

引用格式：徐亚婷，吴鹏，惠博，等. 2026. 碎屑磷灰石记录扬子西北缘新元古代俯冲增生[J/OL]. 沉积学报. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.027.
XU YaTing, WU Peng, HUI Bo, et al. 2026. Detrital Apatite Records of Neoproterozoic Subduction–Accretion Evolution Along the Northwestern Margin of the Yangtze Block [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.027.
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.027 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.027

碎屑磷灰石记录扬子西北缘新元古代俯冲增生

徐亚婷¹，吴鹏¹，惠博²，董云鹏²

1. 成都理工大学地球与行星科学学院，成都 610059

2. 西北大学地质学系，大陆演化与早期生命全国重点实验室，西安 710069

摘要 【目的】活动大陆边缘弧前盆地能够较好保存邻近岩浆弧构造、岩浆和变质演化的重要沉积记录。扬子陆块西北缘碧口地区发育保存较好的新元古代弧前盆地沉积序列——横丹群，但其对邻区岩浆弧相关构造—岩浆过程的响应仍缺乏直接约束。【方法】对横丹群下部白杨组和中上部秧田坝组沉积岩中的碎屑磷灰石开展原位 U-Pb 定年和微量元素分析，并结合磷灰石成因类型的判别结果，以揭示其物源组成变化及对扬子陆块西北缘新元古代俯冲增生演化过程的响应。【结果】横丹群碎屑磷灰石年龄总体以新元古代为主，白杨组和秧田坝组的主要峰值年龄分别为约 810 Ma 和 770 Ma。其中白杨组含有相对更多的古元古代—中元古代碎屑组分，指示其沉积时期古老基底物质的贡献较大。基于磷灰石微量元素特征及 SVM 分类结果，横丹群碎屑磷灰石以 I 型花岗岩类及镁铁质火成岩（IM）为主，其年龄主要集中于 740~860 Ma，与区域新元古代弧岩浆活动时代相对应。高级变质型（HM）磷灰石年龄峰值集中于 800~900 Ma，可能记录了弧陆汇聚过程中区域高级变质基底的剥露与输入。低—中级变质岩及交代岩型（LM）磷灰石表现出两组年龄，分别为 800~1 000 Ma 和 600~700 Ma，前者可能与新元古代早期持续俯冲背景下的低—中级变质作用有关，后者则可能记录了新元古代晚期板内岩浆热事件的影响。IM 型碎屑磷灰石年龄峰值由白杨组的约 810 Ma 年轻化至秧田坝组的约 770 Ma，结合其 Sr/Mn 和 Sr/Y 随年龄的变化特征，表明横丹群沉积期间盆地物源区由相对分散逐步转向以年轻弧岩浆物质为主，同时反映岩浆弧由新生弧岩浆体系向较成熟的大陆弧岩浆体系演化。【结论】综合碎屑磷灰石 U-Pb 年代学和微量元素特征，横丹群主体沉积更可能形成于扬子陆块西北缘新元古代长期俯冲增生背景下活动陆缘弧前盆地发育晚期，或向后期伸展构造转换的早期阶段，其最大沉积年龄应接近 720 Ma，沉积后又受到新元古代晚期区域热事件的叠加改造。

关键词 碎屑磷灰石；年代学；新元古代；扬子陆块；俯冲增生

第一作者 徐亚婷，女，2002 年出生，硕士研究生，地球化学，E-mail: 1299893579@qq.com

通信作者 吴鹏，男，副教授，地球化学，E-mail: pengwu@cdut.edu.cn

中图分类号：P597 文献标志码：A 文章编号：1000-0550（2026）00-0000-00

0 引言

古老造山带中岩石经历了长期风化剥蚀而难以完整保存，这对于精确厘定造山带不同阶段的演化历史构成挑战。相比之下，造山盆地中连续沉积的碎屑物质通常能够提供不同造山阶段更为丰富且全面的演化信息。造山盆地中的沉积碎屑副矿物正是这些信息的重要载体，如何准确、有效地破译碎屑副矿物中的信息是解析造山带演化的关键（Iizuka *et al.*, 2005; Fisher and Vervoort, 2018; Reimink *et al.*, 2019）。传统上，碎屑锆石因其具有非常稳定的

物理化学性质、抗风化和蚀变能力强、较高的 U 含量以及较低的普通 Pb 含量, 是进行定年与沉积物源分析最常用的重副矿物相 (Thomas, 2011); 此外, 锆石 Hf-O 联合分析也能为研究源区性质和地壳演化提供重要线索 (Kemp *et al.*, 2006)。然而, 碎屑锆石的局限性在于: (1) 性质过于稳定, 因而可存在于多期次的沉积旋回中, 难以有效地反映初始沉积旋回的信息 (Thomas, 2011); (2) 锆石主要结晶于长英质岩浆, 在超镁铁质—镁铁质岩浆中的产率很低, 这导致碎屑锆石 U-Pb 年龄谱峰偏向于记录造山带中的长英质岩浆作用 (Moecher and Samson, 2006; Hietpas *et al.*, 2010); (3) 锆石 U-Pb 体系的封闭温度高 ($>900^{\circ}\text{C}$), 在角闪岩相变质级别及以下条件难以生长新锆石 (Rubatto *et al.*, 2001), 对于中—低级区域变质作用几乎没有响应 (Hietpas *et al.*, 2010; O'Sullivan *et al.*, 2016; Chew *et al.*, 2020)。以上因素限制了碎屑锆石在反演造山带演化研究中的进一步应用。相比之下, 碎屑磷灰石的矿物稳定性相对较弱, 可作为初次沉积旋回的代表矿物, 直接反映源区信息 (Carrapa *et al.*, 2009)。此外, 磷灰石的 U-Pb 封闭温度较低 ($375^{\circ}\text{C}\sim 550^{\circ}\text{C}$, Cochrane *et al.*, 2014), 在变质级别不高的增生造山阶段也能有效地记录中—低级变质事件 (如弧—陆碰撞)。最重要的是, 磷灰石能生长于各类岩性中, 如基性岩、中性岩、酸性岩、中—低级变质岩、高级变质岩以及磷块岩等, 并且不同来源的磷灰石在微量元素组成上具有较大差异, 通过微量元素特征分析能有效地判别其原岩性质 (Piccoli and Candela, 2002; O'Sullivan and Chew, 2020)。因此, 碎屑磷灰石微区原位 U-Pb 定年以及配套的微量元素分析是揭示区域构造—岩浆—变质演化的重要工具, 近年来被成功应用于示踪古老造山带的演化过程。例如, 北美的阿巴拉契造山带 (O'Sullivan *et al.*, 2016), 以及劳伦古陆边缘从新元古代罗迪尼亚超大陆裂解到伊阿珀托斯洋打开—关闭的构造演化过程 (O'Sullivan and Chew, 2020)。

新元古代是全球构造体制和地球系统发生重要转变的关键时期 (Stern, 2005; Brown, 2006)。这一时期, 罗迪尼亚超大陆 (Rodinia) 的聚合与裂解过程主导了世界上主要陆块的构造、岩浆、变质和沉积作用, 并留下了丰富的地质记录 (Ashwal *et al.*, 2002; Ge *et al.*, 2012; Murphy *et al.*, 2013; Cawood *et al.*, 2016; Konopásek *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2018)。华南陆块广泛发育新元古代岩浆和沉积作用, 被认为是 Rodinia 超大陆重建中的关键组成部分, 其中扬子陆块西北缘新元古代岩浆作用和沉积记录较为丰富, 是揭示华南构造演化及其与 Rodinia 超大陆关系的重要区域 (Li *et al.*, 2008; Cawood *et al.*, 2013; Xian *et al.*, 2020)。然而, 前人依靠对岩浆岩、碎屑锆石以及少量变质岩的研究, 仍难以全面认识该区不同造山演化阶段的物源组成、岩浆—变质事件及其沉积响应之间的联系, 使得扬子陆块西北缘新元古代的构造演化过程仍存在争议 (Li *et al.*, 1999, 2003, 2008, 2024; Zhou *et al.*, 2002b;

Wang *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2011; Dong *et al.*, 2011, 2012; 李献华, 2021; Wu *et al.*, 2024)。因此, 本文选择该区域新元古代关键构造沉积序列(碧口横丹群)为研究对象(图 1), 拟通过磷灰石原位 U-Pb 定年和微量元素分析, 结合磷灰石成因类型判别, 约束其物质组成、最大沉积时限及其对区域构造—岩浆—变质事件的响应。该研究可为识别不同源区物质贡献, 弥补岩浆岩、变质岩和碎屑锆石记录的不足, 为进一步理解扬子陆块西北缘新元古代构造演化过程提供新的碎屑矿物学证据。

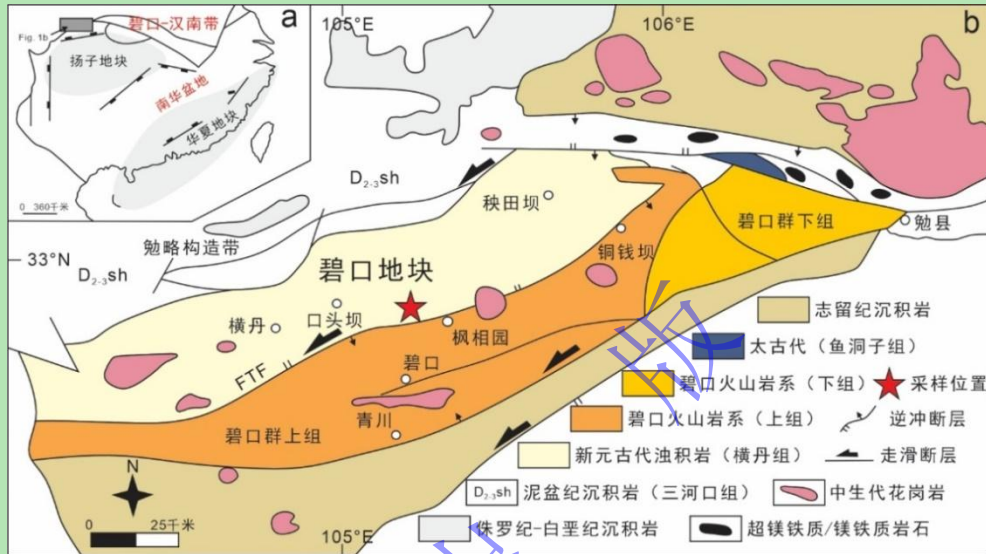


图 1 (a) 华南区域地质图; (b) 扬子板块西北缘碧口地区地质简图(据 Gao *et al.*, 2020 修改)

Fig. 1 (a) Regional geological map of South China; (b) geological sketch map of the Bikou area on the northwestern margin of the Yangtze Block (modified from Gao *et al.*, 2020)

