



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：扬子西缘埃迪卡拉纪—寒武纪大地构造背景演化：来自碎屑锆石 U-Pb 年代学证据

作者：史志强，孙乐，张红，裴进云，李伟

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025065

投稿时间：2025-06-10

录用时间：2026-04-02

预出版时间：2026-04-02

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

扬子西缘埃迪卡拉纪—寒武纪大地构造背景演化：来自碎屑锆石 U-Pb 年代学证据

史志强¹, 孙乐¹, 张红¹, 裴进云¹, 李伟²
SHI Zhiqiang¹, SUN Le¹, ZHANG Hong¹, PEI Jinyun¹, LI Wei²

1. 中国冶金地质总局第三地质勘查院, 山西 太原 030000

2. 中国冶金地质总局昆明地质勘查院, 云南 昆明 650000

1. *The Third Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Taiyuan 030000, Shanxi, China;*

2. *The Kunming Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Kunming 650000, Yunnan, China*

Tectonic evolution of the Western Yangtze Block during the Ediacaran–Cambrian: Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology

Abstract: [Objective] The Yangtze Block was a crucial component of the Gondwana supercontinent. During the Ediacaran-early Cambrian, its western margin underwent a marked transition from carbonate-dominated to siliciclastic-dominated depositional environments. However, the tectonic dynamics controlling this sedimentary facies shift of early Cambrian sedimentation remain poorly constrained. The exposed thick Early Cambrian terrigenous clastic rocks on the western Yangtze Block are key archives for tracing sediment sources and studying the geotectonic background of the Early Cambrian. [Method] This study carried out systematic detrital zircon U-Pb geochronology and whole-rock element analysis on the lower Cambrian Qiongzhusi Formation on the western Yangtze Block to study above question. [Results] The results indicate: (1) The clastic rocks exhibit high-field-strength elements (HFSEs) and large-ion lithophile elements (LILEs; e.g., Th, Zr, Hf, Ba, Pb) consistent with upper crustal compositions, whereas Sr, Sc, V, Cr, Cu, Ni, and Zn show depletion relative to upper continental crust (UCC)-particularly pronounced for Sr, Cr, V, and Cu. The immobile elements (Th, Sc, Hf, Zr, Ho) and rare earth elements (RREEs; e.g., La, Ce, Yb) suggest a dominantly felsic igneous provenance of the upper continental crust; (2) Primary age clusters of detrital zircon U-Pb ages in the Qiongzhusi Formation are ca.590-500Ma and ca.880-720 Ma, with subordinate groups at 1900-1500 Ma and 2500-2400 Ma. [Conclusions] Integrated with regional data and prior studies, we propose that the early Cambrian detritus was largely derived from the Ediacaran-Early Cambrian magmatic rocks in the Longmenshan tectonic belt (Ediacaran-early Cambrian), and the late Neoproterozoic felsic magmatic rocks of the Panxi-Hannan magmatic arc, Ailaoshan Magmatic Arc and the Jiangnan Orogen. The Proto-Tethyan Ocean's subduction beneath the western Yangtze during the Ediacaran-early Cambrian converted the western Yangtze from a passive to an active continental margin, and formed a late Ediacaran-early Cambrian magmatic arc. This arc supplied voluminous early Cambrian detritus, ultimately shifting the western Yangtze margin to a siliciclastic-dominated depositional system. [Significance] These findings reveal the provenance linkages between the western Yangtze and adjacent orogenic belts, thereby providing critical constraints for reconstructing the tectonic and paleogeographic evolution of the South China Block during the Ediacaran-Early Cambrian.

Keywords: Western Yangtze Block; Ediacaran–Cambrian; detrital zircon U–Pb age; whole-rock major and trace element analysis; magmatic arc

基金项目: 中国冶金地质总局地质综合研究项目 (中冶地 (2025) CMGBDZYJ003 号)
This research was financially supported by the Geological Comprehensive Research Project of the China Metallurgical Geology Bureau (Grant No.[2025] CMGBDZYJ003).
第一作者及通信作者: 史志强 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事冶金地质及地球化学研究工作。Email: 315596216@qq.com
收稿日期: 2025-06-10; **修回日期:** 2026-04-02; **录用日期:** 2025-04-02; **网络出版日期:** 2025-04-02
Received:2025-07-08; **Revised:** 2026-04-02; **Accepted:** 2026-04-02; **Available Online:** 2025-04-02

摘要：扬子地块是 Gondwana 超大陆的重要组成部分，其西缘在埃迪卡拉纪—早寒武世期间经历了从碳酸盐岩沉积相向碎屑岩沉积相的显著转变。然而，控制这一沉积相显著转变的构造动力学机制和早寒武世沉积相的大地构造背景仍缺乏明确的约束。扬子地体西缘广泛出露巨厚的早寒武世陆源碎屑岩，是追踪沉积物源和研究扬子板块早寒武世大地构造背景的关键研究对象。研究针对扬子地体西缘下寒武统筲竹寺组开展了沉积碎屑锆石 U-Pb 年代学和全岩主微量元素的分析，结果表明：扬子西缘筲竹寺组碎屑岩的地球化学数据显示高场强元素和大离子亲石元素 Th、Zr、Hf、Ba、Pb 与上地壳相似，Sr、Sc、V、Cr、Cu、Ni、Zn 等元素相对于上地壳亏损，其中 Sr、Cr、V、Cu 强烈亏损；而 Th、Sc、Hf、Zr、Ho 等不活泼元素和 La、Ce 和 Yb 等稀土元素指示其物源主要来自长英质岩浆岩；扬子西缘筲竹寺组碎屑锆石 U-Pb 年龄的主要年龄群为 ca. 590~500 Ma 和 ca. 880~720 Ma，并包含 1900~1500 Ma 和 2500~2400 Ma 两个次要年龄群。结合区域资料和已有研究，认为扬子西缘早寒武世碎屑物质主要来自扬子西缘的龙门山构造带埃迪卡拉纪—早寒武世岩浆岩以及攀西-汉南岩浆弧和哀牢山构造岩浆弧等新元古代晚期长英质岩浆岩的风化剥蚀产物。因此，原特提斯洋在埃迪卡拉纪—早寒武世俯冲于扬子西缘并形成了一条埃迪卡拉纪末期—早寒武世的岩浆弧，为该区域的寒武系碎屑岩提供了大量的早寒武世碎屑物质，促使扬子西缘从被动大陆边缘环境转化成了活动大陆边缘环境，导致由碳酸盐岩沉积相转变成碎屑岩沉积相。揭示了扬子西缘与周缘造山带之间的物源联系，从而有效地重建华南板块在埃迪卡拉纪—早寒武世的构造、古地理演化过程。

关键词：扬子西缘；埃迪卡拉纪—寒武纪；碎屑锆石 U-Pb 定年；全岩地球化学分析；岩浆弧

中图分类号：P541；P597 **文献标识码：**A **文章编号：**

DOI:10.12090/jissn.1006-6616.2025065

0 引言

晚新元古代—早古生代是全球从 Rodinia 超大陆裂解向 Gondwana 超大陆聚合转换的关键构造转换期（赵国春等，2022）。华南板块的扬子地块作为 Rodinia 和 Gondwana 超大陆的重要组成部分，记录了该时期地球—生命系统的演化过程，并保存了大量沉积地层学、古生物学等证据（冯增昭等，2001，2002；Jiang et al., 2003, 2011）。该时期也对应着扬子地块从碳酸盐岩台地向陆源碎屑岩相转变的关键时期，然而控制其转变的构造动力学机制尚不清楚。目前学术界存在以下几种不同观点：①由华南西缘地体与印度西北缘在埃迪卡拉晚期（0.56~0.54 Ga）碰撞形成了造山带（Yang et al., 2020）；②华南板块与伊朗和印度西缘在埃迪卡拉晚期—早寒武世发生拼贴碰撞（Chen et al., 2022）；③原特提斯洋在早寒武世（约 530 Ma）俯冲于扬子西缘之下，形成了岩浆弧（Gu et al., 2022）。因此，厘清这些学术分歧将为深入理解 Rodinia 及 Gondwana 超大陆旋回过程以及该时期地球—生命系统演化提供相应线索和证据。

扬子地块内部及其边缘虽然发育大量新元古代晚期岩浆岩，但埃迪卡拉纪—寒武纪岩浆活动记录出露有限（周明忠等，2011；Zhou et al., 2018；Deng et al., 2025），难以提供充足的直接证据约束上述问题；然而，扬子地块内部广泛保存的新元古代晚期—早古生代（南华纪—寒武纪）沉积序列记录了扬子地块在该时期的构造演化以及地球—生命系统协同演化的重要信息（Jiang et al., 2003, 2011），尤其是扬子地体内部埃迪卡拉纪—早寒武世陆源碎屑含量较高的碳酸盐岩和陆源碎屑岩沉积相，记录了关键的环境—构造转变信息。对该时期扬子地块的埃迪卡拉系—寒武系开展沉积相分析、碎屑锆石 U-Pb 年代学以及地球化学研究，不仅可以揭示其沉积物源区特征，还能揭示其与周缘造山带之间的潜在联系，从而有效地重建华南板块在该时期的构造—环境—生物协同演化过程。因此，文章选取扬子地块西缘埃迪卡拉系—早寒武世筲竹寺组碎屑沉积岩，系统开展沉积相分析、锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究，以揭示该时期扬子地块的沉积物源演化特征，并探讨其构造演化及其动力学过程。

