

引用格式:高悦阳,李红,金佳宁,等. 2026. 扬子陆块北缘汉中地区成冰纪冰期沉积岩与锆石 U-Pb 年龄[J]. 沉积学报, 44(4): 1333-1352.

GAO YueYang, LI Hong, JIN JiaNing, et al. 2026. Cryogenian Sedimentary Rocks and Zircon U-Pb Age in Hanzhong Area, Northern Margin of the Yangtze Block[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(4): 1333-1352.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.013

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.013

扬子陆块北缘汉中地区成冰纪冰期沉积岩与锆石 U-Pb 年龄

高悦阳, 李红, 金佳宁, 穆娅榕, 李宗霖

大陆演化与早期生命国家重点实验室, 西北大学地质学系 西安 710069

摘要 【目的】华南地区扬子陆块广泛保存了新元古代成冰纪“雪球地球”时期的沉积记录, 该时期冰川研究一直是沉积学热点问题, 但西缘康滇裂谷和扬子陆块北缘—秦岭南缘裂谷盆地成冰纪沉积岩的报道相对较少。【方法】以扬子陆块北缘汉中地区钢厂—元坝剖面为研究对象, 在剖面实测基础上, 对冰期沉积岩底部沉凝灰岩和上部砂岩中的锆石进行了 U-Pb 定年分析 (LA-ICP-MS 法), 并探讨了冰期持续时间、沉积充填特征及区域对比。【结果与结论】在汉中地区新元古代成冰纪沉积岩中识别出下、上两套冰碛岩, 均为陆相冰川, 冰碛岩之间和之上发育砂岩和粉砂岩。冰碛岩底部与莲沱组分界处沉凝灰岩锆石最年轻谱和年龄的加权平均值为 $(719 \pm 11) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.75$), 表明其可能形成于 Sturtian 冰期, 两套冰碛岩大致对应于南华系长安组和古城组。这套冰期沉积岩不仅可与盆地内镇巴、城口地区同期沉积岩对比, 而且跟华南其他地区 Sturtian 冰期沉积岩的发育规律也有相似性。

关键词 扬子陆块北缘; “南沱组”; 冰川沉积; Sturtian 冰期; 锆石 U-Pb 测年

第一作者 高悦阳, 男, 1999 年出生, 硕士研究生, 沉积学, E-mail: g2592692037@163.com

通信作者 李红, 女, 副教授, E-mail: lihong2008@nwu.edu.cn

中图分类号: P588.2 P597.3 P534.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0550(2026)04-1333-20

0 引言

新元古代中晚期, 全球陆续发生了 4 次具有标志性的冰期事件, 按照时间先后分别为 Kaigas 冰期 (约 757~741 Ma, 持续约 16 Ma)、Sturtian 冰期 (约 720~660 Ma, 持续约 60 Ma)、Marinoan 冰期 (约 649~635 Ma, 持续约 14 Ma) 和 Gaskiers 冰期 (约 584~580 Ma, 持续约 4 Ma) (Bowring *et al.*, 2003; 赵彦彦和郑永飞, 2011; Shields-Zhou *et al.*, 2016; Hoffman *et al.*, 2017)。其中, 成冰纪 (720~635 Ma, 我国称为南华纪, Nanhuan Period; 储雪蕾等, 2005) Sturtian 冰期和 Marinoan 冰期因持续时间长、冰盖分布范围甚至到达了低纬度古赤道附近, 被称为两次“雪球地球”事件 (Hoffman *et al.*, 2017)。Kaigas 冰期和 Gaskiers 冰期影响范围相对较小、持续时间也较短, 目前仅零

星分布于北美、爱尔兰、中国塔里木盆地和澳大利亚等地区 (Karlstrom *et al.*, 2000; Thompson and Bowring, 2000; Bowring *et al.*, 2003; Calver *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2005; Kirkland *et al.*, 2025)。

Sturtian 冰期 (又称下冰期; 张启锐和储雪蕾, 2006) 的持续时间最长, 沉积记录广泛分布于南美洲、北美洲、非洲, 欧亚大陆和大洋洲 (图 1; Karlstrom *et al.*, 2000; Thompson and Bowring, 2000; Bowring *et al.*, 2003; Schaefer and Burgess, 2003; Calver *et al.*, 2004; Kendall *et al.*, 2004, 2006; Zhou *et al.*, 2004; 储雪蕾等, 2005; Condon *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2005; 张启锐和储雪蕾, 2006; Stanevich *et al.*, 2007; Fanning and Link, 2008; Zhang *et al.*, 2008a; Macdonald *et al.*, 2010; Babinski *et al.*, 2013; Du *et al.*, 2013; Lan *et al.*, 2014; MacLennan *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2019; Zhou

收稿日期: 2025-01-27; 修回日期: 2025-04-07; 录用日期: 2025-08-18; 网络出版日期: 2025-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272115); 陕西省自然科学基金项目 (2025JC-YBMS-303); 西北大学高水平教材建设项目

贵州将军山大塘坡组底部凝灰层中分别获得了(664.2 ± 2.4) Ma (LA-ICP-MS)、(659.3 ± 2.4) Ma (SIMS) 及(657.3 ± 3.2) Ma 的锆石 U-Pb 年龄。上述研究表明, 华南地区 Sturtian 冰期结束时间大致介于 667~657 Ma, 可见 Zhou *et al.* (2019) 关于 Sturtian 冰期结束时间于~660 Ma 的建议是合理的。

Marinoan 冰期(也称上冰期; 张启锐和储雪蕾, 2006) 沉积岩的全球分布特征与 Sturtian 冰期类似, 但范围更大, 被认为是新元古代分布最广的冰期沉积记录(图 1)。Marinoan 冰期沉积岩在华南地区对应于南华系南沱组(650~635 Ma), 在川西被称为列古六组(时代归属仍有争议; 旷红伟等, 2023), 大巴山城口地区叫木座组, 皖南地区称为雷公坞组, 湘西洪江—黔阳一带是洪江组, 黔东南一带为黎家坡组等(周传明等, 2001; 彭学军等, 2004; 江卓斐等, 2018; 陈骁帅等, 2023)。关于南沱冰期的启动时间, Zhang *et al.* (2008b) 在湘西吉首市附近大塘坡组顶部和南沱组底部凝灰岩层中分别获得(654.5 ± 3.8) Ma、(636.3 ± 4.9) Ma (均为 SHRIMP) 锆石加权平均年龄; Liu *et al.* (2015) 在湖北长阳大塘坡组中部凝灰岩夹层中得到(654.2 ± 2.7) Ma (SIMS) 锆石加权平均年龄; 李明龙等(2019) 在鄂西走马地区大塘坡顶部泥岩中获得(651 ± 7.7) Ma (LA-ICP-MS) 的最年轻碎屑锆石年龄; 陈骁帅等(2023) 在大巴山城口地区木座组(即南沱组)底部杂砾岩中获得(643.6 ± 5.6) Ma 的最年轻锆石年龄。针对南沱冰期结束时间, 储雪蕾等(2005) 曾于江西上饶地区南沱组杂砾岩上的火山灰层中获得了(635.3 ± 5.4) Ma (TIMS) 锆石 U-Pb 年龄。Condon *et al.* (2005) 在三峡地区陡山沱组帽白云岩底部之上 2.3 m 富泥火山灰中得到(635.2 ± 0.6) Ma 的锆石 U-Pb 年龄。Zhou *et al.* (2019) 在滇东峨山彝族自治县南沱组杂砾岩顶部凝灰质泥岩中获得(634.57 ± 0.88) Ma (CA-ID-TIMS) 高精度锆石 U-Pb 年龄。兰中伍(2023) 根据前人在旋回地层学和锆石定年方面的研究成果, 建议将华南地区 Marinoan 冰期的开启时间定于 649~639 Ma, 终止于 635 Ma。年代学研究表明, 无论是 Sturtian 冰期还是 Marinoan 冰期, 华南地区的各冰期沉积揭示的时间记录比较一致, 并且均能与全球成冰纪很好地对应, 充分说明华南地区冰川事件是全球新元古代成冰事件的一部分(图 2; Zhou *et al.*, 2004, 2019; 储雪蕾等, 2005; Condon *et al.*, 2005; 尹崇玉等, 2006; Zhang *et al.*, 2008b; 高维和张传恒,

2009; 崔晓庄等, 2013; Lan *et al.*, 2014, 2015, 2020; 高林志等, 2015; 伍皓等, 2015; 江卓斐, 2016; Song *et al.*, 2017; 蔡娟娟等, 2018; 陈骁帅等, 2023; 马晓晨, 2023; 金姜颖等, 2024)。

扬子陆块是华南大陆壳的重要组成部分, 新元古代冰期事件在该地区保留大量的沉积记录。该时期处于 Rodinia 超大陆汇聚—裂解等活动和地球生态环境演化的关键阶段, 因此该时期冰川研究一直是沉积学热点问题。其中扬子陆块东南缘裂谷盆地的研究程度较高, 在岩石地层格架对比、冰川沉积学、冰期期次和年代地层格架、古地理和古环境演化等方面取得了众多重要成果。相较而言, 西缘康滇裂谷和扬子陆块北缘—秦岭南缘裂谷盆地(简称为扬子北缘裂谷盆地)成冰纪沉积岩的报道较少(陈骁帅等, 2023; 旷红伟等, 2023; 金姜颖等, 2024), 在冰川发育期次、沉积相及与邻区地层对比方面可参考的资料有限。本文以汉中地区南郑区钢厂—元坝剖面新元古界南沱组为研究目标, 在野外实测基础上, 分析沉积岩的岩石组合、沉积构造、凝灰岩和凝灰质砂岩中锆石 U-Pb 年龄特征, 并与镇巴、城口地区进行了初步对比, 探讨扬子陆块北缘裂谷盆地新元古界成冰系的充填和演化特征, 以期对相关研究提供实际材料。

1 地质背景

汉中地区位于扬子陆块北缘, 与秦岭造山带一起夹于我国华北和华南两大板块之间, 构造位置属于多构造域结合部, 北邻秦岭造山带, 南邻四川盆地, 西与龙门山与松潘—甘孜地块相隔(图 3a)。该区上元古界发育较为齐全, 包括火地垭群的铁船山组、西乡群和刘坪组, 及莲沱组、南沱组(即《陕西省区域地质志》(陕西省地质矿产局, 1989)中描述的下震旦统未分, The Lower Sinian System), 还有陡山沱组与灯影组(《陕西省区域地质志》中描述的上震旦统, The Upper Sinian System)。在研究区一带, 莲沱组主要为山麓堆积的粗碎屑岩, 南沱组为冰水沉积的含砾粗砂岩、砾岩、含砾黏土质页岩等。

扬子陆块北缘—秦岭南缘裂谷盆地南华系和青白口系(原下震旦统)岩相、厚度变化剧烈(马润华, 1998)。陕西省内, 莲沱组零星分布于宁强、勉县、西乡及镇巴等地, 岩性包括河、湖相紫红—暗红色、灰色、浅灰色、灰绿色、蓝灰色中厚层状砂砾岩、含凝灰质砂岩、长石杂砂岩、薄层状粉砂岩、含砾粉砂岩、板

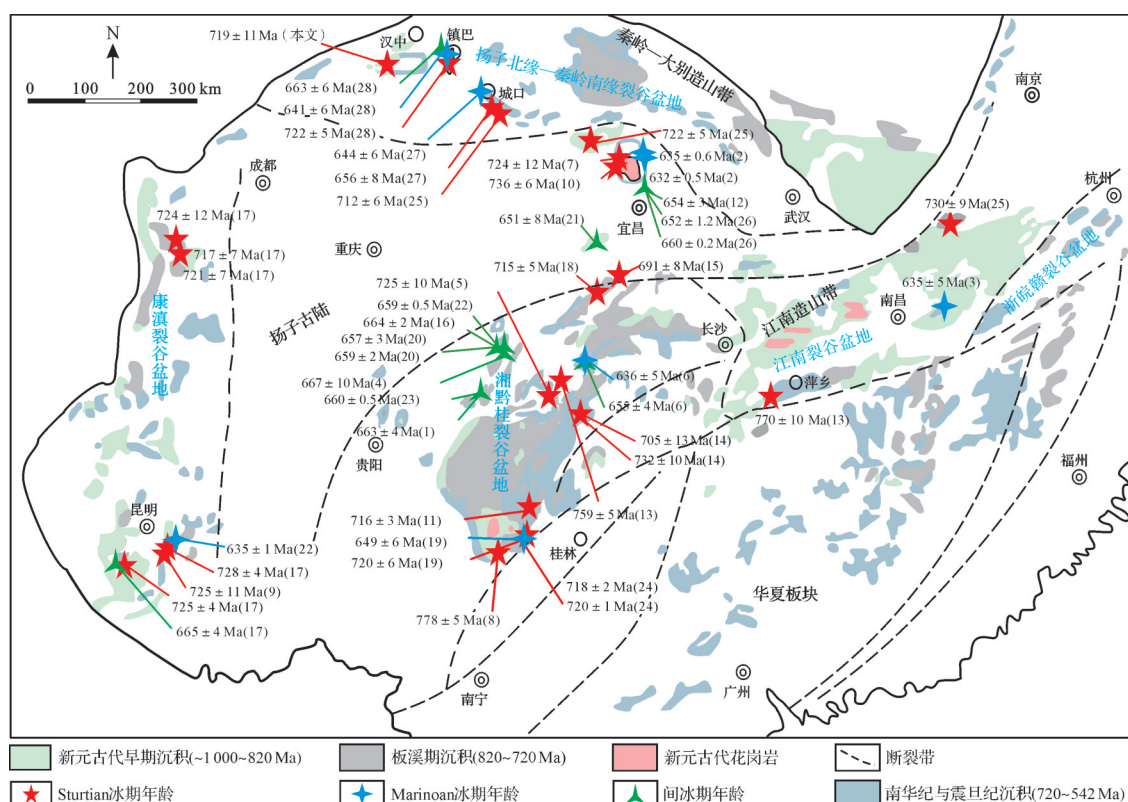


图2 华南板块成冰纪各冰期、间冰期分布图(底图据旷红伟等, 2017 修改)

