87–95 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaochun, Dong Shuwen, Li Sanzhong, Xue Huaimin, Liu Jianmin, Qu Wei. 2005. Timing of the Hong'an Group in Hubei: Constraints from U–Pb dating of metagranitic intrusions[J]. *Geology in China*, 32(1): 75–81 (in Chinese with English abstract).
- Liu X C, Jahn B M, Liu D Y, Dong S W, Li S Z. 2004. SHRIMP U–Pb zircon dating of a metagabbro and eclogites from western Dabieshan (Hong'an Block), China, and its tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 394: 171–192.
- Liu X C, Jahn B M, Li S Z, Liu Y S. 2013. U–Pb zircon age and geochemical constraints on tectonic evolution of the Paleozoic accretionary orogenic system in the Tongbai orogen, central China[J]. *Tectonophysics*, 599: 67–88.
- Liu Y, Gao S, Hu Z, Gao C, Zong K, Wang D. 2010. 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*, 51(1/2): 537–571.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center.
- Peng M, Wu Y B, Wang J, Jiao W F, Liu X C, Yang S H. 2009. Paleoproterozoic mafic dyke from Kongling terrain in the Yangtze Craton and its implication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(6): 1098–1104.
- Peng M, Wu Y B, Gao S, Zhang H F, Wang J, Liu X C, Gong H J, Zhou L, Hu Z C, Liu Y S, Yuan H L. 2012. Geochemistry, zircon U–Pb age and Hf isotope compositions of Paleoproterozoic aluminous A–type granites from the Kongling terrain, Yangtze Block: Constraints on petrogenesis and geologic implications[J]. *Gondwana Research*, 22(1): 140–151.
- Qiu Xiaofei, Yang Hongmei, Lu Shansong, Zhang Liguang, Duan Ruichun, Du Guomin. 2016. Geochronology of the khondalite series in the Kongling Complex, Yangtze Craton and its geological implication[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(3): 549–558 (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Deng Q, Wang Z J, Qiu Y S, Duan T Z, Jiang X S, Yang Q X. 2013. New evidences for sedimentary attributes and timing of the “Macaoyuan conglomerates” on the northern margin of the Yangtze block in southern China[J]. *Precambrian Research*, 235: 58–70.
- Wang Jing, Wu Yuanbao, Peng Min, Jiao Wenfang, Liu Xiaochi. 2009. Protolith age and Hf isotope compositions of eclogite in Hong'an area, western Dabie Mountains: Implication for crustal growth at the Late Mesoproterozoic in the north margin of the Yangtze Block[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 29(2): 108–114 (in Chinese with English abstract).



- Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Zhang Zongqing, Wang Xiaoxia, Wang Yanbin, Zhang Chengli. 2005. Neoproterozoic collisional deformation in the core of the Qinling Orogen and its age: Constrained by zircon SHRIMP dating of strongly deformed syn-collisional granites and weakly deformed granitic veins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 220–231 (in Chinese with English abstract).
- Wang X L, Jiang S Y, Dai B Z. 2010. Melting of enriched Archean subcontinental lithospheric mantle: Evidence from the ca. 1760 Ma volcanic rocks of the Xiong'er Group, southern margin of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 182: 204–216.
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin W L, Spiegel W. 2007. Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1–23.
- Wu Y B, Zheng Y F, Gao S, Jiao W F, Liu Y S. 2008. Zircon U–Pb age and trace element evidence for Paleoproterozoic granulite-facies metamorphism and Archean crustal rocks in the Dabie orogen[J]. *Lithos*, 101(3/4): 308–322.
- Wu Y B, Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling–Tongbai–Hong'an–Dabie–Sulu orogenic belt in central China[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1402–1428.
- Wu Y B, Zhou G Y, Gao S, Liu X C, Qin Z W, Wang H, Yang J Z, Yang S H. 2014. Petrogenesis of Neoproterozoic TTG rocks in the Yangtze Craton and its implication for the formation of Archean TTGs[J]. *Precambrian Research*, 254: 73–86.
- Xiao Zhibin. 2012. Research of the Detrital Zircon from Mesoproterozoic Sedimentary Strata in the North Margin of Yangtze Craton, China[D]. Xi'an: Northwest University, 1–71 (in Chinese with English abstract).
