

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.311>



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

徐 扬^{1,2,3}, 杨振宁⁴, 邓 新^{1*}, 王令占¹, 刘 浩¹, 金鑫鏢¹, 张维峰¹, 魏运许¹,
彭练红¹, 黄海永⁴

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广东广州 510640

4. 河北地质大学资源学院, 河北石家庄 050031

摘 要: 在西大别造山带的区调工作中, 新识别出一系列中元古代末—新元古代的岩石—构造单元, 它们沿着吕王—高桥—永佳河一线展布, 并构成一条 NNW-SEE 向展布的构造混杂岩带. 该混杂岩带主要由超镁铁质—镁铁质岩、硅泥质岩、石英质岩、大理岩、含碳陆源碎屑岩、双峰式火山岩以及卷入其中的榴辉岩等多种变质岩块(片)共同组成, 并赋存于一套遭受了强烈剪切变形的泥质片岩之中. 混杂岩带内各岩块(片)的原岩年龄跨度较大(>4 亿年), 分别集中在 1 200~1 100 Ma 和 800~700 Ma 之间. 锆石记录的变质年龄和云母的冷却年龄则主要集中在 240~200 Ma 之间. 结合接触关系、岩性组合、年代学及地球化学数据的综合研究认为, 混杂岩带的物质来源既包括中元古代末—新元古代早期的弧—弧后盆地系统的沉积岩—火山岩—侵入岩; 也包括叠置其上的新元古代中—晚期大陆裂解期的沉积岩—火成岩. 这些不同时代、不同性质岩石在三叠纪不同程度地卷入了华南陆块北缘向华北陆块之下的俯冲, 而后快速折返, 最终沿着区域上折返断裂(桃花—七角山断裂)就位于西大别造山带之中, 形成一条包含高压—超高压变质岩的三叠纪构造混杂岩带. 混杂岩带内新厘定的中元古代末弧—弧后岩浆—沉积事件, 可与大洪山—黄陵庙湾同时期的地质事件对比, 它们共同揭示扬子北缘曾经存在一条中元古代末—新元古代早期的俯冲岩浆带.

关键词: 锆石 U-Pb-Hf 同位素; 印支期构造混杂岩带; 中元古代末岩块; 扬子克拉通北缘; 构造地质学.

中图分类号: P548; P56

文章编号: 1000-2383(2021)04-1173-26

收稿日期: 2020-06-29

Identification of Indosinian Tectonic Mélange Belt in West Dabie Orogenic Belt and Its Geological Significance

Xu Yang^{1,2,3}, Yang Zhenning⁴, Deng Xin^{1*}, Wang Lingzhan¹, Liu Hao¹, Jin Xinbiao¹, Zhang Weifeng¹,
Wei Yunxu¹, Peng Lianhong¹, Huang Haiyong⁴

1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(No.2020CFB344); 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室开放基金项目(No.TPR-2019-07); 同位素地球化学国家重点实验室开放—合作基金项目(No.SKLabIG-KF-18-13); 中国地质调查局地调项目(No.DD20190050).

作者简介: 徐扬(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事大别地区构造地质学方向的调查与研究. ORCID: 0000-0002-1629-159X.

E-mail: xuyang_0112@163.com

* 通讯作者: 邓新, E-mail: 342821281@qq.com

引用格式: 徐扬, 杨振宁, 邓新, 等, 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. 地球科学, 46(4):1173-1198.

3. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
4. College of Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

Abstract: Recently, a series of the Late Mesoproterozoic to Neoproterozoic tectonic blocks in the southern part of the West Dabie orogenic belt were identified by geological field mapping. These tectonic blocks are distributed along NNW-SSE trending fault, from the Lüwang in the west, to the Gaoqiao and Yongjiahe in the east, forming a tectonic mélange belt within the West Dabie orogenic belt. This tectonic mélange belt is composed of various metamorphic blocks, including ultramafic to mafic rock, silica-pelitic rock, quartzose rock, marble, carbonaceous clastic rock, bimodal volcanic rock, and eclogites. The matrix mainly consists of mica schist with strong deformation. Their protolith ages have a wide range that cluster as two age populations including 1 200–1 000 Ma and 800–700 Ma. Moreover, the 240–200 Ma ages are also recorded by the metamorphic zircons. On the basis of contact relationship and lithological assemblages, as well as their geochronologic and geochemical data, it is proposed that the tectonic blocks in the Lüwang-Gaoqiao-Yongjiahe tectonic mélange have two different geotectonic affinities, including the Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic arc to back-arc basin system, and Middle to Late Neoproterozoic continental rift system. These blocks may have been brought into a deep depth by the subduction of the South China block beneath North China block during the Triassic, followed by subsequent exhumation to the surface and emplacement along the Taohua-Qijiaoshan fault. Furthermore, considering the close temporal and spatial relationships, it is inferred that the Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic arc to back arc basin system in this study extended westward to the 970–820 Ma Dahongshan arc to back arc basin and 1 100–1 000 Ma Miaowan ophiolite.

Key words: zircon U-Pb-Hf isotope; Indosinian tectonic mélange belt; Late Mesoproterozoic block; northern margin of Yangtze craton; structural geology.

0 序言

陆—陆碰撞系指两个相对古老大陆块体之间的碰撞,以发育超高压变质岩为主要特征(如:华北—华南陆块之间的大别碰撞造山带, Liou *et al.*, 2009). 目前研究认为,俯冲大陆可携带不同时代和性质的岩块进入俯冲隧道、发生混合,并经历不同程度的变质变形、乃至熔融,形成不同型式的高压—超高压构造混杂岩(Zheng *et al.*, 2012). 这些混杂岩受到俯冲隧道内角力流作用而折返,与没有参与深俯冲的低级变质岩进一步混合,最终形成出露于地表的、反映不同变质条件、且岩石时代属性不一的构造混杂岩带(郑永飞和陈伊翔, 2019). 大别造山带以出露规模巨大的高压—超高压变质带而举世闻名,在其广泛分布的片麻岩中含有数千个榴辉岩、(超)镁铁质岩、硬玉岩、大理岩、刚玉蓝晶石石英岩的块体和碎片,它们相互叠覆成多个高压—超高压变质岩片(徐树桐等, 2005),记录了地壳物质从俯冲到折返的动力学全过程(杨经绥等, 2009). 另一方面,这些岩块或岩片变质变形不一、时代属性不同(Liu *et al.*, 2004a; Zhou *et al.*, 2015; Dong and Santosh, 2016),蕴含了造山带地壳形成演化的重要信息,对剖析碰撞造山带的物质组成、来源和

构造演化历史具有重要意义(Wu and Zheng, 2013; Liu *et al.*, 2015).

通常认为, 1 300~1 000 Ma 的俯冲—碰撞造山事件被称之为格林威尔造山事件,它导致了全球大部分古陆在中元古代末不断汇聚、并最终于新元古代早期拼贴而形成 Rodinia 超大陆(Rivers, 1997). 华南大陆,作为我国三大古老陆块之一,其中新元古代的构造演化总体是在全球 Rodinia 超大陆聚散背景下发展的(Zhao and Cawood, 2012; Zhang *et al.*, 2013). 目前,华南中元古代末—新元古代构造演化、参与 Rodinia 超大陆的时限、过程仍存在着严重的分歧和争论,并建立了多种相互竞争的动力学模型(Zhou *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2008). 其中,一些研究认为扬子和华夏地块拼贴、华南大陆统一基底形成是在格林威尔期,并将华南置于 Rodinia 超大陆的核心位置(Li *et al.*, 2008, 2009). 然而,已报道的 1 300~1 000 Ma 岩浆—变质事件并不多见,主要集中在扬子西缘(Chen *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2016)和北缘黄陵—神农架地区(Qiu *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012). 扬子东南缘以及华夏内部记录的岩浆事件则大多形成于~980 Ma 之后,其中早期 970~815 Ma 的岩浆活动大多与洋壳俯冲作用有关(Shu *et al.*, 2008; Zhang and Wang, 2016). 因此,一

纪变质岩与扬子北缘的震旦纪以来沉积盖层;其北界龟山—梅山断裂代表了华北—华南陆块在西大别造山带的分界线(图 1).通过野外调查和地质填图,依据物质建造、变质变形和边界断裂特征的研究,将西大别造山带自北而南划分为 6 个岩石—构造单元:南湾复理石建造、八里畈混杂岩带、汴湾高压榴辉岩带、新县超高压榴辉岩带、红安高压榴辉岩带和木兰山蓝片—绿片岩带(Wu and Zheng, 2013).大量年代学和地球化学表明,虽然变质—变形程度不同,但以上各单元的变火成岩石大多具有新元古代中晚期的原岩年龄(820~630 Ma),且记录了古生代或三叠纪与 HP-UHP 变质有关的变质年龄;中元古代—新元古代早期的岩石单元则鲜有报道(Wu and Zheng, 2013;Liu *et al.*, 2015;徐扬, 2017).

红安高压榴辉岩带位于军师岭断裂以南、七角山—桃花断裂以北,主体为一套绿帘角闪岩相—绿片岩相中低级变质的表壳岩系,即原定义红安群.其岩性以白云钠长片麻岩、白云二长片麻岩、钠长浅粒岩、二长浅粒岩、白云石英片岩、石墨片岩、石英岩为主,夹有大理岩和磷矿层,可以划分为天台山岩组、七角山岩组和黄麦岭岩组等 3 个岩组,为一套由不同岩片叠置的无序构造岩石地层(徐扬, 2017).

榴辉(闪)岩和变(超)基性岩以团块、透镜体或不规则条带产于红安岩群的白云钠长片麻岩、白云石英片岩、云母片岩中,并沿着红安北部军师岭断裂(F_2)和南部桃花—七角山断裂(F_3)等 2 条断裂展布,形成七里坪和七角山两个重要的榴辉岩带(图 1b).早期将这些变质的(超)基性岩简单地当作侵入岩处理,并未给予应有的关注.1:25 万麻城市幅区调项目组(湖北省地质调查院, 2003)将七角山一带的榴辉岩、变(超)基性岩等特征岩块从原红安群中解体出来,并推定为一条古生代的蛇绿混杂岩带,划分为 5 种岩片:碳酸盐岩岩片、裂解岩片、超镁铁质岩岩片、基性火山岩岩片和硅泥质岩岩片.受到当时分析测试手段等多方面限制,初始定义的蛇绿混杂岩带各岩块(片)的时代、性质并未得到约束,并造成混杂岩带的构造—地层系统在区域上孤立、无法对比.自此以后的近 20 年来,该混杂岩带基本没有再开展过针对性的调查与研究.

2 吕王—高桥—永佳河构造混杂岩带物质组成

本文重新定义的吕王—高桥—永佳河混杂岩

带位于湖北省大悟县和红安县之间,其北西端被军师岭断裂(F_1)截断,向东南沿着吕王、高桥、永佳河—线 NNW 向展布,其东南端被麻城—新洲盆地的中—新生代的沉积层所覆盖,其累计出露长度达 80 km 以上.混杂岩带的出露宽度东西变化较大,以河口—卡房断裂为界,西部的吕王段出露较宽,由 4 个狭长的 NNW 向构造岩片组成;东部高桥—永佳河段只是沿着桃花—七角山断裂带出露,其出露宽度最大不超过 1 km,并向东南方向逐渐尖灭(图 2).根据其岩性组合、接触关系、变质变形特征(图 3,图 4),初步将该混杂岩带划分为 3 个构造相、9 类岩石组合类型(表 1).不同岩块(片)之间均为构造接触,其面理已经平行化接触,其间填充物(基质)主要为遭受强烈剪切的泥质片岩.

2.1 变超基性岩块(片)

变超基性岩多呈透镜状、扁豆状及不规则状产出,规模较大的出露于西段的南冲—吕王一带,在东段的新寨、康家湾、操家岗等地也有断续出露(图 3).岩块的大小不等,其长轴长度从几米到十几米不等,大者可达 200 m 以上.岩块的长轴与区域片麻理方向(NW—SE)协调一致.野外变超基性岩块多与变基性岩共生,两者界线清楚.岩石多为蚀变岩,常见蛇纹石化、滑石化,菱镁矿化,主要为(含铬铁矿、磁铁矿的)蛇纹石片岩(图 4a)、(含榴)黝帘阳起石片岩(图 4b)、透闪石片岩(图 4c)、叶蛇纹岩(图 4d),偶见闪长辉石岩、变含辉角闪岩,其原岩主要为一套超基性岩类(橄榄岩、辉石岩等).

2.2 变基性岩块(片)

变基性岩块(片)沿着北西向区域构造线展布,它与基质及其他岩片均呈片理平行化接触,其形态、大小各异,并遭受了强烈的构造剪切变形(图 4e~4h).在野外,变基性岩块既可以与变超基性岩块接触,也可以与石英岩、大理岩岩块相伴出现(图 3).该类岩块(片)主要包括(含榴)斜长角闪岩、绿泥绿帘钠长片岩、绿泥阳起片岩、钠长角闪片岩等,偶见气孔构造的变玄武岩和弱变形的变辉长岩透镜体.在操家岗斜长角闪片岩中可见 3 层浅色石英岩夹层(图 4e~4f),石英岩单层厚度 5~15 cm 之间,具有颜色深浅不一的条带状构造,发生褶皱变形,镜下主要由变质形成粒状石英组成(95 % 以上),部分颗粒较细;较难区别界线,其原岩为一套基性火山岩夹薄层硅质沉积岩.