1. 大塘坡组底部凝灰岩夹层(Zhou *et al.*, 2004); 2. 陡山沱组底部凝灰岩(Condon *et al.*, 2005); 3. 蓝田组底部火山灰层(储雪雷等, 2005); 4. 大塘坡组底部凝灰岩夹层(尹崇玉等, 2006); 5-板溪群上部凝灰岩(Zhang *et al.*, 2008); 6. 大塘坡组顶部、南沱组底部凝灰岩(Zhang *et al.*, 2008); 7. 莲沱组顶部凝灰岩(高维和张传恒, 2009); 8. 长安组底部凝灰岩(高林志等, 2013); 9. 澄江组顶部凝灰岩(崔晓庄等, 2013); 10. 莲沱组顶部凝灰岩(Du *et al.*, 2013); 11. 板溪群顶部凝灰岩夹层(Lan *et al.*, 2014); 12. 大塘坡组中部凝灰岩(Liu *et al.*, 2015); 13. 赣湘交界官溪村长安组底部、湘西北铁山乡长安组底部凝灰岩(高林志等, 2015); 14. 古城组底部下方(富禄组)含砾粗砂岩、岩门寨组(板溪组)顶部凝灰质板岩(伍皓等, 2015); 15. 渠水河组顶部凝灰质粉砂岩(Lan *et al.*, 2015); 16. 大塘坡组底部凝灰岩(余文超等, 2016); 17. 开建桥组顶部凝灰质岩、“列古六组”底部凝灰质冰碛岩、“南沱组”底部凝灰质砂岩、“南沱组”上段底部泥质砂岩(江卓斐, 2016); 18. 板溪群上段五强溪组顶部砂岩(Song *et al.*, 2017); 19. 南沱组底部凝灰岩夹层、长安组底部含砾泥岩(蔡娟娟等, 2018); 20. 大塘坡组底部凝灰岩(Wang *et al.*, 2019); 21. 大塘坡组顶部泥岩(李明龙等, 2019); 22. 南沱组顶部凝灰质泥岩、大塘坡组底部凝灰岩(Zhou *et al.*, 2019); 23. 大塘坡组底部凝灰岩(Zhou *et al.*, 2020); 24. 拱洞组顶部凝灰质粉砂岩(Lan *et al.*, 2020); 25. 城口龙潭河组顶部、神农架莲沱组顶部、皖南休宁组顶部凝灰岩(王玉冲等, 2023); 26. 大塘坡下部、大塘坡顶部凝灰岩(马晓晨, 2023); 27. 代安河组一段、木座组杂砾岩(陈晓帅等, 2023); 28. 长安组、古城组、南沱组含砾粗砂岩(姜颖等, 2024); 所有年龄数据和误差均做取整处理

Fig.2 Distribution of Cryogenian glaciations and interglaciation in South China (base map modified from Kuang *et al.*, 2017)

岩、凝灰质含砾片岩和千枚岩等;由下往上碎屑粒度由粗变细,砂岩成分成熟度低,含大量长石,说明距离物源区较近,局部灰绿色与紫红色交替出现,且含较多砾岩,下与花岗岩呈角度不整合接触或与铁船山组呈断层接触,顶界与南沱组呈平行不整合接触(马润华, 1998)。南沱组在陕西省内主要分布在镇巴、略阳、宁强、南郑一带,陕西区调队 1978 年在南郑区钢厂一带于“汉南花岗岩”之上、陡山沱组中一厚层海相碎屑岩—碳酸盐岩之下发现了一套厚度超过 150 m 的砾岩,遂将该砾岩归入南沱组(马润华, 1998)。本文研究重点即为南郑区钢厂这套位于陡山沱组砂质细晶白云岩、细一中晶白云岩之下的陆源碎屑岩组合。

2 野外工作、取样与测试方法

2.1 野外剖面地质特征

钢厂—元坝剖面位于汉中市南郑区汉黎路边,新元古界以角度不整合覆于一套酸性岩浆岩之上,向上依次发育莲沱组、“南沱组”、陡山沱组和灯影组,岩石组合清晰,接触关系明确(图 3b、图 4)。

2.1.1 莲沱组

莲沱组是钢厂—元坝剖面的第一套沉积盖层,实测厚度约 43 m,与下伏酸性岩浆岩角度不整合接触。镜下观察发现,这套岩浆岩除少量花岗岩和花岗斑岩外,主要为流纹岩和流纹斑岩等酸性火山岩和超浅成岩,时代为青白口纪(马润华, 1998),代表

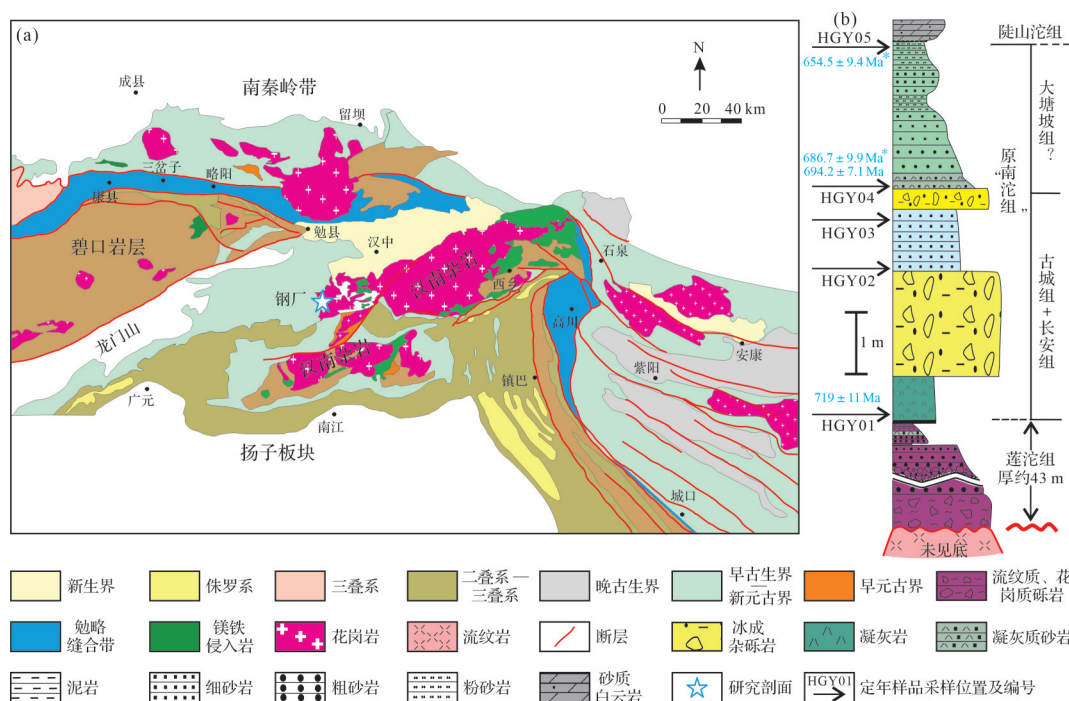


图3 汉中地区构造简图和实测剖面柱状图

(a)汉中地区构造简图(据高晒,2014修改);(b)钢厂—元坝剖面“南沱组”柱状图和取样位置;“(654.5±9.4) Ma”、“(686.7±9.9) Ma”为凝灰质砂岩中单颗最年轻锆石年龄;“(694.2±7.1) Ma”为凝灰质砂岩中5颗<700 Ma峰值的锆石加权平均值;仅作参考

Fig.3 Simplified geological map and lithological column of the measured section, Hanzhong area

了新元古代Rodinia大陆裂解的构造动力学背景下,扬子陆块北缘转入伸展裂谷构造时的岩浆活动(张国伟等,2013)。莲沱组下段为杂砾岩到肉红色细砂岩的岩性组合,向上粒度渐细;底部为厚约2 m的红褐色杂砾岩,无明显层理,砾径介于2 mm~7 cm,砾石成分为花岗质和流纹质,分选、磨圆极差,大小混杂,棱角或次棱角状为主,排列无定向,填隙物为细粒砂、泥混合物,杂基支撑;杂砾岩之上为肉红色含砾粗砂岩、粗砂岩和细砂岩,偶夹黑色泥质条带,多为块状层理,偶见平行层理。莲沱组中段为粗砾岩—粗砂岩组合,岩性转为厚约10 m的紫红、杂色中—粗砾岩、砂砾岩及粗砂岩,发育块状层理、递变层理,砾石分选极差,但有一定磨圆度,次棱角—次圆状,底部发育大型冲刷面(图4a)。镜下观察粗砂岩颗粒分选差,以次圆—次棱角状为主,碎屑颗粒除石英、正长石、微斜长石外,常见流纹岩、流纹斑岩、酸性凝灰岩等岩屑(图5a),说明物源来自下伏地层岩系。莲沱组上段粒度渐细,逐渐变为紫红色细砾岩、粗砂岩、细砂岩和粉砂质泥岩等(图4b),顶部为浅黄绿色砂岩和泥岩,夹有薄层黑色泥质条带。细砾岩的砾径介于2~4 mm,分选中等,次圆状,发育平行层理,泥岩中见水平层理。

2.1.2 “南沱组”

“南沱组”在钢厂—元坝剖面实测厚度约6.08 m,底部与莲沱组似平行不整合接触,并发育一层80 cm厚的浅灰绿色含粉砂凝灰岩(图4c)。该凝灰岩胶结疏松,镜下观察含有约20%的粉砂—细砂级陆源碎屑,应属沉凝灰岩,碎屑粒径介于0.05~0.15 mm,成分以石英和酸性火山岩,如流纹岩为主,次棱角状,火山灰含量约为80%,局部发生伊利水云母化(图5b,c)。按照岩性组合规律,可将“南沱组”分为上、下两段。

下段:底部为厚层块状冰碛岩,厚度1.72 m,无层理,岩性为土黄色砾岩和凝灰质砾岩。砾石直径2~10 cm,分选差,呈次圆—次棱角状,砾石排列杂乱,成分为石英、花岗岩和凝灰岩,填隙物为火山灰(图4d)。冰碛岩之上为厚约96 cm的黄色细粒长石砂岩,块状构造,粒径介于0.10~0.25 mm,颗粒包括石英、正长石、微斜长石等,还可见少量酸性火山岩和凝灰岩岩屑,分选较好,次棱角—次圆状,颗粒支撑,填隙物仍为火山灰,多发生伊利水云母化(图5d,e)。

