

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.168>



扬子陆块三峡地区莲沱组砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义

徐琼^{1,2,3}, 江拓¹, 侯林春⁴, 赵小明^{1,3}, 童喜润¹, 散飞雪⁵, 邱啸飞^{1,2,3*}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205
2. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074
3. 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430205
4. 中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北武汉 430074
5. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 对扬子陆块三峡地区黄牛岩剖面莲沱组顶部砂岩中的120颗碎屑锆石进行了U-Pb定年和Lu-Hf同位素分析。结果显示, 黄牛岩剖面莲沱组中碎屑锆石的年龄谱具有~880~800 Ma、~2 000 Ma、~2 500 Ma及~2 700 Ma的峰值, 其中最年轻的碎屑锆石年龄为724±8 Ma。结合前人对该地区莲沱组顶部凝灰岩开展的年代学工作, 将莲沱组顶部砂岩沉积时代限定为724~714 Ma。莲沱组砂岩沉积时间与其中最年轻的碎屑锆石U-Pb年龄接近, 反映了其源区地壳物质的快速再循环。碎屑锆石Hf同位素两阶段模式年龄(T_{DM2})集中在~3.7~3.1 Ga、~2.5~2.0 Ga和~1.3~1.0 Ga, 反映其物源区存在古一中太古代、古元古代以及中元古代末期的初生地壳生长。对比近年来三峡地区不同剖面莲沱组砂岩中已报道的碎屑锆石年龄和Hf同位素数据, 黄牛岩剖面的莲沱组碎屑锆石年龄和Hf同位素组成与之以北的王丰岗剖面均存在明显差异, 说明莲沱组沉积期两者的陆源物质供给区有较大差别。

关键词: 扬子陆块; 莲沱组; 碎屑锆石; U-Pb 年龄; Hf 同位素; 岩石学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2021)04-1217-14

收稿日期: 2020-04-15

Detrital Zircon Compositions of U-Pb Ages and Hf Isotope for Sandstone of Liantuo Formation from Three Gorges Area, Yangtze Block and Its Geological Significance

Xu Qiong^{1,2,3}, Jiang Tuo¹, Hou Linchun⁴, Zhao Xiaoming^{1,3}, Tong Xirun¹, San Feixue⁵, Qiu Xiaofei^{1,2,3*}

1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China
2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, China
4. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
5. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In this study, 120 detrital zircons from the sandstone at the top of the Liantuo Formation in the Huangniuyan Section of

基金项目: 湖北省重点实验室开放基金项目(No.KLPE-202013); 国家自然科学基金项目(No. 41303026); 中国地质调查局地质调查项目(Nos. DD20190374, DD20190385)。

作者简介: 徐琼(1994—), 女, 在读硕士, 地质学专业。ORCID: 0000-0002-8529-4911. E-mail: xuqiong@cug.edu.cn

* 通讯作者: 邱啸飞, ORCID: 0000-0001-8770-813X. E-mail: qiu Xiaofei@mail.cgs.gov.cn

引用格式: 徐琼, 江拓, 侯林春, 等, 2021. 扬子陆块三峡地区莲沱组砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. 地球科学, 46(4):

1217-1230.

the Three Gorges area were measured for U-Pb dating and Lu-Hf isotopic compositions. The U-Pb ages of the zircons from the Huangniuyan Section cluster at ~ 800 – 880 Ma, $\sim 2\,000$ Ma, $\sim 2\,500$ Ma, $\sim 2\,700$ Ma, among which the youngest zircon age is 724 ± 8 Ma. According to the previous geochronological study of tuff on the top of the Liantuo Formation, the sedimentary age of the sandstone in the upper most part of the Liantuo Formation is limited to ~ 724 – 714 Ma. The sedimentary time of the Liantuo sandstone is close to the U-Pb age of the youngest detrital zircon, which may reflect a rapid recycling of crustal materials. The Hf isotopic two-stage model ages (T_{DM2}) of zircon are concentrated at ~ 3.7 – 3.1 Ga, ~ 2.5 – 2.0 Ga and ~ 1.3 – 1.0 Ga, which indicates that the provenance of the sandstone has juvenile crustal growth in the Paleo-Mesoarchean, Paleoproterozoic and Late Mesoproterozoic. By comparing the detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic data from different sections of the Liantuo Formation in the nucleus of the Yangtze craton reported in recent years, it is suggested that the Huangniuyan Section has distinct detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions compared with the Wangfenggang Section, revealing different provenance between them.

Key words: Yangtze block; Liantuo Formation; detrital zircon; U-Pb age; Hf isotope; petrology.

0 引言

前寒武纪是大陆地壳形成和生长的重要时期,全球约90%的大陆地壳形成于前寒武纪(Hawkesworth and Kemp, 2006).华南陆块是我国大陆最主要组成陆块之一,了解其形成与构造演化过程对认识中国大陆地壳的组成、构造格局演变等均具有重要意义.长期以来,许多研究者对华南陆块前寒武纪地质体开展了大量的地球化学、同位素年代学、岩石学和地层学等工作,积累了大量的数据资料,对华南陆块前寒武纪大地构造演化的认识有了较大幅度的了解.华南陆块大范围出露新元古代与Rodinia超大陆演化过程密切相关的各类地质体.然而,有关这些地质体成因和构造背景目前仍存在较大争议,包括与地幔柱活动相关的陆内拉张环境(Li et al., 2003)、与陆缘岛弧有关的挤压环境(Zhou et al., 2002)以及华南陆内造山后岩石圈垮塌(Zheng et al., 2007)等多种不同认识.

另一方面,华南陆块由其东南部的华夏陆块和西北部的扬子陆块组成,传统观点认为,统一的华南陆块由华夏陆块与扬子陆块这两大块体于新元古代早期沿江南造山带发生拼合最终形成(Chen et al., 1991).然而,随着研究工作的不断积累,尤其是近年来对扬子陆块中—新元古代构造—岩浆事件研究的逐步开展,部分研究者提出现有规模的扬子陆块本身可能由多个次一级微陆块于中元古代末期最终碰撞拼合形成,而非统一的整体(潘桂棠等, 2009; Qiu et al., 2011, 2015; Peng et al., 2012; 陆松年等, 2014; 张克信等, 2015, 2018).显然,要完整认识扬子陆块前寒武纪地质演化历史,离不开对其内部次一级微陆块演化过程的深入

研究.

湖北省宜昌市三峡地区位于扬子陆块核部,该地区不仅出露有扬子陆块最古老的结晶基底(Guo et al., 2014)以及元古宙庙湾蛇绿岩(Peng et al., 2012)和交战垭蛇绿岩(Han et al., 2017)等,而且有大量的新元古代岩浆岩产出(Zhang et al., 2008).此外,该地区新元古代中—晚期地层发育齐全,所以也是我国南方新元古代地层的标准命名地点(Lee, 1924),成为国内外研究新元古代地质过程的热点地区之一.莲沱组碎屑岩作为扬子陆核统一块体形成后第1套未遭受变质变形的沉积地层,对新元古代区域地层对比、扬子陆核新元古代末期构造演化和早期地质演化历史等方面均具有重要指示意义.

本文对宜昌三峡地区黄牛岩剖面莲沱组顶部砂岩中碎屑锆石进行了U-Pb定年和Lu-Hf同位素分析,以对莲沱组沉积时代和沉积物源进行了探讨.此外,通过与近年来扬子陆核其他剖面莲沱组砂岩中所获得的碎屑锆石年龄及Hf同位素结果进行对比,对扬子陆块新元古代构造演化过程提供了约束.