1 区域地质概况

华南陆块由位于西北部的扬子陆块和东南部的华夏陆块组成, 二者由江南造山带相连(图 1a)。太古代—古元古代基底岩石零星分布于崆岭、钟祥、后河、鱼洞子、陡岭、木子店和措科等地区(Zhang *et al.*, 2006, 2020; Guo *et al.*, 2014; Cui *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023), 它们大多被弱变质的新元古代地层和巨厚的震旦系盖层不整合覆盖(Dong and Santosh, 2016; 邓奇等, 2020; 邓奇和汪正江, 2026)。碧口地块位于扬子陆块西北缘(图 1b), 属西秦岭造山带(Zhang *et al.*, 1995)。区域上最古老的基底岩石是出露于碧口地块东北部的新太古代鱼洞子杂岩(秦克令等, 1992; 张宗清等, 2001; 张欣等, 2010; Hui *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020)。新元古代的碧口群、横丹群构成了碧口地块的主体岩石单元, 二者以中部枫相—铜钱断裂为界, 分别出露于枫相—铜钱断裂东南侧及西北侧。成冰系—埃迪卡拉系沉积盖层零星出露于碧口地块的东北、西北和西南部(图 1b)。

碧口群是一套火山—沉积序列, 主要由细碧岩、细碧角斑岩、玄武岩、玄武安山岩、

英安岩和流纹岩组成(赵祥生等, 1990; 闫全人等, 2004), 形成时代为 800~840 Ma (Bader *et al.*, 2013)。少量的侵入岩体(包括辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩、石英二长岩和花岗岩等)主要分布在碧口地块的东侧, 沿 NE—SW 走向的断层呈线性分布, 与主要构造应力方向一致, 形成时代比火山岩略早(820~880 Ma, Xiao *et al.*, 2007; 叶霖等, 2009; Wang *et al.*, 2012; 宫相宽等, 2013; 平先权等, 2014; Hui *et al.*, 2021)。这些岩浆岩兼具岛弧和板内地球化学特征, 被认为形成于俯冲相关构造背景(Wang *et al.*, 2012; Hui *et al.*, 2021), 或是大陆裂谷环境(Wang *et al.*, 2008; 夏林圻等, 2008)。此外, 还报道出露少量具有板内地球化学特征的新元古代晚期(~689 Ma)基性岩脉(Yan *et al.*, 2004), 可能与同时期广泛发育在南秦岭地区的基性—超基性岩墙以及耀岭河群火山—沉积序列共同形成于被动大陆边缘裂谷环境。

横丹群是一套典型的半深海—深海相斜坡重力流沉积序列, 沉积环境范围从底部的浊积砂岩到顶部的扇砾岩和河流沉积物, 局部可见层间熔结凝灰岩(Hui *et al.*, 2021)。横丹群可划分为下部白杨组和中上部秧田坝组(图 2), 并可见典型的鲍马序列构造, 总体呈向上变细的韵律层序。白杨组以灰绿色凝灰质砂岩、粉砂质—泥质板岩以及含砾粗砂岩和砾岩为主, 代表火山质碎屑重力流沉积; 秧田坝组以黑色砂岩、粉砂质—泥质板岩以及含砾粗砂岩和砾岩为主, 代表陆源碎屑重力流沉积。已有沉积学、地球化学以及碎屑锆石年代学研究表明, 横丹群总体具有活动大陆弧边缘沉积体系特征, 并很可能形成于弧前盆地环境(Druschke *et al.*, 2006; Sun *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2020; Hui *et al.*, 2021)。弧前盆地作为活动大陆边缘的重要沉积单元, 常因俯冲侵蚀、后期构造变形及变质改造而保存不完整, 导致原始沉积和物源信息遭受破坏(Draut and Clift, 2013)。相比之下, 横丹群地层序列仅经历了较弱变质与构造变形, 仍较好保留了原始沉积构造和物源特征, 为研究扬子陆块西北缘新元古代构造演化提供了重要窗口。

本次采样位置在露头条件较好的枫相一两河口剖面。其中, 中—粗粒凝灰质杂砂岩(19BK36)采自白杨组底部, GPS 坐标为 32°54'38.01" N, 105°18'18.69" E, 具有块状构造和基质支撑结构。样品组分主要包括岩屑(25%)、石英(20%)及斜长石(25%)等晶屑以及大量杂基物质(30%)。岩屑和晶屑颗粒通常分选性、磨圆性较差, 悬浮在杂基质之中(图 2), 表明这些碎屑物质经历了相对短时间的搬运以及快速的沉积作用。长石岩屑砂岩(19BK40)采自秧田坝组底部, GPS 坐标为 32°58'50.42" N, 105°14'50.22" E, 具有块状构造和基质支撑结构。主要由岩屑(30%)、石英(25%)以及长石(45%)等晶屑组成(图 2)。大多数岩屑和晶屑呈棱角状, 且分选性不佳。岩屑颗粒中含有更多的沉积碎屑组分,

火山岩碎屑相对较少。

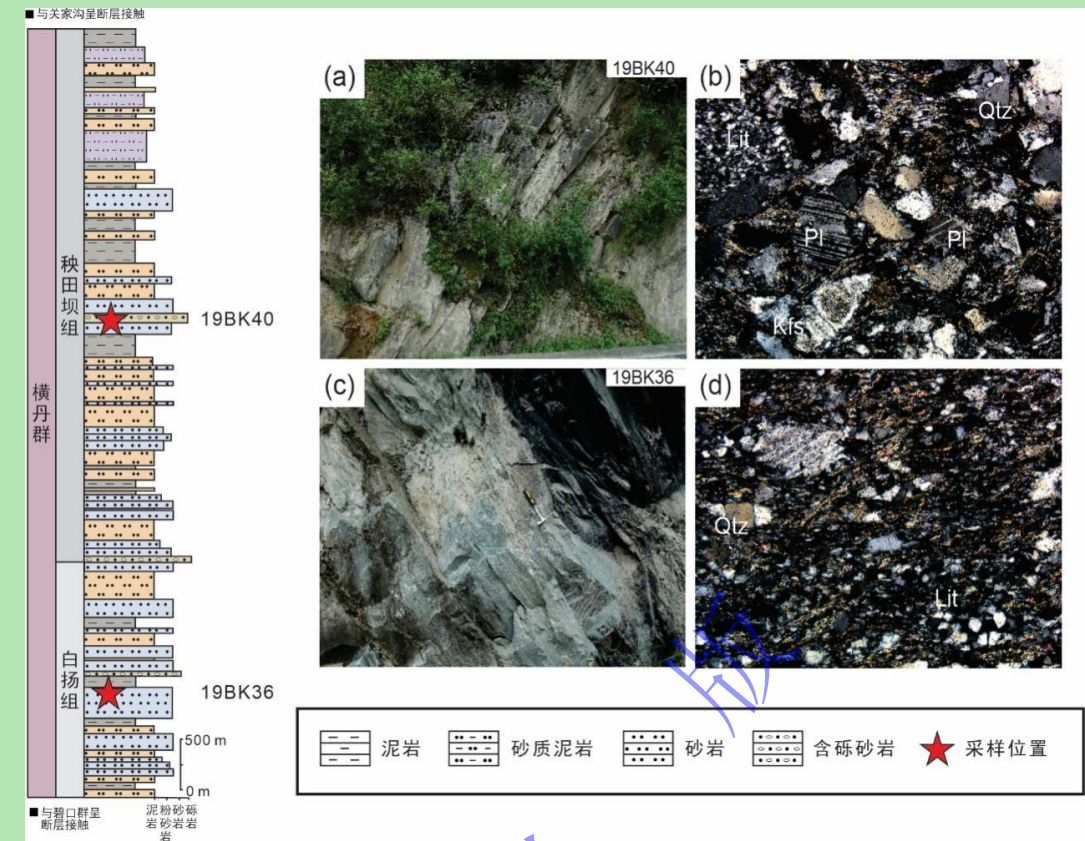


图 2 横丹群剖面地层综合柱状图及野外和岩相学照片

缩写：Pl-斜长石，Qtz-石英，Lit-岩屑

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of the Hengdan Group, along with field and petrographic photos

Abbreviations: Pl-Plagioclase, Qtz-Quartz, Lit-Lithic fragment

2 分析方法

碎屑磷灰石单矿物分选在河北省廊坊市诚信地质服务公司完成。天然沉积岩样品破碎至 60~80 目，经淘洗洗去基质后，将精淘产物自然晾干，以避免高温蒸干过程中磷灰石晶体发生破碎以及破坏 U-Pb 体系。然后再通过磁选和重液选矿技术进行初选，最后配合双目镜手选方法进行单矿物分离提纯。磷灰石制靶在廊坊诚信地质服务公司完成。对制好的磷灰石靶进行抛光后，再对其进行透、反射光、背散射（BSE）以及阴极发光（CL）照相，以揭示其内部结构特征并指导 U-Pb 定年分析选点。CL 照相使用仪器为 FEI Sirion 200 扫描电镜，工作参数为 15 kV 和 20 nA。需要指出的是，本文 CL 图像用于显示颗粒内部结构特征并指导分析点位的选择，不作为磷灰石成因类型判别的唯一依据。图 3 中部分颗粒在 CL 图像上显示出边部增亮、弱核一边结构或局部不均一发光特征，这些现象可能反映原始生长环带、后期流体—热事件改造或局部溶解—再沉淀过程。U-Pb 和微量元素分析时优先选择颗粒内

部相对均一、无明显裂隙并尽量避开显著边部改造域的位置进行测试,因此本文获得的年龄主要代表被分析区域的年龄信息,而不一定代表整个颗粒完整的核一边演化历史。

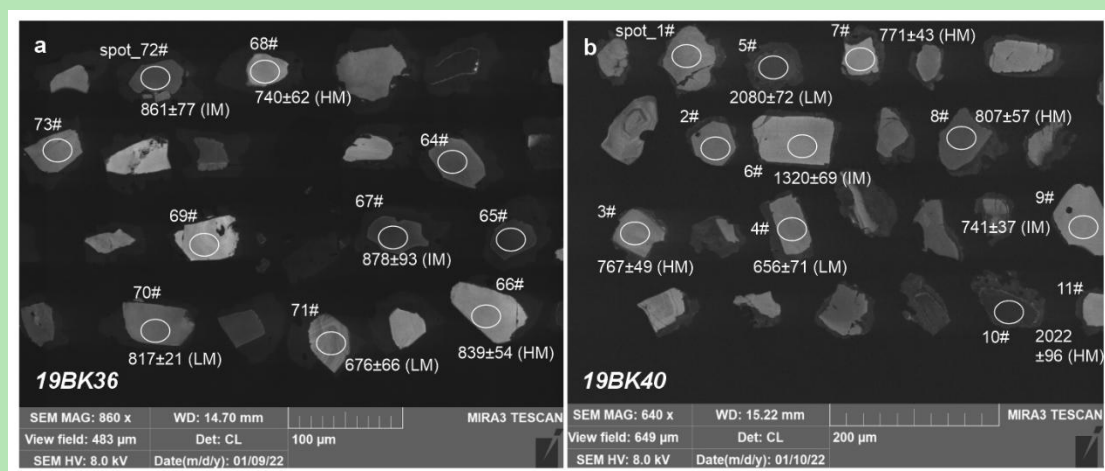


图3 碎屑磷灰石局部阴极发光图像

实心白圈代表 U-Pb 测年点位, 数字对应分析点号编号及其 ^{207}Pb 校正的单点年龄和误差 (1s), 未标注年龄的分析点表示在后续数据筛选过程中已被剔除; 括号中的 IM、LM、HM 为磷灰石微量元素分类结果, 具体说明见正文讨论部分

