

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.280>



扬子地块新元古代裂谷盆地莲沱组沉积分异及其物源分析

杜秋定^{1,2,3,4}, 王 剑^{1,2}, 汪正江³, 邓 奇³, 杨 菲³

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500
2. 西南石油大学羌塘盆地研究院, 四川成都 610500
3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081
4. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

摘 要: 扬子地块莲沱组及相当地层单元的划分和对比, 一直是我国南华系(即 Cryogenian)研究关键难题之一。新元古代裂谷盆地开启早期, 构造—沉积分异作用, 同裂谷相变很大, 使得盆地边缘区地层序列不完整。过分依赖岩石地层单元对比, 历存分歧, 典型的关于莲沱组与板溪群地层对比、时代归属以及莲沱组的沉积环境问题。本文通过对扬子地块东南缘莲沱组沉积古环境分析和锆石 U-Pb 精确定年, 认为莲沱组沉积时限为 790~720 Ma, 相当于板溪群中上部, 是华南新元古代裂谷盆地沉积充填序列的第 II 旋回。莲沱组顶部 U-Pb 最小年龄约 720 Ma, 制约了扬子地块 Sturtian 冰期的启动年龄 ≤ 720 Ma。通过对中扬子地块从北向南展布的莲沱组陆相—海陆过渡相—海相不同的沉积单元岩相组合的沉积特征观察研究, 分析沉积环境并建立了沉积模式; 莲沱组及休宁组碎屑锆石记录了莲沱组沉积时该盆地在 780~760 Ma 经历了持续热隆升与地层剥蚀, 揭示了中国南方扬子和华夏地块聚合与裂解事件的重要信息。

关键词: 年代学和古环境; 莲沱组; 构造—沉积分异; 物源; 沉积学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2021)07-2529-15

收稿日期: 2020-09-29

Depositional Differentiation and Provenance Analysis of Liantuo Formation in Neoproterozoic Rift Basin, Yangtze Block

Du Qiuding^{1,2,3,4}, Wang Jian^{1,2}, Wang Zhengjiang³, Deng Qi³, Yang Fei³

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
2. Qiangtang Institute of Sedimentary Basin, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
3. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China
4. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The division and correlation of the Liantuo Formation and its equivalent stratigraphic units in the Mid-Yangtze block has been one of the key problems in study of the Nanhuan System (Cryogenian) in China. In the early stage of the Neoproterozoic rift basin, tectonic-sedimentary differentiation, which made the stratigraphic sequence of the basin margin incomplete. Due to the excessive reliance on the lithostratigraphic unit comparison, which are typically related to the stratigraphic correlation between the Liantuo Formation and the Banxi Group. The geochronology and paleoenvironment of the Liantuo Formation are still highly controversial. An integrated approach of facies analysis, paleogeography, and geochronology provides new insights into the

基金项目: 国家自然科学基金项目“新元古代中期湘黔桂盆地重要变革期的沉积学响应研究”(No. 41672108);“扬子东南缘中新元古代沉积超覆界面性质及盆地转换过程研究”(No. 41672112);“鄂西裂陷槽在扬子古大陆裂解中的沉积响应及其油气地质意义”(No. 41972121);“扬子地块莲沱组沉积环境及其时代归属研究”(No. 41302091);中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目(No. 2020CX010000)。

作者简介: 杜秋定(1983—), 男, 副研究员, 主要从事沉积学和沉积盆地分析研究。ORCID: 0000-0003-4712-5735. E-mail: dqiating@163.com

引用格式: 杜秋定, 王剑, 汪正江, 等, 2021. 扬子地块新元古代裂谷盆地莲沱组沉积分异及其物源分析. 地球科学, 46(7):2529-2543.

sedimentology and paleogeography in the Precambrian. The Liantuo Formation was deposited ca. 790–720 Ma, which was equivalent to the Wuqiangxi Formation in the middle-upper part of the Banxi Group. Due to the uplift and subsidence of the earth's crust, the sea water gradually overflows from south to north. Different sedimentary units of the Liantuo Formation, continental, transitional and Marine facies, have been developed from north to south in the Mid-Yangtze block. Detrital zircons from the Liantuo and Xiuning formations record that the basin experienced continuous heat uplift and stratigraphic denudation in 780–760 Ma during the deposition of the Liantuo Formation, which reveals the important information about the convergence and rift events of the Yangtze and Cathaysia blocks in south China.

Key words: geochronology and paleoenvironment; Liantuo Formation, tectono-deposition differentiation, provenance; sedimentology.

0 引言

扬子地块莲沱组及相当地层单元的划分和对比,一直是我国南华系(即 Cryogenian)划分、对比研究中的关键难题之一,历存分歧(刘鸿允等, 1991; Zhou *et al.*, 2004). 我国新元古代研究起步于峡东及湘赣北部地区,新元古代裂谷盆地开启早期,构造—沉积分异作用,同裂谷地层相变很大,使得盆地边缘区地层序列不完整. 以往地层对比工作,过分依赖岩石地层单元,造成了种种误解,由此也带来一系列认识上的分歧,典型的关于扬子地块莲沱组与板溪群、澄江组、休宁组的地层对比,莲沱组的沉积环境问题及时代归属(马国干等, 1989; 刘鸿允等, 1991; 林树基, 1995; 尹崇玉等, 2003; 冯连君等, 2004; 王自强等, 2006a, 2006b; 杜秋定等, 2013; Du *et al.*, 2013).