1 区域地质背景

研究区位于扬子陆块核心部位,湖北省宜昌市三峡地区,在地理位置上其西与四川盆地相邻,北与秦岭造山带接壤.该地区不仅出露有华南最古老的岩石,如太古宙东冲河杂岩、古元古代水月寺岩群等,还存在新太古代TTG岩石、古元古代圈椅端花岗岩和新元古代黄陵花岗基岩等侵入体,而且出露有扬子陆块新元古代标准地层剖面.太古宙东冲河杂岩和古元古代水月寺岩群为区域上最古老结

晶基底,总出露面积 $\sim 360 \text{ km}^2$,以高角闪岩相到麻粒岩相变质岩为主,岩性包括TTG片麻岩、斜长角闪岩和变沉积岩(黑云斜长片麻岩、石英片岩、大理岩、变粒岩)等。已有研究表明,TTG片麻岩主要形成于 $\sim 3.4\text{--}2.7 \text{ Ga}$ (Chen *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2014; Qiu *et al.*, 2018);斜长角闪岩主要形成于 $\sim 3.0\text{--}2.7 \text{ Ga}$ (凌文黎等, 1998; Li *et al.*, 2014);副变质岩原岩则沉积于 $\sim 2.1\text{--}1.9 \text{ Ga}$ (邱啸飞等, 2017; Qiu *et al.*, 2018)。区内岩浆岩主要为中酸性

侵入岩,同时有少量辉绿岩脉,在不同区段侵入崆岭杂岩中,侵入岩具有多期次特点,时代从新太古代到新元古代不等(Peng *et al.*, 2009; Guo *et al.*, 2015; 邱啸飞等, 2019)(图1)。

中上新元古代沉积地层以沉积不整合接触关系覆盖在崆岭杂岩及侵入岩之上,从老至新依次为莲沱组、南沱组、陡山沱组和灯影组。莲沱组为一套紫红色、暗紫红色的中一厚层状砂砾岩、含砾粗砂岩、长石石英砂岩、石英砂岩、细粒岩屑砂岩、长石

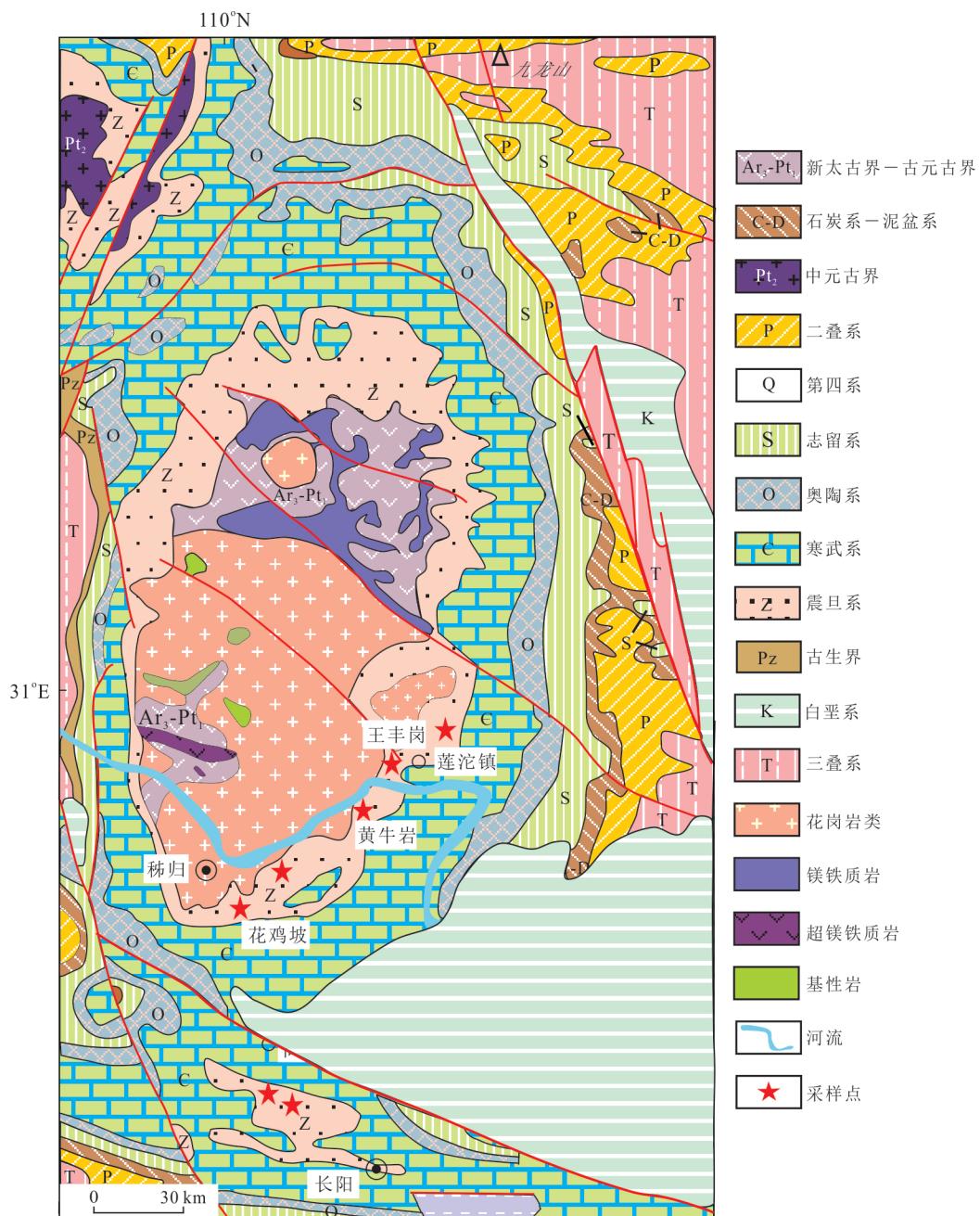


图1 宜昌三峡地区地质简图及采样位置(据Liu *et al.*(2008)和Li *et al.*(2020)修改)
Fig.1 Sketch geological map of the study area at the Three Gorges area and sampling locations

质砂岩夹凝灰质岩屑砂岩,含砾岩屑凝灰岩,与上覆南沱组冰碛砾岩之间呈平行不整合接触。南沱组主要由灰绿色、暗绿色冰碛泥砾岩组成,上部夹薄层状砂岩透镜体,与上覆陡山沱组呈整合或平行不整合接触。陡山沱组以灰色、褐灰色、灰白色白云岩为主,下部为灰色、灰白色厚层白云岩,含泥质、硅质和磷质结核,中部为灰黑色页片状含粉砂质白云岩、炭质页岩、泥灰岩,上部由灰、灰白色薄层—中层白云岩夹硅质层或燧石团块组成,与上覆灯影组呈整合接触。灯影组下部为灰白色厚层状内碎屑白云岩,中部黑色薄层状含沥青质灰岩,含燧石条带及结核,上部灰白色中—厚层状白云岩,含燧石层及燧石团块,顶部为硅磷质白云岩。对研究区莲沱组、陡山沱组以及灯影组中凝灰岩夹层的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年表明,莲沱组、陡山沱组和灯影组的年龄分别为 763 ± 10 Ma、 621 ± 7 Ma 和 555 ± 6 Ma (Zhang *et al.*, 2006)。此外,胡蓉等(2016)在三峡地区南沱组凝灰质岩石中获得了最年轻锆石年龄为 706 ± 7 Ma,并结合前人在上下地层中所做的年代学工作,将南沱组沉积时代限定为 654~635 Ma。

2 样品采集及测试

本文所研究的莲沱组样品采自湖北宜昌三峡地区的黄牛岩一带。样品(18HNY01)采自黄牛岩剖面莲沱组上部(图 2),位于莲沱组与南沱组平行不整合面之下 5 cm(图 3a)。样品的 GPS 坐标点位为 $30^{\circ}49'15.34''N$, $111^{\circ}05'11.05''E$, 岩性为中粗粒长石石英砂岩。研究样品为厚层状,其中可见平行层理,块状构造,中粗粒结构。主要矿物组合为石英、斜长石、钾长石等,含少量岩屑,副矿物包括锆石、钛铁氧化物等(图 3b)。

样品采集后直接送往河北省廊坊市(宇能)宇恒矿岩技术服务有限公司进行锆石分选工作,锆石分选采用重磁法完成。锆石阴极发光(CL)图像在北京锆年领航科技有限公司配备英国 Gatan 公司生产的阴极荧光探头装置系统的 JSM6510 扫描电镜上完成。在 CL 图像采集之前,对样品还进行了透射光和反射光图像照相,以便更好地观察锆石的内外部形态。在照相之前,用体积百分比为 3% 的 HNO_3 清洗锆石表面,以除去表面污染。

锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素测试分析均在中国地质调查局武汉地质调查中心同位素地球化学实验室完成。锆石 U-Pb 定年分析仪器为装备 RES-

Olution 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统与 icapQ 型 ICP-MS 联机。实验中激光束斑直径为 $29 \mu m$, 激光剥蚀时间为 45 s, 激光频率和能量密度分别为 3 Hz 和 $4 J/cm^2$ 。采用国际锆石标样 91500 作为外标来校正 U-Pb 同位素数据,采用 NIST SRM610 作为外标来测定元素含量,单个数据点误差为 1σ 。锆石 U-Pb 同位素组成原始数据采用 ICPMSDataCal 软件(ver. 10.8)进行处理(Liu *et al.*, 2008)。锆石年龄计算以及谐和图的绘制均采用 ISOPLOT 3.0 软件完成(Ludwig, 2003)。