Fig. 3 Representative cathodoluminescence (CL) images of selected detrital apatite grains

Solid white circles indicate the spots analyzed for U-Pb dating; The numbers denote the analysis spot IDs and their corresponding single-spot ^{207}Pb -corrected ages and uncertainty (1s); spots without labelled ages were excluded during subsequent data screening; IM, LM, and HM in parentheses indicate the apatite trace-element classification results, as discussed in the main text

碎屑磷灰石 U-Pb 定年在合肥中国科学技术大学中国科学院壳幔物质与环境重点实验室完成, 采用激光剥蚀—电感耦合等离子质谱 (LA-ICPMS) 进行分析, 仪器为 193 nm 准分子激光 (Geolas-HD) 剥蚀系统+安捷伦四极杆质谱 (型号为 7900)。实验过程中, 氦气作为载气、氩气作为补充气体, 在进入 ICP 质谱分析前先通过均质机使之与载气混合均匀。激光光斑尺寸为 32 μm 。每次分析都包含一个约 20 秒的背景采集, 随后是约 70 s 的数据采集时间。整个打点过程中为了避免主观挑选颗粒大、自形的磷灰石等人为因素的干扰, 我们对靶区磷灰石直径满足束斑大小的颗粒进行了依次无差别地分析。分析结果使用 Iolite 软件 (Paton *et al.*, 2011) 对数据进行离线分析与处理、时间漂移校正以及微量元素含量校正。磷灰石微量元素含量校正时选择 NIST610 为标样, 内标元素选择 ^{43}Ca 。对于 U-Pb 年龄数据, 使用 VizualAgeUcomPb 插件进行处理, 该插件用于 Iolite 中的 VizualAge DRS, 能够校正标样中变化的普通铅含量 (Chew *et al.*, 2014)。主标样为 Mad (Thomson *et al.*, 2012), 副标样为 Mud Tank。在实验分析过程中获得 Mud Tank 加权平均年龄为 $(456 \pm 14) \text{ Ma}$, 在误差范围内与推荐值一致 $(456 \pm 18 \text{ Ma}$, Sun *et al.*, 2025)。单粒未知磷灰石年龄采用 Chew *et al.* (2011) 方法进行 ^{207}Pb 校正, 该方法基于 Stacey and Kramers (1975) 提出的估算值对每个分析点进行迭代校正。未知磷灰石单颗粒年龄使用 ^{207}Pb 校正的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的相对误差

进行筛选，截取标准是“按比例缩放”的，由于采用固定百分比精度值作为筛选标准容易导致数据集偏向年龄较老的碎屑磷灰石，其中年轻的磷灰石放射成因铅含量较低，普通铅与放射成因铅的比值较高（Chew *et al.*, 2020），使其获得的表观年龄明显偏离磷灰石的真实结晶年龄，从而影响物源分析结果。本文共测试分析碎屑磷灰石 213 颗，其中 175 颗的 ^{207}Pb 校正 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相对误差满足筛选标准，最终保留比例为 >82%。

3 结果

磷灰石 U-Pb 年龄分析结果见图 3 和图 4（附加数据见 ScienceDB 数据集：徐亚婷等，2026）。横丹群碎屑磷灰石多呈自形、半自形，且磨圆度较低（图 3），指示近源搬运特征。部分碎屑磷灰石颗粒具有边部增亮、弱核一边结构或不均一发光特征，而另一些颗粒则表现为相对均一的发光特征（图 3）。总体上，这些特征说明横丹群中的碎屑磷灰石内部结构较为复杂，部分颗粒可能经历了后期改造；但仅凭 CL 图像本身尚不足以对其成因类型作出可靠判别。因此，本文根据磷灰石微量元素组成（Sr/Y 值和 LREE 含量），采用支持向量机（SVM）算法对横丹群碎屑磷灰石进行分类，并赋予每颗碎屑磷灰石可能的源岩类型（图 5）。该方法已被证实能有效区分碎屑磷灰石的不同来源，如 I 型花岗岩类及镁铁质火成岩（IM）、低级—中级变质岩和交代岩（LM）、高级变质型（HM）、S 型花岗岩及高铝饱和指数的 I 型花岗岩（S）、超镁铁质岩（UM）以及富碱火成岩（ALK）（O’Sullivan *et al.*, 2020）。结果显示，横丹群白杨组与秧田坝组的碎屑磷灰石均以 IM 型为主（56%~60%），其次为 LM 型（14%~20%）和 HM 型（12%~18%），而 S 型和 UM 型的占比最少（1%~3%，图 5c~f）。

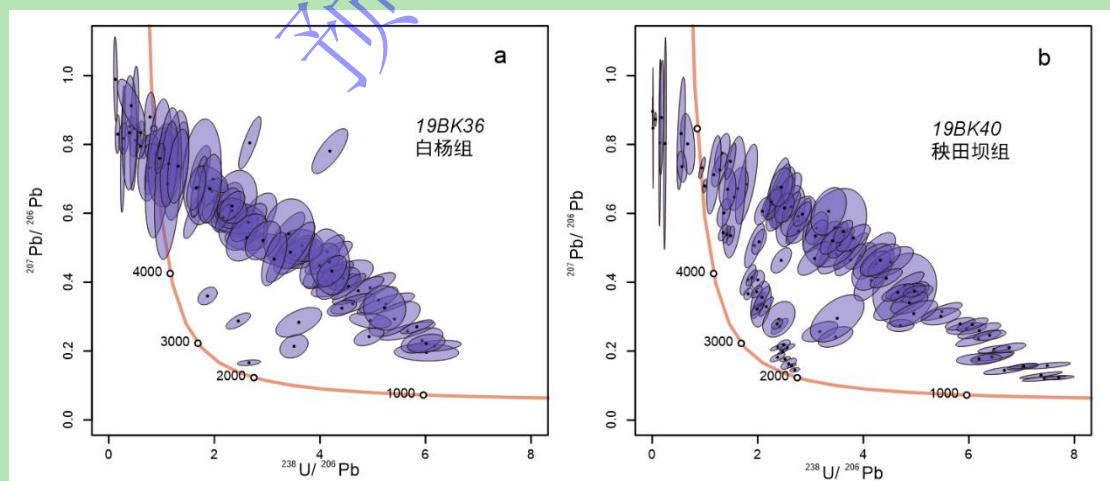


图 4 横丹群碎屑磷灰石的 TW 年龄图解

Fig. 4 Tera-Wasserburg diagrams of detrital apatite in the Hengdan Group

图 6 与图 7 进一步统计了不同类型碎屑磷灰石的 U-Pb 年龄分布特征。其中，占绝大多数的 IM 型的年龄主要集中于 700~900 Ma，并以 770~840 Ma 为主峰区间，少量较老年龄组

分布于中元古代及古元古代（图 6a, b）。LM 型磷灰石出现新元古代和古元古代两个较明显的年龄峰，峰值分别为 830 Ma 和 2 000 Ma。HM 型磷灰石主要出现在新元古代，峰值为 810 Ma，次峰为 2 000 Ma。此外，白杨组中的元古代—中元古代碎屑组分占比高于秧田坝组，而秧田坝组则具有更突出的 770 Ma 年龄峰和约 2 000 Ma 的年龄组分（图 5a, b）。

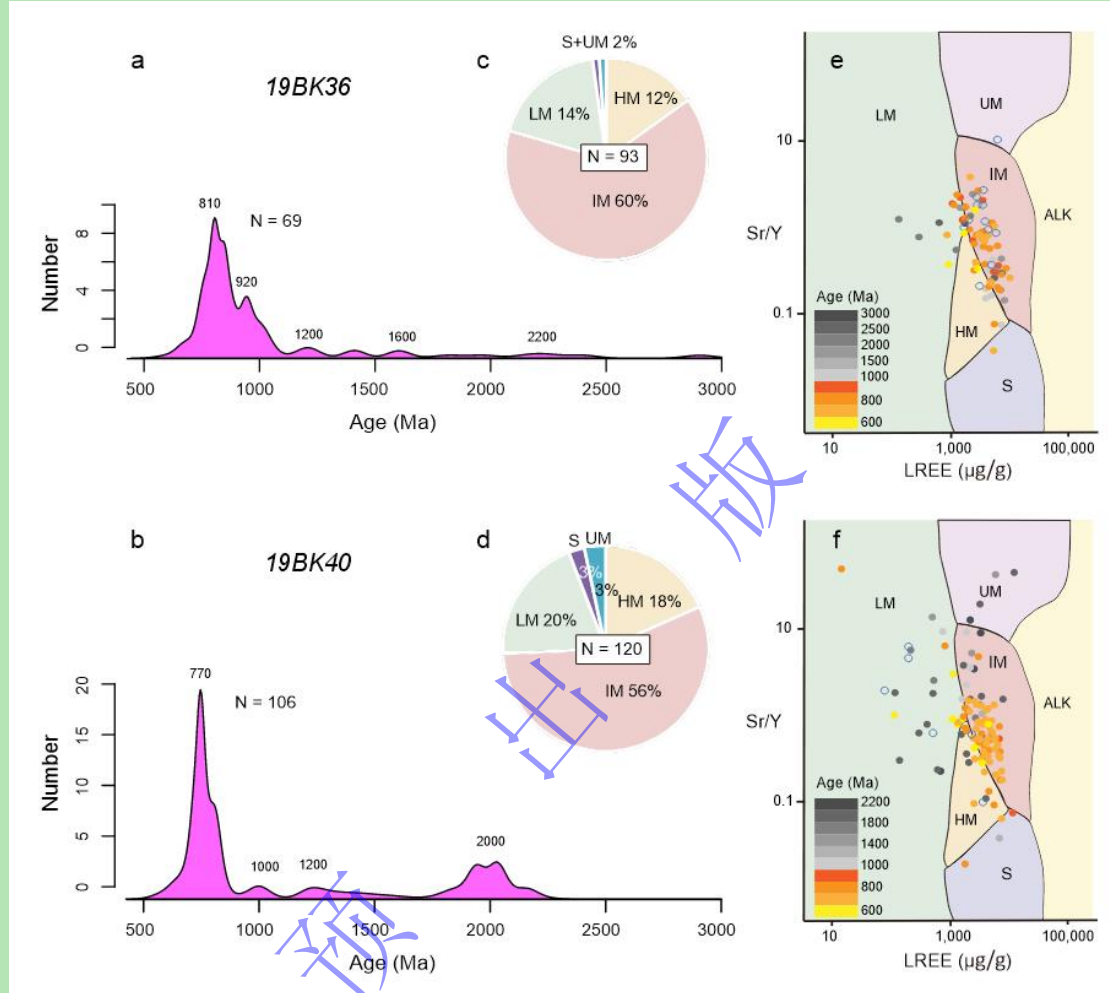


图 5 横丹群碎屑磷灰石 U-Pb 年龄特征及物源判别结果

(a, b) 横丹群碎屑磷灰石 U-Pb 年龄核密度图、(c, d) 各岩性类别比例以及 (e, f) 支持向量机 (SVM) 磷灰石分类图（据 O'Sullivan *et al.*, 2020）；图 e, f 中的空心圆圈表示在后续数据筛选过程中已被剔除的年龄点；缩写：ALK. 富碱火成岩；IM. I 型花岗岩类及镁铁质火成岩；LM. 低—中变质岩和交代岩；HM. 高级变质岩；S. S 型花岗岩及高铝饱和指数的 I 型花岗岩类；UM. 超镁铁质岩