裂谷初期,盆地内部不同部位的差异构造作用,沉积充填变化显著. 地层学关系表明,扬子地块莲沱组超覆于新元古代中期(830~820 Ma)火山岩和不同地层之上,具有分布区域广泛,沉积序列类型多样等特征,且与南华冰期地层之间的接触关系也不尽相同(图 1)(据 Wang *et al.*, 2003; Du *et al.*, 2013 修改). 中扬子隆起周缘的莲沱组地层对比及时代一直存在争议,以峡东莲沱组研究为源头,引出了莲沱组与板溪群地层对比,莲沱组与黔东南—桂北富禄组对比,还有莲沱组与下冰期地层长安组对比问题. 尽管近年的研究表明,莲沱组与板溪群地层并非上下关系,二者基本上是同时异相,莲沱组比板溪群沉积起始时间稍晚(Du *et al.*, 2013; 周传明, 2016). 上扬子地区澄江组研究也取得了一定进展(江新胜等, 2012). 扬子地块东南缘的休宁组的沉积时代仍有一定争议,扬子地块莲沱组与休宁组的物源对比尚未有研究成果.

因此,扬子地块莲沱组及其相当地层单元的构造属性、区域地层划分对比、同位素年代学的研究

已经成为南华系建系和国际地层对比中亟待解决的重大问题. 中扬子莲沱组及相当地层作为中国南方“武陵—四堡运动”不整合面之上未变质的地层,对研究古大陆演化也具有很重要的意义.

本文通过对鄂中古陆周缘莲沱组沉积特征的研究,完善扬子地区莲沱组地层对比,恢复构造—沉积格局;通过对扬子地块莲沱组、休宁组地层碎屑锆石同位素年代学研究,对比分析碎屑物质来源.

1 区域地质特征及采样位置

研究区主要位于扬子地块东南缘,大地构造位置为扬子板块中下部,中扬子可以划分为相对稳定的鄂中地块与桐柏—大别地块,相对活动的南秦岭陆内裂陷盆地与鄂湘陆内裂陷盆地. 通山地区前寒武系内部存在角度不整合面(图 2a),下伏地层冷家溪群为一套浅海相砂泥质沉积,岩层发育条纹、条带、交错层理、波痕等沉积构造. 该沉积单元具轻度变质、褶皱复杂. 上覆地层莲沱组—南华系岩石单元由砾岩、长石石英砂岩、石英砂岩、粉砂质泥岩、冰碛岩组成. 皖南休宁地区位于下扬子地区,休宁组底部为紫红色砾岩、灰白色长石石英粗砂岩夹粉砂质泥岩,发育交错层理、波痕等沉积构造. 休宁组中部及上部由灰色、灰紫色细砂岩、泥岩等组成砂、泥韵律层,总体为一套滨海及浅海相碎屑岩建造. 休宁组与下伏地层牛屋组呈角度不整合接触关系(图 2b).

本次研究的 2 件碎屑锆石样品采自通山地区莲沱组顶部粉砂质 TS-1 (N29° 39'30.43", E114° 29'10.41") 及底部细砂岩 TS-2 (N29° 40'54.46", E114° 29'26.66"); 2 件碎屑锆石样品采自皖南蓝田休宁组上部细砂岩 LT-3 (N29° 55'58.27", E118° 05'36.19") 及底部层位细砾岩 LT-1 (N29° 57'00.61", E118° 05'20.64").