锆石 Hf 同位素分析仪器为配备 RESolution 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统与 Neptune plus 型 MC-ICP-MS 联机。锆石 Lu-Hf 同位素分析点选择在 LA-ICP-MS 年龄测试点附近(图 4)。实验中激光束斑直径为 $43 \mu m$, 激光剥蚀时间 60 s, 激光频率为 6 Hz, 激光能量密度为 $4 J/cm^2$ 。测定时采用 91500 作为外部标准。 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的干扰采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.026\ 56$ 进行校正(Blichert-Toft and Albarède, 1997),同时假设 Lu 和 Hf 的分馏情况类似。 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的干扰采用实测无干扰 ^{173}Yb 进行校正,同时设定 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}$ 比值为 0.786 96 (Thirlwall and Anzwickiewicz, 2004) 来进行计算。锆石 Hf 同位素组成原始数据同样采用 ICPMSDataCal 软件(ver. 10.8)进行处理(Liu *et al.*, 2008)。

3 样品分析结果

莲沱组上部砂岩中的锆石棱角分明,均为较自形的长柱状、短柱状或是破碎的棱柱状。锆石的颗粒长度为 45~200 μm 左右,多数锆石 CL 发光较强,大部分锆石都具有显著的振荡环带,代表其岩浆成因。少数锆石具有残留核或不对称结构,表明来源相对复杂(图 4)。

本文对莲沱组顶部砂岩中分选出的 120 颗锆石进行了 120 个点的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定。其中 115 个锆石年龄数据点谐和或近似谐和(谐和度大于 90%)(附表 1)(图 5a),Th/U 比值对 U-Pb 年龄关系图显示,所有谐和锆石 Th/U 比值均大于 0.4(图 5c),且均具有振荡环带,说明这些都属岩浆锆石。考虑到 ^{207}Pb 放射性子体同位素的累计问题,本文对于锆石 U-Pb 年龄小于 1 000 Ma 的数据选取 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,而大于 1 000 Ma 的数据选取 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄进行讨论。

U-Pb 年龄结果显示,黄牛岩地区莲沱组中碎

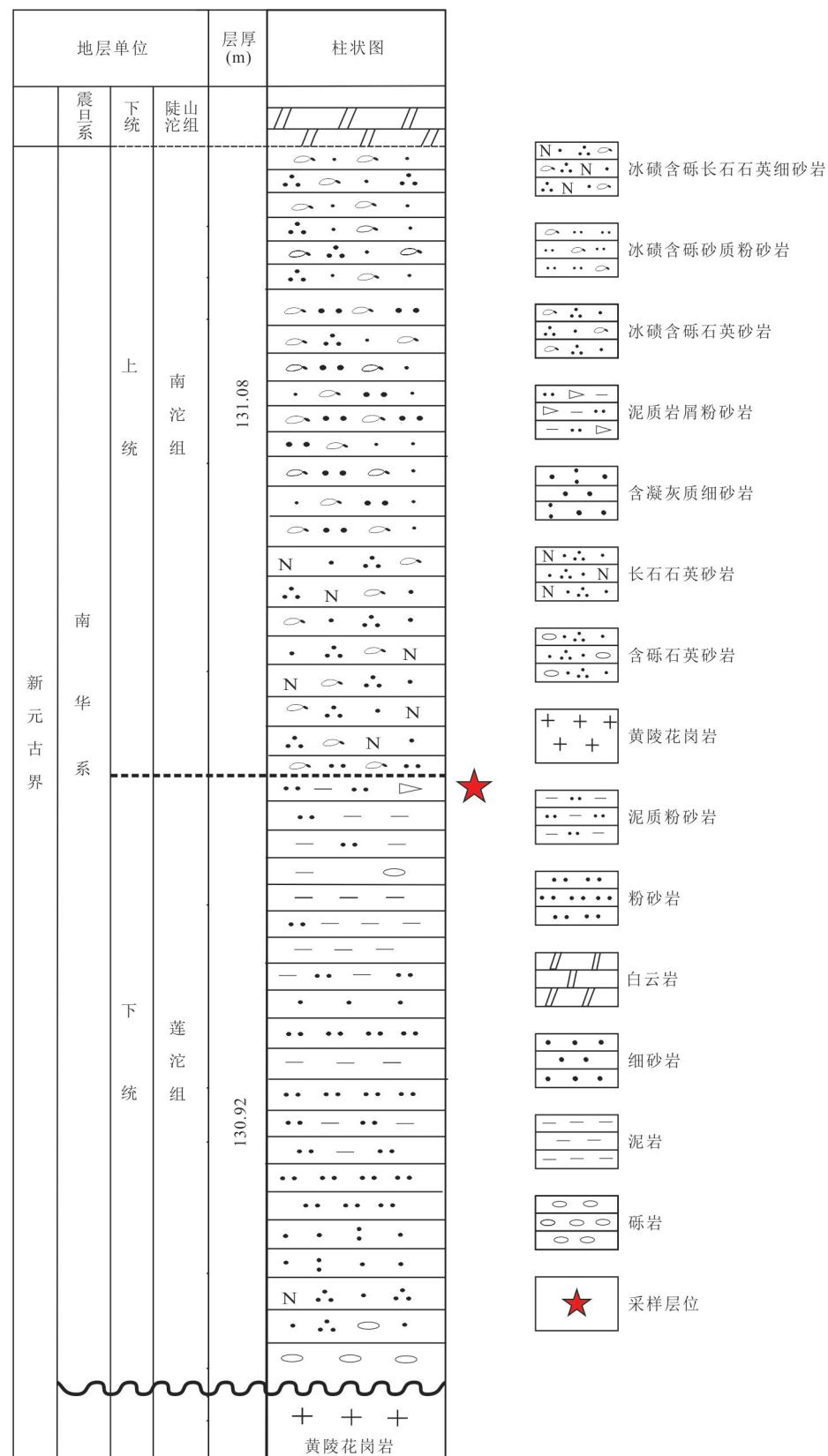


图2 宜昌三峡地区黄牛岩剖面南华系地层柱状图(据赵小明等(2011)修改)

Fig.2 Stratigraphic column for the Nanhua System sedimentary successions from the Huangniuyan Section at the Three Gorges area (modified after Zhao *et al.*, 2011)

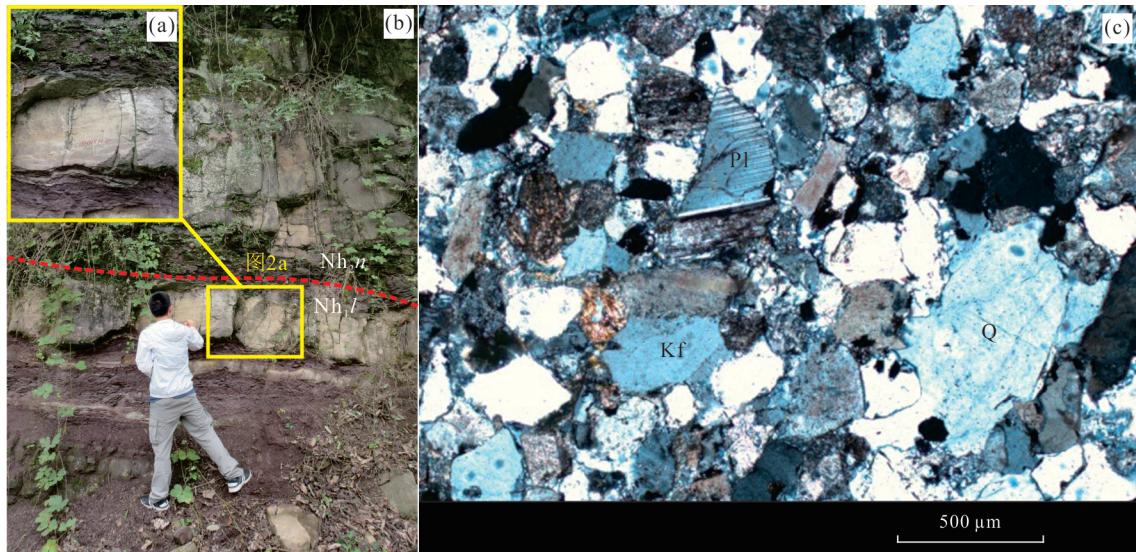


图3 宜昌三峡地区黄牛岩剖面莲沱组砂岩野外及薄片照片

Fig.3 Field outcrop and photomicrograph for the sandstone of the Liantuo Formation from the Huangniuyan Section, Three Gorges area

