

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.02.003

华夏陆块晚新元古代–早古生代沉积物源的组成与演化及其对冈瓦纳大陆重建的意义

王伟¹, 薛尔堃^{1,2}, 张杨¹, 章俊¹, 蔡欣豫¹

WANG Wei¹, XUE Er-Kun^{1,2}, ZHANG Yang¹, ZHANG Jun¹, CAI Xin-Yu¹

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074;

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

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China

摘要: 华南板块是冈瓦纳大陆的重要组成部分, 其在冈瓦纳大陆中的古地理位置是恢复古大陆格局的关键要素, 也是地质学界争论的焦点。本文汇总并对比了华南东南部华夏陆块多个盆地的成冰纪-奥陶纪碎屑沉积岩的岩石地层学、全岩地球化学和碎屑锆石数据, 厘清了华夏陆块晚新元古代-早古生代三次重要的沉积-构造事件: 晚成冰世砾岩指示的近源沉积事件, 晚埃迪卡拉世硅质岩指示的海进事件, 以及中寒武统底部平行不整合界面、砂岩中砾石的广泛出现指示的构造抬升事件。成冰纪-奥陶纪沉积岩中含有大量格林威尔早期(1300~1000 Ma)和晚期(1000~900 Ma)的碎屑锆石, 分别主要来自澳大利亚和印度板块。印度东部为华夏盆地长期提供物质补给, 而澳大利亚西部在晚埃迪卡拉世从主要源区变为次要源区。中寒武世华夏陆块抬升使内部850~700 Ma岩浆岩出露成为主要物源之一, 是对外部构造应力的远程响应。因此, 华夏陆块在晚新元古代-早古生代位于东冈瓦纳北缘, 与印度、澳大利亚具有长期稳定的联系, 毗邻东南极洲。在冈瓦纳大陆聚合过程中, 印度和澳大利亚泛非期造山带的形成、抬升和剥蚀影响了华夏陆块沉积盆地的物源变化。

关键词: 沉积物源; 碎屑锆石; 晚新元古代-早古生代; 华夏陆块; 冈瓦纳大陆

中图分类号: P512.2; P548

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)02-0211-23

Wang W, Xue E K, Zhang Y, Zhang J and Cai X Y. 2024. Provenance and Its Evolution of the Cathaysia Block in the Late Neoproterozoic–Early Paleozoic and Implication on the Reconstruction of the Gondwana Supercontinent. *South China Geology*, 40(2):211–233.

Abstract: As a significant component of Gondwanaland, the South China Block holds a crucial role in reconstructing the paleogeographic framework of the supercontinent. In this study, we have compiled and compared lithostratigraphic, geochronological, and geochemical data from Cryogenian-Ordovician clastic sedimentary rocks across multiple sub-basins within the Cathaysia Block, situated in the southeastern portion of the South China Block. The abundance of siliceous and conglomeratic rocks, along with local unconformities

收稿日期: 2024-01-22; 修回日期: 2024-03-19; 网络出版日期: 2024-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272228)

第一作者: 王伟(1984—), 男, 博士, 教授, 研究方向为前寒武纪地质学和沉积岩石学, E-mail: wwz@cug.edu.cn

in certain layers, suggests a proximal deposition during the late Cryogenian, followed by a late Ediacaran transgression and middle Cambrian uplift. Australia and India were the primary sources of zircons in the early (1300 ~ 1000 Ma) and late Grenvillian (1000 ~ 900 Ma) age, respectively, while detritus from East Antarctica contributed to a lesser extent. Notably, India served as a prolonged source terrane for the Cryogenian-Ordovician basin in the Cathaysia Block, whereas western Australia shifted from being a major to a secondary sediment supplier during the late Ediacaran. Intrinsic 850 ~ 700 Ma magmatic rocks that were exposed during the middle Cambrian uplift of the Cathaysia Block, in response to the far-field stress effects of the external tectonic movement, contributed as one of the provenances. Thus, the Cathaysia Block was inferred to be located in the northern margin of Eastern Gondwana during the late Neoproterozoic-early Paleozoic and had persistent connections with India and Australia, adjacent to East Antarctica. During the Gondwana assembly, the formation, uplift, and exhumation of the Pan-African orogenic belts in India and Australia influenced the provenance variations of sedimentary basins in the Cathaysia Block.

Key words: Sedimentary provenance; Detrital zircon; Late Neoproterozoic-early Paleozoic; Cathaysia Block; Gondwana supercontinent

作为东亚重要陆块和中国三大前寒武纪地体之一(图 1a), 华南板块保留有相对完整的超大陆循环的地质记录, 对重建超大陆古地理格局这一地球科学领域前沿问题具有重要的意义。然而在形成于晚新元古代-早古生代这一地球重要演化阶段的 Gondwana(冈瓦纳)大陆中, 华南板块缺少与泛非期(650 ~ 500 Ma)相对应的岩浆-变质记录, 使得其在冈瓦纳古地理中的位置难以精确厘定, 因此具有极大的探索空间和研究价值。沉积盆地的物源分析可以判断碎屑物质源区, 因而可为古陆块是否相邻提供关键信息, 是确定各陆块在超大陆中相对位置的有效方法(Myrow et al., 2010; Wang W et al., 2021)。华夏陆块位于华南板块的东南部, 保留有分布广泛、层序相对完整的成冰纪-奥陶纪沉积地层, 前人以此为研究对象, 进行了大量碎屑锆石物源分析的工作, 取得了一系列关于华南古地理恢复的成果(Xu Y J et al., 2013; Shu L S et al., 2014; Yao W H et al., 2014; Qi L et al., 2018; Wang W et al., 2019), 由此提出了多个关于华南古地理位置的不同模型:

(1) 华南板块长期位于印度北部、东南极洲与澳大利亚西部之间, 属于冈瓦纳大陆东部的北缘。福建、江西和广西等多个地区的晚新元古代-早古生代沉积地层含有大量格林威尔期年龄(1300 ~ 900 Ma)的碎屑锆石。通过对比, 澳大利亚西部、东南极洲和印度北部同时期沉积岩中存在类似的碎

屑锆石年龄峰值。华夏陆块碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的正负值比例与上述陆块同时期沉积岩碎屑锆石相似, 支持它们之间的亲缘性(Yu J H et al., 2008; Xu Y J et al., 2013; Wang W et al., 2018)。根据不同时期或不同盆地样品碎屑锆石年龄图谱的差异, 华夏陆块沉积物被认为主要来自澳大利亚西部和印度北部(Xue E K et al., 2019; Yang Z Y and Jiang S Y, 2019; Wang L J et al., 2023), 或者东南极洲(Qi L et al., 2018)。

(2) 华南板块毗邻劳伦古陆。江西地区晚新元古代-早古生代沉积地层的碎屑锆石尽管具有明显的格林威尔期年龄峰值, 但该峰值在同时期劳伦古陆的沉积地层中同样可见。相对而言, 冈瓦纳大陆早古生代沉积岩的另一个特征年龄峰值——泛非期年龄峰值(650 ~ 500 Ma)在华夏陆块和劳伦古陆沉积岩中占比不明显。因此泛非期华南板块位于劳伦古陆而非冈瓦纳大陆, 在其东南方存在一个外部的格林威尔期造山带物源(Wu L et al., 2010)。

(3) 华南板块自劳伦古陆移动到印度附近。基于重建罗迪尼亚超大陆的 Missing Link 模式, 华夏陆块新元古代裂谷盆地地层和构造事件可与澳大利亚东南部和劳伦古陆西缘对比, 与劳伦、澳大利亚、东南极洲共同构成了罗迪尼亚超大陆的核心。在约 750 Ma 罗迪尼亚超大陆裂解, 华南板块与之分离并开始逆时针漂移。粤北地区寒武系碎屑锆石

U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素特征与印度北部的同时期沉积岩相似,而不同于华南内部、澳大利亚西部以及劳伦西部样品(Yao W H et al., 2014)。因此在埃迪卡拉纪-早古生代,华南与印度北部碰撞,并顺时针旋转,逐步向澳大利亚-东南极洲陆块靠近(Yao W H et al., 2014)。

(4) 华南板块自印度、伊朗-土耳其附近漂移到澳大利亚。华南板块多个晚新元古代-早古生代沉积盆地接受来自内部攀西-汉南弧以及江南造山带的碎屑物质。部分地区沉积岩碎屑锆石年龄图谱展现出单一的泛非期年龄峰值,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围和 Hf 模式年龄与伊朗-土耳其地块的泛非期岩浆岩锆石可以

对比。来自澳大利亚西部的格林威尔期年龄碎屑锆石输入比例随时间增加。因此华南板块长期位于印度北部,毗邻伊朗-土耳其地块,550~500 Ma 开始顺时针方向漂移并旋转,在 500~470 Ma 与澳大利亚板块碰撞(Chen Q et al., 2021; Wang W et al., 2021)。

上述对华南板块在冈瓦纳大陆中重建的不同认识主要基于陆源沉积岩中碎屑锆石的 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析。得益于稳定的 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素体系以及高度的物理化学抗性,碎屑锆石在物源分析中的作用日益突出,并已成为主要手段之一(Chew et al., 2020)。然而其不足正如上所述,同样的研究方法导致了不同的结论,原因在于碎屑锆

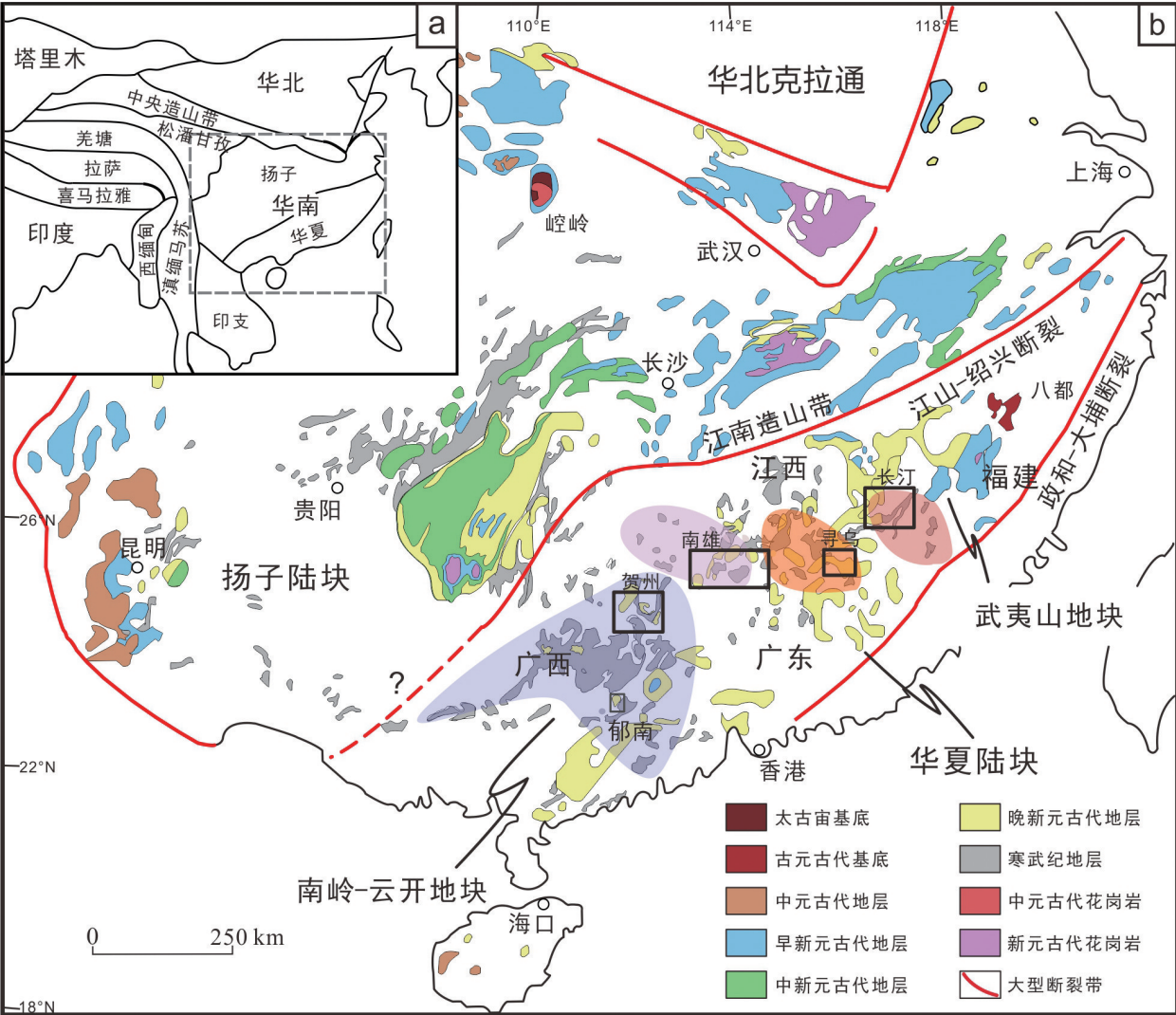


图 1 华南板块地理位置示意图(a)及地质简图(b)

Fig. 1 Location map (a) and geological sketch (b) of the South China Block

阴影代表本文涉及的沉积盆地,黑色矩形框指示剖面所在研究区;修改自 Zhao G C and Cawood(2012)、Yao W H et al.(2014)

石用于示踪沉积盆地物源具有一定的多解性。一方面,上述对华夏陆块重建的不同认识大多基于单一盆地的研究,对区域内不同盆地的对比工作相对较少,影响了对华夏陆块沉积特征的整体认识(张雄等, 2016; 农军年等, 2020)。目前,碎屑锆石研究方法处于持续改进和发展中,越来越多的研究倾向于将某区域的大量数据汇总进行分析(Cawood et al., 2017; Wang W et al., 2019; Yao J L et al., 2019)。另一方面,冈瓦纳大陆聚合过程中内部和外围的一系列造山事件在时间上重叠,存在多个年龄相近的源区,进而使单矿物年龄对比具有多解性。基于以上认识,本文聚焦华夏陆块闽西、赣南、粤北和桂东四个沉积盆地,广泛搜集已有的岩石地层学资料、全岩地球化学和碎屑锆石物源分析数据[数据及参考文献见 Xue E K et al. (2021)],进行汇总、统计和对比,以求全面、完整地反映华夏陆块晚新元古代-早古生代物源演化,并结合最近报道的该时期华夏陆块碎屑独居石和磷灰石研究,为重建华南板块在冈瓦纳大陆中的位置和演化过程提供新的参考。