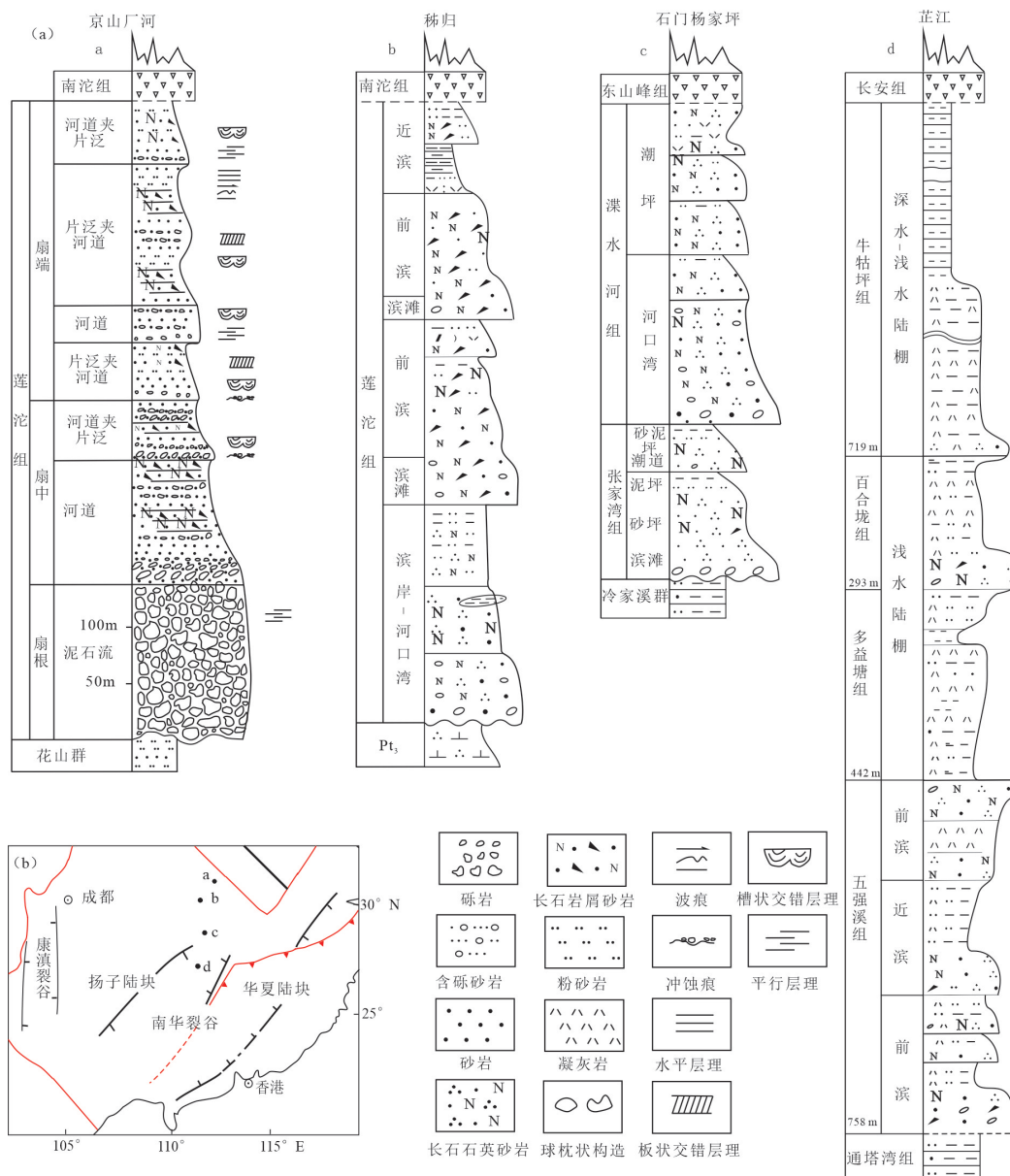


图 1 扬子地块莲沱组沉积结构对比(a);南华裂谷盆地及剖面位置(b)

Fig.1 Stratigraphic column of Liantuo Formation in Yangtze block (a); distribution of Nanhua rift and the section in Yangtze block (b)

2 样品分析及测试结果

2.1 样品分析方法

锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 同时分析完成. 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a. 激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合. 在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和

改善分析精密度. 另外,激光剥蚀系统配置了一个信号平滑装置,即使激光脉冲频率低达 1 Hz,采用该装置后也能获得光滑的分析信号(Hu *et al.*, 2012). 每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号. 对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008)完成. 详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu *et al.* (2008).

U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外

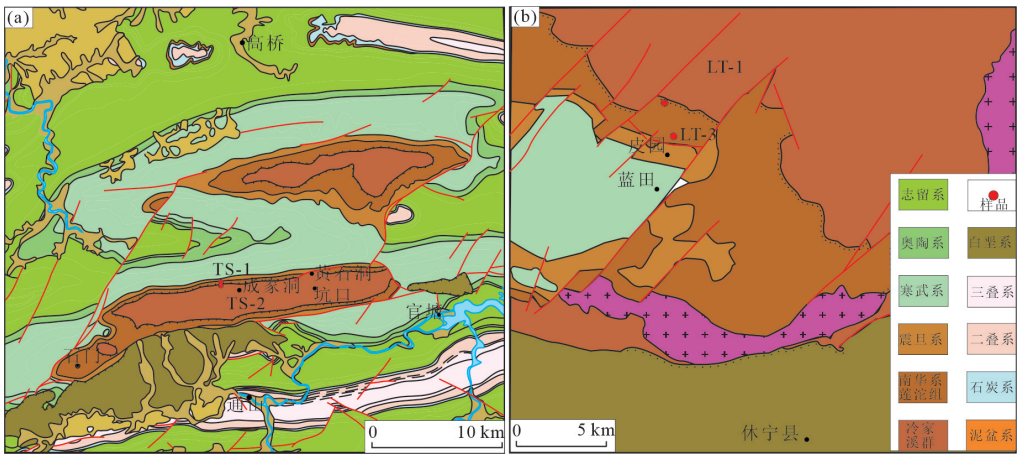


图 2 通山(a)和蓝田(b)区域地质及采样位置
Fig.2 Geological map and the sampling location of Tongshan (a) and Lantian (b)