Q. 石英; Kf. 钾长石; Pl. 斜长石

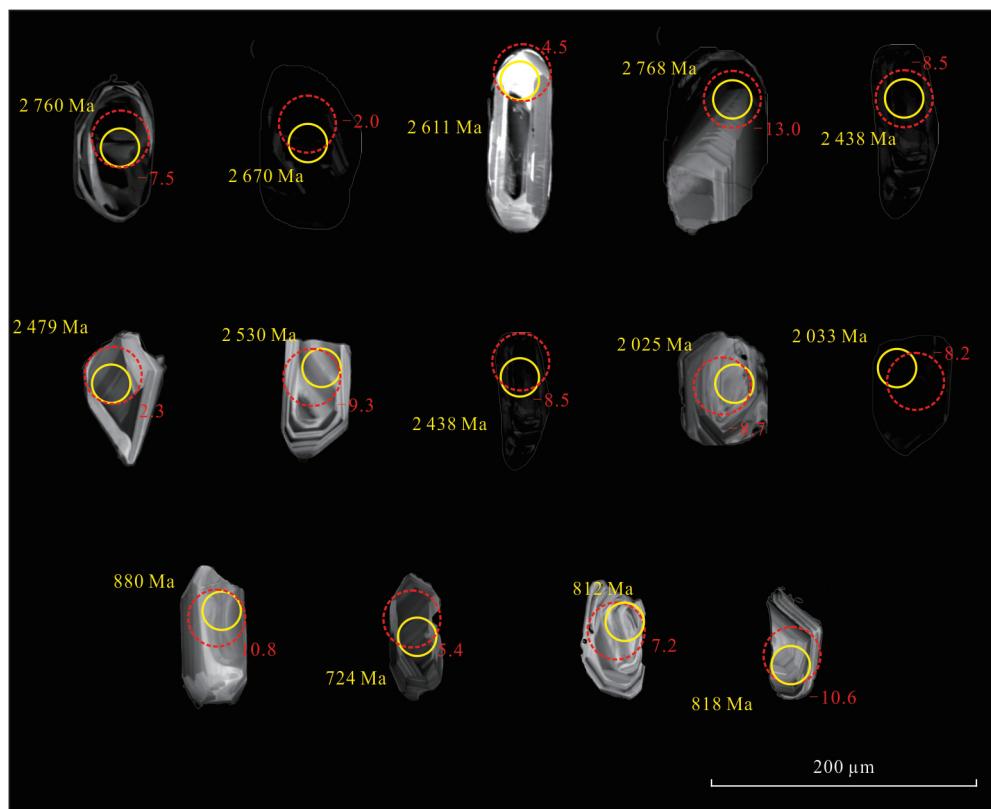


图4 宜昌三峡地区莲沱组顶部砂岩代表性锆石阴极发光图

Fig.4 CL images of representative zircons for the sandstone of the uppermost Liantuo Formation at the Three Gorges area
较小的圈为 U-Pb 同位素年龄分析点及对应的 U-Pb 表面年龄; 较大的圈为 Lu-Hf 同位素分析点及对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

屑锆石的年龄主要集中于 3 个年龄阶段, 分别为新太古代($\sim 2700 \sim 2500$ Ma)、古元古代(~ 2000 Ma)

以及新元古代($\sim 880 \sim 800$ Ma), 其中主要峰值分别为 ~ 800 Ma 和 ~ 880 Ma, 另外还存在 2 052 Ma、

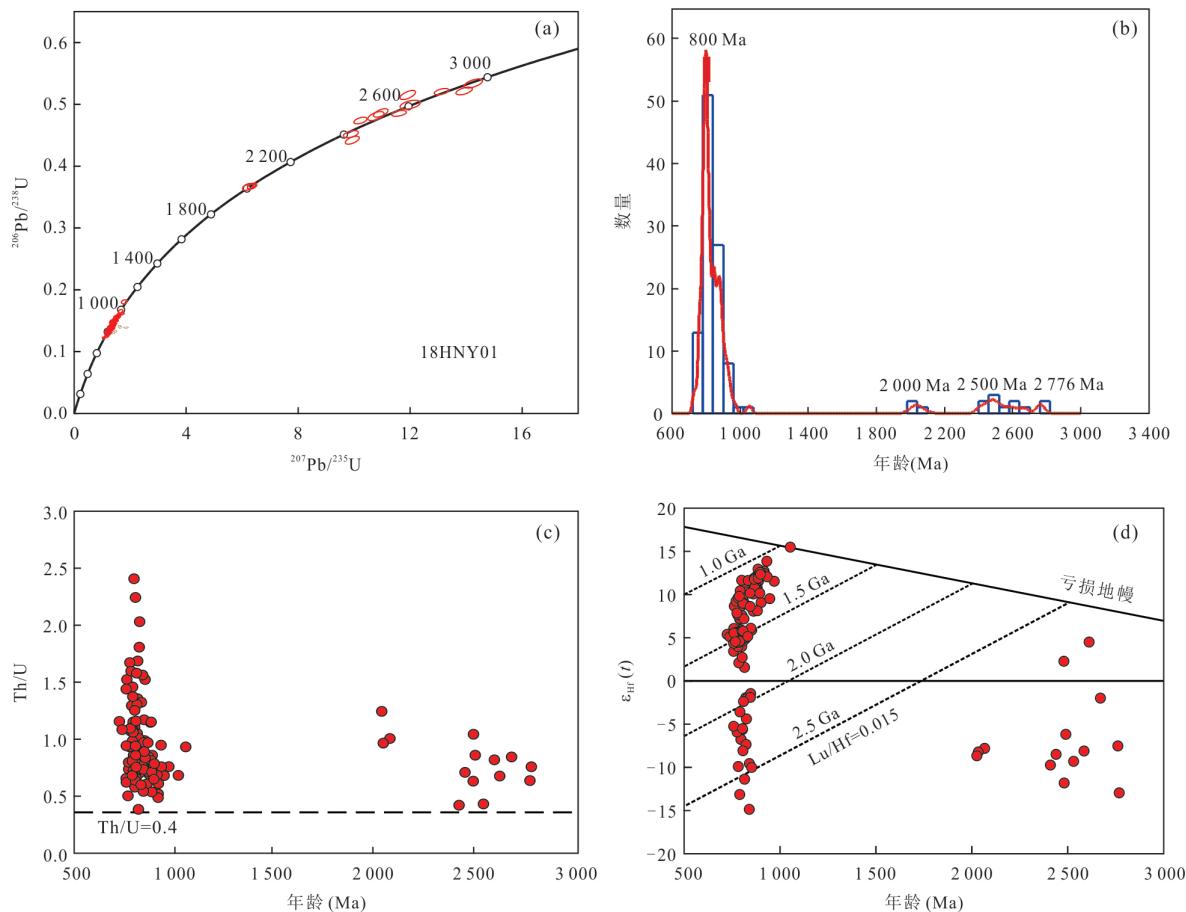


图5 宜昌三峡地区黄牛岩剖面莲沱组顶部砂岩锆石U-Pb年龄谐和图(a)、年龄分布(b)、Th/U比值与年龄关系(c)和U-Pb年龄与 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系(d)

Fig.5 Diagram of U-Pb concordia (a), age distribution (b), U-Pb age vs. Th/U ratios (c) and U-Pb age vs. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value plots (d) for zircons from the sandstone of the uppermost Liantuo Formation from the Huangniuyan Section at the Three Gorges area

2 500 Ma 和 2 776 Ma 等几个次要峰值(图5b).值得注意的是,莲沱组砂岩中最年轻的碎屑锆石年龄为 724±8 Ma (附表1).