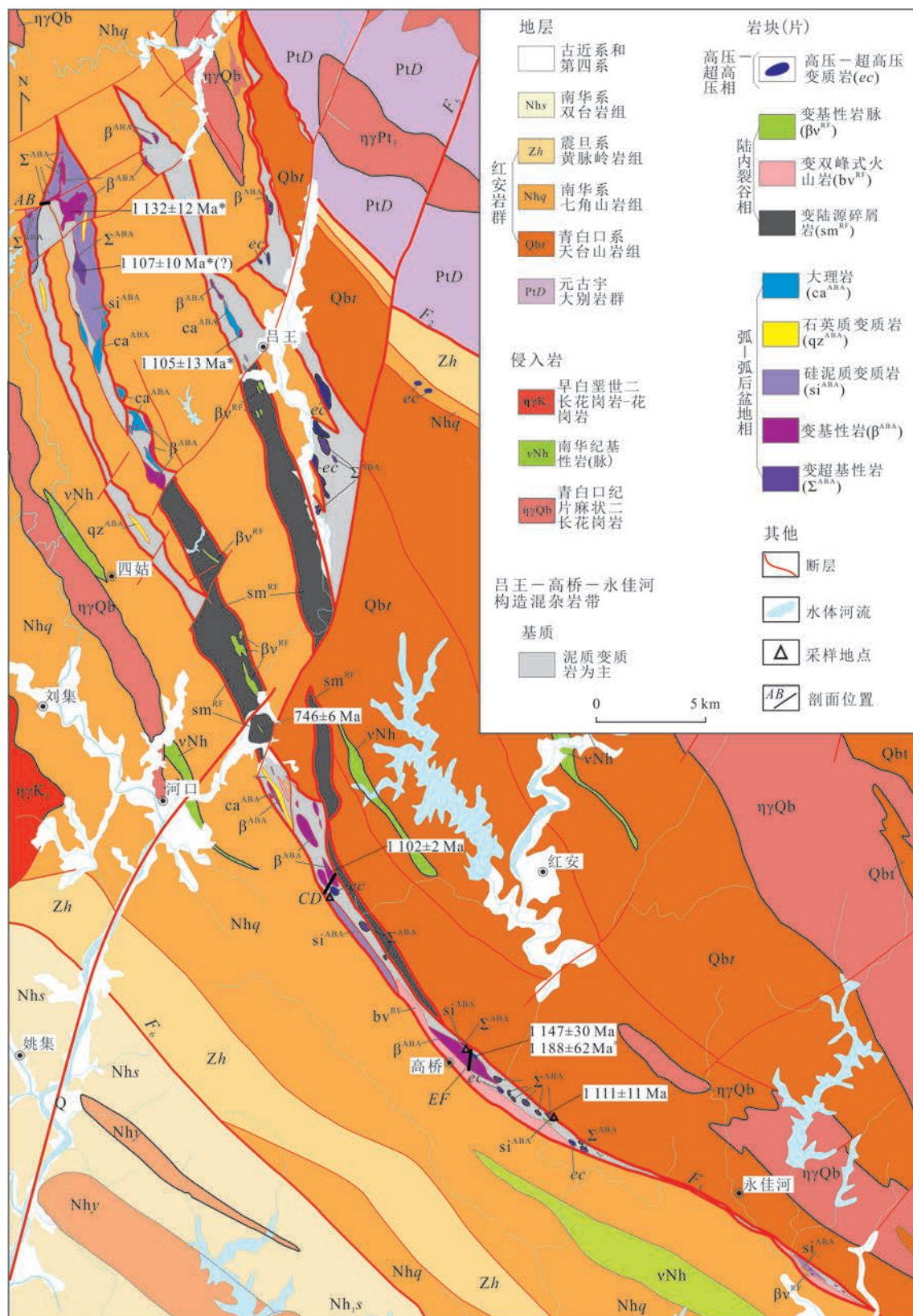
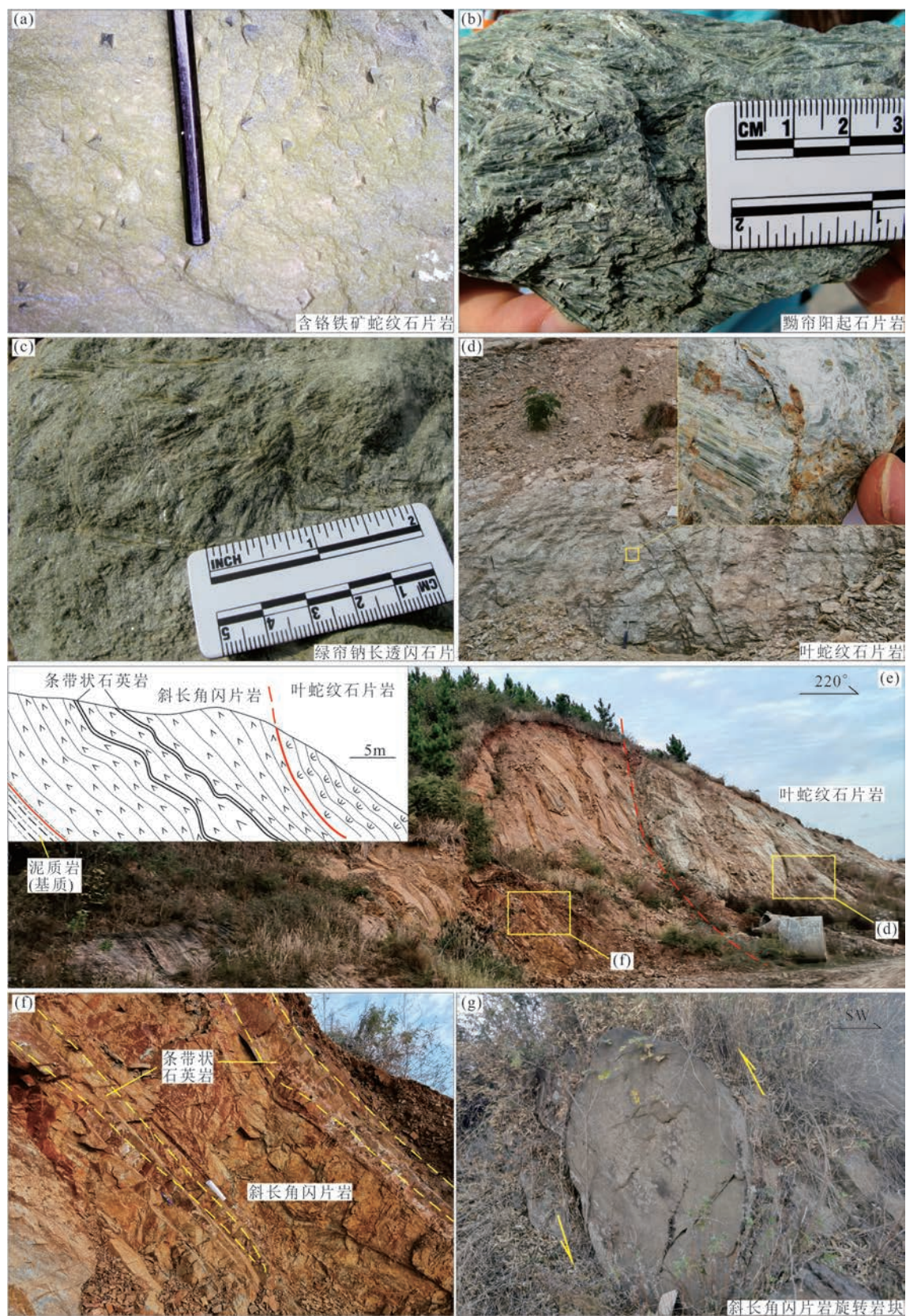


图2 吕王—高桥—永佳河构造混杂岩带地质简图

Fig.2 Geological sketch map of the Lüwang-Gaoqiao-Yongjiahe tectonic mélange belt in West Dabie orogenic belt
 标记*的年龄来自湖北省地质调查院(2018);标记#的年龄来自 Zhou *et al.* (2015);没有标记的年龄为本文数据. F_5 .河口—卡房断裂; F_6 .
 庙咀—八里湾断裂.据湖北省地质调查院(2018)和本文数据修改





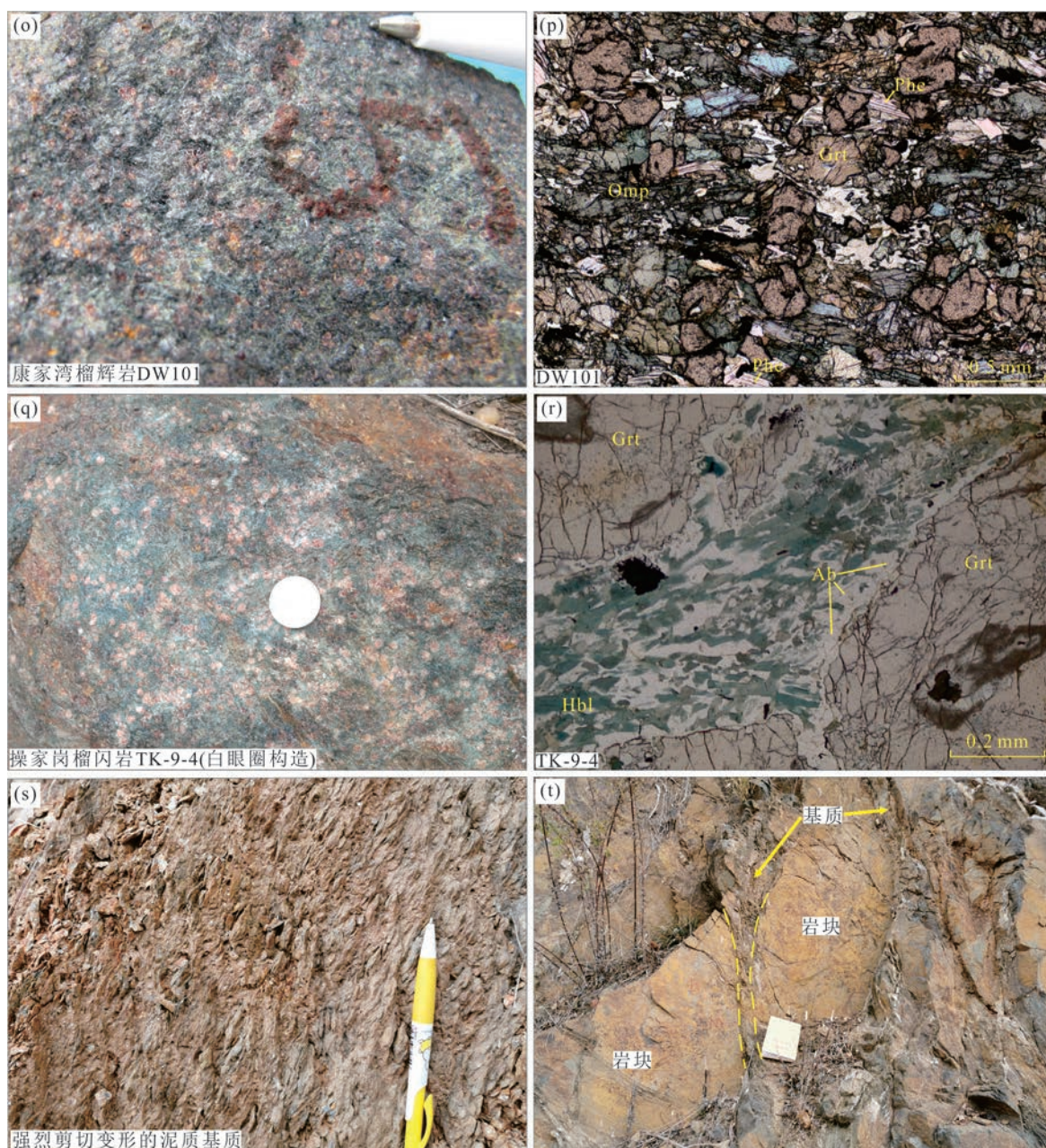


图4 吕王—高桥—永佳河构造混杂岩带野外照片和显微照片

Fig.4 Representative photographs and photomicrographs for the Lüwang-Gaoqiao-Yongjiahe tectonic mélange belt

a~d. 变超基性岩岩块; e~f. 斜长角闪片岩中夹的褶皱变形的条带状石英岩(硅质岩); g. 旋转的基性岩块; h. 基性岩块中剪切变形; i. 云母片岩夹条带状石英岩(硅质岩); j~l. 大理岩及其侵入其中的基性岩; m. 厚层状半石墨片岩; n. 弱变形的辉长岩旋转岩块; o~p. 康家湾榴辉岩(DW101); q~r. 操家岗榴辉岩(TK-9-4); s. 泥质基质; t. 岩块间剪切破碎形成的细粒组分基质. 矿物缩写: omp. 绿辉石; Grt. 石榴石; Hbl. 角闪石; Ab. 钠长石; Phe. 多硅白云母

2.7 变双峰式火山岩岩块(片)

变双峰式火山岩(片)在整个混杂岩带均有分布,尤其在东部的桃花附近较为典型,为一套浅色的白云钠长片麻岩—白云钠长片岩—钠长浅粒岩、夹深色的(含榴)斜长角闪片岩构成的岩石组合,野外表现为深浅颜色的岩性反复交替出现.白云钠长

片麻岩、白云钠长片岩、钠长浅粒岩的矿物组成中以相对富含长石(一般 $>40\%$)为主要特征,其石英和云母含量明显低于陆源碎屑岩岩块中的砂岩.斜长角闪片岩多以透镜体或夹层赋存于白云钠长片麻岩之中,透镜体的长、短轴之比变化较大,其片理与围岩的片麻理协调一致(图4n),二者接触带可见