Fig. 5 U-Pb age characteristics and provenance discrimination of detrital apatite from the Hengdan Group Kernel density plots (a, b), proportion of each lithological category (c, d), and support vector machine (SVM) apatite classification diagrams (e, f) for the Hengdan Group (after O'Sullivan *et al.*, 2020); Open circles in Fig. e, f indicate that ages were excluded during subsequent data screening; Abbreviations for groups: ALK. alkali-rich igneous rocks; IM. I-type granitoids and mafic igneous rocks; LM. low- and medium-grade metamorphic and metasomatic rocks; HM. high-grade metamorphic rocks; S. S-type granitoids and high aluminium saturation index (ASI) 'felsic' I-types; UM. ultramafic rocks

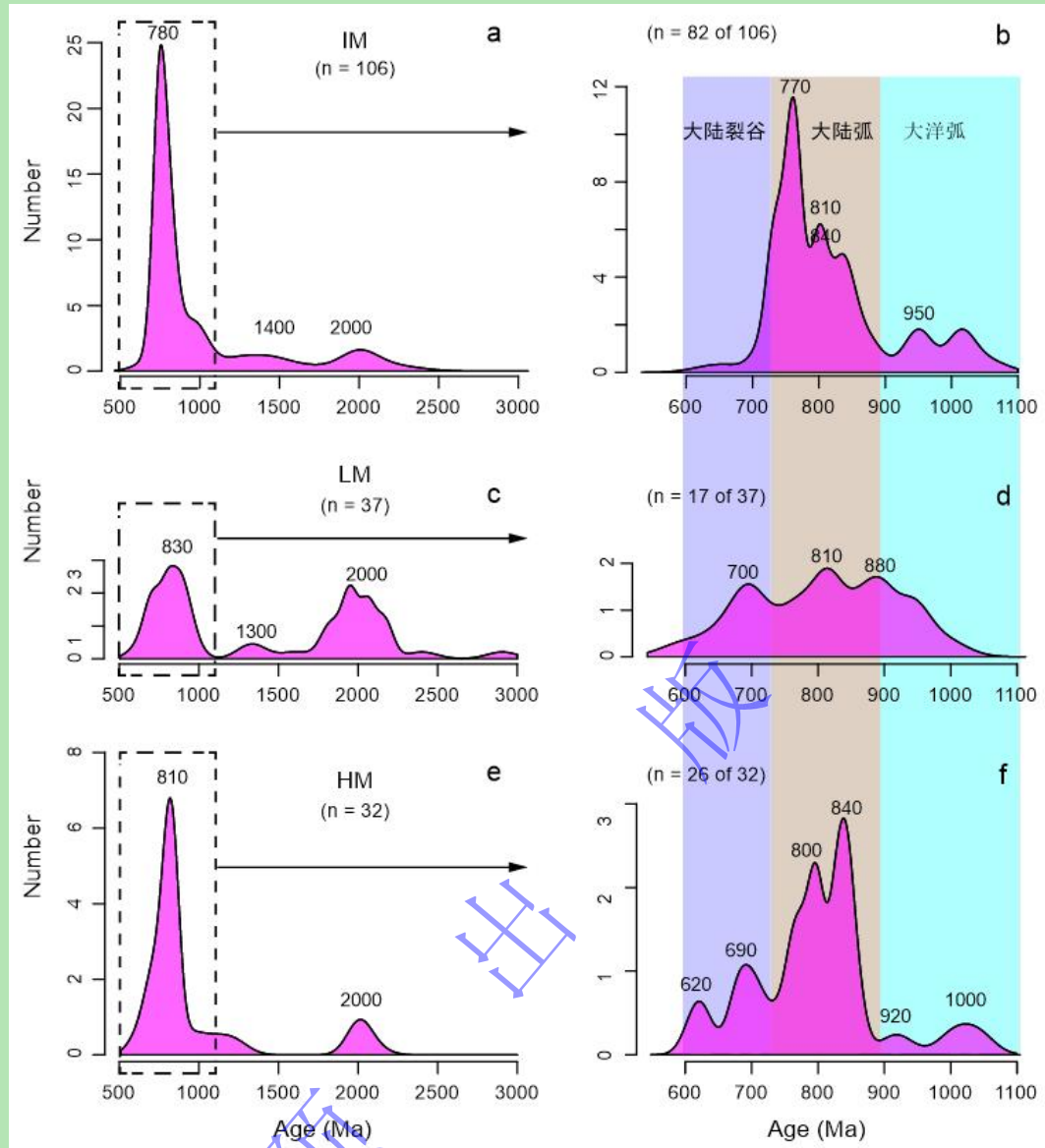


图6 三种主要类型（IM、LM 和 HM 型）碎屑磷灰石的核密度图

图 b、d、f 中关于扬子陆块西北缘新元古代区域构造—岩浆演化阶段的划分是基于前人对研究区岩浆岩、变质岩和沉积岩的综合研究 (Dong *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2024)

Fig. 6 Kernel density plots of detrital apatite of three main types (IM, LM, and HM)

In panels b, d, and f, the division of the Neoproterozoic regional tectonic–magmatic evolution stages on the northwestern margin of the Yangtze Block is based on previous studies of magmatic, metamorphic, and sedimentary rocks in the study area (Dong *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2024)

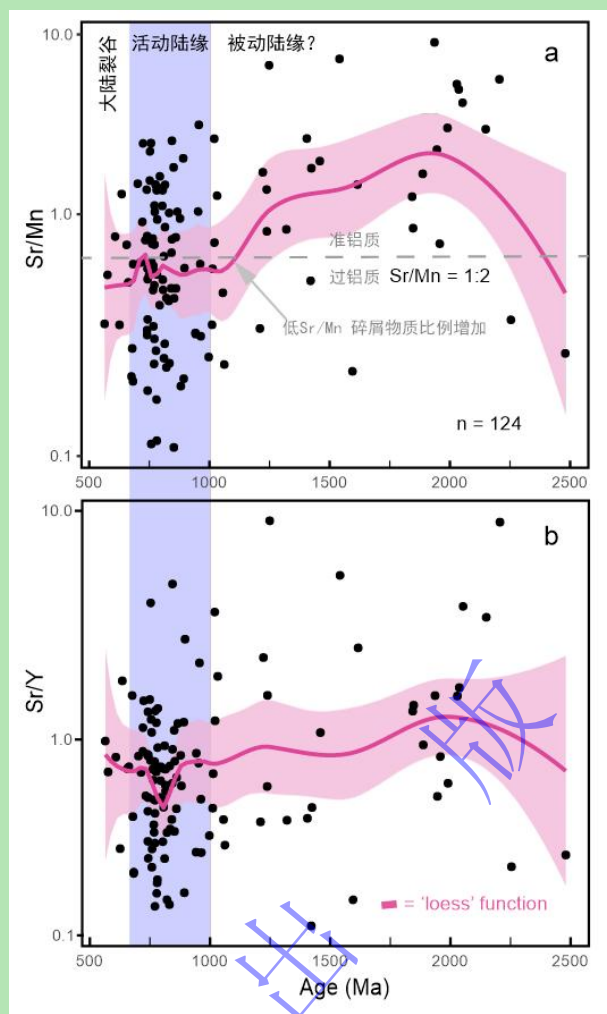


图7 火成来源碎屑磷灰石的年龄—地球化学关系图

(a) Sr/Mn 与 U-Pb 年龄关系图, 虚线为 Sr:Mn = 1:2 经验分界, 用于近似估算不同阶段准铝质 (金属铝质) 与过铝质火成物质的相对贡献; (b) Sr/Y 与 U-Pb 年龄关系图, 用于刻画火成碎屑物源中相对镁铁质—长英质成分的时间变化。两图均仅采用 SVM 判定为 IM 型的颗粒, 曲线为 LOESS 平滑结果。图中阴影区域为区域构造背景的示意性划分, 主要用于对比火成来源碎屑磷灰石年龄—地球化学特征与区域演化阶段之间的关系

Fig. 7 Age-geochemical plots for detrital apatite grains classified as igneous (IM)

(a) Sr/Mn versus U-Pb age. The dashed line at Sr:Mn = 1:2 is used as an empirical boundary to estimate the relative contributions of metaluminous and peraluminous igneous sources through time; (b) Sr/Y versus U-Pb age, showing temporal variation in the relative mafic versus felsic character of igneous detritus; Both panels include only grains classified as IM, and the curves represent LOESS smoothing; The shaded band represents a schematic division of the regional tectonic background, primarily used to compare the relationship between the age-geochemical characteristics of igneous-derived detrital apatite and the regional evolutionary stages

4 讨论

4.1 横丹群的沉积年龄

前人依据横丹群沉积岩中最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄, 将其最大沉积年龄限定为约 720 Ma (Druschke *et al.*, 2006; Sun *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2020; Hui *et al.*, 2021)。然而, 本文的 U-Pb 定年结果中还出现了一组 <720 Ma 的年轻碎屑 ($n = 12$)。关于这些年轻碎屑

磷灰石的成因以及对横丹群的沉积年龄的指示意义,还存在争议。通过结合磷灰石微量元素分析、物源分析,以及区域上构造—岩浆等因素的综合分析,本文更倾向于认为,这批碎屑磷灰石记录的年轻年龄(600~700 Ma)主要反映了横丹群沉积后的区域变质/热事件,而非代表横丹群沉积年龄的上限,理由如下。