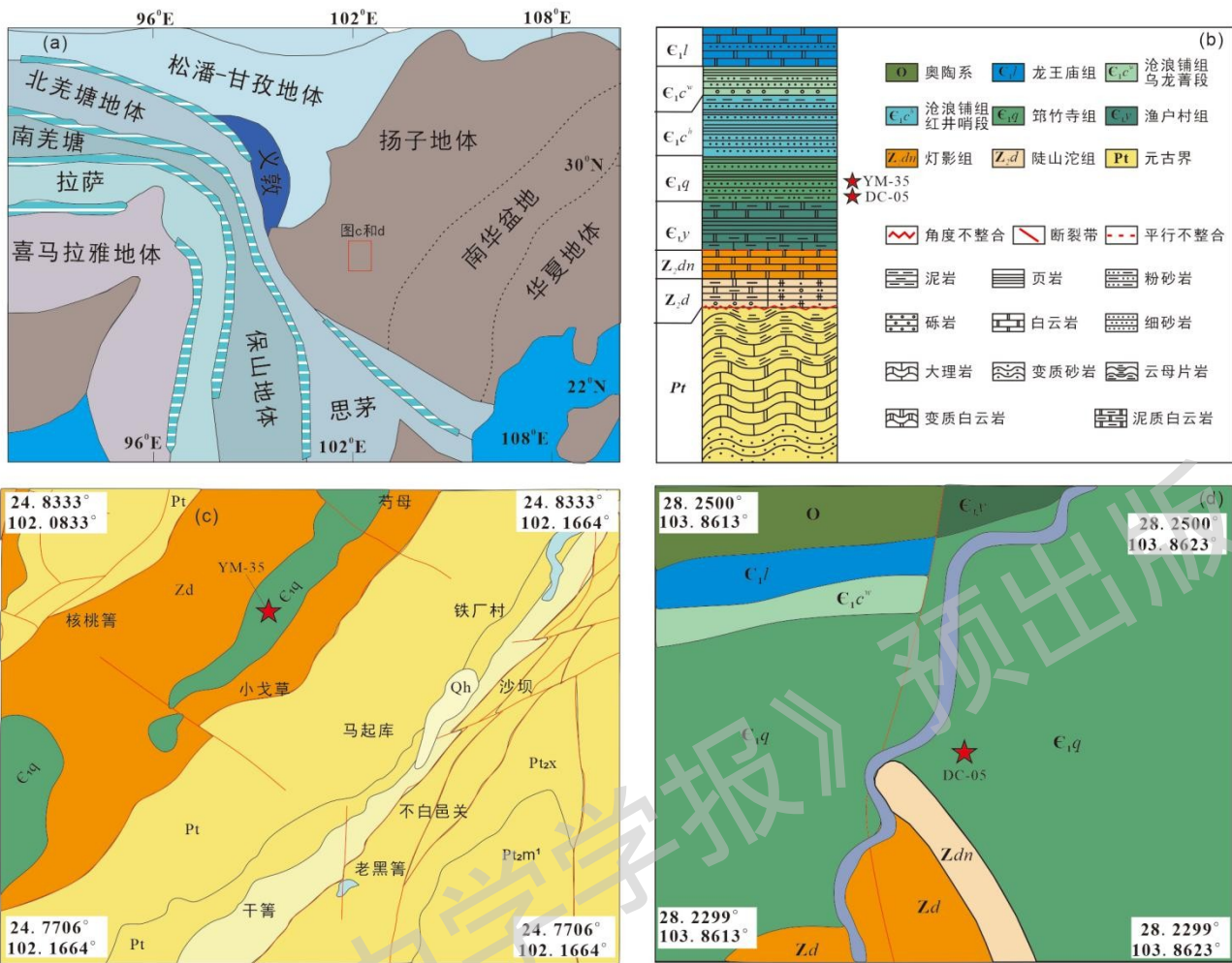
1 区域地质背景和样品特征

1.1 区域地质背景

华南板块夹持于秦岭-大别-苏鲁造山带、哀牢山-Song Ma 断裂带和龙门山断裂带之间（图 1），主要由扬子地块与华夏地块碰撞拼合而成。学界对二者碰撞拼合时间仍存在分歧，主要有 2 种观点：① 约 820 Ma 前的晋宁期拼合（Zhao et al., 2018）；② 约 420 Ma 前的加里东晚期或更晚时期的最终拼合（张克信等, 2015, 2023；何卫红等, 2014；Wang et al., 2023；Lin et al., 2024）。伴随着 Rodinia 超大陆的解体，华南板块内部发育了一系列裂谷盆地（齐靓等, 2023；张克信等, 2023）。扬子地块周缘广泛发育了一系列新元古代（880~700 Ma）岩浆岩，如西北缘 700~880 Ma 的攀西-汉南岩浆弧、西缘 730~840 Ma 的哀牢山岩浆带、南缘 740~840 Ma 的江南造山带岩浆带（Cai et al., 2014, 2015；Yao et al., 2019；张克信等, 2023）。扬子地块由新元古代早期的裂谷盆地火山岩组合及沉积充填序列和震旦纪-早古生代陆源碎屑-碳酸盐岩台地相沉积序列，主要发育南华纪早期的碎屑岩夹火山岩建造、南华纪晚期的冰碛岩建造、震旦纪碳酸盐岩建造、埃迪卡拉纪盖帽白云岩建造、寒武-奥陶纪碎屑岩和碳酸盐岩建造，震旦纪之后地层火山物质含量稀少（冯增昭等, 2001, 2002；Jiang et al., 2003, 2011；张克信等, 2023）；扬子地体南缘的南华裂谷盆地，主要发育斜坡相和深水沉积体系。斜坡南北边界分别沿着蒙自-贵阳-花垣-张家界-岳阳-九江-常州和广南-文山-凯里-镇远-铜仁-吉首-常德-武宁-岳阳-宣城-无锡-宜兴，主要沉积发育南华纪陆源碎屑岩-火山碎屑岩-冰川砾岩、震旦纪浊积岩-泥质岩-页岩-碳酸盐、寒武纪泥灰岩-泥质岩；深水相（北部边界：广南-文山-凯里-镇远-铜仁-吉首-常德-武宁-岳阳-宣城-无锡-宜兴；南部边界：南宁市-象州县-道县-耒阳市-萍乡市-南昌市-万年县-杭州）主要发育南华纪陆源碎屑岩-火山碎屑岩-冰川砾岩和埃迪卡拉纪-早寒武世炭质粘土岩、硅质泥质岩（Wang and Li, 2003；冯增昭等, 2001, 2002；Jiang et al., 2003, 2011）。

研究区位于扬子地体西缘的东川县娜姑镇和易门县（图 1a、b；熊家镛等, 1980；云南省区域地质志, 1990）。其中娜姑镇主要出露埃迪卡拉系浅海相碳酸盐岩（陡山沱组（ Z_2d ）和灯影组（ Z_2dn ））及寒武系滨海相碎屑岩（渔户村组（ C_{1y} ）、箬竹寺组（ C_{1q} ）、沧浪铺组（ C_{1c} ）和龙王庙组（ C_{1l} ）；熊家镛等, 1980；云南省区域地质志, 1990）。其中，陡山沱组主要发育白云岩，局部含泥质岩，其上被灯影组整合覆盖；灯影组主要岩性为浅灰白色的块状白云岩，局部地区出露硅质条带白云岩和含磷白云岩（熊家镛等, 1980）。另外，整合上覆于埃迪卡拉纪灯影组的渔户村组（ C_{1y} ），其主要岩性包括白云岩、硅质岩、粉砂岩、磷块岩和灰岩等；而箬竹寺组（ C_{1q} ）下部发育粉-细砂岩与黑色页岩，并整合于渔户村组大海段灰岩之上，中上部的黄绿色页岩整合下伏于沧浪铺组。沧浪铺组（ C_{1c} ）下段（红井哨段）主要岩性为细砂岩和泥页岩，沧浪铺组（ C_{1c} ）的上段（乌龙箐段）主要岩性为砾岩、细砂岩和泥页岩；龙王庙组（ C_{1l} ）整合上覆于乌龙箐段之上，主要发育白云岩和白云质灰岩（熊家镛等, 1980），研究区柱状剖面图见图 1c。

易门地区基底主要由中元古界浅变质岩构成，其上被震旦系-二叠系陆表海沉积物覆盖（熊家镛等, 1980）。具体层序如下：（1）中元古界美党组（ Pt_2m ）主要岩性为灰色砂质板岩与粉砂岩、硅化石英砂岩互层；其上发育青白口系柳坝塘组（ Q_6l ），主要岩性为灰色炭锰质板岩、灰色砾岩、砂泥岩夹硅质岩、变质泥岩；其上被南华系澄江组（ Nh_1c ）不整合覆盖，主要岩性为紫红色砂质砾岩、砂岩、粉砂岩夹泥页岩；埃迪卡拉纪灯影组（ Z_2dn ）不整合于澄江组（ Nh_1c ），岩性主要岩性为白云岩；下寒武统箬竹寺组（ C_{1q} ）主要发育粉砂质页岩和粉砂岩，整合上覆于灯影组（徐云飞, 2018）。



a—亚洲地区大地构造分区图（改自Liu et al., 2022; 刘兵兵等, 2024）；b—东川娜姑镇地区埃迪卡拉纪—奥陶纪地层柱状图（改自熊家镛等, 1980）；c—东川娜姑镇地区埃迪卡拉纪—奥陶纪地层柱状图易门地区地质简图（改自熊家镛等, 1980）；d—东川娜姑镇地区埃迪卡拉纪—奥陶纪采样层位图（改自熊家镛等, 1980）

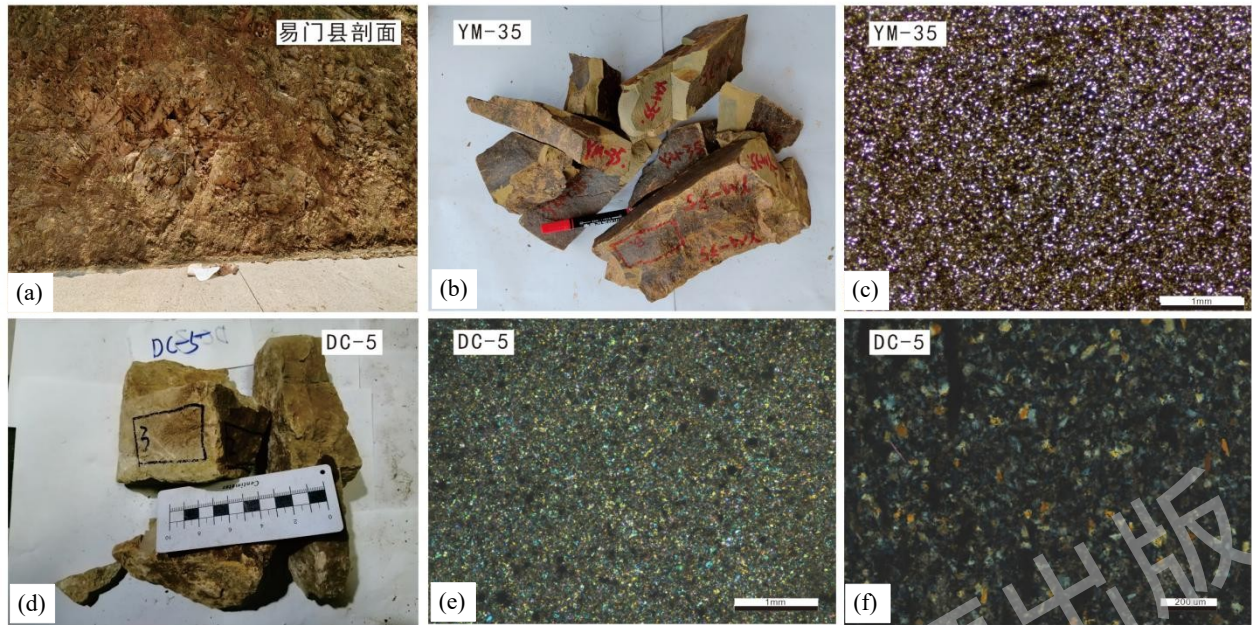
图1 研究区区域地质和采样简图

Fig1 Geotectonic and simplified geological maps of the study area

(a) Simplified geological map of the Asian area (Modified from Liu et al.,2022; Liu et al.,2024);(b) the Ediacaran-Ordovician stratigraphic column in the Nagu region (Modified from Xiong et al.,1980);(c) geological map of the Yimen region (Modified from xiong et al.,1980);(d) sampling location in the Nagu region (Modified from xiong et al.,1980)(Modified from xiong et al.,1980)

1.2 样品特征

在东川县和易门县分别采集了筇竹寺组的灰黑色粉砂岩（样品 DC05）和黄色粉砂质页岩（样品 YM-35）样品，每个样品约 5kg（图 1b，图 2）。样品 DC05 采自早寒武世筇竹寺组（26.493371°，103.200043°），具有含粉砂黏土结构，粉砂含量 15%~20%和黏土含量 80%~85%，粉砂主要成分为石英和云母；样品 YM-35 采自早寒武世筇竹寺组（26.489570°，103.205050°），具有粉砂质黏土结构，以粉砂（含量 40%~45%）和黏土（含量 55%~60%）为主，粉砂主要成分也为石英和云母（图 2）。



a—样品YM-35野外露头；b—样品YM-35手标本；c—样品YM-35镜下照片；d—样品DC-5手标本；e、f—样品DC-5镜下照片

图2 样品野外、镜下照片

Fig.2 Field-Microscopic graphs for Samples

(a) Outcrop photograph for Sample YM-35; (b) Hand specimen for Sample YM-35; (c) Microscopic photographs for Sample YM-35; (d) Hand specimen for Sample DC-5; (e, f) Microscopic photographs for Sample DC-5