表 1 西大别吕王—高桥—永佳河构造混杂岩带岩石—构造单元划分				
Table 1 The partition scheme of different types of block and matrix in the Lüwang-Gaoqiao-Yongjiahe tectonic mélange belt				
构造相	岩块(片)和基质	岩性类型(组合)	锆石 U-Pb 年龄	
			岩浆锆石年龄	变质锆石年龄
/	基质	泥质变质岩 强烈剪切变形的(石墨)白云母片岩、石墨片岩、榴云片岩	/	/
高压—超高压相	高压—超高压变质岩(ec)	榴辉岩及其退变榴闪岩	1 200~1 100 Ma; 1 188 Ma [#] ; 765 Ma [@]	295 Ma 和 220 Ma; 245~221 Ma [#] ; 232 Ma [@]
陆内裂谷相	变基性岩脉(β _v ^{RF})	弱变形的辉长(绿)岩脉	746±6 Ma; 630±4 Ma ^{&}	200~230 Ma ^{&}
	变双峰式火山岩(bv ^{RF})	浅色的钠长浅粒岩—白云钠长片麻岩夹深色(含榴)斜长角闪片岩	780 Ma ^{&} ; 750 Ma ^{&} ; 720 Ma ^{&}	210~220 Ma ^{&}
	变陆源碎屑岩(sm ^{RF})	半石墨片岩、(石墨)白云母片岩、(含石墨)白云石英片岩、榴云片岩、夹变粒岩	2 339~690 Ma 之间, 峰值区间: 1 776~1 433 Ma, 814~690 Ma	/
	岩块(片)	大理岩	/	/
弧—弧后盆地相	石英质变质岩(qz ^{ABA})	白云石英片岩、厚层状石英岩、夹浅粒岩	3 528~1 139 Ma, 峰值区间: 2.6~2.45 Ga, 2.1~1.82 Ga 和 1.2~1.1 Ga	/
盆地相	硅泥质变质岩(si ^{ABA})	白云母片岩、榴云片岩夹条带状的石英岩薄层	3 335~1 994 Ma*; 峰值位于 2.54 Ga 和 2.0 Ga	/
	变基性岩(β ^{ABA})	(含榴)斜长角闪片岩、斜长角闪片岩、绿泥绿帘钠长片岩、绿泥阳起片岩、绿帘透闪片岩	1 102±2 Ma 1 132±12 Ma* 1 105±13 Ma*	/
	变超基性岩(Σ ^{ABA})	变橄榄岩、变辉石岩、蛇纹石片岩、含榴斜长角闪岩、含榴黠帘阳起石片岩等	1 107±10 Ma*(?)	/

注: 年龄值中, 标*年龄值来自湖北省地质调查院(2018); 标#年龄来自 Zhou *et al.* (2015); 标@年龄来自 Cheng *et al.* (2010); 标& 年龄为作者未发表数据; 没有任何标记的年龄为本文数据。

薄层的构造片带,发育透入性片理。

2.8 变基性岩脉

混杂岩带内、外均可见弱变形变质的基性岩脉(图2)。这些基性岩脉大多沿着NW向构造线展布,在混杂岩两侧侵入于红安岩群之中,在混杂岩内部则侵入到其他各种岩片之中(图4k~4l)。岩石以粒状变晶结构为主,质地坚硬,其构造面理大多相对较弱,与围岩的构造面理平行化;野外也可见它们因遭受剪切而发育强烈片理,甚至形成不同规模的旋转岩块。

2.9 高压—超高压变质岩

高压—超高压变质的榴辉岩及其退变榴闪岩沿着王店—仙居顶—高桥—永佳河一带分布,以群体产出为主,少数呈条带状、似层状、似脉状、透镜状、豆荚状、团块状等不同形态产出,其大小一般为10~100 m²,部分或大或小,最大者可达1 000 m²。通常,榴辉(闪)岩与白云钠长片麻岩、蛇纹片岩、斜长角闪片岩等在野外伴生,其面理与围岩面理产状协

调一致,或者围岩的面理围绕榴辉岩体发育。榴辉岩代表性露头在康家湾,主要由石榴子石、绿辉石、多硅白云母和角闪石组成,另外还有少量的绿帘石和石英(图4o~4p)。然而在操家岗露头,肉眼可见粗大的玫瑰红色石榴石周围发育“白眼圈”构造(图4q),镜下这些白色反应边由角闪石和钠长石组成,可能为榴辉岩在折返过程退变而成(图4r)。

2.10 基质

填充于岩块之间的基质主体为强烈剪切变形的泥质片岩,岩性包括石墨白云母片岩、石墨片岩、榴云片岩以及少量石英片岩(图4s)。基于岩性组合相似性,这类基质可能是由岩块(片)中能干性较弱的组分(如含石墨的云母片岩)遭受构造剪切而形成。野外常见其中的石英脉体发育肠状褶皱、同斜褶皱或者无根褶皱。另一方面,部分刚性岩块之间的基质并非泥质,而是由岩块遭受强烈剪切破碎的细粒组分构成,以发育透入性片理为主要特征(图4t)。

3 分析方法

本文涉及的锆石分选、阴极发光(CL)照相、锆石U-Pb-Hf同位素分析、全岩主量—微量元素分析方法描述见附件1。

4 各岩块(片)的年代学特征

4.1 高压—超高压变质岩

4.1.1 操家岗榴闪岩(TK-9-4) 45 kg操家岗榴闪岩样品(TK-9-4)中获得75颗锆石,它们为无色透明或半透明,多为短柱状、棱角状或等轴状,半自形到自形、其长度多在30~150 μm 之间,对应的长宽比值大部分集中在1:1~3:1之间。在CL图像(图5a)上,大部分颗粒发育核—边结构,深色的核部发育弱的板状环带、或者表现模糊不清的内部结构,这样的特征与基性侵入岩中的岩浆锆石特征相似;白色的边部狭窄(大多不足10 μm),无分带结构(图5a)。少量浑圆状的锆石细小,阴极发光效应强,整体具有无分带或可见海绵状分带,显示变质锆石的特征(图5b)。

针对该样品的40颗代表性锆石进行了U-Pb定年(附表1)。其中,位于锆石核部的36个分析点具有变化的Th($48 \times 10^{-6} \sim 3227 \times 10^{-6}$)和U($72 \times 10^{-6} \sim 1680 \times 10^{-6}$)含量,其Th/U比值均大于0.7;具有类似于岩浆锆石的稀土元素配分模式(LREE相对HREE亏损、具有Eu负异常和Ce正异常;图5b)。除了第35号分析点外,35个分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中在1058~1280 Ma之间。其中32个分析点分布在谐和线附近(图6a),对应的加权平均值为 1111 ± 11 Ma(MSWD=1.0)(图6b),代表了该样品的原岩年龄。第35号点获得较老的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(1998 ± 35 Ma),其形态浑圆,具有较窄的岩浆振荡环带(图5b),说明是经过搬运和磨蚀后被基性岩所捕获,可能源自邻近金盆杂岩体中~2.0 Ga花岗岩(Xu *et al.*, 2020)。4个分析点位于无分带或者具海绵状分带的浑圆状锆石上,3颗锆石在分析中被击穿、未获得可靠的数据。a3号分析点获得的Th/U比值和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值分别为0.5和335 Ma,但其不谐和度高,约束意义较弱。

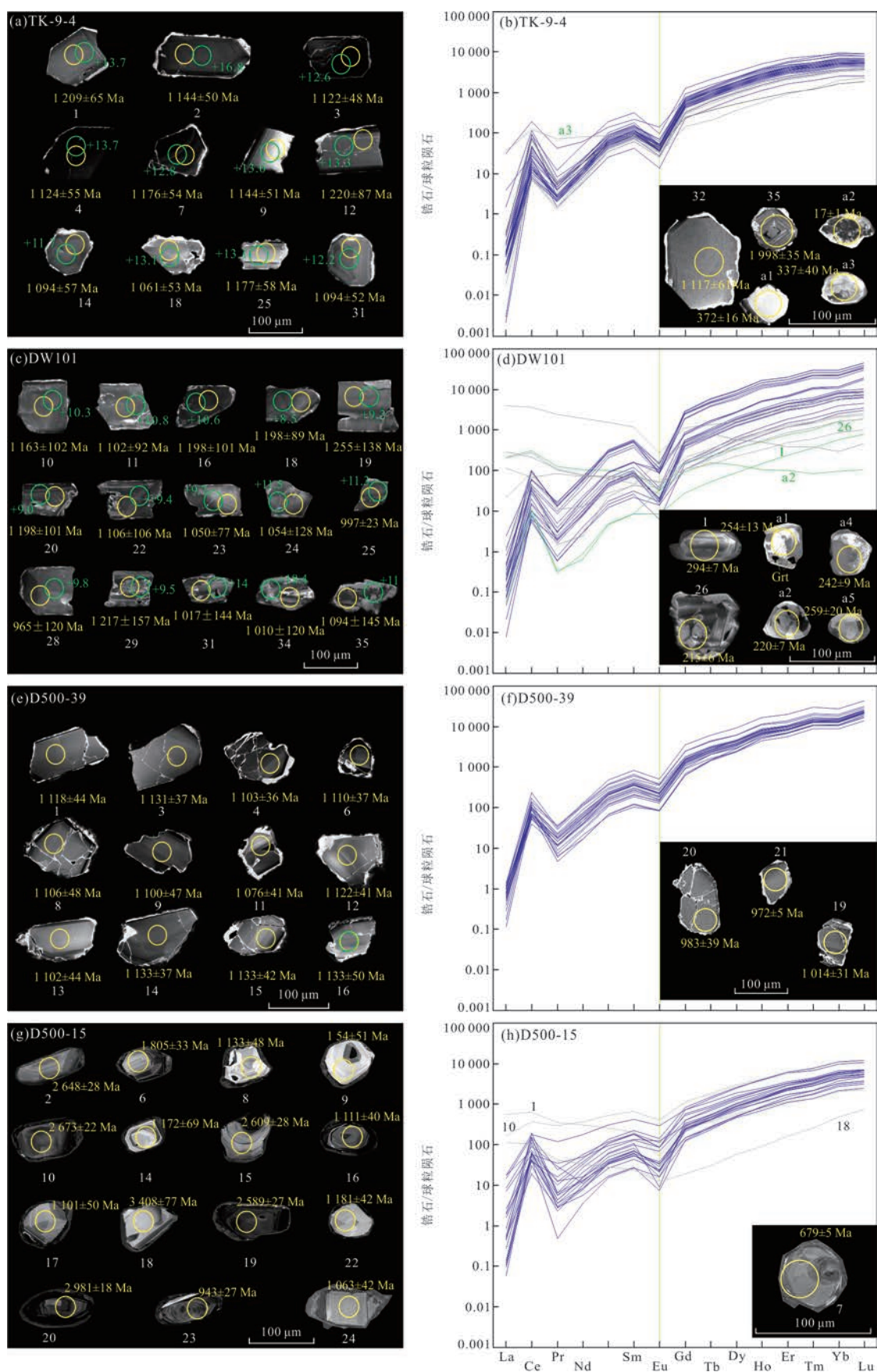
对获得谐和原岩年龄的25颗锆石核进行了Lu-Hf同位素分析。结果显示(附表2),它们的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围很小(0.282 418~

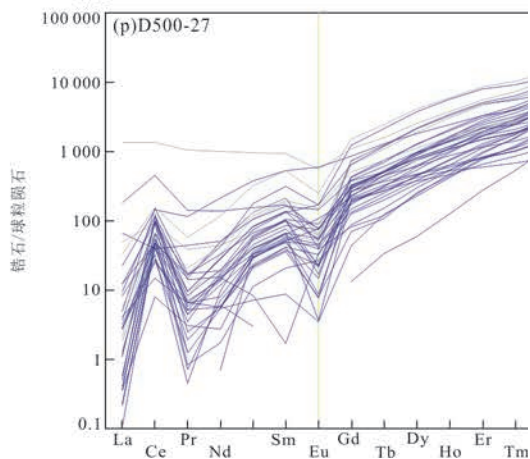
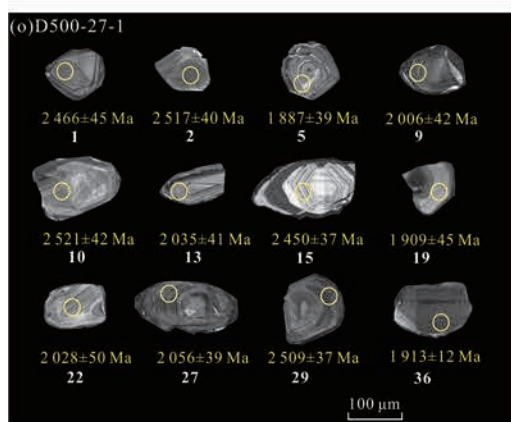
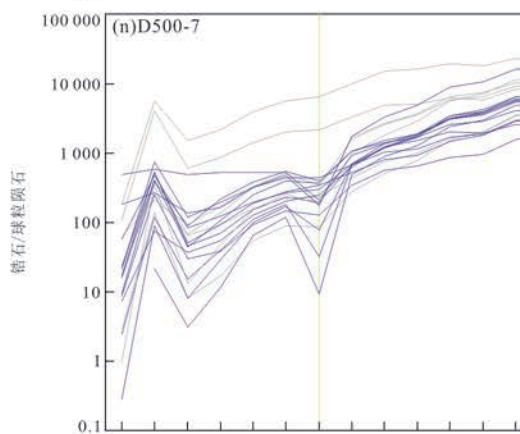
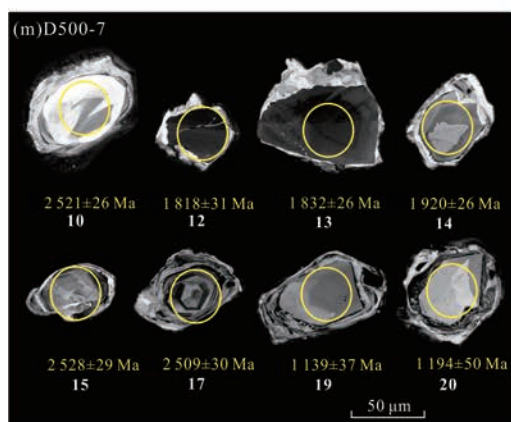
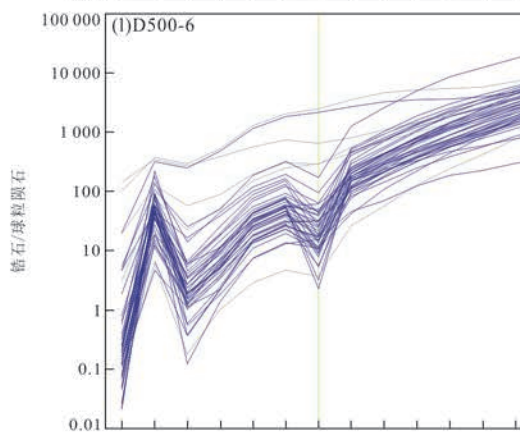
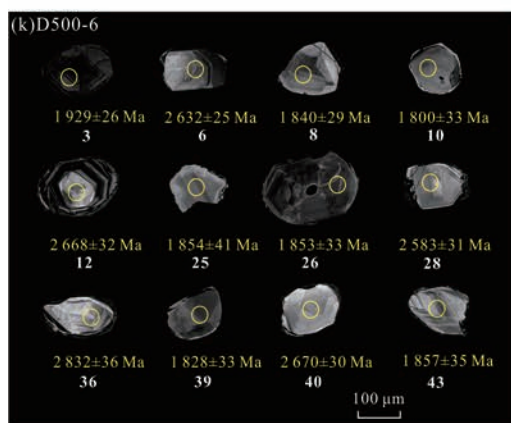
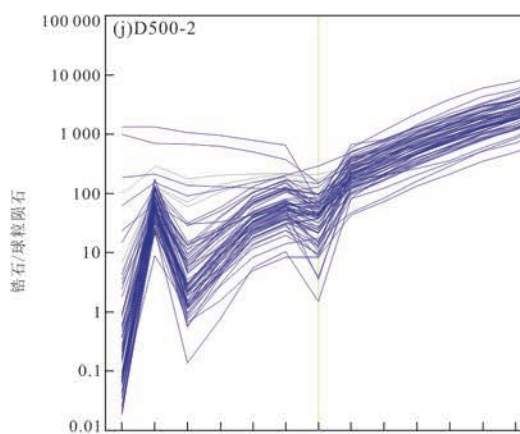
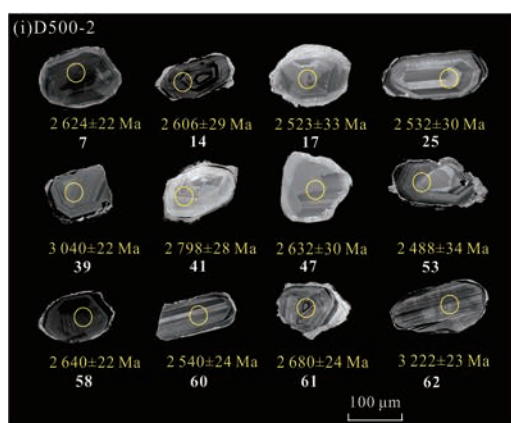
0.282 616)。使用其原岩年龄($t=1111$ Ma)计算得到的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较高(+11~+16.8),与当时的亏损地幔值接近,其对应的一阶段模式年龄(955~1196 Ma)与结晶年龄接近。