上段:底部为中层状黄灰色冰碛砾岩,厚约30 cm,砾石也为花岗质,粒径7~10 cm,分选差,砾石表面见擦痕,无定向排列,以次棱角状为主,胶结疏

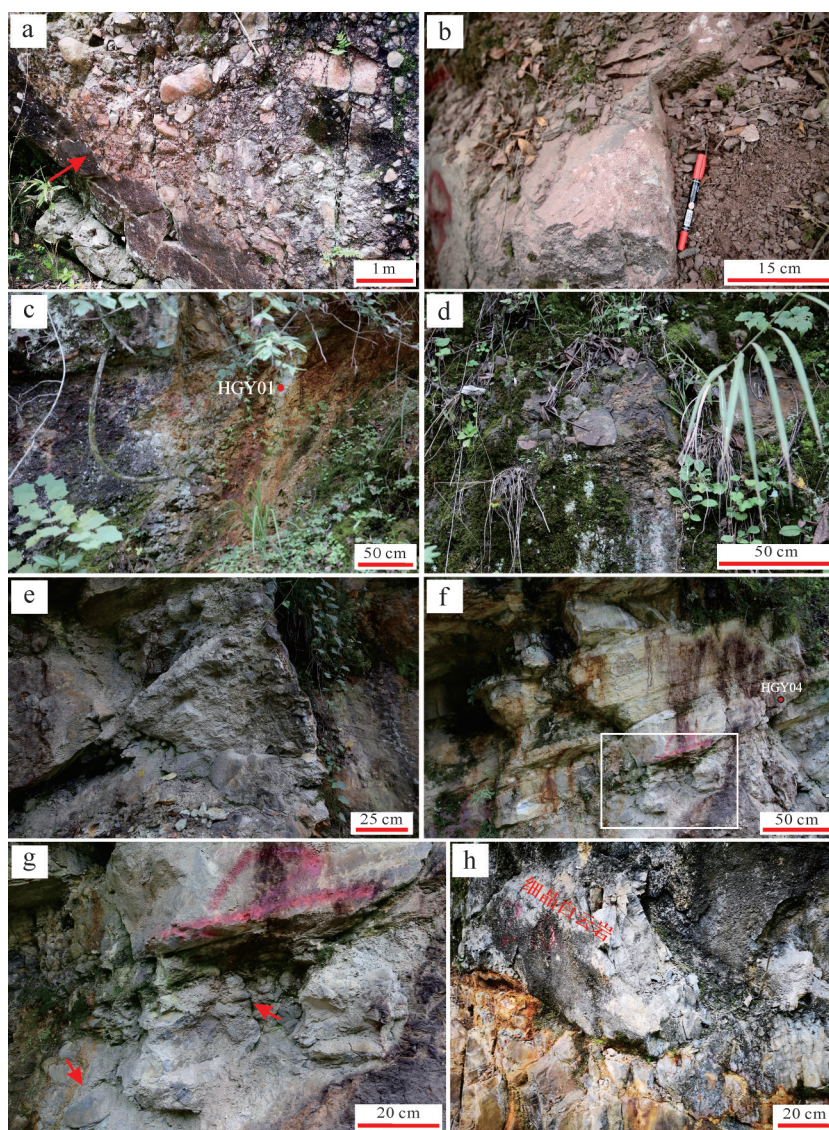


图4 汉中地区钢厂—元坝剖面新元古界野外特征

(a) 莲沱组中段粗砾岩底部发育大型冲刷面(红色箭头所指),砾石分选极差,次棱角一次圆状;(b) 莲沱组顶部紫红色细砾岩和粗砂岩;(c) “南沱组”底部浅灰绿色沉凝灰岩,样品 HGY01 取样点;(d) “南沱组”下部冰碛杂砾岩;(e) “南沱组”上部冰碛砾岩,砾石为花岗岩,表面可见擦痕;(f) “南沱组”上部中砂岩—粉砂岩构成的向上渐细的递变层理,砂岩见平行层理,顶部为厚约 10 cm 的薄层粉砂岩,样品 HGY04 取样处;(g) 照片 f 中白线框内放大图片,红色箭头指示上段冰碛岩的砾石,砾石分选差,之上为中层状长石砂岩,具平行层理;(h) 虚线上方为陡山沱组中层状砂质细晶白云岩,下方黄褐色的为“南沱组”顶部凝灰质砂岩和粉砂岩

Fig.4 Neoproterozoic field features in Gangchang-Yuanba section, Hanzhong area

松,填隙物为火山灰(图 4e~g)。冰碛岩之上是 4 个由粗—中砂岩至粉砂岩组成的层系组,厚度约为 2.3 m。单个层系组厚 40~60 cm,底部为浅黄绿色凝灰质粗—中粒长石砂岩,厚约 30~50 cm,上部为厚约 10 cm 粉砂岩(图 4f,g)。砂岩、粉砂岩胶结疏松,碎屑颗粒分选差,呈次圆一次棱角状,多为石英、正长石、微斜长石,岩屑主要包括流纹岩、凝灰岩、花岗岩和砂岩等,填隙物仍是伊利水云母化的火山灰(图 5f)。上段砂岩常见平行层理,属牵引流作用的产物,粉砂岩发育水平层理,未见冰坠石构造。单个层系

组由平行层理变为水平层理,反映了水动力由强到弱的转变。

2.1.3 陡山沱组

剖面上陡山沱组实测厚度约为 40 m,与“南沱组”似为整合接触(图 4h)。岩性组合呈现三段式特点,下段为厚约 20 m 的砂质细晶白云岩和细—中晶白云岩,向上厚度变薄,为细—中晶白云岩和泥—粉晶藻云岩,细晶白云岩中白云石多为自形晶,表面常发生去云化作用被方解石交代(图 5g,h);中段厚度约为 14 m,由灰黑色页岩和灰褐色白云岩构成薄互

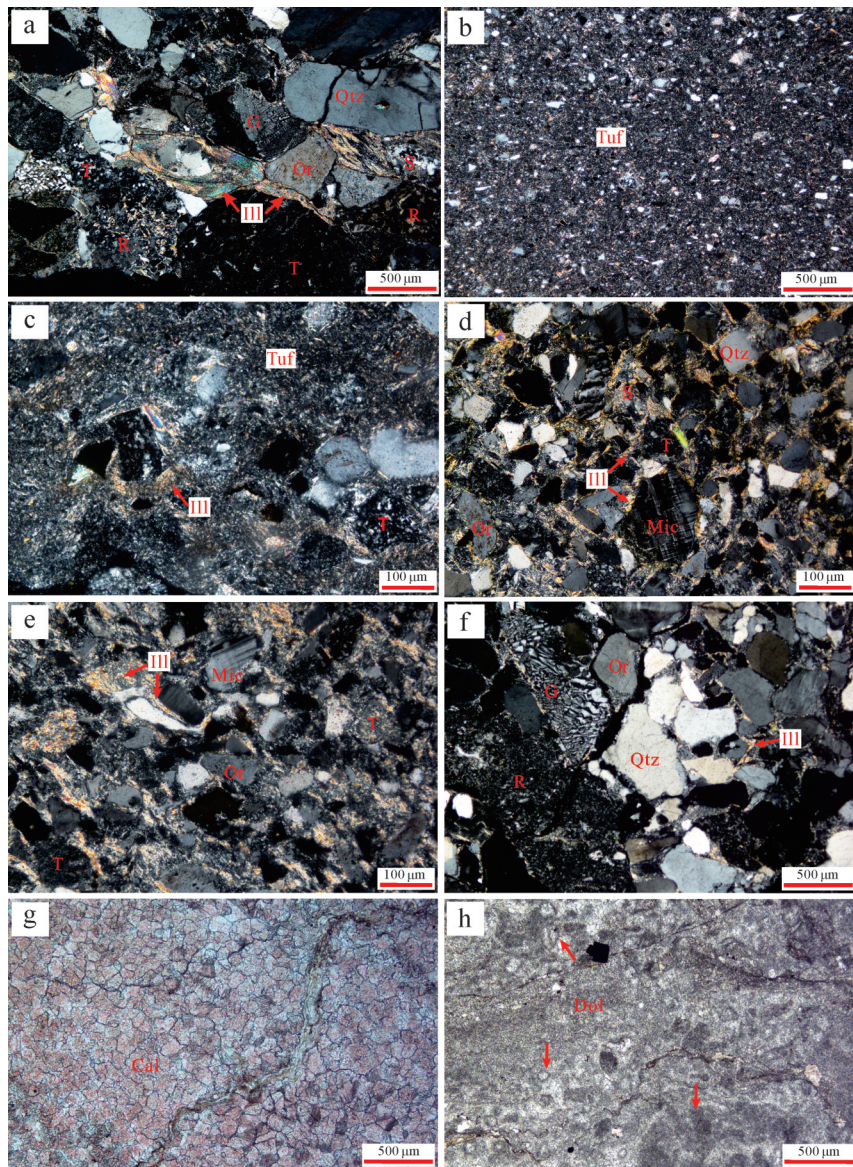


图5 汉中地区钢厂—元坝剖面沉积岩镜下特征

(a)莲沱组伊利水云母胶结中—粗粒岩屑砂岩,填隙物为伊利水云母化的火山灰;(b,c)“南沱组”底部沉凝灰岩,含约20%粉砂和细砂级陆源碎屑,火山灰局部有伊利水云母化(样品 HGY01);(d)“南沱组”下段细粒长石砂岩,填隙物为伊利水云母化火山灰(样品 HGY02);(e)“南沱组”下段细粒长石砂岩(样品 HGY03);(f)“南沱组”上段粗—中粒长石砂岩,填隙物为伊利水云母化火山灰(样品 HGY04);(g)陡山沱组底部,细晶白云岩,多数白云石表面发生去云化作用被粉红色方解石交代,染色薄片;(h)陡山沱组泥—粉晶藻云岩,藻粒和藻团块有重结晶,结构不清晰(红色箭头所指);Cal. 方解石;Dol. 白云石;Ill. 伊利水云母;Mic. 微斜长石;Or. 正长石;Qtz. 石英;Tuf. 火山灰;G. 花岗岩;R. 流纹岩;S. 砂岩;T. 凝灰岩

Fig.5 Photomicrographs of sedimentary rocks in Gangchang-Yuanba section, Hanzhong area

层,发育水平层理,顶部变为黄绿色、紫红色粉砂质泥岩、页岩和细砂岩互层;上段厚度约为6 m,为灰白、土黄色厚层块状中—细粒岩屑长石砂岩,隐约见平行层理,砂岩粒径0.1~0.5 mm,填隙物为伊利水云母,砂岩层面可见大量白云母碎片。

2.2 样品采集与挑选

南郑区钢厂—元坝剖面莲沱组取样10余件,“南沱组”取样20余件,制成岩石薄片用于岩相学分析。

另外,选取1件沉凝灰岩、4件凝灰质砂岩进行锆石颗粒挑选、阴极发光(CL)成像、LA-ICP-MS法(激光剥蚀电感耦合等离子体质谱)锆石U-Pb定年及微量元素含量分析。样品打点位置和锆石年龄见图3b,样品 HGY01 为浅灰绿色沉凝灰岩,位于剖面“南沱组”底部;样品 HGY02、HG03 为凝灰质细粒长石砂岩,位于“南沱组”中部;样品 HGY04 为黄色凝灰质长石砂岩,位于“南沱组”上段冰碛岩顶部;样品 HGY05

为凝灰质中粒长石砂岩,采于“南沱组”顶部(图3b)。

样品处理过程如下:将块状岩石样品粉碎至60目以下,先用人工重砂方法富集锆石,然后在双目镜下挑选。每件样品初选出199~224颗锆石颗粒,将挑好的锆石颗粒粘在双面胶上,固定在透明的环氧树脂中,和树脂一起打磨抛光,直至露出锆石内部,以适合 LA-ICP-MS 分析。对抛光后的锆石进行反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)成像分析。凝灰岩 HGY01 样品根据锆石 CL 图像进行了二次筛选,去掉环带模糊、边缘破损、穿孔、有裂纹的锆石颗粒,保留震荡环带清楚、边缘平直或轮廓完整的35颗锆石进行测试分析。凝灰质砂岩样品 HGY02、HGY03 经上述二次筛选后,各保留32颗和33颗锆石测试。凝灰质砂岩 HGY04 和 HGY05 样品则分别挑选了90颗和87颗自形一半自形的锆石进行测试。所选锆石的测试点位均根据反射光和透射光图像,避开表面裂隙和内部包体,保证数据质量。

2.3 锆石年龄测试方法

锆石年龄及微量元素含量分析在中国地质调查局西安市地质调查中心完成。实验采用的电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)为美国 Agilent 公司生产的7700x 型四级杆质谱仪,激光剥蚀系统(LA)为德国 Coherent 公司生产的 GeoLas pro193 nm ArF 准分子激光器。激光剥蚀束斑为24 μm ,氦气作为载气、氩气作为补偿气以调节灵敏度。测试过程中,每6个样品点打一组标样:91500、GJ-1 和 NIST610,分别用于锆石 U-Pb 年龄的校正和监控,以及锆石微量元素含量的校正;数据处理采用 Glitter4.0 软件完成(包括对样品和空白信号的选择、同位素分馏及仪器漂移的校正等),年龄结果误差为 2σ ;对年龄大于1 000 Ma 的锆石采用其 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄,而对于年龄小于1 000 Ma 的锆石则采用其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。所有数据未进行普通铅校正,锆石 U-Pb 年龄谐和图、加权平均年龄图以及年龄分布频谱图均通过 Isoplot3.0 程序获得(叶亚康等,2020)。