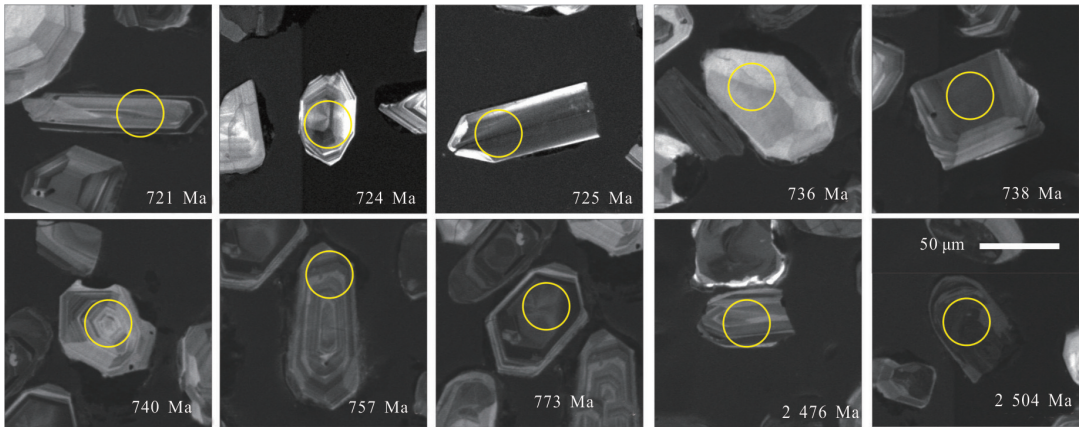


图 3 通山莲沱组碎屑锆石阴极发光图
Fig.3 Representative cathodoluminescence images for Liantuo Formation samples of Tongshan area

标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 91500. 对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正. 锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3 完成.

2.2 锆石 U-Pb 同位素年代学

2.2.1 锆石 CL 图像特征 通山地区莲沱组中锆石的 CL 图像(图 3)显示大部分颗粒较自形、粒状、短柱状、长柱状,粒径 30~70 μm,晶体长宽比为 1:1~4:1,大部分颗粒核部呈现不均一亮度的环带,具岩浆锆石特征的振荡环带;个别颗粒无分带、弱分带,可能代表变质成因的锆石;在部分锆石周围可见较窄的白色蚀变边,说明锆石可能受到后期变质热液的溶蚀作用.

蓝田地区休宁组锆石的 CL 图像(图 4)显示大部分颗粒较自形、粒状. LT-1 样品锆石颗粒较大,

60~150 μm, 锆石岩浆振荡环带结构清晰, LT-3 样品锆石颗粒相对较小, 60~100 μm, 锆石形态多样, 自形程度弱于 LT-1 样品, 个别锆石常见溶蚀空洞, 锆石具有核幔结构.

2.2.2 锆石 U-Pb 年龄 通山莲沱组样品碎屑锆石分析结果(附表 1-1, 附表 1-2, 图 5), 莲沱组底部 TS-2 样品锆石中 39 个数据点分析, 锆石 U 和 Th 的含量为 $(78\sim354)\times10^{-6}$ 和 $(39\sim973)\times10^{-6}$, 具有较大的变化范围, 其 Th/U 比值为 0.51~3.19, 获得 U-Pb 年龄范围在 780~2 700 Ma, 锆石表面年龄均在谐和线上. 第一组 6 颗锆石给出了 1 647~2 700 Ma 较老年龄, 第二组 33 颗锆石给出了 782~992 Ma 较老年龄, 最年轻的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据为 782 Ma;

莲沱组顶部 TS-1 样品, 获得 59 个数据点 U-Pb 年龄, 锆石 U 和 Th 的含量为 $(90\sim1\,354)\times10^{-6}$ 和 $(118\sim1\,772)\times10^{-6}$, 具有较大的变化范围, 其 Th/

