



移动阅读

齐靓, 徐亚军, 杜远生, 等, 2023. 华夏地块新元古代沉积记录与超大陆重建[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 188–211. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02017](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02017)

QI L, XU Y J, DU Y S, et al., 2023. Neoproterozoic sedimentary records in the Cathaysia Block and their implications for the supercontinent reconstruction[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 188–211. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02017](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02017)

华夏地块新元古代沉积记录与超大陆重建

齐 靓^{1,2}, 徐亚军³, 杜远生³, 侯明才^{1,2}

(1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059; 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059; 3. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 新元古代-早古生代, Rodinia 超大陆裂解至 Gondwana 大陆聚合的过程对华南构造格局与古地理演化具有重要的制约作用, 然而在这过程中华夏地块的位置、华夏与扬子之间的关系等问题仍存在争议。本文通过同位素地层年代学、新元古代冰期事件及成矿事件对比了华夏地块武夷南部-南岭地区及华夏西缘新元古代中-晚期地层。在此基础上, 对新元古代沉积物进行碎屑锆石物源分析, 发现华夏西缘拉伸纪晚期-埃迪卡拉纪曾出现多次物源方向的转换, 并在成冰纪晚期同时出现来自华南内部和外部的双向物源。结合浅海陆棚的沉积环境, 表明此时扬子与华夏之间并没有宽阔的大洋相隔。华夏地块拉伸纪晚期-埃迪卡拉纪碎屑岩中包含了大量中元古代至新元古代早期的碎屑锆石, 与东冈瓦纳北部印度、东南极等地区的沉积记录吻合, 指示华夏地块至少自 750 Ma 时期就接收到来自印度北缘的碎屑物质。在 Rodinia 超大陆裂解至 Gondwana 大陆聚合期间, 华南一直保持在超大陆边缘的古地理位置, 与印度北缘相连。

关键词: 华夏地块; 新元古代; 物源分析; Rodinia 超大陆; Gondwana 大陆

中图分类号: P534.3

文献标识码: A

Neoproterozoic sedimentary records in the Cathaysia Block and their implications for the supercontinent reconstruction

QI Liang^{1,2}, XU Yajun³, DU Yuansheng³, HOU Mingcai^{1,2}

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The tectonic framework and paleogeographic evolution of Neoproterozoic-early Paleozoic successions in the South China Block provides the first-order constraint on its role in the break-up of Rodinia and the subsequent amalgamation of Gondwana. However, there still is much disagreement in defining the paleoposition of the Cathaysia Block and its relationship with the Yangtze Block. In this thesis, isotopic geochronology, Neoproterozoic glaciations, and mineralization records were found in the Cathaysia Block, providing new evidence for the stratigraphic framework. Detrital zircon U-Pb dating results provide evidence of prominent provenance transition during late Tonian to Ediacaran, and bidirectional sources in the western margin of Cathaysia Block at late Cryogenian, integrating with the evidence from a sedimentary environment of neritic shelf, a closure of paleo-South China Ocean is suggested during late-Neoproterozoic. The detrital records of the early Tonian -Ediacaran strata in the Cathaysia Block present

收稿日期: 2022-12-31; 改回日期: 2023-01-15; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 崔晓庄

作者简介: 齐靓(1992—), 女, 研究员, 硕士生导师, 主要从事沉积大地构造、古气候和古地理研究。

E-mail: liangqi_cdut@163.com

资助项目: 国家自然科学基金项目(42102139、42172126)

abundant late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic (1 200-950 Ma) ages. These ages match the record of East Gondwana, and imply a peripheral setting for South China with respect to the supercontinent and most likely adjacent to India during the transitional period from the Rodinia supercontinent to the Gondwana.

Key words: Cathaysia Block; Neoproterozoic; Provenance analysis; Rodinia supercontinent; Gondwanaland.

0 引言

华夏地块位于华南的东南部,新元古代与扬子地块沿江山-绍兴带拼合形成统一的华南板块。“华夏”这一名词最早由 Grabau 在 1924 年提出,将其称为“华夏古陆”,范围包含中国东南部、海南岛、朝鲜半岛甚至日本东北部分地区等存在于前寒武纪时期的大陆(Grabau, 1924)。随后在 1945-1999 年,不同学者针对这一名词包含的范围及地层年代提出了不同的见解。例如,黄汲清(1994)依据浙、闽、赣、湘、桂、粤泥盆系沉积岩之下的区域性角度不整合,提出“华夏古陆”包含的范围较小,仅为中国东南部以加里东造山带为基底的前泥盆纪古陆;根据在泥盆纪沉积之下变质岩系中发现的笔石、三叶虫、腕足类化石等,任纪舜(1990)提出华夏并非一个前震旦纪地块,而将“华夏古陆”重新定义为华南加里东造山带或震旦纪-早古生代褶皱带;与此同时,武夷-云开地区是加里东期古岛弧(郭令智等, 1996)、华夏和扬子之间是特提斯多岛洋体系,且扬子和华夏直至中三叠世印支运动才完整拼合(殷鸿福等, 1999)、华夏地区是由大洋板块向华南俯冲拼贴而成的早古生代岛弧(杨树峰, 陈汉林, 1995)或早古生代碰撞造山带(李继亮, 1993)等观点陆续被提出,均不赞成华夏古陆的存在。但随着近年来大量前寒武纪年代数据的发表,越来越多的学者认为在元古宙时期的扬子地块对岸曾存在过一个规模较大的地体。目前较多学者认同华夏地区存在古老岩层,但分布较为局限、且刚性差,经历了加里东期强烈的变质作用,而采用“华夏地块”一词来描述位在华南东南部广泛出露前寒武系浅变质泥砂质板岩、千枚岩夹变质基性火山岩,以及早古生代被巨量志留纪铝过饱和花岗岩侵入的地质体(舒良树, 2006, 于津海等, 2006, Yu et al., 2008, 舒良树等, 2020, Shu et al., 2021)。

根据年代学数据和构造变形记录表明,华夏地块为多地体经离散-拼合的陆块群,这些中/小陆块以新元古界变质岩为主体,结晶基底可进一步划分。各地体在新元古代早-中期拼合为统一地块前拥有

着不同的地层序列、物源体系和演化历史。其中,于津海(2006)提出华夏可分为武夷山区和南岭-云开两个分区;舒良树(2006, 2020)厘定出 3 个前寒武纪地体构造,分别为古元古代-新元古代武夷地体、新元古代南岭地体和云开地体;许效松等(2012)提出这些小地体小而不稳定,自东向西为武夷地块、罗霄地块、云开地块以及东南沿海的闽粤地块和粤东南地块。新元古代中-晚期(820~538.8 Ma)华夏地块内部形成拉张性的盆地,沉积了一套稳定的浅海-半深海碎屑岩系(舒良树, 2006)。在晚奥陶世-早泥盆世(460~390 Ma),华夏地区地壳逐渐开始隆升,发生区域性海退,同时加里东造山运动使华夏地块新元古代-早古生代岩层卷入强烈变形或被岩浆活动侵入。但这一过程的造山类型和地球动力学过程尚未形成统一意见,部分学者认为是俯冲-碰撞造山作用,即华夏与扬子地块之间的华南洋持续至早古生代,与洋盆俯冲-闭合有关(殷鸿福等, 1999, Peng et al., 2012, 潘桂棠等, 2016, 覃小锋等, 2017, Liu et al., 2018, 张克信等, 2018);然而另一部分学者将华夏地块内部早古生代造山过程归因为板内构造体制,由 Gondwana 大陆最终聚合增生造山的构造应力远程传播效应形成的陆内造山(Wang et al., 2010, 张国伟等, 2013, Xu et al., 2013, 李三忠等, 2016, Shu et al., 2021)。由于陆内造山的驱动机制仍缺少关键性证据,近期, Zhao et al. (2022)利用数值模拟结果提出洋-陆碰撞模式,认为华南东华夏大洋岩石圈受西华夏地块逆冲作用发生洋-陆碰撞,从而形成早古生代造山带。早古生代构造运动之后,华南板块主体定型,沉积环境与古地理真正统一。

本文以讨论华夏地块新元古代沉积记录对超大陆聚合和裂解过程的响应为导向,梳理出目前针对华夏地块新元古代地层学、古地理学以及大地构造学方面的研究仍存在一些需要解决的问题。这些问题包括:华夏与扬子板块是否可进行地层对比?华夏与扬子板块之间华南洋的闭合时间为晚古生代-中生代还是新元古代?华夏地块或华南板块的古地理位置是在 Rodinia 超大陆的中心还是边

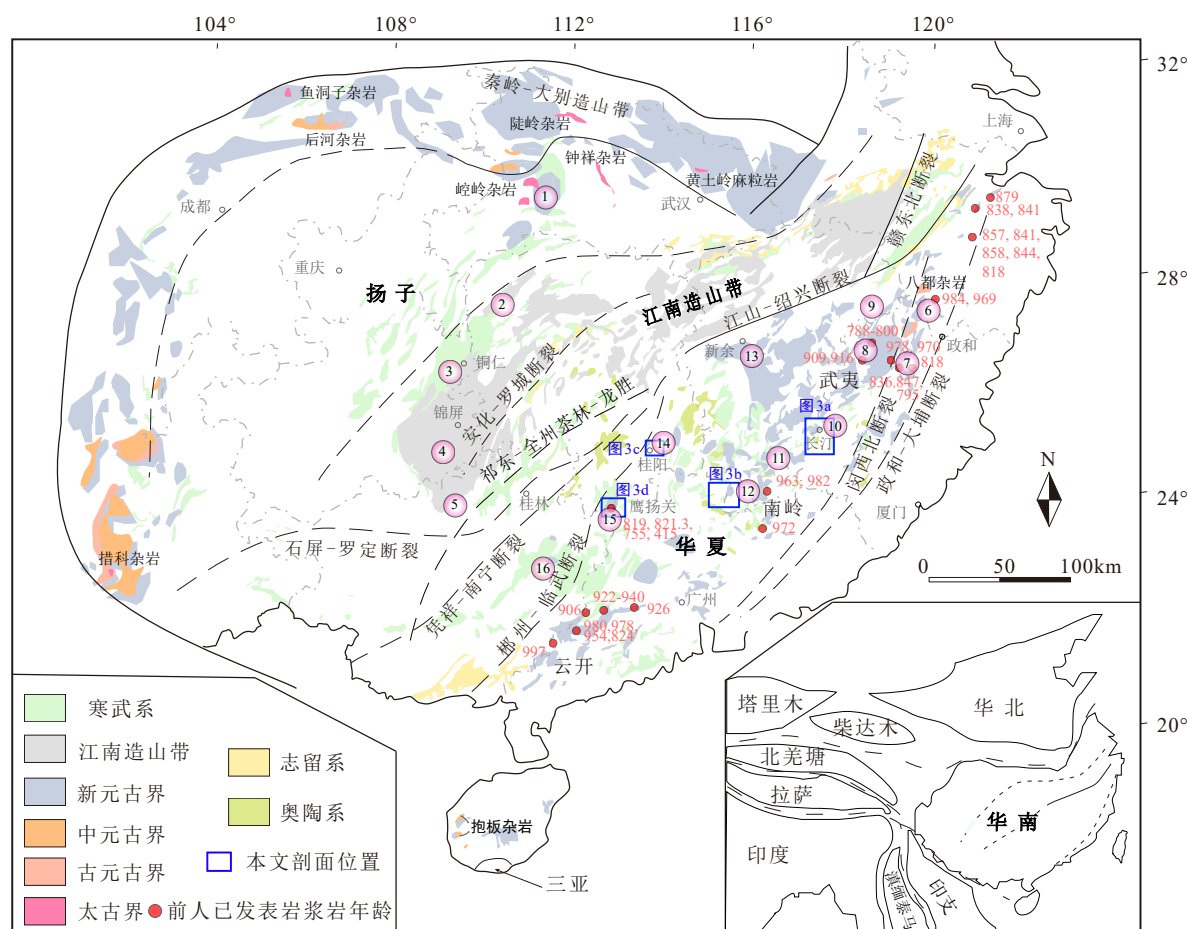
缘?近年来,笔者对华夏武夷南部长汀、南岭南雄以及华夏西缘泗州山、鹰扬关等地区新元古代地层展开了一系列野外地质调查,基于对沉积记录和关键事件的系统研究,从地质年代学、地球化学等角度对物源体系、古地理环境及构造演化进行讨论,已取得若干成果(Qi et al., 2018, 2019, 2020a, 2021)。本文对上述地区新元古代地层岩性特征、锆石峰值特征等信息进行梳理、总结,在对华夏地块不同地区进行地层划分对比的基础上进行物源分析,从而为超大陆古地理重建提供新的证据。

1 华夏地块地质概况

1.1 前新元古代基底

华夏与扬子地块均为华南板块重要的组成部分,然而与扬子地块北缘、西缘分布有古老基底不

同(例如,约 3.45~2.62 Ga 崆岭杂岩,约 2.9~2.65 Ga 钟祥杂岩,约 2.5 Ga 陡岭杂岩,约 2.82~2.5 Ga 鱼洞子杂岩,约 2.75~2.7 Ga 黄土岭麻粒岩,以及约 3.11~3.06 Ga、2.86~2.85 Ga 措科杂岩)(Gao et al., 2011, Cui et al., 2021)(图 1),相较而言,华夏地块是否含有古老基底仍没有明确的认识。目前仅在靠近政和-大埔断裂的武夷山北部(浙西南-闽西北地区)发现一套具有岛弧属性的片麻岩、A 型/S 型花岗岩以及八都角闪岩,被认为是华夏地块最古老的岩石(Yu et al., 2012, Zhang et al., 2021)。该套岩石结晶年龄为 1.91~1.78 Ga,其 Hf 同位素两阶段模式年龄约为 2.78 Ga,认为是晚太古代古老物质重熔再造。尽管在华夏地块仍未发现出露地表的太古代基底,但大量具有太古代年龄的锆石被陆续报道。例如,广西东南部中生代-新生代火山岩中具



(圆圈序号位置的地层划分见图 2, 岩浆岩年龄参考文献见附表 1*)

图 1 华南板块构造简图, 示前寒武纪-早古生代地层及华夏地块新元古代岩浆岩分布

Fig. 1 Simplified geological map of the South China Craton showing the main Precambrian and early Paleozoic stratigraphic units and Neoproterozoic volcanic rocks of Cathaysia Block.