4.1.2 康家湾榴辉岩(DW101) 超过100 kg的康家湾榴辉岩样品(DW101)获得了不足100颗锆石,其晶型、大小和CL图像特征与操家岗榴闪岩基本一致,其长度多在30~120 μm 之间,对应的长宽比值大部分集中在1:1~2:1之间。在阴极发光图像(图5c)上,大部分锆石发光强度较弱,只是在周围可见宽约1~10 μm 的亮边,暗色核部可见弱的板状环带结构、或者表现为均一的内部结构。少部分浑圆的细小颗粒(粒径在30~70 μm),并可见石榴子石包体,它们整体无分带、或可见斑杂状、扇状分带,指示为变质锆石特征。

定年结果(附表1)显示,40颗定年锆石的Th($0.1 \times 10^{-6} \sim 15308 \times 10^{-6}$)和U($3 \times 10^{-6} \sim 6244 \times 10^{-6}$)含量变化范围较大,对应的Th/U比值和点年龄变化范围较大。在谐和图上,可拟合成一条不一致线(图6c),它与谐和线的上、下交点年龄分别为 1107 ± 46 Ma、 188 ± 29 Ma。27个分析点位于锆石核部,其Th/U比值较高(一般大于0.7),有12个谐和的分析点分布在上交点附近,获得的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为 1147 ± 30 Ma(MSWD=0.72),它与上交点年龄在误差范围内一致,代表了该样品的原岩年龄。在无分带、或斑杂状、扇状分带的浑圆锆石上分析了13个点,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于174~409 Ma。由于锆石颗粒较小、内部结构复杂,大部分年龄谐和度较低,只有3颗锆石(第1、26和a2号点)点获得了谐和的年龄: 215 ± 6 Ma、 295 ± 8 Ma、 220 ± 7 Ma。它们低的Th/U比值(0.01~0.80)、平坦的锆石稀土元素配分模式以及无明显的Eu异常进一步指示为变质成因锆石(图5d),记录的两期变质年龄(~220 Ma、~295 Ma)与红安地区的两期榴辉岩相变质年龄在误差范围内一致(Cheng *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2015)。

对获得谐和年龄的16颗岩浆锆石核部开展了Lu-Hf同位素分析(附表2)。结果显示,它们具有均匀的Hf同位素组成,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于0.282 382~0.282 630,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+8.5~+18.4)也与当时亏损地幔值一致,对应的阶段模式年龄(1338~920 Ma)接近于与其结晶年龄。





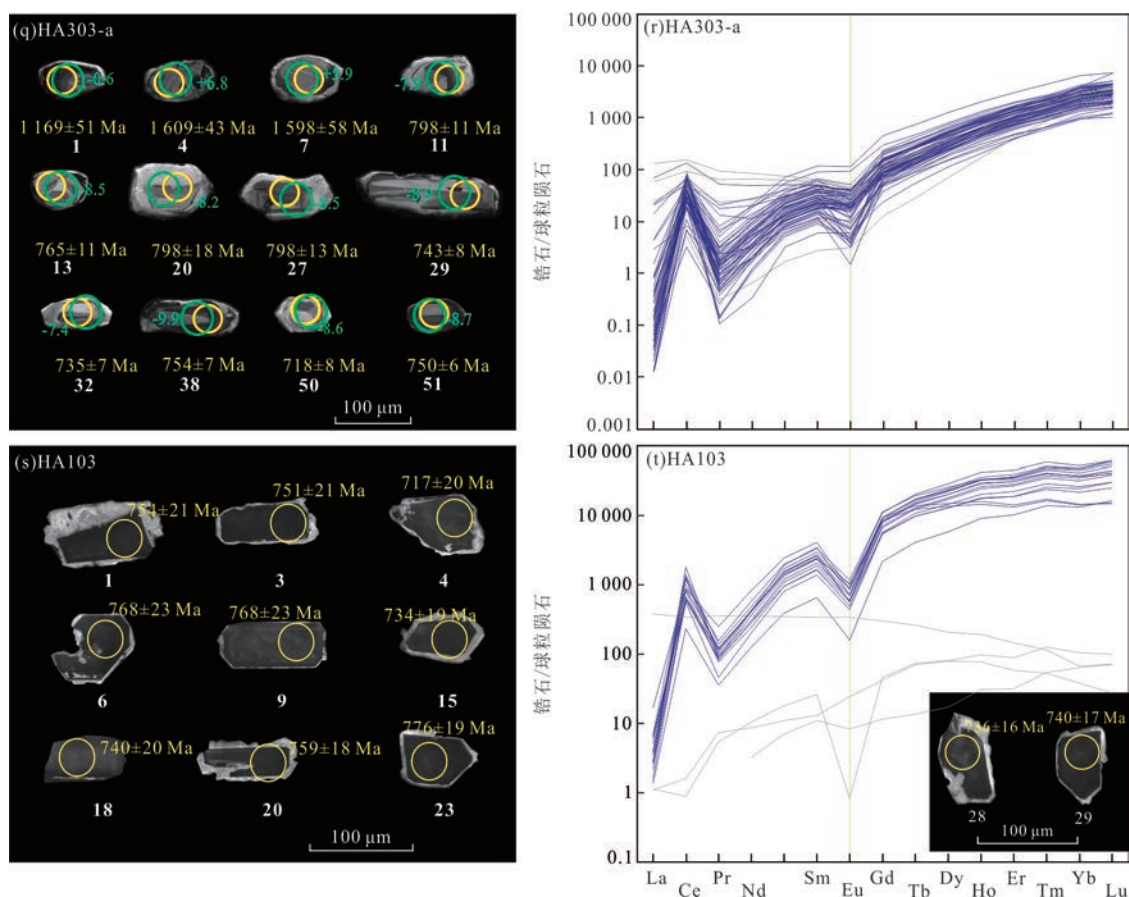


图5 吕王—高桥—永佳河构造混杂岩带代表性锆石阴极发光图像及锆石稀土元素分布模式

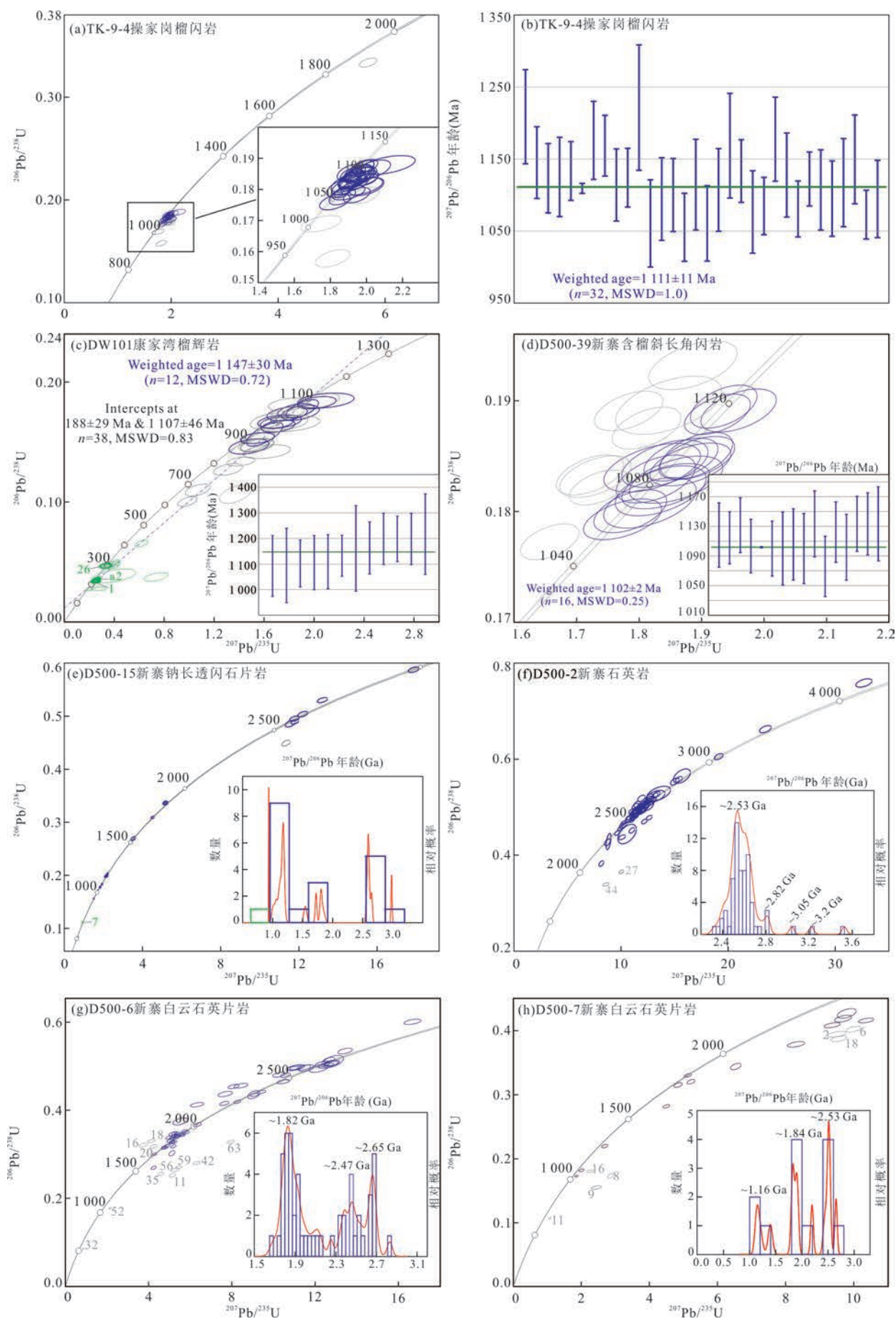
Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns for all dated zircons and cathodoluminescence images for representative zircon grains. 黄色圆圈和数值分别代表年分析点位置及其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ($>1\,000\text{ Ma}$)或 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ($<1\,000\text{ Ma}$)年龄值(Ma);绿色圆圈和数值分别为Hf同位素分析点位置及其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值. 球粒陨石标准化数据引自Sun and McDonough (1989). 矿物缩写: Grt. 石榴石

4.2 新寨变基性岩岩

4.2.1 含榴斜长角闪岩(D500-39) 含榴斜长角闪岩(D500-39)的锆石的晶型、大小和CL图像特征与前述两个样品(TK-9-4, DW101)一致(图5e),以长柱状和板状晶体为主,部分晶体表面发育了裂纹,可见类似于基性岩浆岩锆石的板状环带结构,或者表现混沌不清的内部结构,有少量锆石颗粒可见狭窄的白色边部. 24个分析锆石的Th和U含量分别为 $406\times 10^{-6}\sim 1\,927\times 10^{-6}$ 和 $357\times 10^{-6}\sim 1\,207\times 10^{-6}$,其Th/U比值均大于1;同时具有富集重稀土元素的锆石稀土元素配分模式(图5f). 8个分析点由于不和谐度高而舍去(图6d). 剩余16个谐和锆石获得的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 $1\,102\pm 2\text{ Ma}$ (MSWD=0.25),代表了该样品的原岩年龄.