首先,这组碎屑磷灰石在微量元素判别图中绝大多数被划分为变质型(LM-HM),而IM型颗粒极少(图6c, d),指示受到了不同程度变质作用的影响。其次,扬子陆块北缘至西北缘在620~720 Ma期间广泛发育多期次的板内岩浆活动,如680 Ma钾长花岗岩和火山岩(牛宝贵等, 2006)、635~650 Ma大规模的耀岭河群火山岩及同期基性岩墙群等(Zhao and Asimow, 2018; Liu *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022),以及620 Ma超基性—基性侵入岩(郭现轻等, 2014)。由于磷灰石U-Pb体系的封闭温度相对较低(375 °C~550 °C, Cochrane *et al.*, 2014),容易在后期热事件、流体活动或溶解—再沉淀过程中发生扰动或部分重置,所以与碎屑锆石相比,年轻的碎屑磷灰石年龄并不能直接用于最大沉积年龄的限定。考虑到区域上新元古代晚期的高温板内岩浆活动与构造热事件很可能干扰并重置了部分早期磷灰石的U-Pb体系,并且这批年轻的碎屑磷灰石颗粒在横丹群下部的白杨组与中上部的秧田坝组中分布比例大致相近(5.8%和6.6%),未表现出明显向上富集的趋势。我们认为最有可能的解释就是:这些年轻的磷灰石年龄是在横丹群沉积之后由于区域变质作用才形成的,它们在沉积后的多期次热事件中又经历了不同程度的重结晶、扰动或部分U-Pb年龄重置。如果这些年轻的磷灰石在横丹群沉积前或沉积时就输入进来,那么理论上它们应该在横丹群的上部层位中富集,而不应该在下部和中上部层位中近乎均匀地分布。综上所述,结合前人碎屑锆石U-Pb年龄证据以及本文中IM型碎屑磷灰石年龄谱及颗粒形态特征,横丹群的沉积年龄应在700~720 Ma左右。

4.2 新元古代横丹群碎屑磷灰石类型变化及其物源意义

横丹群碎屑磷灰石年代学和微量元素判别结果表明,不同类型磷灰石具有明显不同的时间分布特征,说明横丹群不同沉积层位的碎屑磷灰石不仅记录了多阶段物源输入,还可能反映了不同性质源岩在新元古代不同时段相对贡献变化。其中,IM型碎屑磷灰石占绝对优势,年龄主要集中于700~900 Ma,与区域上广泛发育的新元古代弧岩浆活动一致,表明IM型碎屑磷灰石主要来源于该时期的弧岩浆碎屑物质。HM型磷灰石年龄分布范围较宽,除集中于800~900 Ma外,在600~700 Ma区间也有少量出现,表明该时期的热事件对磷灰石U-Pb体系改造的影响;LM型磷灰石则呈现出从约600 Ma至1 000 Ma的连续分布特征。从区域地质背景看,较老的变质成因磷灰石(800~1 000 Ma)可能记录了新元古代早期持续

俯冲背景下的低级至中高级变质作用；而年轻的部分（600~700 Ma）则更可能反映横丹群沉积后的区域变质或热液改造事件。由于在年龄谱上并无截然分界，新元古代早期和中晚期地质过程对变质型磷灰石（LM-HM）的影响可能存在叠加或过渡。整体上看，不同类型碎屑磷灰石的分布反映了横丹群记录中既包含源区物质输入信息，也叠加了后期热事件对磷灰石 U-Pb 体系的改造。

HM 型磷灰石通常形成于较高温压条件下的区域变质或深部地壳部分熔融环境。扬子陆块西北缘的米仓山和北缘陡岭等地区均记录了约 820 Ma 的角闪岩相变质作用，局部甚至发生混合岩化，被认为与弧陆汇聚过程中的地壳增厚、埋藏和后续抬升剥露有关（Berkana *et al.*, 2022; He *et al.*, 2023）。因此，横丹群中 800~900 Ma 的 HM 型碎屑磷灰石很可能记录了这一阶段的中高级变质岩源区物质的输入。相比之下，LM 型磷灰石的解释较为复杂：对于 800~1 000 Ma 的 LM 型磷灰石，目前尚不能排除其记录了新元古代早期持续俯冲背景下浅部地壳源区发生低级变质改造的可能，因为区域上缺乏相关低级变质作用的直接岩石记录，仅存在一些间接证据（如主微量元素与 Nd-Hf-O 同位素）表明扬子陆块西北缘由于俯冲带的前进与后退作用导致区域地壳厚度发生周期性地增厚—减薄的变化趋势（Wu *et al.*, 2024, 2026），弧地壳构造增厚期（860~870 Ma）甚至一度达到约 60 km（Wu *et al.*, 2024）。而对于 600~700 Ma 的碎屑磷灰石，我们认为其反映了横丹群沉积后的区域低级变质/热事件，而非新的碎屑源区的输入，因为这些年轻的 LM 型磷灰石在白杨组与秧田坝组中所占比例大致相近，且与扬子陆块北缘—西北缘广泛发育的 600~700 Ma 板内岩浆事件在时间上高度一致。此类板内岩浆事件及其伴随的热作用，很可能对横丹群中既有磷灰石颗粒产生了不同程度的低级变质或热液改造。基于上述认识，横丹群碎屑磷灰石类型随时间的变化更有可能记录了两个叠加过程：一方面，800~900 Ma 阶段邻近的岩浆弧和中—高级变质基底持续向弧前盆地提供碎屑物质；另一方面，晚期的 600~700 Ma 区域热事件又对沉积后的物质产生了变质叠加改造。因而，HM 型与 LM 型在年龄分布上的差异，为扬子陆块西北缘从早期俯冲增生到晚期伸展热事件转换提供了间接约束。

为进一步识别火成来源碎屑磷灰石所记录的源区岩浆成分演化，将 SVM 判定为 IM 型的磷灰石颗粒单独提取出来，绘制 Sr/Mn—年龄和 Sr/Y—年龄关系图（图 7）。研究表明，火成磷灰石的 Sr/Mn 比值可在一定程度上反映源岩岩浆的铝饱和度和分异程度，其中 Sr:Mn = 1:2 可作为区分相对准铝质与过铝质物质贡献的经验分界；Sr/Y 值则可粗略反映岩浆相对镁铁质—长英质属性及高 Sr/Y 值特征（O'Sullivan *et al.*, 2020）。需要指出的是，这类判别主要适用于火成成因磷灰石，若将 LM 或 HM 颗粒混入讨论，则可能因变质重结晶或溶解

一再沉淀作用导致 Sr、Mn、Y 和 LREE 发生明显迁移，从而干扰对原始岩浆性质的解读。结果显示，900~1 000 Ma 的 IM 型碎屑磷灰石整体表现出相对较高的 Sr/Y 值，部分颗粒同时具有较高的 Sr/Mn 值，反映其源岩具有偏镁铁质且以准铝质为主的新生地壳物质的特征（Chu *et al.*, 2009）；770~840 Ma 阶段，IM 型颗粒的 Sr/Y 值整体降低，而落在 Sr:Mn = 1:2 分界线以下或附近的颗粒比例增加，LOESS 平滑曲线也显示低 Sr/Mn 成分相对增多，表明碎屑物源中相对演化、过铝质的长英质地壳组分逐渐增强（Chu *et al.*, 2009）。结合区域上 820~880 Ma 基性—中性侵入岩、800~840 Ma 弧火山岩以及同期花岗质岩浆活动，以及前人对该地区大量岩浆岩、变质岩和沉积岩的研究工作归纳出的区域构造演化过程（如图 6 中标注的洋内弧、大陆弧等），推测扬子陆块西北缘岩浆弧在新元古代经历了从早期新生弧岩浆向成熟大陆弧岩浆的演化过程，并伴随明显的地壳重熔或同化混染作用（Wu *et al.*, 2020, 2024; Li *et al.*, 2021, 2024; Dong *et al.*, 2024）。该趋势与白杨组至秧田坝组峰值年龄由约 810 Ma 年轻化至约 770 Ma，以及古老碎屑年龄组分减少而新元古代弧岩浆相关碎屑占比上升的演化趋势一致，表明横丹群沉积期间盆地物源区发生了明显调整。值得注意的是，白杨组与秧田坝组碎屑磷灰石年龄峰值之间的明显差异，反映了横丹群沉积期间物源区组成的阶段性变化。白杨组主峰为约 810 Ma，同时保留了相对更多的古元古代—中元古代年龄组分，说明其物源更为分散，既接受了早期弧岩浆物质，也混入了一定比例的古老基底或再循环碎屑；相比之下，秧田坝组主峰更年轻为约 770 Ma，且年龄峰更为集中，表明其沉积时年轻弧岩浆相关物质贡献增强，物源区可能更加集中于邻近晚期弧岩浆暴露区。因而，白杨组与秧田坝组碎屑磷灰石 U-Pb 年龄峰值的差异，很可能反映盆地充填过程中源区剥蚀层位和供源格局的调整，而未必指示两者沉积时代存在同等幅度的差异。另外，720 Ma 代表横丹群的最大沉积年龄约束，并不意味着碎屑磷灰石年龄谱必须出现明显的 720 Ma 峰值。因为最大沉积年龄通常由最年轻可靠碎屑颗粒限定，而不要求成为年龄的峰值。需要强调的是，图 7 所反映的是火成碎屑物源组成的相对变化，而不是对源岩类型的唯一约束，仍需结合区域岩浆岩年代学、碎屑锆石物源重建等来共同解析。

前人对横丹群的碎屑锆石研究已经较好建立了其最大沉积年龄及活动陆缘物源框架（Druschke *et al.*, 2006; Sun *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2020; Hui *et al.*, 2021）。与之相比，本文碎屑磷灰石结果为横丹群物源组成和后期热演化提供了新的补充约束。横丹群碎屑锆石与碎屑磷灰石年龄谱的共同特征是二者主峰均集中于约 780 Ma（图 8），表明横丹群沉积物主体均受新元古代弧岩浆体系控制。然而，二者在年龄分布细节上仍存在明显差异。一方面，碎屑锆石最年轻年龄为约 720 Ma，因此可较可靠地限定横丹群的最大沉积年龄；碎屑

磷灰石含有少量 <720 Ma 的年轻颗粒,但其主要为变质型(HM-LM),更可能记录沉积后的变质或热液改造事件。另一方面,碎屑磷灰石相较碎屑锆石保留了更多 800~1 000 Ma 和中元古代(1 000~1 800 Ma)年龄组分,表明其对中—基性火成岩、低—中级变质岩及部分再循环物源更为敏感;而碎屑锆石中更明显的~2 500 Ma 年龄峰则更好地记录了新太古代古老基底的贡献。值得注意的是,二者均含有~2 000 Ma 年龄组分,说明横丹群物源区中存在古元古代基底组分,或包含由古元古代基底派生的再循环物质的输入。综上所述,碎屑锆石与碎屑磷灰石在横丹群研究中具有明显互补性:碎屑锆石更适于建立沉积时限及长英质岩浆物源的基本框架,而碎屑磷灰石则进一步揭示了弧岩浆物源输入的阶段性调整、变质基底剥露输入以及晚期热事件对沉积体系的叠加改造。二者结合,可更全面地约束扬子陆块西北缘新元古代从长期俯冲增生到晚期热改造的构造演化历史。