有太古代 Lu-Hf 同位素结晶年龄的锆石捕虏晶(郑建平等, 2008); 龙泉地区发现的两颗约 4 100 Ma 的碎屑锆石(于津海等, 2006), 大明山寒武系砂岩中近似亏损地幔 Hf 同位素组成的结晶年龄为 $4\ 107 \pm 29$ Ma 的碎屑锆石(徐亚军等, 2013), 粤北南雄地区片麻岩中 3.7 Ga 的碎屑锆石(Yu et al., 2007), 三叠纪玄武岩的基性麻粒岩中年龄为 ca. 2 520 Ma 捕虏体(Li et al., 2018), 以及普遍存在于新元古界-古生界样品中的太古代继承锆石(Xu et al., 2013)。此外, 现代河流碎屑物中 2.8~2.5 Ga 的锆石 Hf 同位素和全岩 Nd 同位素模式年龄数据(Xu et al., 2007), 也指示着华夏地块可能存在深埋的太古代基底。

早期研究者们认为, 浙西南、闽北、赣中等地存在着华夏地块古-中元古代基底, 包括龙泉群、马面山群、迪口群、麻源群等。但近年来报道的锆石、独居石年代学证据表明, 这些基底为新元古代-早古生代建造, 并经历了显生宙的高级变质作用(Wan et al., 2007, 徐先兵等, 2010, Yang and Jiang, 2019)。目前确认的中元古代基底记录仅零星保存于海南岛的抱板杂岩中, 包含 1.55~1.43 Ga 的片麻状花岗岩(Xu et al., 2019, Zhang et al., 2020), 以及沉积年龄分别为 1.55~1.45 Ga 和 1.45~1.30 Ga 的戈枕村组和峨文岭组(Xu et al., 2019)。但海南岛在前寒武时期是否归属于华夏地块仍存在争议(Cawood et al., 2020, Zhang et al., 2020), 因此本文暂不将抱板杂岩作为华夏地块的中元古代基底。

1.2 新元古代地层记录

华夏存在长达六亿年的中元古代沉积记录缺失, 这可能是因为长期隆升所导致的沉积间断, 或该时期并不存在构造运动仅发生古老物质再循环的稳定沉积, 亦或是这些地层仍深埋于地下还未被发现(舒良树等, 2020), 具体原因仍需要更多的研究证据。新元古代中期-早古生代地层主要出露于武夷、南岭、云开和华夏西缘一带, 与下伏地层呈断层接触。由于后期造山运动引起的改造作用对定年解释造成了一定的困难, 因此其地层序列对比的工作研究相对较少。有学者先后对武夷北部闽西北、闽东北地区出露的原岩为火山岩或碎屑岩的片麻岩、片岩进行了系统的同位素年龄和全岩地球化学研究, 将原先认为形成于中元古代的迪口群、万全群、马面山群、龙泉群修正为新元古代中期(拉伸系晚期, ca. 820~720 Ma)(Wan et al., 2007, 徐先

兵等, 2010, Yang and Jiang, 2019)。同时, 于津海等和张爱梅等人也对出露于武夷南部闽西南桃溪地区的曾被认为形成于中元古时期的麻粒岩相泥质变质岩、原岩为花岗质(或流纹质)片麻岩进行了年代学研究, 将其形成时代重新厘定为新元古代中期(ca. 736 Ma)(图 2)(Yu et al., 2005, 张爱梅等, 2011)。

华夏地块武夷-云开地区新元古代成冰纪-埃迪卡拉纪地层(720~534 Ma)广泛分布, 总体为一套以绿片岩相变质砂岩-泥岩为主碎屑岩陆棚浅海沉积, 并没有出现与成冰纪雪球地球相关的冰碛杂岩(例如, 扬子地块成冰系长安组、南沱组等厚层块状杂砾岩夹砂岩透镜体)。这些地层包括武夷南部赣西南-闽西南的楼子坝组、南岩组、黄连组、西溪组、寻乌组, 南岭-云开赣中-粤东北等地的上施组、下坊组、老虎塘组、乐昌峡群等(福建省地质矿产局, 1985; 广东省地质矿产局, 1988; 江西省地质矿产局, 1984)(图 2)。此外, 华夏西缘赣中新余、湘东南桂阳以及粤桂湘交界的鹰扬关等地也分布有成冰纪—埃迪卡拉纪地层, 为一套绿片岩相变质碎屑岩沉积, 包含大江边组、泗州山组、天子地组、上施组、正园岭组、老虎塘组等(图 2)。其中, 在桂阳、新余等地的泗州山组、正园岭组和下坊组均出现据冰川沉积特征的含砾碎屑岩, 但与全球成冰纪冰期的对应关系仍需更明确的年代学证据(湖南省地质矿产局, 1988; 黄建中等, 1994)。另外, 广西区域地质调查院(2017)也在华夏西缘桂东大瑶山一带发现一套成冰系-寒武系地层(未分组), 新元古界成冰系-震旦系为一套浅变质细砂岩、石英砂岩、泥岩, 顶部为一套硅质岩并与寒武系砂岩整合接触。前人对华夏地块新元古代地层的对比工作主要依据较少的古生物及碎屑锆石证据, 由于缺少约束前寒武地层年龄的凝灰岩, 缺乏对地层沉积时限以及区域地层对应关系的梳理。

2 华夏新元古代岩浆与变质作用

2.1 新元古代岩浆作用

由于后期显生宙造山运动作用的改造, 整个华夏地块发生强烈隆升-褶皱变形, 这为岩石定年工作带来很大的困难(徐先兵等, 2010)。目前在华夏地块内部仅识别出有限的新元古代岩体, 主要分布于武夷北部陈蔡-诸暨-龙泉-政和、南岭寻乌以及云开信宜-北流-罗定等地, 岩性以辉长岩、变辉绿岩、角闪岩、变流纹岩、石英角斑岩等为主, 锆石

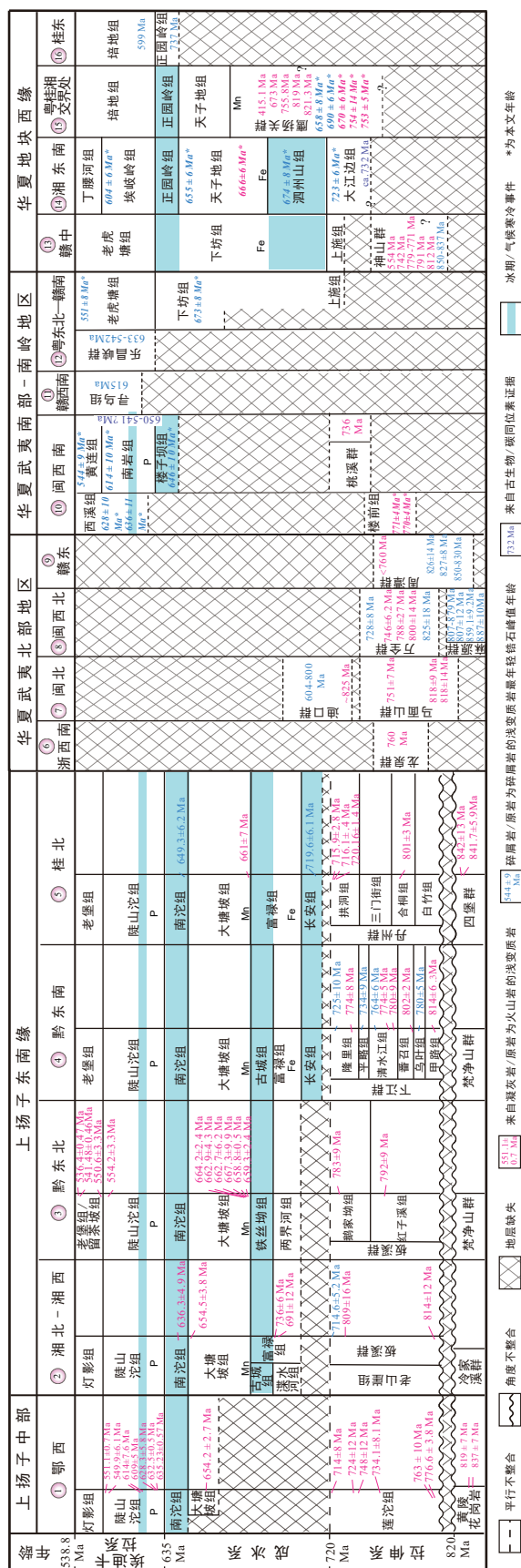


图 2 华南东南部新元古中-晚期地层划分及同位素年代统计表

年龄集中于 ca. 906~984 Ma 以及 ca. 824~858 Ma (图 1, 附表 1*和附表 2*)。其中, 前一个年龄区间的岩浆岩多具有岛弧地球化学特征(Shu et al., 2011, Wang et al., 2013), 而后者中的部分样品具有大陆裂谷特征(Li et al., 2011)。据此, 有学者推测华夏地块曾在新元古代早期经历过板块俯冲和增生过程, 与扬子地块沿江南造山带发生碰撞, 并在 ca. 820 Ma 进入碰撞后伸展阶段(周金城等, 2009, Zhao, 2015)。

新元古代中-晚期岩浆岩分布更加有限, 仅在武夷南部政和、建瓯一带以及云开的信宜等地零星出露, 锆石 U-Pb 年龄集中在 ca. 818~750 Ma, 岩性以幔源铁镁质岩为主。该年龄的多数岩浆岩具有大陆裂谷地球化学特征, 其中在政和地区出露的 ca. 818 双峰式岩浆岩被解释为地幔柱岩浆作用形成大陆裂谷的证据(Li et al., 2005)。此外, 华夏西缘的新余、鹰扬关一带出露了一系列包含基性火山岩、火山碎屑岩、凝灰岩岩块或岩片的混杂岩, 这些混杂岩中的基质部分也被称为鹰扬关群、神山群, 但前人对他们形成的时代和构造背景的认识并不统一。例如, 周汉文等(2002)、覃小峰等(2015)和田洋等(2015)和 Tian et al. (2020)等对鹰扬关混杂岩中变基性岩、凝灰岩岩块定年, 得到了 822~755 Ma, 415 Ma 不同的原岩年龄; 侯立鸣(2020)、Wang et al.(2022)和 Yang et al.(2022)在神山群辉长岩、凝灰岩、变火山岩和砂岩中获得了 850~837 Ma, 812~742 Ma, 554 Ma 不同的年龄。其中早古生代的岩浆年龄也被当作华夏与扬子之间存在早古生代洋盆的重要证据(覃小峰等, 2015, 覃小峰等, 2017, Wang et al., 2022)。然而, 由于华夏西缘普遍遭受到后期变质变形作用的影响, 围岩混染、后期混杂岩体侵入等原因均可形成早古生代时期的变质记录。而这些早古生代年龄代表的是早期(新元古代)岩浆被后期改造的年龄, 还是形成年龄, 仍未有明确判别。

2.2 新元古代变质作用

新元古代与造山作用相关的变质记录在华夏地块、乃至整个华南东南部均不显著, 区域上仅发生低绿片岩相到低角闪岩相变质作用, 多表现为板岩、千枚岩、片岩等, 而麻粒岩、片麻岩等高级变质岩仅在拼合带附近的武夷北部、江南造山带东

段的赣东北和赣北零星出现。例如, Shu et al. (1994)对赣东北蓝闪石片岩、硬玉钠长片岩中蓝闪石进行 K-Ar 年代学研得出变质年龄约为 866 ± 14 Ma, 由于蓝闪石片岩一般认为是洋壳俯冲的产物低温高压变质作用的产物, 因此该年龄也被推测为江南造山带的变质峰值年龄(Zhao and Cawood, 1999)。近年来, 一些年代学研究结果为新元古代变质记录提供了新的证据。例如, 从庐山星子群样品中锆石的 U-Pb 谐和图推测, 铅丢失所对应变质年龄晚于 820 Ma(Zhang et al., 2017); 华夏武夷北部黎川-建宁和湖南岳阳分别发现了 14 颗和 9 颗具有明显核-边结构的锆石, 亮白色变质环带的年龄分别为 860 ± 6 Ma(Yao et al., 2017)和 853~835 Ma(Yan et al., 2015)。上述证据均证明了新元古代早-中期(约 860~820 Ma)在华夏地块曾发生过一次变质变形作用。此外, Zhao et al.(2015)提出的华南双向俯冲、陆-弧-(微)陆之间的软碰撞模式, 而非陆-陆之间的硬碰撞, 为拼合带附近缺乏高级变质记录提供了合理解释。

对于华夏地块而言, 普遍发生的是加里东期热事件的叠加改造事件。早期锆石被热液蚀变、重结晶或边缘形成变质环带, 导致在前寒武地层中获得了大量的加里东期变质年龄或酸性侵入岩体年龄。例如, 前人在云开罗定、信宜、高州等地的基底变质岩中, 识别出了 450 Ma 加里东变质作用叠加形成的变质(深熔)锆石年龄(周雪瑶等, 2015); 武夷北部闽北、闽西北地区马面山群、麻源群等变沉积岩中记录了 446~425 Ma 的锆石变质环带年龄(Wan et al., 2007); 武夷北部靠近江南造山带的赣东弋阳周潭群高角闪岩相变火山-沉积岩中获得 437~417 Ma 的变质锆石年龄(Hui et al., 2020, Yang et al., 2022); 弋阳县南出露的原岩为新元古代早期的基性麻粒岩, 也识别出了 436 Ma 的变质年龄(于津海等, 2014)。此外, 华夏与扬子拼合带的诸暨陈蔡和龙游的新元古代蛇绿混杂岩中, 也获得了 ca. 430 Ma 的混合岩化和锆石重置年龄(Yao et al., 2014a)。因此, 有限的新元古代变质记录可能被后期强烈再造或重置, 可能是在华夏-江南造山带地区难以识别出新元古代大量与俯冲-碰撞相关变质事件的重要原因之一。

一些学者将华夏西缘岑溪糯垌蛇绿岩(彭松柏,

*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。

2016)、岑溪大爽玄武安山岩-安山岩(彭松柏, 2016)、韶关地区河口上洞英安岩(易立文等, 2014)、鹰扬关变基性岩(覃小锋等, 2015)等作为早古生代洋壳俯冲, 也就是早古生代存在“华南洋”的证据。然而, 经历后期构造-热事件改造的锆石, 往往在变质流体作用下形成亮白色的变质环带, 或者整颗锆石被蚀变、重置、退晶, 改变原始年龄信息, 上述岩体中的锆石年龄是否可以代表早古生代的结晶年龄仍存在一定挑战。因此, 上述高精度年龄能否做出适当解释的关键在于能否区别继承锆石以及由于后期热事件对原有锆石进行不同程度改造。

3 新元古代地层划分与对比

自 820 Ma 开始, 华南东南部发育南华裂谷盆地, 形成了相对完整的陆-海相沉积序列。前人对扬子地块不同地区的地层研究取得了较大进展, 为华南东南部新元古代地层划分及对比提供了基础证据(图 2)。然而, 华夏地块由于缺少直接有效的年代学或古生物学证据, 且多数地区前寒武地层为断层接触, 无法与扬子地区进行直接对比。本文对华夏武夷南部长汀、南岭南雄以及华夏西缘泗州山、鹰扬关等地区新元古代地层展开了野外地质调查, 通过火山岩、火山碎屑岩锆石年代学、碎屑锆石年龄证据、地质事件对比等方法, 讨论华夏地块新元古代地层的沉积时限及区域对比关系。