1 华夏陆块地质背景

华南板块与华北克拉通和塔里木克拉通并称中国三大前寒武纪地质体,也是东亚大陆的重要板块之一。华南板块北部与华北克拉通以秦岭-大别造山带为界,西北部与松潘-甘孜地体以龙门山断裂带为界,西南部与印支板块以哀牢山-红河断裂带为界,东南部毗邻太平洋。华南板块主要由西北部的扬子陆块和东南部的华夏陆块组成(图 1b)。

1.1 华夏陆块基底特征

华夏陆块报道有大量太古宙年龄的碎屑锆石或继承锆石(覃小锋等, 2006; Yao J L et al., 2011; Lu Y Y et al., 2022),而最古老的碎屑锆石年龄为 4127 Ma($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; 邢光福等, 2015)。目前华夏陆块报道的最古老结晶基底出露于武夷山八都地区(图 1b),由零散分布的古元古代花岗岩类和表壳岩系组成(1888 ~ 1855 Ma)(于津海等, 2006; Zhao L et al., 2015)。变质-结晶基底岩石主要出露在溪口、淡竹、里庄和泉坑等地区,主要岩性为花岗

闪长质片麻岩、英云闪长质片麻岩和片麻状花岗岩;而变质表壳岩系主要由黑云母斜长片麻岩、黑云母片岩和混合岩组成(Xiang H et al., 2008; Yu J H et al., 2009; Zhao L et al., 2015)。中元古代年龄的基底在海南岛有报道,包括被大量 1430 Ma 花岗岩类侵入的抱板群陆源海相沉积建造,以及与其同时期的石碌群(1440 Ma),主要由云母片岩、石英岩、千枚岩和含铁建造组成(Yao W H et al., 2017; Xu Y J et al., 2019; Zhang L M et al., 2019)。但最近的研究显示海南地块并不是华夏的一部分,可能晚古生代才拼贴到华南板块(刘晓春等, 2021; 龙文国等, 2022, 2023)。赣东北铁砂街岩组出露~1159 Ma 双峰式火山岩,可能代表华夏陆块北缘的中元古代基底,但其属于扬子、华夏的一部分也存在一定的争议(Li L M et al., 2013)。其他过去被认为形成于中元古代中晚期的武夷山、陈蔡和云开地区变沉积岩,近年的定年结果显示其年龄为新元古代(Wan Y S et al., 2007, 2010)。早新元古代格林威尔期(1000 ~ 900 Ma)结晶基底零散出露于华夏陆块的西部和西北部,由(变)基性岩、(变)中性岩、斜长角闪岩和花岗质片麻岩组成(Xia Y et al., 2018)。中新元古代形成于南华裂谷时期的岩浆岩和沉积岩在华夏陆块分布广泛,包括武夷山地区的麻源群、马面山群、万全群、陈蔡群和龙泉群,南岭-云开地区的神山群和云开群等(魏震洋等, 2009)。麻源群和陈蔡群主要由 840 ~ 720 Ma 的(变)沉积岩、副片麻岩、角闪岩和石榴子石-白云母片岩组成(Wan Y S et al., 2007, 2010),而龙泉群、马面山群以及万全群主要由 860 ~ 728 Ma 的玄武岩、安山岩、流纹岩,以及角闪岩、黑云母片麻岩和云母-石英片岩组成(Li Z X et al., 2010; 舒良树, 2006)。

晚新元古代-早古生代(700 ~ 490 Ma)的变质结晶基底岩石在华夏陆块内部少有报道,几乎没有关于该时期的精确岩浆活动和构造事件的记录。除闽北政和地区的变沉积岩外(Yang Z Y and Jiang S Y, 2019),目前已知的该时期变质岩包括:(1)闽西武平地区桃溪群混合岩,包括糜棱岩化灰色条带状混合岩脉体以及灰色花岗片麻岩,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 496 ~ 494 Ma(张爱梅等, 2011)。新生长锆石和榍石显示桃溪群混合岩在 470 ~ 400 Ma 间经历

多期次的水致熔融作用(Xue E K et al., 2024a)。(2)闽东北政和县角闪石岩,呈透镜体状产出于政和-大埔断裂带的新元古代片麻岩和云母片岩中,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $533 \pm 7 \text{ Ma}$ (Li L M et al., 2017)。(3)闽东北政和县马面山群变斜长花岗岩,呈数厘米至数十厘米宽的窄带状与政和-大埔断裂带中的透镜状变超基性岩互层,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $523 \sim 518 \text{ Ma}$,并经历了同时期的剪切和高级变质作用(Li L M et al., 2021)。

1.2 华夏陆块晚新元古代-早古生代沉积记录

晚新元古代-早古生代时期华夏陆块处于构造寂静期(Yao W H and Li Z X, 2016),结晶基底被一套巨厚的成冰纪-奥陶纪复理石沉积物所覆盖(Shu L S et al., 2014; 牛志军等, 2017, 2023; Qi L et al., 2018)。这套沉积地层较为完好地保存于华夏陆块的四个晚新元古代-早古生代盆地中(图2),自东北至西南依次位于(1)福建西部,以长汀地区(福建省地质调查研究院, 2016)为代表;(2)江西南部,以崇义、寻乌地区(江西省地质矿产勘查开发局, 2017)为代表;(3)广东北部,以南雄地区(广东省地质调查院, 2017)为代表;以及(4)广西东部,以贺州地区(广西区域地质调查研究院, 2016)为代表。值得注意的是,依据最新的地质年代划分方案可将华南板块寒武系划分为底统、下统、中统和上统,但在华夏陆块,寒武系四分的依据相对不足,部分地区对岩石地层单位依然采取三/二分方案,其下寒武统对应了四分方案的底统和下统(广西区域地质调查研究院, 2016; 江西省地质矿产勘查开发局, 2017; 广东省地质调查院, 2017)。

1.2.1 闽西盆地长汀剖面

长汀地区出露的晚新元古代地层存在多套划分方案:如整体划为楼子坝群,自下而上包括成冰纪的姜畲坑组、赖坑组,以及埃迪卡拉纪的南岩组、黄连组(张开毕等, 2005);或划分为早埃迪卡拉世的楼子坝组和晚埃迪卡拉世的南岩组、黄连组(福建省地质调查研究院, 2016)。本文采用前一种划分方案。早古生代地层包括寒武纪林田组、东坑口组和奥陶纪魏坊组、罗峰溪组。各组之间整合接触(福建省地质调查研究院, 2016)。

姜畲坑组下段主要为中厚层(中)细粒变石英

砂岩夹变粉砂岩、千枚岩或板岩,上段为互层的中薄-中厚层(中)细粒变石英砂岩、变长石石英砂岩、变粉砂岩和千枚岩,夹有中薄层变质硅质岩,可见水平纹层。

赖坑组下部为中厚层细粒变(长石)石英砂岩,夹中薄层变粉砂岩及千枚岩,或三者互层;上部主要为薄层板状千枚岩和变粉砂岩,水平纹层发育且多呈薄层状构造,具下粗上细的韵律。

南岩组整体为一套海相硅质和砂泥质细碎屑沉积,其下段为薄板状变细砂岩、变粉砂岩、薄层千枚岩互层,上段为中厚层细粒变石英砂岩、变粉砂岩、薄板状千枚岩互层,可见水平纹层。

黄连组主体岩性为中薄层变质硅质岩、细粒变石英砂岩、变粉砂岩及薄层千枚岩,普遍发育多层浅色条带状硅质岩。变砂岩、变粉砂岩中发育有水平纹理。

林田组下段主要由厚层细粒变石英砂岩夹碳质板岩、千枚岩和硅质岩组成两个从粗到细的沉积旋回,复理石韵律清楚,中部可见厚约8 m的含砾石英砂岩层;上段则由互层的中薄层细粒变石英砂岩、变泥质细砂岩与变粉砂岩、硅质泥岩和千枚岩组成。

东坑口组以厚层—巨厚层变中细粒石英砂岩为主,夹少量薄层千枚岩、变粉砂岩,局部砂岩中含同生泥屑或炭质碎屑,偶见板岩、石英岩。

魏坊组以薄层千枚岩、千枚状泥岩、千枚状硅质岩为主,夹变石英细砂岩、变长石石英砂岩,偶见千枚状页岩、碳质泥岩。发育水平层理、交错层理、包裹层理、平行层理和冲刷构造,具浊积的特征。

罗峰溪组下段主要由互层的薄层碳质板岩、变粉砂岩和中厚层中-细粒变(含长石)石英砂岩组成;上段则以厚-巨厚层变中-细粒(含长石)石英砂岩为主,夹薄层碳质板岩、变粉砂岩(张开毕等, 2005; 福建省地质调查研究院, 2016)。

1.2.2 赣南盆地寻乌剖面

寻乌地区出露的晚新元古代-早古生代沉积地层自下而上可划分为:成冰纪沙坝黄组、埃迪卡拉纪乐昌峡群、寒武纪八村群和早奥陶世下黄坑组,其中乐昌峡群自下而上包括坝里组和老虎塘组,八村群自下而上包括牛角河组、高滩组和水石组(江西省地质矿产勘查开发局, 2017)。

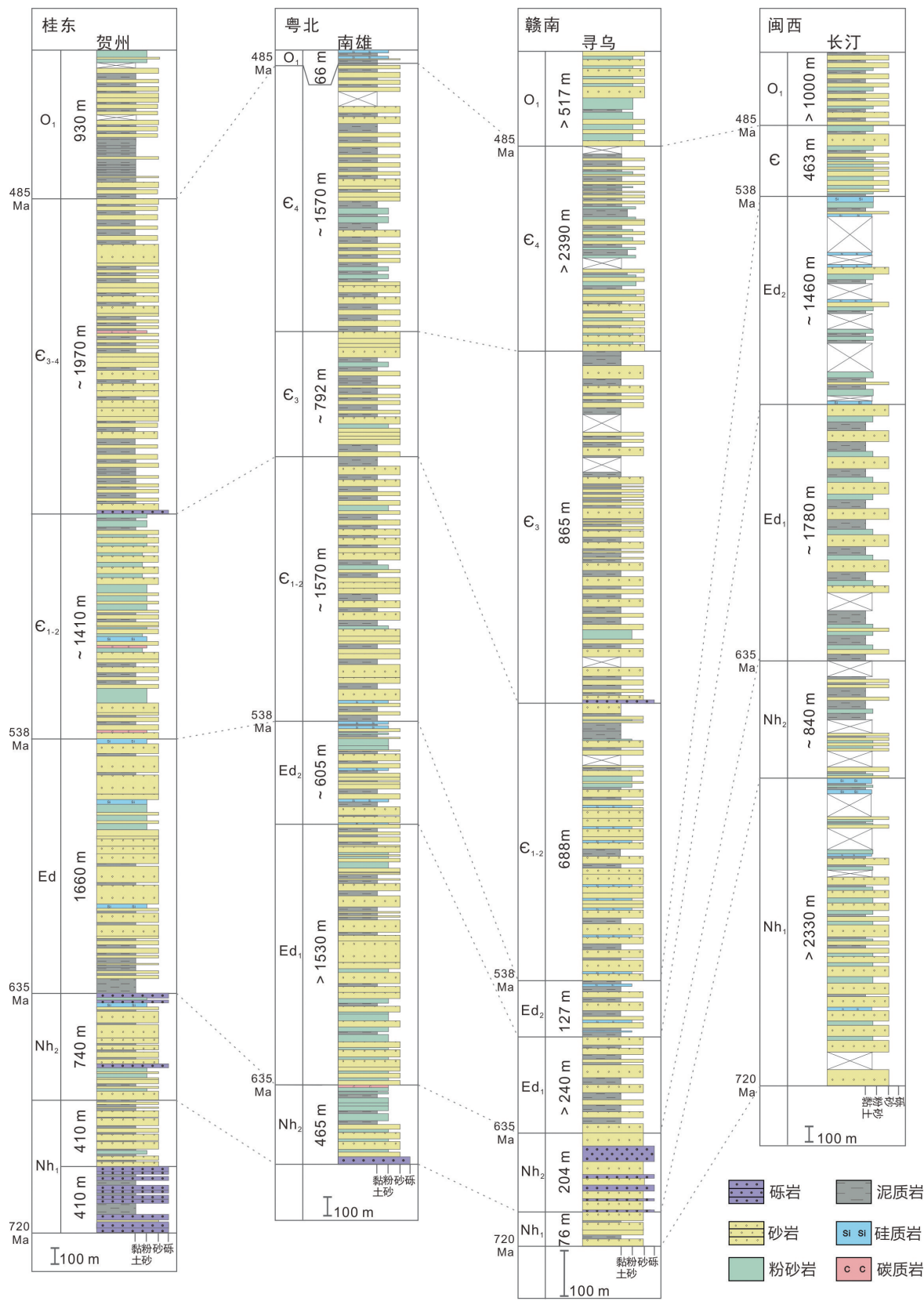


图2 华夏陆块晚新元古代-早古生代桂东、粤北、赣南、闽西盆地沉积序列柱状图

Fig. 2 Simplified lithostratigraphic columns of late Neoproterozoic and early Paleozoic successions in eastern Guangxi, northern Guangdong, southern Jiangxi and western Fujian

修改自 Xue E K et al. (2021)

沙坝黄组平行不整合于下伏上施组之上,岩性主要为发育砾质岩层的中-粗粒碎屑岩,包括砾岩、砂砾岩、含砾砂岩和变砂岩、变粉砂岩以及板岩,砾石主要成分为石英,其次为板岩,岩层发育正粒序层理。