2 分析方法

针对扬子西缘碎屑岩样品主要开展了岩相学、全岩主微量元素和碎屑锆石 U-Pb 定年分析，以期厘定扬子西缘埃迪卡拉纪-早寒武世地层的矿物组成、化学组成和碎屑物源来源等信息。具体实验方法详述如下。

2.1 锆石 U-Pb 同位素定年

碎样、岩石薄片磨制、淘洗、锆石分选及制靶等前处理流程均委托河北省廊坊市宇恒岩矿技术有限公司完成。抛光好的锆石靶先进行透射/反射光显微照相，随后送至重庆宇劲科技有限公司完成锆石阴极发光（CL）照相。根据上述显微图像和 CL 图像，识别锆石内部的裂隙或包裹体的位置，并优选结构完整、无干扰的锆石颗粒及分析点位。

锆石 U-Pb 同位素定年在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成。激光剥蚀电感耦合等离子体质谱（LA-ICPMS）由美国 Resonetics 公司生产的 Resolution S-155 激光剥蚀系统和 Agilent7500 型 ICP-MS 联机。分析过程中，采用 He 作为剥蚀物质的载体。锆石测试所需激光能量：90 mJ、能量密度：4 J/cm²、激光频率：6Hz、He MFC：600scm、补偿气流量：0.8 L/min、激光束斑：44µm。U-Pb 同位素定年过程中，采用标准锆石 91500std、Qinghu、TanZ、Jilin 和 PL 作为标样，微量标样：BCR-2G、BHVO-2G、BIR-1G、和 SRM 612、锆石具体实验分析方法详见（Liu et al., 2010）。普通 Pb 校正方法和流程见 Andersen（2002）。随后的数据处理采用 ICP-MS DataCal 软件，具体流程见 Liu et al.（2010）。最后，锆石 U-Pb 年龄谐和图和频谱图绘制分别应用 Isoplot 3.0 和 DensityPlotter 程序完成（Ludwig, 2003; Vermeesch, 2012）。

2.2 全岩主、微量元素分析

全岩样品的主量和微量元素分析测试在澳实矿物实验室（广州）完成。主量元素分析实验流程为：首先称取风干后的全岩粉末样品，900℃加热 90 分钟，以去除样品中的碳酸盐和有机质。然后准确称量 0.50 克加热后的样品并加入 4.00 克 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 混合，之后在 1200℃ 下熔融形成玻璃熔片以备分析。采用 Rigaku ZSX100e X 射线荧光光谱仪测试玻璃熔片的主量元素含量，即为全岩样品的主量元素含量，该光谱仪分析精度小于 1%。进行微量元素分析时，将准确称量后的粉末样品在 1025℃ 下与四硼酸锂熔融，并采用 HF-HCl-HNO₃ 混合物在温度为 180℃ 条件下与浓缩溶液中完全消融。稀释后，使用 Agilent7900x 电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）进行测定样品微量元素，所有元素分析准确度和精密度均优于 10%（王三达等，2023）。

3 分析结果

3.1 锆石年龄组成特征

大多数锆石颗粒的阴极发光（CL）图像都显示典型的韵律生长的振荡环带结构并具有较高的 Th/U 值（>0.1；附件 1 和附件 2），表明其为岩浆成因（吴元保和郑永飞，2004）。此外，也有少数锆石的 CL 图像整体较亮，内部成分较为均一，且 Th/U 值也较低（<0.1），指示其为变质成因（吴元保和郑永飞，2004）（图 3）。锆石年龄小于 1000Ma 时，采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄；锆石年龄大于 1000 Ma 时，则采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄（Gehrels et al., 2006）。



a、b—样品 YM-35 代表性锆石 CL 图像及 U-Pb 年龄；c、d—样品 DC-5 代表性锆石 CL 图像及 U-Pb 年龄

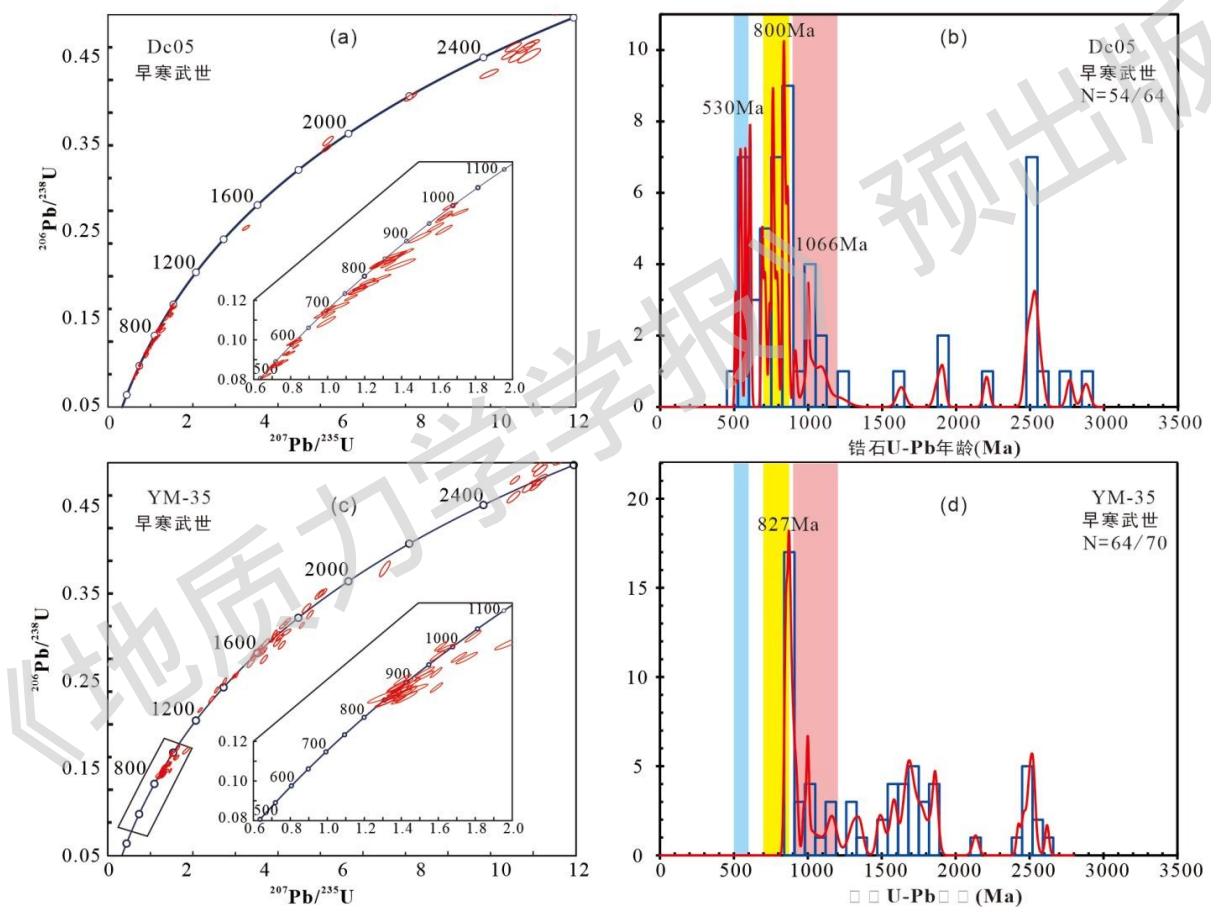
图3 东川和易门地区下寒武统代表性碎屑锆石CL照片（红圈和数字分别代表分析位置和U-Pb年龄；束斑直径为40μm）

Fig.3 CL images of the represented zircons from the lower Cambrian strata of the Dongchuan and Yimen area (red circles and date represent the analytical spots and their U-Pb age)

(a, b) Representative zircon CL images and age values of Sample YM-35; (c,d) Representative zircon CL images and age values of Sample DC-5

样品 YM-35 (ϵ_{1q}) 测定了 70 颗碎屑锆石, 共获得 64 个有效的 U-Pb 年龄数据, 锆石 U-Pb 年龄分布范围介于 842~2618 Ma 之间 (附件 1)。年龄频谱图显示其主要年龄群为 842~928 Ma, 对应的主峰值为 ca.862 Ma; 并含有 1502~1868 Ma 和 2425~2532 Ma 两个次要年龄群, 对应的次峰值分别为 ca.1686 Ma 和 ca.2508 Ma (图 4)。样品 YM-35 共有 20 颗锆石的年龄分布于 842~928 Ma 之间, 占有效数据的 27.1%。

样品 DC0 (ϵ_{1q}) 测定了 64 颗碎屑锆石, 共获得 54 个有效 U-Pb 年龄数据, 其 U-Pb 分布范围介于 508~2877 Ma 之间 (附件 1)。样品年龄频谱图显示出 508~612 Ma 和 704~868 Ma 两个主要年龄群, 分别对应 ca. 570Ma 和 ca.835 Ma 两个主峰值; 同时还有 912~1083 Ma 和 2477~2579 Ma 两个微弱的次要年龄群, 对应的峰值年龄分别为 ca. 997 Ma 和 ca. 2517 Ma (图 4)。样品 DC05 共有 32 颗锆石的年龄分布于 508~868 Ma 之间, 占有效数据的 59%。



a-样品 DC05 U-Pb 年龄谱和图; b-样品 DC05 U-Pb 年龄频谱图; c-样品 YM-35 U-Pb 年龄谱和图; d-样品 YM-35 U-Pb 年龄频谱图

图 4 东川和易门地区碎屑锆石 U-Pb 年龄谱和图和频谱图

Fig.4 Detrital zircon U-Pb concordia and age spectra diagrams in the Dongchuan and Yimeng area

(a) U-Pb concordia diagram for Sample DC05; (b) U-Pb age spectrum for Sample YM-35; (c) U-Pb concordia diagram for Sample YM-35; (d) U-Pb age spectrum for Sample DC05

3.2 全岩地球化学特征

5个样品的主、微量元素氧化物测试数据见表3。样品主量元素氧化物主要包括SiO₂ (51.97 wt.%~54.00 wt.%)、Al₂O₃ (7.12 wt.%~7.41 wt.%)、CaO (9.09 wt.%~9.80 wt.%)、MgO (6.62 wt.%~7.10 wt.%)、K₂O (2.10 wt.%~2.17 wt.%)、Fe₂O₃ (4.31 wt.%~4.84 wt.%)，而TiO₂ (0.35 wt.%~0.36 wt.%)、P₂O₅ (0.18 wt.%~0.19 wt.%)、MnO (0.21 wt.%~0.23 wt.%)等氧化物含量则普遍低于1 wt.% (见附件1)。该样品的烧失量比较大，介于15.05 wt.%~15.99 wt.%之间。

沉积岩中稀土元素含量主要受源区岩石的元素丰度及源区风化条件控制，成岩过程及成岩期后对稀土元素的含量改变较小 (Bhatia, 1985; Taylor et al., 1985)。5个筲竹寺组页岩样品在微量元素蛛网图中显示，高场强元素和大离子亲石元素Th、Zr、Hf、Ba、Pb与上地壳相似；Rb、Ba相对于上地壳轻微富集；Sr、Sc、V、Cr、Cu、Ni、Zn等元素相对于上地壳亏损，其中Sr、Cr、V、Cu强烈亏损 (图5)。稀土元素总量 (ΣREE) 范围在 71.4×10^{-6} ~ 74.0×10^{-6} (La/Yb) N 范围在 4.97~5.51，LREE/HREE 值为 3.97~4.26，平均值为 4.10；在稀土元素配分模式图中显示出轻稀土富集、重稀土平坦的右倾模式，轻、重稀土分异较明显， δEu 值为 0.70~0.90，平均值为 0.76，具有较弱的负Eu异常，Ce异常不明显 (图5)。样品相对亏损高场强元素 (Nb和Ta)，却相对富集大离子亲石元素 (Ba和Sr) 和高场强元素 (La、Zr)。