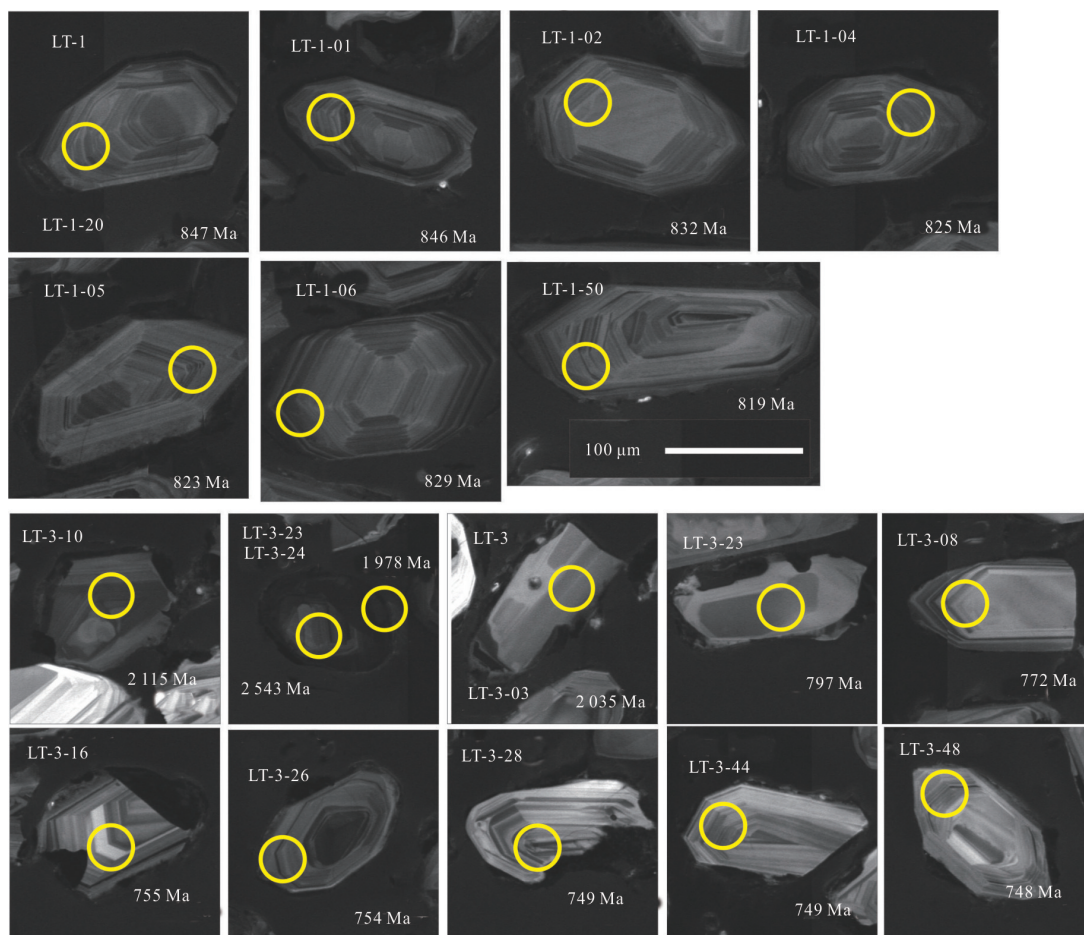


图4 蓝田休宁组碎屑锆石阴极发光图

Fig.4 Representative cathodoluminescence images for Xiuning Formation samples of Lantian area

U 比值为 0.85~2.81. 第一组 4 颗锆石显示 2 504~2 376 Ma 较老年龄, 第二组 11 颗锆石显示 1 951~2 097 Ma 年龄区间, 第三组锆石显示 824~721 Ma, 最年轻的一组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权数据为 724 ± 12 Ma (MSWD=0.047, 3 个数据加权).

蓝田休宁组样品碎屑锆石分析结果(附表 2-1, 附表 2-2, 图 6), 休宁组下部 LT-1 样品, 获得 55 个数据点 U-Pb 年龄, 锆石 U 和 Th 的含量为 $(47 \sim 528) \times 10^{-6}$ 和 $(22 \sim 92) \times 10^{-6}$, 具有较大的变化范围, 其 Th/U 比值为 0.09~1.05, 显示大部分锆石具有深熔结晶的特性. LT-1 样品获得的表面年龄 935~778 Ma, 有一个较为显著的峰值约 830 Ma.

休宁组上部 LT-3 样品, 获得 55 个数据点 U-Pb 年龄, 锆石 U 和 Th 的含量为 $(10 \sim 1\,329) \times 10^{-6}$ 和 $(12 \sim 822) \times 10^{-6}$, 具有较大的变化范围, 其 Th/U 比值为 0.10~2.36, 显示锆石具有相对复杂的成因. LT-3-23, LT-3-24 分析点, 具有典型核幔结构, 核部年龄 2 543 Ma, Th/U 比值为 0.77; 边缘年龄为

1 978 Ma, 具有低的 Th/U 比值 0.1. LT-3 样品获得表面年龄可以分为 4 组, 第一组显示了 2 543~2 345 Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄), 第二组显示了 2 115~1 977 Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄), 第三组显示了 854~800 Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄), 第四组显示了 800~731 Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄).

3 中扬子地块莲沱组沉积特征

3.1 紫红色砾岩、含砾砂岩和砂岩组合

发育于莲沱组早期, 主要是紫红色砾岩、砾质(含砾)砂岩和砂岩为主(图 7a, 7b), 夹少量粉砂岩和泥岩. 砾岩、砾质砂岩为块状或具叠瓦状构造(图 7c), 颗粒支撑或杂基支撑(图 7d); 砂岩为块状或具板状交错层理和平行层理. 根据岩性与沉积构造组合, 沉积环境解释为主要是冲积扇、泥石流、河道沉积和片泛沉积. 典型剖面为扬子地块北缘的京山地区厂河剖面. 由于沉积构造部位不同, 岩性相变为紫红色粗—中粒岩屑砂岩, 细砂岩及粉砂岩, 很少