3 南沱组碎屑锆石 U-Pb 年龄

目前常用7种锆石 U-Pb 测年统计方法(Dickinson and Gehrels, 2009):①最年轻单颗粒年龄(YSG);②最年轻图像碎屑锆石年龄(YPP);③最年轻碎屑锆石年龄(YDZ);④加权平均年龄(YC1 σ)(+3);⑤加权平均年龄(YC2 σ)(+3);⑥算术平均年

龄(WA);⑦Tuffzirc 年龄(+6),即至少需要6颗最年轻的碎屑锆石做加权平均年龄。其中方法①和⑦为最常用的碎屑锆石年龄统计法,本文也依此进行数据处理。

本文1件沉凝灰岩与4件凝灰质砂岩的锆石共获得277组 U-Pb 年龄数据,全部数据谐和度介于89%~109%(图6,7)。其中来自沉凝灰岩和砂岩中火山灰填隙物的岩浆锆石约62颗,其峰值年龄为720 Ma(图7a,b);所有碎屑锆石215颗,除4颗 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄>1.0 Ga 锆石外(分别来自 HGY04 号和 HGY05 号样品),其余碎屑锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于901~655 Ma(图8)。

3.1 沉凝灰岩锆石年龄

样品 HGY01 含粉砂凝灰岩位于“南沱组”底部,选出的锆石无色透明,晶形完整,粒径集中在50~150 μm ,多为粒状、短柱状或针状,阴极发光下显示出明显的震荡环带结构(图6)。对其中35颗锆石进行 U-Th-Pb 同位素分析,U 含量介于23~257 mg/g、Th 含量介于23~326 $\mu\text{g/g}$,对应的 Th/U 值介于0.6~2.5,指示为岩浆成因。图7c 显示所有年龄数据点均在谐和线上及其附近,出现了两个峰值年龄,主峰值在760 Ma 左右,次峰为740 Ma(图7d)。选取11颗年龄小于次峰740 Ma 的岩浆锆石,它们晶形完整,外形规则,震荡环带清晰,未见长途搬运迹象,Th/U 值大于0.4,最年轻且谐和度最好(谐和度介于99%~101%),计算加权平均年龄为(719 $\pm$ 11) Ma($n=11$, MSWD=0.75,图9a)。这个年龄可看作研究区冰期沉积岩的初始沉积年龄,相当于长安冰期(即 Sturtian 冰期)。

3.2 凝灰质砂岩锆石年龄

样品 HGY02 采自“南沱组”下段细粒长石砂岩,锆石无色透明,粒径介于50~100 μm ,多呈短柱状,形态完整,大多数锆石在阴极发光下震荡环带结构明显,外形略有磨圆,可能是经历较近距离搬运的碎屑锆石(图6)。选择32颗锆石(其中29颗为碎屑锆石)进行 U-Th-Pb 同位素分析,U 含量介于18~158 $\mu\text{g/g}$ 、Th 含量介于12.28~173.12 $\mu\text{g/g}$,Th/U 值介于0.6~1.5。碎屑锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于777~721 Ma,峰值年龄为745 Ma(图8a)。

样品 HGY03 位于“南沱组”下段顶部长石砂岩,锆石无色透明,粒径介于60~130 μm ,多为粒状、短柱状,阴极发光下部分锆石颗粒有不甚清晰的震荡环

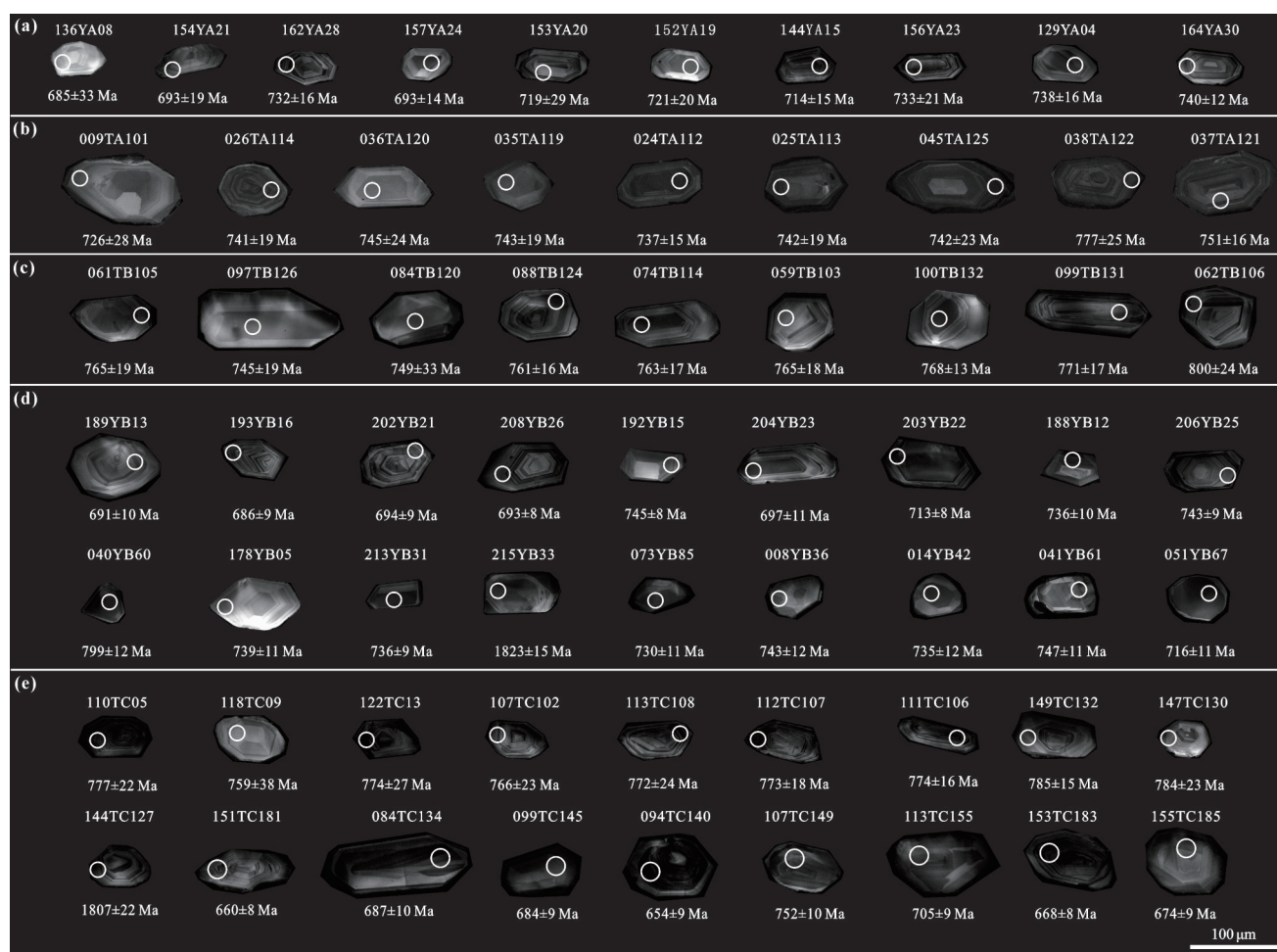


图6 研究区样品部分锆石阴极发光图像和年龄结果

(a) HGY01; (b) HGY02; (c) HGY01; (d) HGY04; (e) HGY05; 锆石上方为对应测点序号

Fig.6 CL images of selected zircons and their U-Pb ages in the study section

带结构,多数颗粒表面有一定磨圆度,为碎屑锆石(图6)。选择33颗锆石(其中28颗为碎屑锆石)进行U-Th-Pb同位素分析,U含量介于21.47~170 $\mu\text{g/g}$ 、Th含量介于15.52~240.3 $\mu\text{g/g}$ 、Th/U值介于0.7~1.6,碎屑锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于828~745 Ma,峰值年龄为790 Ma(图8b)。

样品HGY04位于“南沱组”上段粗一中粒长石砂岩,锆石无色透明,晶形较完整,粒径集中在70~200 μm ,多呈粒状、短柱状,阴极发光下多数锆石震荡环带明显,其中具有棱角状规则外形的推测为来自火山灰填隙物中的岩浆锆石,而有一定磨圆度的为碎屑锆石(图6)。选择90颗锆石U-Th-Pb同位素分析,U含量介于16.9~248.53 $\mu\text{g/g}$ 、Th含量介于9.98~334.58 $\mu\text{g/g}$ 、Th/U值介于0.51~2.22,均为岩浆成因。其中75颗碎屑锆石的峰值年龄为760 Ma(图8c),包括2颗较古老的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄分别为

(1 823.5 $\pm$ 15.2) Ma、(1 751.3 $\pm$ 13.0) Ma,其余73颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于890~702 Ma。该样品另有15颗锆石疑似来自火山灰填隙物,轮廓平直且环带清晰,它们具有730 Ma和700 Ma两个峰值年龄(图7e,f),选取5颗年龄小于700 Ma、最年轻且谐和度最高的锆石进行加权平均年龄计算,结果为(694.2 $\pm$ 7.1) Ma($n=5$,MSWD=0.25,图9b),其中单颗最年轻岩浆锆石年龄为(686.7 $\pm$ 9.9) Ma(图6),Th/U值为1.4。

凝灰质长石砂岩样品HGY05位于“南沱组”顶部与陡山沱组分界处,锆石无色透明,粒状、粒径范围介于50~120 μm ,部分锆石环带结构明显,多数表面有磨圆,推测仍以碎屑锆石为主(图6)。选择87颗(83颗为碎屑锆石)进行U-Th-Pb同位素分析,U含量介于9.62~355.74 $\mu\text{g/g}$ 、Th含量介于7.71~387.18 $\mu\text{g/g}$ 、Th/U值介于0.43~1.92。有2颗碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄大于1.0 Ga,分别为(1 807.9 $\pm$ 22.8) Ma、(1 693.5 $\pm$ 12.7) Ma,

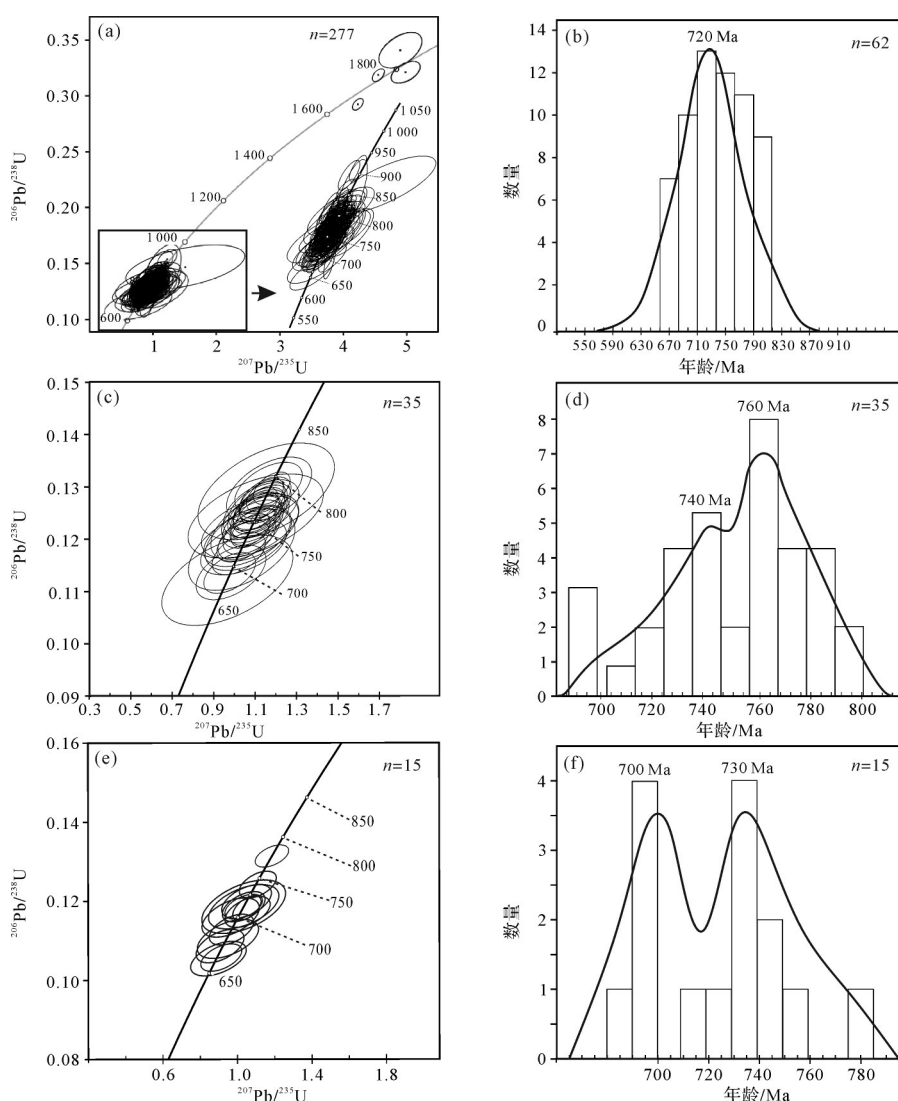


图7 研究区样品全部锆石、HGY01 和 HGY04 中岩浆锆石 U-Pb 年龄谐和图

(a) 所有锆石 U-Pb 年龄谐和图; (b) 全部岩浆锆石 U-Pb 年龄分布直方图; (c) 凝灰岩(样品 HGY01) 锆石 U-Pb 年龄谐和图; (d) 凝灰岩 HGY01 锆石 U-Pb 年龄分布图; (e) 凝灰质砂岩(样品 HGY04) 中岩浆锆石 U-Pb 年龄谐和图; (f) 凝灰质砂岩(HGY04) 中岩浆锆石 U-Pb 年龄分布直方图