《地质力学学报》预出版

表3 全岩样品主量和微量元素分析测试表

Table 3 Major and trace element analysis table of whole-rock

样品编号	检测项目																
	Ag	Al	As	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	Ge	In	K	Li
YM-35-1	0.09	3.72	3.7	1.01	0.07	6.73	0.04	5.9	24	2.43	39.3	3.18	8.87	<0.05	0.116	1.72	53.5
YM-35-2	0.08	3.82	3.0	1.03	0.05	6.37	0.74	4.7	25	2.41	84.0	2.98	8.84	<0.05	0.160	1.76	55.5
YM-35-3	0.09	3.81	3.5	1.03	0.08	6.78	0.08	6.1	25	2.54	49.1	3.22	8.92	<0.05	0.126	1.76	53.8
YM-35-4	0.06	3.90	2.8	1.05	0.06	6.56	0.05	5.2	25	2.61	38.7	3.01	9.22	<0.05	0.122	1.80	56.0
YM-35-5	0.09	3.83	4.1	1.05	0.07	6.84	0.04	6.4	25	2.61	39.6	3.32	9.23	<0.05	0.122	1.77	53.3
	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	Rb	Re	S	Sb	Sc	Se	Sn	Ta	Te	Ti
YM-35-1	4.08	1615	6.85	0.04	16.8	890	5.3	61.0	<0.002	0.44	0.60	5.8	1	1.3	0.49	<0.05	0.208
YM-35-2	3.86	1500	4.72	0.05	14.8	880	4.4	58.9	<0.002	0.27	0.49	5.8	<1	1.3	0.47	<0.05	0.214
YM-35-3	4.15	1615	8.98	0.05	17.0	880	5.3	63.2	<0.002	0.49	0.63	6.0	1	1.4	0.49	<0.05	0.214
YM-35-4	4.04	1575	5.75	0.05	14.7	890	4.1	63.4	<0.002	0.19	0.46	6.0	<1	1.4	0.48	<0.05	0.220
YM-35-5	4.14	1635	8.58	0.05	18.6	880	5.5	63.0	<0.002	0.54	0.70	6.0	<1	1.4	0.50	<0.05	0.212
	Tl	W	Zn	Ba	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Hf	Ho	La	Lu	Nb	Nd	Pr	Sm
YM-35-1	0.33	1.0	38	604	29.4	5.40	2.35	1.45	6.54	3.3	1.00	14.0	0.31	7.5	16.5	3.91	6.29
YM-35-2	0.31	0.9	419	544	29.2	5.02	2.24	1.39	6.22	3.3	0.95	14.2	0.30	7.7	16.6	3.91	6.11
YM-35-3	0.35	1.0	79	490	30.1	5.56	2.45	1.51	6.86	3.6	1.02	14.4	0.33	7.7	17.4	4.00	6.56
YM-35-4	0.31	1.0	39	597	30.2	5.17	2.26	1.39	6.28	3.6	0.97	14.6	0.32	7.7	16.9	4.04	6.28
YM-35-5	0.35	1.0	36	403	29.6	5.31	2.38	1.47	6.46	3.4	0.97	14.2	0.31	7.6	16.9	3.91	6.30
	Sr	Tb	Th	Tm	U	V	Y	Yb	Zr	Al ₂ O ₃	As ₂ O ₃	BaO	CaO	Cl	CoO	Cr ₂ O ₃	CuO
YM-35-1	47.5	0.97	6.22	0.35	1.81	49	27.6	2.02	127	7.12	<0.01	0.07	9.66	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
YM-35-2	45.3	0.97	6.25	0.32	1.74	52	26.2	1.90	123	7.39	<0.01	0.06	9.09	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
YM-35-3	47.5	1.05	6.47	0.35	1.92	52	28.0	2.06	134	7.33	<0.01	0.05	9.80	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
YM-35-4	46.3	0.97	6.29	0.34	1.82	52	26.9	1.90	130	7.39	<0.01	0.07	9.20	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
YM-35-5	46.6	0.98	6.27	0.34	1.82	48	27.0	1.95	126	7.41	<0.01	0.05	9.75	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	NiO	P ₂ O ₅	PbO	SiO ₂	SnO ₂	SO ₃	SrO	TiO ₂	V ₂ O ₅	ZnO	ZrO ₂	LOI 1000
YM-35-1	4.67	2.10	6.97	0.22	0.05	<0.01	0.18	<0.01	52.54	<0.01	1.04	<0.01	0.35	<0.01	<0.01	0.01	15.72
YM-35-2	4.38	2.17	6.62	0.21	0.05	<0.01	0.19	<0.01	54.00	<0.01	0.64	<0.01	0.35	<0.01	0.04	0.01	15.05

样品编号	检测项目																
YM-35-3	4.74	2.13	7.08	0.23	0.05	<0.01	0.18	<0.01	51.97	<0.01	1.15	<0.01	0.35	<0.01	<0.01	0.01	15.99

续表 1

样品编号	检测项目																
YM-35-4	4.31	2.16	6.75	0.21	0.04	<0.01	0.19	<0.01	53.68	<0.01	0.44	<0.01	0.36	<0.01	<0.01	0.01	15.55
YM-35-5	4.84	2.16	7.10	0.23	0.05	<0.01	0.19	<0.01	51.80	<0.01	1.28	<0.01	0.35	<0.01	<0.01	0.01	15.87

《地质力学学报》预出版

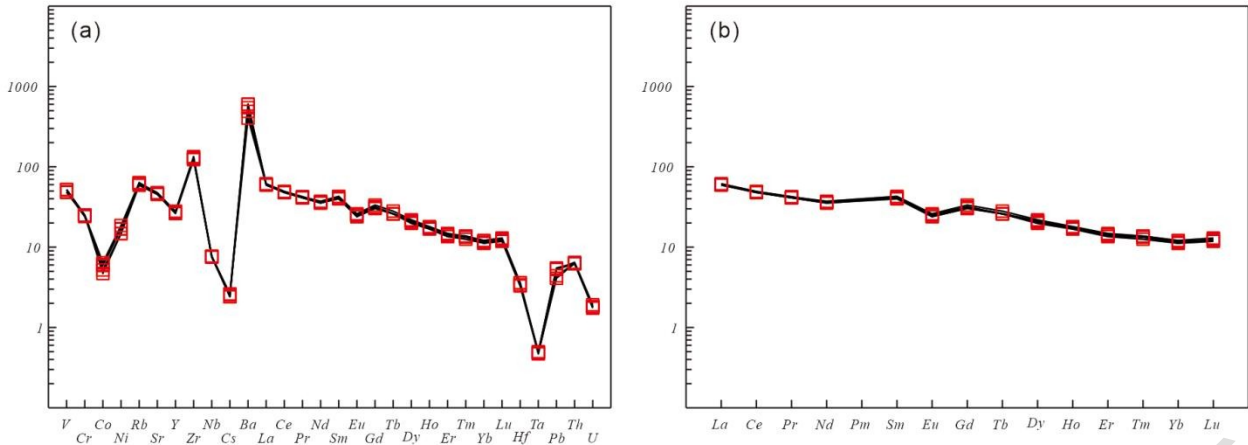


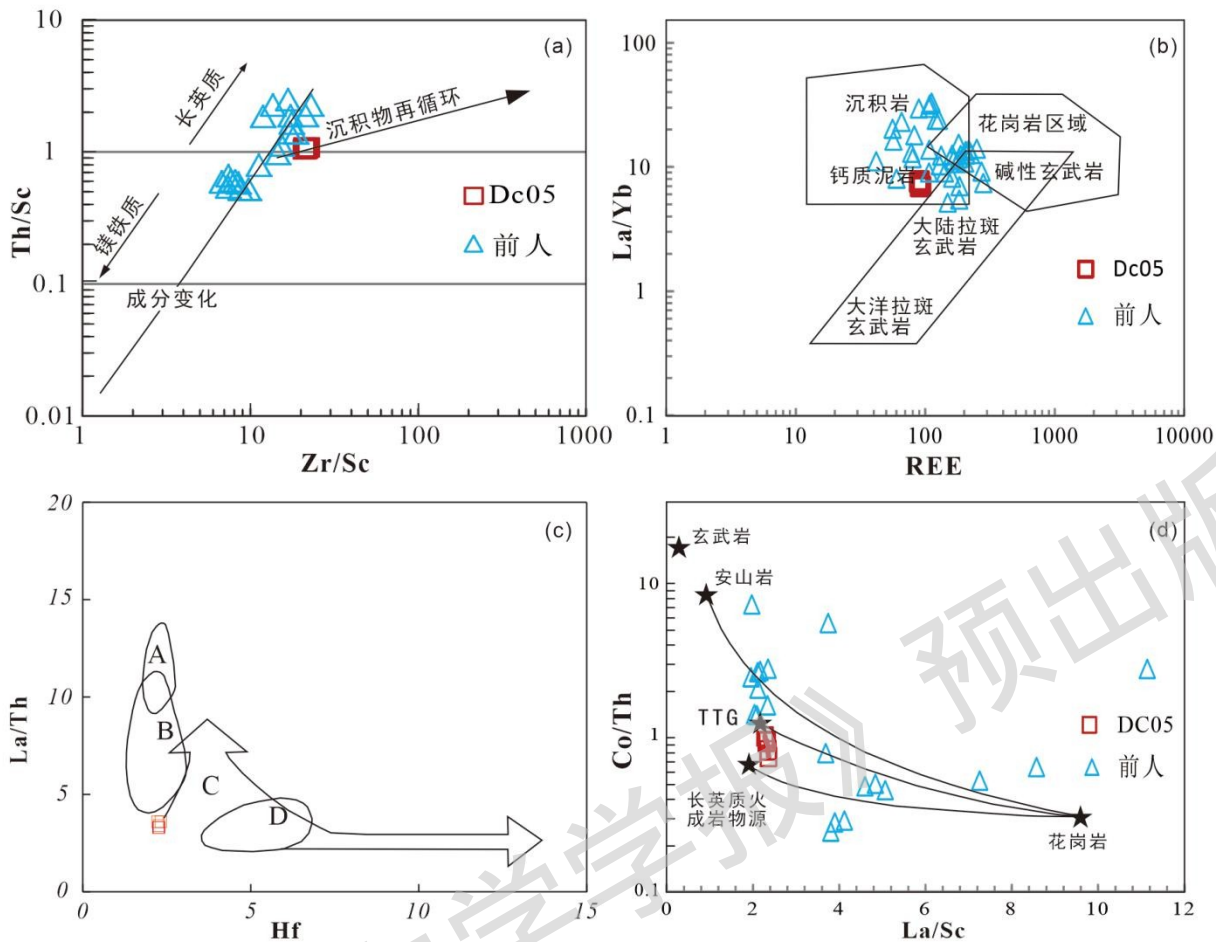
图 5 微量元素上地壳标准化和稀土元素配分曲线 (球粒陨石和上地壳数据来自 McDonough and Sun (1995), Rudnick and Gao (2014), respectively)