坝里组广泛出露于赣中、赣南地区,不同区域岩性稳定但厚度变化大,整合于下伏沙坝黄组之上,主要由韵律互层的变长石石英砂岩、凝灰质砂岩、变粉砂岩、砂质板岩和千枚岩组成。

老虎塘组整合于下伏坝里组之上,岩性主要为灰色硅质岩,夹有变岩屑砂岩,凝灰质板岩和千枚岩。

牛角河组整合于下伏老虎塘组之上,岩性主要为一套互层的砂板岩,底部发育深色碳质板岩,向上为互层的碳质长石石英砂岩和碳质粉砂岩,再向上为“华山硅质岩段”,由深色薄层含碳硅质岩、含碳硅质板岩和碳质板岩组成,最上部为一套鲍马序列,主要为变长石石英砂岩、变粉砂岩、粉砂质板岩。

高滩组多数地区整合于下伏牛角河组之上,以含砾砂岩、砂砾岩或巨厚层砂岩出现为界,崇义地区二者为断层接触,底面发育槽模以及变粉砂岩、板岩中的小型交错层理和水平层理,构成鲍马序列,指示浊流沉积。高滩组岩性以厚-巨厚层长石石英砂岩为主,夹有由条带状板岩、薄层状板岩和变粉砂岩组成的韵律层。

水石组整合于下伏高滩组之上,以板岩、粉砂质板岩或含条带板岩为主,夹有变长石石英砂岩和少量变长石砂岩,下部以变砂岩夹板岩为主,上部多为板岩夹变砂岩,变砂岩发育粒序层理、平行层理,变粉砂岩可见斜层理,板岩主要见水平层理。

下黄坑组整合于下伏水石组之上,为一套绢云板岩夹变长石石英砂岩。下部为变砂岩夹板岩,上部为板岩夹变砂岩(江西省地质矿产勘查开发局,2017)。

1.2.3 粤北盆地南雄剖面

南雄地区出露的晚新元古代-早古生代沉积地层自下而上可划分为:晚成冰世活道组,埃迪卡拉纪乐昌峡群,寒武纪八村群和早奥陶世下黄坑组,其中乐昌峡群自下而上包括坝里组和老虎塘组,八村群自下而上包括牛角河组、高滩组和水石组(广东省地质调查院,2017)。

活道组岩性主要为变泥质细砂岩和变粉砂岩,夹千枚岩和石英云母片岩,底部见砂砾岩或砾岩,

砾石成分以石英为主,次圆-次棱角状,中上部夹灰岩(大理岩),顶部见灰岩或火山岩。

坝里组整合于下伏活道组之上,主要由变长石石英砂岩和变细粒石英砂岩组成,夹有板岩,自粤北、粤中到云开地区,岩石中长石含量逐渐减少,过渡为变粉砂-细砂岩为主。

老虎塘组整合于下伏坝里组之上,岩性主要为硅质岩,夹有变岩屑砂岩,凝灰质板岩和千枚岩。

牛角河组整合于下伏老虎塘组之上,岩性主要为一套互层的砂板岩,包括变砂岩、粉砂质板岩、硅质板岩和碳质板岩,夹有硅质岩、粉砂岩和凝灰质砂岩。

高滩组多数地区整合于下伏牛角河组之上,郁南一带二者为平行不整合接触,底部为含砾石英砂岩,岩性以砂岩为主,夹有黑白相间韵律式条带状板岩,凝灰质砂岩和变粉砂岩。

水石组整合于下伏高滩组之上,以条纹或条带状板岩、粉砂质板岩为主,夹有中薄层变长石石英砂岩和少量含长石石英砂岩以及凝灰质板岩。

下黄坑组整合于下伏水石组之上,岩性稳定且单一,为一套黑色页岩与碳质页岩为主的地层,由北向南粉砂质及砂质成分逐渐增多(广东省地质调查院,2017)。

1.2.4 桂东盆地贺州剖面

贺州地区出露的晚新元古代-早古生代沉积地层自下而上可划分为:成冰纪泗洲山组、天子地组、正园岭组,埃迪卡拉纪培地组,早寒武世小内冲组,中晚寒武世黄洞口组以及早奥陶世六陈组。各组之间整合接触(广西区域地质调查研究院,2016)。

泗洲山组整合于下伏下龙组之上,接触面上有厚约1 m的铁锰质层。岩性为板岩、砂质板岩夹含砾砂岩,底部为厚层状含砾不等粒岩屑砂岩。发育鲍马序列。

天子地组岩性为中厚层长石岩屑砂岩、长石石英砂岩与中薄层状绢云板岩、粉砂质泥岩互层或互为夹层,泥岩局部含少量磁铁矿。

正园岭组以厚层块状含长石岩屑砂岩为主,夹砂砾岩、含砾砂岩、中薄层泥岩、粉砂岩,底部夹一层厚约1 m砾质板岩,顶部为乳白色硅质岩及含砾板岩。发育鲍马序列。

培地组岩性为长石石英砂岩、石英砂岩、页岩

夹多层硅质岩、硅质泥岩,顶部为一层5~27 m厚的硅质岩。水平层理发育。

小内冲组岩性为互层的粒度较细的砂质岩和泥质岩,夹有变粉砂岩、碳质页岩,水平纹层发育,粒度由东北向西南变细。

黄洞口组岩性为互层的变砂岩、含砾砂岩、变粉砂岩以及页岩、粉砂质页岩,底部多数为含砾粗砂岩。粒序层理、斜层理、波状层理和水平层理发育,可见槽模和底冲刷构造,具鲍马序列,指示浊流沉积,整体上自西向东沉积物粒度变细,长石石英砂岩比例减少,碳质页岩增加。

六陈组岩性主要为互层的变细砂岩、页岩,局部夹有长石石英砂岩,变泥质细砂岩,变粉砂岩和页岩,页岩夹层较多,局部地区底部见砾岩,可见小型交错层理、波痕、水平微层理,指示浅海陆架沉积,整体上自西向东沉积物粒度变细,地层厚度增加(广西区域地质调查研究院,2016)。

2 华夏陆块区域地层与沉积构造事件对比

闽西、赣南、粤北和桂东等盆地的成冰纪-奥陶纪复理石沉积序列主要由中-细粒变石英砂岩和/或长石砂岩组成,夹有泥岩和变粉砂岩(图2)。板状交错层理、波痕和叠瓦状构造等浅水沉积构造指示稳定的半深海至浅海大陆坡环境,而非先前提出的深水环境(福建省地质调查研究院,2016;广西区域地质调查研究院,2016;江西省地质矿产勘查开发局,2017;广东省地质调查院,2017)。Yao W H and Li Z X(2016)推断华夏陆块的沉积环境于中寒武世由半深海向浅海转变。此外,沉积相和整体上北西向的古水流方向(刘宝珺和许效松,1994; Wang Y J et al., 2010; Shu L S et al., 2014)表明,华夏陆块沉积盆地由东南向西北加深(Xu Y J et al., 2013),时间不晚于中寒武世。

赣南、粤北和桂东盆地中的晚成冰世地层下部或整个序列中含有砾岩或含砾砂岩和泥岩(广西区域地质调查研究院,2016;江西省地质矿产勘查开发局,2017;广东省地质调查院,2017)。这些粗粒碎屑岩中的砾石成分复杂,包括石英岩、板岩、硅质

岩、砂岩、泥岩、花岗岩等,分选性、磨圆性差,不同于一般具有单成分砾石、分选性好、磨圆性好的远源滨海粗碎屑岩。因此这些粗碎屑岩指示华夏陆块在晚成冰世广泛发生一次相对近源的沉积事件,结合地层中发育的鲍马序列,可能形成于浊流沉积(牛志军等,2023),或者与同时期发生在扬子陆块的冰期事件产生的冰碛砾岩有关(Qi L et al., 2018)。赣南崇义地区沙坝黄组夹数层复成分砾岩,砾石分选性、磨圆性差,表面可见刻痕和压裂现象,形成于寒冷气候条件下的海洋和冰筏混合沉积;桂东正园岭组同样含有较多砾石(广西区域地质调查研究院,2016;江西省地质矿产勘查开发局,2017)。

硅质岩广泛出露于华夏陆块的晚埃迪卡拉世地层,以夹层或中薄-中厚层状产出。更古老的硅质岩仅出露于闽西盆地(图2)。硅质岩(或燧石)的出现,以及细碎屑岩,泥岩,碳质泥岩,粉砂质泥岩等岩石组合代表水深相对较大的沉积环境,指示晚埃迪卡拉世时期华夏陆块发生一次海进,盆地水体深度达到最大值(牛志军等,2017;2020)。这些硅质岩在早寒武世地层中所占比例减少,中寒武世序列中消失,意味着早-中寒武世时期的华夏陆块经历了逐渐海退的过程(福建省地质调查研究院,2016;广西区域地质调查研究院,2016;江西省地质矿产勘查开发局,2017;广东省地质调查院,2017)。

赣南、粤北、桂西盆地在中寒武统底部均可见含砾砂岩(广西区域地质调查研究院,2016;江西省地质矿产勘查开发局,2017;广东省地质调查院,2017)。闽西盆地寒武系中下段同样可见含砾砂岩,但由于地层划分方案不一致,与其他盆地中寒武世地层的对比较为困难(福建省地质调查研究院,2016)。粤西北郁南地区下寒武统与中寒武统之间呈平行不整合接触,中寒武统底部为含砾石英砂岩,向上变为细粒石英砂岩和粉砂岩(广东省地质调查院,2017)。此外,在赣南盆地出露中寒武世含砾砂岩区域的北部,早-中寒武世地层表现出由海退引起的沉积地层的东缘向西退覆,指示该时期华夏东部发生抬升(江西省地质矿产勘查开发局,2017)。同样赣西南地区的中寒武统指示海平面下降(郑宁等,2011)。在粤西古水地区,下寒武统自下而上粒度变粗,有机质含量减少,指示沉积环境由深水盆地向

碎屑陆棚过渡,而中寒武统沉积于碎屑陆棚,顶部发育指示海平面下降和浊流沉积快速充填的不等厚透镜状泥晶-微晶灰岩(吴小辉,2018)。桂东盆地中寒武世沉积岩碎屑粒度由自东向西变细改为自西向东变细,发生沉积物搬运方向的反转(广西区域地质调查研究院,2016)。桂东北兴安地区中寒武统由薄层粉砂岩、与泥岩互层的中厚层中细粒砂岩组成,自下而上粒度变粗,砂岩含量增加,层厚变厚,表现为快速堆积的海退进积型层序(贾龙龙,2016)。结合上述证据和硅质岩含量的逐渐降低,可以推断华夏陆块在中寒武世受到一次构造事件的影响。

传统观点认为华夏陆块在晚新元古代-早古生代处于构造寂静期且长期位于海平面之下,没有受到构造热事件影响(Shu L S et al., 2014)。赣南、粤北、桂东三个盆地中寒武统底部砂岩中砾石广泛出现(广西区域地质调查研究院,2016;江西省地质矿产勘查开发局,2017;广东省地质调查院,2017),指示中寒武世构造事件并非偶然的沉积变化。虽然华夏陆块中寒武统底部不整合的出露局限于陆块南部(广东省地质调查院,2017),但也可能暗示着局部区域的抬升。尽管华夏陆块大部分地区寒武系-奥陶系之间为整合接触,前人已经报道在局部地区发生有构造热事件(490~480 Ma),表现为南部沿岸地区隆升导致寒武系和奥陶系之间的局部不整合(Wang W and Zhou M F, 2013; Xu Y J et al., 2014; Yao W H and Li Z X, 2016)。因此,局部出露的不整合界面仍然可以作为构造热事件的证据。华夏陆块东部在寒武纪经历了构造热事件,如角闪岩相变质事件(Li L M et al., 2017)、深熔作用(张爱梅等, 2011)和缺少锆石记录的潜在低级变质作用(Chen C H et al., 2018)。这可能是对来自澳大利亚西部中寒武世构造事件应力远程响应的结果。该事件在澳大利亚表现为Amadeus和Officer盆地中早-中寒武世地层之间的角度不整合接触(Yao W H et al., 2018)。该中寒武世构造热事件的影响从东南向西北减弱,依次表现为澳大利亚的角度不整合、华夏南部的平行不整合、华夏中部的含砾砂岩。这种构造事件应力逐渐减弱的模式类似于冈瓦纳北部造山作用,导致寒武系和奥陶系之间从近处印度地区的角度不整合,逐渐向远处华夏南部平行不整合,再到华

夏内部整合接触的过渡(Xu Y J et al., 2014)。

3 华夏陆块沉积盆地物源演化

3.1 全岩地球化学物源分析

在沉积过程中,化学风化、矿物分选、后期交代、再循环等作用会改变沉积物的地球化学特征,使其不能反映正确的物源信息,因此需要对上述过程进行评估。通过化学成分变异指数ICV($[\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2]/\text{Al}_2\text{O}_3$,氧化物为摩尔含量)以及化学蚀变指数CIA($\text{Al}_2\text{O}_3/[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}]$,氧化物为摩尔含量, CaO^* 为扣除生物成因碳酸盐后的CaO值),可以反映再循环和化学风化作用对沉积物地球化学特征的影响(Nesbitt and Young, 1982; Wang W and Zhou M F, 2013)。在A-CN-K三角图(图3a)中,闽西和赣南盆地多数样品沿英云闪长岩和花岗闪长岩的预测风化趋势线分布,指示其源岩为中酸性岩浆岩,在沉积过程中经历的化学风化作用较弱。然而,粤北盆地多数样品沿A-K轴分布,指示成岩后钾交代作用的影响。在CIA-ICV判别图(图3b)中,多数粤北盆地样品和少量闽西和赣南盆地样品ICV值>1, CIA值高于后太古代澳大利亚页岩,指示较强的再循环和化学风化作用影响。Al、Fe、Ti、Th、Sc、Co和La等非迁移元素在沉积过程中的地球化学行为稳定,受化学风化作用影响较低,适用于反映源岩的地球化学信息,且Xue E K et al. (2021)排除了磷灰石、独居石、锆石等重矿物分选对华夏陆块成冰纪-早奥陶世沉积岩全岩微量元素的影响。因此,非迁移元素和微量元素结果可以判断源岩岩性。中寒武世前、中寒武世及其后样品,具有不同的地球化学特征(图4)。中寒武世前样品的 $100 \times \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $100 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^{(\text{T})}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值,以及Eu/Eu*和Sc/Th值较高,可能有来自元古宙安山岩的碎屑输入(图4a)。值得注意的是,中寒武世前和中寒武世及其后样品的 $100 \times \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $100 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^{(\text{T})}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Eu/Eu*, Sc/Th比值有部分重叠(图4),说明源岩中混合了元古宙花岗岩和长英质火山岩(图4b、4c、4d)。在东冈瓦纳北部(如澳大利亚西部和印度东部)报道有大量形成于格林威尔期的火山岩和正片麻岩,可以为华夏