4.2.2 钠长透闪石片岩(D500-15) 钠长透闪石片岩(D500-15)分离出的锆石较少,其大小、形态、内部结构变化多样(图5g). 24个分析点具有相对较低

的Th($19\times 10^{-6}\sim 826\times 10^{-6}$)和U($85\times 10^{-6}\sim 938\times 10^{-6}$)含量,其对应的Th/U比值变化于0.20~1.74之间. 根据其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值不同,21个谐和年龄值可以分为4组:太古宙(2 981~2 569 Ma)、古—中元古代(1 836~1 544 Ma)、中元古代末(1 183~935 Ma)和新元古代(图6e). 与前述3件基性岩锆石中板状环带不同,样品D500-15中具有太古宙和中—古元古代年龄(第1和第2组)的锆石多为柱状或者椭圆状;与基性岩浆结晶锆石不同,具有窄的岩浆振荡环带(图5g). 推测它们为捕获的锆石,其来源可能为邻近金盆杂岩、或者是扬子的古老基底(Xu *et al.*, 2020). 第3组的10颗中元古代末锆石具有板状环带、或者窄环带,考虑到野外样品D500-15与D500-39伴生,且它们具有相似锆石形态和结构、年龄值以及微量元素含量(图5h),它们也可能是源自围岩的捕获锆石. 7号分析点所在锆石为等轴粒状,无环带结构,其Th/U比值(0.7)较低,可能



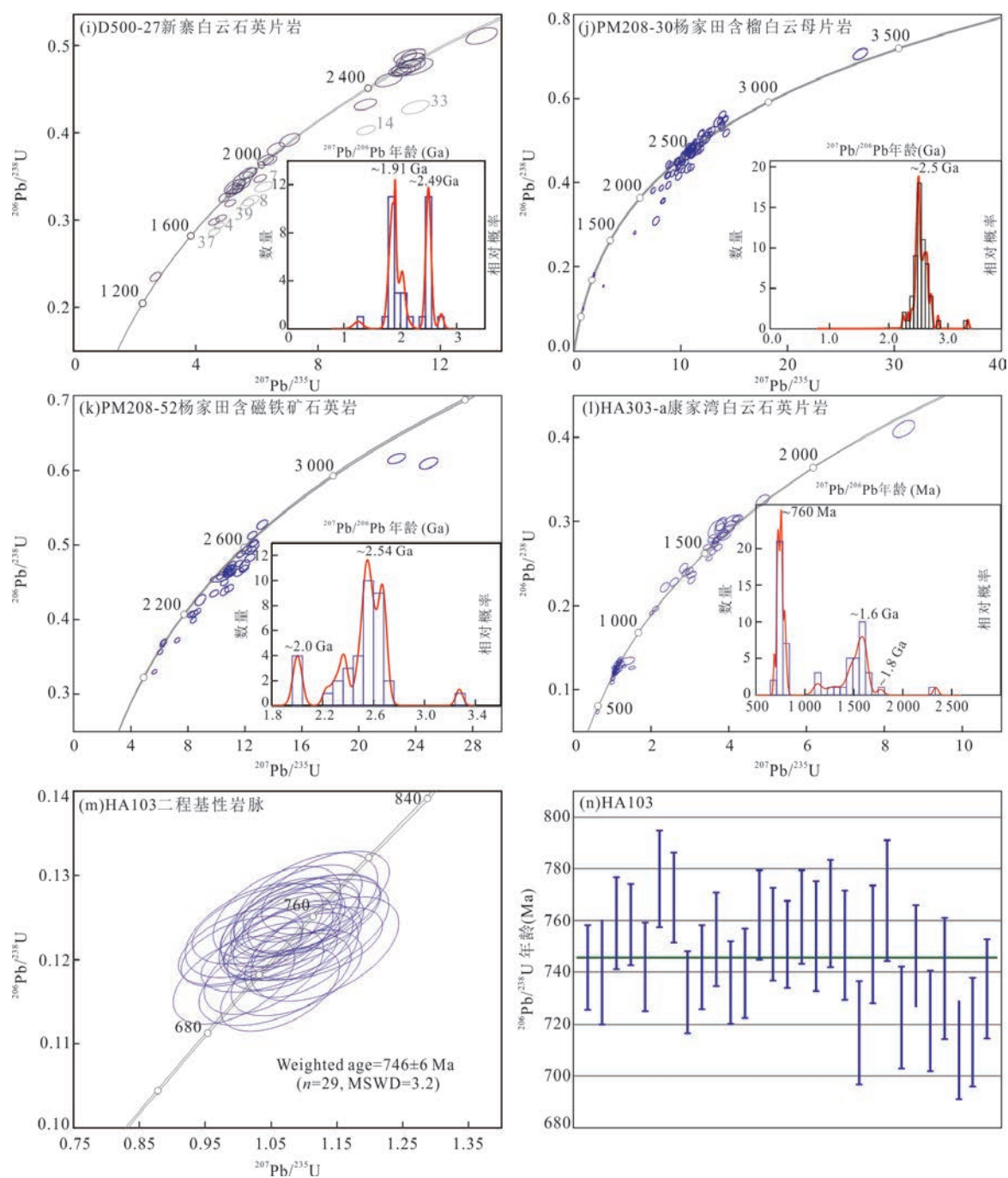


图6 吕王—高桥—永佳河构造混杂岩带内岩石锆石U-Pb年龄谐和图

Fig.6 Zircon U-Pb concordia diagrams for the rocks from the Lüwang-Gaoqiao-Yongjiahe tectonic mélangé belt
蓝色和灰色数据点分别为岩浆锆石微区上获得的谐和、不谐和年龄点;绿色的粗细和细线数据点分别为变质锆石微区上获得的谐和、不谐和年龄点.样品PM208-30和PM208-52年龄数据引自湖北省地质调查院(2018);其他数据为本文数据

为第3组锆石遭受后期改造的结果,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 $679\pm5\text{ Ma}$ 指示了一期新元古代晚期构造—热事件.

4.3 新寨石英质变质岩

与前述新寨剖面变火成岩不同,新寨石英岩(D500-2)、白云石英片岩(D500-6、D500-7、

D500-27)中所分离出的锆石呈浅黄色到无色透明,椭圆形到圆形,磨圆度较好,且锆石表面具有明显的搬运磨蚀痕迹,具有典型碎屑锆石特征(图5i~5p).这些锆石的长度 $100\sim200\text{ }\mu\text{m}$ 之间,长宽比1:1到1.5:1.0不等.绝大部分锆石CL图中锆石发育清晰或者模糊的振荡环带、或者带状

分带,部分锆石具有狭窄白边。

对样品 D500-2 中的 70 颗代表性锆石开展了 70 个点碎屑锆石定年和微量元素分析(附表 1)。其结果显示,分析锆石具有低的 Th 和 U 含量,分别变化于 $23 \times 10^{-6} \sim 1\,919 \times 10^{-6}$ 和 $43 \times 10^{-6} \sim 1\,318 \times 10^{-6}$ 之间,其 Th/U 比值大于 0.2。锆石的稀土元素具有富集重稀土元素、明显 Eu 负异常和 Ce 正异常的配分模式,这些特征与岩浆成因的锆石一致(图 5j)。除去 3 个不谐和度高的分析点,剩余 67 个高谐和度分析点获得的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 $3\,528 \sim 2\,321$ Ma, 形成一个主要的年龄峰值位于 ~ 2.53 Ga 左右(图 6f), 同时还有少量年龄分布在 ~ 2.82 Ga、 ~ 3.05 Ga 和 ~ 3.2 Ga 附近。

样品 D500-6 开展的 64 个点定年,获得与样品 D500-2 具有相似的 Th、U 元素含量和微量元素配分模式(图 5l)。53 个分析点获得了高谐和度的年龄,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值介于 $2\,832 \sim 1\,683$ Ma (图 6g), 并在 ~ 1.82 Ga、 ~ 2.47 Ga 和 ~ 2.65 Ga 形成 3 个年龄峰。

样品 D500-7 共分析了 20 个点,其中 14 个点获得了谐和年龄,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中在 $1\,139 \sim 1\,398$ Ma、 $1\,818 \sim 2\,195$ Ma、 $2\,440 \sim 2\,653$ Ma 等 3 个区间内(图 6h)。

样品 D500-27 共分析了 40 个点,获得了 33 个谐和年龄数据。它们的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 $2\,727 \sim 1\,256$ Ma (图 6i), 其主要的年龄峰值出现在 ~ 1.91 Ga 和 2.49 Ga。

4.4 杨家田硅泥质变质岩

样品 PM208-30 和 PM208-52 来自杨家田硅泥质变质岩片,岩性分别为含榴白云母片岩和含磁铁矿石英岩,其锆石 U-Pb 定年数据引自湖北省地质调查院(2018)。结果显示(图 6j~6k),样品 PM208-30 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 $3\,335 \sim 2\,244$ Ma, 其年龄峰值位于 ~ 2.5 Ga 左右;样品 PM208-52 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄介于 $3\,274 \sim 1\,994$ Ma, 两个年龄峰值分别位于 ~ 2.54 Ga 和 ~ 2.0 Ga。

4.5 康家湾变质陆源碎屑岩

样品 HA303-a 取自康家湾的陆源碎屑岩岩块(片)中白云石英片岩。其锆石呈短柱状,浑圆状,其磨圆程度低于新寨石英片岩。CL 图像上,可见清晰的岩浆振荡环带,绝大部分锆石具有白

色的变质窄边(图 5q~5r)。68 个分析锆石微区的 Th 和 U 变化较大,其 Th/U 比值一般大于 0.3。结合其锆石稀土元素配分模式,推测它们性质为岩浆锆石。61 个高谐和度年龄值介于 $2\,339 \sim 690$ Ma (图 6l), 并集中在两个年龄区间之中($690 \sim 814$ Ma 和 $1\,433 \sim 1\,776$ Ma), 其对应的峰值分别位于 ~ 760 Ma 和 $\sim 1\,580$ Ma。

对该样品的锆石 Hf 同位素分析表明,除了古元古代—中元古代锆石($1\,433 \sim 1\,643$ Ma)具有变化的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-4.5 \sim +10$)外,其他时代锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值:新元古代锆石($717 \sim 798$ Ma)具有低负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-7.5 \sim -10$);两个中元古代末的锆石($1\,122$ Ma、 $1\,169$ Ma)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -5.3 和 -0.6 。

4.6 二程变基性岩脉

二程变基性岩脉锆石为暗紫红色,不透明为主,以长柱状和板状晶体为主,少数为他形不规则粒状晶体,长宽比多为 $1:1 \sim 2:1$, 其粒度一般为 $50 \sim 150$ μm 。CL 图像具有相对弱发光效应特征(灰黑色),其内部普遍具有弱的板状环带,与源自基性岩浆的锆石特征一致(图 6s~6t)。同时,大部分颗粒局部不规整的白色变质窄边。

35 个 U-Pb 年龄分析点选在环带较为清晰的微区开展(附表 1)。它们具有十分高的 Th($274 \times 10^{-6} \sim 2\,926 \times 10^{-6}$) 和 U ($889 \times 10^{-6} \sim 10\,721 \times 10^{-6}$) 含量,其 Th/U 比值一般大于 0.3。除去 6 个不谐和度偏高的分析点,剩余 29 个谐和分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 $710 \sim 776$ Ma 之间,其加权平均值为 746 ± 6 Ma (MSWD=3.2)。结合其锆石结构特征、Th/U 比值和稀土元素配分模式,认为该年龄值代表了该样品的原岩年龄。

5 新寨变基性岩和康家湾榴辉岩($\sim 1.2 \sim 1.1$ Ga)的原岩性质

16 件新寨变基性岩和 6 件康家湾榴辉岩样品用于全岩主量、微量元素分析(附表 3)。虽然野外岩石样品采集尽量选取风化蚀变低、成分均匀的新鲜岩石,但是由于混杂岩带内岩块大多曾经遭受不同程度的变质作用,成岩后交代和蚀变作用对岩石元素含量的影响仍需充分约束。9 件样品由于烧失量偏大、或者具有明显 Ce 异常($\text{Ce}/\text{Ce}^* < 0.8$)(图 7),将不用于后文岩石成因的讨论。剩余 13 件样品烧失量低(< 2)、且没有明显的 Ce 异常,表明它们只是遭受

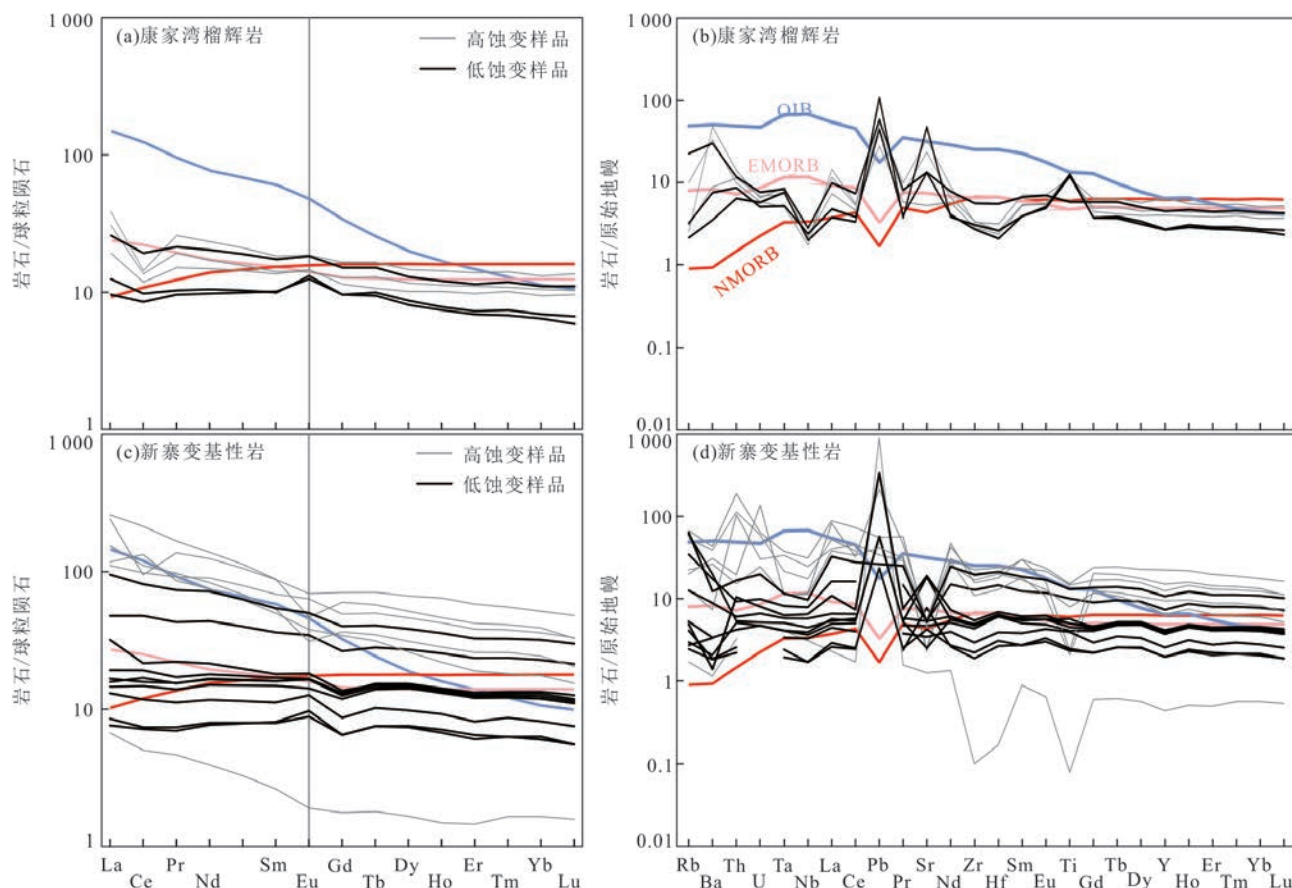


图7 球粒陨石标准化稀土元素配分模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spider diagrams for the Lüwang-Gaoqiao-Yongjiahe tectonic mélange belt

标准化值自 Sun and McDonough (1989)

了低程度的蚀变 (Polat and Hofmann, 2003). 这些样品的稀土元素 (REE) 和高场强元素 (HFSE) 显示协调一致的配分模式 (图 7), 它们 (La、Ce、Tb、Y、Sm、Nb、Ta、Th 和 Yb) 与极不活泼元素 Zr 显示正相关的线性关系 (附件 2), 表明 REE、HFSE 较为稳定, 并没有遭受成岩后变质作用的显著影响, 可以用来反映其原始组分特征. 另一方面, 新寨变基性岩和康家湾榴辉岩在野外未见与之伴生的长英质浅色体, 样品中也未见 Th 和 LREE 等强不相容元素的显著亏损 (图 7), 表明它们没有遭受部分熔融或熔体的抽取. 因此, 本文将主要通过这些变质蚀变不活泼元素、以及稳定的锆石 Hf 同位素组成, 讨论和推断变基性岩的原岩性质.