Fig.5 Upper continental crust (UCC) compositions-normalized element and Chondrite-normalized REE patterns of the samples from the Qiongzhusi Formation (The data of chondrite and UCC are from McDonough and Sun (1995), Rudnick and Gao (2014), respectively)

4 碎屑物源分析

前期学者对扬子地体西缘地区的埃迪卡拉纪—早寒武世地层开展了一系列碎屑物源和地球化学的研究工作 (Xia et al., 2016; Yang et al., 2020; Gu et al., 2021, 2023; Liu et al., 2023; 刘兵兵等, 2024)。因此, 结合已有研究的碎屑锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究成果可进一步约束物源信息。

碎屑沉积岩微量元素含量及其组合已被用于判别沉积岩源区母岩的性质, 尤其是 Th、Sc、Hf、Zr、Ho 等不活泼元素和 REE (La、Ce 和 Yb)。这些地球化学数据指示筲竹寺组粉砂质页岩物源主要来源于大陆上地壳的长英质物质。其中稀土元素显示物源主要来源于上地壳的陆源沉积物, 如在 La/Yb-ΣREE 图解中 (图 6b), 碎屑岩数据结果与前期研究成果一致, 均集中在沉积岩与花岗岩的交汇区。微量元素进一步支持筲竹寺组的碎屑物源主要来自长英质物质的剥蚀: 在 Th/Sc-Zr/Sc 图解中 (图 6a), 早寒武世筲竹寺组碎屑岩集中于长英质以及部分沉积物再旋回交汇区域; 在 La/Th-Hf 图解中 (图 6c), 样品主要落入酸性岩浆弧源区和长英质与基性混合源区; Co/Th-La/Sc 图解显示筲竹寺组碎屑岩主要来自长英质、TTG 等中酸性物质 (图 6d)。这些筲竹寺组碎屑岩全岩地球化学数据说明原岩沉积物主要由中酸性岩浆岩风化而成。因此, 早寒武世筲竹寺组碎屑岩物源主要来自长英质岩浆岩。



a- Th/Sc vs. Zr/Sc (底图来自McLennan et al., 1993) ; b-La/Yb vs. REE (底图来自Taylor & McLennan, 1985) ; c-La/Th vs. Hf (底图来自Floyd and Leveridge, 1987) ; d-Co/Th vs. La/Sc (底图来自Wronkiewicz and Condie, 1987)

图6 扬子西缘早寒武世碎屑沉积岩物源性判别图解 (数据来源于本研究和陈思达等, 2023; 刘慧萍等, 2024; 杨永祯等, 2024)

Fig.6 Discriminant diagrams for provenance attributes of the Early Cambrian sedimentary rocks of the West Yangtze (Data from this study and Chen et al., 2023; Liu et al., 2024; Yang et al., 2024)

(a)Th/Sc vs. Zr/Sc(after McLennan et al.,1993);(b)La/Yb vs. REE(after McLennan et al.,1993);(c) La/Th vs. Hf(after Floyd and Leveridge,1987);(d)Co/Th vs. La/Sc(after Wronkiewicz and Condie, 1987)

另外, 扬子西缘早寒武世地层的碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱可以进一步揭示这些长英质物质的详细物源。综合前期的早寒武世碎屑锆石 U-Pb 年龄数据显示出 ca. 880~725 Ma 和 ca. 590~500 Ma 两个主要年龄群以及 2100~1700 Ma 和 2600~2400 Ma 两个次要年龄群 (图 7)。其中, 590~500 Ma 年龄群: 该期岩浆岩通常与 Gondwana 超大陆聚合过程的泛非期造山作用有关, 主要出露于印度东缘的 Kuunga 造山带和印度西缘包括伊朗俯冲带在内的 Cadomian 造山带 (Liu et al., 2020; Chen et al., 2021); 华南地块内部该期岩浆-构造记录零星出露于云开-武夷地区和大量分布于龙门山构造带 (Li et al., 2017; Gu et al., 2023; Deng et al., 2025)。由于北东-南西向展布的南华-德里深水盆地 (北、南边界分别为: 广南-文山-凯里-镇远-铜仁-吉首-常德-武宁-岳阳-宣城-无锡-宜兴和南宁市-象州县-耒阳市-萍乡市-南昌市-万年县-杭州) 主要发育黑色页岩、碳质页岩、硅质页岩等深水相, 分别阻隔了华南板块的扬子、华夏地体和印度板块的东西两侧地体物质交流之间物质交流 (冯增昭等, 2001, 2002; Liu et al., 2022), 那么 Kuunga 造山带和云开-武夷地区可能并非扬子地体主要碎屑物源。相反, 原特提斯洋俯冲作用相关的岩浆带 (Cadomian 造

山带以及龙门山地区)更可能是扬子地体的主要碎屑物源(Deng et al., 2025)。结合研究区内早寒武世碎屑岩的该期碎屑锆石的棱角状一次棱角状形态特征(图3),反映有近缘搬运特征,因而推测这些碎屑物质可能来自扬子西缘北侧的龙门山构造带或 Cadomian 俯冲带。扬子陆块广泛发育 880~725Ma 的长英质岩浆岩,比如攀西-汉南岩浆弧(725~888Ma; Zhao et al., 2017, 2021)、西南缘的哀牢山构造带(834~731Ma; Cai et al., 2014, 2015)、扬子东南缘的江南造山带(840~742Ma; Yao et al., 2019)。该时期碎屑锆石形态呈棱角-次棱角状,指示近源搬运(图3),但沉积相结果显示江南造山带此时位于江南盆地的深水区,而其它两个造山带当时属于隆起区或者台地区。因而,攀西-汉南岩浆弧和哀牢山构造带都有可能为扬子西缘提供该期碎屑锆石。

1860~1730Ma 和 2500~2400Ma 年龄群: 1860~1730Ma 岩浆岩在扬子地体西缘昆阳群火山岩中已有大量的报道(Wang et al., 2012); 2500~2400Ma 岩浆岩则见于扬子地体北缘崆岭地区(3.5~2.5Ga)和越西北地区的西潘(Phan Si Pan)地区(2.6~2.1Ga; Zhao et al., 2019)。这两期碎屑锆石普遍具有再循环成因的次圆-圆状的特征(图3),表明这些元古-太古宙的碎屑锆石可能来源于扬子地体前寒武纪老地层的再循环。

综上,扬子地体西缘早寒武世碎屑物质以近源沉积为主,可能由扬子西北缘的龙门山泛非期、新元古代的攀西-汉南岩浆弧和西缘的哀牢山构造岩岩浆弧等长英质岩浆岩以及部分基性岩的风化剥蚀搬运至扬子西缘各地区。

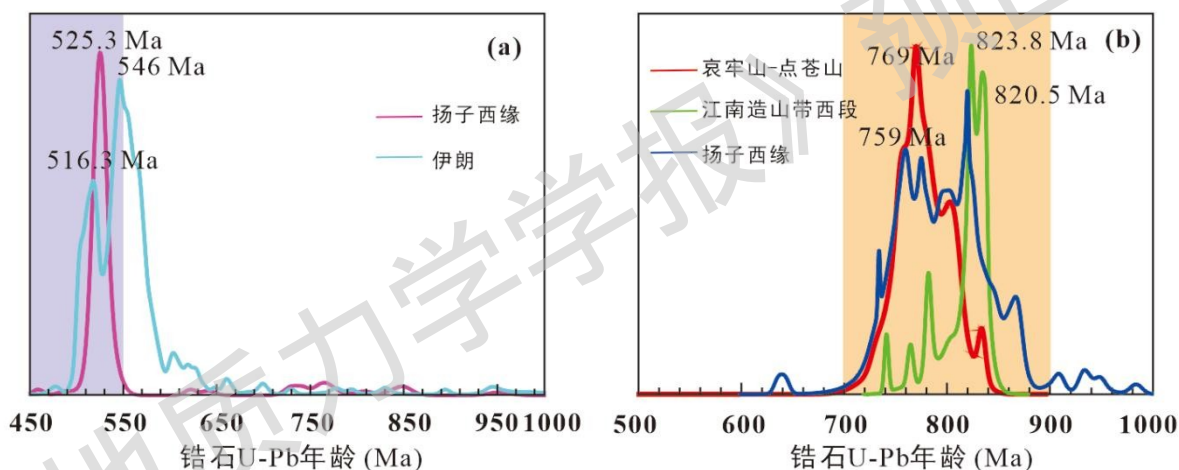


图7 潜在物源的岩浆岩锆石 U-Pb 年龄频谱图(数据来源:宋昊等, 2015; Shafaii Moghadam et al., 2017; Shahzeidi et al., 2017; Moradi, 2022; 刘兴源等, 2023; 占沈薇, 2023; 邓藤丽等, 2025; 李亚博等, 2025; Deng et al., 2025)

Fig 7 Igneous zircon U-Pb age spectrum of the potential provenance (Data from: Song et al., 2015; Shafaii Moghadam et al., 2017; Shahzeidi et al., 2017; Moradi, 2022; Liu et al., 2023; Zhan et al., 2023; Deng et al., 2025; Li et al., 2025; Deng et al., 2025)

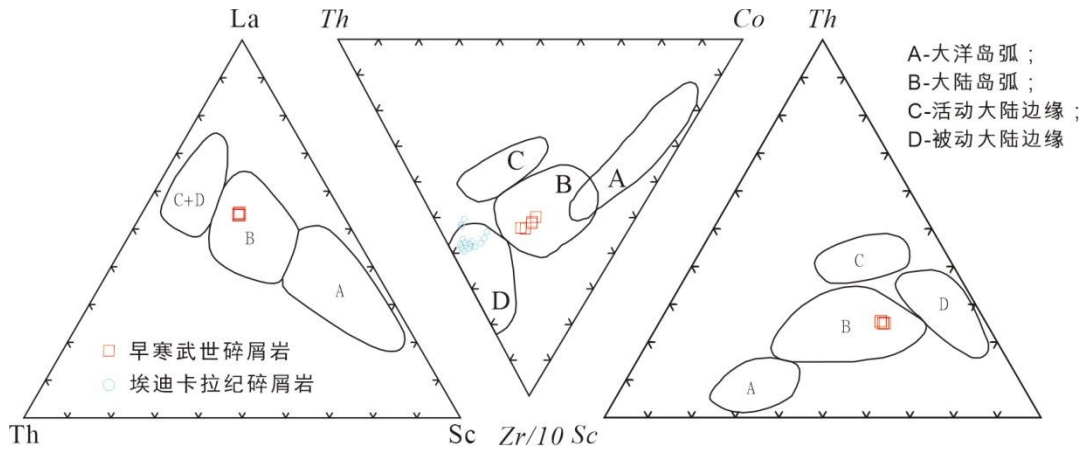


图8 扬子地体埃迪卡拉纪-早寒武世碎屑沉积岩物源区构造背景微量元素判别图解（数据来源于本研究 and Gu et al., 2023；底图来自 Bhatia, 1983）

Fig.8 Trace element-based tectonic setting diagrams for the Ediacaran-Early Cambrian sedimentary rock from the Yangtze Block (Data from experiment and Gu et al., 2023; base map after Bhatia, 1983)