对样品中 120 颗碎屑锆石均进行了 Lu-Hf 同位素测定(附表2).由于锆石 Hf 同位素的分析点与 U-Pb 年龄测试点接近,且锆石内部相对均匀(图4),因此可假设所分析点的 Hf 同位素组成和锆石 U-Pb 年龄基本相对应,因此在进行 Hf 同位素计算时,所用的是同一锆石所测得的 U-Pb 年龄.在进行 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 Hf 同位素模式年龄计算时,现今球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别采用 0.033 200, 0.282 772 (Blichert-Toft and Albarède, 1997) 和 0.038 400, 0.283 250 (Griffin *et al.*, 2000). Hf 同位素两阶段模式年龄计算时,平均大陆地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 组成采用 0.015 (Griffin *et al.*, 2002). ^{176}Lu 的衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Al-

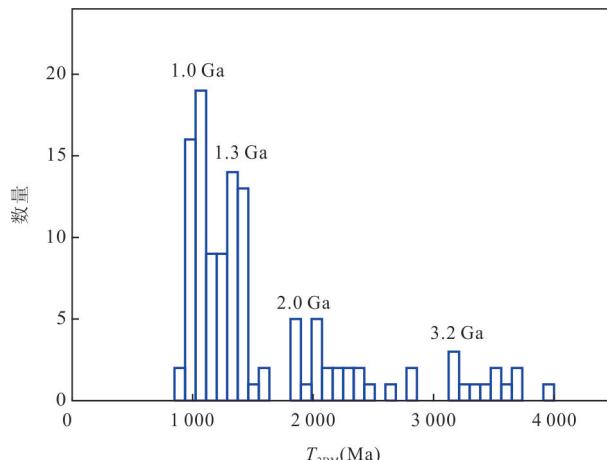


图6 宜昌三峡地区黄牛岩剖面莲沱组顶部砂岩锆石 Hf 同位素模式年龄频率分布直方图

Fig.6 Zircon Hf model ages for the uppermost sandstone of the Liantuo Formation from the Huangniuyan Section at the Three Gorges area

barède *et al.*, 2006). 结果表明, 锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分布在 0.280 67~0.282 67 之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -14.9~15.5 (图 5d), 对应的 Hf 同位素两阶段模式年龄大致可以分为 3 组: 分别为 ~1.3~1.0 Ga、2.5~2.0 Ga、3.7~3.1 Ga (图 6).

4 讨论

4.1 黄牛岩地区莲沱组顶部砂岩的沉积时代

由于三峡地区拥有华南新元古代地层标准剖面, 因而该地区以莲沱组为代表的新元古代地层年龄备受国内外地学研究者的广泛关注。随着工作的不断开展, 学者们对莲沱组开展了大量同位素年代学工作, 取得了一些共识, 但也存在不同观点: 部分学者认为它属于板溪群, 沉积年龄应该为 780~714 Ma, 属于前南华纪地层 (高维和张传恒, 2009; Lan *et al.*, 2015); 另一些学者则认为它位于板溪群之上, 属于南华系, 沉积年龄可能小于 730 Ma, 对比于冰期地层 (Zhang *et al.*, 2006)。这些观点的不同导致扬子陆块新元古代地层格架难以取得统一认识。

本文样品采自三峡地区黄牛岩剖面莲沱组与南沱组平行不整合界面之下 5 cm 处, 并获得其中最年轻碎屑锆石年龄为 724 ± 8 Ma, 表明该剖面顶部莲沱组砂岩的沉积年龄不早于 724 Ma。最近对莲沱组中凝灰岩夹层开展的高精度锆石 U-Pb 定年对限定该套地层时代起到了关键作用。例如, 高维和张传恒 (2009) 在三峡地区莲沱组顶部凝灰岩中获得了 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 724 ± 12 Ma。此外, Lan *et al.* (2015) 在利用 SIMS 在宜昌王丰岗剖面莲沱组中上部凝灰质粉砂岩中获得了 ~733 Ma 的锆石 U-Pb 年龄、在田家院子剖面上部凝灰质粉砂岩中获得了 ~735 Ma 的年龄, 而在靠近南沱组底界莲沱组顶部凝灰质粉砂岩层则获得了 ~714 Ma 的年龄。这些新的年代学研究将莲沱组顶部时代限定在了 735~714 Ma。综合本研究和前人的相关研究成果, 可将三峡地区黄牛岩剖面莲沱组顶部砂岩的沉积时代限定为 ~724~714 Ma。

4.2 黄牛岩地区莲沱组物源分析

锆石 U-Pb 年龄记录了岩浆结晶或者变质事件, 而锆石 Hf 同位素模式年龄则反映了源区的地壳平均居留时间, 或者说岩浆从地幔源区分离出来的时间。将碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄和 Hf 同位素模式年龄结合起来, 是沉积岩物源分析研究的重要手段之一 (Fedo *et al.*, 2003)。前文已提及黄牛岩地区

莲沱组砂岩中的碎屑锆石 U-Pb 年龄大致可分为新太古代、古元古代以及新元古代 3 组。这些碎屑锆石形态以自形或半自形为主, 反映出并未经历远距离搬运的近源锆石特点。

新太古代年龄存在 ~2.7 Ga 和 ~2.5 Ga 两个年龄峰值, 可对应扬子陆核古老基底的固化和形成。其中 ~2.7 Ga 的年龄峰相对偏低, 该年龄地质体近年来在崆岭杂岩北部屡有报道, 包括: Chen *et al.* (2013) 在崆岭地区报道的 ~2.67~2.62 Ga 的 A 型花岗岩, 邱啸飞等 (2019) 在崆岭杂岩中报道的 ~2.7 Ga 的 I 型花岗片麻岩等。本文的研究表明, 该期岩浆事件可能不仅限于北部崆岭地区, 应更广泛地影响着整个扬子陆核。Han *et al.* (2017) 对流经扬子陆核的 3 条现代河流中河沙样品的碎屑锆石开展了 U-Pb 年龄分析, 认为 ~2.7~2.6 Ga 构造岩浆事件可能在整个扬子陆核普遍存在, 其规模甚至可能比区域上 3.4~2.9 Ga 的 TTG 岩浆作用影响更为广泛。这些锆石都具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 对应 Hf 模式年龄为 ~4.0 Ga 到 ~3.3 Ga, 说明这些锆石主要来自中太古代甚至冥古宙地壳岩石的再造或再循环。

与 ~2.7 Ga 构造热事件相比, 除在秦岭一大别造山带中有少量 ~2.5 Ga 地质体 (如陡岭杂岩) 报道以外 (Nie *et al.*, 2016), 该年龄的地质体至今仍未在扬子陆块内报道。然而, ~2.5 Ga 的碎屑锆石在扬子陆核新元古代沉积岩中普遍存在。例如, Liu *et al.* (2008) 和赵小明等 (2018) 对三峡地区南华系碎屑岩地层 (莲沱组、南沱组) 开展的锆石年代学研究均显示存在 ~2.5 Ga 的明显峰值; 宋芳等 (2016) 的研究也表明中扬子地区湖北通山、长阳以及湖南杨家坪 3 个代表性剖面南华纪早期莲沱组及相应层位碎屑锆石年龄谱中均存在明显的 ~2 500 Ma 的年龄峰值。本文在黄牛岩剖面所开展的碎屑锆石工作同样显示了相对明显的 ~2.5 Ga 峰值, 这些锆石形态显示其并未经历长距离搬运过程, 暗示在扬子陆核之下可能存在 ~2.5 Ga 的尚未出露的未知地质体。另外, Zheng *et al.* (2006) 在宜昌地区南边的京山煌斑岩中也发现了 ~2.5 Ga 的自形捕获锆石, 似乎也支持在扬子陆核南边可能存在 ~2.5 Ga 的地质体。除两颗锆石外, 多数锆石具有负 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 对应 T_{DM2} 值为 3.7~2.8 Ga, 表明这些锆石母岩的源区物质为古太古代到中太古代的古老地壳。

样品中 3 颗古元古代锆石年龄集中在 ~2.0 Ga。近年来, 在扬子陆核报道了大量古元古代构造—岩

浆事件的年代学记录,包括在崆岭地区近期报道的~2.0 Ga 的 S 型含石榴石花岗岩等(Yin *et al.*, 2013). 这些地质体的年龄与全球范围内 Columbia 超大陆聚合事件发生的时间相一致,通常被作为支持扬子陆块可能是该超大陆重要组成部分的关键证据之一. 因此,莲沱组砂岩样品中古元古代的碎屑锆石也可能来自崆岭杂岩中这些古元古代地质体. 3 颗古元古代锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都是负值,说明这些锆石来自再造或再循环地壳,其 T_{DM2} 集中在~3.2~3.1 Ga, 说明主要源区从地幔分异出来的时间为中太古代.

新元古代在样品碎屑锆石年龄组成中所占比例最高,从~880 Ma 到 724 Ma 均有记录,多数锆石分布在~880~800 Ma 之间. 这些年龄信息的地质体在整个扬子陆块范围内大量出露,它们被认为可能与 Rodinia 超大陆的演化过程相关,莲沱组之下的黄陵花岗岩基为新元古代复式岩体,其形成时代为 880~800 Ma,与莲沱组砂岩多数新元古代锆石年龄相一致,因此,本文样品内新元古代锆石大部分可能来自下伏的黄陵复式岩体. 与太古宙和古元古代锆石不同,新元古代锆石的 Hf 同位素组成变化很大, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -14.9~15.5, T_{DM2} 为 2.6~0.9 Ga, 说明新元古代时期南部崆岭地体同时存在新生地壳生长和古老地壳再造. 另外值得注意的是,新元古代锆石随着年龄年轻化,其 Hf 同位素组成具有明显的越来越富集的趋势,表现出随着时间的推移,越来越多的古老基底地壳岩石参与到源区物质之中.