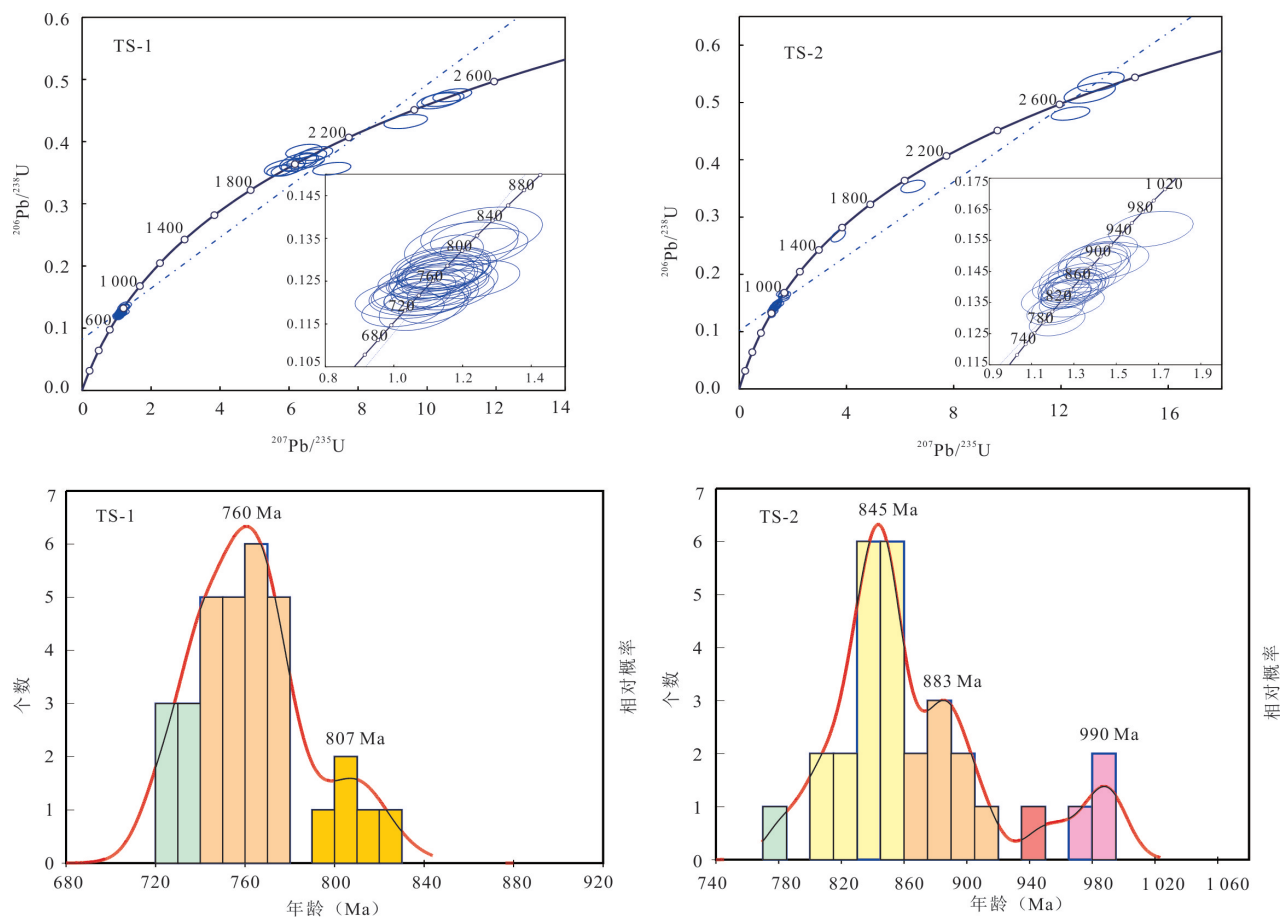


图5 通山地区莲沱组碎屑锆石 U-Pb 谐合曲线图和碎屑锆石 U-Pb 年龄统计直方图
Fig. 5 Detrital zircon data U-Pb concordia diagrams and histogram of from the Liantuo Formation

含砾. 具有较发育的沉积韵律, 并见有交错层理和波痕, 可能为山前水下扇沉积.

3.2 紫红色含砾砂岩和中-细砂岩组合

该岩相可以在冲积扇的基础上发育起来, 也可以直接沉积于下伏地层之上. 沉积物为紫红色含砾长石石英砂岩—细粒砂岩(图 7b), 矿物成分及结构成熟度均较低, 颗粒支撑为主, 具中大型板状、槽状交错层理、平行层理. 沉积旋回、韵律极其发育, 沉积剖面具河流二元剖面结构, 具有辫状河流沉积的特征. 砂球、砂枕等变形构造的存在, 也反映了一种快速堆积与沉积物液化的沉积条件. 此类岩石组合以湖北莲沱地区、巴东地区, 湖南石门杨家坪渚水河剖面的下段为典型.

3.3 紫红色、灰绿色中细粒石英砂岩、长石石英砂岩夹岩屑砂岩组合

岩石组合主要由紫红色、灰绿色中细粒石英砂岩、长石石英砂岩夹岩屑砂岩等组成. 其组分复杂, 陆屑(岩屑、长石)含量较高, 多呈杂基支撑, 为成熟度低的陆源碎屑岩(图 7e)、还发育有灰绿色条带

状砂质板岩及板岩. 具有向上变细河口湾沉积层序, 主要是由河道滞留沉积和河道水下浅滩组成. 河道滞留沉积常为砾岩或砂质砾岩, 块状或具大型交错层理, 底冲刷明显. 水下浅滩沉积以中—细粒砂岩为主, 有时含砾. 河口湾是在河流基础上发育起来, 往上过渡为潮坪环境, 形成河口湾—潮坪组合沉积. 此类岩石组合以湖北莲沱地区、湖南石门杨家坪渚水河剖面的下段为典型.