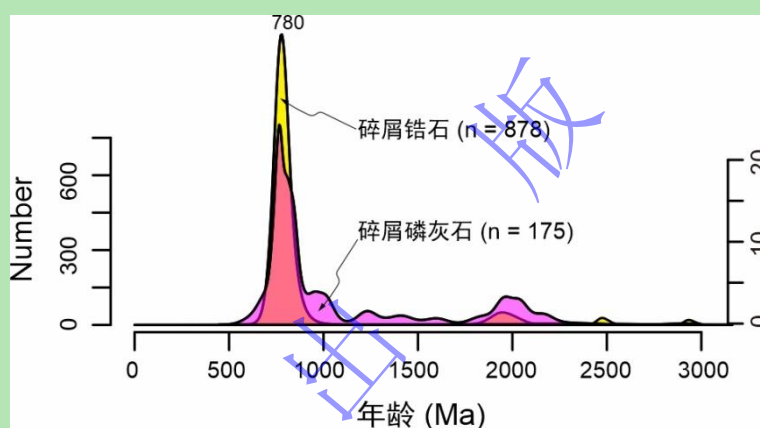


图8 横丹群碎屑锆石与磷灰石 U-Pb 年龄分布对比图

碎屑锆石数据源自 Druschke *et al.*, 2006; Sun *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2020; Hui *et al.*, 2021

Fig. 8 Comparison of detrital zircon and apatite U-Pb age distributions from the Hengdan Group

Literature data of detrital zircons are from Druschke *et al.*, 2006; Sun *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2020; Hui *et al.*, 2021

4.3 扬子陆块西北缘新元古代构造演化及弧前盆地响应

横丹群碎屑磷灰石年龄谱及其类型分布特征表明,该沉积体系不仅记录了邻近源区的物质输入特征,也保存了扬子陆块西北缘新元古代构造—岩浆演化过程在盆地中的响应记录。横丹群主体沉积时期的碎屑供给明显受邻近岩浆弧持续控制:白杨组和秧田坝组的碎屑磷灰石均以 IM 型为主,且年龄主要集中于 720~900 Ma,说明沉积盆地与邻近弧岩浆体系之间存在紧密的源—汇耦合关系。与此同时,白杨组和秧田坝组的主峰年龄分别为约 810 Ma 和 770 Ma,且白杨组保留了相对更多的古元古代—中元古代年龄组分,而秧田坝组中新元古代组分比例更高,表明横丹群沉积期间盆地物源区并非恒定不变,而是经历了由相对分散向更加集中、由古老基底与早期弧岩浆共同供源向年轻弧岩浆物质占优的调整过程。IM 型颗粒的 Sr/Mn—年龄和 Sr/Y—年龄关系进一步显示,较老阶段的火成碎屑物源整体具有相对较

高的 Sr/Y 值和部分较高的 Sr/Mn 值，指示其源岩更偏新生、相对镁铁质和准铝质；而较年轻阶段则表现为更低的 Sr/Y 值和更高比例的低 Sr/Mn 成分，说明碎屑物源中相对演化、较过铝质—长英质的组分逐渐增强。上述变化表明，横丹群不仅记录了弧岩浆物质的持续供给，还记录了该岩浆弧由早期较新生弧岩浆向较成熟大陆弧岩浆演化的过程。

横丹群并非仅记录单一的火成岩弧供源，还保存了汇聚期变质基底剥露的沉积响应。HM 型磷灰石数量虽少于 IM 型，但年龄主要集中于 800~900 Ma，且分布相对集中，表明该类颗粒应具有明确的区域地质意义。结合扬子陆块西北缘米仓山、陡岭等地区约 820 Ma 的角闪岩相变质及局部混合岩化记录（Berkana *et al.*, 2022; He *et al.*, 2023），指示横丹群中的 HM 型颗粒较可能反映了弧陆汇聚过程中的中—高级变质基底的抬升剥露及其向盆地的物质输入。因此，横丹群记录的并不是单纯的“弧岩浆碎屑盆地”，而是一个同时接受弧岩浆物质和汇聚期变质基底碎屑输入的复合源汇体系。这一点也是碎屑磷灰石相较于碎屑锆石在重建盆地—造山带耦合过程中的重要补充（O’Sullivan *et al.*, 2016; O’Sullivan and Chew, 2020; Zhou *et al.*, 2022）。然而，600~700 Ma 的 LM 型年轻颗粒反映的更可能是横丹群沉积后的区域热事件，而不是新的年轻碎屑输入。该年龄段大部分颗粒均落入 LM-HM 型，且在白杨组和秧田坝组中的比例大致相近，并未表现出明显的层位富集趋势。若横丹群主体形成于这一时期或之后，并持续接受 600~700 Ma 年轻物源的输入，则这类颗粒理论上应在更上部层位中明显增多，但实际并未观察到这种现象。结合扬子陆块北缘—西北缘在 600~700 Ma 广泛发育的板内火山岩、侵入岩及基性岩墙群（牛宝贵等，2006; 吴发富等，2012; Zhao and Asimow, 2018; Liu *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022），这些年轻碎屑颗粒更可能记录横丹群沉积后经历的新元古代晚期变质/热事件的影响。

综上所述，横丹群更可能形成于活动陆缘弧前盆地发育晚期，其主体沉积记录了邻近岩浆弧持续供源及物源区逐步向年轻弧岩浆集中演化的过程，同时也保留了汇聚期中—高级变质基底剥露的物质响应；其后，区域构造背景转入晚新元古代伸展—热事件阶段，对盆地中既有磷灰石颗粒产生了明显改造。因此，横丹群所保存的并非单一时刻的构造快照，而是一套同时记录了弧岩浆供源演化、汇聚期变质基底剥露以及晚期热事件叠加改造的复合沉积记录。与区域已有岩浆岩、变质岩和沉积学研究相结合，本文碎屑磷灰石数据进一步支持扬子陆块西北缘在新元古代经历了长期活动陆缘俯冲增生演化，并在晚新元古代发生明显构造体制转换（Zhou *et al.*, 2002a, 2002b, 2006; Dong *et al.*, 2011, 2012, 2017; Zhao *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2019, 2023; Hui *et al.*, 2021）。

5 结论

(1) 横丹群沉积岩中的碎屑磷灰石 U-Pb 年龄总体以新元古代为主, 白杨组和秧田坝组主峰年龄分别为约 810 Ma 和 770 Ma。碎屑磷灰石微量元素 SVM 分类结果显示, 碎屑磷灰石以 I 型花岗岩类及镁铁质火成岩为主, 其次为低—中级变质和交代岩型 (LM) 和高级变质型 (HM), 表明横丹群沉积物主体来源于新元古代弧岩浆体系, 并伴有一定比例的变质基底物质输入。

(2) 横丹群中出现的 600~700 Ma 年轻碎屑磷灰石主要为 LM 型, 其年龄更可能记录沉积后的区域变质/热事件, 而非年轻碎屑物质的输入。综合前人碎屑锆石 U-Pb 年龄以及本研究中 IM 型碎屑磷灰石年龄分布特征, 横丹群的最大沉积年龄应接近 720 Ma; 其主体沉积更可能形成于弧前盆地发育晚期, 或发生在活动大陆边缘向后期裂谷伸展构造背景转换的早期阶段。

(3) 不同类型碎屑磷灰石的年龄分布以及 IM 型颗粒的 Sr/Mn 值、Sr/Y 值随年龄的变化, 共同记录了扬子陆块西北缘新元古代盆地—造山带耦合演化过程: IM 型磷灰石指示 700~900 Ma 期间邻近岩浆弧持续向盆地供源, 且物源区由相对分散逐步转向更集中于年轻弧岩浆; 较老的 (800~1 000 Ma) 变质型 (LM-HM) 磷灰石反映了弧陆汇聚过程中的低级至中—高级变质基底的剥露输入; 而最年轻的 (600~700 Ma) LM-HM 型碎屑颗粒则记录了新元古代晚期区域热事件的改造作用。因此, 碎屑磷灰石不仅记录了横丹群弧岩浆供给源的演化, 也记录了汇聚期变质基底剥露以及晚期热事件叠加改造的影响。

数据可用性声明

支撑本研究的科学数据已在中国科学院科学数据银行 (Science Data Bank, ScienceDB) 平台公开发布, 访问地址为 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.38059> 和 <https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.38059>

致谢 感谢张少兵教授为本文的实验分析测试提供了实验支持。感谢梁婷和姚星宇博士在数据处理过程中的帮助。感谢编辑部老师与审稿专家对论文提出的宝贵修改意见。

参考文献 (References)

- 邓奇, 汪正江, 任光明, 等. 2020. 扬子地块西北缘~2.09 Ga 和~1.76 Ga 花岗质岩石: Columbia 超大陆聚合—裂解的岩浆记录[J]. 地球科学, 45 (9): 3295-3312. [Deng Qi, Wang Zhengjiang, Ren Guangming, et al. 2020. Identification of the ~2.09 Ga and ~1.76 Ga granitoids in the northwestern Yangtze Block: Records of the assembly and break-up of Columbia supercontinent[J]. Earth Science, 45(9): 3295-3312.]
- 邓奇, 汪正江. 2026. 扬子陆块西北缘新元古代早—中期地层与岩浆活动: 进展、争议与认识[J]. 华东地质, 47 (1): 124-140. [Deng Qi, Wang Zhengjiang. 2026. Early-Middle Neoproterozoic strata and magmatism in the northwestern margin of the Yangtze Block: Advances, controversies and insights[J]. East China Geology, 47(1): 124-140.]