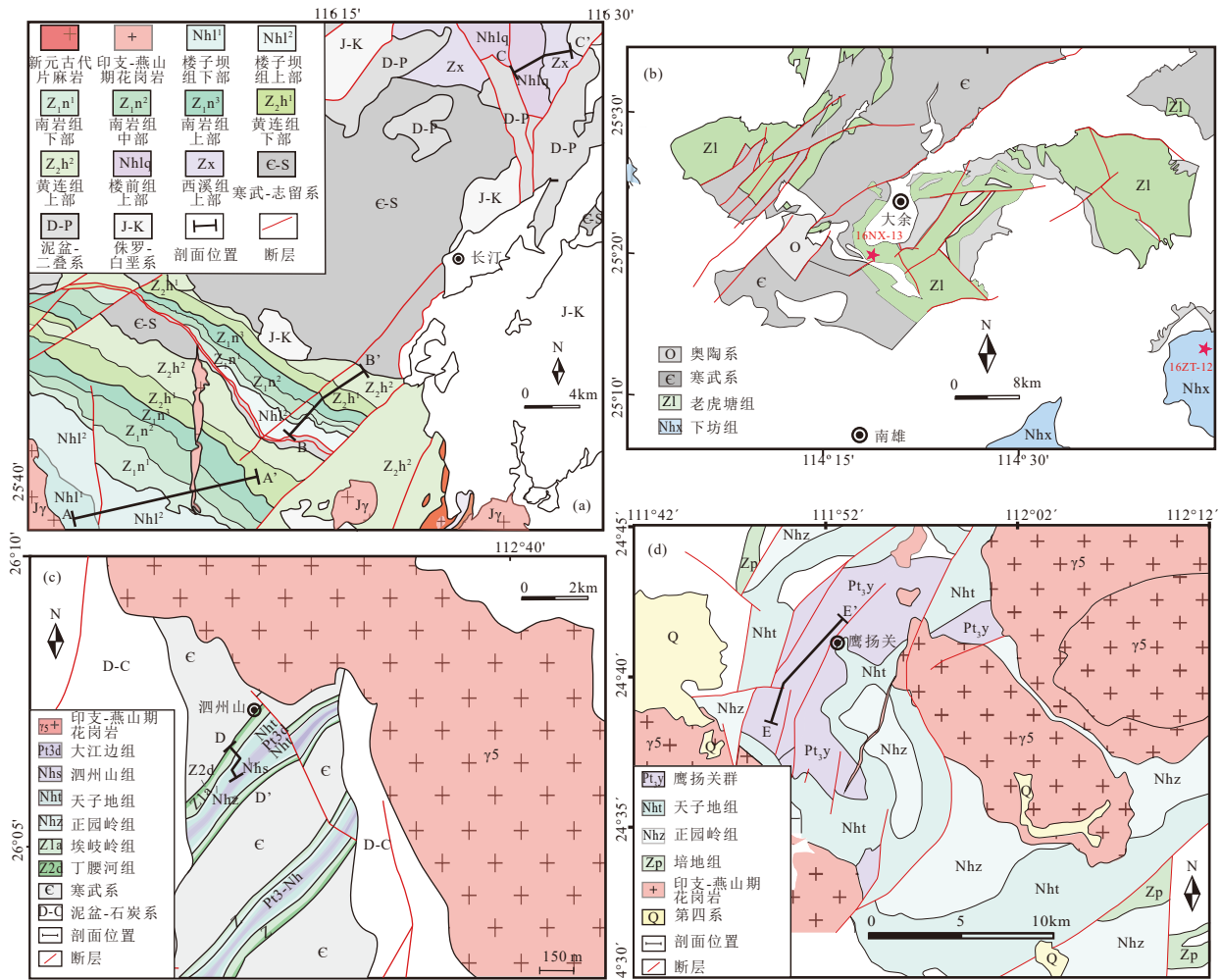
3.1 地层岩性特征

武夷南部闽西南长汀一带前寒武地层出露较广, 区域内最老的地层是拉伸纪桃溪群, 呈残块形式分布, 岩性多为石榴二云片岩、黑云斜长变粒岩及花岗质片麻岩侵入体(福建省地质矿产局, 1985), 与上覆成冰系呈断层接触。成冰纪-埃迪卡拉纪地层在日东-庵杰以南的地区, 出露有楼子坝组、南岩组、黄连组, 而在以北的地区, 岩石整体变质程度较浅, 出露地层为楼前组、西溪组(图 3a)。其中, 楼子坝组厚度大于 3 200 m, 为灰-灰绿色中-厚层中细、细粒砂岩, 偶夹灰白色薄层硅质岩, 顶部被厚度为 ca. 1 700 m 的南岩组灰绿色中-厚细粒砂岩整合覆盖(图 5)。南岩组下部含磷灰岩条带夹层, 顶部夹灰白色薄层变质硅质岩, 与厚度为 ca. 2 000 m 的黄连组浅灰色-浅灰绿色-灰色中-厚层状中细、细粒长石砂岩、砂质泥岩整合接触(图 5), 该组含有多层变质条带状泥质硅质岩(图 4 I a-h)。张开毕等(2005)根据在长汀一带球藻类植物化石证据, 推测

楼子坝组的形成时代为晚成冰世, 南岩、黄连组形成时代为埃迪卡拉纪。形成对比的是, 楼前组在区域主要为一套浅变质(中)酸性火山碎屑岩, 以浅灰、灰色中层-块状英安质、流纹质晶屑凝灰岩、流纹英安质岩屑凝灰岩为主, 向上碎屑岩成分增多, 过渡为浅灰色-浅紫色凝灰质泥岩、凝灰质砂岩(图 4 I i-p), 顶部与西溪组变质中-厚层中细粒砂岩整合接触(图 5)。

南岭粤东北-赣南至华夏西缘赣中地区新元古代地层出露范围较大, 但在区内各地发育程度不一致, 包含成冰系下坊组与埃迪卡拉系老虎塘组, 向北至武功山及赣江以东一带可见下坊组之下的上施组(江西省地质矿产局, 1984)。其中, 上施组在江西广昌-会昌一带发育火山碎屑岩, 而在分宜-新干一带以低级区域变质千枚岩为主; 下坊组在松山-新余-萍乡地区划分为下层含砾、中层含铁、上层含砾三个部分, 局部夹有条带磁铁矿石英岩, 在遂川-兴国以南为粗碎屑岩, 不含铁、局部含砾石, 顶部与老虎塘组整合接触; 老虎塘组在该区分布较广且岩性变化不大, 主要为泥岩、硅质岩、硅质板岩, 顶部以浅灰色硅质岩或碳酸盐岩与寒武系分界。前人在老虎塘组发现了多种同在保存于扬子与东南极埃迪卡拉纪岩层中的藻古植物化石, 由此推测老虎塘组沉积时代为埃迪卡拉纪(江西省地质矿产局, 1984)。在南雄-大余地区仅出露下坊组及老虎塘组(图 3b), 岩性较为单一, 以低级区域变质的千枚岩、板岩为主, 未见砾石、含铁建造, 总厚度约为 3 600 m(图 5)。

华夏西缘湘东南泗州山位于郴州-临武断裂附近, 区内构造作用强烈, 褶皱、断层发育, 新元古代岩性组合与上扬子湘北-湘西差异较大, 由老至新可划分为大江边组、泗州山组、天子地组、正园岭组和埃岐岭组, 均为整合接触(湖南省地质矿产局, 1988)(图 5)。大江边组为该区出露最老地层, 未见底, 厚约 400 m, 底部为一套中层紫红色粉砂岩、泥岩互层构成的韵律岩层, 顶部为灰黑色粉砂岩、碳质粉砂岩、泥岩夹薄层状细晶白云质大理岩, 可见向流面倾向为 320°~358°的不对称波痕; 泗州山组整体为灰绿色-灰白色含砾砂岩、含砾板岩, 偶见含锰白云岩(图 4 III g-h), 顶部与上部天子地组界面附近可见一薄层灰白色凝灰岩; 天子地组厚度约 590 m, 以中厚层紫红色-灰绿色粉砂岩为主, 砂岩中不对称波痕向流面倾向为 284°~310°(图 4 III e-f);



(a) 武夷南部长汀地区; (b) 南岭南雄地区; (c) 华夏西缘泗州山地区; (d) 华夏西缘鹰扬关地区

图3 研究区新元古代地层分布及剖面位置

Fig. 3 Simplified geological map and sample locations.

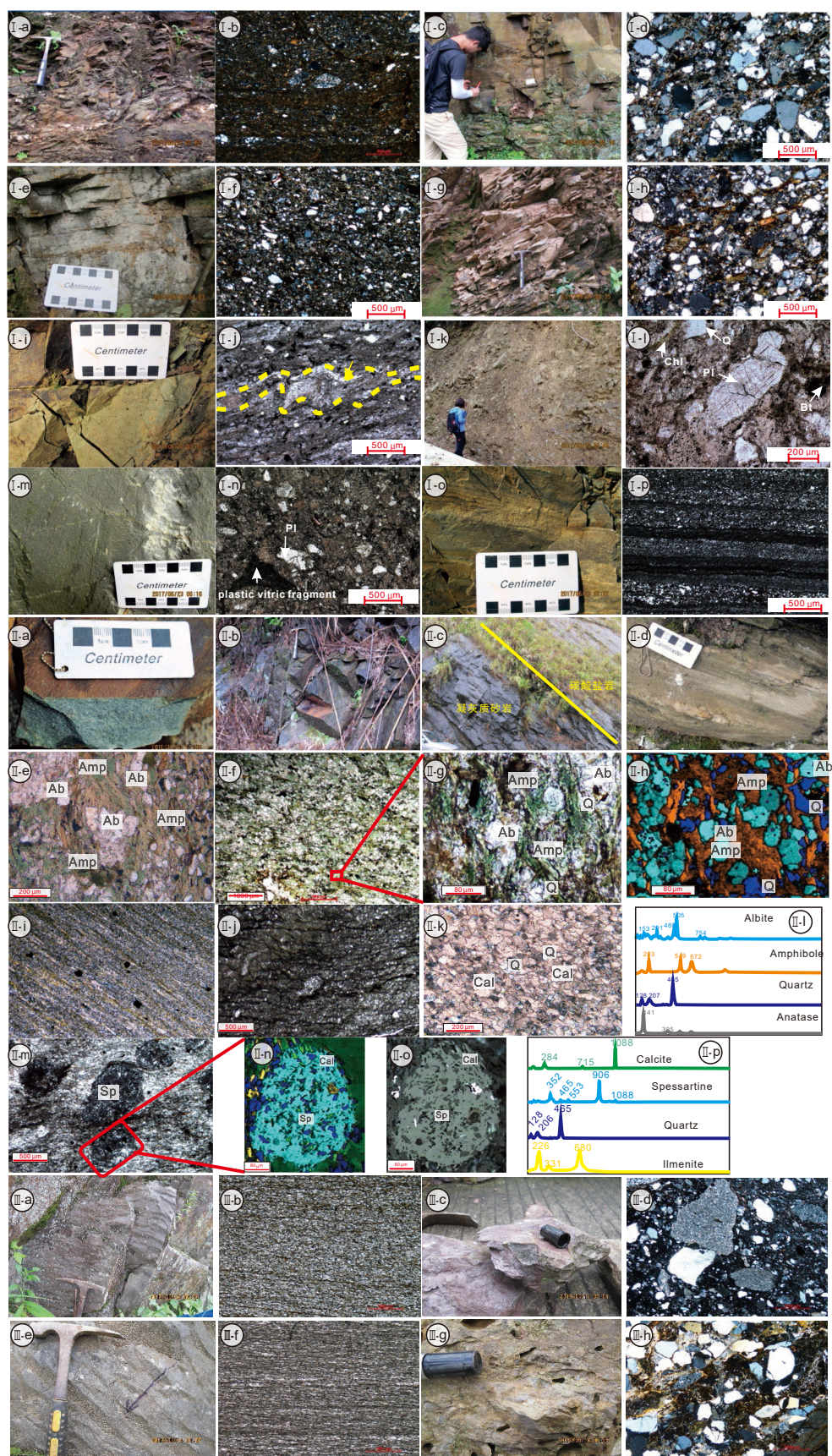
正园岭组为一套灰白色-紫红色厚层含砾长石砂岩、粉砂质板岩、石英杂砂岩,厚度约 200 m(图 4Ⅲc-d);埃岐岭组在本文研究剖面并未发现明显砾石沉积,但在该组中上部可见多组不对称波痕,向流面倾向为 $271^{\circ}\sim 285^{\circ}$ (图 4Ⅲa-b),顶部与丁腰河组灰黑色硅质岩、硅质板岩整合接触(图 5);丁腰河组所产的微体藻类古植物组合特征与扬子埃迪卡拉纪的相同,但与寒武系底部出现的微体古植物组合明显不同,指示丁腰河组属埃迪卡拉纪晚期沉积(黄建中等, 1994)。

鹰扬关地区处于华夏与扬子地块拼合带的西南段(图 3d),该地区构造运动强烈,构造变形复杂,褶皱、断层发育,梧州-鹰扬关断裂带自中部穿过(广东省地质矿产局, 1988;广西壮族自治区地质矿产局, 2017;王令占等, 2020)。出露的混杂岩主要

为一套受绿片岩相区域变质作用改造的变火山岩-火山碎屑岩-沉积岩系,岩石组合整体无序、局部有序。其中,变火山岩岩块主要为角斑岩、细碧岩、石英角斑岩、安山岩等;变火山碎屑岩岩块主要为变凝灰岩和火山角砾岩;碎屑岩岩块普遍富含凝灰质,包含绢云千枚岩、白云母千枚岩等(图 4Ⅱa-p)。该混杂岩与区域上成冰系天子地组之间存在明显的岩性和变形程度差异。鹰扬关混杂岩中透入性构造面理发育,最少具三期变形面理,碎屑岩岩块以为绢云千枚岩为主,代表浅海-半深海还原环境的泥岩和粉砂质泥岩;相较而言,天子地组及上覆正园岭组仅普遍发育一组板劈理,岩性为不等粒长石石英砂岩、杂砂岩夹泥岩、粉砂岩,为潮坪-浅海陆棚相沉积(广西壮族自治区地质矿产局, 2017)。

3.2 锆石年代学证据

华南东南部自新元古代沿江南造山带拼合之



I-武夷南部长汀地区: (a、b) 楼子坝组粉砂岩野外及镜下照片; (c、d) 南岩组厚层细砂岩野外及镜下照片; (e、f) 黄连组粉砂岩与泥岩互层; (g、h) 西溪组粉砂岩野外及镜下照片; (i、j) 楼前组流纹质凝灰岩野外及镜下照片; (k、l) 楼前组凝灰岩野外及镜下照片; (m、n) 楼前组流纹英安质凝灰岩野外及镜下照片; (o、p) 楼前组顶部凝灰质砂泥岩野外及镜下照片; II-华夏西缘鹰扬关地区: (a) 鹰扬关群灰绿色火山岩野外照片; (b) 鹰扬关群火山碎屑岩野外照片; (c) 鹰扬关群凝灰质砂岩与碳酸盐岩接触关系; (d) 鹰扬关群细砂岩野外照片; (e、f、g、l) 鹰扬关群火山碎屑岩镜下、放大镜下照片、同位置拉曼面扫图像及拉曼光谱; (i) 鹰扬关群细砂岩镜下照片; (j) 鹰扬关群凝灰岩镜下照片; (k) 鹰扬关群碳酸盐岩镜下照片; (m、p、o、n) 鹰扬关群中上部含锰铝榴石碳酸盐岩镜下、放大镜下照片、同位置拉曼面扫图像及拉曼光谱; III-华夏西缘泗州山地区: (a) 埃岐岭组石英砂岩, 可见波痕; (b) 埃岐岭组石英砂岩镜下照片; (c) 正园岭组紫红色含砾砂岩; (d) 正园岭组含砾砂岩镜下照片; (e) 天子地组细砂岩, 可见波痕; (f) 天子地组细砂岩镜下照片; (g) 泗州山组灰色含砾砂岩; (h) 泗州山组含砾砂岩镜下照片