3.4 细-微粒砂岩、粉砂岩和泥岩组合

该岩相组合总体上以灰色—灰绿色细—微粒砂岩、粉砂岩和泥岩占优势, 组成频繁的向上变细的韵律互层(图 7h). 当以潮下和潮间沉积占优势时, 常见波状、脉状、水平和沙纹层理(图 7g), 在潮道沉积中可见有中—细粒砂岩、含砾砂岩及砾岩, 也偶见有大型交错层理和粒序层理、流水和浪成波痕发育. 此类岩石组合以湖北莲沱地区、湖南石门杨家坪渚水河剖面的上段为典型.

3.5 砾岩、砂质砾岩、粗-巨粒砂岩

该岩相主要以海滩沉积为主, 砾石和砂岩成分

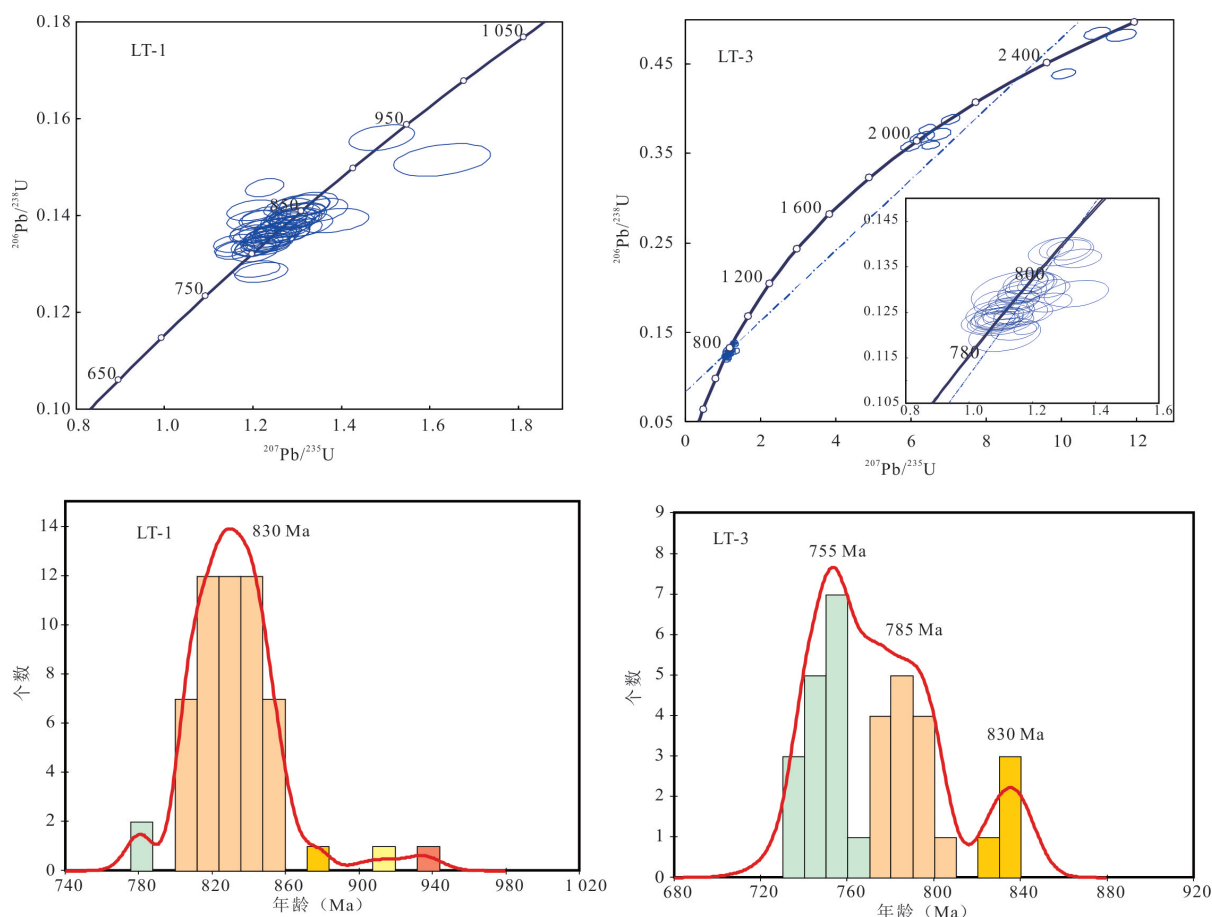


图6 蓝田地区休宁组碎屑锆石U-Pb谐合曲线图、碎屑锆石U-Pb年龄统计直方图

Fig. 6 Detrital zircon data U-Pb concordia diagrams and histogram of from the Xiuning Formation

和结构成熟度均比较高(图7b,图7f). 以中粗粒长石英砂岩、石英砂岩为主,夹含砾不等粒石英砂岩. 含砾不等粒石英砂岩中砾石含量5%~10%,成分主要是为石英,砾径2~5 mm,多呈次圆状,少数次棱角状. 发育各种大型交错层理、平行层理、冲洗层理、羽状层理、沙纹层理,底冲刷和波痕常见. 此岩相以湖南临湘陆城张家湾组,湖北通山莲沱组底部为典型.