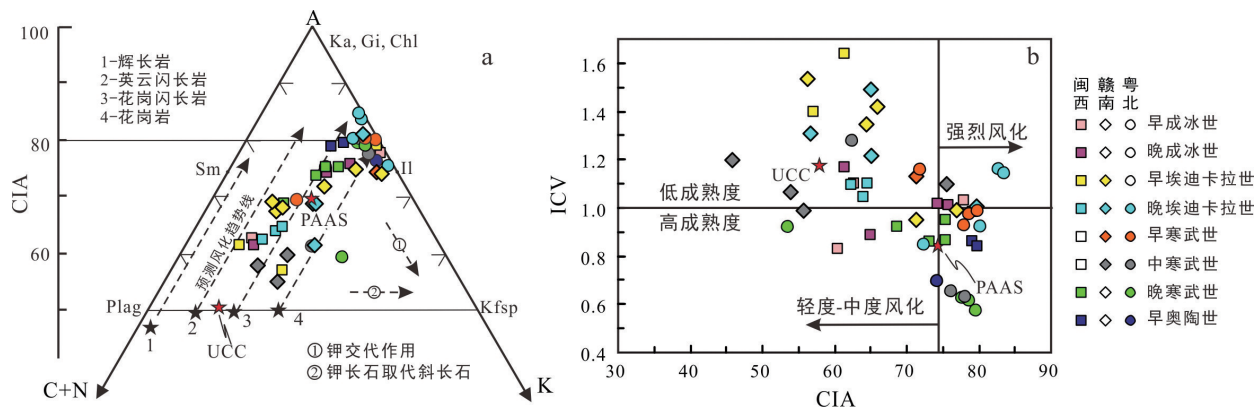


图3 闽西、赣南、粤北盆地沉积岩 A-CN-K 三角图(a)及 CIA-ICV 图(b)

Fig. 3 A-CN-K ternary diagram (in molecular proportions) (a) CIA vs. ICV (b) diagram. compositions are also shown for comparison Plag—斜长石; Sm—蒙脱石; Ka—高岭石; Gi—三水铝石; Chl—绿泥石; Il—伊利石; Kfsp—钾长石; PAAS(澳大利亚后太古代页岩)数据来自 Taylor and McLennan (1985), UCC(大陆上地壳)数据来自 Rudnick and Gao S (2014)

盆地提供充足的来自花岗岩和安山岩的碎屑物质 (Yang Z Y and Jiang S Y, 2019)。相比之下, 中寒武世及其后样品相对较低的 $100\times\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $100\times\text{Fe}_2\text{O}_3^{(\text{T})}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值表明其具有与元古宙花岗岩的亲缘性 (图 4a、4c)。高于大陆上地壳的 La/Sc、低于大陆英质岩石, 可能为花岗质源岩 (图 4b、4d)。粤北和赣南盆地中寒武世前和中寒武世及其后沉积岩地球化学特征差异明显, 而闽西盆地则差异不明显;

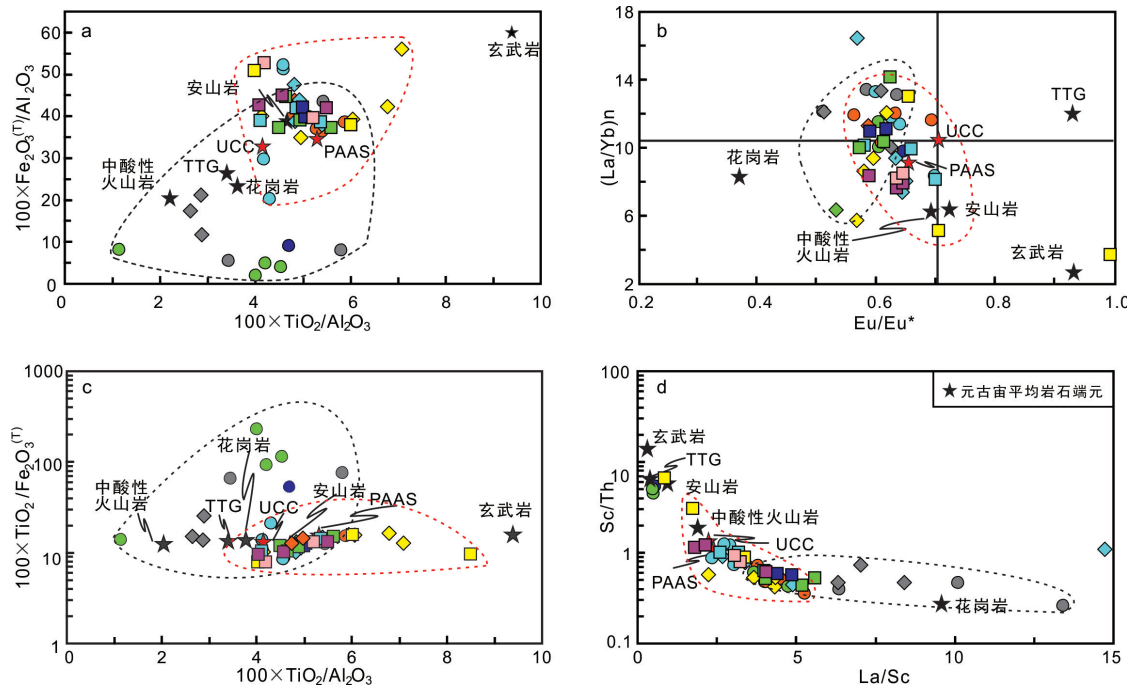


图4 闽西、赣南、粤北盆地沉积岩基于稳定元素的初始源岩判别图

Fig. 4 Immobile elements based source rock discrimination diagrams for sedimentary rocks from eastern Guangxi, northeastern Guangdong and southeastern Jiangxi

修改自 Wang W and Zhou M F (2013), Wang W et al. (2018); 样品图例与图3相同; 红色虚线表示中寒武世之前形成的沉积岩, 而黑色虚线表示中寒武世及其后形成的样品, 元古宙平均岩石端元数据来自 Condie (1993)

粤北和赣南地区中寒武世及其后样品在地球化学判别图上的分布较闽西地区更为分散,表明前者物源更为复杂(图4)。此外,在适用于碎屑岩类的多变量函数物源区环境判别分类方案(Roser and Korsch, 1988)中,大部分样品物源为富含石英质的沉积岩,而赣南盆地中寒武世样品物源以长英质火成岩为主(图5)。因此,中寒武世前沉积岩主要来自再循环沉积碎屑,初始源岩为长英质岩浆岩。而中寒武世及其后的沉积岩主要来自初始源岩为花岗岩的再循环沉积物,以及部分中酸性岩。

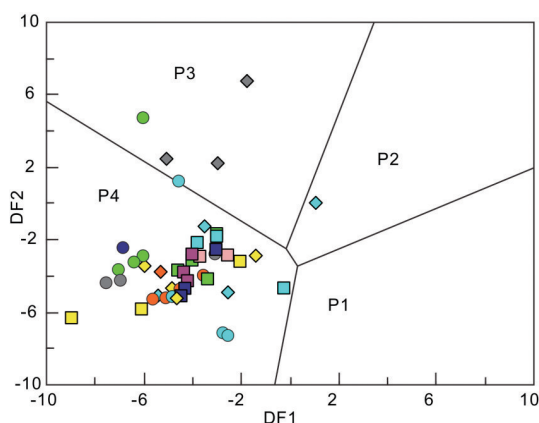


图5 基于主量元素的沉积岩源岩判别图

Fig. 5 Major element discrimination function diagram for sedimentary provenance

修改自 Roser and Korsch (1988); 样品图例与图3 相同

$DF1 = -1.773 \times TiO_2 + 0.607 \times Al_2O_3 + 0.76 \times Fe_2O_3 - 1.5 \times MgO + 0.616 \times CaO + 0.509 \times Na_2O - 1.224 \times K_2O - 9.09$; $DF2 = 0.445 \times TiO_2 + 0.07 \times Al_2O_3 - 0.25 \times Fe_2O_3 - 1.142 \times MgO + 0.438 \times CaO + 1.475 \times Na_2O + 1.426 \times K_2O - 6.861$; P1—基性岩和较少中性岩浆岩物源区,指示不成熟的大洋岛弧背景;P2—中性岩浆岩物源区,指示成熟的岛弧和不成熟的大陆边缘岩浆弧背景;P3—中酸性岩浆岩物源区,指示成熟的大陆边缘弧和大陆转换边界背景;P4—再循环石英质沉积物物源区,指示被动大陆边缘和克拉通内部背景。

3.2 碎屑锆石物源分析

3.2.1 沉积序列多物源

结合已发表的59个样品的碎屑锆石年龄数据,获得了4个盆地中来自8个不同时代地层(早-晚成冰世,早-晚埃迪卡拉世,早-中-晚寒武世,早奥陶世)的共22组碎屑锆石年龄数据(图6a、6b、6c、6d)。除去占比不明显的年龄群组,观察到三组主要年龄群组和分布模式:(1)1300~1000 Ma 主要年

龄群组和1000~900 Ma 次要群组[图6b(1)、6c(1)-(2)、6d(1)-(4)];(2)1000~900 Ma 的主要年龄群组,伴有1300~1000 Ma 和650~500 Ma 的次要年龄群组[图6a、6b(2)-(3)、6b(5)-(6)、6c(3)、6c(5)-(6)、6d(5)-(6)];(3)850~700 Ma 的主要年龄群组,伴有1000~900 Ma 的次要年龄群组[图6b(4)、6c(4)]。其中1300~1000 Ma 和1000~900 Ma 年龄群组分别与格林威尔期造山运动早期和晚期阶段有关。850~700 Ma 年龄群组与华南板块的形成以及南华裂谷事件有关。而650~500 Ma 年龄群组与泛非期造山运动有关(Xiong C et al., 2019)。群组(1)仅出现在新元古代地层中。群组(3)仅出现在赣南和粤北盆地中寒武统。群组(2)较为常见,主要出现在古生代样品中。不同样品间>1300 Ma 的碎屑锆石年龄信息的差异较大,可能是由于时间跨度较大,包含了复杂的年龄群组,在单个样品内的统计数据量相对不足所导致的。考虑到难以准确评估再循环作用的影响,本文讨论的碎屑物质源区是指原始源区(矿物结晶时的区域)而非直接源区。

3.2.2 华夏陆块外部沉积碎屑物源

综合所有年龄图谱表明,格林威尔期年龄的碎屑锆石占主导地位。尽管华夏陆块的结晶基底中存在一些1000~900 Ma 的岩浆岩,但出露很少,且部分为几乎不含锆石的基性岩(Xia Y et al., 2018)。这些岩体年龄大多为1000~900 Ma,而沉积岩中含有大量1300~1100 Ma 的锆石。因此这些岩体作为主要源区的可能性较低。此外,部分岩体位于华夏陆块的西部和西北部(Xia Y et al., 2018),而盆地的古水流方向为北西向(图6e-m、6q-s),指示物源应在东南方(现代方位)(Wang Y J et al., 2010; Shu L S et al., 2014; Xue E K et al., 2021)。同理,有观点认为扬子陆块可能是华夏陆块的源区(朱洪发等, 1990; 殷鸿福等, 1999),然而扬子陆块位于华夏陆块西北方(现代方位),1000~900 Ma 的岩体相对较少,因此作为华夏陆块该时期源区的可能性也较低(Xu Y J et al., 2013)。综上所述,华南板块少量1000~900 Ma 岩体的碎屑为盆地提供主要沉积物源的可能性较低。