图4 研究区野外、镜下照片(均为正交光)及拉曼图像

Fig. 4 Field photographs, representative micro-images, and Raman images for selected samples in this study

后,发育了由一系列地堑、地垒组成的拉张性裂谷盆地,也发生了与陆内拉张作用相关的幕式火山爆发事件。例如,扬子东南缘黔东南、桂北等地在丹洲群、下江群、板溪群底部、华夏武夷北部马面山群中保存的火山岩及火山-碎屑岩,上述事件都记录在一套侧向延伸的楔状地层中,锆石 U-Pb 年龄集中于 850~820 Ma, 780~770 Ma 和 760~750 Ma 几个阶段(Wang and Li, 2003)。笔者在华夏地块发现了 6 件火山岩、火山碎屑岩及凝灰岩样品,分别为武夷南部闽西南长汀地区楼前组凝灰岩、华夏西缘鹰扬关混杂岩火山岩、火山碎屑岩、凝灰岩岩块、湘东南泗州山地区天子地组底部凝灰岩。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果表明,武夷南部楼前组厚层凝灰岩 ca. 770 Ma 岩浆活动的产物(具体数据详见 Qi et al., 2019),华夏西缘鹰扬关混杂岩中火山岩岩块的喷发时间约为 750 Ma、凝灰岩岩块形成时代约为 670 Ma(具体数据详见 Qi et al., 2021),而华夏西缘天子地组沉积时代应为成冰纪中期晚于 666 Ma(具体数据详见 Qi et al., 2020)(图 5)。

沉积岩中的碎屑锆石 U-Pb 年龄也可以有效限定地层单元的最大沉积年龄,该方法普遍应用于缺乏古生物化石证据的前寒武地层(Dickinson and Gehrels, 2009)。尽管年轻碎屑锆石年龄一定程度上与沉积年龄存在偏差,例如铅丢失可以使实验测得锆石年龄稍晚于真实的沉积年龄,碎屑锆石年龄仍是目前约束地层最大沉积时代的最有效方法之一。实例表明,在小于 5 Ma 的误差范围内,最年轻单颗粒锆石年龄限定沉积年龄的可信度达到 95%(Dickinson and Gehrels, 2009)。实验过程中,我们随机选取锆石颗粒,结合锆石 CL 图像选取锆石边部环带清晰的位置进行分析,以排除测得最年轻锆石年龄为混合年龄或者变质年龄的可能性。另

外,用于限定地层沉积年龄的锆石分析点均具有较高的 Th/U 比值(0.25~2.89),表明均为岩浆成因锆石。

武夷南部闽西南长汀地区楼子坝组、南岩组、黄连组碎屑岩样品中最年轻单颗粒碎屑锆石年龄分别为 646 ± 10 Ma、 614 ± 10 Ma 和 544 ± 9 Ma,与前人根据微古植物化石对地层沉积年代的认识一致。因此,本文认为楼子坝组形成时代应为成冰纪晚期,可与扬子地区南沱组对应,南岩组、黄连组沉积时代分别为埃迪卡拉纪早期、晚期,分别与扬子东南缘陡山沱组、老堡组或灯影组对应。

南岭粤东北-赣南南雄地区下坊组和老虎塘组砂岩中最年轻单颗粒碎屑锆石年龄分别为 637 ± 8 Ma 和 551 ± 8 Ma,均与根据微古植物化石推测的地层沉积年代一致,即下坊组形成于成冰纪,老虎塘组形成于埃迪卡拉纪。华夏西缘大江边组、泗州山组、天子地组、正园岭组与埃岐岭组碎屑岩样品中最年轻碎屑锆石年龄分别为 723 ± 6 Ma、 674 ± 8 Ma、 655 ± 6 Ma、 778 ± 7 Ma 与 604 ± 6 Ma。结合天子地组底部的凝灰岩年龄(666 Ma),我们提出大江边组形成时代应为拉伸纪晚期,该结论与前人通过 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 负偏异常推测该组沉积时代约为 732 Ma 一致(Feng and Zhang, 2016),而泗州山组、天子地组、正园岭组与埃岐岭组沉积时代为成冰纪早期、中期、晚期与埃迪卡拉纪早期,分别与上扬子东南缘长安组、富禄组-大塘坡组、南沱组与陡山沱组对应。华夏西缘鹰扬关混杂岩泥质碳酸盐岩、细砂岩岩块最年轻单颗粒碎屑锆石年龄分别为 658 ± 8 Ma、 690 ± 6 Ma。其中砂岩与上述鹰扬关混杂岩中凝灰岩岩块年龄一致,指示鹰扬关混杂岩中碎屑岩岩块形成年龄约为 690~660 Ma,与扬子东南缘富禄-大塘坡组沉积时限大致相同(图 2)。

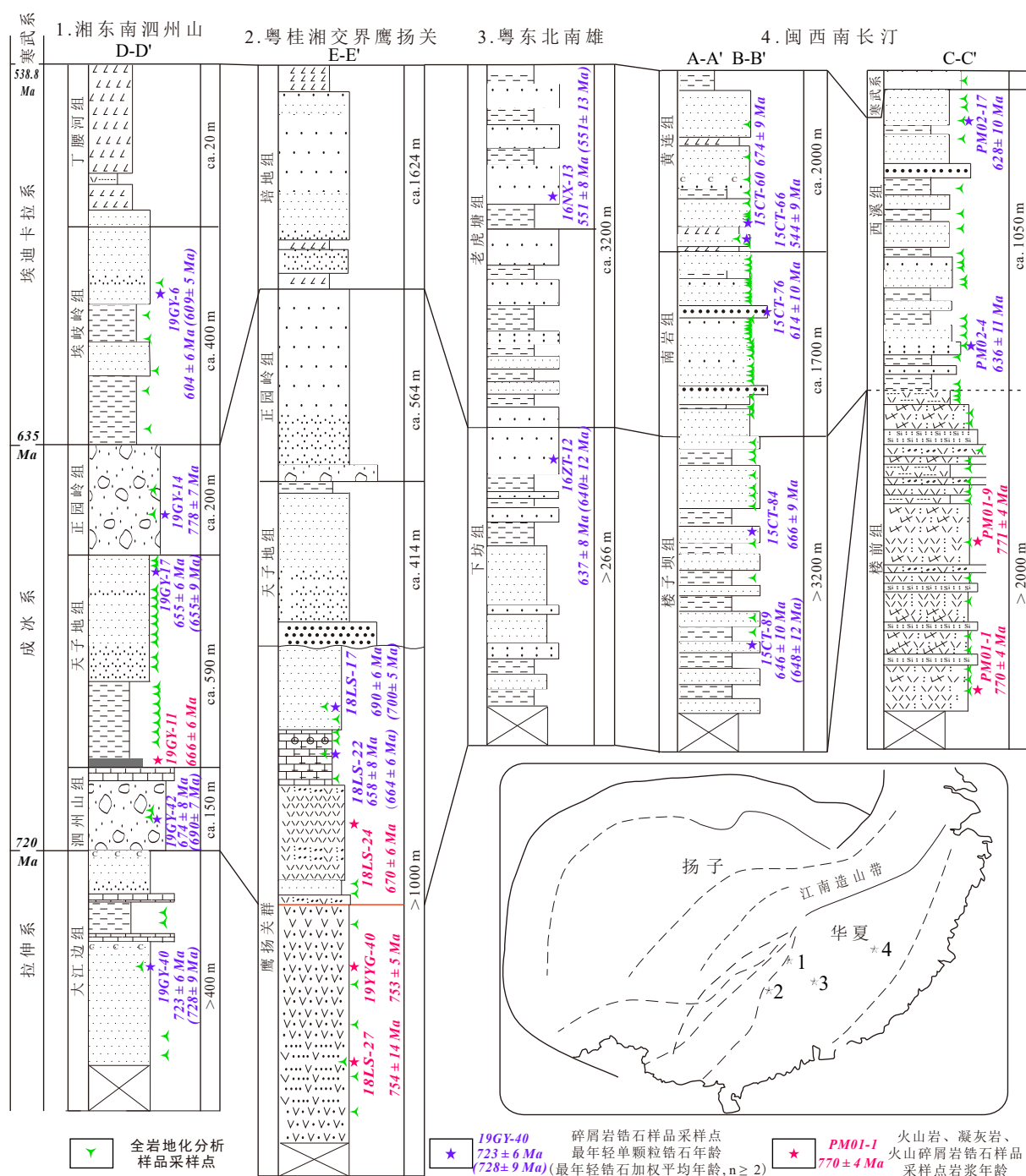


图5 研究区新元古代中-晚期地层柱状对比图及锆石年龄结果

Fig. 5 Mid-late Neoproterozoic stratigraphic column and radiometric ages results of this study.

3.3 地质事件证据

依据新元古代冰期寒冷事件在较大区域所具有的准同时性的原则, 结合华南东南部延伸稳定的含矿层、岩性标志层及古生物资料, 对华夏地块新元古代地层进行了区域对比。

碎屑岩矿物、地球化学组成可以直接反映沉积物从源区陆表风化、剥蚀, 到搬运、沉积及后期

成岩过程中受到的影响。近年来, 以细碎屑岩地球化学组成为基础的各种化学风化指标例如 CIA(化学蚀变指数 Chemical index of alteration)、CIW(化学风化指数 Chemical index of weathering)等指标被广泛用来估算化学风化强度, 对揭示源区气候变化提供了重要的证据(Fedo et al., 1995)。尤其是针对前寒武纪全球范围内的重大气候转变事件, 例如新

元古代雪球地球事件,具有重要的指示作用(冯连君等, 2003, Qi et al., 2020b)。因此,沉积物中的化学风化强度可以近似反映冰期-非冰期气候波动,对于没有冰期沉积记录的地层,通过对比风化指数变化趋势可以间接为地层对比提供新的证据。

笔者对泗州山和长汀地区共 103 件细碎屑岩样品进行全岩地化分析,其中含砾砂岩样品仅选择细粒基质进行测试。在排除了沉积再循环作用、物源变化、粒度等因素对化学蚀变指数的影响后,发现武夷南部闽西南长汀地区新元古代地层中出现了两次明显的 CIA_{corr} 指数降低现象(详细信息见 Qi et al., 2018; 2020a),结合锆石 U-Pb 年龄证据,在时限上分别可以与全球 Marinoan 及 Gaskiers 对应,即反映 650~635 Ma 和 ca. 580 Ma 的气候寒冷事件,并将楼子坝组、南岩组划分为与扬子东南缘长安组、陡山沱组同时期沉积的地层。而泗州山地区在新元古代也经历了两次化学风化强度降低的事件,结合锆石年代学证据及冰碛砾岩沉积记录,可知泗州山组、正园岭组分别对应于 Sturtian 及 Marinoan 冰期,分别反映 717~660 Ma 和 650~635 Ma 的气候寒冷事件(Cox et al., 2018, Zhou et al., 2019)。

新元古代中-晚期,南华盆地在浅海陆棚沉积环境下形成了多期大规模的成矿作用,是铁、锰、磷的重要成矿时期,例如桂北富禄组底部的铁矿、赣中下坊组的铁矿、黔东北大塘坡组底部锰矿和黔中陡山沱组底部磷矿成矿事件等(Yu et al., 2017, Zhang et al., 2019)。这些成矿事件与新元古代全球超大陆聚合-裂解及雪球地球冰期-非冰期气候波动事件也都有着重要的联系。尽管上述大规模成矿事件多出于扬子东南缘,华夏地块也在新余、长汀等地零星出现含矿层位,例如赣中新余地区下坊组的铁矿、湘东南天子地组底部 15~20 cm 厚的条带状赤铁矿层及闽西南长汀地区南岩组普遍可见的磷块岩条带。这些含矿标志层,可为区域性地层序列提供对比依据(图 2)。另外,笔者在鹰扬关混杂岩碳酸盐岩岩块中发现了大量的锰铝榴石(图 4 III m-p),该矿物通常出现在以锰碳酸盐与石英矿物组合的岩石经低级绿片岩相变质作用的产物中,因此,锰铝榴石很可能是由菱锰矿和/或锰白云石变质形成(Nyame, 2001),而富含锰铝榴石的碳酸盐岩原岩可能为富含菱锰矿的沉积物,由此推测这套地层与扬子东南缘大塘坡底部富锰岩系形