新寨变基性岩和康家湾—操家岗榴辉岩具有相似的原岩年龄和地球化学组成, 暗示可能具有相似岩石成因 (图 6, 图 7). 它们具有与当时亏损地幔一致的锆石 Hf 同位素组成. 在微量元素蛛网图上 (图 7b, 图 7d), 地壳中常见的 Nb-Ta-Ti 负异常在

样品中并不明显, 同时显示弱的 Zr-Hf 的负异常 (Rudnick and Gao, 2014), 这些特征都表明其岩石成因中并未遭受强烈的地壳混染.

新寨变基性岩和康家湾榴辉岩样品具有低的稀土元素含量, 样品中显示平坦、或者很弱的右倾稀土元素配分模式, 其 $(La/Yb)_N < 3$, 没有 Eu 的异常、或者具有弱的 Eu 正异常. 部分样品显示 REE 含量接近或者低于正常洋脊玄武岩 (N-MORB), 且具有类似于当时亏损地幔的 Hf 同位素组成, 表明它们应起源于一个类似 N-MORB 的亏损地幔源区. 在微量元素蛛网图上 (图 7b, 图 7d), 它们分布于洋脊玄武岩 (MORB) 和岛弧玄武岩 (IAB) 之间, 少量样品相较于 MORB 轻微富集 Th 和 LREE, 同时亏损高场强元素 Nb-Ta, 显示弧岩浆的地化特征, 表明其地幔源区还可能存在俯冲带流体/熔体的贡献. 在 $La/Nb-La$ 和 $Nb/Th-La/Nb$ 等相关图解 (图 8a, 图 8b) 上, 新寨变基性岩和康家湾榴辉岩样品都显示从 MORB 向 IAB 演化的趋势. 这种既有软流圈

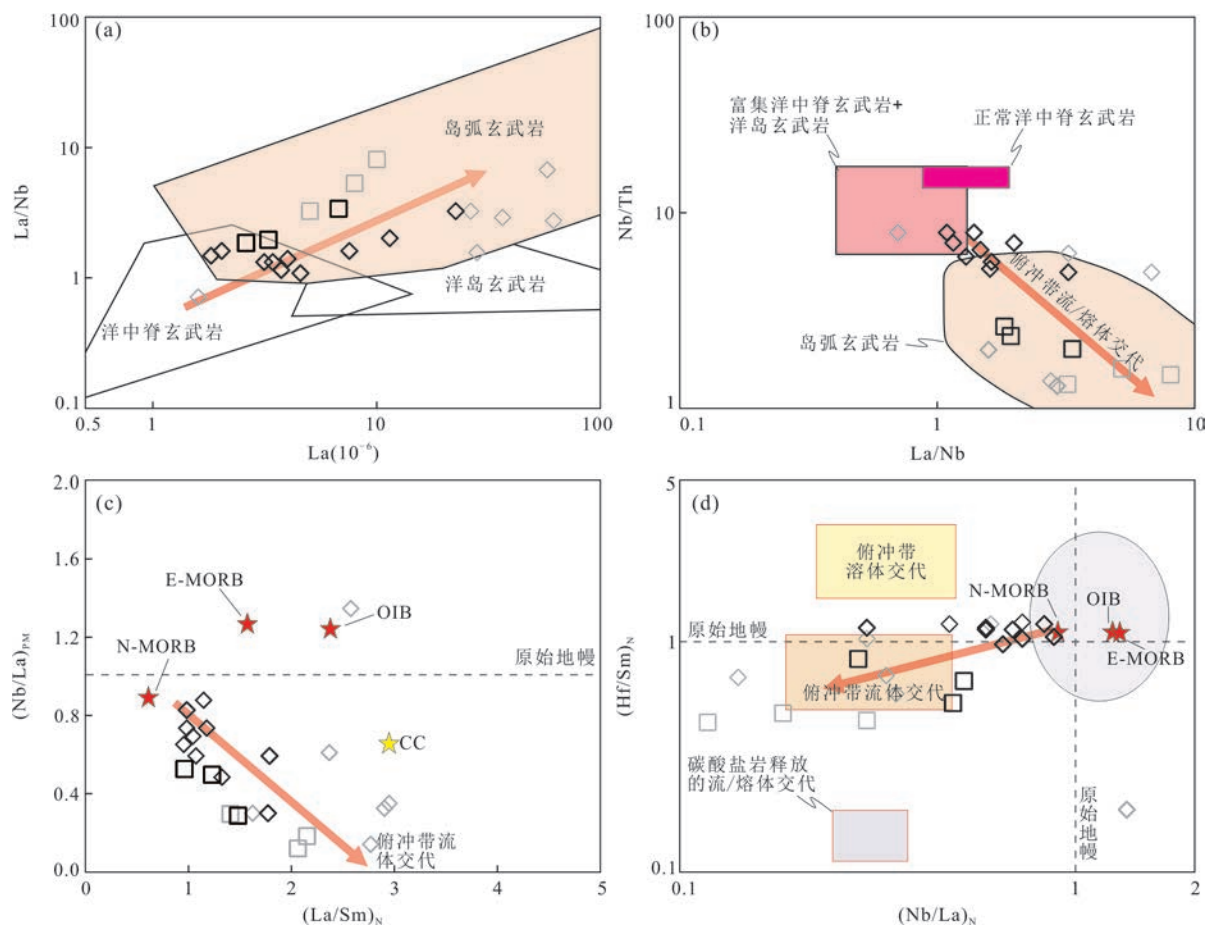


图8 康家湾榴辉岩和新寨变基性岩的La/Nb vs. La图解(李曙光, 1993) (a), Nb/Th vs. La/Nb图解(Fan *et al.*, 2004) (b); (Nb/La)_{PM} vs. (La/Sm)_N图解(Sun and McDonough, 1989) (c); (Hf/Sm)_N vs. (Nb/La)_N图解(Laflèche *et al.*, 1998) (d)

Fig.8 Plots of (a) La/Nb vs. La (Li, 1993); (b) Nb/Th vs. La/Nb (Fan *et al.*, 2004); (c) (Nb/La)_{PM} vs. (La/Sm)_N (Sun and McDonough, 1989); (d) (Hf/Sm)_N vs. (Nb/La)_N (Laflèche *et al.*, 1998)

MORB成分特征、又有IAB地球化学特征的岩石, 通常被认为是消减带上弧后盆地次级扩张形成的弧后盆地玄武岩所有(Taylor and Martinez, 2003). 在(Nb/La)_{PM}—(La/Sm)_N和(Hf/Sm)_N—(Nb/La)_N图解(图8c, 图8d)上, 部分样品显示高的La/Nb比值, 结合其亏损的Hf同位素组成, 推测交代地幔源区的组分为年轻洋壳释放的流体(Laflèche *et al.*, 1998).

由稳定元素构成的基性岩环境判别图解(图9a, 图9b)上, 新寨变基性岩和康家湾榴辉岩均落入弧后盆地的范围之内. 在Th/Yb—N/Yb图解上(图9c), 这些样品落在洋中脊向大陆岛弧过渡的成分区内; 在Ce/Nb—Th/Nb图解上(图9d), 它们分布于陆缘—陆内弧后盆地玄武岩的成分区, 这些特征进一步约束它们形成于陆缘弧后盆地有关的构造环境(如日本海). 综述上所述, 1.2~1.1 Ga新寨变基

性岩和康家湾榴辉岩兼有MORB和IAB“双重”地球化学特征, 反映其来源和形成过程受到洋脊扩张作用和俯冲消减作用共同控制, 其产出的构造环境最有可能为陆缘的弧—弧后盆地系统.

6 康家湾—吕王—高桥—永佳河混杂岩带不同岩块的性质

6.1 中元古代末—新元古代早期弧—弧后盆地系统

弧后盆地通常是在弧后伸展与海底扩张作用下形成新生洋壳的基础上发展而来的, 伴随着强烈的构造活动和岩浆作用(Taylor and Karner, 1983). 与大洋弧后盆地不同, 陆缘弧后盆地相对富含陆源碎屑组分, 其填充物除了源自岩浆弧外, 相邻大陆也是弧后盆地沉积物的重要源区(Marsaglia *et al.*, 1992). 因此, 其沉积类型复杂多样, 除了发育大量的

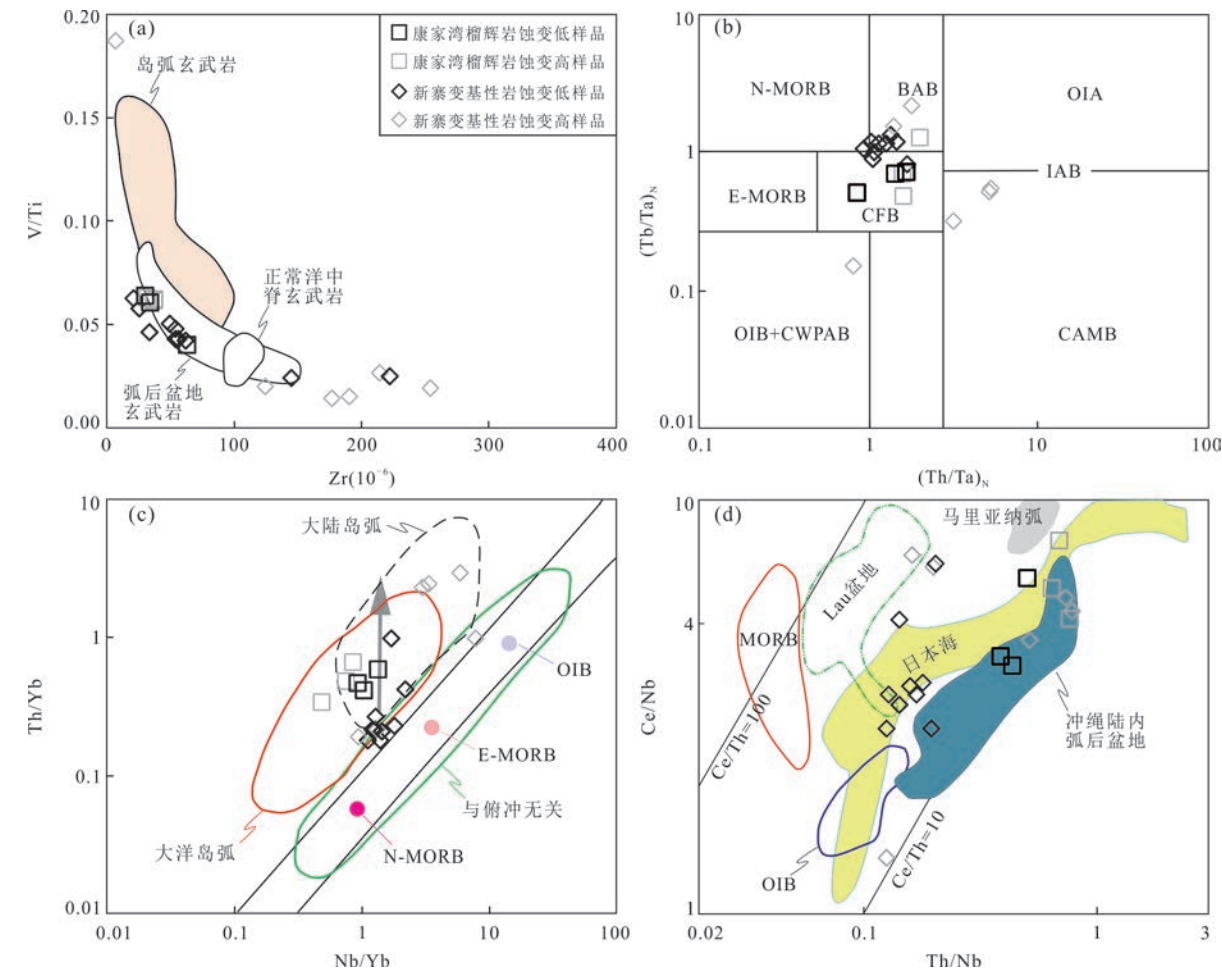


图 9 康家湾榴辉岩和新寨变基性岩稳定元素构造判别图解

Fig.9 Diagrams showing the tectonic setting of the metamafic rocks from the Xinzhai and Kangjiawan areas
a. V/Ti vs. Zr 图解, 据 Woodhead *et al.* (1993); b. $(Tb/Ta)_N$ vs. $(Th/Ta)_N$ 图解, 据 Fekak *et al.* (2001); c. Th/Yb vs. Nb/Yb 图解, 据 Dilek and Furnes (2011); d. Ce/Nb vs. Th/Nb 图解, 据 Taylor and Martinez (2003). 图 b 中缩写: N-MORB. 正常洋中脊玄武岩; E-MORB. 富集洋中脊玄武岩; BAB. 弧后盆地玄武岩; CFB. 大陆溢流玄武岩; OIA. 马里亚纳型洋内弧; IAB. 弧间玄武岩; OIB. 洋岛玄武岩; CWPAB. 大陆板内碱性玄武岩; CAMB. 主动陆缘玄武岩

火山碎屑及火山岩外,在大陆一侧多发育三角洲体系至陆棚碎屑沉积(砂岩成熟度高),在岛弧侧可见深海一半深海相的冲积扇沉积岩、硅泥质沉积物和以少量内源碳酸盐岩夹层(彭勇民等, 1999).