近期研究表明,华夏陆块可能接收来自外部源区的格林威尔期和泛非期的碎屑,例如东冈瓦纳北

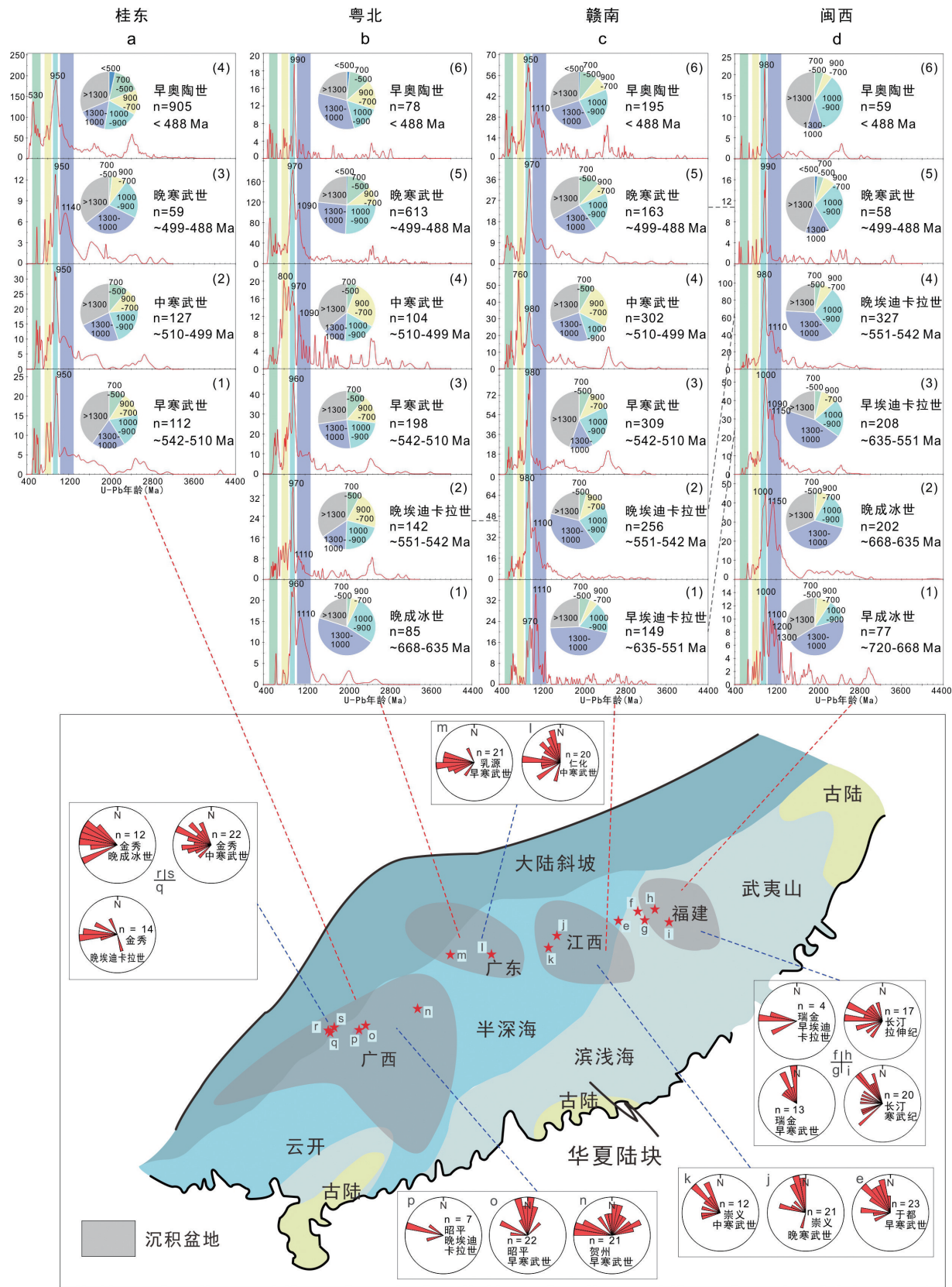


图6 华夏陆块晚新元古代-早古生代闽西、赣南、粤北、桂东盆地不同层位沉积岩碎屑锆石年龄图谱及古水流方向

Fig. 6 Detrital zircon age spectra and paleocurrent data of late Neoproterozoic-early Paleozoic successions of different sub-basins in the Cathaysia Block

锆石数据引自 Xue E K et al. (2021); 沉积相图修改自刘宝珺和许效松 (1994)

缘的澳大利亚西部、东南极洲和印度东部(Yu J H et al., 2008; Xu Y J et al., 2013; Yao W H et al., 2014; Qi L et al., 2018; Wang K X et al., 2018; Wang W et al., 2018, 2021; Xue E K et al., 2019; Yang Z Y and Jiang S Y, 2019)。1300 ~ 1000 Ma 和 1000 ~ 900 Ma 年龄的碎屑锆石在汇总的数据中最为显著。前者可能来自澳大利亚-南极洲地体,包括澳大利亚西部的 Albany-Fraser Belt-Musgrave 造山带(1300 ~ 1050 Ma)和东南极洲的 Windmill Islands-Bunger 山(1300 ~ 1050 Ma)。而后者可能来自东南极洲的 North Prince Charles 山(990 ~ 950 Ma)和印度东部的东高止山(990 ~ 950 Ma)(Fitzsimons, 2000; Boger et al., 2001; Daczko et al., 2018)。西羌塘陆块早古生代地层同样具有约 950 Ma 的年龄峰值,表明东冈瓦纳北缘的部分微陆块与华夏陆块同时接受来自印度的碎屑物质沉积(图 7a)。中元古代早期(约 1600 ~ 1400 Ma)的碎屑锆石在东南极洲晚新元古代至早古生代沉积岩中形成明显的年龄峰值(图 7d),但在华夏陆块(图 6a-d)和澳大利亚西部则数量较低(图 7e)。因此,东南极洲对华夏陆块沉积碎屑的输入量相对澳大利亚和印度较低。碎屑锆石 Hf 同位素特征同样支持该解释。华夏陆块 1300 ~ 1000 Ma 锆石中 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正、负值所占比例大致相同(图 8),与澳大利亚西部 1300 ~ 1000 Ma 锆石相似;而 1000 ~ 900 Ma 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大多为负值(图 8a、8c、8d),与特提斯喜马拉雅和东南极洲 1000 ~ 900 Ma 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 特征一致,但与澳大利亚西部的锆石明显不同。因此,1300 ~ 1000 Ma 的年龄群组更有可能来自澳大利亚西部,而不是东南极洲(Xue E K et al., 2019)。

3.2.3 华夏陆块内部沉积碎屑物源

中寒武统中大量 850 ~ 700 Ma 的沉积物可能来自华夏陆块的武夷山地区(Xue E K et al., 2019)。前人研究推测 850 ~ 700 Ma 碎屑锆石来源于印度(Yu J H et al., 2008)。然而,中新元古代年龄群组仅在印度西部新元古代至早古生代地层中占主导地位,在印度东北部则不明显(图 7a、7b、7c; Wang W et al., 2019)。相比之下,武夷山地区晚新元古代变沉积地层碎屑锆石以 850 ~ 700 Ma 年龄群组为主(图 7f)。其他证据也支持该推论:(1)武夷

山地区广泛分布有中新元古代岩浆岩(Li W X et al., 2005; Li Z X et al., 2010; Wan Y S et al., 2007; Chen C H et al., 2018; Yang Z Y and Jiang S Y, 2019);(2)中寒武统样品碎屑矿物比下伏地层粒度更粗、磨圆度更低,且 850 ~ 700 Ma 锆石磨圆度低于其他年龄锆石(Xue E K et al., 2019);(3)850 ~ 700 Ma 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值几乎全部为负值(图 8b、8c),与武夷山地区新元古代变沉积岩中 850 ~ 700 Ma 碎屑锆石一致。中寒武世沉积岩中古元古代碎屑锆石含量较低(图 6b4、6c4),这是因为古元古代基底可能被较厚的盖层所覆盖,使其难以暴露并被剥蚀成碎屑。部分古元古代岩体与其侏罗系和白垩系围岩呈断层接触,表明它们可能直到中生代方抬升至地表(Yu J H et al., 2009)。此外,古元古代岩体位于华夏陆块东北部,即盆地的东北方(图 1)。而寒武纪的古水流方向整体指向北西方向(图 6),故古元古代碎屑无法搬运到位于西南方的盆地。

3.2.4 沉积物物源时空变化特征

几乎所有年龄组均具有 1000 ~ 900 Ma 的主要年龄峰值(图 6a、6b、6c、6d),指示至少一个共同的物源。此外,所有年龄组都缺少约 2000 Ma, 700 ~ 650 Ma, 1300 Ma 以及 2500 Ma 的锆石(图 6a、6b、6c、6d),同样指示它们之间的相似性。长期北西走向的古水流方向(图 6e-m, 6s-q),也证明华夏陆块存在至少一个稳定输入的物源(Wang Y J et al., 2010; Shu L S et al., 2014; Xue E K et al., 2021),而不同区域和时代之间的年龄图谱差异可能是由其他多个物源及其输入沉积物比例的变化导致。1300 ~ 1000 Ma、1000 ~ 900 Ma、850 ~ 700 Ma 和 650 ~ 500 Ma 年龄群组与不同的构造事件和物源有关。它们的比例在上述三种不同年龄群组的分布模式(图 6a、6b、6c、6d)中也有所不同。因此,除了 1000 ~ 900 Ma 的沉积物外,其他年龄沉积物的输入具有时空上的差异。

澳大利亚西部是格林威尔期沉积物的主要来源之一,至少在成冰纪到埃迪卡拉纪如此。格林威尔早期(1300 ~ 1000 Ma)年龄群组在新元古代地层中为主要组分,随后在晚埃迪卡拉世减少,而在更年轻的地层中占比更低(图 6a、6b、6c、6d)。晚埃迪卡拉世海进形成的广泛分布的硅质岩可能与造

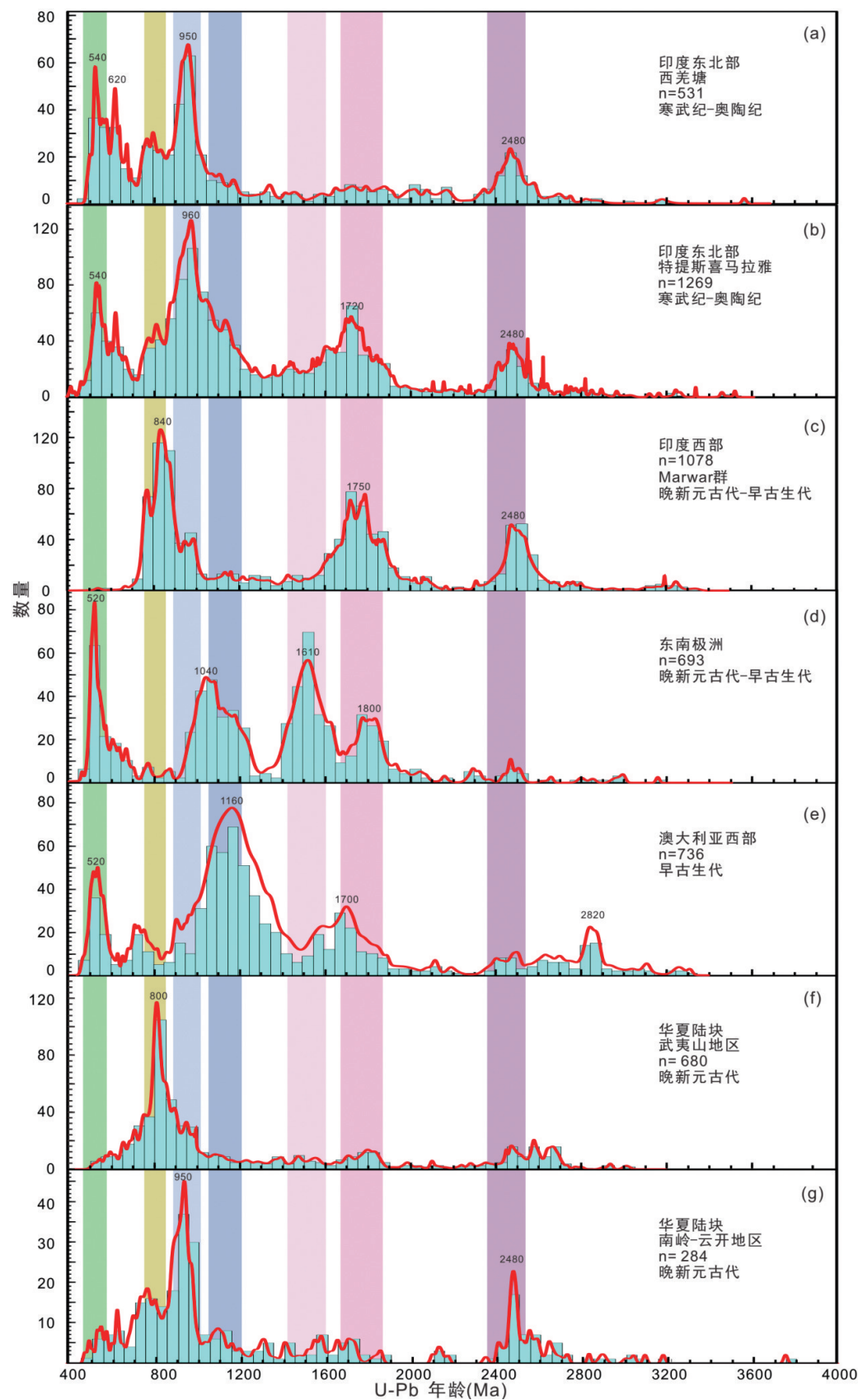
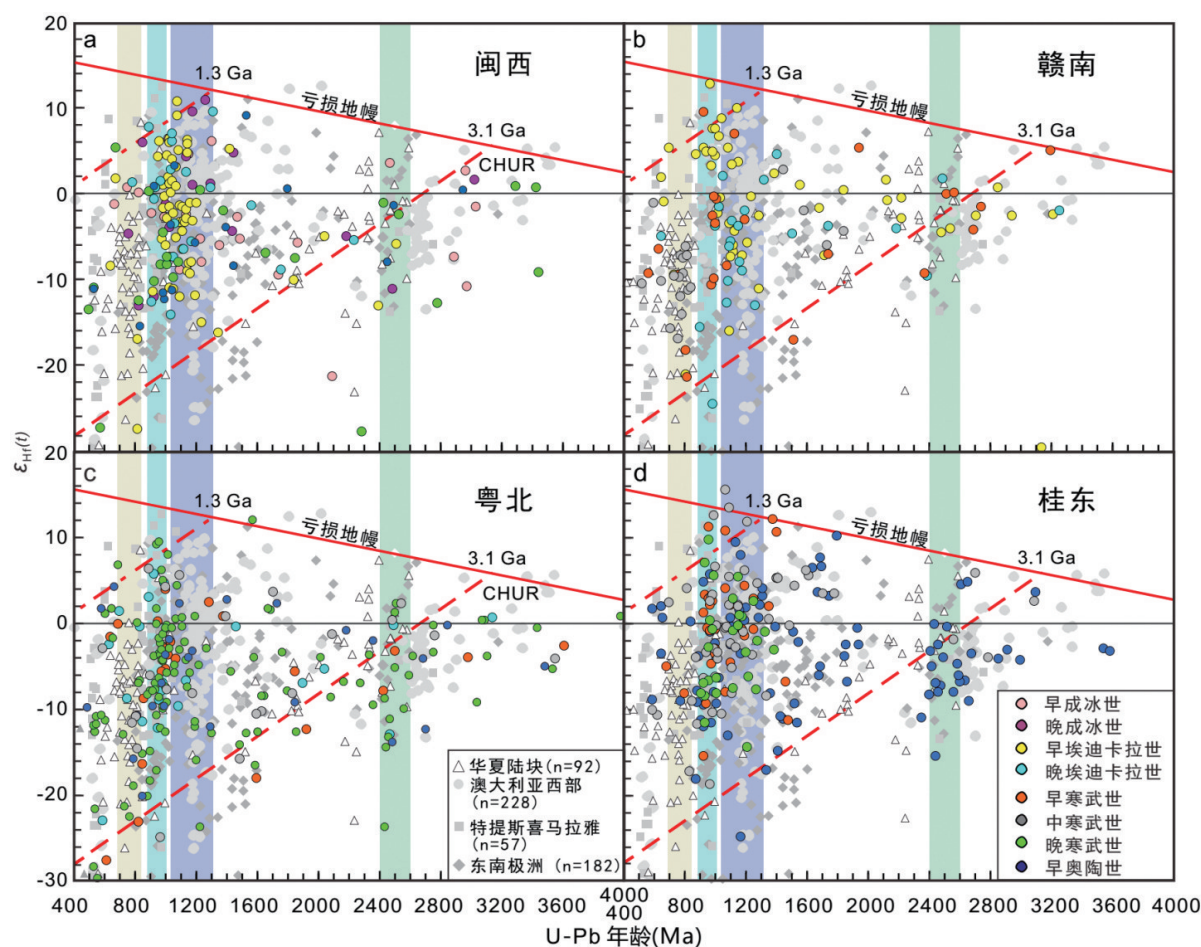


图7 源区晚新元古代-早古生代(变)沉积岩碎屑锆石年龄图谱

Fig. 7 Relative probability plots for zircon U-Pb ages from potential source terranes.