- 宫相宽, 陈丹玲, 赵皎. 2013. 陕西铜厂闪长岩地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素研究[J]. 西北地质, 46(3): 50-63. [Gong Xiangkuan, Chen Danling, Zhao Jiao. 2013. Studies on geochemistry, zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope composition of the Tongchang diorites, Shaanxi province[J]. Northwestern Geology, 46(3): 50-63.]
- 郭现轻, 闫臻, 王宗起, 等. 2014. 山阳一柞水矿集区李家砭 Ti-Fe 矿床成矿构造背景研究[J]. 岩石学报, 30(2): 437-450. [Guo Xianqing, Yan Zhen, Wang Zongqi, et al. 2014. Tectonic setting of Lijiabian Ti-Fe deposit in Shanyang-Zhashui ore concentration area, Qinling orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(2): 437-450.]
- 李献华. 2021. 超大陆裂解的主要驱动力: 地幔柱或深俯冲?[J]. 地质学报, 95(1): 20-31. [Li Xianhua. 2021. The major driving force triggering breakup of supercontinent: Mantle plumes or deep subduction?[J]. Acta Geologica Sinica, 95(1): 20-31.]
- 牛宝贵, 和政军, 任纪舜, 等. 2006. 秦岭地区陡岭一小茅岭隆起带西段几个岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质论评, 52(6): 826-835. [Niu Baogui, He Zhengjun, Ren Jishun, et al. 2006. SHRIMP U-Pb ages of zircons from the intrusions in the western Douling-Xiaomaoling uplift and their geological significances[J]. Geological Review, 52(6): 826-835.]
- 平先权, 郑建平, 熊庆, 等. 2014. 扬子西北缘碧口块体花岗质岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(4): 1200-1218. [Ping Xianquan, Zheng Jianping, Xiong Qing, et al. 2014. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics of the granitic plutons in Bikou terrane, northwestern Yangtze Block, and their geological significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 44(4): 1200-1218.]
- 秦克令, 宋述光, 何世平. 1992. 陕西勉略宁地区鱼洞子花岗岩—绿岩地体地质特征及其含金性[J]. 西北地质科学, 13(1): 65-74. [Qin Keling, Song Shuguang, He Shiping. 1992. The geological characteristics of the Yudongzi granite-greenstone terrain and its gold-bearing property in Mianluening area, Shaanxi[J]. Northwest Geoscience, 13(1): 65-74.]
- 吴发富, 王宗起, 王涛, 等. 2012. 南秦岭山阳板板山钾长花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. 矿物岩石, 32(2): 63-73. [Wu Fafu, Wang Zongqi, Wang Tao, et al. 2012. SHRIMP zircons U-Pb ages and geochemical characteristics of the Banbanshan K-feldspar granite in Shanyang, southern Qinling orogenic belt[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 32(2): 63-73.]
- 夏林圻, 夏祖春, 李向民, 等. 2008. 南秦岭东段耀岭河群、陇西群、武当山群火山岩和基性岩墙群岩石成因[J]. 西北地质, 41(3): 1-29. [Xia Linqi, Xia Zuchun, Li Xiangmin, et al. 2008. Petrogenesis of the Yaolinghe Group, Yunxi Group, Wudangshan Group volcanic rocks and basic dyke swarms from eastern part of the South Qinling Mountains[J]. Northwestern Geology, 41(3): 1-29.]
- 徐亚婷, 吴鹏, 惠博, 等. (2026-06-11). 扬子西北缘碧口群碎屑磷灰石 U-Pb 定年数据集[EB/OL]. V1. Science Data Bank, <https://www.scidb.cn/detail?dataSetId=68481b03c1514c92a6451d63594411f7>. [Xu Yating, Wu Peng, Hui Bo, et al. (2026-06-11). Detrital apatite U-Pb dating dataset of the Bikou Group on the northwestern margin of the Yangtze Block[EB/OL]. V1. Science Data Bank, <https://www.scidb.cn/detail?dataSetId=68481b03c1514c92a6451d63594411f7>.]
- 闫全人, Hanson A D, 王宗起, 等. 2004. 扬子板块北缘碧口群火山岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 23(1): 1-11. [Yan Quanren, Hanson A D, Wang Zongqi, et al. 2004. Geochemistry and tectonic setting of the Bikou volcanic terrane on the northern margin of the Yangtze Plate[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 23(1): 1-11.]
- 叶霖, 程增涛, 陆丽娜, 等. 2009. 陕南勉略宁地区铜厂闪长岩岩石地球化学及 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素年代学[J]. 岩石学报, 25(11): 2866-2876. [Ye Lin, Cheng Zengtao, Lu Lina, et al. 2009. Petrological geochronology and zircon SHRIMP U-Pb of Tongchang diorites, Mianluening area, southern Shaanxi province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(11): 2866-2876.]
- 张欣, 徐学义, 宋公社, 等. 2010. 西秦岭略阳地区鱼洞子杂岩变形花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年及地质意义[J]. 地质通报, 29(4): 510-517. [Zhang Xin, Xu Xueyi, Song Gongshe, et al. 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and significance of Yudongzi Group deformation granite from Lueyang area, western Qinling, China[J]. Geological Bulletin of China, 29(4): 510-517.]
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 2001. 鱼洞子群变质岩年龄及秦岭造山带太古宙基底[J]. 地质学报, 75(2): 198-204. [Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan, et al. 2001. On the age of metamorphic rocks of the Yudongzi Group and the archaic crystalline basement of the Qinling orogen[J]. Acta Geologica Sinica, 75(2): 198-204.]
- 赵祥生, 马少龙, 邹湘华, 等. 1990. 秦巴地区碧口群时代层序、火山作用及含矿性研究[J]. 西北地质科学, (29): 1-144. [Zhao Xiangsheng, Ma Shaolong, Zou Xianghua, et al. 1990. The study of the age, sequence, volcanism and mineralization of Bikou Group in Qinling-Dabashan[J]. Northwest Geoscience, (29): 1-144.]

- Ashwal L D, Demaiffe D, Torsvik T H. 2002. Petrogenesis of Neoproterozoic granitoids and related rocks from the Seychelles: The case for an Andean-type arc origin[J]. *Journal of Petrology*, 43(1): 45-83.
- Bader T, Ratschbacher L, Franz L, et al. 2013. The heart of China revisited, I. Proterozoic tectonics of the Qin mountains in the core of supercontinent Rodinia[J]. *Tectonics*, 32(3): 661-687.
- Berkana W, Wu H, Ling W L, et al. 2022. Neoproterozoic metavolcanic suites in the Micangshan terrane and their implications for the tectonic evolution of the NW Yangtze Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 368: 106476.
- Brown M. 2006. Duality of thermal regimes is the distinctive characteristic of plate tectonics since the Neoarchean[J]. *Geology*, 34(11): 961-964.
- Carrapa B, DeCelles P G, Reiners P W, et al. 2009. Apatite triple dating and white mica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of syntectonic detritus in the Central Andes: A multiphase tectonothermal history[J]. *Geology*, 37(5): 407-410.
- Cawood P A, Wang Y J, Xu Y J, et al. 2013. Locating South China in Rodinia and Gondwana: A fragment of greater India lithosphere?[J]. *Geology*, 41(8): 903-906.
- Cawood P A, Strachan R A, Pisarevsky S A, et al. 2016. Linking collisional and accretionary orogens during Rodinia assembly and breakup: Implications for models of supercontinent cycles[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 449: 118-126.
- Chew D, O'Sullivan G, Caracciolo L, et al. 2020. Sourcing the sand: Accessory mineral fertility, analytical and other biases in detrital U-Pb provenance analysis[J]. *Earth-Science Reviews*, 202: 103093.
- Chew D M, Sylvester P J, Tubrett M N. 2011. U-Pb and Th-Pb dating of apatite by LA-ICPMS[J]. *Chemical Geology*, 280(1/2): 200-216.
- Chew D M, Petrus J A, Kamber B S. 2014. U-Pb LA-ICPMS dating using accessory mineral standards with variable common Pb[J]. *Chemical Geology*, 363: 185-199.
- Chu M F, Wang K L, Griffin W L, et al. 2009. Apatite composition: Tracing petrogenetic processes in Transhimalayan granitoids[J]. *Journal of Petrology*, 50(10): 1829-1855.
- Cochrane R, Spikings R A, Chew D, et al. 2014. High temperature (>350 °C) thermochronology and mechanisms of Pb loss in apatite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 127: 39-56.
- Cui X Z, 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 Cuohe complex, SW China[J]. *Precambrian Research*, 357: 106155.
- Dong Y P, Liu X M, Santosh M, et al. 2011. Neoproterozoic subduction tectonics of the northwestern Yangtze Block in South China: Constrains from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic intrusions in the Hannan massif[J]. *Precambrian Research*, 189(1/2): 66-90.
- Dong Y P, Liu X M, Santosh M, et al. 2012. Neoproterozoic accretionary tectonics along the northwestern margin of the Yangtze Block, China: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 196-197: 247-274.
- Dong Y P, Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling orogenic belt, central China[J]. *Gondwana Research*, 29(1): 1-40.
- Dong Y P, Sun S, Yang Z, et al. 2017. Neoproterozoic subduction-accretionary tectonics of the South Qinling belt, China[J]. *Precambrian Research*, 293: 73-90.
- Dong Y P, Hui B, Sun S, et al. 2024. The links between Neoproterozoic tectonics, paleoenvironment and Cambrian explosion in the Yangtze Block, China[J]. *Earth-Science Reviews*, 248: 104638.
- Draut A E, Clift P D. 2013. Differential preservation in the geologic record of intraoceanic arc sedimentary and tectonic processes[J]. *Earth-Science Reviews*, 116: 57-84.
- Druschke P, Hanson A D, Yan Q R, et al. 2006. Stratigraphic and U-Pb SHRIMP detrital zircon evidence for a Neoproterozoic continental arc, central China: Rodinia implications[J]. *The Journal of Geology*, 114(5): 627-636.
- Fisher C M, Vervoort J D. 2018. Using the magmatic record to constrain the growth of continental crust: The Eoarchean zircon Hf record of Greenland[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 488: 79-91.
- Gao F, Pei X Z, Li R B, et al. 2020. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern margin of the Yangtze Block (southwestern

- China): Evidence from sandstone geochemistry and detrital zircon U-Pb ages of the Hengdan Group[J]. *Precambrian Research*, 344: 105737.
- Ge R F, Zhu W B, Zheng B H, et al. 2012. Early Pan-African magmatism in the Tarim Craton: Insights from zircon U-Pb-Lu-Hf isotope and geochemistry of granitoids in the Korla area, NW China[J]. *Precambrian Research*, 212-213: 117-138.
- Guo J L, Gao S, Wu Y B, et al. 2014. 3.45 Ga granitic gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for Early Archean crustal growth[J]. *Precambrian Research*, 242: 82-95.
- He Y, Wu Y B, Zhao Y J, et al. 2023. Neoproterozoic amphibolite-facies metamorphism of the Douling complex in the northern Yangtze Craton and its tectonic implications: Constraints from petrology and zircon U-Pb-Hf-O isotopes[J]. *Precambrian Research*, 390: 107039.
- Hietpas J, Samson S, Moecher D, et al. 2010. Recovering tectonic events from the sedimentary record: Detrital monazite plays in high fidelity[J]. *Geology*, 38(2): 167-170.
- Hui B, Dong Y P, Cheng C, et al. 2017. Zircon U-Pb chronology, Hf isotope analysis and whole-rock geochemistry for the Neoproterozoic-Paleoproterozoic Yudongzi complex, northwestern margin of the Yangtze Craton, China[J]. *Precambrian Research*, 301: 65-85.
- Hui B, Dong Y P, Zhang F F, et al. 2021. Neoproterozoic active margin in the northwestern Yangtze Block, South China: New clues from detrital zircon U-Pb geochronology and geochemistry of sedimentary rocks from the Hengdan Group[J]. *Geological Magazine*, 158(5): 842-858.
- Iizuka T, Hirata T, Komiya T, et al. 2005. U-Pb and Lu-Hf isotope systematics of zircons from the Mississippi River sand: Implications for reworking and growth of continental crust[J]. *Geology*, 33(6): 485-488.
- Kemp A I S, Hawkesworth C J, Paterson B A, et al. 2006. Episodic growth of the Gondwana supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon[J]. *Nature*, 439(7076): 580-583.
- Konopásek J, Janoušek V, Oyhantçabal P, et al. 2018. Did the circum-Rodinia subduction trigger the Neoproterozoic rifting along the Congo-Kalahari Craton margin?[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 107(5): 1859-1894.
- Li J Y, Wang X L, Gu Z D. 2018. Early Neoproterozoic arc magmatism of the Tongmuliang Group on the northwestern margin of the Yangtze Block: Implications for Rodinia assembly[J]. *Precambrian Research*, 309: 181-197.
- Li J Y, Tang M, Lee C T A, et al. 2021. Rapid endogenic rock recycling in magmatic arcs[J]. *Nature Communications*, 12(1): 3533.
- Li J Y, Wang X L, Cawood P A, et al. 2024. Neoproterozoic low-*T/P* metamorphism in the Yangtze Block manifests a long-lived subduction girdle around Rodinia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 634: 118678.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 173(3): 171-181.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 122(1/2/3/4): 85-109.
- 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.
- Liu H, Zhao J H, Li L M. 2022. Opening of the Proto-Tethys Ocean: Implications from the Late Neoproterozoic mafic dike swarms in the South Qinling belt, South China[J]. *Gondwana Research*, 101: 44-58.
- Moecher D P, Samson S D. 2006. Differential zircon fertility of source terranes and natural bias in the detrital zircon record: Implications for sedimentary provenance analysis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 247(3/4): 252-266.
- Murphy J B, Pisarevsky S, Nance R D. 2013. Potential geodynamic relationships between the development of peripheral orogens along the northern margin of Gondwana and the amalgamation of West Gondwana[J]. *Mineralogy and Petrology*, 107(5): 635-650.
- O'Sullivan G J, Chew D M. 2020. The clastic record of a Wilson Cycle: Evidence from detrital apatite petrochronology of the Grampian-Taconic fore-arc[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 552: 116588.
- O'Sullivan G, Chew D, Kenny G, et al. 2020. The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance

- studies[J]. *Earth-Science Reviews*, 201: 103044.
- O'Sullivan G J, Chew D M, Samson S D. 2016. Detecting magma-poor orogens in the detrital record[J]. *Geology*, 44(10): 871-874.
- Paton C, Hellstrom J, Paul B, et al. 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(12): 2508-2518.
- Piccoli P M, Candela P A. 2002. Apatite in igneous systems[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1): 255-292.
- Reimink J R, Pearson D G, Shirey S B, et al. 2019. Onset of new, progressive crustal growth in the central Slave craton at 3.55 Ga[J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 10(10): 8-13.
- Rubatto D, Williams I S, Buick I S. 2001. Zircon and monazite response to prograde metamorphism in the Reynolds Range, central Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(4): 458-468.
- Spencer C J, Mitchell R N, Brown M. 2021. Enigmatic mid-Proterozoic orogens: Hot, thin, and low[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(16): e2021GL093312.
- Stacey J S, Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2): 207-221.
- Stern R J. 2005. Evidence from ophiolites, blueschists, and ultrahigh-pressure metamorphic terranes that the modern episode of subduction tectonics began in Neoproterozoic time[J]. *Geology*, 33(7): 557-560.
- Sun G C, Chen M Y, Huo J J, et al. 2025. Enhanced chlorine content calibration method for simultaneous determination of apatite U-Pb age and trace elements by LA-ICP-MS[J]. *Atomic Spectroscopy*, (2): 185-197.
- 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(1/2): 99-126.
- Thomas W A. 2011. Detrital-zircon geochronology and sedimentary provenance[J]. *Lithosphere*, 3(4): 304-308.
- Thomson S N, Gehrels G E, Ruiz J, et al. 2012. Routine low-damage apatite U-Pb dating using laser ablation-multicollector-ICPMS[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(2): Q0AA21.
- Wang R R, Xu Z Q, Santosh M. 2023. Mid-Late Neoproterozoic tectonic evolution of the northern margin of the Yangtze Block, South China, as constrained from the detrital Zircon record[J]. *GSA Bulletin*, 135(5/6): 1449-1466.
- Wang W, Liu S W, Feng Y G, et al. 2012. Chronology, petrogenesis and tectonic setting of the Neoproterozoic Tongchang dioritic pluton at the northwestern margin of the Yangtze Block: Constraints from geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopic systematics[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 699-716.
- Wang X C, Li X H, Li W X, et al. 2008. The Bikou basalts in the northwestern Yangtze Block, South China: Remnants of 820-810 Ma continental flood basalts?[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 120(11/12): 1478-1492.
- Wu P, Zhang S B, Zheng Y F, et al. 2019. Amalgamation of South China into Rodinia during the Grenvillian accretionary orogeny: Geochemical evidence from Early Neoproterozoic igneous rocks in the northern margin of the South China Block[J]. *Precambrian Research*, 321: 221-243.
- Wu P, Zhang S B, Zheng Y F, et al. 2020. The occurrence of Neoproterozoic low $\delta^{18}\text{O}$ igneous rocks in the northwestern margin of the South China Block: Implications for the Rodinia configuration[J]. *Precambrian Research*, 347: 105841.
- Wu P, Zhang S B, Li Z X, et al. 2023. Secular change in the nature of mantle and tectonic evolution of northwestern margin of the Yangtze Block during Neoproterozoic: Constraints from the mafic intrusions and associated granitoids of the Hannan and Xiaomoling complexes[J]. *Precambrian Research*, 393: 107094.
- Wu P, Wu Y B, Zhang S B, et al. 2024. Revisiting Neoproterozoic tectono-magmatic evolution of the northern margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth-Science Reviews*, 255: 104825.
- Wu P, Zhang S B, Zheng Y F, et al. 2026. Episodic rifting magmatism along the northern margin of the South China Block: Implications for the breakup of Rodinia[J]. *GSA Bulletin*, 138(3/4): 1157-1178.
- Xian H B, Zhang S H, Li H Y, et al. 2020. Geochronological and palaeomagnetic investigation of the Madiyi Formation, Lower Banxi Group, South China: Implications for Rodinia reconstruction[J]. *Precambrian Research*, 336: 105494.
- Xiao L, Zhang H F, Ni P Z, et al. 2007. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of Early Neoproterozoic mafic-intermediate intrusions

- from NW margin of the Yangtze Block, South China: Implication for tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 154(3/4): 221-235.
- Yan Q R, Hanson A D, Wang Z Q, et al. 2004. Neoproterozoic subduction and rifting on the northern margin of the Yangtze Plate, China: Implications for Rodinia reconstruction[J]. *International Geology Review*, 46(9): 817-832.
- Zhang G W, Meng Q R, Lai S C. 1995. Tectonics and structure of the Qinling orogenic belt[J]. *Science in China. Series B*, 38: 1379-1394.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. 2006. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze Craton of China[J]. *Precambrian Research*, 146(1/2): 16-34.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu P, et al. 2020. The nature of subduction system in the Neoproterozoic: Magmatic records from the northern Yangtze Craton, South China[J]. *Precambrian Research*, 347: 105834.
- Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, et al. 2011. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny[J]. *Geology*, 39(4): 299-302.
- Zhao J H, Asimow P D. 2018. Formation and evolution of a magmatic system in a rifting continental margin: Neoproterozoic arc- and MORB-like dike swarms in South China[J]. *Journal of Petrology*, 59(9): 1811-1844.
- Zhao J H, Li Q W, Liu H, et al. 2018. Neoproterozoic magmatism in the western and northern margins of the Yangtze Block (South China) controlled by slab subduction and subduction-transform-edge-propagator[J]. *Earth-Science Reviews*, 187: 1-18.
- Zhao L M, Li Y L, Rong C, et al. 2022. Geochemical and zircon U-Pb-Hf isotopic study of volcanic rocks from the Yaolinghe Group, South Qinling orogenic belt, China: Constraints on the assembly and breakup of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 371: 106603.
- Zhou G Y, Wu Y B, Li L, et al. 2018. Identification of ca. 2.65 Ga TTGs in the Yudongzi complex and its implications for the early evolution of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 314: 240-263.
- Zhou G Y, Li L, Xiao G Q, et al. 2022. New constraints on the source of loess from U/Th-Pb geochronology of detrital multi-minerals[J]. *Geology*, 50(10): 1156-1160.
- Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, et al. 2002a. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of South China: Implications for the accretion of Rodinia[J]. *The Journal of Geology*, 110(5): 611-618.
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. 2002b. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1/2): 51-67.
- Zhou M F, Ma Y X, Yan D P, et al. 2006. The Yanbian terrane (southern Sichuan province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 144(1/2): 19-38.

Detrital Apatite Records of Neoproterozoic Subduction–Accretion Evolution Along the Northwestern Margin of the Yangtze Block

XU YaTing¹, WU Peng¹, HUI Bo², DONG YunPeng²

1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: [Objective] Forearc basins along active continental margins can effectively preserve important sedimentary records of the tectonic, magmatic, and metamorphic evolution of adjacent magmatic arcs. The Hengdan Group exposed in the Bikou area at the northwestern margin of the Yangtze Block, serves as a well-preserved Neoproterozoic forearc-basin succession. However, its response to arc-related tectono-magmatic processes in adjacent areas remains poorly constrained. [Methods] In situ U-Pb dating and trace-element analyses

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42403010

Corresponding author: WU Peng, E-mail: pengwu@cdut.edu.cn

were conducted on detrital apatite from sedimentary rocks of the lower Baiyang Formation and middle-upper Yangtianba Formation of the Hengdan Group. These data were combined with genetic-type discrimination of apatite to reveal changes in provenance composition and their response to the Neoproterozoic subduction–accretion evolution along the northwestern margin of the Yangtze Block. **[Results]** Detrital apatite ages from the Hengdan Group are dominated by Neoproterozoic populations, with major age peaks at approximately 810 Ma and 770 Ma for the Baiyang and Yangtianba formations, respectively. The Baiyang Formation contains relatively more Paleoproterozoic to Mesoproterozoic detrital components, indicating a greater contribution from ancient basement materials during its deposition. Based on apatite trace-element characteristics and SVM classification results, detrital apatite from the Hengdan Group is dominated by I-type granitoids and mafic igneous rocks (IM), with ages mainly concentrated between ca. 740 and 860 Ma, corresponding to regional Neoproterozoic arc magmatism. High-grade metamorphic apatite (HM) shows age peaks concentrated at 800–900 Ma, which may record the exhumation and input of regional high-grade metamorphic basement during arc–continent convergence. Low- to medium-grade metamorphic and metasomatic apatite (LM) displays two age groups of 800–1000 Ma and 600–700 Ma. The former may be related to low- to medium-grade metamorphism under a prolonged early Neoproterozoic subduction setting, whereas the latter may record the influence of late Neoproterozoic intraplate magmatic thermal events. The age peak of IM-type detrital apatite youngs from ca. 810 Ma in the Baiyang Formation to ca. 770 Ma in the Yangtianba Formation. Together with the age-related variations in Sr/Mn and Sr/Y ratios, this trend indicates that the provenance of the basin shifted from relatively diverse sources to a dominance of young arc-derived magmatic materials during deposition of the Hengdan Group, and that the magmatic arc itself evolved from a juvenile arc system into a more mature continental arc system. **[Conclusion]** Integrated detrital apatite U-Pb geochronology and trace-element characteristics suggest that the main deposition of the Hengdan Group most likely occurred during the late stage of active continental-margin forearc-basin development under a long-lived Neoproterozoic subduction–accretionary setting along the northwestern margin of the Yangtze Block, or during the early stage of transition to post-orogenic extension environment. The maximum depositional age of the Hengdan Group should be close to 720 Ma, and the succession was subsequently overprinted by late Neoproterozoic regional thermal events.

Key words: detrital apatite; geochronology; Neoproterozoic; Yangtze Block; subduction-accretion