成时间相同(670~660 Ma)。

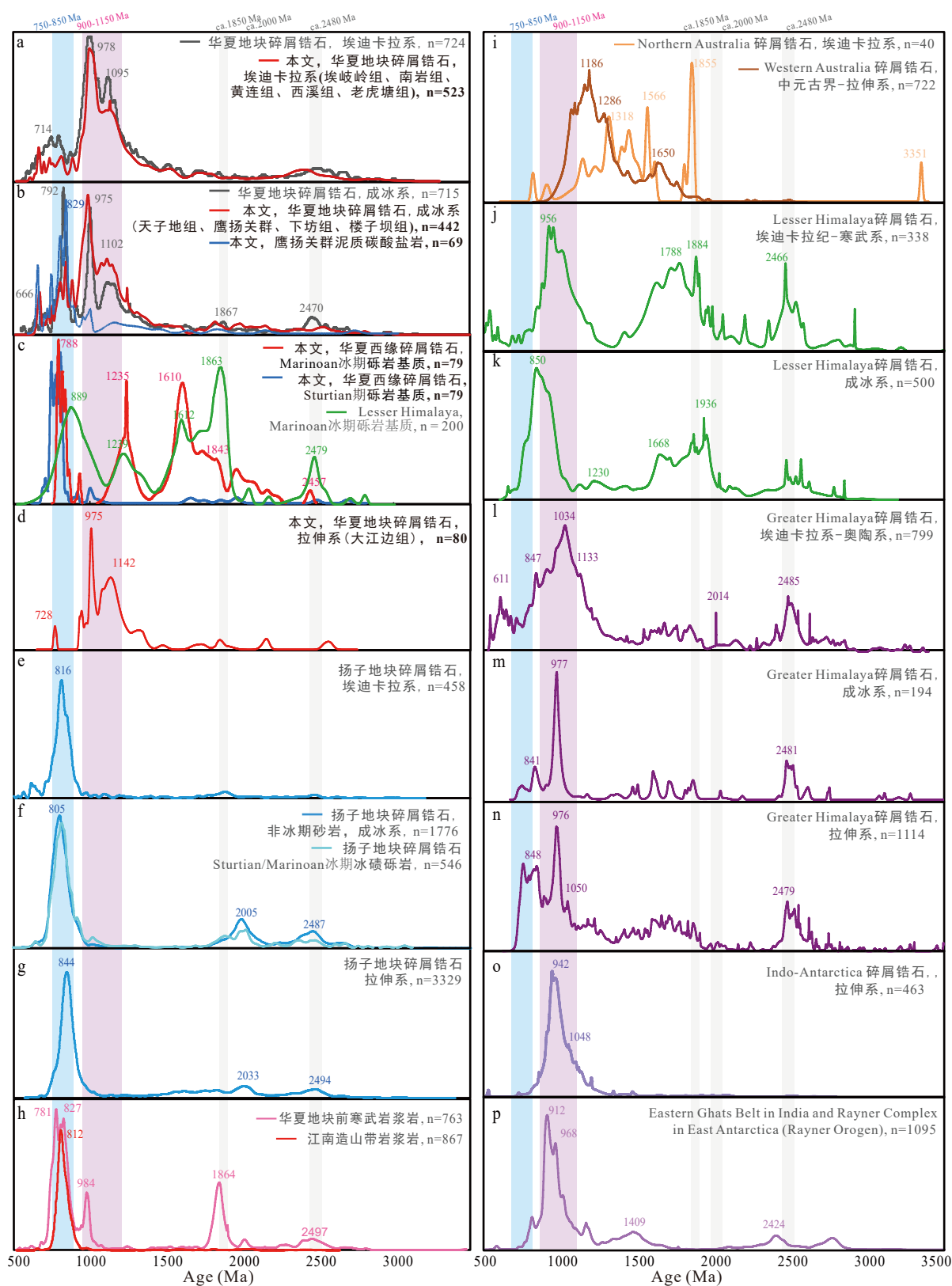
4 物源分析及其大地构造意义

4.1 碎屑锆石物源分析

本文总结了笔者在华夏武夷南部-南岭与华夏西缘报道的 16 件碎屑岩、泥质碳酸盐岩的碎屑锆石年代学数据。其中,武夷南部-南岭一带成冰系-埃迪卡拉系的楼子坝组、南岩组、黄连组、西溪组、下坊组、老虎塘组的 9 件碎屑岩样品(数据信息详见 Qi et al., 2018),以及华夏西缘拉伸系-埃迪卡拉系大江边组、天子地组、埃岐岭组及鹰扬关混杂岩中的 4 件碎屑岩样品(数据信息详见 Qi et al., 2020a; 2021),显示出了相似的锆石年龄峰值(图 6)。峰值年龄集中于 1 150~900 Ma 之间,其他次要峰值为 2 500~2 400 Ma、1 900~1 800 Ma、800~750 Ma 和 730~600 Ma 区间,与前人所得华夏地块新元古代晚期-早古生代碎屑岩中包含大量 Grenville 期碎屑锆石的结论一致(Yu et al., 2008, 王丽娟等, 2008)。

从锆石的 Th/U 比值及 CL 图像可知,本文中碎屑锆石均为岩浆成因,其中 Grenville 期年龄的锆石多呈椭圆形,自形程度较差,磨圆度较高,指示经历了较远距离的搬运-磨蚀作用。然而,华夏地块仅在局部地区零星分布少量 997~755 Ma 的岩浆岩(图 1、图 6h 和附表 1^{*})。例如,云开信宜、北流等地 997~978 Ma 的变火山岩、武夷北部邵武等地 909~916 Ma 的花岗质片麻岩、武夷北部龙泉、庆元等地 984~969 Ma 的基性深成岩等(详见附表 1^{*}),这些岩浆岩多被认为是新元古代早期与造山运动有关的大陆边缘岩浆弧(Shu et al., 2011, Wang et al., 2013),也有部分学者认为这些岩浆岩是华夏地块响应全球 Grenville 运动、与扬子板块在该时期拼贴在一起形成统一的华南板块的标志(Li et al., 2005)。

然而,华南内部缺乏 1 150~1 000 Ma 的岩浆事件,故华夏地块新元古代碎屑岩中大量 1 150~900 Ma 的 Grenville 期碎屑物源不太可能由原地、有限的岩浆活动提供物源,而应当来源于华南外部。结合华夏西缘泗州山地区的古流向数据,武夷南部-南岭地区、华夏西缘拉伸纪晚期至埃迪卡拉纪早期的物源区应为华南外部东南方向的其他地体。此外,华夏西缘泗州山地区的古流向数据也显示拉伸纪晚期、成冰纪中期以及埃迪卡拉纪早期的物源



(图 a-g 扬子、华夏地块参考数据详见图 8 编号 1-27 文献; 图 h. 华南基底年龄参考文献详见附表 1*; 其他数据参考文献见 Qi et al., 2020)

图 6 华南东南部与东冈瓦纳大陆北缘地体碎屑锆石年龄谱对比图

Fig. 6 Compilation of detrital zircon age distribution of southeastern South China and continental blocks/terrane from northern East Gondwana.

方向均为南东至西北。由碎屑锆石年龄谱对比图可知,上述 13 件样品与前人在武夷南部-云开已报道的成冰系-埃迪卡拉系碎屑锆石,和东冈瓦纳北缘 Greater Himalaya、Lesser Himalaya、Indo-Antarctica 同时期地层的相似度较高(图 6 j-o),而与澳大利亚新元古代沉积物碎屑锆石年龄谱相差较大。前者均具有 1 150-850 Ma 的主要峰值,而后者在西澳主要峰值为 ca. 1 185 Ma、ca. 1 285 Ma,北澳主要峰值为 ca. 1 318 Ma、ca. 1 566 Ma 和 ca. 1 855 Ma。此外,碎屑锆石 Hf 同位素特征也支持外部物源的观点,华夏地块样品中 Grenville 期碎屑锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与华夏内部岩浆岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相差较大,但与印度东南部的 Eastern Ghats 造山带高度重合(图 7)。综上,华夏地块内部岩浆事件不太可能为新元古代碎屑岩提供物源, Grenville 期锆石的物源应来自于华南外部的印度北缘(Greater Himalaya、Lesser Himalaya 地区)与 Indo—Antarctica 地区。尽管华夏基底有可能为新元古代地层提供古元古代碎屑物质,但并不排除印度北缘与 Indo—Antarctica 为华夏地块提供古老物质的可能性。

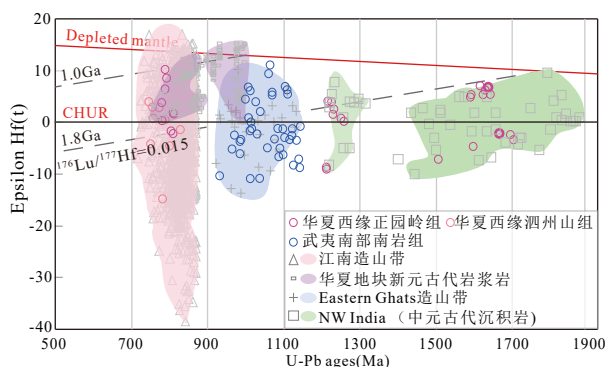
值得注意的是,华夏西缘的泗州山组、正园岭组与鹰扬关混杂岩中的泥质碳酸盐岩的三件样品显示了不同的年龄分布特征(图 6b, 6c),这些均具有 850~700 Ma 的主要峰值,但正园岭组的样品中还含有大量中元古代至太古宙年龄的碎屑锆石,峰值年龄分布区间为 1 880~1 600 Ma、1 300~1 200 Ma。江南造山带分布了大量与俯冲、碰撞相关的 850~700 Ma 年龄的岩浆岩,并在同时期为扬子东南缘提供了大量物源(图 6e-h)。因此,华夏西缘这 3 件样品中的 850~700 Ma 的碎屑物源区为华南

内部。由上文可知,正园岭组沉积时期与成冰纪 Marinoan 冰期对应,而该组中广泛分布的 1 800~1 600 Ma、1 300~1 200 Ma 区间的锆石在华夏地块其他新元古代样品中并不常见,华南内部也并不发育该年龄区间的岩体,而 Lesser Himalaya 地区 Marinoan 冰期砾岩基质具有相同的年龄分布(图 6c)-峰值为 ca. 1 863、ca. 1 612 Ma、ca. 1 239 Ma 及 ca. 889 Ma。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值也显示了正园岭组样品与印度西北部中元古代沉积岩物源的亲缘性,后者也为 Lesser Himalaya 地区 Marinoan 冰碛砾岩的物源区。上述观察表明,华夏西缘在成冰纪 Sturtian 冰期物源区从华南外部转变为华南内部,在 Marinoan 冰期可以同时接收到内部、外两个方向的物源供应。

综上,华夏武夷南部-南岭地区新元古代拉伸纪-埃迪卡拉纪沉积物的主要物源区为华南外部的印度北缘(Greater Himalaya、Lesser Himalaya)与 Indo—Antarctica 地区。而华夏西缘在不同时期显示出不同的物源区(图 8):在拉伸纪晚期,物源与武夷南部-南岭地区相同,均为华南外部(印度北缘与 Indo—Antarctica 地区);成冰纪 Sturtian 冰期,冰碛物的物源来自华南内部江南造山带;成冰纪间冰期,物源恢复至华南外部;成冰纪 Marinoan 冰期,华夏西缘的冰碛物中可同时接收到来自内部和外部两个方向的物源;埃迪卡拉纪早期冰期结束后,物源区再次恢复至华南外部。

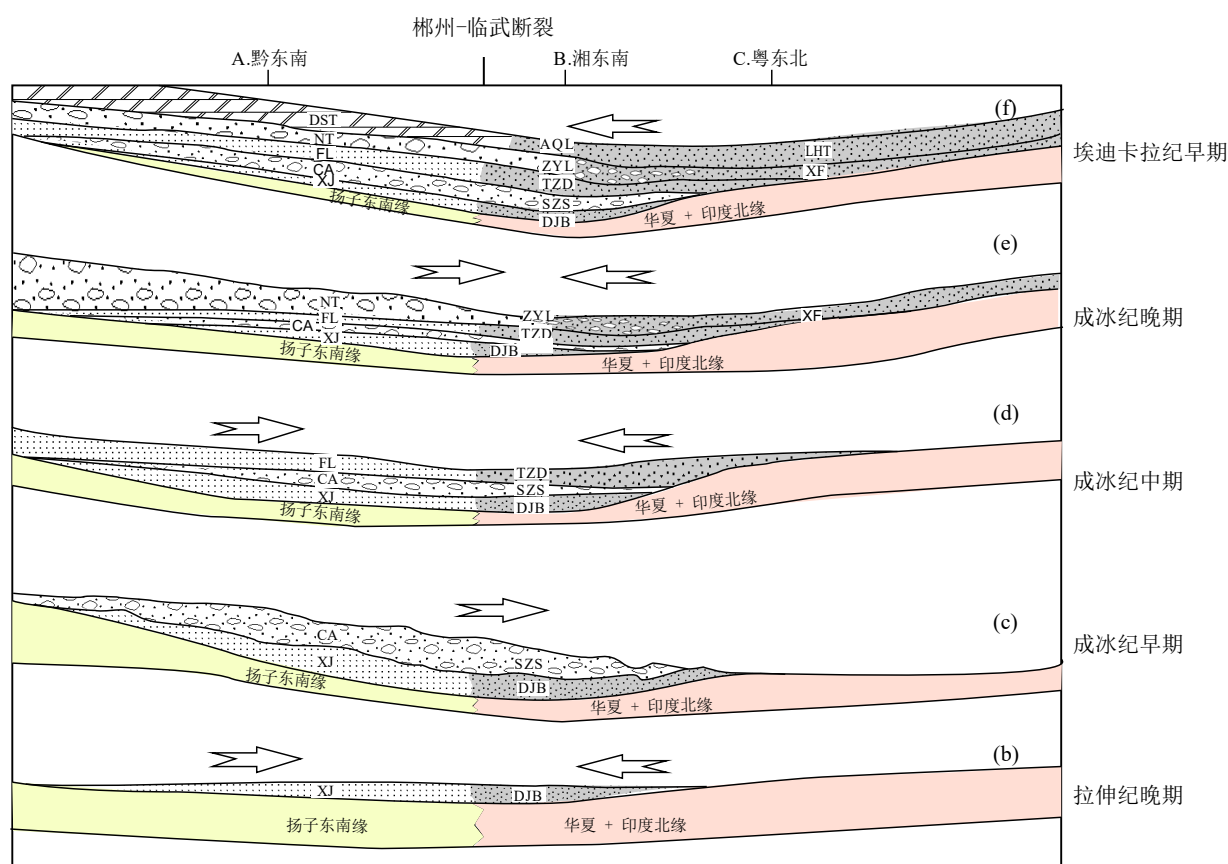
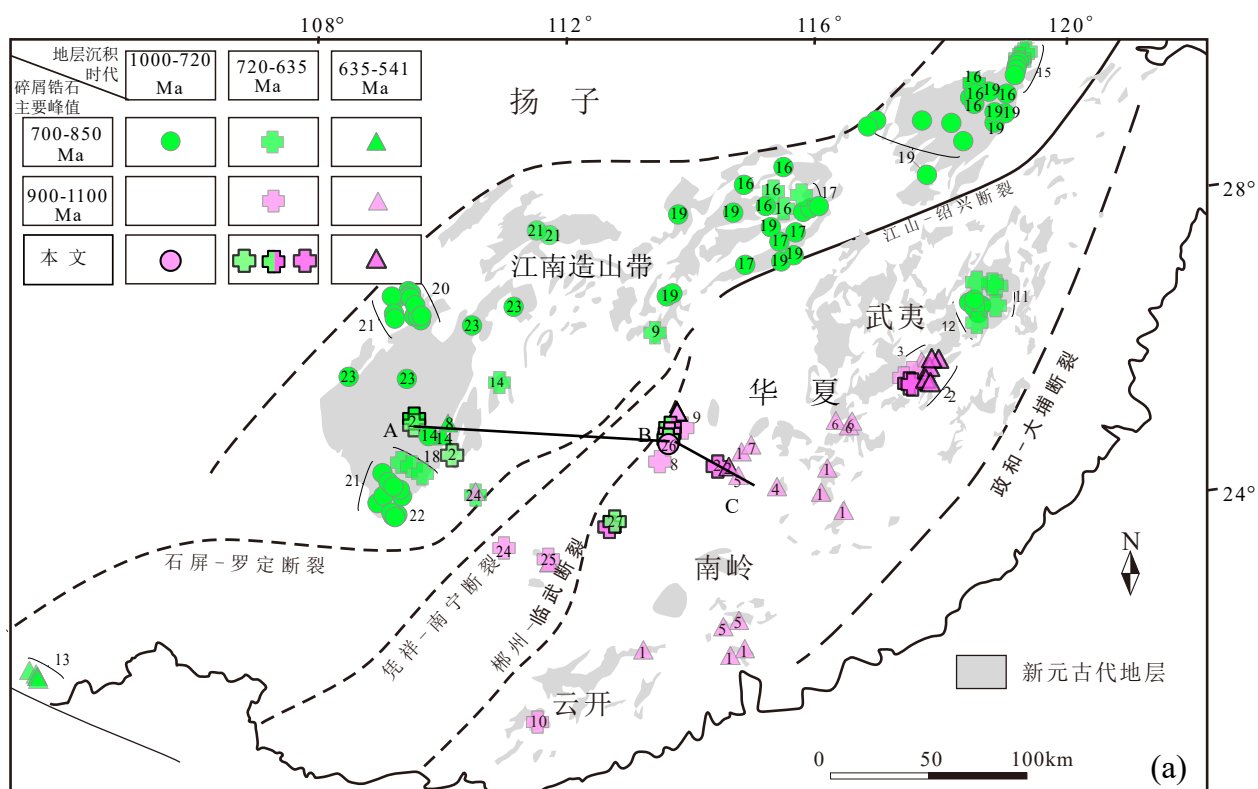
4.2 对古地理重建的指示

新元古代时期华夏与扬子之间的拼合过程一直是国内外研究学者关注的焦点,由上文可知,该过程中华夏与扬子之间的古地理关系,即二者之间是否仍存在“华南洋盆”仍旧存在争议。部分学者认为,华南洋自中元古代分隔扬子与华夏两个地块,仅在江绍-萍乡之间由“弧-陆增生”形成江南岛弧,在拼合带西段仍存在华南洋的残留洋盆,呈现出多岛洋面貌,直至晚古生代-中生代完全闭合(殷鸿福等, 1999, 潘桂棠等, 2016; Wang et al., 2022)。主要的证据为晚古生代放射虫硅质岩,华夏西缘广西鹰扬关-岑溪糯垌、大爽一带早古生代具有蛇绿岩-岛弧属性的基性岩(Lin et al., 2016, 彭松柏, 2016, Liu et al., 2018),赣中新余至云开西侧广东信宜贵子等地发现的代表洋壳玄武岩经岩浆分异形成具 TTG 特征的奥陶纪-志留纪深熔花岗岩杂岩(彭松柏, 2016),以及早古生代加里东洋盆俯



(数据参考文献详见 Qi et al., 2020)。

图 7 华夏地块新元古代碎屑锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值-年龄图解
Fig. 7 U-Pb age vs. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram for the zircon grains from Neoproterozoic sediments of the Cathaysia Block



(图 a 编号 1-23 见 Qi et al., 2020; 24. Song et al., 2020; 25. 王雅迪等, 2021; 26. Qi et al., 2020; 27. Qi et al., 2021) .