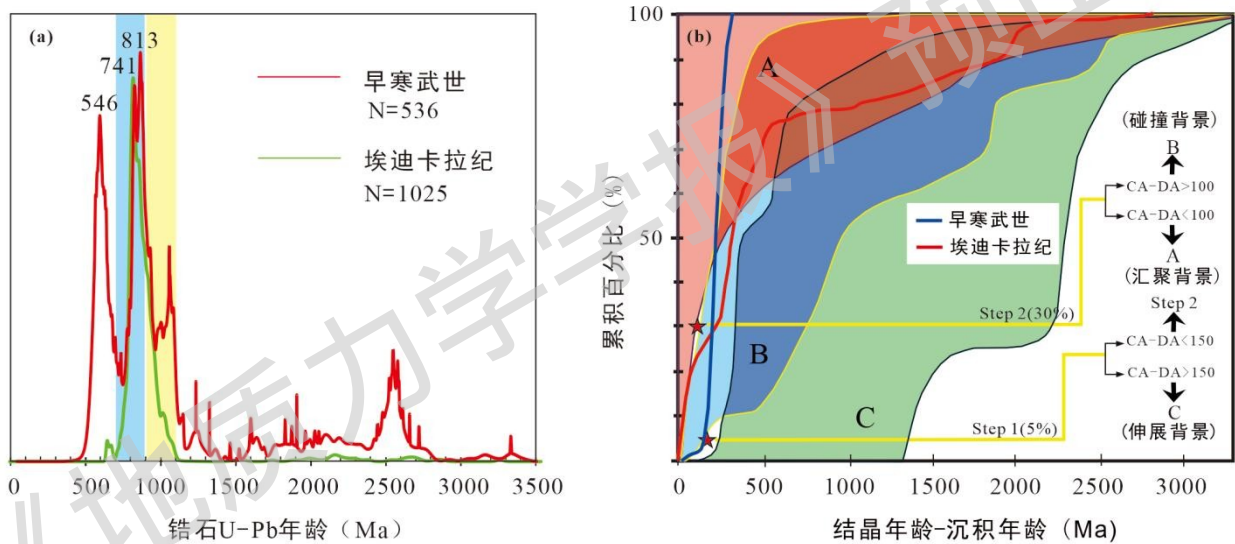


图9 扬子西缘埃迪卡拉纪—早寒武世地层碎屑锆石 U-Pb 频谱图 (a) 和锆石结晶年龄 (CA) -沉积年龄 (DA) 的累积分布曲线图 (b)（数据来源：Gu et al., 2023；Wang et al., 2012；Tian et al., 2020；Chen et al., 2017；Liu et al., 2023；底图据 Cawood et al., 2012 修改）

Fig.9 Detrital zircon age distributions (a) and cumulative distribution curve of variation of the difference between the crystallization and depositional ages (CA-DA) (b) for Ediacaran to Early Cambrian sedimentary rocks from West Yangtze (Data from: Gu et al., 2023; Wang et al., 2012; Tian et al., 2020; Chen et al., 2017; Liu et al., 2023; modified from Cawood et al., 2012)

5 扬子地体西缘埃迪卡拉纪末期-早寒武世的岩浆弧

埃迪卡拉纪—寒武纪是扬子地体西缘从碳酸盐岩沉积相向着碎屑沉积相转变的关键时期（冯增昭，2001，2002；Jiang et al., 2003，2011），但驱动这一沉积相转变的深部构造动力学机制尚不明确。本研究在前人基础上，从沉积相、碎屑锆石 U-Pb 年代学和全岩地球化学角度对上述问题进行了分析。

埃迪卡拉纪时期，扬子西缘发育以碳酸盐岩为主的巨厚沉积序列（ca.800-1500 m，包括陡山沱组和灯影组；

图 1b)。碳酸盐岩层系中薄层的粉砂岩和页岩显示出典型的被动大陆边缘地球化学特征：轻稀土元素（LREE）富集、重稀土元素（HREE）配分模式平坦、明显的 Eu 负异常（McLennan, 1989; Gu et al., 2023）。这些特征与后太古宙澳大利亚页岩（PAAS）具有高度相似性。在主要元素构造判别图解（ K_2O/Na_2O-SiO_2 、 $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ ）和微量元素构造判别图解（ $Th-Co-Zr/10$ ）中，样品均落入被动大陆边缘区域（图 8; Gu et al., 2023），表明扬子西缘当时可能处于被动大陆边缘环境。此外，埃迪卡拉纪碎屑岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系显示 720~880 Ma 的单峰分布特征（图 9）。结合巨厚的碳酸盐岩沉积序列，这些证据共同表明扬子地块西缘在埃迪卡拉纪早-中期处于相对稳定的构造环境，缺乏显著的埃迪卡拉纪岩浆活动，具有典型的被动大陆边缘构造属性。

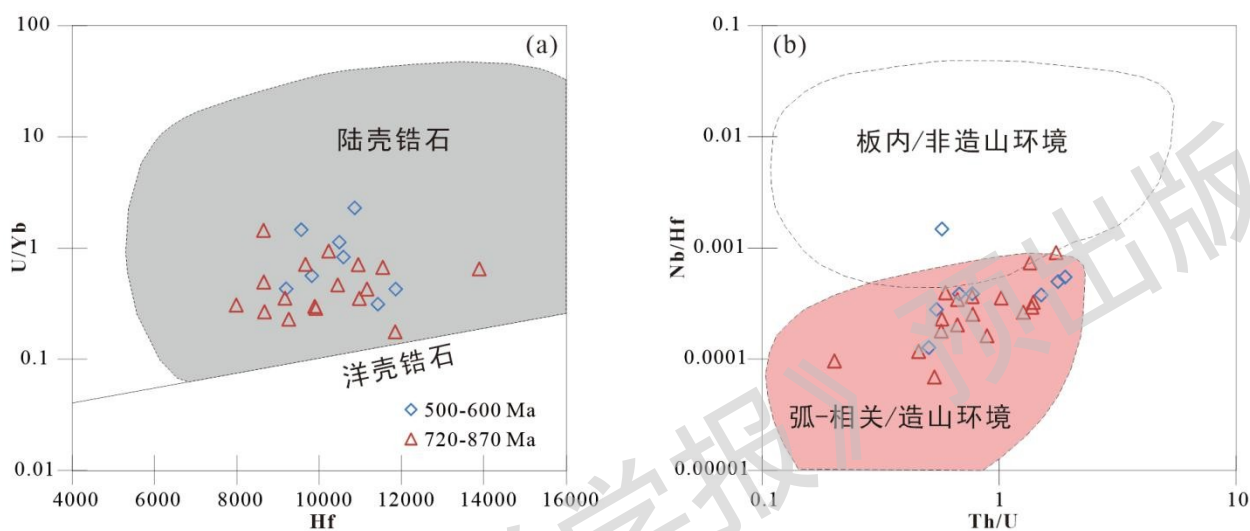


图 10 早寒武世样品碎屑锆石的 Hf-U/Yb 锆石结晶环境判别图解（Grimes et al., 2007）；Th/U-Nb/Hf 锆石构造环境判别图解（Yang et al., 2012）

Fig 10. Trace element composition diagrams of zircons from the Early Cambrian sedimentary rocks of the Yangtze Block (after Yang et al., 2012; Grimes et al., 2007).

埃迪卡拉纪末—早寒武世，扬子西缘经历了被动大陆边缘向活动大陆边缘的构造体制转换。首先，以碳酸盐岩为主的埃迪卡拉纪沉积序列（如陡山沱组、灯影组）被早寒武世以陆源碎屑岩为主的沉积体系替代（图 1b），这一突变可能反映了区域构造背景的调整。其次，扬子西缘在埃迪卡拉纪—早寒武世期间还经历了碎屑物源的重大转变。该区下寒武统发育 ca.520 Ma 和 ca.800 Ma 两期碎屑峰值（图 9），这表明扬子西缘下寒武统除了接受来自攀西—汉南岩浆弧和哀牢山构造带持续输入的 ca.800 Ma 的碎屑物质外，还接受了大量的泛非期（ca.530Ma）碎屑物质。扬子西缘早寒武世地层中这些大量的泛非期碎屑锆石非常接近其地层沉积年龄，使得其符合汇聚大陆边缘环境碎屑锆石 U-Pb 年龄分布特征（图 9; Cawood, 2012）；而且分析样品及前期早寒武世地层中的泛非期（590~500Ma）碎屑锆石具有较低的 Nb/Hf 值和较高的 U/Yb 值（图 10 和附件 2），也表明其源区母岩可能与弧岩浆作用有关。此外，早寒武世粉砂质泥岩具有大陆边缘弧特征的地球化学组成。尽管碎屑岩样品的烧失量（LOI）比较大，但在水体中不活泼滞留时间短，且稳定性强的 La、Ce、Nd、Th、Zr、Hf、Nb、Ti 等微量元素仍可有效指示物源构造环境。在 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 构造判别图解中（Bhatia, 1983），5 个碎屑岩样品的数值均落在大陆边缘的范围内（图 8）。这些证据都表明，扬子早寒武世地层的碎屑物源与泛非期弧岩浆作用具有强烈相关性（张帅等, 2025）。前期古水流资料表明扬子西缘早寒武世的碎屑物质可能主要来自扬子西缘的北侧地区，比如龙门山一带（张冬孟等, 2023; 张英利等, 2018; Deng et al., 2025）。近期，Gu et al. (2021, 2023) 在扬子西缘龙门山地区发现了数百米厚的早寒武世火山岩和火山碎屑沉积序列（ca.526 Ma）和辉长岩（ca.528 Ma）（Deng et al., 2025）。这些岩石的地球化学组成符合弧岩浆特征，比如富集轻稀土和大离子亲石元素，亏损（Nb、Ta 和 Ti）等元素，表明龙门山地区的早寒武世

早期岩浆作用形成于原特提斯洋的俯冲过程。因此，扬子西缘在埃迪卡拉纪—早寒武世期间逐步从被动大陆边缘转化成了活动大陆边缘，并可能发育了一条与原特提斯洋俯冲相关的埃迪卡拉纪末期—早寒武世岩浆弧，并持续为扬子西缘寒武系碎屑岩提供了大量的早寒武世碎屑物质（图 11）。

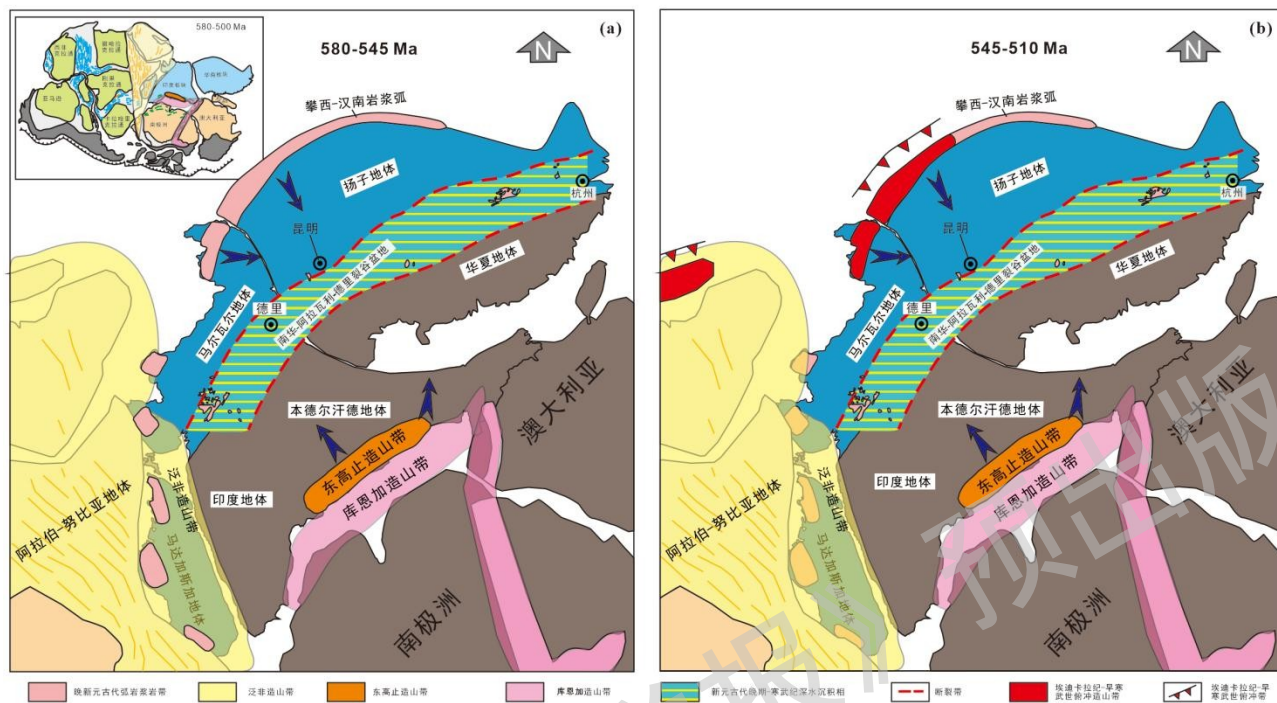


图 11 华南—印度联合地体埃迪卡拉纪 (a) 和早寒武世 (b) 构造格局图 (改自 Liu et al. , 2023)