Fig.7 U-Pb concordia diagram of all zircons, zircons from volcanic ash of sample HGY01 and HGY04

另外 81 颗碎屑锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 901~655 Ma, 2 个峰值年龄分别为 790 Ma 和 740 Ma。单颗最年轻碎屑锆石年龄为 $(654.5 \pm 9.4)\text{Ma}$ (图 6、图 8d)。

4 件凝灰质砂岩中所有锆石 Th/U 值均大于 0.4, 说明其均属岩浆成因。在具有磨圆的碎屑锆石中, 有 4 颗锆石年龄大于 1.0 Ga, 分别为 1.82 Ga、1.80 Ga、1.75 Ga、1.69 Ga, 可能是来自中元古代早期后河杂岩(李献华等, 2012)。其他碎屑锆石峰值年龄均集中在 790~740 Ma (图 8), 镜下观察显示, 砂岩中岩屑多以花岗岩、流纹岩和凝灰岩为主, 变质岩岩屑极少(图 5d-f), 反映出它们可能来自同一物源, 物源区母岩可能是与新元古代陆内裂谷伸展期酸性岩浆活动

有关的岩浆岩(张国伟等, 2013)。此外, 剖面自下而上, 随着砂岩样品越来越年轻, 碎屑锆石年龄分布直方图由明显的单峰式逐渐呈现出多峰趋势, 锆石年龄也逐渐变老, 暗示了随着持续的侵蚀作用(风化、流水或冰川搬运等), 母源区更古老的岩石被剥露、破碎、搬运并汇入沉积物中。

4 讨论

4.1 研究区成冰纪冰期沉积岩的形成时间

前已述及, 全球新元古代成冰纪 Sturtian 冰期(720~660 Ma)和 Marinoan 冰期(约 649~635 Ma)与扬子陆块南华纪各冰期基本等时, 即长安冰期和古城

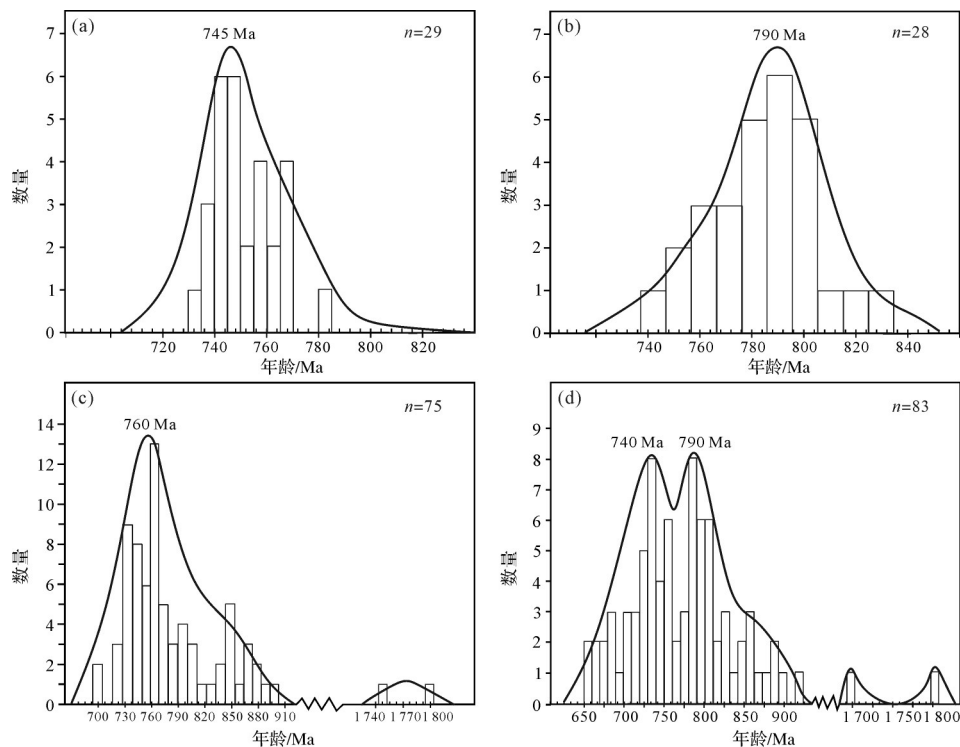


图8 研究区碎屑锆石 U-Pb 年龄分布图

(a)HGY02; (b)HGY03; (c)HGY04; (d)HGY05

Fig.8 Ages of detrital zircons from sandstones in the study area

冰期相当于 Sturtian 冰期,南沱冰期相当于 Marinoan 冰期(高林志等,2015;张启锐和兰中伍,2016;周传明,2016;兰中伍,2023;旷红伟等,2023)。区域资料表明(陕西省区域地层表编写组,1983;陕西省地质矿产局,1989;马润华,1998),扬子陆块北缘裂谷盆地内南沱冰期沉积分布较广,但是关于长安冰期和古城冰期的记录却极少。本文在钢厂—元坝剖面冰期沉积岩底部沉凝灰岩(样品 HGY01)中获得的锆石年龄为 719 ± 11 Ma(图 9a),与近年来扬子陆块其他地区报道的下冰期底界年龄基本一致(表 1、图 2),支持将 Sturtian 冰期的启动时间置于 720 Ma(周传明,2016;旷红伟等,2023)。这个年龄与砂岩样品 HGY04 中小于 700 Ma 的锆石加权平均年龄(694.2 ± 7.1) Ma(图 9b)和单颗最年轻锆石年龄(686.7 ± 9.9) Ma,以及砂岩样品 HGY05 中单颗最年轻锆石年龄(654.5 ± 9.4) Ma 一起(图 3b),均表明冰期沉积岩形成时间略早于南沱冰期,大致相当于南华纪长安大冰期(即 Sturtian 冰期),下、上两套冰碛砾岩(约 719~694 Ma)可能分别属于长安组和古城组(即江口群)。在冰碛岩之上,厚约 2.3 m 的砂岩和粉砂岩段(约 694~655 Ma)暂定为大塘坡间冰期产物,由于冰碛岩

之上的锆石年龄数据均来自长石砂岩,其确切的时代归属有待后续研究进一步验证。高磊(2014)曾在研究区附近南郑县(现南郑区)汉黎路剖面南沱组发现了(684 ± 8) Ma 和(692 ± 17) Ma 的锆石年龄,与本文冰期沉积岩年龄区间重合(图 3b、图 6)。近年来,扬子北缘裂谷盆地的其他地区,例如,大巴山城口(陈骁帅等,2023)、镇巴穿心店(金姜颖等,2024)和小洋坝(马圣杰等,2024),陆续可见关于长安冰期和南沱冰期沉积岩的报道(表 1、图 2),反映该裂谷盆地较好地保存了成冰纪两个冰期(Sturtian 冰期和 Marinoan 冰期)的沉积记录。

类似情况也在康滇裂谷盆地出现,川滇地区长期被认为新元古代仅发育南沱组一期冰川沉积(云南省地质矿产局,1990),但崔晓庄等(2013)和江卓斐(2016)在滇中澄江县(现澄江市)、峨山彝族自治县、川西甘洛县和汉源县等地南沱组上段底部、南沱组/澄江组界限处获得多组代表长安组或江口群的锆石年龄(728~665 Ma,图 2);而 Zhou *et al.* (2019)则在峨山剖面陡山沱组/南沱组界限处凝灰质泥岩中获取了(634.57 ± 0.88) Ma 的高精度锆石年龄,确定了南沱冰期的存在,说明康滇裂谷盆地也发育完整的南华

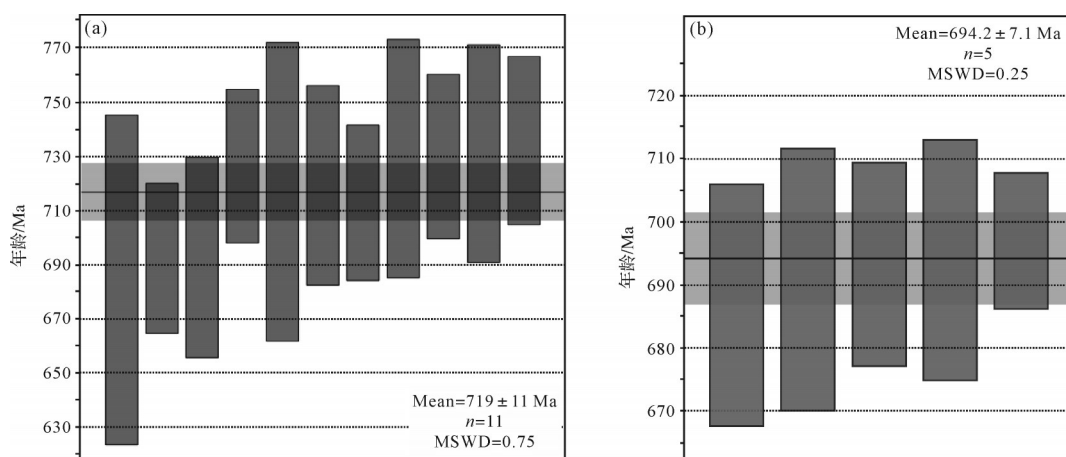


图9 研究区成冰纪沉积岩锆石 U-Pb 加权平均年龄图

(a)HGY01 锆石加权平均年龄图;(b)HGY04 锆石加权平均年龄图,位置见图3b

Fig.9 Zircon U-Pb weighted average age map of the Cryogenian sedimentary rocks in the study area

系。近年来,华夏地块也出现了新元古代成冰纪沉积岩和锆石年龄的报道(齐靛等,2023),说明新元古代“雪球地球”事件的影响范围涉及整个华南地区。

4.2 扬子陆块北缘裂谷盆地成冰纪沉积充填特征对比

4.2.1 钢厂—元坝剖面成冰纪沉积充填特征

尽管钢厂—元坝剖面莲沱组与上覆“南沱组”均有杂砾岩发育,但它们的岩性组合和沉积构造显示二者的形成环境并不相同。莲沱组内部由多个下粗上细的层系组构成,每个层系组底部均发育砾岩,从下段杂基支撑、无分选、磨圆的杂砾岩到中段分选差但磨圆较好的粗砾岩,再到上段分选、磨圆均较好的细砾岩,砾径逐渐变细。每个层系组上部岩性也有规律变化,由粗砂岩渐变为粉砂岩和粉砂质泥岩。莲沱组碎屑岩中还见到丰富的流水成因沉积构造,如递变层理、大型冲刷构造(图4a)、平行层理和压扁层理等,表明莲沱组自下向上由山麓冲洪积扇向辫状河、曲流河甚至湖泊环境的转变,这种迅速的相变是研究区处于裂谷盆地幼年期快速裂陷和快速充填导致的。而上、下两套冰碛砾岩则充填于裂谷盆地成熟期,除个别砾石表面见擦痕外,未见与流水相关的沉积构造,是冰川直接堆积的产物,可能属于陆地冰川(图3b)。两段冰碛岩间砂岩发育平行层理,反映牵引流作用为主的河流相沉积,此时冰川可能处于消融状态。上段冰碛岩以上的部分(样品 HGY04 至 HGY05 之间,暂定为间冰期沉积),砂岩发育平行层理,粉砂岩发育水平层理,未见冰坠石构造,也具有河流相沉积的特点。