图 8 (a) 华南东南部碎屑锆石峰值特征统计; (b-f) 拉伸纪晚期至埃迪卡拉早期华夏西缘物碎屑源方向示意图

Fig. 8 (a) The distribution of sedimentary rocks from southeastern South China showing the dominant peak age of detrital zircons. (b) Schematic model showing the source direction on the western margin of Cathaysia Block.

冲-碰撞造山形成的增生型构造混杂岩(Wang et al., 2022)。然而,也有一些学者对放射虫硅质岩形成环境、锆石年龄意义等方面提出质疑,例如,王玉净等(2006)提出下扬子地区上奥陶统五峰组放射虫、大西洋沿岸陆表海古生代放射虫一致,指示浅海而非深海环境。另外,通过沉积相分析发现,华南东南部早古生代沉积岩整合覆盖于前寒武纪岩系之上,沉积环境从扬子地区的台地-浅海环境过渡为华夏地区的浅海-斜坡环境(舒良树等, 2020),没有沉积相突变,且古流向数据反应此时物源区位于华夏东侧和南侧(Xu et al., 2013)。最近,周恩恩等(2017)在近期对华南进行新一轮岩相古地理编图也得出相似的结论,发现扬子与华夏地块之间在早古生代为连续过渡、符合瓦尔特相律的沉积相配置,中间没有重大构造界线,并不存在华南的残留洋盆。因此,较多学者认可古华南海在新元古代早-中期的俯冲、增生和闭合,华夏与扬子两个块体碰撞聚合为统一的华南板块,随后在 Rodinia 超大陆裂解的背景下,转为陆内裂解阶段,在盆地内发育一系列裂陷槽(杜远生等, 2015)。

出现上述争议的原因之一为,前人多通过火山岩的锆石同位素定年判断火山岩或混杂岩的形成年龄,但对样品中新元古代-早古生代年龄的锆石是否受到后期变形变质、构造热事件的改造未有明确的判别。即华夏西缘代表早古生代洋壳俯冲的基性岩中发现的早古生代锆石代表的是形成年龄,还是早期(新元古代)形成后被早古生代构造-岩浆事件所改造的年龄,亦或是后期岩浆作用所捕获的新元古代-早古生代多期构造-岩浆信息?例如,舒良树等(2020)提出鹰扬关基性岩中出现早古生代年龄的锆石,是新元古代基性岩被后期花岗质高温岩浆热液改造的结果,而岑溪县糯垌镇辉绿玢岩为中三叠世浅成基性岩墙、并非志留纪形成的蛇绿岩。笔者对鹰扬关地区野外调查研究中,并未发现堆晶超镁铁质岩、枕状玄武岩、放射虫硅质岩等蛇绿岩套组成单元(图 4 II)。在鹰扬关混杂岩里挑选火山岩中锆石形态完整、环带较宽且清晰的点位进行 U-Pb 定年分析,认为该期岩浆形成于 ca. 750 Ma(图 5)造山后岩石圈伸展环境(Qi et al., 2021),而前人获得的早古生代年龄可能代表后期岩浆热液改造年龄,与显生宙多期的构造变形相关(王令占等, 2020),而并非代表洋底火山喷发。夏元等(2022)通过构造解析发现,鹰扬关混杂岩缺乏

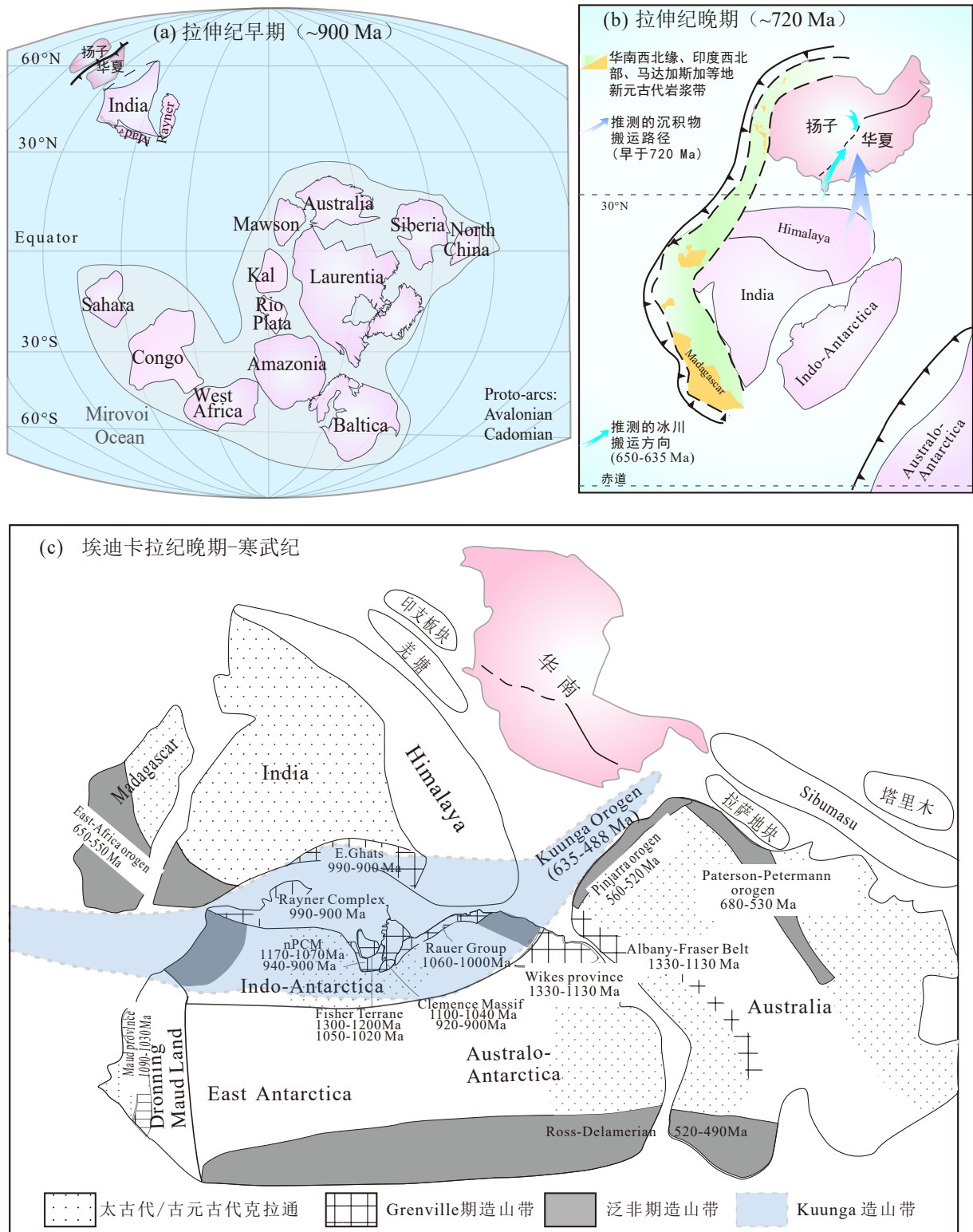
构造混杂岩典型的底劈构造,应是在新元古代晚期伸展背景下因重力作用形成的沉积混杂岩,在显生宙经历造山作用的叠加形成陆内构造变形带。上述证据均表明,鹰扬关混杂岩中火山岩并非早古生代蛇绿岩的组成单元或构造混杂岩岩块。因此,华夏西缘是否存在早古生代蛇绿混杂岩及岛弧岩浆岩,仍需进一步研究。

上文中碎屑锆石数据表明,华夏西缘自新元古代拉伸纪晚期至埃迪卡拉纪早期及发生了两次物源转换,物源方向由华南外部与华南内部交替出现,并在成冰纪晚期(Marinoan 冰期)同时接收了来自东冈瓦纳北缘及江南造山带两个方向的物源(图 8)。一方面,华夏西缘位于扬子与华夏交界附近,是两个地块的结合部位,新元古代中-晚期华南在拉张的背景下形成南华盆地,该区域往往是板块内的薄弱地区,同时也容易形成盆地的沉积中心。这便可以解释在没有明显沉积间断的情况下,只有在华夏西缘可以明显的接收到两个不同方向碎屑物质的原因。另一方面,我们在大江边组、天子地组和埃岐岭组均发现了不对称波痕沉积(图 4 III a, e),指示浅水的沉积环境。农军年等人(2020)也在华夏与扬子过渡的桂东大瑶山地区成冰系-寒武系地层中发现交错层理、砂包泥、泥砾等指示浅水环境的沉积标志。这些证据表明,南华盆地中心在新元古代中-晚期是一浅海盆地,并非处于深海-半深海的沉积环境。

结合上述年代学、地球化学、物源分析、沉积构造标志等方面的证据,及前人对华南东南部的岩相古地理环境分析,本文认为在粤桂湘地区,华夏与扬子之间并没有宽阔的大洋相隔,南华盆地应是已统一的陆内盆地(图 9)。

4.3 对超大陆重建的指示

在最早由 Hoffman(1991)建立的 Rodinia 超大陆复原图中,由于当时对华夏或华南缺乏相关研究,仅将华南象征性的放置在了超大陆的边缘。随后,李正祥根据海南岛抱板杂岩与劳伦大陆南部 Belt 盆地地壳组成的相似性,提出华夏与劳伦大陆物源存在亲缘性,且四堡造山带(江南造山带)为 Grenville 造山带的一部分,可分别延伸至劳伦西北部和东南极根据这一观点,并提出了华南在 Rodinia 超大陆中的“内部”模式或“missing link”模式,即华南是连接着劳伦大陆与澳大利亚重要的一环,位于超大陆中心(Li et al., 1995, Li et al., 2008)。



(a) ca. 900 Ma 时期 (底图修改自 Merdith et al., 2017); (b) ca. 720 Ma 时期; (c) 埃迪卡拉纪晚期-寒武纪 (底图修改自 Xu et al., 2013)

图 10 华南板块在 Rodinia 超大陆和 Gondwana 大陆中的古地理复原图

Fig. 10 Paleoposition of the South China Block in Rodinia supercontinent and Gondwanaland.

地区成冰系-埃迪卡拉系碎屑岩,以及华夏西缘拉伸系碎屑岩(沉积时代约为 723 Ma)、火山碎屑岩(形成时代约为 750 Ma)中碎屑锆石年龄谱与同时期印度北缘 Greater Himalaya、Lesser Himalaya 与 Indo-Antarctica 碎屑岩锆石年龄图谱相近,与澳大利亚、劳伦大陆相差较大。指示华夏地块至少自 750 Ma 起与印度北缘、Indo-Antarctica 北部地区同期沉积物享有共同的源区供应。其中,中元古代晚期碎屑物质的源区可能为:Indo-Antarctica 北部的 Rauer 杂岩(1 060~1 000 Ma, Liu et al., 2021)、Fisher Terrane(1 050~1 020 Ma, Kinny et al., 1997)、Prince Charles Mountains(1 170~1 070 Ma, Liu et al., 2017)、或 Clemence Massif(1 100~1 040 Ma, Corvino et al., 2011);而新元古代早期的碎屑物源区可能为:印度东南部的 Eastern Ghats 造山带(990~900 Ma, Dasgupta et al., 2013)、Indo-Antarctica 北部的 Rayner 杂岩(990~900 Ma)、Northern Prince Charles Mountains(940~900 Ma, Halpin et al., 2005)(图 10);其余少量古元古代-新元古代碎屑物质源区可能来源于印度或华夏地块基底。

综上所述,华夏地块至少自 ca. 750 Ma 开始与印度北部相连,由上一小节可知华夏与扬子地块并没有宽阔的大洋相隔,因此统一的华南板块在新元古代应一直在超大陆边缘,并非独立漂移的块体。

5 结论

本文通过对华夏地块武夷南部-南岭、华夏西缘多个地区新元古代地层的岩性特征、同位素年代学、地质事件进行总结,为地层沉积时限、区域对比提供了新的证据。华夏西缘记录了外部物源与内部物源体系交替出现与共存的现象,新元古代中-晚期在华夏与扬子之间并不存在宽阔的“华南洋”。印度北部及 Indo-Antarctica 北部地区为华夏地块拉伸纪-埃迪卡拉纪重要的物源区之一,该时期华南与印度北部相连并位于超大陆的边缘,华南并非一个游离于其他陆块之外的独立板块。