锆石数据详见 Xue E K et al.(2021)

图8 闽西、赣南、粤北、桂东盆地碎屑锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - (U-Pb)年龄图Fig. 8 The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs U-Pb ages diagram for detrital zircons from the four discussed sub-basins数据详见 [Xue E K et al. \(2021\)](#)

成物源变化的构造事件有关。华夏陆块在中寒武世为赣南和粤北两个盆地提供了850~700 Ma沉积物(图6a、6b、6c、6d)。中寒武统底部砂岩中砾石的广泛出现和平行不整合表明构造运动影响了该次物源变化。从中寒武世向西进行的海退和西北向古水流方向来看,华夏陆块东南部抬升是最合理的解释。隆升不仅阻止了部分外来格林威尔期碎屑进入盆地,也使850~700 Ma岩浆岩出露并剥蚀,为盆地提供沉积碎屑。此外,赣南和粤北盆地中寒武世地层中的格林威尔期年龄群组锆石可能来自华夏陆块内的再循环沉积物;在早寒武世之后的地层中,除闽西盆地外,1300~1000 Ma碎屑锆石重新出现并形成中等年龄峰值(图6d)。粤北盆地晚寒武世样品的格林威尔期锆石磨圆度更高,说明经历了更多的磨蚀(Xue E K et al., 2021)。此外,粤北盆

地样品在Th/Sc-Zr/Sc判别图中表现出较强的锆石富集趋势(Xue E K et al., 2021)。结合华夏陆块东南部的中寒武世隆起,早寒武世之后的沉积物再循环是由中新元古代岩石被完全剥蚀后的进一步抬升所致。泛非期碎屑锆石相对于主要年龄群组占比较低,但仍然可以辨识,其含量从晚新元古代到早古生代呈稳定上升趋势,尤其是在奥陶纪沉积岩中(图6a、6b、6c、6d)。

在闽西、赣南和粤北三个盆地的晚埃迪卡拉世地层中,1300~1000 Ma碎屑锆石比例均呈下降趋势,但从东(福建)到西(广东),其下降程度愈加明显[图6b(2)、6c(2)、6d(4)]。由此可以推断,来自澳大利亚西部的碎屑可能通过华夏陆块的东部或东南部进入盆地。中寒武世物源变化仅限于赣南和粤北盆地,而桂东盆地的地层则没有这种变化[图6a

(2)、6b(4)、6c(4)]。闽西盆地没有中寒武世地层锆石资料的记录,但寒武纪前后源岩地球化学特征差异不明显(图4)。因此,闽西和桂东两个盆地可能受到抬升的影响较弱。鉴于抬升的影响是局部性的,且沉积相分析表明华夏陆块在这段时期主要处于海平面以下(刘宝珺和许效松,1994;Shu L S et al.,2008;Yu J H et al.,2008;Wang Y J et al.,2010),以及中新元古代源岩主要分布在华夏陆块东部,故而华夏陆块抬升的部分应位于其东南部,可提供有限的850~700 Ma源岩。中寒武世后,850~700 Ma 群组锆石比例降低,可能是由于此时出露的源岩已经完全被剥蚀成碎屑。在闽西盆地寒武纪-奥陶纪地层中,再循环的1300~1000 Ma 碎屑锆石所占比例较低[图6d(5)-(6)],进一步表明闽西盆地受中寒武世抬升的影响不明显。1300~1000 Ma 沉积物自东(福建)向西(广西)减少,而650~500 Ma 组分自东向西增加,表明二者的源区和搬运水系不同(图6a、6b、6c、6d)。泛非期年龄沉积物的比例呈向西增加的趋势,可能通过华夏陆块的西南区域进入沉积盆地。因此,泛非期年龄碎屑来自澳大利亚西部的可能性较低。考虑到印度东部晚新元古代-早古生代地层中泛非期年龄碎屑锆石占显著比例(图7a、7b),而来自东南极洲的碎屑输入有限,印度东部似乎是最有可能的物源。桂东盆地寒武纪地层局部观察到东北方向的古水流方向,进一步支持了这一解释(图6n-o;陈懋弘等,2006;Xue E K et al.,2021)。与其他地区相比,桂东盆地地层泛非期年龄锆石比例明显增加(图6a),可能是局部水系随时间变化造成的。桂东盆地古水流方向的时空多样性反映了物源和局部水系,亦即华夏陆块西南部寒武纪时期古地形的复杂性。

3.3 碎屑独居石、磷灰石物源分析现状

近年来,碎屑单矿物的物源分析方法不再仅限于锆石,其他重矿物如独居石和磷灰石等的作用受到越来越多的关注(Guo R H et al.,2020)。由于锆石主要结晶于中酸性岩浆岩和高级变质岩,所提供的物源信息偏向于此类岩性,可导致继承性误差(Lancaster et al.,2016;Zoleikhaei et al.,2022)。其次,锆石中Pb的扩散封闭温度达到900℃,对低于该温度范围的热事件记录不足。此外,锆石稳定的

物理化学性质使其可以在多次沉积物再循环中保留下来,因此提供的是间接而非直接的物源信息,从而难以区分物源是再循环的沉积物还是结晶基底(Hietpas et al.,2010)。以上原因导致了碎屑锆石在物源分析中存在一定的多解性。而其他重矿物(如独居石和磷灰石等)源岩岩性更加广泛,Pb的扩散封闭温度更低,且不易在再循环中保留,因此可以弥补锆石带来的偏差(Chew et al.,2020)。Xu Y J et al.(2022)对广西寒武系进行了碎屑独居石物源分析,通过对比独居石年龄和微量元素特征,指出华夏陆块接受来自印度东北部寒武纪初期变泥质岩的碎屑物质;独居石的主要年龄峰值与锆石相似,为格林威尔期年龄峰值,同时表现出次要的泛非期年龄峰值,比例高于锆石。值得注意的是,该套碎屑独居石数据均来自早寒武世地层,因此未能反映连续的物源演化过程。

对闽西盆地长汀剖面的碎屑磷灰石物源分析表明,碎屑磷灰石年龄数据中可识别出四个特征年龄群组:主要的泛非期年龄(650~500 Ma)、次要的南华裂谷年龄(850~700 Ma)、格林威尔早期(1300~1000 Ma)和晚期(1000~900 Ma)年龄(Xue E K et al.,2023,2024b)。华夏陆块缺少650~500 Ma和1300~900 Ma 岩浆岩和变质岩,充分证明了泛非期年龄和格林威尔期年龄的碎屑来自外部源区,表明华夏陆块具有明显的冈瓦纳亲缘性(Xue E K et al.,2023)。泛非期年龄源岩分布在澳大利亚西部和印度,包括澳大利亚西部的Patterson-Petermann造山带(680~530 Ma)和Pinjarra造山带(560~520 Ma),印度的东非造山带(650~550 Ma)和这两个地体之间的Kuunga造山带(640~490 Ma)。一些格林威尔期造山带(如East Ghats)经历了泛非时期的变质改造(Axelsson et al.,2020),也可能形成并为华夏盆地提供泛非期年龄磷灰石。此外,伊朗-土耳其地块被认为是华南板块泛非期年龄碎屑的源区(Chen Q et al.,2021)。然而,在华夏陆块埃迪卡拉纪-早奥陶世样品中,最年轻的磷灰石主要年龄峰值晚于600 Ma(Xue E K et al.,2023),而来自伊朗寒武系Lalun组的碎屑磷灰石形成了650~620 Ma的单一年龄峰值(Zoleikhaei et al.,2022)。微量元素组成表明,华夏陆块寒武系和

奥陶系中泛非期年龄磷灰石的源岩主要为高级变质岩(42%~56%),中低级变质岩比例较低(12%)(Xue E K et al., 2023)。相反,伊朗Lalun组磷灰石源岩主要为中低级变质岩(33%~61%),高级变质岩比例较低(12%~13%)(Zoleikhaei et al., 2022)。因此,碎屑磷灰石数据证明晚新元古代-早古生代华南板块与伊朗-土耳其地块之间的亲缘性较弱。综合碎屑磷灰石年龄和微量元素组成特征,可以观察到物源随时间的三次重要变化,分别发生于晚成冰世,晚埃迪卡拉世至寒武纪,以及早奥陶世,在时间上可以与华夏陆块晚成冰世近源沉积事件和晚埃迪卡拉世海进对应,同时反映了源区泛非期造山带的抬升和剥蚀,补充了锆石所不能反映的物源信息并避免了再循环的影响(Xue E K et al., 2023)。

4 华夏陆块在冈瓦纳大陆中的演化与重建

针对华南板块晚新元古代-早古生代的古地磁研究主要集中于扬子陆块,华夏陆块的研究相对较少(Yang Z Y et al., 2004; Zhang S H et al., 2015)。如果扬子和华夏陆块在晚新元古代之前形成统一的华南板块,那么它们的古地理位置应具有-致性。较早的古地磁分析揭示750~380 Ma时期华南板块与澳大利亚存在长期联系(Yang Z Y et al., 2004; Li Z X et al., 2008)。此外,对扬子陆块陡山沱组的古地磁研究表明,华南板块在埃迪卡拉纪为独立板块,毗邻印度北部(560 Ma),之后在埃迪卡拉纪末期-早寒武世(560~505 Ma)逐步靠近澳大利亚西北部(Zhang S H et al., 2015)。最新的研究则表明,华南板块在900~750 Ma左右与印度的亲缘性较强,与澳大利亚相距较远(Jing X Q et al., 2020; Chang L X et al., 2022)。上述研究表明华南板块的古地理位置位于东冈瓦纳中澳大利亚和印度附近,但仍然存在一定分歧。而关于华夏陆块的冈瓦纳亲缘性缺少直接的岩石学证据,目前仅有关于533 Ma左右的角闪岩相变质记录和523~518 Ma的变斜长花岗岩(Li L M et al., 2017, 2021)记录。大量格林威尔期碎屑锆石和泛非期碎屑磷灰石指示,东冈瓦

纳北缘陆块长期为华夏陆块提供沉积碎屑,而非劳伦古陆。上述结果可以确定华夏陆块的古地理位置位于澳大利亚西部和印度北部交界处,毗邻东南极洲而非伊朗-土耳其地块(图9)。来自印度北部的长期沉积物输入表明印度与华夏陆块之间存在着持久的联系。

自早成冰世开始,华夏陆块沉积盆地的物源以印度和澳大利亚地壳浅部经历了泛非期变质改造的格林威尔期岩体为主。由于深度较浅,变质作用的条件不足以重置锆石的格林威尔期年龄,而新生成泛非期年龄锆石的岩体处于较深位置,尚未出露到地表成为物源。因此,锆石以格林威尔期年龄群组为主(图9a),可能包括沉积岩(物)中的再循环碎屑。晚成冰世时期,澳大利亚西部的Paterson-Petermann造山带(680~530 Ma)开始隆起,受其远程效应的影响,华夏陆块出现近源沉积事件。

在晚埃迪卡拉世,随着Pinjarra造山运动(550~520 Ma)的进行,自澳大利亚输入的格林威尔早期锆石比例减少,可能是由于Pinjarra造山带隆起,以及Kuunga造山运动的早期阶段(开始于约640~635 Ma)限制了1300~1000 Ma碎屑进入华夏陆块(图9b)。印度成为华夏陆块的单一主要物源区,并逐渐开始输入泛非期锆石(图9b)。与此同时,华夏陆块发生了广泛的海进事件。

中寒武世期间,华夏陆块东南部发生局部抬升,导致其内部850~700 Ma的岩体出露并为盆地提供部分碎屑物质(图9c)。类似的早-中寒武世物源变化同样发生于华夏-扬子界线(王鹏鸣等, 2013),以及扬子、华夏和印支交界处附近的盆地中(Zhou X Y et al., 2018),指示沉积物源区由扬子变为华夏陆块,与中寒武世华夏陆块抬升的推测吻合。考虑到华夏陆块缺少相应的岩浆和变质记录,该抬升事件可能是对外部造山运动远程应力的响应,如Kuunga运动的晚期阶段(530~480 Ma),指示冈瓦纳大陆聚合最终阶段的开始。古地磁数据表明,华南板块与澳大利亚的古纬度位置在早-中寒武世同时发生了明显变化(Yang Z Y et al., 2004),表明它们可能经历了重要的构造运动事件,而非之前推测的构造寂静期。值得注意的是,在印度东北部和东南极洲的沉积地层中同样报道有与华夏陆块