Fig.11 Diagram shows the proposed tectonic framework for South China-India-Duo during Ediacaran(a)and Early Cambrian(b)time (after Liu et al., 2023)

6 结论

(1) 扬子西缘筇竹寺组粉砂质页岩富含 Th、Sc、Hf、Zr、Ho 等不活泼元素和 REE (La、Ce 和 Yb)，这些地球化学数据指示其物源主要来自长英质岩浆岩的风化剥蚀；而其碎屑锆石 U-Pb 年龄数据显示出 ca.590~500 Ma 和 ca.690~880 Ma 两个主要年龄群以及 1700~2100 Ma 和 2400~2600 Ma 两个次要年龄群。扬子地体西缘早寒武世碎屑物质以近源为主，主要来源于扬子西缘的龙门山泛非期和新元古代的攀西—汉南岩浆弧和哀牢山构造岩浆弧等上地壳长英质岩浆岩以及部分基性岩的风化剥蚀产物。

(2) 扬子西缘在埃迪卡拉纪—早寒武世期间沉积相和碎屑物源的重大转变可能受控于扬子西缘埃迪卡拉纪末—早寒武世俯冲作用。由于原特提斯洋俯冲于扬子西缘之下，在扬子西缘龙门山一带发育了一条埃迪卡拉纪—早寒武世的岩浆弧，为扬子西缘寒武系碎屑岩提供了大量的早寒武世碎屑物质，促使扬子西缘从被动大陆边缘环境转化成了活动大陆边缘环境。

致谢：感谢两位匿名审稿专家的细致审阅和提出的建设性修改建议，使研究的讨论更加简明扼要和深入，让作者受益匪浅。

References

- BHATIA M R,1983.Plate tectonic sand geochemical composition of sandstones[J].The Journal of geology,91(6) :611-627.
- BHATIA M R, CROOK K A,1986.Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J].Contributions to Mineralogy and Petrology.,92:181-193.

- CAI Y F,WANG Y J,CAWOOD P A,et al.,2014.Neoproterozoic subduction along the Ailaoshan zone[J],South China:Geochronological and geochemical evidence from amphibolite.Precambrian Research,245:13-28.
- CAI Y F, WANG Y J,CAWOOD P A,et al.,2015.Neoproterozoic crustal growth of the Southern Yangtze Block[J].Geochemical and zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic evidence of Neoproterozoic diorite from the Ailaoshan zone.Precambrian Research,266:137-149.
- CAWOOD P A,HAWKESWORTH C J,DHUIE B,2012.Detrital zircon record and tectonic setting[J].Geology,40 (10) :875-878.
- CHEN Q,SUN M, LONG X P,et al.,2018.Provenance study for the Paleozoic sedimentary rocks from the west Yangtze Block[J].Constraint on possible link of South China to the Gondwana supercontinent reconstruction. Precambrian Research,309:271-289.
- CHEN Q,SUN M,LONG X P,et al.,2016.U-Pb ages and Hf isotopic record of zircons from the late Neoproterozoic and Silurian-Devonian sedimentary rocks of the western Yangtze Block:Implications for its tectonic evolution and continental affinity[J].Gondwana Research,31:184-199.
- Chen Q,ZHAO G,SUN M,2021.Protracted northward drifting of South China during the assembly of Gondwana[J].Constraints from the spatial-temporal provenance comparison of Neoproterozoic-Cambrian strata.GSA Bulletin,133:1947-1963.
- CHEN S D,XU Z Q,SONG H,et al.2023.Analysis of Rock Geochemical Characteristics and Sedimentary Environment of the Qiongzhu Temple Formation in Daibu Town[J],Huize County,Yunnan Province.Sichuan Metallurgy,45(01):12-21.(in Chinese with English abstract).
- DENG Q,WANG Z J,LIU H,et al.,2025.Subduction-collision and rapid uplift of the NW Yangtze Block during the Ediacaran-Cambrian transition: new evidence from the shoshonite series[J].International Geology Review,67 (3) :331-351.
- FENG Z Z,PENG Y M,JIN Z K,et al.,2002.Early Cambrian lithofacies paleogeography of China[J].Journal of Palaeogeography,4 (1) :1-12.(in Chinese with English abstract).
- FENG Z Z,PENG Y M,JIN Z K,et al.,2001.Cambrian lithofacies paleogeography in southern China[J].Journal of Palaeogeography,3 (1) :1-14.(in Chinese with English abstract).
- FLOYD P A, LEVERIDGE B E,1987.Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin[J],south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones.Journal of the Geological Society, London,144:531-542.
- GEHRELS G E,DECELLES P G,OJHA T P,et al.,2006.Geologic and U-Pb geochronologic evidence for Early Paleozoic tectonism in the Dadeldhura thrust sheet, far-west Nepal Himalaya[J].Journal of Asian Earth Sciences,28 (4-6):385-408.
- GRIMES C B,JOHN B E,KELEMEN P B,et al.,2007.Trace element chemistry of zircons from oceanic crust:a method for distinguishing detrital zircon provenance[J].Geology,35 (7) :643-646.
- Gu Z D,LONERGAN L,ZHAI X,et al.,2021.The formation of the Sichuan Basin, South China, during the late Ediacaran to early Cambrian[J].Basin Research,33 (4) :2328-2357.
- Gu Z D,JIANG X,WATTS A B,et al.,2023.Formation and evolution of an Early Cambrian foreland basin in the NW Yangtze Block[J].South China.Journal of the Geological Society,180(3),pp.jgs2022-127.
- HOFMANN M H,LI X H,CHEN J,et al.,2016.Provenance and temporal constraints of the early Cambrian Maotianshan shale[J].Yunnan Province,China.Gondwana Research,37:348-361.
- JIANG G Q,SHI X Y,ZHANG S H,et al.,2011.Stratigraphy and paleogeography of the Ediacaran Doushantuo formation(ca.635–551Ma) in South China[J].Gondwana Research,19 (4) :831-849.
- JIANG G Q,SOHL L E,CHRISTIE-BLICK N.2003.Neoproterozoic stratigraphic comparison of the Lesser Himalaya (India) and Yangtze block(South China) [J].Paleogeographic implications.Geology,31(10):917.
- KONO S,ISOZAKI Y,SATO T,et al.,2021.Unique lowermost Cambrian small shelly fossils (SSFs)from eastern Yunnan,South China:implications for the early diversification history of animals[J].Palaeoworld,30:199–207.<https://doi.org/10.1016/j.palwor.2021.02.001>.
- LI L M,LIN S F,XING G F,et al.,2017.First direct evidence of Pan-African orogeny associated with Gondwana assembly in the Cathaysia block of southern China[J].Scientific Reports,7,794-803.
- LIU B B,PENG T P,FAN W M,et al.,2020.Tectonic evolution and paleoposition of the Baoshan and Lincang blocks of West Yunnan during the Paleozoic[J].Tectonics,39(10):e2019TC006028.
- LIU B B,PENG T P,FAN W M,et al.,2022.Correlation between South China and India and development of double rift systems in the South China-India Duo during late Neoproterozoic time[J].GSA Bulletin,135:351-366.
- LIU B B,YAN Q H,SHI Z Q,et al.,2024.Paleogeographic pattern of the Late Neoproterozoic-Middle Cambrian in the South China Plate and its tectonic

- significance[J].*Geotectonics and Mineralization*,1-199(in Chinese with English abstract).
- LIU H P,RONG J,LIU Z L,et al.,2024.Geochemical characteristics and geological significance of elements in the Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Guangyuan[J].*Sichuan Basin.Natural Gas Geoscience*, 1-31.(in Chinese with English abstract).
- LIU Y S,HU Z C,ZONG K Q,et al.,2010.Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J].*Chinese Science Bulletin*,55 (15) :1535-1546.
- LIN S F, WANG L J, XIAO W J,et al.,2024. The early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny in South China: a collisional orogeny with a major lag in time between onset of collision and peak metamorphism in subducted continental crust.
- LUDWIG K R,2003.*User's manual for Isoplot 3.00:A geochronological toolkit for Microsoft Excel*[J].Berkeley Calif:Berkeley Geochronology Center Special Publications, 4, 74.
- LUO L,ZENG L,WANG K,et al.,2019a.Provenance investigation for the Cambrian-Ordovician strata from the northern margin of the western Yangtze Block: implications for locating the South China Block in Gondwana[J].*Geological Magazine*,157:551-572.
- LUO L,ZENG L B,WANG K,et al.,2019b.Detrital zircon provenance investigation from the Neoproterozoic successions of the South China Block:Paleogeographic implications[J].*Journal of Geodynamics*,124:25-37.
- MCCLENNAN S M,HEMMING S,MCDANIEL D K,1993.Geochemical approaches to sedimentation, provenance,and tectonics.In: Johnsson,M.J.and Basu,A. (eds) *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*[J].*Geological Society of America Special Paper*,284:21-40
- MCDONOUGH W F,SUN S S,1995.The composition of the Earth.*Chem[M].Geol.*120(3-4):223-253.
- MORADI A,SHABANIAN N,DAVOUDIAN Ret al.,2022.Zircon U-Pb and geochemistry of the north Shahrekord metamorphosed felsic rocks:implications for the Ediacaran-Cambrian tectonic setting of Iran[J].*International Journal of Earth Sciences*,111 (7) :2239-2263.
- QI L,XU Y J,DU Y S,et al.,2023.Neoproterozoic Sedimentary Records and Supercontinent Reconstruction in the Huaxia Block[J].*Sedimentary and Tethian Geology*,43 (1) :188-211.(in Chinese with English abstract).
- RUDNICK R L, GAO S,2014. Composition of the continental crust. *The crust* 3,1-51.
- SHAFI M H,GRIFFIN W L,LI X H,et al.,2017.Crustal evolution of NW Iran: Cadomian arcs,Archean fragments and the Cenozoic magmatic flare-up[J].*Journal of Petrology*,58 (11) :2143-2190.
- SHAHZEIDI M,MOAYYED M,MURATA M,et al.,2017.Late Ediacaran crustal thickening in Iran:Geochemical and isotopic constraints from the~ 550 Ma Mishu granitoids (northwest Iran) [J].*International Geology Review*,59 (7) :793-811.
- SUN W H,ZHOU M F,GAO J F,et al.,2009.Detrital zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the western Yangtze Block,SW China[J].*Precambrian Research*,172:99-126.
- TAYLOR S R,MCCLENNAN S M,1985.*The Continental Crust:its Composition and Evolution Geoscience Texts*[J].vol.312.Blackwell Scientific Publications.
- VERMEESCH,2012.On the visualisation of detrital age distributions[J].*Chemical Geology*,312:190-194.
- 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 L J,YU J H,GRIFFIN W L,et al.,2012.Early crustal evolution in the western Yangtze Block:Evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks[J].*Precambrian Research*,222:368-385.
- 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 S D,DUAN X X,CAI X B,et al.,2023.Study on the enrichment and differentiation of REY in the weathering crust of metamorphic rocks in the Shiguan area of the Dabie Orogenic Belt[J].*Geology and Exploration*,59(04):828-851.(in Chinese with English abstract)
- WRONKIEWICZ D J, CONDIE K C,1987. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa:source-area weathering and provenance [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 2401-2416.
- WU Y B,ZHENG Y F,2004.Research on zircon Genesis Mineralogy and Its constraints on the interpretation of U-Pb age[J].*Chinese Science Bulletin*,49(16):1589-1604.(in Chinese with English abstract).
- XIA X P,NIE X S,LAI C K,et al.,2016.Where was the Ailaoshan Ocean and when did it open:A perspective based on detrital zircon U-Pb age and Hf isotope evidence[J].*Gondwana Research*,36:488-502.
- XU Y F.2018.Determination of the Proterozoic in the Yimen Area of Central Yunnan and Its Significance for Regional Mineral Exploration[J].*Kunming University of Science and Technology*.(in Chinese with English abstract).