References

- Cawood P A, Wang W, Zhao T, et al., 2020. Deconstructing South China and consequences for reconstructing Nuna and Rodinia[J]. *Earth-Science Reviews*, 204: 103169.
- Chang L, Zhang S, Li H, et al., 2022. New paleomagnetic insights into the Neoproterozoic connection between South China and India and their position in Rodinia[J]. *Geophysical Research Letters*, 49 (10): e2022GL098348.
- Corvino A F, Wilson C J L, Boger S D, 2011. The structural and tectonic evolution of a Rodinian continental fragment in the Mawson Escarpment, Prince Charles Mountains, Antarctica[J]. *Precambrian Research*, 184 (1-4): 70-92.
- Cox G M, Isakson V, Hoffman P F, et al., 2018. South Australian U-Pb zircon (CA-ID-TIMS) age supports globally synchronous Sturtian deglaciation[J]. *Precambrian Research*, 315: 257-263.
- Cui X, Wang J, Wang X. C, et al., 2021. Early crustal evolution of the Yangtze Block: Constraints from zircon U-Pb-Hf isotope systematics of 3.1-1.9 Ga granitoids in the Cuoke Complex, SW China[J]. *Precambrian Research*, 357: 106155.
- Dasgupta S, Bose S. and Das K, 2013. Tectonic evolution of the Eastern Ghats Belt, India[J]. *Precambrian Research*, 227: 247-258.
- Dickinson W R, Gehrels G E, 2009. Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 288 (1-2): 115-125.
- Du Y S, Zhou Q, Yu W C, et al., 2015. Linking the Cryogenian Manganese Metallogenic Process in the Southeast Margin of Yangtze Block to Break-up of Rodinia Supercontinent and Sturtian Glaciation[J]. *Geological Science and Technology Information*, 34 (6): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- Fedo C M, Nesbitt H. Wayne, Young G M, 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23 (10): 921-924.
- Feng L, Zhang Q, 2016. The Pre-Sturtian negative $\delta^{13}\text{C}$ excursion of the Dajiangbian formation deposited on the western margin of Cathaysia Block in South China[J]. *Journal of Earth Science*, 27 (2): 225-232.
- Feng L J, Chu X L, Zhang Q R, et al., 2003. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 10 (4): 539-544 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Fujian Province (BGMRF), 1985. Regional Geology of the Fujian Province[M]. Geological Publishing House, Beijing.
- Gao S, Yang, J, Zhou L, et al., 2011. Age and growth of the Archean Kongling terrain, South China, with emphasis on 3.3 Ga granitoid gneisses[J]. *American Journal of Science*, 311 (2): 153-182.
- Guo L Z, Lu H F, Shi Y S, et al., 1996. On the Meso-Neoproterozoic Jiangnan island arc: its kinematics and dynamics[J]. *Geological Journal of China Universities*, 002 (001): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Grabau A W, 1924. Migration of geosynclines[J]. *Bull. Geol. Soc. China*, 3 (3-4): 207-349.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region (BGMRGZAR), 2017. Regional Geology of the Guangxi

- Zhuang Autonomous Region[M]. Geological Publishing House, Beijing.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangdong Province (BGMRGP), 1988. Regional Geology of the Guangdong Province[M]. Geological Publishing House, Beijing.
- Halpin J A, Gerakiteys C L, Clarke G L, et al., 2005. In-situ U-Pb geochronology and Hf isotope analyses of the Rayner Complex, east Antarctica[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148 (6) : 689 – 706.
- Hoffman P F, 1991. Did the breakup of Laurentia turn Gondwanaland inside-out?[J]. *Science*, 252 (5011) : 1409 – 1412.
- Hou L M, 2020. The formation age and tectonic environment of metamorphic sedimentary strata in the Yudu – xingguo area, Southern Jiangxi province[D], China University of Geosciences (Beijing).
- Huang T K. The main characteristics of the structure of China: Preliminary conclusions[M]. Geological Publishing House.
- Huang J Z, Tang X S, Zhang C C, et al., 1994. New Stratigraphic Division and Correlation of Sinian System in Southeastern Hunan[J]. *Hunan Geology*, 13 (3) : 129–136.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hunan Province (BGMRHP), 1988. Regional Geology of the Hunan Province[M]. Geological Publishing House, Beijing.
- Hui B, Dong Y, Neubauer F, et al., 2020. Detrital zircon U–Pb ages of metasedimentary rocks from the Neoproterozoic Zhoutan Group in the northern Cathaysia Block (South China) : Provenance and tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 63 (9) : 1132 – 1152.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province (BGMRJP), 1984. Regional Geology of the Hunan Province[M]. Geological Publishing House, Beijing.
- Jing X, Yang Z, Evans D A, et al., 2020. A pan-latitudinal Rodinia in the Tonian true polar wander frame[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 530: 115880.
- Kinny P, Black L, Sheraton J, 1997. Zircon U–Pb ages and geochemistry of igneous and metamorphic rocks in the northern Prince Charles Mountains, Antarctica[J]. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 16 (5) : 637 – 654.
- Li J L, 1993. The Continental Lithospheric Structure and Geological Evolution of the Southeast China[M]. Beijing Metallurgy Industry Publishing, 1–264.
- Li S Z, Li X Y, Zhao S J, et al., 2016. Global Early Paleozoic Orogens (III) : Intracontinental Orogen in South China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46 (4) : 1005 – 1025 (in Chinese with English abstract).
- Li W X, Li Z, 2005. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance[J]. *Precambrian Research*, 136 (1) : 51 – 66.
- Li W X, Li Z X, 2011. Ca. 850 Ma bimodal volcanic rocks in northeastern Jiangxi Province, South China: Initial extension during the breakup of Rodinia?[J]. *American Journal of Science*, 310 (9) : 951 – 980.
- Li X Y, Zheng J P, Xiong Q, et al., 2018. Triassic rejuvenation of unexposed Archean-Paleoproterozoic deep crust beneath the western Cathaysia block, South China[J]. *Tectonophysics*, 724-725: 65 – 79.
- Li Z X, Zhang L, Powell C M, 1995. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia –East Antarctica and Laurentia?[J]. *Geology*, 23 (5) : 407 – 410.
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al., 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 160 (1-2) : 179 – 210.
- Li Z X, Evans D A D, Zhang S, 2004. A 90° spin on Rodinia: possible causal links between the Neoproterozoic supercontinent, superplume, true polar wander and low-latitude glaciation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220 (3-4) : 409 – 421.
- Lin M, Peng S, Jiang X, et al., 2016. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of Neoproterozoic mafic–ultramafic rocks from the western Jiangnan orogen, South China[J]. *Gondwana Research*, 35: 338 – 356.
- Liu S, Peng S, Kusky T, et al., 2018. Origin and tectonic implications of an early Paleozoic (460–440 Ma) subduction-accretion shear zone in the northwestern Yunkai Domain, South China[J]. *Lithos*, 322: 104 – 128.
- Liu X, Chen L, Wang W R Z, et al., 2021. Deciphering early Neoproterozoic and Cambrian high-grade metamorphic events in the Archean/Mesoproterozoic Rauer Group, East Antarctica[J]. *Precambrian Research*, 365: 106392.
- Liu X, Zhao Y, Chen H, et al., 2017. New zircon U–Pb and Hf–Nd isotopic constraints on the timing of magmatism, sedimentation and metamorphism in the northern Prince Charles Mountains, East Antarctica[J]. *Precambrian Research*, 299: 15 – 33.
- Meert J G, Pandit M K, Kamenov G D, 2013. Further geochronological and paleomagnetic constraints on Malani (and pre-Malani) magmatism in NW India[J]. *Tectonophysics*, 608: 1254 – 1267.
- Merdith A S, Collins A S, Williams S E, et al., 2017. A full-plate global reconstruction of the Neoproterozoic[J]. *Gondwana Research*, 50: 84 – 134.
- Niu J, Li Z X, Zhu W, 2016. Palaeomagnetism and geochronology of mid-Neoproterozoic Yanbian dykes, South China: implications for a c. 820–800 Ma true polar wander event and the reconstruction of Rodinia[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 424 (1) : 191 – 211.
- Nong J N, Guo S Y, Sun M H, et al., 2020. Geochemical Characteristics of Nanhuan-Cambrian Sandstones in Dayaoshan Area of Southeastern Guangxi and Its Implication for Sedimentary Environment[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 36 (2) : 93 – 103 (in Chinese with English abstract).
- Nyame F, 2001. Petrological significance of manganese carbonate inclusions in spessartine garnet and relation to the stability of

- spessartine in metamorphosed manganese-rich rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141 (6) : 733 – 746 .
- Pan G., Lu S., Xiao Q., et al., 2016. Division of tectonic stages and tectonic evolution in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 23 (6) : 1 – 23 (in Chinese with English abstract).
- Park Y., Swanson - Hysell N L., Xian H., et al., 2021. A Consistently High - Latitude South China From 820 to 780 Ma: Implications for Exclusion From Rodinia and the Feasibility of Large - Scale True Polar Wander[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126 (6) : e2020JB021541 .
- Peng S., 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[J]. *Gondwana Research*, 21 (2-3) : 577 – 594 .
- Peng S B., Liu S F., Lin M S., et al., 2016. Early Paleozoic subduction in Cathaysia (II) : new evidence from the Dashuang high magnesian-magnesian andesite[J]. *Earth Science*, 41 (6) : 931 – 947 (in Chinese with English abstract).
- Peng S B., Liu S F., Lin M S., et al., 2016. Early Paleozoic subduction in Cathaysia (I) : New evidence from Nuodong ophiolite[J]. *Earth Science*, 41 (5) : 765 – 778 (in Chinese with English abstract).
- Qi L., Cawood P A., Xu Y., et al., 2020a. Linking South China to North India from the late Tonian to Ediacaran: Constraints from the Cathaysia Block[J]. *Precambrian Research*, 350: 10598 .
- Qi L., Cawood P A., Yang J., et al., 2020b. Quantifying temperature variation between Neoproterozoic cryochron – nonglacial interlude, Nanhua Basin, South China[J]. *Precambrian Research*, 351: 105967 .
- Qi L., Xu Y., Cawood P A., et al., 2018. Reconstructing Cryogenian to Ediacaran successions and paleogeography of the South China Block[J]. *Precambrian Research*, 314: 452 – 467 .
- Qi L., Xu Y., Cawood P A., et al., 2019. Implications of 770 Ma Rhyolitic Tuffs, eastern South China Craton in constraining the tectonic setting of the Nanhua Basin[J]. *Lithos*, 324-325: 842 – 858 .
- Qi L., Xu Y., Cawood P A., et al., 2021. Implications for supercontinent reconstructions of mid-late Neoproterozoic volcanic – Sedimentary rocks from the Cathaysia Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 354: 106056 .
- Ren J S., Chen T Y., Niu B G., et al., 1990. Tectonic evolution of the continental lithosphere and metallogeny in eastern China and adjacent areas[M]. Beijing, Science Press.
- Shu L S., Faure M., Yu J H., et al., 2011. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China) : New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 187 (3-4) : 263 – 276 .
- Shu L., Yao J., Wang B., et al., 2021. Neoproterozoic plate tectonic process and Phanerozoic geodynamic evolution of the South China Block[J]. *Earth-Science Reviews*, 216: 103596 .
- Shu L., Zhou G., Yangshen S., et al., 1994. Study of the High Pressure Metamorphic Blueschist and Its Late Proterozoic Age in the Eastern Jiangnan Belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 39 (14) : 1200 – 1204 .
- Shu L S., 2006. Predevonian tectonic evolution of South China: from Cathaysian Block to Caledonian period folded orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12 (4) : 418 – 431 (in Chinese with English abstract).
- Shu L S., Chen X Y., Lou F S., 2020. Pre-Jurassic tectonics of the South China[J]. *Acta Geological Sinica*, 94 (2) : 333 – 360 (in Chinese with English abstract).
- Song F., Niu Z J., He Y Y., et al., 2020. Geographic proximity of Yangtze and Cathaysia blocks during the late Neoproterozoic demonstrated by detrital zircon evidence[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 558: 109939 .
- Qin X F., Wang Z Q., Wang T., et al., 2015. The reconfirmation of age and tectonic setting of the volcanic rocks of Yingyangguan Group in the eastern Guangxi: Constraints on the structural pattern of the southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou joint belt[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 36 (3) : 282-291.
- Qin X F., Wang Z Q., Gong J H., et al., 2017. The confirmation of Caledonian intermediate-mafic volcanic rocks in northern margin of Yunkai block: Evidence for Early Paleozoic paleo-ocean basin in southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou joint belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (3) : 791-809.
- Tian Y., Wang W., Wang L., et al., 2020. Age and petrogenesis of the Yingyangguan volcanic rocks: Implications on constraining the boundary between Yangtze and Cathaysia blocks, South China[J]. *Lithos*, 376-377: 105775 .
- Tian Y., Wang L Z., Li X., et al., 2015. Identification and chronology of metamorphic ignimbrite of the Yingyangguan Group in Guangxi, China[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 31 (1) : 110 – 111 (in Chinese with English abstract).
- Wan Y., Liu D., Xu M., et al., 2007. SHRIMP U –Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in Northwestern Fujian, Cathaysia block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units[J]. *Gondwana Research*, 12 (1-2) : 166 – 183 .
- Wang J., Li Z X., 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up[J]. *Precambrian Research*, 122 (1-4) : 141 – 158 .
- Wang J., Jiang X S., Zhuo J W., et al., 2019. Evolution and lithofacies paleogeography of the Neoproterozoic rift basin in South China [M]. Beijing, Science Press.
- Wang L., Zhang K., Lin S., et al., 2022. Origin and age of the Shenshan tectonic mélange in the Jiangshan-Shaoxing-Pingxiang Fault and late Early Paleozoic juxtaposition of the Yangtze Block and the West Cathaysia terrane, South China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 134: 113 – 129 .
- Wang L J., Yu J H., O'Reilly S Y., et al., 2008. Grenvillian orogeny in the Southern Cathaysia Block: Constraints from U–Pb ages and