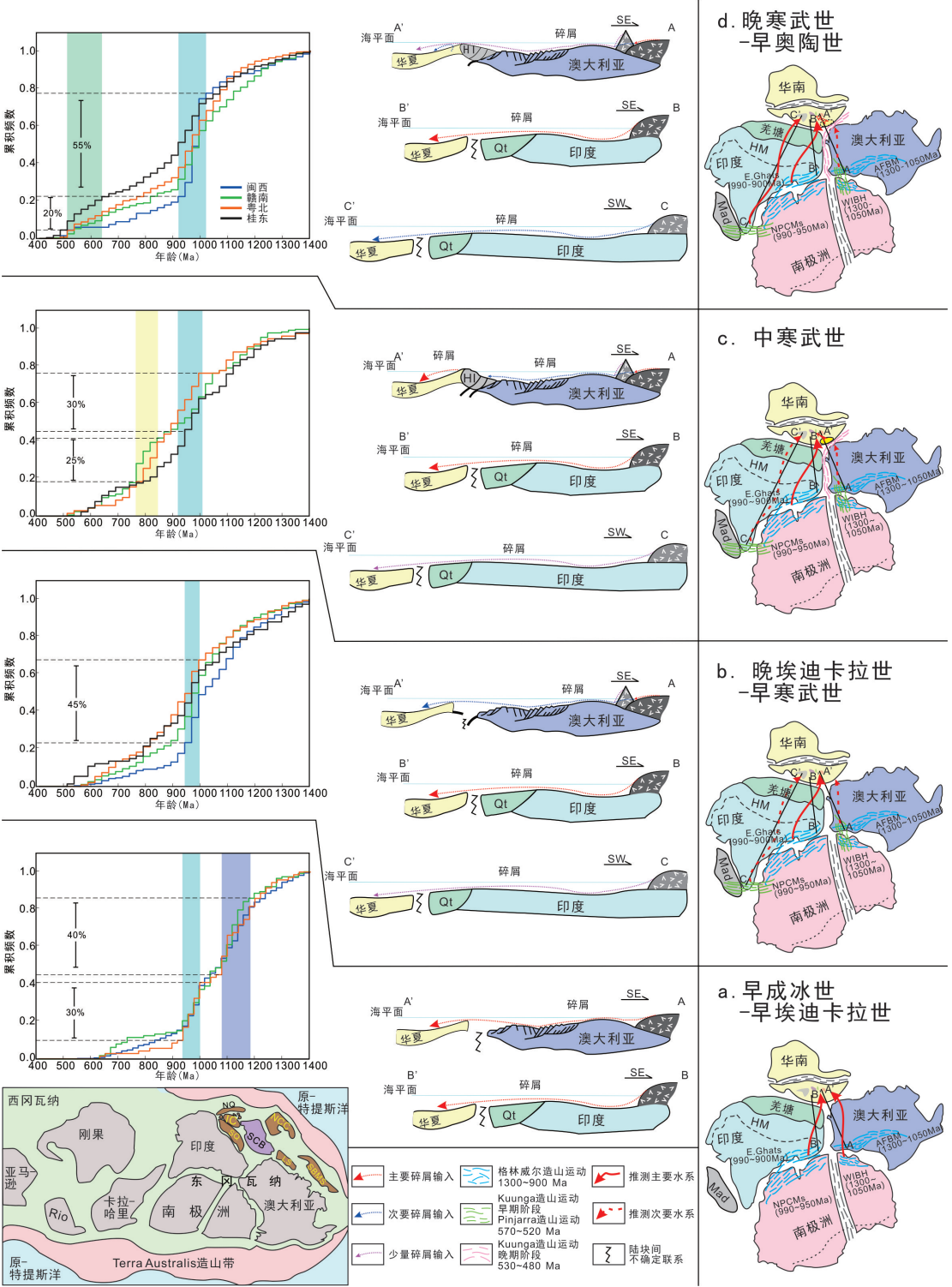


图9 晚新元古代-早古生代华南板块相对于澳大利亚西部、东南极洲和印度东部的古地理位置、物源输入和构造演化示意图

Fig. 9 Simplified temporal and spatial evolution models showing Neoproterozoic to Paleozoic paleoposition and tectonics of the South China Block

剖面未根据实际比例尺;左侧为闽西、赣南、粤北和桂东盆地沉积岩1400~400 Ma碎屑锆石年龄累积曲线,指示沉积物中不同年龄群组的时空变化,百分数代表重要年龄群组所占比例;左下角为华南板块位于冈瓦纳大陆中的大致位置(修改自Xue E K et al., 2021).

地块缩写:SCB-华南;NCC-华北;LS-拉萨;SBMS-滇缅马苏;Qt-羌塘;NQ-北羌塘;SQ-南羌塘;IC-印支;HI-海南;HM-喜马拉雅;Mad-马达加斯加;E. Ghats-东高止山;NPCMs-Northern Prince Charles山;WIBH-Windmill Islands/Bunger山;AFBM-Albany Fraser Belt/Musgrave造山带

类似的中-晚寒武世物源变化,碎屑锆石主要年龄峰值由格林威尔期年龄变为更年轻的年龄,证明了Kuunga运动晚期阶段对东冈瓦纳沉积物搬运水系的广泛影响(Goodge et al., 2004; Myrow et al., 2010)。

晚寒武世-早奥陶世期间,华夏陆块与源区同时抬升(图9d)。更多的古老基底出露并接受剥蚀,碎屑锆石中早于1300 Ma的群组增加。华夏陆块的隆升也导致了中寒武世之前沉积序列的部分再循环,锆石磨圆度上升。此外,形成于较深位置的泛非期岩浆岩和高级变质岩在隆升中出露,泛非期年龄的碎屑锆石含量明显增加,在桂东盆地中变化最为显著(图9d)。来自印度东部的沉积物通过东北流向的水系进入华夏陆块,与来自澳大利亚的格林威尔早期年龄碎屑明显不同(图9d)。

5 结论

(1)华夏陆块晚新元古代-早古生代地层记录了三次广泛的沉积-构造事件:(a)沉积盆地发育的晚成冰世砾岩指示近源沉积事件;(b)晚埃迪卡拉世硅质岩指示海进事件;(c)中寒武世地层平行不整合、砂岩中砾石的广泛出现指示构造抬升事件,该沉积-构造事件是对外部陆块构造应力的远程响应,表明该时期华夏陆块并非完全处于构造寂静期。

(2)华夏陆块晚新元古代-早古生代沉积岩中含有大量格林威尔早期(1300~1000 Ma)和晚期(1000~900 Ma)的锆石,分别主要来自澳大利亚和印度的格林威尔期造山带。印度东部为华夏陆块内的盆地长期提供物质补给,而澳大利亚西部在晚埃迪卡拉世从主要源区变为次要源区。中寒武世华夏陆块抬升使内部850~700 Ma岩浆岩出露成为主要物源之一。650~500 Ma碎屑锆石占比较低,主要来自印度的泛非期造山带。沉积岩中大量650~500 Ma的碎屑磷灰石主要来自泛非期变质岩,记录了三期物源变化,反映源区造山带抬升过程中新基岩的出露与剥蚀。

(3)综合的沉积物源信息表明,华夏陆块在晚新元古代-早古生代位于东冈瓦纳北缘,与印度、澳

大利亚具有长期稳定的联系,毗邻东南极洲,与劳伦、伊朗-土耳其亲缘性较弱。在冈瓦纳大陆聚合过程中,印度和澳大利亚泛非期造山带的形成、抬升和剥蚀影响了华夏陆块沉积盆地的物源变化,并使华夏陆块在中寒武世发生局部抬升。

致谢:本文涉及的课题研究过程中得到诸多老师和同行的建议和意见,成文过程中田洋正高级工程师、黄思访和孙力博士提出了详细并富有建设性的修改意见,在此一并致谢。感谢牛志军副主编和两位审稿专家对本文提出的宝贵意见和建议。

参考文献:

- 陈懋弘,梁金城,张桂林,李文杰,潘罗忠,李容森.2006.加里东期扬子板块与华夏板块西南段分界线的岩相古地理制约[J].高校地质学报,12(1):111-122.
- 福建省地质调查研究院.2016.中国区域地质志·福建志[M].北京:地质出版社.
- 广东省地质调查院.2017.中国区域地质志·广东志(送审稿)[R].
- 广西区域地质调查研究院.2016.中国区域地质志·广西志(送审稿)[R].
- 贾龙龙.2016.华南南部早古生代碎屑岩系原型盆地及构造古地理演化[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 江西省地质矿产勘查开发局.2017.中国区域地质志·江西志[M].北京:地质出版社.
- 刘宝珺,许效松.1994.中国南方岩相古地理图集(震旦纪-三叠纪)[M].北京:科学出版社.
- 刘晓春,胡娟,陈龙耀,陈意,王伟,夏蒙蒙,韩建恩,胡道功.2021.海南壳型高温榴辉岩:基本特征及待解问题[J].岩石学报,37(1):143-161.
- 龙文国,周岱,柯贤忠,王晶,吴俊,张建钰,王磊,王祥东,徐德明.2022.海南岛早古生代大地构造格局:来自志留纪早期碎屑锆石年代学的约束[J].华南地质,38(1):79-93.
- 龙文国,王晶,谭满堂,王磊,王祥东,吴俊,李岩.2023.海南地块形成与拼合时限:来自早石炭世变质粉细砂岩中碎屑锆石年代学的约束[J].华南地质,39(2):259-277.
- 牛志军,杨文强,宋芳,何奎砚,刘浩.2017.南岭成矿带早古生代地层区划与岩石地层的厘定[J].地层学杂志,41(3):256-265.
- 牛志军,杨文强,何奎砚,田洋.2020.湘桂地区新元古代地层序列物源分析构造演化[M].北京:科学出版社.

- 牛志军,宋芳,何垚砚,安志辉,田洋,刘浩,杨文强.2023.中南地区南华纪地层序列及对重大地质事件的响应[J].华南地质,39(2):173-185.
- 农军年,郭尚宇,孙明行,李昌明,石伟民,覃初礼.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.
- 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.
- 覃小锋,潘元明,李江,李容森,周府生,胡贵昂,钟锋运.2006.桂东南云开地区变质杂岩锆石 SHRIMP-U-Pb 年代学[J].地质通报,25(5):553-559.
- 王鹏鸣,于津海,孙涛,时毓,陈培荣,赵葵东,陈卫峰,刘潜.2013.湘桂震旦-寒武纪沉积岩组成的变化——对华南构造演化的指示[J].中国科学:地球科学,43(11):1893-1903+附录 1-7.
- 魏震洋,于津海,王丽娟,舒良树.2009.南岭地区新元古代变质沉积岩的地球化学特征及构造意义[J].地球化学,38(1):1-19.
- 吴小辉.2018.粤西古水地区寒武纪地层研究[J].地层学杂志,42(1):27-38.
- 邢光福,杨祝良,陈志洪,姜杨,洪文涛,靳国栋,余明刚,赵希林,段政.2015.华夏地块龙泉地区发现亚洲最古老的锆石[J].地球学报,36(4):395-402.
- 殷鸿福,吴顺宝,杜远生,彭元桥.1999.华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J].地球科学,24(1):1-12.
- 于津海,魏震洋,王丽娟,舒良树,孙涛.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,张菲菲,张玉芝.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.
- 张开毕,陈金良,林亨才,黄昌旗,罗志兴.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.
- 张雄,曾佐勋,刘伟,潘黎黎,杨宝忠,刘建雄,魏运许,贺赤诚,李绍凡.2016.湘南—桂东北地区寒武—奥陶纪沉积岩碎屑锆石 U-Pb 年代学特征及其地质意义[J].中国地质,43(1):153-173.
- 郑宁,李廷栋,耿树方,宋志瑞,阎丽艳.2011.赣西南地区寒武纪沉积构造环境分析[J].中国地质,38(6):1454-1466.
- 朱洪发,张渝昌,秦德余,周浩达.1990.论浙皖赣闽地区早古生代盆地沉积特征及其构造环境[J].石油实验地质,12(2):121-134.
- Axelsson E, Mezger K, Ewing T. 2020. The Kuunga Orogeny in the Eastern Ghats Belt: Evidence from geochronology of biotite, amphibole and rutile, and implications for the assembly of Gondwana[J]. Precambrian Research, 347: 105805.
- Boger S D, Wilson C J L, Fanning C M. 2001. Early Paleozoic tectonism within the East Antarctic craton: The final suture between east and west Gondwana?[J]. Geology, 29(5): 463-466.
- Cawood P A, Zhao G C, Yao J L, Wang W, Xu Y J, Wang Y J. 2017. Reconstructing South China in Phanerozoic and Precambrian supercontinents[J]. Earth-Science Reviews, 186: 173-194.
- Chang L X, Zhang S H, Li H Y, Xian H B, Wu H C, Yang T S. 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.
- Chen C H, Lee C Y, Liu Y H, Xiang H, Zeng W, Zhou H W. 2018. Precambrian protoliths and Phanerozoic overprinting on the Wuyishan terrain (South China): New evidence from a combination of LA-ICPMS zircon and EMP monazite geochronology[J]. Precambrian Research, 307: 229-254.
- Chen Q, Zhao G C, Sun M. 2021. Protracted northward drifting of South China during the assembly of Gondwana: Constraints from the spatial-temporal provenance comparison of Neoproterozoic–Cambrian strata[J]. Geological Society of America Bulletin, 133(9-10): 1947-1963.
- Chew D, O' Sullivan G, Caracciolo L, Mark C, Tyrrell S. 2020. Sourcing the sand: Accessory mineral fertility, analytical and other biases in detrital U-Pb provenance analysis[J]. Earth-Science Reviews, 202: 103093.
- Condie K C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales[J]. Chemical Geology, 104(1-4): 1-37.
- Daczko N R, Halpin J A, Fitzsimons I C W, Whittaker J M. 2018. A cryptic Gondwana-forming orogen located in Antarctica[J]. Scientific Reports, 8(1): 8371.
- Fitzsimons I C W. 2000. Grenville-age basement provinces in East Antarctica: Evidence for three separate collisional orogens[J]. Geology, 28(10): 879-882.
- Goodge J W, Williams I S, Myrow P. 2004. Provenance of Neoproterozoic and lower Paleozoic siliciclastic rocks of the central Ross orogen, Antarctica: Detrital record of