本文榴辉岩、变基性岩获得的锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致(图 6),也与前人报道的在混杂岩带内变基性岩原岩年龄(1 200~1 100 Ma)一致(图 2,表 1).它们大都具有亏损 Hf 同位素组成以及兼 MORB 和 IAB 的“双重”地球化学组成(Zhou *et al.*, 2015),指示它们形成于弧后盆地有关的构造环境.另一方面,在吕王一带出露了纺锤状的变基岩岩块,与大理岩和硅泥质变质岩伴生,获得了 $1\,105\pm13$ Ma 的原岩年龄.相较于本文的弧后盆地基性岩,它们更加富集 LREE,具有明显亏损 Nb-Ta

负异常的特征,为一套岛弧玄武质岩石(湖北省地质调查院,2018).从新屋基、新寨、康家湾和操家岗等多个剖面(图 2~3)看,这些弧—弧后盆地性质的(超)基性岩块与硅泥质变质岩、石英岩、大理岩共生,其原岩为一套(超)基性岩、深海一半深海硅泥质沉积岩、高成熟砂岩与碳酸盐岩的组合,这样的岩性组合与陆缘弧—后盆地组成一致.

锆石 U-Pb 定年结果表明,杨家田硅泥质变质岩、新寨石英质变质岩的碎屑锆石的最小年龄值为 ~1 139 Ma,而与之共生的新寨变基性岩的原岩年龄为 ~1 102 Ma,且被基性岩脉侵入(~746 Ma),它们共同约束硅泥质变质岩、石英质变质岩中的碎屑岩的形成时代可能为中元古代末—新元古代早期.在它们的碎屑锆石年龄谱(图 6)中,既包括太古

宙—古元古代的古老年龄(峰值区间位于2.60~2.50 Ga, 2.10~1.82 Ga),这与崆岭杂岩体以及邻区金盆杂岩体中的变质基底年龄一致(Xu *et al.*, 2020);也包括中元古代末年轻的年龄(1.2~1.1 Ga),它与混杂岩带内变基性岩的年龄一致(表1). 硅泥质和石英质岩块既有来自扬子陆块的陆源物质,也有来自弧—弧后盆地的年轻物质,这种双向物源的沉积特征与陆缘弧后盆地沉积的一致(Marsaglia *et al.*, 1992).

近年来,随着研究深入,越来越多的扬子克拉通中元古代末—新元古代早期岩浆—沉积事件被报道. 其中,包括大量陆缘弧火山系统,自西向东包括盐边群(>860 Ma, Sun *et al.*, 2008), 西乡群(950~890 Ma, Ling *et al.*, 2003)、碧口群(880~750 Ma, Wang *et al.*, 2008)和神农架群(1 150~900 Ma; Qiu *et al.*, 2011)等. 米仓山—汉南地区甚至出现一条向北迁移的弧岩浆带,其岛弧有关的岩浆活动从900 Ma开始、可能持续到750 Ma之后(Dong *et al.*, 2012). 最近, Wu *et al.* (2019)从原勉略杂岩中识别出一套950~900 Ma辉长岩—闪长岩—安山岩—斜长花岗岩的组合; Peng *et al.* (2012)在黄陵地体中也识别出年代接近的庙湾蛇绿岩(1 100~980 Ma). 本文作者(徐扬, 2017)在大洪山厘定了947~820 Ma弧—弧后盆地的物质组合,包括弧岩浆岩、弧后盆地的(超)基性岩、深海硅泥质岩、喷气硅质岩和碳酸盐岩和砾岩等. 考虑到相似的岩性组合和相近的时空关系,推测残留于本文混杂岩带内的弧后性质岩块(片)可能与大洪山弧—弧后盆地以及庙湾蛇绿岩对接,在扬子北缘构成一条断续出露的大洋俯冲增生杂岩带/弧岩浆带(图10a),它们与中元古代末—新元古代早期Rodnian超大陆汇聚、扬子地块不断向外横向增生有关(Bader *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013).

6.2 新元古代中—晚期裂解期沉积岩—火成岩

变陆源碎屑岩岩块(片)以发育厚层状的半石墨片岩、石英岩等为标志,其沉积序列可以与混杂带两侧的红安岩群黄麦岭岩组(Zp)对比. 变陆源碎屑岩的定年结果显示,其碎屑锆石年龄分布于2 339~690 Ma,主要年龄峰值位于~760 Ma;对应的800~700 Ma锆石具有低负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-7.5~-10),这与混杂岩带外片麻状花岗岩、红安岩群火山岩的锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成一致,反映了古老陆壳物质在造山后的伸展背景下的再造(徐扬,

2017). 类似地,在桃花附近的变双峰式火山岩岩块中,多件白云钠长片麻岩的原岩年龄集中在800~700 Ma之间(~780 Ma、~750 Ma和~720 Ma),其锆石具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(<-5)和低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(-2‰~+4.7‰)(作者待发表数据),指示为裂谷环境下高温热液蚀变的大陆地壳岩石的部分熔融. 二程变基性岩脉的年龄(746±6 Ma)与西大别地区侵入红安岩群的变基性岩年龄(780~600 Ma; Liu *et al.*, 2004a; 薛怀民等, 2011; 及作者待发表数据)一致. 作者待发表数据显示,西大别这一时期的基性岩脉大多富集大离子亲石元素和亲稀土元素、亏损HFSE和重稀土元素,同时具有富集的Hf-Nd同位素组成,指示为富集大陆岩石圈地幔在伸展背景下的部分熔融,与Rodnian超大陆裂解有关. 以上新元古代中—晚期火成岩组合是裂谷环境下大陆岩石圈地幔和地壳部分熔融的产物(图10b),它们与新元古代中—晚期Rodnian超大陆裂解有关.

6.3 高桥—吕王—永佳河构造混杂岩带的就位时代和性质

高桥—吕王—永佳河构造混杂岩带以包含榴辉岩为特色,它们和其他变质岩块沿着桃花—七角山断裂展布. 本文在康家湾榴辉岩获得~220 Ma变质年龄,这与前人报道的红安高压榴辉岩的变质作用时间一致(Liu *et al.*, 2004b; Zhou *et al.*, 2015). 变质学的研究表明,康家湾和帅家河(位于操家岗以西1 km)榴辉岩的峰值变质条件为432~565 °C、1.9~2.2 GPa(Liu *et al.*, 2004b; Cheng *et al.*, 2010),表明混杂岩带内榴辉岩所在单元曾卷入三叠纪华南陆块向华北陆块的俯冲(图10c, Liu *et al.*, 2015). 混杂岩带南部的王德湾韧性剪切带中获得了214~208 Ma白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(作者未发表数据);应代表折返过程中变质白云母冷却至<350 °C的年龄,进一步约束该混杂岩带在三叠纪末才最终就位于西大别造山带的内部.

一般认为,华南陆块与华北陆块最终拼贴发生在三叠纪(240~220 Ma),表现为华南大陆向北的深俯冲—折返、以及大别—苏鲁高压—超高压变质岩的形成(杨经绥等, 2009; Wu and Zheng, 2013; Dong and Santosh, 2016). 在这一过程中,扬子北缘不同时代和性质的岩石不同程度地卷入俯冲隧道,并发生混合、遭受同程度的变形变质(图10c; Liu *et al.*, 2004b; Cheng *et*

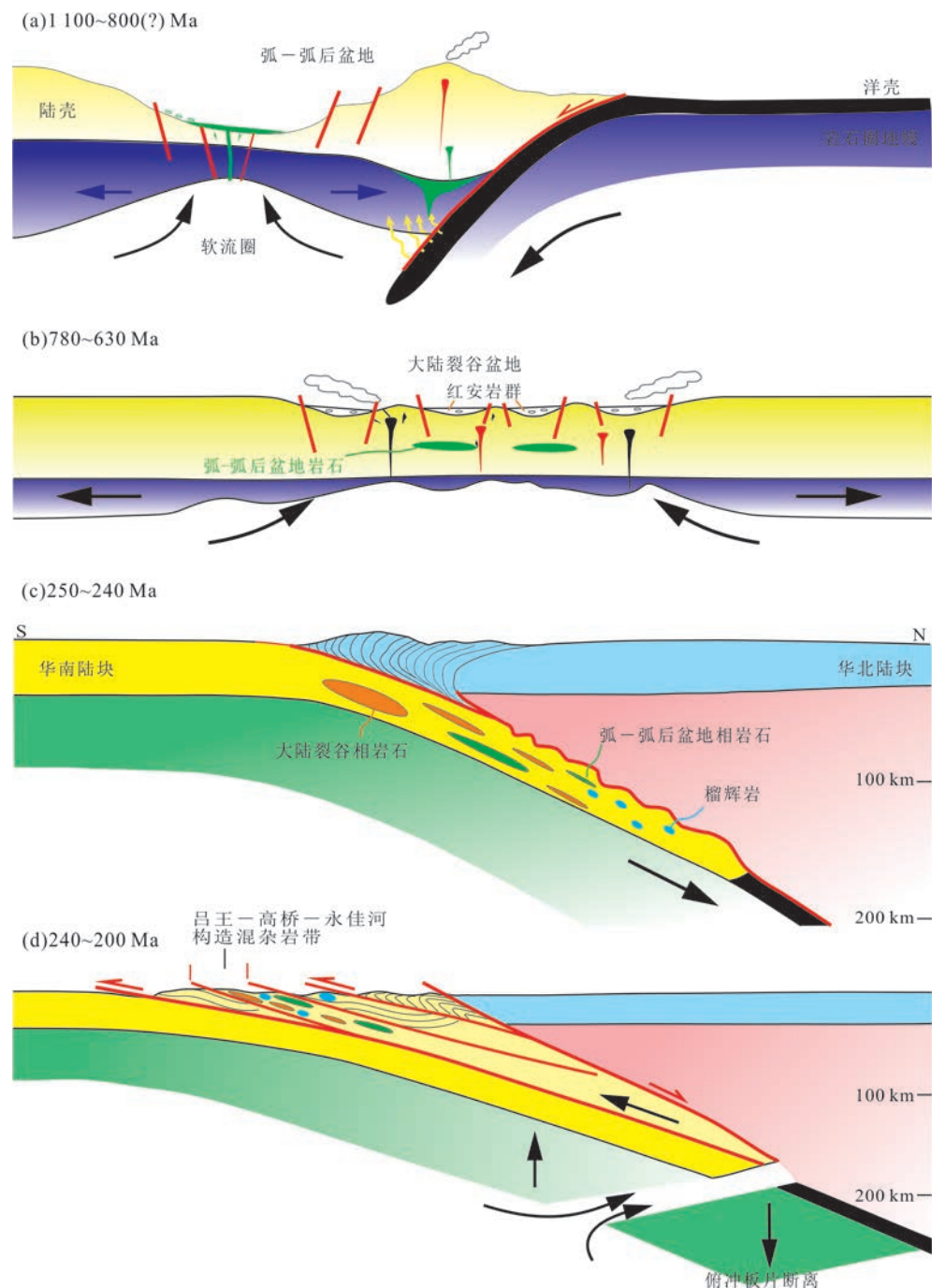


图 10 吕王—高桥—永佳河构造混杂岩带从原岩形成(a~b)、到大陆俯冲(c)和碰撞后折返(d)演化

Fig.10 Sketched diagrams showing the formation of the Lüwang-Gaoqiao-Yongjiahe tectonic mélange belt through protolith emplacement and tectonic transition from continental subduction to the final exhumation in the post-collisional stage

a. 中元古代末—新元古代早期扬子北缘的弧—弧后盆地; b. 新元古代中—晚期大陆裂谷盆地沉积了红安岩群; c. 早三叠世, 扬子北缘不同时代性质的岩石卷入华南向华北的俯冲, 遭受了不同程度的变质; d. 中—晚三叠世俯冲的板片折返、与未卷入深俯冲的低级变质岩进一步混合, 最终在地表形成包含榴辉岩包体的构造混杂岩带. 图 c 和图 d 据 Wu and Zheng(2013)修改

al., 2010). 折返过程中, 它们又与未卷入深俯冲的低变质岩进一步混合 (Zheng *et al.*, 2012), 最终沿着折返断裂面就位于西大别造山带内部 (徐树桐等, 2005), 形成了吕王—高桥—永佳河构造混杂岩带 (图 10d). 由于混杂岩带两侧为相同的红安岩群地层系统 (图 2), 现今的混杂岩带已经不具备构造古地理分割意义.