- Xu Daliang, Liu Hao, Wei Yunxu, Peng Lianhong, Deng Xin. 2016. Detrital zircon U–Pb dating of Zhengjiaya Formation from the Shengnongjia area in the northern Yangtze Block and its tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2648–2660 (in Chinese with English abstract).
- Xu H J, Ma C Q, Ye K. 2007. Early Cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U–Pb dating and geochemistry[J]. *Chemical Geology*, 240(3/4): 238–259.
- Xu Y, Zhang S, Griffin W L, Yang Y, Yang B, Luo Y, Zhu L, Afonso J C, Lei B. 2016. How did the Dabie orogen collapse? Insights from 3–D magnetotelluric imaging of profile data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 121(7): 5169–5185.
- Xu Yang, Yang Zhenning, Deng Xin, Wang Lingzhan, Liu Hao, Jin Xindaru, Zhang Weifeng, Wei Yunxu, Peng Lianhong. 2021. Identification of an Indosinian tectonic mélange belt in the Western Dabie orogenic belt and its geological significance[J]. *Earth Science*, 46(4): 1173–1198 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Fu Changlei, Niu Manlan, Ji Wenhua, Li Rongshe, Qi Shengsheng, Mao Xiaochang. 2018. Characteristics and thematic geological mapping of mélanges[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(2/3): 167–191 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y N, Wang X C, Li Q L, Li X H. 2016. Integrated in situ U–Pb age and Hf–O analyses of zircon from Suixian Group in northern Yangtze: New insights into the Neoproterozoic low-<sup>18</sup>O magmas in the South China Block[J]. *Precambrian Research*, 273: 151–164.
- Yi Chengsheng. 2019. Mineral characteristics and metallogenic regularity of graphite ore in Hubei Province[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 42(3): 361–369 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Ma Changqian. 2008. Large-scale Late Mesozoic magmatism in the Dabie Mountain: Constraints from zircon U–Pb dating and Hf isotopes[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(4): 71–79 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, Xiao Qinghui. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continent Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1–855 (in Chinese).
- Zhang Jinming, Chen Guangting, Cai Hangjia, Tian Chengxiu, Lei Xiaoqing. 2023. Geochemical characteristics and zircon U–Pb age of gabbros in the Zhaqiaohe ophiolite mélange, and its limitation on the ocean ridge environment[J]. *Geology in China*, 50(6): 1837–1847 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China[J]. *Precambrian Research*, 222/223: 13–54.
- Zhong Zengqiu, Suo Shutian, Zhang Hongfei, Zhou Hanwen. 2001. Major constituents and texture of the Tongbai–Dabie collisional orogenic belt[J]. *Earth Science*, 26(6): 560–567 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Dingwu, Zhang Chengli, Hua Hong, Hu Jianmin. 1998. New knowledge about division and correlation of the Mid- and Neo-Proterozoic strata in the South Qinling[J]. *Geological Journal of China Universities*, 4(3): 350–357 (in Chinese with English abstract).
- Zhu J, Wu B, Wang L, Peng S, Zhou H. 2019. Neoproterozoic bimodal volcanic rocks and granites in the western Dabie area, northern margin of Yangtze block, China: Implications for extension during the break-up of Rodinia[J]. *International Geology Review*, 61(11): 1370–1390.
- Zhu Jiang, Qiu Xiaofei, Zhou Bao, Zhang Haijun, Wu Yue, Deng Xin. 2021. Neoproterozoic bimodal volcanic rocks from Dingyuan formation in western Dabie area, northern margin of Yangtze block, China: Geochemistry, petrogenesis and geological implications[J]. *Earth Science*, 46(4): 1311–1327 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈柏林, 李松彬, 王永, 陈正乐, 周永贵, 郝瑞祥, 刘牧. 2023. 阿尔金山喀腊大湾区堆晶辉长岩地球化学、年代学: 洋壳演化证据

- [J]. 中国地质, 50(5): 1557-1572.
- 邓乾忠, 李雄伟, 邓喆, 黎蓉. 2013. 再论红安群地层序列与有关问题[J]. 资源环境与工程, 27(2): 125-132.