综合来看,宜昌三峡地区黄牛岩剖面莲沱组砂岩中碎屑锆石形态上呈自形一半自形特点,其碎屑锆石年龄结构与下伏基底岩石时代接近,综合其近源沉积特点,判断其沉积物源主要为下伏的扬子陆块基底岩石.

4.3 构造指示意义

如上文所述,莲沱组砂岩的沉积时代被限定在~724~714 Ma. 岩浆岩中结晶的锆石在出露地表以后,经过风化和剥蚀,在外动力地质条件下被搬运至盆地中,再经过成岩作用固结成沉积岩. 样品中最年轻的碎屑锆石年龄与寄主岩石沉积年龄相近,表明莲沱组沉积时地壳物质发生了快速再循环. 虽然学界对扬子陆块新元古代中前期构造背景存在较大争议,对扬子陆块新元古代末的构造背景则取得了共识,已有大量研究均显示,扬子陆块在晚新元古代处于裂谷构造背景之下(Zhao and Asimow,

2018), 华南裂谷盆地是 Rodinia 超大陆在新元古代裂解过程中的一个重要组成部分. 因此,本文认为莲沱组砂岩可能沉积于大陆裂谷构造背景下,由于裂谷作用持续,导致已经侵位的新元古代岩浆岩发生相对剥露,从而导致大量的新元古代碎屑物质沉积到莲沱组之中.

为进一步限定扬子陆核莲沱组的构造属性,本文系统收集了近年来已发表的三峡地区莲沱组砂岩中的碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄和 Hf 同位素组成数据(包括王丰岗、花鸡坡、长阳、通州剖面),并与本文所获得数据进行对比. 处理过程中为保证数据质量,用于探讨的锆石均选取谐和锆石(谐和度 >90%)来进行统计,统计结果见图 7a. 对比结果显示,同一剖面内部碎屑锆石年龄和 Hf 同位素组成具有一致性,说明区域上莲沱组碎屑锆石的组成与采样层位没有太大关系. 此外,黄牛岩剖面中莲沱组砂岩中的碎屑锆石年龄组成与南面的花鸡坡、长阳、通州剖面(由于这几个剖面年龄具有相似性,地理位置又恰好都分布在长江以南,因此下文中简述其为“江南剖面”)具有相似性,而与北面的王丰岗剖面则明显不同. 具体表现为虽然~0.8 Ga 和~2.0 Ga 的年龄记录在各剖面中均普遍存在,但王丰岗剖面莲沱组砂岩中具有显著的~2.7 Ga 年龄峰值,在所有锆石中~2.7 Ga 锆石具有最高比例,然而该年龄段锆石在“江南剖面”中则明显偏少. 此外,王丰岗剖面莲沱组砂岩中存在大量>3.0 Ga 的锆石年龄记录,最老的锆石年龄甚至达到~3.8 Ga, 与之相比,“江南剖面”相对缺乏>3.0 Ga 锆石记录,中太古代年龄峰亦不明显.

对扬子陆核莲沱组砂岩中碎屑锆石 Hf 同位素数据进行的统计结果(图 7b)表明,“江南剖面”莲沱组砂岩内新元古代锆石具有高度变化的 Hf 同位素组成,相当一部分新元古代碎屑锆石 Hf 同位素具有正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,表明“江南剖面”莲沱组沉积岩的剥蚀源区存在大量早中新元古代幔源岩浆作用形成的初生地壳. 相比而言,王丰岗剖面莲沱组碎屑锆石的 Hf 同位素特征则明显不同,表现为碎屑锆石具有明显相对富集的 Hf 同位素组成,绝大多数锆石的 Hf 同位素模式年龄为太古宙甚至冥古宙,表明这些沉积岩物源区初生地壳的生长主要发生在太古宙,而非元古宙.

基于上述锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成的差异,笔者认为王丰岗剖面与黄牛岩、花鸡坡、通

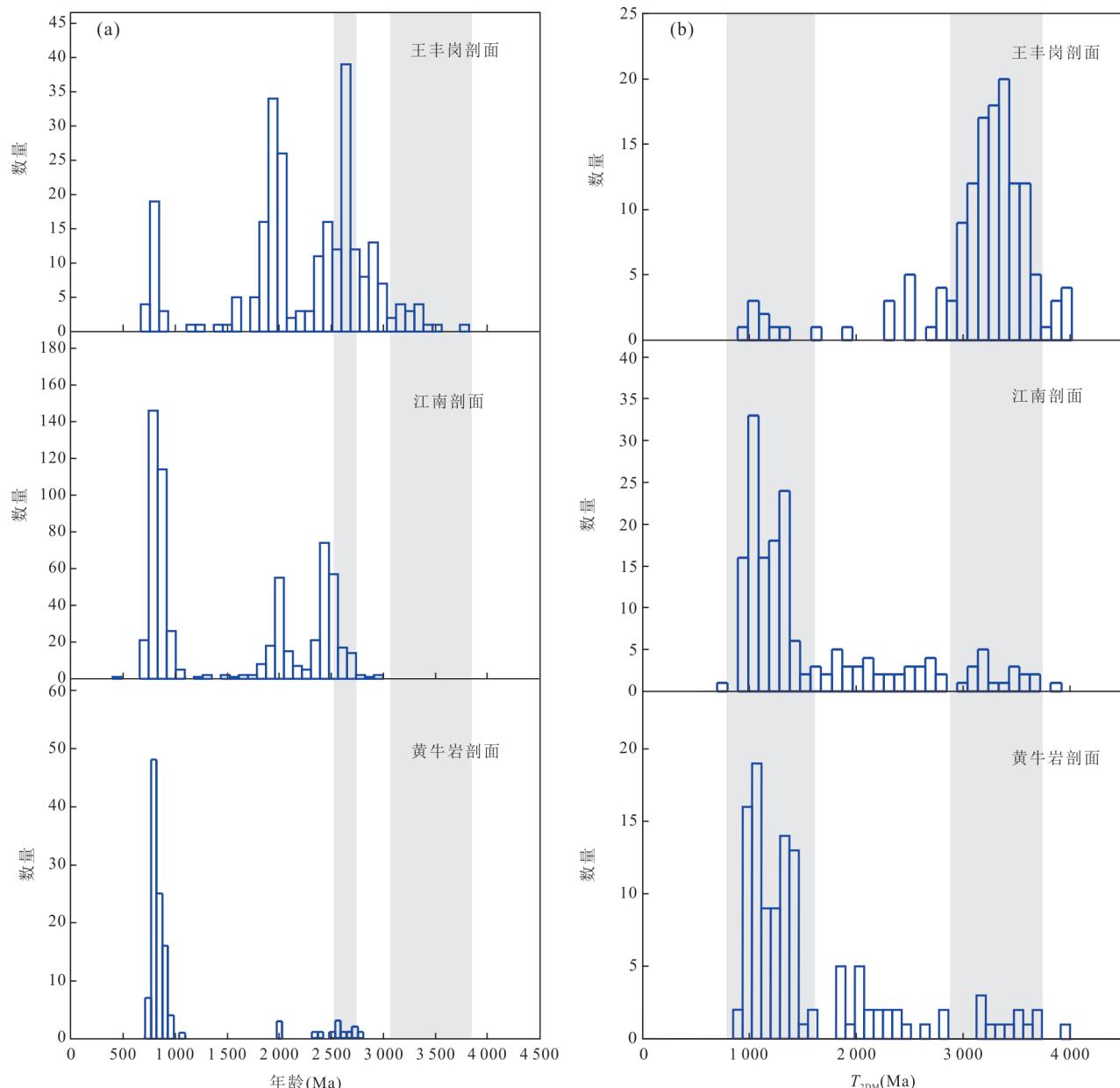


图 7 扬子陆核莲沱组砂岩锆石 U-Pb 年龄分布对比(a)和 Hf 同位素模式年龄分布对比(b)

Fig.7 Comparison diagrams of zircon ages (a) and zircon Hf model ages (b) for the sandstone of the Liantuo Formation at the nucleus of the Yangtze block

王丰岗剖面数据来自 Zhang *et al.*(2006); 江南剖面数据来自 Liu *et al.*(2008); Hofmann *et al.*(2011); 宋芳等(2016); Wang *et al.*(2013)

州、长阳等剖面的莲沱组沉积岩具有显著不同的陆缘物质供给, 黄牛岩、花鸡坡、通州、长阳等剖面莲沱组沉积岩并未接受来自扬子陆核北部崆岭地体最古老的基底岩系剥蚀的沉积物质。