4.2.2 扬子陆块北缘裂谷盆地成冰纪沉积充填特征对比

将扬子陆块北缘裂谷盆地不同地区,如陕西汉中、镇巴、四川万源、大巴山城口、鄂西一带 Sturtian 冰期沉积岩充填特征进行对比,发现自盆缘向盆地内部,沉积岩厚度出现由薄迅速增厚的特征,岩石组合和沉积构造也有规律变化,体现出裂谷盆地不同位置沉积充填速率、沉积环境变化极快的特点(图10a,b)。沉积岩最薄处为东南缘鄂西走马剖面,古城组厚度为 1.70 m(马晓晨,2023);其次为本文剖面(汉南隆起之上)实测厚度为 3.78 m(斜距约 29 m);最厚处在大巴山城口一带,可达 3 000~4 000 m,是裂谷盆地的沉降中心(陕西省地质矿产局,1989);二者之间的斜坡带,如陕南镇巴穿心店和小洋坝,长安组和古城组厚度为 220~346 m(金姜颖等,2024)。研究区位于盆地西缘,发育厚层杂砾岩,岩性单一,判断为陆相冰川;东南缘黄陵隆起田家园子剖面,季泽龙(2023)在厚约 6.10 m 古城组内也识别出陆地环境块状冰碛岩组合;但马晓晨(2023)认为鄂西古城剖面厚约 2 m 的古城组灰绿—深灰色块状冰碛砾岩形成于浅海台地;另外,王剑等(2024)在华南新元古代早冰期(720~660 Ma)古地理图上将鄂北古陆划为扬子冰缘大陆冰川,说明该地区可能存在由陆相冰川向浅海环境的相变带。在斜坡带,如镇巴穿心店和小洋坝地区,沉积物为厚层块状含砾砂岩和粉砂岩,砂岩中常见平行层理和包卷层理等,被认为是扇三角洲前缘碎屑流和冰水远距离搬运的斜坡相重力流沉积(马圣杰等,2024;金姜颖等,2024)。在沉降中心

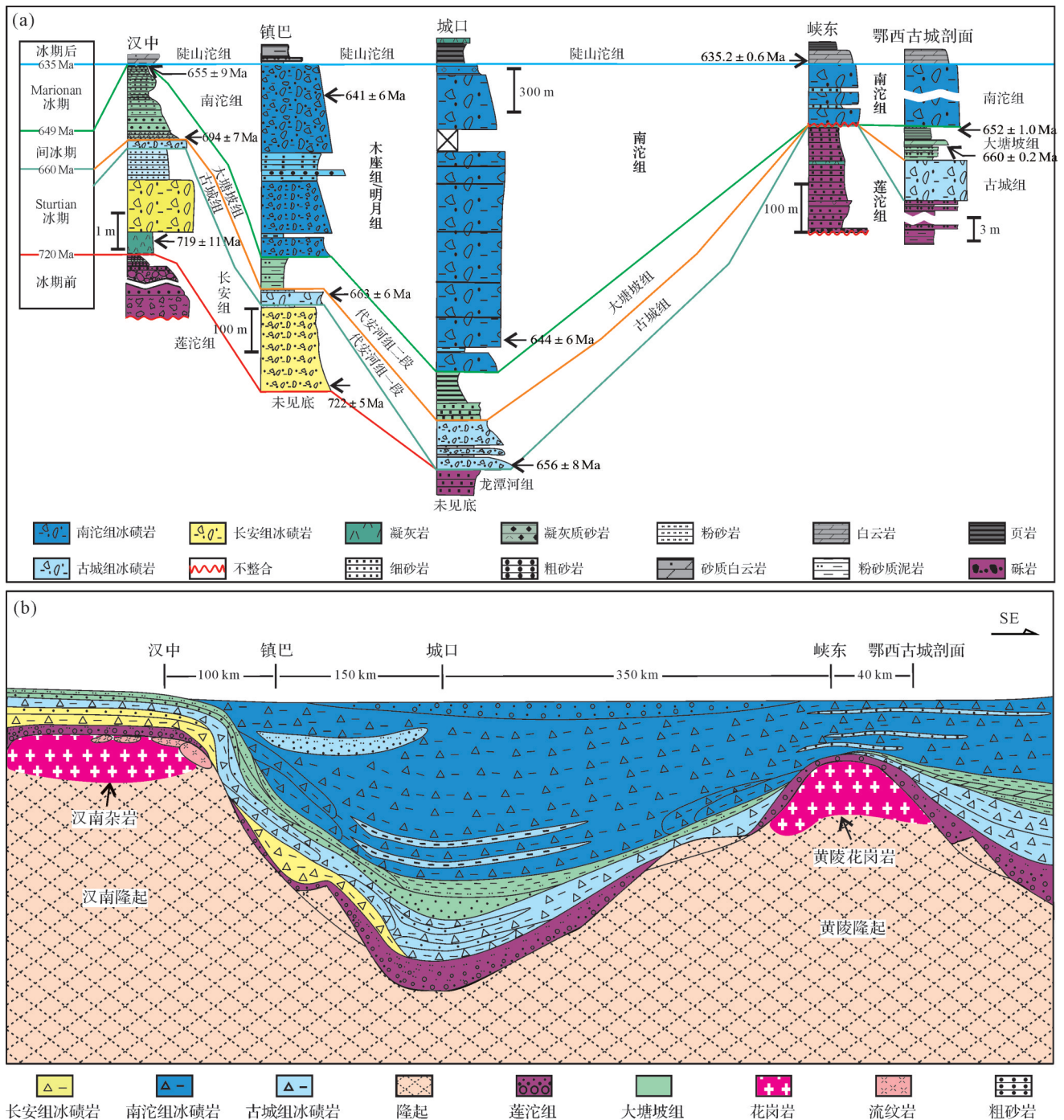


图10 扬子陆块北缘裂谷盆地成冰纪沉积充填模式示意图

(a) 扬子陆块北缘成冰系柱状对比图; (b) 扬子陆块北缘裂谷盆地成冰纪沉积充填模式图(岩性柱、锆石年龄和沉积模式引用或修改自 Condon *et al.*, 2005; 旷红伟等, 2017; 陈骁帅等, 2023; 金姜颖等, 2024; 马晓晨, 2023)

Fig.10 Simplified depositional model of the Cryogenian in the rift basin along the northern margin of the Yangtze Block

大巴山城口地区, 陈骁帅等(2023)根据锆石年龄将代安河组一段划归古城组, 岩性为三层块状杂砾岩夹两层砂岩, 属冰海近缘水下冰成碎屑流沉积。上述沉积充填特征表明, 扬子陆块北缘裂谷盆地 Sturtian 冰期沉积环境依次经历了陆相冰川、斜坡重

力流到近缘冰海的变化(图10b)。由盆地西缘、东南缘到盆内, 陆地冰川转化为海洋冰川, 保留了两至三期冰碛岩, 还有代表冰融期的河流相沉积, 说明此时期扬子陆块北缘并非总是冰封状态, 很可能由两个小冰期和一个间冰期组成。

大塘坡间冰期(图 10a),研究区砂岩和粉砂岩段厚度约为 2.3 m,发育河流环境。镇巴穿心店和小洋坝一带,大塘坡组厚度介于 101.0~127.8 m,为紫红色中—厚层泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,反映富氧的浅海陆棚环境(马圣杰等,2024;金姜颖等,2024)。大巴山城口地区大塘坡组为厚几百米的黑色、灰黑色、灰绿—紫红色粉砂质泥岩、页岩和砂岩,富有机质含黄铁矿,水平层理发育,被认为形成于局部有障壁的潟湖环境(陈骁帅等,2023)。在鄂西古城剖面,该组厚度不足 3.0 m,下部发育土黄色含锰粉砂岩和薄层黑色含锰碳酸盐岩、中上部为深灰色、黑色含锰碳质页岩、含锰泥岩,形成于浅水陆棚环境(马晓晨,2023)。

根据锆石 U-Pb 年龄,钢厂—元坝剖面似乎缺失南沱冰期(Marinoan 冰期)沉积记录。然而,斜坡带镇巴地区南沱组厚度为 300~600 m,主要由厚层砂砾岩、含砾粗砂夹细砂岩和粉砂质泥岩组成,反映斜坡重力流沉积,属冰川融化后由冰水远距离搬运的产物(马圣杰等,2024;陈骁帅等,2023;金姜颖等,2024)。城口地区,该组厚度为 200~1 800 m 不等,杂砾岩厚度巨大,发育正粒序层理、低角度斜层理、擦痕并偶见旋转构造,是冰川搬运并经流水再改造的海相盆地冰川水下触地扇,并夹有冰海远缘冰筏相沉积(陈骁帅等,2023),指示该时期盆地的沉积中心也在此处(图 10a,b)。此外,陈骁帅等(2023)还指出,城口地区南沱组由下至上发育多层向上变细的岩石组合,体现了多次冰川进—退的旋回演化。受黄陵隆起影响,在盆地东南缘斜坡带,鄂西神农架地区宋洛剖面南沱组厚度大于 296.63 m,出现了冰海重力流沉积,并识别出三次冰进—冰退旋回;神农架以东,南沱组厚度依次减薄,石家河剖面南沱组厚度约为 83.08 m,龙溪剖面南沱组厚度仅存 1.80 m,由含砾砂岩组成,砾石主要为白云岩,表面见冰川擦痕,属于冰下冰碛岩(胡军,2021)。

彭学军等(2004)在扬子古陆东南缘湘黔桂裂谷盆地对比了鄂西—湘西一带的 5 条剖面,认为由西北至东南,南华系(与国际成冰系对应)的发育逐渐完整,峡东仅见一期冰川沉积,而湘西黔阳能观察到三期冰川沉积。林树基等(2013)报道了黔东南黎家坡一带长安组、富禄组和南沱组内部至少四套海相冰成沉积;黔东北松桃地区富禄组、黎家坡组发育两套冰期沉积;黔西遵义、开阳、息烽等地至少保存一期大陆冰川沉积。陈建书等(2016)、卢定彪等(2024)也报道

了湘、黔、桂等多地广泛分布的长安冰期、古城冰期和南沱冰期沉积岩,以长安冰期为例,贵阳—三都—芷江—怀化—沅陵一线以北西、罗城—龙胜以南东为古陆,中间为海盆,其中融安—三江一带,沉积岩最厚约为 2 100 m,发育冰筏浅海沉积,向两侧厚度骤减,见冰水滨岸沉积。不难看出,华南其他地区新元古代冰川沉积记录可与扬子陆块北缘裂谷盆地同期沉积岩进行很好的对比,从裂谷盆缘向盆内,陆—海间沉积相变极快。而且,它们的发育特征也印证了近年来越来越多学者趋于一致的观点(周传明,2016;Lan *et al.*, 2015;陈骁帅等,2023;旷红伟等,2023;卢定彪等,2024;王剑等,2024),即新元古代“雪球事件”的地球表面并非总是被冰雪覆盖,无论是 Sturtian 冰期(长安冰期和古城冰期,或江口冰期)还是 Mainoan 冰期(南沱冰期),内部可能出现过幕式多期冰进—冰退作用。

5 结论

(1) 扬子陆块北缘汉中地区钢厂—元坝剖面新元古代成冰系(南华系)沉积岩中发育下、上两套冰碛岩,下段冰碛岩厚度较大,上段冰碛岩相对较薄,均属陆相冰川。两套冰碛岩间和冰碛岩之上发育河流相砂岩和粉砂岩组合。

(2) 冰期沉积岩底部与莲沱组界限处沉凝灰岩锆石年龄为 (719 ± 11) Ma; 上段冰碛岩顶部长石砂岩锆石年龄为 (694.2 ± 7.1) Ma, 表明它们可能形成于 Sturtian 冰期。两套冰碛岩大致对应于南华系长安组和古城组,或江口群。在这套沉积岩顶部与陡山沱组分界处的长石砂岩中获得了单颗最年轻碎屑锆石年龄 (654.9 ± 9.4) Ma, 因此将冰碛岩之上的砂岩和粉砂岩段暂定为大塘坡组。

(3) 对比扬子陆块北缘裂谷盆地不同地区沉积岩,发现 Sturtian 冰期自盆地西缘、东南缘向盆地内部,沉积环境均经历了陆相冰川、斜坡重力流到近缘冰海甚至远缘冰海的变化,沉积物中保留了两期或以上冰碛岩。这种充填特征与华南其他地区,如湘黔桂裂谷盆地同期沉积岩的发育规律相似。

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.cjxb.00011> 和 <https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.cjxb.00011>。

致谢 诚挚地感谢审稿专家提供的很多中肯意见和建议,使我们深受启发,获益良多。感谢中国地质调查局西安市地质调查中心汪双双高工、靳梦琪工程师在锆石分析测试期间提供的无私指导。

参考文献(References)