- 耿元生, 旷红伟, 柳永清, 杜利林. 2017. 扬子地块西、北缘中元古代地层的划分与对比[J]. 地质学报, 91(10): 2151-2174.
- 李怀坤, 田辉, 周红英, 张健, 刘欢, 耿建珍, 叶丽娟, 相振群, 瞿乐生. 2016. 扬子克拉通北缘大洪山地区打鼓石群与神农架地区神农架群的对比: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及 Hf 同位素证据[J]. 地学前缘, 23(6): 186-201.
- 李廷栋, 肖庆辉, 潘桂棠, 陆松年, 丁孝忠, 刘勇. 2019. 关于发展洋板块地质学的思考[J]. 地球科学, 44(5): 17-27.
- 刘浩, 徐大良, 魏运许, 彭练红, 邓新, 赵小明, 陈铁龙, 柯贤忠. 2017. 扬子陆核区白坪坪火山岩建造形成时代的重新厘定——来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 地层学杂志, 41(3): 87-95.
- 刘晓春, 董树文, 李三忠, 薛怀民, 刘建民, 曲玮. 2005. 湖北红安群的时代: 变质花岗质侵入体 U-Pb 定年提供的制约[J]. 中国地质, 32(1): 75-81.
- 邱啸飞, 杨红梅, 卢山松, 张利国, 段瑞春, 杜国民. 2016. 扬子克拉通崆岭杂岩孔兹岩系同位素年代学研究及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 40(3): 549-558.
- 汪晶, 吴元保, 彭敏, 焦文放, 刘小驰. 2009. 西大别红安地区榴辉岩原岩年龄及 Hf 同位素组成: 对扬子板块北缘中元古代晚期地壳生长作用的显示[J]. 矿物岩石, 29(2): 108-114.
- 王涛, 张宗清, 王晓霞, 王彦斌, 张成立. 2005. 秦岭造山带核部新元古代碰撞变形及其时代——强变形同碰撞花岗岩与弱变形脉体锆石 SHRIMP 年龄限定[J]. 地质学报, 79(2): 220-231.
- 肖志斌. 2012. 中元古代扬子北缘神农架地区沉积岩碎屑锆石研究[D]. 西安: 西北大学, 1-71.
- 徐大良, 刘浩, 魏运许, 彭练红, 邓新. 2016. 扬子北缘神农架地区郑家垭组碎屑锆石年代学及其构造意义[J]. 地质学报, 90(10): 2648-2660.
- 徐扬, 杨振宁, 邓新, 王令占, 刘浩, 金鑫鏢, 张维峰, 魏运许, 彭练红, 黄海永. 2021. 西大别南缘印支期吕王—高桥—永佳河构造混杂岩带的厘定及其构造意义[J]. 地球科学, 46(4): 1173-1198.
- 闫臻, 王宗起, 付长垒, 牛漫兰, 计文化, 李荣社, 祁生胜, 毛晓长. 2018. 混杂岩基本特征与专题地质填图[J]. 地质通报, 37(2/3): 167-191.
- 易承生. 2019. 湖北省石墨矿产特征及成矿规律[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 42(3): 361-369.
- 张超, 马昌前. 2008. 大别山晚中生代巨量岩浆活动的启动: 花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 矿物岩石, 28(4): 71-79.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1-855.
- 张金明, 陈光庭, 才航加, 田成秀, 雷晓清. 2023. 青海扎巧合蛇绿混杂岩中辉长岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及对洋脊环境的限定[J]. 中国地质, 50(6): 1837-1847.
- 钟增球, 索书田, 张宏飞, 周汉文. 2001. 桐柏—大别碰撞造山带的基本组成与结构[J]. 地球科学, 26(6): 560-567.
- 周鼎武, 张成立, 华洪, 胡健民. 1998. 南秦岭中、新元古代地层划分对比新认识[J]. 高校地质学报, 4(3): 350-357.
- 朱江, 邱啸飞, 周豹, 张海军, 吴越, 邓新. 2021. 扬子陆块北缘西大别地区新元古界定远组双峰式火山岩地球化学特征、成因及其地质意义[J]. 地球科学, 46(4): 1311-1327.