华南陆块传统上被认为是扬子陆块和华夏陆块沿江南造山带拼合而成, 然而, 近年来越来越多的研究则暗示扬子陆块在新元古代之前可能具有多个独立次一级块体, 并于中元古代末到新元古代初期汇聚拼合形成(Qiu *et al.*, 2011, 2015; Peng

et al., 2012). 最近, Peng *et al.* (2012)在宜昌太平溪—邓村一带识别出一套~1.0 Ga 的镁铁质—超镁铁质岩石组合, 并认为其代表了残余洋壳的蛇绿岩系。此外, 在扬子陆核以东的随州花山地区最近也报道了一套构造混杂岩, 之前曾被认为代表了古生代洋盆俯冲作用的证据(Dong *et al.*, 2004)。然而, 最新的研究表明, 该套混杂岩可能为新元古代蛇绿混杂岩。Shi *et al.* (2007)在花山蛇绿岩中辉长岩和花岗岩中分别获得了 947 ± 14 Ma 和 876 ± 17 Ma 的

年龄,将古洋盆的时间限定在新元古代。这些证据支持了扬子陆核可能存在新元古代早期的俯冲增生过程。本文所研究的黄牛岩剖面与王丰岗剖面现今直线距离仅为6 km,但两者之间在碎屑锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成却均存在明显差异,暗示两者于新元古代晚期分别具有不同的陆源物质供给。由于扬子陆核各剖面中的莲沱组均显示出近源碎屑沉积特点,因此其物源特征主要受控于该地区的古地理格局。已有研究显示,新元古代晚期,中扬子地区主要为NW-SE向展布的鄂中古陆。莲沱组作为扬子陆核第1个稳定的沉积盖层,根据研究区周缘莲沱组或相应层位的沉积相特征,其地势总体呈现北高南低、北陡南缓的特点,理论上沉积物源应由北向南(现今方向)搬运,然而,在各江南剖面中却均未接受到来自北边崆岭地体古老基底剥蚀的沉积物质,这是否意味着在它们与北部崆岭地体之间可能存在着阻隔,从而阻碍了崆岭地体的物源供给,需要后续进一步开展研究。

5 结论

(1) 湖北宜昌三峡地区黄牛岩剖面莲沱组砂岩中碎屑锆石的年龄谱具有 $\sim 880\text{--}800\text{ Ma}$ 、 $\sim 2\,000\text{ Ma}$ 、 $\sim 2\,500\text{ Ma}$ 及 $\sim 2\,700\text{ Ma}$ 的峰值,其中最年轻的碎屑锆石年龄为 $724\pm 8\text{ Ma}$,该地区莲沱组上部砂岩沉积时间可能为 $724\text{--}714\text{ Ma}$;

(2) 莲沱组砂岩中碎屑锆石Hf同位素两阶段模式年龄(T_{DM2})集中在 $\sim 3.7\text{--}3.1\text{ Ga}$ 、 $\sim 2.5\text{--}2.0\text{ Ga}$ 和 $\sim 1.3\text{--}1.0\text{ Ga}$,反映其物源区存在古—中太古代、古元古代以及中元古代末期的初生地壳生长;

(3) 扬子陆核莲沱组碎屑锆石年龄和Hf同位素组成统计对比结果表明位置相对偏北的王丰岗剖面与其以南剖面之间在锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成上均存在明显差异,暗示新元古代晚期分别具有不同的陆源物质供给。

致谢:野外工作期间得到了中国地质大学(武汉)彭红霞副教授的大力协助;锆石LA-ICP-MS U-Pb定年和Hf同位素测定得到了中国地质调查局武汉地质调查中心卢山松和杨文武工程师的大力协助,论文成文和修改过程中与中国地质调查局武汉地质调查中心安志辉博士和魏运许教授进行了大量讨论,两位匿名审稿专家对本文初稿进行了详细审阅并提出了许多宝贵意见和建议,在此一并表示感谢。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Albarède, F., Scherer, E.E., Blichert-Toft, J., et al., 2006. γ -Ray Irradiation in the Early Solar System and the Conundrum of the ^{176}Lu Decay Constant. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(5): 1261–1270. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.09.027>
- Blichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1): 243–258. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(97\)00040-x](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(97)00040-x)
- Chen, J.F., Foland, K.A., Xing, F.M., et al., 1991. Magmatism along the Southeast Margin of the Yangtze Block: Precambrian Collision of the Yangtze and Cathaysia Blocks of China. *Geology*, 19(8): 815–818. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)0190815: matsmo>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)0190815: matsmo>2.3.co;2)
- Chen, K., Gao, S., Wu, Y.B., et al., 2013. 2.6–2.7 Ga Crustal Growth in Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 224: 472–490.
- Dong, Y.P., Zhang, G.W., Zhao, X., et al., 2004. Geochemistry of the Subduction-Related Magmatic Rocks in the Dahong Mountains, Northern Hubei Province — Constraint on the Existence and Subduction of the Eastern Mianlue Oceanic Basin. *Science in China (Series D)*, 47(4): 366–377.
- Fedo, C.M., 2003. Detrital Zircon Analysis of the Sedimentary Record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 277–303. <https://doi.org/10.2113/0530277>
- Gao, W., Zhang, C.H., 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. *Geological Bulletin of China*, 28(1): 45–50(in Chinese with English abstract).
- Griffin, W.L., Pearson, N.J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9)
- Griffin, W.L., Wang, X., Jackson, S.E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3): 237–269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8)
- 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. *Precambrian*

- Research*, 242: 82—95. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.12.018>
- Guo, J. L., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2015. Episodic Paleoarchean–Paleoproterozoic (3.3—2.0 Ga) Granitoid Magmatism in Yangtze Craton, South China: Implications for Late Archean Tectonics. *Precambrian Research*, 270: 246—266. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.09.007>
- Han, P. Y., Guo, J. L., Chen, K., et al., 2017. Widespread Neoproterozoic (~2.7—2.6 Ga) Magmatism of the Yangtze Craton, South China, as Revealed by Modern River Detrital Zircons. *Gondwana Research*, 42: 1—12. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.09.006>
- Hawkesworth, C. J., Kemp, A. I. S., 2006. Evolution of the Continental Crust. *Nature*, 443(7113): 811—817. <https://doi.org/10.1038/nature05191>
- Hofmann, M., Linnemann, U., Rai, V., et al., 2011. The India and South China Cratons at the Margin of Rodinia: Synchronous Neoproterozoic Magmatism Revealed by LA-ICP-MS Zircon Analyses. *Lithos*, 123(1—4): 176—187. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.01.012>
- Hu, R., Li, S. Q., Wang, W., et al., 2016. Source Characteristics of Tillite the Nantuo Formation in Three Gorges, Northern Yangtze Block: Evidences from Zircon Ages and Geochemical Composition. *Earth Science*, 41(10): 1630—1654(in Chinese with English abstract).
- Lan, Z. W., Li, X. H., Zhu, M. Y., et al., 2015. Revisiting the Liantuo Formation in Yangtze Block, South China: SIMS U-Pb Zircon Age Constraints and Regional and Global Significance. *Precambrian Research*, 263: 123—141. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.03.012>
- Lee, J. S., 1924. Geology of the Gorge District of the Yangtze (from Ichang to Tzekuei) with Special Reference to the Development of the Gorges. *Bulletin of the Geological Society of China*, 34: 351—392.
- Li, H. Q., Zhou, W. X., Wei, Y. X., et al., 2020. Two Extensional Events in the Early Evolution of the Yangtze Block, South China: Geochemical and Isotopic Evidence from Two Sets of Paleoproterozoic Alkali Porphyry in the Northern Kongling Terrane. *Geological Journal*, 55 (9): 6296—6324. <https://doi.org/10.1002/gj.3802>
- Li, L. M., Lin, S. F., Davis, D. W., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry of Igneous Rocks from the Kongling Terrane: Implications for Mesoarchean to Paleoproterozoic Crustal Evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 255: 30—47. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.09.009>
- 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. *Precambrian Research*, 122(1): 85—109. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(02)00208-5)
- Ling, W. L., Gao, S., Zheng, H. F., et al., 1998. Sm-Nd Isotopic Dating of Kongling Terrain. *Chinese Science Bulletin*, 43(1): 86—89 (in Chinese).
- Liu, X., Gao, S., Diwu, C., et al., 2008. Precambrian Crustal Growth of Yangtze Craton as Revealed by Detrital Zircon Studies. *American Journal of Science*, 308(4): 421—468. <https://doi.org/10.2475/04.2008.02>
- Lu, S. N., Hao, G. J., Wang, H. C., et al., 2014. Mesoproterozoic-Late Qingbaikou (~820 Ma) Tectonic Map in China (1: 10 000 000). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel (Berkeley Geochronology Center, Berkeley, California). BGC Special Publication, Berkeley.
- Nie, H., Yao, J., Wan, X., et al., 2016. Precambrian Tectono-thermal Evolution of South Qinling and Its Affinity to the Yangtze Block: Evidence from Zircon Ages and Hf-Nd Isotopic Compositions of Basement Rocks. *Precambrian Research*, 286: 167—179. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.10.005>
- Pan, G. T., Xiao, Q. H., Lu, S. N., et al., 2009. Subdivision of Tectonic Units in China. *Geology in China*, 36: 1—38 (in Chinese with English abstract).
- Peng, M., Wu, Y., Wang, J., et al., 2009. Paleoproterozoic Mafic Dyke from Kongling Terrain in the Yangtze Craton and Its Implication. *Chinese Science Bulletin*, 54(6): 1098—1104.
- Peng, S. B., Kusky, T. M., Jiang, X. F., et al., 2012. Geology, Geochemistry, and Geochronology of the Miaowan Ophiolite, Yangtze Craton: Implications for South China's Amalgamation History with the Rodinian Supercontinent. *Gondwana Research*, 21(2—3): 577—594. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.07.010>
- Qiu, X. F., Ling, W. L., Liu, X. M., et al., 2011. Recognition of Grenvillian Volcanic Suite in the Shennongjia Region and Its Tectonic Significance for the South China Craton. *Precambrian Research*, 191(3—4): 101—119. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.09.011>
- Qiu, X. F., Ling, W. L., Liu, X. M., et al., 2018. Evolution of the Archean Continental Crust in the Nucleus of the Yangtze Block: Evidence from Geochemistry of 3.0 Ga TTG Gneisses in the Kongling High-Grade Metamor-