- 蔡娟娟,崔晓庄,兰中伍,等. 2018. 华南扬子陆块成冰纪冰川作用的启动时限及其全球对比[J]. 古地理学报, 20(1): 65-86. [Cai Juanjuan, Cui Xiaozhuang, Lan Zhongwu, et al. 2018. Onset time and global correlation of the Cryogenian glaciations in Yangtze Block, South China[J]. Journal of Palaeogeography, 20(1): 65-86.]
- 陈建树,戴传固,彭成龙,等. 2016. 湘黔桂相邻区新元古代820~635 Ma时期裂谷盆地充填序列与地层格架[J]. 中国地质, 43(3): 899-920. [Chen Jianshu, Dai Chuangu, Peng Chenglong, et al. 2016. The filling sequence and stratigraphic framework of rift basin during the Neoproterozoic 820-635 Ma in Hunan, Guizhou and Guangxi[J]. Geology in China, 43(3): 899-920.]
- 陈骁帅,旷红伟,柳永清,等. 2023. 扬子克拉通西北缘成冰系冰川沉积特征和地层格架[J]. 地质学报, 97(12): 3943-3966. [Chen Xiaoshuai, Kuang Hongwei, Liu Yongqing, et al. 2023. Sedimentary characteristics and stratigraphic framework of the Cryogenian in the northwestern Yangtze Craton[J]. Acta Geologica Sinica, 97(12): 3943-3966.]
- 储雪蕾, Todt W, 张启锐, 等. 2005. 南华—震旦系界线的锆石 U-Pb 年龄[J]. 科学通报, 50(6): 600-602. [Chu Xuelei, Todt W, Zhang Qirui, et al. 2005. U-Pb zircon age for the Nanhua-Sinian boundary[J]. Chinese Science Bulletin, 50(6): 600-602.]
- 崔晓庄,江新胜,王剑,等. 2013. 滇中新元古代澄江组层型剖面锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 现代地质, 27(3): 547-556. [Cui Xiaozhuang, Jiang Xinsheng, Wang Jian, et al. 2013. Zircon U-Pb geochronology for the stratotype section of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in central Yunnan and its geological significance[J]. Geoscience, 27(3): 547-556.]
- 高林志,陆济璞,丁孝忠,等. 2013. 桂北地区新元古代地层凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国地质, 40(5): 1443-1452. [Gao Linzhi, Lu Jipu, Ding Xiaozhong, et al. 2013. Zircon U-Pb dating of Neoproterozoic tuff in South Gaungxi and its implications for stratigraphic correlation[J]. Geology in China, 40(5): 1443-1452.]
- 高林志,尹崇玉,丁孝忠,等. 2015. 华南地区新元古代年代地层标定及地层对比[J]. 地球学报, 36(5): 533-545. [Gao Linzhi, Yin Chongyu, Ding Xiaozhong, et al. 2015. Rating data of the Neoproterozoic chronostratigraphy and stratigraphic correlation in South China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 36(5): 533-545.]
- 高维,张传恒. 2009. 长江三峡黄陵花岗岩与莲沱组凝灰岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造地层意义[J]. 地质通报, 28(1): 45-50. [Gao Wei, Zhang Chuanheng. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Huangling granite and the tuff beds from Liantuo Formation in the Three Gorges area of Yangtze River, China and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 28(1): 45-50.]
- 高晒. 2014. 南郑—宁强地区晚前寒武纪地层沉积特征及年代学研究[D]. 西安: 西北大学: 1-95. [Gao Xi. 2014. The study on the sedimentology and chronology of Late Precambrian strata in Nanzheng-Ningqiang region abstract[D]. Xi'an: Northwest University: 1-95.]
- 关成国,万斌,陈哲,等. 2012. 皖南新元古代冰期地层再认识[J]. 地层学杂志, 36(3): 611-619. [Guan Chengguo, Wan Bin, Chen Zhe, et al. 2012. A revisit of the Neoproterozoic glacial deposit in southern Anhui[J]. Journal of Stratigraphy, 36(3): 611-619.]
- 胡军. 2021. 华南神农架地区新元古代南沱组沉积古地理和古海洋环境研究[D]. 武汉: 中国地质大学: 1-174. [Hu Jun. 2021. Sedimentary characteristics, paleogeography and paleomarine environment of the Neoproterozoic Nantuo Formation in Shennongjia area, (South China) [D]. Wuhan: China University of Geosciences: 1-174.]
- 季泽龙. 2023. 峡东地区成冰系地层划分与沉积相研究[D]. 武汉: 中国地质大学: 1-46. [Ji Zelong. 2023. Stratigraphic division and sedimentary facies of the Cryogenian in the East Yangtze gorges area[D]. Wuhan: China University of Geosciences: 1-46.]
- 江卓斐. 2016. 扬子西缘新元古代冰川启动时间、期次及其构造—岩相古地理演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-174. [Jiang Zhuofei. 2016. Onset time and periods of the Neoproterozoic glaciers in western Yangtze Block and the tectonic-lithofacies palaeogeography[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-174.]
- 江卓斐,崔晓庄,伍皓,等. 2018. 滇东成冰纪南沱组碎屑锆石 U-Pb 年代学研究及其地质意义[J]. 矿物岩石, 38(1): 42-54. [Jiang Zhuofei, Cui Xiaozhuang, Wu Hao, et al. 2018. Study of detrital zircon U-Pb age of the Cryogenian Nantuo Formation in eastern Yunnan province and its geological significance[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 38(1): 42-54.]
- 金姜颖,裴先治,裴磊,等. 2024. 扬子地块北缘镇巴穿心店地区南华系碎屑锆石 U-Pb 年龄及其物源示踪[J]. 矿产勘查, 15(3): 321-352. [Jin Jiangying, Pei Xianzhi, Pei Lei, et al. 2024. Detrital zircon U-Pb age and provenance tracing of Nanhua System in Zhenba-Chuanxindian area, northern margin of Yangtze Block[J]. Mineral Exploration, 15(3): 321-352.]
- 旷红伟,柳永清,耿元生,等. 2023. 中国中—新元古代地层研究进展及建议划分、对比方案[J]. 地质学报, 97(12): 3861-3901. [Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Geng Yuansheng, et al. 2023. Research advances, a subdivision and correlation of the Meso-Neoproterozoic stratigraphy in China[J]. Acta Geologica Sinica, 97(12): 3861-3901.]
- 旷红伟,柳永清,彭楠,等. 2017. 神农架成冰系“南沱组”宏观藻应属大塘坡组的新证据[J]. 中国地质, 44(6): 1257-1258. [Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Peng Nan, et al. 2017. Benthic macroscopic phototrophs of the Cryogenian in Shennongjia that survived in interglacial period between Sturtian and Marinoan glaciations [J]. Geology in China, 44(6): 1257-1258.]

- 兰中伍. 2023. 华南南华系年代地层学研究进展[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 180-187. [Lan Zhongwu. 2023. Research progress on the chronostratigraphic study of Nanhua System in South China [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 180-187.]
- 李明龙, 田景春, 方喜林, 等. 2019. 鄂西走马地区大塘坡组顶部泥岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 39(1): 22-31. [Li Minglong, Tian Jingchun, Fang Xilin, et al. 2019. Mudstones from the topmost part of the Datangpo Formation in the Zouma area, western Hubei: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and its geological implications[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 39(1): 22-31.]
- 李献华, 李武显, 何斌. 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合—裂解: 观察、解释与检验[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(6): 543-559. [Li Xianhua, Li Wuxian, He Bin. 2012. Building of the South China Block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent: Observations, interpretations and tests[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 31(6): 543-559.]
- 林树基, 卢定彪, 肖加飞, 等. 2013. 贵州南华纪冰期地层的主要特征[J]. 地层学杂志, 37(4): 542-557. [Lin Shuji, Lu Dingbiao, Xiao Jiafei, et al. 2013. Stratigraphy of the Nanhua System in Guizhou province[J]. Journal of Stratigraphy, 37(4): 542-557.]
- 卢定彪, 张德明, 骆珊, 等. 2024. 湘黔桂毗邻地区南华纪岩相古地理特征及地质意义[J]. 贵州地质, 41(1): 9-17. [Lu Dingbiao, Zhang Deming, Luo Shan, et al. 2024. Paleogeography character and geological significance of Nanhua Period lithofacies in Hu'nan-Guizhou-Guangxi adjoining area[J]. Guizhou Geology, 41(1): 9-17.]
- 马润华. 1998. 陕西省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 69-74. [Ma Runhua. 1998. Stratigraphy lithostratic of Shaanxi province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 69-74.]
- 马圣杰, 裴先治, 裴磊, 等. 2024. 陕南镇巴小洋坝地区南华系物源分析: 来自碎屑锆石 U-Pb 年龄、碎屑成分分析及地球化学的证据[J]. 矿产勘查, 15(2): 165-189. [Ma Shengjie, Pei Xianzhi, Pei Lei, et al. 2024. Provenance analysis of the Nanhua System in the Zhenba Xiaoyangba area, southern Shaanxi: Evidence from detrital zircon U-Pb ages, clastic composition analysis and geochemistry [J]. Mineral Exploration, 15(2): 165-189.]
- 马晓晨. 2023. 鄂西新元古代重大转折期的年龄约束及其地质意义[D]. 武汉: 中国地质大学: 1-151. [Ma Xiaochen. 2023. Geochronologic constraints on Neoproterozoic major events in western Hubei and their geological significances[D]. Wuhan: China University of Geosciences: 1-151.]
- 彭学军, 刘耀荣, 吴能杰, 等. 2004. 扬子陆块东南缘南华纪地层对比[J]. 地层学杂志, 28(4): 354-359. [Peng Xuejun, Liu Yaorong, Wu Nengjie, et al. 2004. Correlation of the Nanhua strata on the southern margin of the Yangtze landmass[J]. Journal of Stratigraphy, 28(4): 354-359.]
- 齐靓, 徐亚军, 杜远生, 等. 2023. 华夏地块新元古代沉积记录与超大陆重建[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 188-211. [Qi Liang, Xu Yajun, Du Yuansheng, et al. 2023. Neoproterozoic sedimentary records in the Cathaysia Block and their implication for the supercontinent reconstruction[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 188-211.]
- 钱迈平, 张宗言, 姜杨, 等. 2012. 中国东南部新元古代冰碛岩地层[J]. 地层学杂志, 36(3): 587-599. [Qian Maiping, Zhang Zongyan, Jiang Yang, et al. 2012. The Neoproterozoic tillite in south-eastern China[J]. Journal of Stratigraphy, 36(3): 587-599.]
- 陕西省地质矿产局. 1989. 陕西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 60-69. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province. 1989. Regional geology of Shaanxi province[M]. Beijing: Geological Publishing House: 60-69.]
- 陕西省区域地层表编写组. 1983. 西北地区区域地层表: 陕西省分册[M]. 北京: 地质出版社: 192-203. [Compilation Group of Regional Stratigraphy in Shaanxi Province. 1983. Regional geological table of Northwest China: Shaanxi branch[M]. Beijing: Geological Publishing House: 192-203.]
- 王剑, 崔晓庄, 王伟, 等. 2024. 华南古大陆演化及其资源环境效应: 从哥伦比亚到冈瓦纳[J]. 沉积学报, 42(6): 1849-1875. [Wang Jian, Cui Xiaozhuang, Wang Wei, et al. 2024. Evolution of the South China paleocontinent and related resource- environmental developments: From Columbia to Gondwana[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(6): 1849-1875.]
- 王玉冲, 旷红伟, 柳永清, 等. 2023. 扬子克拉通拉伸系莲沱组年代框架与沉积过程[J]. 地质学报, 97(12): 3922-3942. [Wang Yuchong, Kuang Hongwei, Liu Yongqing, et al. 2023. Chronological framework and sedimentary evolution process of the Neoproterozoic Liantuo Formation in the Yangtze Craton[J]. Acta Geologica Sinica, 97(12): 3922-3942.]
- 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(1): 1-22. [Wang Zhengjiang, Wang Jian, Jiang Xinsheng, et al. 2015. New progress for the stratigraphic division and correlation of Neoproterozoic in Yangtze Block, South China[J]. Geological Review, 61(1): 1-22.]
- 伍皓, 江新胜, 王剑, 等. 2015. 湘西托口地区南华系沉积地层学研究及其地质意义[J]. 地层学杂志, 39(3): 300-309. [Wu Hao, Jiang Xinsheng, Wang Jian, et al. 2015. A Sedimentological and stratigraphical study of the Nanhua System in the Tuokou area, western Hunan and their geological significance[J]. Journal of Stratigraphy, 39(3): 300-309.]
- 叶亚康, 周家云, 周雄. 2020. 川西塔公松林口岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄化学特征[J]. 岩矿测试, 39(6): 921-933. [Ye Yakang, Zhou Jiayun, Zhou Xiong. 2020. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age and geochemical features of the Songlinkou pluton, western Sichuan[J]. Rock and Mineral Analysis, 39(6): 921-933.]
- 尹崇玉, 王砚耕, 唐烽, 等. 2006. 贵州松桃南华系大塘坡组凝灰岩锆石 SHRIMP II U-Pb 年龄[J]. 地质学报, 80(2): 273-278. [Yin Chongyu, Wang Yangeng, Tang Feng, et al. 2006. SHRIMP II U-Pb zircon date from the Nanhua Datangpo Formation in Songtao county, Guizhou province[J]. Acta Geologica Sinica, 80(2): 273-