- Lu-Hf isotopes in zircon from metamorphic basement[J]. Chinese Science Bulletin, 53 (14): 1680–1692.
- Wang L Z, Tian Y, Li X, et al., 2020. Composition and deformation of the Yingyangguan tectonic mélange in eastern Guangxi[J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 44 (3): 340–356 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Zhang A, Cawood P A, et al., 2013. Geochronological, geochemical and Nd-Hf-Os isotopic fingerprinting of an early Neoproterozoic arc-back-arc system in South China and its accretionary assembly along the margin of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 231: 343–371.
- Wang Y, Zhang F, Fan W, et al., 2010. Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology[J]. *Tectonics*, 29 (6): 1–16.
- Wang Y D, Yu J H, Li X L, et al., 2021. Western boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks constrained by Neoproterozoic to Cambrian sedimentary rocks in the northern and eastern Guangxi Province, South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95 (6): 1712–1726 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Yang Q, Yin L M, et al., 2006. The Putative "Radiolarian Cherts" from Ophiolitic and Metamorphic Complexes in Northeast Jiangxi: A Re-examination[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12 (1): 98–105 (in Chinese with English abstract).
- Wen B, Evans D A D, Wang C, et al., 2018. A positive test for the Greater Tarim Block at the heart of Rodinia: Mega-dextral suturing of supercontinent assembly[J]. *Geology*, 46 (8): 687–690.
- Xian H, Zhang S, Li H, et al., 2019. How Did South China Connect to and Separate From Gondwana? New Paleomagnetic Constraints From the Middle Devonian Red Beds in South China[J]. *Geophysical Research Letters*, 46 (13): 7371–7378.
- Xia Y, Chen J J, Xu X B, 2022. Tectonic nature and evolution of the Yingyangguan tectonic belt, South China: Constrains from structural analysis[J]. *Geological Review*, 68 (06): 1–17 (in Chinese with English abstract).
- Xu X, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al., 2007. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes[J]. *Precambrian Research*, 158 (1-2): 51–78.
- Xu X B, Zhang Y Q, Shu L S, et al., 2010. Precambrian geochronology and stratigraphy in the Wuyishan area, South China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 34 (3): 254–267 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y J, Cawood P A, Zhang H C, et al., 2019. The Mesoproterozoic Baoban Complex, South China: A missing fragment of western Laurentian lithosphere[J]. *GSA Bulletin*, 132 (7-8): 1404–1418.
- Xu Y J, Du Y S, Huang H W, et al., 2013. Detrital zircon of 4.1 Ga in South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (3): 240–246.
- Xu Y, Cawood P A, Du Y, et al., 2013. Linking south China to northern Australia and India on the margin of Gondwana: Constraints from detrital zircon U-Pb and Hf isotopes in Cambrian strata[J]. *Tectonics*, 32 (6): 1547–1558.
- Xu X S, Liu W, Men Y P, et al., 2012. Probe into the tectonic nature of Neoproterozoic southern Hunan-northern Guangxi marine basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86 (12): 1890–1904 (in Chinese with English abstract).
- Yan C, Shu L, Santosh M, et al., 2015. The Precambrian tectonic evolution of the western Jiangnan Orogen and western Cathaysia Block: Evidence from detrital zircon age spectra and geochemistry of clastic rocks[J]. *Precambrian Research*, 268: 33–60.
- Yang S F, Chen H L, Wu G H, et al., 1995. Discovery of Early Paleozoic Island-arc Volcanic rock in North Part of Fujian Province and the Significance for Tectonic Study[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 30 (2): 105–116 (in Chinese with English abstract).
- Yang X, Wang Y, Zhang Y, et al., 2022. Early Neoproterozoic (~840 Ma) assemblage in South China and the southern extension of the Jiangshan-Shaoxing zone: Records from the Zhoutan and Shenshan igneous rocks in central Jiangxi[J]. *Precambrian Research*, 371: 106573.
- Yang Z Y and Jiang S Y., 2019. Detrital zircons in metasedimentary rocks of Mayuan and Mamianshan Group from Cathaysia Block in northwestern Fujian Province, South China: New constraints on their formation ages and paleogeographic implication[J]. *Precambrian Research*, 320: 13–30.
- Yao J, Shu L, Cawood P A, et al., 2017. Constraining timing and tectonic implications of Neoproterozoic metamorphic event in the Cathaysia Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 293: 1–12.
- Yao J, Shu L, Santosh M, et al., 2014a. Palaeozoic metamorphism of the Neoproterozoic basement in NE Cathaysia: zircon U-Pb ages, Hf isotope and whole-rock geochemistry from the Chencai Group[J]. *Journal of the Geological Society*, 171 (2): 281–297.
- Yao W H, Li Z X, Li W X, et al., 2014b. From Rodinia to Gondwanaland: A tale of detrital zircon provenance analyses from the southern Nanhua Basin, South China[J]. *American Journal of Science*, 314 (1): 278–313.
- Yi L W, Ma C Q, Wang L X, et al., 2014. Discovery of late Ordovician subvolcanic rocks in South China: Existence of subduction-related dacite from early Paleozoic[J]. *Earth Science*, 39 (6): 637–653 (in Chinese with English abstract).
- Yin H F, Wu S B, Du Y S, et al., 1999. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 24 (1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Yu J H, O'Reilly S Y, Wang ., et al., 2008. Where was South China in the Rodinia supercontinent?[J]. *Precambrian Research*, 164 (1-2): 1–15.
- Yu J H, O'Reilly S Y, Zhou M F, et al., 2012. U-Pb geochronology and Hf-Nd isotopic geochemistry of the Badu Complex, Southeastern China: Implications for the Precambrian crustal evolution and paleogeography of the Cathaysia Block[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 424–449.
- Yu J, O'Reilly Y S, Wang L, et al., 2007. Finding of ancient

- materials in Cathaysia and implication for the formation of Precambrian crust[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52 (1) : 13–22.
- Yu J, Zhou X, O'Reilly Y, et al., 2005. Formation history and protolith characteristics of granulite facies metamorphic rock in Central Cathaysia deduced from U-Pb and Lu-Hf isotopic studies of single zircon grains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50 (18) : 2080–2089.
- Yu J H, Lou F S, Wang L J, et al., 2014. The geological significance of a Paleozoic mafic granulite found in the Yiyang area of northeastern Jiangxi Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59 (35) : 3508–3516 (in Chinese with English abstract).
- Yu J H, Wei Z, Wang L, et al., 2006. Cathaysia Block: A Young Continent Comprising Ancient Materials[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12 (4) : 440–447 (in Chinese with English abstract).
- Yu W, Algeo T J, Du Y, et al., 2017. Newly discovered Sturtian cap carbonate in the Nanhua Basin, South China[J]. *Precambrian Research*, 293: 112–130.
- Zhang A M, Wang Y J, Fan W M, et al., 2011. LA-ICPMS Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Composition of the Taoxi Migmatite (Wuping): Constrains on the Formation Age of the Taoxi Complex and the Yunanian Event[J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 35 (1) : 64–72 (in Chinese with English abstract).
- Zhang A, Ma L, Liu H, et al., 2021. Identification of two-phased late Paleoproterozoic magmatism in the Wuyishan Domain (SE China): Implications for the tectonic evolution of the Cathaysia Block[J]. *Precambrian Research*, 355: 106093.
- Zhang F F, Wang X L, Wang D, et al., 2017. Neoproterozoic backarc basin on the southeastern margin of the Yangtze block during Rodinia assembly: New evidence from provenance of detrital zircons and geochemistry of mafic rocks[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 129 (7-8) : 904–919.
- Zhang L, Cawood P A, Wang Y, et al., 2020. Provenance record of late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic units, west Hainan, South China, and implications for Rodinia reconstruction[J]. *Tectonics*, 39 (8) : 1–19.
- Zhang Y, Pufahl P K, Du Y, et al., 2019. Economic phosphorite from the Ediacaran Doushantuo Formation, South China, and the Neoproterozoic-Cambrian Phosphogenic Event[J]. *Sedimentary Geology*, 388: 1–19.
- Zhao G, 2015. Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction[J]. *Gondwana Research*, 27 (3) : 1173–1180.
- Zhao G, Cawood P A, 1999. Tectonothermal evolution of the Mayuan Assemblage in the Cathaysia Block; implications for Neoproterozoic collision-related assembly of the South China Craton[J]. *American Journal of Science*, 299 (4) : 309–339.
- Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, et al. 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China Earth Sciences*, 43 (10) : 1553–1582.
- Zhang K B, Chen J L, Lin H C, et al. 2005. Lithostratigraphic division and correlation of the Nanhuaan-Sinian Periods in southwestern Fujian[J]. *Geology in China*, 32 (3) , 363–369.
- Zhang K X, Xu Y D, He W H, et al., 2018. The Pattern of Early Neoproterozoic Ocean and Blocks in China[J]. *Earth Science*, 43 (11) : 3837–3852 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J H, Yang T, Wang W, 2022. Orogenic belt resulting from ocean-continent collision[J]. *Geology*, 50 (11) : 1266–1269.
- Zheng J P, Griffin W L, Tang H Y, et al., 2008. Archean basement similar to the North China and Yangtze continents may be existed beneath the western Cathaysia[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14 (4) : 549–557 (in Chinese with English abstract).
- Zhou C, Huyskens M H, Lang X, et al., 2019. Calibrating the terminations of Cryogenian global glaciations[J]. *Geology*, 47 (3) : 251–254.
- Zhou H W, Li X H, Wang H R, et al., 2002. U-Pb Zircon Geochronology of Basic Volcanic Rocks of the Yingyanguan Group in Hezhou, Guangxi, and Its Tectonic Implications[J]. *Geological Review*, 48 (S1) : 22–25 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J C, Wang X L, Qiu J S, 2009. Some Neoproterozoic geological events involved in the development of the Jiangnan Orogen[J]. *Geological Journal of China Universities*, 15 (4) : 453–459 (in Chinese with English abstract).
- Zhou K K, Mu C L, Ge X Y, et al., 2017. Lithofacies paleogeography of the South China in Early Paleozoic and its reflection on key geological problems[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35 (3) : 449–459 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X Y, Yu J H, Wang L J, et al., 2015. Compositions and formation of the basement metamorphic rocks in Yunkai terrane, western Guangdong Province, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (3) : 855–882 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 杜远生, 周琦, 余文超, 等, 2015. Rodinia 超大陆裂解, Sturtian 冰期事件和扬子地块东南缘大规模锰成矿作用[J]. *地质科技情报*, 34 (6) : 1–7.
- 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等, 2003. 化学蚀变指数 (CIA) 及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. *地学前缘*, 10 (4) : 539–544.
- 福建省地质矿产局, 1985. 福建省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 郭令智, 卢华复, 施央申, 等, 1996. 江南中、新元古代岛弧的运动学和动力学[J]. *高校地质学报*, 002 (001) : 1–13.
- 广西壮族自治区地质矿产局, 2017. 广西壮族自治区地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 广东省地质矿产局, 1988. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 侯立鸣, 2020. 赣南于都—兴国地区变质沉积地层形成时代与构造环境分析[D]. 中国地质大学 (北京).
- 黄汲清, 1994. 中国主要地质构造单位[M]. 地质出版社.
- 黄建中, 唐晓珊, 张纯臣, 等, 1994. 湘东南地区震旦纪地层的新

- 划分与区域对比[J]. 湖南地质, 13(3): 129-136.
- 湖南省地质矿产局. 1988. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 江西省地质矿产局, 1984. 江西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 李继亮, 1993. 东南大陆岩石圈结构与地质演化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1-264.
- 李三忠, 李玺瑶, 赵淑娟, 等, 2016. 全球早古生代造山带(III): 华南陆内造山[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 46(4): 1005-1025.
- 农军年, 郭尚宇, 孙明行, 等, 2020. 桂东南大瑶山地区南华纪-寒武纪砂岩地球化学特征及对沉积构造环境的指示[J]. 华南地质与矿产, 36(2): 93-103.
- 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等, 2016. 中国大地构造阶段划分和演化[J]. 地学前缘, 23(6): 1-23.
- 彭松柏, 刘松峰, 林木森, 等, 2016. 华夏早古生代俯冲作用(II): 大爽高镁-镁质安山岩新证据[J]. 地球科学, 41(6): 931-947.
- 彭松柏, 刘松峰, 林木森, 等, 2016. 华夏早古生代俯冲作用(I): 来自糯垌蛇绿岩的新证据[J]. 地球科学, 41(5): 765-778.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等, 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社.
- 舒良树, 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带[J]. 高校地质学报, 12(4): 418-431.
- 舒良树, 陈祥云, 楼法生, 2020. 华南前侏罗纪构造[J]. 地质学报, 94(2): 333-360.
- 覃小锋, 王宗起, 王涛, 等, 2015. 桂东鹰扬关群火山岩时代和构造环境的重新厘定: 对钦杭结合带西南段构造格局的制约[J]. 地球学报, 36(3): 283-292.
- 覃小锋, 王宗起, 宫江华, 等, 2017. 云开地块北缘加里东期-基性火山岩的厘定: 钦-杭结合带南西段早古生代古洋盆存在的证据[J]. 岩石学报, 33(3): 791-809.
- 田洋, 王令占, 李响, 等, 2015. 广西鹰扬关组变质熔结凝灰岩的发现及年代特征[J]. 华南地质与矿产, 31(1): 110-111.
- 王剑, 江新胜, 卓皆文, 等, 2019. 华南新元古代裂谷盆地演化与岩相古地理[M]. 北京: 科学出版社.
- 王丽娟, 于津海, O'Reilly S. Y. 等, 2008. 华夏南部可能存在 Grenville 期造山作用: 来自基底变质岩中锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素信息. 科学通报, 53(14): 1680-1692.
- 王令占, 田洋, 李响, 等, 2020. 桂东鹰扬关构造混杂岩物质组成及变形特征[J]. 大地构造与成矿学, 44(3): 340-356.
- 王雅迪, 于津海, 李晓玲, 等, 2021. 扬子地块与华夏地块的西段界线: 来自桂北和桂东新元古界—寒武系沉积岩的证据[J]. 地质学报, 95(6): 1712-1726.
- 王玉净, 杨群, 尹磊明, 等, 2006. 赣东北蛇绿混杂岩带和变质岩系中“放射虫硅质岩”的再研究[J]. 高校地质学报, 12(1): 98-105.
- 夏元, 陈家驹, 徐先兵, 2022. 华南鹰扬关构造带的大地构造属性与构造演化过程: 基于构造解析的[J]. 地质论评, 68(06): 1-17.
- 徐先兵, 张岳桥, 舒良树, 等, 2010. 武夷山地区前寒武纪地层沉积时代研究[J]. 地层学杂志, 34(3): 254-267.
- 徐亚军, 杜远生, 黄宏伟, 等, 2013. 华南发现 4.1 Ga 的碎屑锆石[J]. 科学通报, 58(3): 240-246.
- 许效松, 刘伟, 门玉澎, 等, 2012. 对新元古代湘桂海盆及邻区构造属性的探讨[J]. 地质学报, 86(12): 1890-1904.
- 杨树峰, 陈汉林, 1995. 闽北早古生代岛弧火山岩的发现及其大地构造意义[J]. 地质科学, 30(2): 105-116.
- 易立文, 马昌前, 王连训, 等, 2014. 华南晚奥陶世次火山岩的发现: 早古生代与俯冲有关的英安岩?[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 39(6): 637-653.
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等, 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 24(1): 1-12.
- 于津海, 楼法生, 王丽娟, 等, 2014. 赣东北弋阳早古生代麻粒岩的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 59(35): 3508-3516.
- 于津海, 魏震洋, 王丽娟, 等, 2006. 华夏地块: 一个由古老物质组成的年轻陆块[J]. 高校地质学报, 12(4): 440-447.
- 张爱梅, 王岳军, 范蔚茗, 等, 2011. 福建武平地区桃溪群混合岩 U-Pb 定年及其 Hf 同位素组成: 对桃溪群时代及郁南运动的约束[J]. 大地构造与成矿学, 35(1): 64-72.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等, 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1553-1582.
- 张开毕, 陈金良, 林亨才, 等, 2005. 闽西南地区南华纪——震旦纪岩石地层的划分与对比[J]. 中国地质, 32(3): 363-369.
- 张克信, 徐亚东, 何卫红, 等, 2018. 中国新元古代青白口纪早期(1000~820 Ma) 洋陆分布[J]. 地球科学, 43(11): 3837-3852.
- 郑建平, Griffin W L, 汤华云, 等, 2008. 西部华夏地区深部可能存在与华北和扬子大陆相似的古太古代基底[J]. 高校地质学报, 14(4): 549-557.
- 周汉文, 李献华, 王汉荣, 等, 2002. 广西鹰扬关群基性火山岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 48(S1): 22-25.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生, 2009. 江南造山带形成过程中若干新元古代地质事件[J]. 高校地质学报, 15(4): 453-459.
- 周恩恩, 牟传龙, 葛祥英, 等, 2017. 新一轮岩相古地理编图对华南重大地质问题的反映——早古生代晚期“华南统一板块”演化[J]. 沉积学报, 35(3): 449-459.
- 周雪瑶, 于津海, 王丽娟, 等, 2015. 粤西云开地区基底变质岩的组成和形成[J]. 岩石学报, 31(3): 855-882.