- YANG C,LI X H,LI Z X,et al.,2020.Provenance evolution of age-calibrated strata reveals when and how South China Block collided with Gondwana[J].Geophysical Research Letters,47(19),e90282.
- YANG J,CAWOOD P A,DU Y,et al.,2012.Large igneous province and magmatic arc sourced Permian-Triassic volcanogenic sediments in China[J].Sedimentary geology,261-262:120-131.
- YANG Y Z,GUO L,FANG Z X,et al.,2024.Weathering characteristics of sediment sources of the Qiongzhusi Formation on the eastern margin of the Kangdian Palecontinent:A Case study of the Wulong Village Section in Wuding County, Chuxiong City,Yunnan Province[J].Acta Sedimentologica Sinica,42(01):324-341. (in Chinese with English abstract).
- YAO J L,CAWOOD P A,SHU L S,et al.,2019.Jiangnan Orogen,South China:A~970–820 Ma Rodinia margin accretionary belt[J].Earth-Science Reviews,196,102872.
- YUAN H Y,ZHOU Q,DING J,et al.,2017.Chronology study of elastic Zircon U-Pb in Jianglangyan Formation[J].Western Sichuan Acta Mineralica Sinica, 37:296-304. (in Chinese with English abstract).
- ZHANG D M,CHENG X,WEI B T,et al.,2023.Research on the magnetic composition of the third-stage Cambrian sedimentary rocks in Eastern Yunnan and Its Implications for the direction of ancient water flow[J].Journal of Northwest University(Natural Science Edition),53 (04) :655-670.(in Chinese with English abstract)
- ZHANG K X,HE W H,XU Y D,et al.,2023.Tectonic-stratigraphic zoning and characteristics of the Qingbaikou-Triassic period in South China[J].Geology of South China,39(1):1-23.(in Chinese with English abstract).
- ZHANG S,LUO B,WANG Z C,et al.,2025.Genesis of the Deyang-Anyue Cratonic rifting depression in the Sichuan Basin and its connection with the Former Tethys Ocean.Natural Gas Industry[J],45(2):37-50.(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Y L,JIA X T,WANG Z Q,et al.,2018.New understanding of sediment sources of the Early Cold Wusian Fairy Cave Formation in the Mica Mountain Area:Evidence from sedimentology,heavy mineralogy and elastic zircon chronology[J].Acta Geologica Sinica,92(9):1918-1935.(in Chinese with English abstract).
- ZHAO B S,LONG X P,LUO J,et al.,2022.Late Neoproterozoic to Early Paleozoic paleogeographic position of the Yangtze block and the change of tectonic setting in its northwestern margin:Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopes of sedimentary rocks[J]. GSA Bulletin,134 (1-2):335-347.
- ZHAO G C,WANG Y J,HUANG B C,et al.,2018.Geological reconstructions of the East Asian blocks:From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J].Earth-Science Reviews,186: 262-286.
- ZHAO G C,HAN Y G,LI J H,et al.,2022.Environmental Effects of Supercontinent Aggregation and Dispersion[J].Acta Geologica Sinica,96 (09) :3120-3127.(in Chinese with English abstract).
- ZHAO J H,ASIMOW P D,ZHAO M F,et al.,2017.An Andean-type arc system in Rodinia constrained by the Neoproterozoic Shimian ophiolite in South China[J].Precambrian Research, 296, 93-111.
- ZHAO J H,NEBEL O,JOHNSON T E.,2021.Formation and evolution of a Neoproterozoic continental magmatic arc[J].Journal of Petrology,62 (8) ,029.
- ZHAO T Y,CAWOOD P A,ZI J W,et al.,2019.Early Paleoproterozoic magmatism in the Yangtze Block:Evidence from zircon U-Pb ages,Sr-Nd-Hf isotopes and geochemistry of ca.2.3 Ga and 2.1 Ga granitic rocks in the Phan Si Pan Complex,north Vietnam[J].Precambrian Research,324: 253-268.
- Zhou M,LUO T,HUFF W D,et al.,2018.Timing the termination of the Doushantuo negative carbon isotope excursion: evidence from U-Pb ages from the Dengying and Liuchapo formations, South China[J].Science Bulletin 63,1431–1438.<https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.10.002>.

附中文参考文献

- 陈思达, 徐争启, 宋昊, 等, 2023. 云南省会泽地区待补镇筇竹寺组岩石地球化学特征及沉积环境分析[J]. 四川冶金, 45 (01) : 12-21.
- 邓藤丽, 彭义伟, 程文斌, 郎兴海, 宋明伟, 梁芳硕, 蔡姬敏, 许文丽, 李家辉, 彭磊. 2024. 扬子西缘摩挲营新元古代高分异花岗岩年龄、成因和锡钨成矿潜力[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 1-30.
- 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 鲍志东, 2002. 中国早寒武世岩相古地理[J]. 古地理学报, 4 (1) : 1-12.
- 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 蒋盘良, 鲍志东, 罗璋, 鞠天吟, 田海芹, 汪红, 2001. 中国南方寒武纪岩相古地理[J]. 古地理学报, 3 (1) : 1-14.
- 何卫红, 唐婷婷, 乐明亮, 等, 华南南华纪一二叠纪沉积大地构造演化[J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 2014, 39 (08) : 929-953.
- 罗惠麟, 1982. 云南的寒武系[J]. 云南地质, 1 (2) : 104-111+210.
- 李亚博, 任祥, SAFONOVA Inna, 裴秋明, 甘保平, 马啸阳, 曹一鸣, 2025. 扬子西缘新元古代早期大洋俯冲作用: 来自川西天全闪长岩成因的制约[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 52 (3) : 480-501.
- 刘兵兵, 闫庆贺, 史志强, 等, 2024. 华南板块新元古代晚期-中寒武世古地理格局及其大地构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 49 (4) : 975-991.
- 刘慧萍, 戎佳, 刘自亮, 等, 2024. 四川盆地广元北部寒武系筇竹寺组元素地球化学特征及地质意义[J]. 天然气地球科学, 36 (5) : 936-952.

- 刘兴源, 曹杰, 李赛赛, 等, 2023. 桂北新元古代清明山花岗岩地球化学特征及其地质意义[J]. 桂林理工大学学报, 43 (03): 351-363.
- 马义波, 唐佐其, 谯文浪, 等, 2015. 贵州梵净山地区南华系一志留系沉积体系特征及其演化[J]. 贵州地质, 32 (01): 15-20+26.
- 齐靓, 徐亚军, 杜远生, 侯明才, 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.
- 王三达, 段晓侠, 蔡晓兵, 等, 2023. 大别造山带石关地区变质岩风化壳中 REY 富集和分异研究[J]. 地质与勘探, 59 (04): 828-851.
- 宋昊, 徐争启, 倪师军, 等, 2015. 广西摩天岭岩体对江南造山带西南段构造演化的响应: 来自新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 大地构造与成矿学, 39 (06): 1156-1175.
- 汪正江, 王剑, 江新胜, 等, 2015. 华南扬子地区新元古代地层划分对比研究新进展[J]. 地质论评, 61 (01): 1-22.
- 吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49 (16): 1589-1604.
- 熊家镛, 张志斌, 刘世荣, 林尧明, 1980. 中华人民共和国 1:20 万区域地质调查报告 (东川幅) [R]. 云南省地质局, 玉溪.
- 徐云飞, 2018. 滇中易门地区古元古界的厘定及区域找矿意义[D]. 昆明理工大学.
- 杨永祯, 郭岭, 方泽鑫, 等, 2024. 康滇古陆东缘筇竹寺组沉积物源的风化特征——以云南省楚雄市武定县乌龙村剖面为例[J]. 沉积学报, 42 (01): 324-341.
- 云南省地质矿产局, 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.
- 袁华云, 周清, 丁俊, 张惠华, 李同柱, 梁金, 唐高林, 王昌南, 2017. 川西江浪岩组碎屑锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 矿物学报, 37: 296-304.
- 占沈薇, 2023. 扬子板块西缘泸沽花岗岩的地球化学特征及地质意义[D]. 成都理工大学.
- 张冬孟, 程鑫, 卫弼天, 等, 2023. 滇东地区寒武系第三阶沉积岩磁组构研究及其对古水流方向的启示[J]. 西北大学学报 (自然科学版), 53 (04): 655-670.
- 张克信, 潘桂棠, 何卫红, 等, 2015. 中国构造-地层大区划分新方案[J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 40 (02): 206-233
- 张克信, 何卫红, 徐亚东, 翟刚毅, 石万忠, 陆永潮, 2023. 华南青白口纪 - 三叠纪构造 - 地层区划及特征[J]. 华南地质, 39 (1): 1-23.
- 张帅, 罗冰, 汪泽成, 等, 2025. 川盆地德阳-安岳克拉通内裂隙成因及其与原特提斯洋的联系[J]. 天然气工业, 45 (2): 37-50.
- 张英利, 贾晓彤, 王宗起, 陈木银, 2018. 米仓山地区早寒武世仙女洞组沉积物源新认识: 沉积学、重矿物和碎屑锆石年代学的证据[J]. 地质学报, 92 (9): 1918-1935.
- 周明忠, 罗泰义, 黄智龙, 刘世荣, 2011. 贵州早寒武世火山活动记录及其地质意义[J]. 矿物学报 31: 453 - 461.
- 朱日祥, 李献华, 侯先光, 潘永信, 王非, 邓成龙, 贺怀宇, 2009. 梅树村剖面离子探针锆石 U-Pb 年代学: 对前寒武纪-寒武纪界线的年代制约[J]. 中国科学 (D辑:地球科学) 39: 1105 - 1111.
- 赵国春, 韩以贵, 李建华, 等, 2022. 超大陆聚散的环境效应[J]. 地质学报, 96 (09): 3120-3127.