- rift-, passive-, and active-margin sedimentation[J]. Geological Society of America Bulletin, 116(9-10): 1253-1279.
- Guo R H, Hu X M, Garzanti E, Lai W, Yan B, Mark C. 2020. How faithfully do the geochronological and geochemical signatures of detrital zircon, titanite, rutile and monazite record magmatic and metamorphic events? A case study from the Himalaya and Tibet[J]. Earth-Science Reviews, 201: 103082.
- Hietpas J, Samson S, Moecher D, Schmitt A K. 2010. Recovering tectonic events from the sedimentary record: Detrital monazite plays in high fidelity[J]. Geology, 38(2): 167-170.
- Jing X Q, Yang Z Y, Evans D A D, Tong Y B, Xu Y C, Wang H. 2020. A pan-latitudinal Rodinia in the Tonian true polar wander frame[J]. Earth and Planetary Science Letters, 530: 115880.
- Lancaster P J, Daly J S, Storey C D, Morton A C. 2016. Interrogating the provenance of large river systems: multi-proxy in situ analyses in the Millstone Grit, Yorkshire[J]. Journal of the Geological Society, 174(1): 75-87.
- Li L M, Lin S F, Xing G F, Jiang Y, He J. 2017. First Direct Evidence of Pan-African Orogeny Associated with Gondwana Assembly in the Cathaysia Block of Southern China[J]. Scientific Reports, 7(1): 794.
- Li L M, Lin S F, Xing G F, Davis D W, Davis W J, Xiao W J, Yin C Q. 2013. Geochemistry and tectonic implications of late Mesoproterozoic alkaline bimodal volcanic rocks from the Tieshajie Group in the southeastern Yangtze Block, South China[J]. Precambrian Research, 230: 179-192.
- Li L M, Lin S F, Xing G F, Xiao F, Xiao W J. 2021. Identification of ca. 520 Ma mid-ocean-ridge-type ophiolite suite in the inner Cathaysia block, South China: Evidence from shearing-type oceanic plagiogranite[J]. Geological Society of America Bulletin, 134(7-8): 1701-1720.
- Li W X, Li X H, Li Z X. 2005. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance[J]. Precambrian Research, 136(1): 51-66.
- Li Z X, Li X H, Li W X, Ding S J. 2008. Was Cathaysia part of Proterozoic Laurentia? - new data from Hainan Island, south China[J]. Terra Nova, 20(2): 154-164.
- Li Z X, Li X H, Wartho J A, Clark C, Li W X, Zhang C L, Bao C. 2010. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions[J]. Geological Society of America Bulletin, 122(5-6): 772-793.
- Lu Y Y, Cao J Y, Fu J M, Liu L, Wu Q H, Yang X Y, Yang S X, Cheng S B, Qiu X F., He D. 2022. Discovery of a Hadean xenocrystic zircon in the Cathaysia Block[J]. Science Bulletin, 67(23): 2416-2419.
- Myrow P M, Hughes N C, Goodge J W, Fanning C M, Williams I S, Peng S, Bhargava O N, Parcha S K, Pogue K R. 2010. Extraordinary transport and mixing of sediment across Himalayan central Gondwana during the Cambrian-Ordovician[J]. Geological Society of America Bulletin, 122(9-10): 1660-1670.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 299(5885): 715-717.
- Qi L, Xu Y J, Cawood P A, Du Y S. 2018. Reconstructing Cryogenian to Ediacaran successions and paleogeography of the South China Block[J]. Precambrian Research, 314: 452-467.
- Roser B P, Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data[J]. Chemical Geology, 67(1): 119-139.
- Rudnick R L, Gao S. 2014. Composition of the Continental Crust[M]. Treatise on Geochemistry (Second Edition), 4: 1-51.
- Shu L S, Deng P, Yu J H, Wang Y B, Jiang S Y. 2008. The age and tectonic environment of the rhyolitic rocks on the western side of Wuyi Mountain, South China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(8): 1053-1063.
- Shu L S, Jahn B M, Charvet J, Santosh M, Wang B, Xu X S, Jiang S Y. 2014. Early Paleozoic depositional environment and intraplate tectono-magmatism in the Cathaysia Block (South China): Evidence from stratigraphic, structural, geochemical and geochronological investigations[J]. American Journal of Science, 314(1): 154-186.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution, an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. Blackwell Scientific Publication.
- Wan Y S, Liu D Y, Wilde S A, Cao J J, Chen B, Dong C Y, Song B, Du L L. 2010. Evolution of the Yunkai Terrane, South China: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd isotope[J]. Journal of Asian

- Earth Sciences, 37(2): 140-153.
- Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, Zhuang J M, Song B, Shi Y R, Du L L. 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 K X, Sun L Q, Sun T, Huang H, Qin L S. 2018. Provenance, weathering conditions, and tectonic evolution history of the Cambrian meta-sediments in the Zhuguangshan area, Cathaysia Block [J]. *Precambrian Research*, 311: 195-210.
- Wang L J, Lin S F, Xiao W J. 2023. Yangtze and Cathaysia blocks of South China: Their separate positions in Gondwana until early Paleozoic juxtaposition[J]. *Geology*, 51(8): 723-727.
- Wang W, Cawood P, Pandit M, Zhao J H, Zheng J P. 2019. No collision between Eastern and Western Gondwana at their northern extent[J]. *Geology*, 47(4): 308-312.
- Wang W, Zeng M F, Zhou M F, Zhao J H, Zheng J P, Lan Z F. 2018. Age, provenance and tectonic setting of Neoproterozoic to early Paleozoic sequences in southeastern South China Block: Constraints on its linkage to western Australia-East Antarctica[J]. *Precambrian Research*, 309: 290-308.
- Wang W, Zhou M F. 2013. Petrological and Geochemical Constraints On Provenance, Paleoweathering, and Tectonic Setting of the Neoproterozoic Sedimentary Basin In the Eastern Jiangnan Orogen, South China[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 83(11): 974-993.
- Wang W, Cawood P A, Pandit M K, Xia X P, Raveggi M, Zhao J H, Zheng J P, Qi L. 2021. Fragmentation of South China from greater India during the Rodinia-Gondwana transition[J]. *Geology*, 49(2): 228-232.
- Wang Y J, Zhang F F, Fan W M, Zhang G W, Chen S Y, Cawood P A, Zhang A M. 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): TC6020.
- Wu L, Jia D, Li H B, Deng F E I, Li Y Q. 2010. Provenance of detrital zircons from the late Neoproterozoic to Ordovician sandstones of South China: implications for its continental affinity[J]. *Geological Magazine*, 147(6): 974-980.
- Xia Y, Xu X S, Niu Y L, Liu L. 2018. Neoproterozoic amalgamation between Yangtze and Cathaysia blocks: The magmatism in various tectonic settings and continent-arc-continent collision[J]. *Precambrian Research*, 309: 56-87.
- Xiang H, Zhang L, Zhou H W, Zhong Z Q, Zeng W, Liu R, Jin S. 2008. U-Pb zircon geochronology and Hf isotope study of metamorphosed basic-ultrabasic rocks from metamorphic basement in southwestern Zhejiang: The response of the Cathaysia Block to Indosinian orogenic event[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(6): 788-800.
- Xiong C, Niu Y L, Chen H D, Chen A Q, Zhang C G, Li F, Yang S, Xu S L. 2019. Detrital zircon U-Pb geochronology and geochemistry of late Neoproterozoic-early Cambrian sedimentary rocks in the Cathaysia Block: Constraint on its palaeo-position in Gondwana supercontinent[J]. *Geological Magazine*, 156(9): 1587-1604.
- Xu Y J, Cawood P A, Du Y S, Hu L S, Yu W C, Zhu Y H, Li W C. 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 Y J, Cawood P A, Du Y S, Zhong Z Q, Hughes N C. 2014. Terminal suturing of Gondwana along the southern margin of South China Craton: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopes in Cambrian and Ordovician strata, Hainan Island[J]. *Tectonics*, 33(12): 2490-2504.
- Xu Y J, Cawood P A, Zhang H C, Zi J W, Zhou J B, Li L X, Du Y S. 2019. The Mesoproterozoic Baoban Complex, South China: A missing fragment of western Laurentian lithosphere[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 132(7-8): 1404-1418.
- Xu Y J, Liang X, Cawood P A, Zi J W, Zhang H C, Liu J, Du Y S. 2022. Revisiting the paleogeographic position of South China in Gondwana by geochemistry and U-Pb ages of detrital monazite grains from Cambrian sedimentary rocks[J]. *Lithos*, 430-431: 106879.
- Xue E K, Wang W, Huang S F, Lu G M. 2019. Detrital zircon U-Pb-Hf isotopes and whole-rock geochemistry of Neoproterozoic-Cambrian successions in the Cathaysia Block of South China: Implications on paleogeographic reconstruction in supercontinent[J]. *Precambrian Research*, 331: 105348.
- Xue E K, Wang W, Zhou M F, Pandit M K, Huang S F, Lu G

- M. 2021. Late Neoproterozoic – early Paleozoic basin evolution in the Cathaysia Block, South China: Implications of spatio-temporal provenance changes on the paleogeographic reconstructions in supercontinent cycles[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 133(3-4): 717-739.
- Xue E K, Chew D, Drakou F, Wang W. 2023. Paleogeographical reconstruction of the South China Block during Gondwana assembly using detrital apatite: Pan-African source affinity concealed by detrital zircon[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 136(5-6):2063-2074.
- Xue E K, Wang W, Chew D, Pandit M K, Deng X, Tian Y, Tong X R, Zhao J H. 2024a. Episodic water-fluxed anatexis recorded by migmatites from the Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny in South China[J]. *Gondwana Research*, 126: 96-111.
- Xue E K, Chew D, Drakou F, Wang W. 2024b. Detrital multi-mineral provenance constraints on the reconstruction of the South China Block within Gondwana [J]. *Earth-Science Reviews*, 253: 104798.
- Yang Z Y, 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.
- Yang Z Y, Sun Z M, Yang T S, Pei J L. 2004. A long connection (750-380 Ma) between South China and Australia: paleomagnetic constraints[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(3): 423-434.
- Yao J L, Cawood P A, Shu L S, Zhao G C. 2019. Jiangnan Orogen, South China: A ~970-820 Ma Rodinia margin accretionary belt[J]. *Earth-Science Reviews*, 196: 102872.
- Yao J L, Shu L S, Santosh M. 2011. Detrital zircon U-Pb geochronology, Hf-isotopes and geochemistry—New clues for the Precambrian crustal evolution of Cathaysia Block, South China[J]. *Gondwana Research*, 20(2-3): 553-567.
- Yao W H, Li Z X. 2016. Tectonostratigraphic history of the Ediacaran-Silurian Nanhua foreland basin in South China[J]. *Tectonophysics*, 674: 31-51.
- Yao W H, Li Z X, Li W X, Li X H. 2017. Proterozoic tectonics of Hainan Island in supercontinent cycles: New insights from geochronological and isotopic results[J]. *Precambrian Research*, 290: 86-100.
- Yao W H, Li Z X, Li W X, Li X H, Yang J H. 2014. 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.
- Yao W H, Li Z X, Spencer C J, Martin E L. 2018. Indian-derived sediments deposited in Australia during Gondwana assembly[J]. *Precambrian Research*, 312: 23-37.
- Yu J H, O'reilly S Y, Wang L J, Griffin W L, Zhang M, Wang R C, Jiang S Y, Shu L S. 2008. Where was South China in the Rodinia supercontinent?[J]. *Precambrian Research*, 164(1-2): 1-15.
- Yu J H, Wang L J, O'reilly S Y, Griffin W L, Zhang M, Li C Z, Shu L S. 2009. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia Block, China[J]. *Precambrian Research*, 174(3-4): 347-363.
- Zhang L M, Zhang Y Z, Cui X, Cawood P A, Wang Y J, Zhang A M. 2019. Mesoproterozoic rift setting of SW Hainan: Evidence from the gneissic granites and metasedimentary rocks[J]. *Precambrian Research*, 325: 69-87.
- Zhang S H, Li H Y, Jiang G Q, Evans D A D, Dong J, Wu H C, Yang T S, Liu P J, Xiao Q S. 2015. New paleomagnetic results from the Ediacaran Doushantuo Formation in South China and their paleogeographic implications[J]. *Precambrian Research*, 259: 130-142.
- Zhao G C, Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 13-54.
- Zhao L, Zhai M G, Zhou X W, Santosh M, Ma X D. 2015. Geochronology and geochemistry of a suite of mafic rocks in Chencai area, South China: Implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. *Lithos*, 236-237: 226-244.
- Zhou X Y, Yu J H, O'Reilly S Y, Griffin W L, Sun T, Wang X L, Tran M, Nguyen D. 2018. Component variation in the late Neoproterozoic to Cambrian sedimentary rocks of SW China-NE Vietnam, and its tectonic significance[J]. *Precambrian Research*, 308: 92-110.
- Zoleikhaei Y, Mulder J A, Cawood P A. 2022. Evaluating sediment recycling through combining inherited petrogenic and acquired sedimentary features of multiple detrital minerals[J]. *Basin Research*, 34(3): 1055-1083.