278.]
- 余文超,杜远生,周琦,等. 2016. 黔东南桃地区大塘坡组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 62(3): 539-549. [Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Qi, et al. 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating from the Nanhuan Datangpo Formation in Songtao area, east Guizhou and its geological significance[J]. Geological Review, 62(3): 539-549.]
- 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: 1-522. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. 1990. Regional geology of Yunnan province[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-522.]
- 张国伟,郭安林,王岳军,等. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学:地球科学, 43(10): 1553-1582. [Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, et al. 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. Science China Earth Sciences, 43(10): 1553-1582.]
- 张启锐,储雪蕾. 2006. 扬子地区江口冰期地层的划分对比与南华系层型剖面[J]. 地层学杂志, 30(4): 306-314. [Zhang Qirui, Chu Xuelei. 2006. The stratigraphic classification and correlation of the Jiangkou glaciation in the Yangtze Block and the stratotype section of the Nanhuan System[J]. Journal of Stratigraphy, 30(4): 306-314.]
- 张启锐,兰中伍. 2016. 南华系、莲沱组年龄问题的讨论[J]. 地层学杂志, 40(3): 297-301. [Zhang Qirui, Lan Zhongwu. 2016. An update on the chronostratigraphy of the Nanhuan System[J]. Journal of Stratigraphy, 40(3): 297-301.]
- 赵彦彦,郑永飞. 2011. 全球新元古代冰期的记录和时限[J]. 岩石学报, 27(2): 545-565. [Zhao Yanyan, Zheng Yongfei. 2011. Record and time of Neoproterozoic glaciations on Earth[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(2): 545-565.]
- 周传明. 2016. 扬子区新元古代前震旦纪地层对比[J]. 地层学杂志, 40(2): 120-135. [Zhou Chuanming. 2016. Neoproterozoic lithostratigraphy and correlation across the Yangtze Block, South China[J]. Journal of Stratigraphy, 40(2): 120-135.]
- 周传明,燕夔,胡杰,等. 2001. 皖南新元古代两次冰期事件[J]. 地层学杂志, 25(4): 247-252. [Zhou Chuanming, Yan Kui, Hu Jie, et al. 2001. The Neoproterozoic tillites at Lantian, Xiuning county, Anhui province[J]. Journal of Stratigraphy, 25(4): 247-252.]
- Babinski M, Boggiani P C, Trindade R I F, et al. 2013. Detrital zircon ages and geochronological constraints on the Neoproterozoic Puga diamictites and associated BIFs in the southern Paraguay Belt, Brazil[J]. Gondwana Research, 23(3): 988-997.
- Bowring S A, Myrow P M, Landing E, et al. 2003. Geochronological constraints on terminal Neoproterozoic events and the rise of Metazoan[C]//EGS-AGU-EUG joint assembly. Nice: EUG: 13219.
- Calver C R, Black L P, Everard J L, et al. 2004. U-Pb zircon age constraints on Late Neoproterozoic glaciation in Tasmania[J]. Geology, 32(10): 893-896.
- Condon D, Zhu M Y, Bowring S, et al. 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China[J]. Science, 308(5718): 95-98.
- Courtney-Davies L, Flowers R M, Siddoway C S, et al. 2024. Hematite U-Pb dating of Snowball Earth meltwater events[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 121(47): e2410759121.
- de Carvalho D F, Nogueira A C R, Macambira M J B, et al. 2023. Constraining the diagenesis of the Puga cap carbonate from U-Pb in-situ dating of seafloor crystal fans, southern Amazonian Craton, Brazil[J]. Terra Nova, 35(4): 276-284.
- Dickinson W R, Gehrels G E. 2009. Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database[J]. Earth and Planetary Science Letters, 288(1/2): 115-125.
- Du Q D, Wang Z J, Wang J, et al. 2013. Geochronology and paleoenvironment of the pre-Sturtian glacial strata: Evidence from the Liantuo Formation in the Nanhua rift basin of the Yangtze Block, South China[J]. Precambrian Research, 233: 118-131.
- Dufour F, Davies J H F L, Greenman J W, et al. 2023. New U-Pb CA-ID TIMS zircon ages implicate the Franklin LIP as the proximal trigger for the Sturtian Snowball Earth event[J]. Earth and Planetary Science Letters, 618: 118259.
- Fanning C M, Link P K. 2008. Age constraints for the sturtian glaciation; data from the adelaide geosyncline, South Australia and Pocatello Formation, Idaho, USA[C]//Neoproterozoic extreme climates and the origin of early metazoan life, Selwyn symposium of the GSA victoria division. Melbourne: Geological Society of Australia: 57-62.
- Gong Z. 2021. Cyclostratigraphy of the Cryogenian Fiq Formation, Oman and its implications for the age of the Marinoan glaciation[J]. Global and Planetary Change, 204: 103584.
- Hoffman P F, Abbot D S, Ashkenazy Y, et al. 2017. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology[J]. Science Advances, 3(11): e1600983.
- Karlstrom K E, Bowring S A, Dehler C M, et al. 2000. Chuar Group of the Grand Canyon: Record of breakup of Rodinia, associated change in the global carbon cycle, and ecosystem expansion by 740 Ma[J]. Geology, 28(7): 619-622.
- Kendall B, Creaser R A, Selby D. 2006. Re-Os geochronology of post-glacial black shales in Australia: Constraints on the timing of "Sturtian" glaciation[J]. Geology, 34(9): 729-732.
- Kendall B S, Creaser R A, Ross G M, et al. 2004. Constraints on the timing of Marinoan "Snowball Earth" glaciation by ^{187}Re - ^{187}Os dating of a Neoproterozoic, post-glacial black shale in western Canada [J]. Earth and Planetary Science Letters, 222(3/4): 729-740.
- Kirkland C L, Strachan R A, Archibald D B, et al. 2025. The Neoproterozoic glacial broom[J]. Geology, 53(5): 435-440.
- Lan Z W, Huyskens M H, Lu K, et al. 2020. Toward refining the onset age of Sturtian glaciation in South China[J]. Precambrian Research, 338: 105555.
- Lan Z W, Li X H, Zhu M Y, et al. 2014. A rapid and synchronous initia-

- tion of the wide spread Cryogenian glaciations[J]. *Precambrian Research*, 255: 401-411.
- Lan Z W, Li X H, Zhang Q R, et al. 2015. Global synchronous initiation of the 2nd episode of Sturtian glaciation: SIMS zircon U-Pb and O isotope evidence from the Jiangkou Group, South China[J]. *Precambrian Research*, 267: 28-38.
- Liu P J, Li X H, Chen S M, et al. 2015. New SIMS U-Pb zircon age and its constraint on the beginning of the Nantuo glaciation[J]. *Science Bulletin*, 60(10): 958-963.
- Macdonald F A, Schmitz M D, Crowley J L, et al. 2010. Calibrating the Cryogenian[J]. *Science*, 327(5970): 1241-1243.
- MacLennan S, Park Y, Swanson-Hysell N, et al. 2018. The arc of the Snowball: U-Pb dates constrain the Islay anomaly and the initiation of the Sturtian glaciation[J]. *Geology*, 46(6): 539-542.
- Millikin A E G, Strauss J V, Halverson G P, et al. 2022. Calibrating the Russoya excursion in Svalbard, Norway, and implications for Neoproterozoic chronology[J]. *Geology*, 50(4): 506-510.
- Pu J P, Macdonald F A, Smith E F, et al. 2023. Tonian Basins record rifting of Kalahari from Rodinia and no evidence of a pre-Sturtian Kaigas glaciation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 624: 118472.
- Schaefer B F, Burgess J M. 2003. Re-Os isotopic age constraints on deposition in the Neoproterozoic Amadeus Basin: Implications for the 'Snowball Earth' [J]. *Journal of the Geological Society*, 160(6): 825-828.
- Shields-Zhou G A, Porter S, Halverson G P. 2016. A new rock-based definition for the Cryogenian Period (circa 720 - 635 Ma)[J]. *Episodes*, 39(1): 3-8.
- Song G Y, Wang X Q, Shi X Y, et al. 2017. New U-Pb age constraints on the Upper Banxi Group and synchrony of the Sturtian glaciation in South China[J]. *Geoscience Frontiers*, 8(5): 1161-1173.
- Stanevich A M, Mazukabzov A M, Postnikov A A, et al. 2007. Northern segment of the Paleoasian Ocean: Neoproterozoic deposition history and geodynamics[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 48(1): 46-60.
- Thompson M D, Bowring S A. 2000. Age of the Squantum "tillite," Boston Basin, Massachusetts: U-Pb zircon constraints on terminal Neoproterozoic glaciation[J]. *American Journal of Science*, 300(8): 630-655.
- Wang D, Zhu X K, Zhao N N, et al. 2019. Timing of the termination of Sturtian glaciation: SIMS U-Pb zircon dating from South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 177: 287-294.
- Xu B, Jian P, Zheng H F, et al. 2005. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Neoproterozoic volcanic rocks in the Tarim Block of Northwest China: Implications for the breakup of Rodinia supercontinent and Neoproterozoic glaciations[J]. *Precambrian Research*, 136(2): 107-123.
- Zhang Q R, Li X H, Feng L J, et al. 2008a. A new age constraint on the onset of the Neoproterozoic glaciations in the Yangtze Platform, South China[J]. *The Journal of Geology*, 116(4): 423-429.
- Zhang S H, Jiang G Q, Han Y G. 2008b. The age of the Nantuo Formation and Nantuo glaciation in South China[J]. *Terra Nova*, 20(4): 289-294.
- Zhou C M, Huyskens M H, Lang X G, et al. 2019. Calibrating the terminations of Cryogenian global glaciations[J]. *Geology*, 47(3): 251-254.
- Zhou C M, Huyskens M H, Xiao S H, et al. 2020. Refining the termination age of the Cryogenian Sturtian glaciation in South China[J]. *Palaeoworld*, 29(3): 462-468.
- Zhou C M, Tucker R, Xiao S H, et al. 2004. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in South China[J]. *Geology*, 32(5): 437-440.

Cryogenian Sedimentary Rocks and Zircon U-Pb Age in Hanzhong Area, Northern Margin of the Yangtze Block

GAO YueYang, LI Hong, JIN JiaNing, MU YaRong, LI ZongLin

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

Abstract: [Objective] Neoproterozoic “Snowball Earth” (Cryogenian) glaciations is a long-standing hot topic in sedimentology. In South China, well-preserved sedimentary records during Cryogenian Period have been found in many places in the Yangtze Block. However, there are relatively few reports on deposits of this time in Kangdian Rift Basin on western margin of the Yangtze Block, and in the rift basin between northern margin of the Yangtze Block and southern margin of the Qingling Orogen. [Methods] This study focuses on the Cryogenian glacial deposits in the Gangchang-Yuanba section, Hanzhong area, northern margin of the Yangtze Block. Based on the field observations and measurements, zircons were selected from the bottom tuff layer and upper sandstones for U-Pb dating analysis using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). Detailed features of the sedimentary rocks and their regional correlation are also discussed. [Results] Two sets of tillites were identified for the first time within the Neoproterozoic glacial sedimentary rocks in this region, both from a continental glacier. Several layers of sandstone and siltstone are presented between and above the tillite sets. Zircons from the bottom tuff yielded the earliest mean concordant age of (719 ± 11) Ma, indicating the beginning of glaciation in this region. Considering their lithological succession and sedimentary structures, these Cryogenian deposits are thought to have been formed during Sturtian glaciation, corresponding respectively to the Chang'an and Gucheng glaciation periods. The timing of this glaciation event, and the sedimentary associations, are consistent with contemporaneous sediments in the adjacent Zhenba and Chengkou areas, and also show similarities to Sturtian sediments widely distributed in other parts of South China.

Key words: northern margin of the Yangtze Block; Nantuo Formation; glacial deposition; Sturtian glaciation; zircon U-Pb dating

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41272115; Natural Science Foundation of Shaanxi Province General Program Project, No. 2025JC-YBMS-303; Northwestern University High-Level Textbook Construction Project

Corresponding author: LI Hong, E-mail: lihong2008@nwnu.edu.cn