7 结论

(1)新厘定的吕王—高桥—永佳河构造混杂岩带主要由(超)镁铁质岩、硅泥质岩、石英质岩石、大理岩、含碳陆源碎屑岩、双峰式火山岩以及卷入其中的榴辉岩等多种变质岩块(片)共同组成,它们赋存在一套遭受强烈剪切变形的泥质片岩之中。

(2)构造混杂岩带内的岩块分别来自扬子北缘中元古代末—新元古代早期的弧—弧后盆地系统的沉积岩—火成岩、以及新元古代中—晚期大陆裂解期的陆源碎屑岩—双峰式火山岩—基性岩脉。这些不同时代、不同性质的岩石在三叠纪不同程度地卷入扬子北缘的深俯冲—快折返过程,并最终沿着区域上的折返断裂就位于西大别造山带内部,形成一条包含高压—超高压变质岩的印支期构造混杂岩带。

(3)吕王—高桥—永佳河构造混杂岩带内新厘定的中元古代末弧—弧后岩浆—沉积事件,可与大洪山—黄陵庙湾同时期的地质事件对比,它们共同揭示扬子北缘曾经存在一条中元古代末—新元古代早期俯冲岩浆带。

致谢:感谢两位匿名评审专家对本文提出了有益的修改意见和建议。本文受到湖北省自然科学基金项目(2020CFB344)、中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室开放基金项目(TPR-2019-07)、同位素地球化学国家重点实验室开放—合作基金项目(SKLabIG-KF-18-13)、以及中国地质调查局地调项目(DD20190050)的联合资助。

附表和附件见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Bader, T., Ratschbacher, L., Franz, L., et al., 2013. The Heart of China Revisited, I. Proterozoic Tectonics of the Qin Mountains in the Core of Supercontinent Rodinia. *Tectonics*, 32(3): 661—687. <https://doi.org/10.1002/tect.20024>
- Cheng, H., Du Frane, S. A., Vervoort, J. D., et al., 2010. The Triassic Age for Oceanic Eclogites in the Dabie Orogen: Entrainment of Oceanic Fragments in the Continental Subduction. *Lithos*, 117(1—4): 82—98. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.02.007>
- Chen, W. T., Sun, W. H., Zhao, J. H., et al., 2014. “Grenvillian” Intra-Plate Mafic Magmatism in the Southwestern Yangtze Block, SW China. *Precambrian Research*, 242: 138—153. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.12.019>
- Dilek, Y., Furnes, H., 2011. Ophiolite Genesis and Global Tectonics: Geochemical and Tectonic Fingerprinting of Ancient Oceanic Lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3—4): 387—411. <https://doi.org/10.1130/b30446.1>
- Dong, Y. P., Liu, X. M., Santosh, M., et al., 2012. Neoproterozoic Accretionary Tectonics along the Northwestern Margin of the Yangtze Block, China: Constraints from Zircon U—Pb Geochronology and Geochemistry. *Precambrian Research*, 196—197: 247—274. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.12.007>
- Dong, Y. P., Santosh, M., 2016. Tectonic Architecture and Multiple Orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Gondwana Research*, 29(1): 1—40. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.06.009>
- Fan, W. M., Guo, F., Wang, Y. J., et al., 2004. Late Mesozoic Volcanism in the Northern Huaiyang Tectono-Magmatic Belt, Central China: Partial Melts from a Lithospheric Mantle with Subducted Continental Crust Relicts beneath the Dabie Orogen? *Chemical Geology*, 209(1—2): 27—48. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.04.020>
- Fekkak, A., Pouclet, A., Ouguir, H., et al., 2001. Geochemistry and Geotectonic Significance of Early Cryogenian Volcanics of Saghro (Eastern Anti-Atlas, Morocco). *Geodinamica Acta*, 14(6): 373—385. <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.10510730>
- Hubei Geological Survey, 2013. 1: 250 000 Geological Map of Macheng City, People's Republic of China. Hubei Geological Survey, Wuhan (in Chinese).
- Hubei Geological Survey, 2018. 1: 50 000 Geological and Mineral Map of Xiaohe Town, People's Republic of China. Hubei Geological Survey, Wuhan (in Chinese).
- Laflèche, M. R., Camire, G., Jenner, G. A., 1998. Geochemistry of Post-Acadian, Carboniferous Continental Intraplate Basalts from the Maritimes Basin, Magdalen Islands, Quebec, Canada. *Chemical Geology*, 148(3—4): 115—136. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00002-3](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00002-3)
- Liou, J. G., Ernst, W. G., Song, S. G., et al., 2009. Tectonics and HP—UHP Metamorphism of Northern Tibet — Preface. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3—4): 191—198. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.03.001>
- Li, S. G., 1993. Ba—Nb—Th—La Diagrams Used to Identify Tectonic Environments of Ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 146—157 (in Chinese with English ab-

- stract).
- Li, X.H., Li, W.X., Li, Z.X., et al., 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb Zircon Ages, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes of the Shuangxiwu Volcanic Rocks. *Precambrian Research*, 174(1): 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.07.004>
- Li, Z.X., Bogdanova, S.V., Collins, A.S., et al., 2008. Assembly, Configuration, and Break-up History of Rodinia: A Synthesis. *Precambrian Research*, 160(1): 179–210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021>
- Ling, W.L., Gao, S., Zhang, B.R., et al., 2003. Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Northwestern Yangtze Craton, South China: Implications for Amalgamation and Break-up of the Rodinia Supercontinent. *Precambrian Research*, 122(1): 111–140. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(02\)00222-x](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(02)00222-x)
- Liu, X.C., Jahn, B.M., Liu, D., et al., 2004a. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of a Metagabbro and Eclogites from Western Dabieshan (Hong'an Block), China, and Its Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 394(3–4): 171–192. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.08.004>
- Liu, X., Wei, C., Li, S., et al., 2004b. Thermobaric Structure of a Traverse across Western Dabieshan: Implications for Collision Tectonics between the Sino-Korean and Yangtze Cratons. *Journal of Metamorphic Geology*, 22(4): 361–379. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2004.00519.x>
- Liu, X.C., Li, S.Z., Jahn, B.M., 2015. Tectonic Evolution of the Tongbai-Hong'an Orogen in Central China from Oceanic Subduction/Accretion to Continent-Continent Collision. *Science China: Earth Sciences*, 58(9): 1477–1496. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5145-z>
- Marsaglia, K.M., Ingersoll, R.V., Packer, B.M., 1992. Tectonic Evolution of the Japanese Islands as Reflected in Modal Compositions of Cenozoic Forearc and Backarc Sand and Sandstone. *Tectonics*, 11(5): 1028–1044. <https://doi.org/10.1029/91tc03183>
- Peng, S.B., Kusky, T.M., Jiang, X.F., et al., 2012. Geology, Geochemistry, and Geochronology of the Miaowan Ophiolite, Yangtze Craton: Implications for South China's Amalgamation History with the Rodinian Supercontinent. *Gondwana Research*, 21(2–3): 577–594. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.07.010>
- Peng, Y.M., Pan, G.T., Luo, J.N., 1999. The Volcanic-Sedimentary Characteristics of Back-Arc Basins. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 19(5): 65–72 (in Chinese with English abstract).
- 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., 2011. Recognition of Grenvillian Volcanic Suite in the Shennongjia Region and Its Tectonic Significance for the South China Craton. *Precambrian Research*, 191(3): 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.09.011>
- Rivers, T., 1997. Lithotectonic Elements of the Grenville Province: Review and Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 86(3): 117–154. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(97\)00038-7](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(97)00038-7)
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2014. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 4: 1–51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Shu, L.S., Deng, P., Yu, J.H., et al., 2008. The Age and Tectonic Environment of the Rhyolitic Rocks on the Western Side of Wuyi Mountain, South China. *Science in China (Series D)*, 51(8): 1053–1063. <https://doi.org/10.1007/s11430-008-0078-4>
- 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: 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, W.H., Zhou, M.F., Yan, D.P., et al., 2008. Provenance and Tectonic Setting of the Neoproterozoic Yanbian Group, Western Yangtze Block (SW China). *Precambrian Research*, 167(1–2): 213–236. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.08.001>
- Taylor, B., Karner, G.D., 1983. On the Evolution of Marginal Basins. *Reviews of Geophysics*, 21(8): 1727–1741. <https://doi.org/10.1029/rg021i008p01727>
- Taylor, B., Martinez, F., 2003. Back-Arc Basin Basalt Systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(3): 481–497. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00167-5](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00167-5)
- Wang, X.C., Li, X.H., Li, W.X., et al., 2008. The Bikou Basalts in the Northwestern Yangtze Block, South China: Remnants of 820–810 Ma Continental Flood Basalts? *Geological Society of America Bulletin*, 120(11): 1478–1492. <https://doi.org/10.1130/b26310.1>
- Wang, Y.J., Zhou, T.Z., Cai, Y.F., et al., 2016. Geochronological and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of the Ailaoshan Granitic and Migmatite Rocks and Its Implications on Neoproterozoic Subduction along the SW Yangtze Block. *Precambrian Research*, 283: 106–124.

- <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.07.017>
- Woodhead, J., Eggins, S., Gamble, J., 1993. High Field Strength and Transition Element Systematics in Island Arc and Back-Arc Basin Basalts: Evidence for Multi-Phase Melt Extraction and a Depleted Mantle Wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 114(4): 491–504. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(93\)90078-n](https://doi.org/10.1016/0012-821x(93)90078-n)
- Wu, P., Zhang, S.B., Zheng, Y.F., et al., 2019. Amalgamation of South China into Rodinia during the Grenvillian Accretionary Orogeny: Geochemical Evidence from Early Neoproterozoic Igneous Rocks in the Northern Margin of the South China Block. *Precambrian Research*, 321: 221–243. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.12.015>
- 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. *Gondwana Research*, 23(4): 1402–1428. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.09.007>
- Xu, S.T., Liu, Y.C., Chen, G.B., et al., 2005. Classification of Microdiamonds from Eclogites of the Dabie Mountains and Sulu Area, East-Central China, and Their Tectonic Implications. *Geological Bulletin of China*, 24(12): 1081–1088 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y., 2017. Neoproterozoic (900–780 Ma) Magmatism during the Evolution of the Suiying Terrane in the Northern Margin of the Yangtze Block (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y., Polat, A., Deng, X., et al., 2020. The ~1.97 Ga Dioritic Block in the Hong'an Terrane, Central China: Syn-collisional Alkaline Magmatism at the Northern Margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 342(15): 105–713. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105713>
- Xue, H.M., Ma, F., Song, Y.Q., 2011. Geochemistry and SHRIMP Zircon U–Pb Data of Neoproterozoic Metamagmatic Rocks in the Suizhou–Zaoyang Area, Northern Margin of the Yangtze Craton, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1116–1130 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J.S., Xu, Z.Q., Zhang, J.X., et al., 2009. Tectonic Setting of Main High- and Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belts in China and Adjacent Region and Discussion on Their Subduction and Exhumation Mechanism. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1529–1560 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.W., Guo, A.L., Wang, Y.J., et al., 2013. Tectonics of South China Continent and Its Implications. *Science China: Earth Sciences*, 56(11): 1804–1828. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4679-1>
- Zhang, Y.Z., Wang, Y.J., 2016. Early Neoproterozoic (~840 Ma) Arc Magmatism: Geochronological and Geochemical Constraints on the Metabasites in the Central Jiangnan Orogen. *Precambrian Research*, 275: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.11.006>
- Zhao, G.C., Cawood, P.A., 2012. Precambrian Geology of China. *Precambrian Research*, 222–223: 13–54. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.017>
- Zhao, J.H., Zhou, M.F., Yan, D.P., et al., 2011. Reappraisal of the Ages of Neoproterozoic Strata in South China: No Connection with the Grenvillian Orogeny. *Geology*, 39(4): 299–302. <https://doi.org/10.1130/g31701.1>
- Zheng, Y.F., Chen, Y.X., 2019. Crust–Mantle Interaction in Continental Subduction Zones. *Earth Science*, 44(12): 3961–3983 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.F., Zhang, L.F., McClelland, W.C., et al., 2012. Processes in Continental Collision Zones: Preface. *Lithos*, 136–139: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.11.020>
- Zhou, L.G., Xia, Q.X., Zheng, Y.F., et al., 2015. Tectonic Evolution from Oceanic Subduction to Continental Collision during the Closure of Paleotethyan Ocean: Geochronological and Geochemical Constraints from Metamorphic Rocks in the Hong'an Orogen. *Gondwana Research*, 28(1): 348–370. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.03.009>
- Zhou, M.F., Yan, D.P., Wang, C.L., et al., 2006. Subduction-Related Origin of the 750 Ma Xuelongbao Adakitic Complex (Sichuan Province, China): Implications for the Tectonic Setting of the Giant Neoproterozoic Magmatic Event in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1–2): 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.032>
- Zhou, X.M., Zou, H.B., Yang, J.D., et al., 1989. Sm–Nd Isochron Age and Its Geological Significance for Pophiolites from Fuchuan of the She County of Anhui Province. *Chinese Science Bulletin*, 34(16): 1243–1245 (in Chinese).
- Zhu, W.G., Zhong, H., Li, Z.X., et al., 2016. SIMS Zircon U–Pb Ages, Geochemistry and Nd–Hf Isotopes of ca. 1.0 Ga Mafic Dykes and Volcanic Rocks in the Huili Area, SW China: Origin and Tectonic Significance. *Precambrian Research*, 273: 67–89. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.12.011>

附中文参考文献

- 湖北省地质调查院, 2013. 中华人民共和国 1:250 000 麻城市幅地质图. 武汉: 湖北省地质调查院.
- 湖北省地质调查院, 2018. 中华人民共和国 1:50 000 小河镇幅矿产图. 武汉: 湖北省地质调查院.
- 李曙光, 1993. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Nb-Th-La 判别图. 岩石学报, 9(2): 146—157.
- 彭勇民, 潘桂棠, 罗建宁, 1999. 弧后盆地火山—沉积特征. 岩相古地理, 19(5): 65—72.
- 徐树桐, 刘贻灿, 陈冠宝, 等, 2005. 大别山及苏鲁地区微粒金刚石分类及其大地构造意义. 地质通报, 24(12): 1081—1088.
- 徐扬, 2017. 扬子北缘随应地块及邻区新元古代 900—780 Ma 岩浆事件及其构造意义(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 2011. 扬子克拉通北缘随(州)—枣(阳)地区新元古代变质岩浆岩的地球化学和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究. 岩石学报, 27(4): 1116—1130.
- 杨经绥, 许志琴, 张建新, 等, 2009. 中国主要高压—超高压变质带的大地构造背景及俯冲/折返机制的探讨. 岩石学报, 25(7): 1529—1560.
- 郑永飞, 陈伊翔, 2019. 大陆俯冲带壳幔相互作用. 地球科学, 44(12): 3961—3983.
- 周新民, 邹海波, 杨杰东, 等, 1989. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. 科学通报, 34(16): 1243—1245.