- phic Terrane, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.12.026>
- Qiu, X.F., Yang, H.M., Lu, S.S., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of Grenville-Aged ($1\ 063 \pm 16$ Ma) Metabasalts in the Shennongjia District, Yangtze Block: Implications for Tectonic Evolution of the South China Craton. *International Geology Review*, 57(1): 76–96. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.991949>
- Qiu, X.F., Yang, H.M., Zhao, X.M., et al., 2019. Neoarchean Granitic Gneisses in the Kongling Complex, Yangtze Craton: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Earth Science*, 44(2): 415–426(in Chinese with English abstract).
- Qiu, X.F., Zhao, X.M., Yang, H.M., et al., 2017. Paleoproterozoic Metamorphic Event in the Nucleus of the Yangtze Craton: Evidence from U-Pb Geochronology of the Metamorphic Zircons from the Khondalite. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 706–714(in Chinese with English abstract).
- Shi, Y.R., Liu, D.Y., Zhang, Z.Q., et al., 2007. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Gabbro and Granite from the Huashan Ophiolite, Qinling Orogenic Belt, China: Neoproterozoic Suture on the Northern Margin of the Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 239–243. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2007.tb00947.x>
- Song, F., Niu, Z.J., He, Y.Y., et al., 2016. U-Pb Age of Detrital Zircon and Its Restriction of Provenance & Paleogeographic Characteristics of Early Nanhua Period in Middle Yangtze. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2661–2680(in Chinese with English abstract).
- Thirlwall, M. F., Anczkiewicz, R., 2004. Multidynamic Isotope Ratio Analysis Using MC-ICP-MS and the Causes of Secular Drift in Hf, Nd and Pb Isotope Ratios. *International Journal of Mass Spectrometry*, 235(1): 59–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2004.04.002>
- Wang, L.J., Griffin, W.L., Yu, J.H., et al., 2013. U-Pb and Lu-Hf Isotopes in Detrital Zircon from Neoproterozoic Sedimentary Rocks in the Northern Yangtze Block: Implications for Precambrian Crustal Evolution. *Gondwana Research*, 23(4): 1261–1272. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.04.013>
- Yin, C.Q., Lin, S.F., Davis, D.W., et al., 2013. 2.1–1.85 Ga Tectonic Events in the Yangtze Block, South China: Petrological and Geochronological Evidence from the Kongling Complex and Implications for the Reconstruction of Supercontinent Columbia. *Lithos*, 182–183: 200–210.
- Zhang, K.X., Pan, G.T., He, W.H., et al., 2015. New Division of Tectonic-Strata Super Region in China. *Earth Science*, 40(2): 206–233(in Chinese with English abstract).
- Zhang, K.X., Xu, Y.D., He, W.H., et al., 2018. Oceanic and Continental Blocks Distribution during Neoproterozoic Early Qingbaikou Period ($1\ 000$ – 820 Ma) in China. *Earth Science*, 43(11): 3837–3852 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Wu, Y.B., et al., 2006. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Evidence for 3.8 Ga Crustal Remnant and Episodic Reworking of Archean Crust in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1–2): 56–71.
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., et al., 2008. Neoproterozoic Anatexis of Archean Lithosphere: Geochemical Evidence from Felsic to Mafic Intrusions at Xiaofeng in the Yangtze Gorge, South China. *Precambrian Research*, 163(3): 210–238.
- 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. *Journal of Petrology*, 59(9): 1811–1844. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy080>
- Zhao, X.M., An, Z.H., Qiu, X.F., et al., 2018. A New Understanding of the “Macaoyuan Group” in North Kongling Area of Yangtze Craton. *Earth Science*, 43(9): 3324–3336(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.M., Liu, S.D., Zhang, Q.X., et al., 2011. Geochemical Characters of the Nanhua System in Changyang, Western Hubei Province and Its Implication for Climate and Sequence Correlation. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 576–585(in Chinese with English abstract).
- Zheng, J.P., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., et al., 2006. Widespread Archean Basement beneath the Yangtze Craton. *Geology*, 34(6): 417–420. <https://doi.org/10.1130/g22282.1>
- Zheng, Y.F., Zhang, S.B., Zhao, Z.F., et al., 2007. Contrasting Zircon Hf and O Isotopes in the Two Episodes of Neoproterozoic Granitoids in South China: Implications for Growth and Reworking of Continental Crust. *Lithos*, 96(1): 127–150. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.10.003>
- Zhou, M. F., Yan, D. P., Kennedy, A. K., et al., 2002. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronological and Geochemical Evidence for Neoproterozoic Arc-Magmatism along the Western Margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1–2): 51–67. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(01\)00595-7](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(01)00595-7)

附中文参考文献

- 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. 地质通报, 28(1): 45—50.
- 胡蓉, 李双庆, 王伟, 等, 2016. 扬子北部三峡地区南沱组冰碛岩的物源特征: 锆石年龄和地球化学证据. 地球科学, 41(10): 1630—1654.
- 凌文黎, 高山, 郑海飞, 等, 1998. 扬子克拉通黄陵地区崆岭杂岩 Sm-Nd 同位素地质年代学研究. 科学通报, 43(1): 86—89.
- 陆松年, 郝国杰, 王惠初, 等, 2014. 中国中元古代—青白口纪早期(~ 820 Ma)大地构造图(1:10 000 000). 北京: 地质出版社.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等, 2009. 中国大地构造单元划分. 中国地质, 36: 1—38.
- 邱啸飞, 杨红梅, 赵小明, 等, 2019. 扬子克拉通崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩成因及其构造意义. 地球科学, 44(2): 415—426.
- 邱啸飞, 赵小明, 杨红梅, 等, 2017. 扬子陆核古元古代变质事件——来自孔兹岩系变质锆石 U-Pb 同位素年龄的证据. 地质通报, 36(5): 706—714.
- 宋芳, 牛志军, 何垚砚, 等, 2016. 中扬子地区南华纪早期碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对物源特征和古地理格局的约束. 地质学报, 90(10): 2661—2680.
- 张克信, 潘桂棠, 何卫红, 等, 2015. 中国构造—地层大区划分新方案. 地球科学, 40(2): 206—233.
- 张克信, 徐亚东, 何卫红, 等, 2018. 中国新元古代青白口纪早期($1\,000\sim 820$ Ma)洋陆分布. 地球科学, 43(11): 3837—3852.
- 赵小明, 安志辉, 邱啸飞, 等, 2018. 扬子陆核北崆岭地区“马槽园群”的新认识. 地球科学, 43(9): 3324—3336.
- 赵小明, 刘圣德, 张权绪, 等, 2011. 鄂西长阳南华系地球化学特征的气候指示意义及地层对比. 地质学报, 85(4): 576—585.