3.6 火山碎屑岩

此岩相分布广泛与莲沱组沉积期火山喷发活动息息相关,主要为火山—陆源碎屑河流、浅海沉积. 湖北京山莲沱组中有这类沉积为紫红色、灰紫色火山碎屑岩夹凝灰岩,发育有凝灰质角砾岩和粗砂级凝灰岩,其中大型槽状和楔状交错层理、平行层理和底冲刷发育,属辫状河沉积. 浅海相火山碎屑岩主要以砂级—粉砂质凝灰岩和粉砂岩沉凝灰岩为主、夹陆源碎屑岩. 见有波状、透镜状和沙纹层理、波痕等构造.

中扬子鄂中古陆周缘,同沉积断裂不同程度地

控制和影响着裂陷盆地的分布,沉积相的展布. 莲沱组沉积早期主要为河流相,剖面序列往上变为河口湾、海湾或潮坪相,其河流类型也常以辫状河为主,但是陆相单元的厚度却不尽相同(图8). 古陆外缘则为分布较广的滨浅海相沉积.

4 讨论

4.1 莲沱组沉积时限、地层对比以及与南华系的关系

莲沱组曾被李四光等置于南沱组下部称“南沱粗砂岩及底砾岩”,几经沿革,刘鸿允将原“南沱砂岩”称为莲沱群,湖北三峡地层组改称莲沱组. 现指黄陵花岗岩与南沱组之间的一套紫红色—暗紫红色的中—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、长石质砂岩夹凝灰质岩屑砂岩,含砾岩屑凝灰岩. 由下往上碎屑粒度由粗变细,顶界与南沱组冰碛砾岩呈平行不整合接触,底界与黄陵花岗岩呈不整合接触(湖北岩石地层).



图7 莲沱组图版

Fig.7 Plate of Liantuo Formation

a. 莲沱组与双桥山群接触关系;b. 莲沱组底部含砾石英砂岩;c. 莲沱组砾石叠瓦状排列;d. 莲沱组块状杂砾岩;e. 莲沱组斜层理,水流方向从左向右;f. 莲沱组石英砂岩发育平行层理;g. 莲沱组发育透镜状、波状潮汐层理;h. 莲沱组灰绿色细粒沉积物

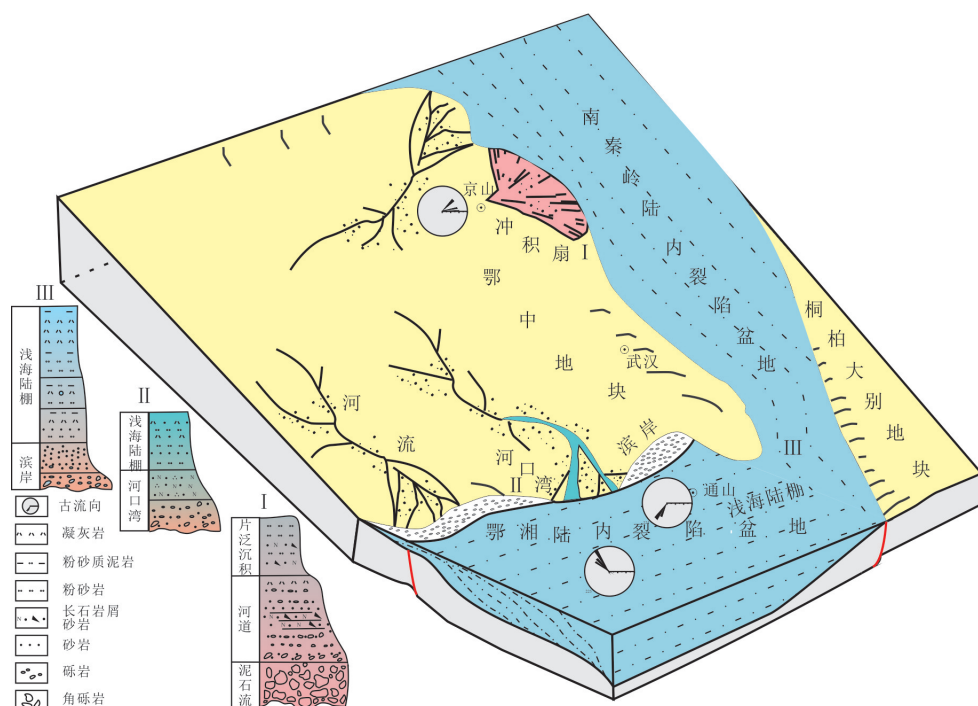


图8 中扬子地块莲沱组沉积期古地理格局及沉积模式

Fig. 8 Schematic diagram illustrating the tectonic-sedimentary model of Liantuo Formation in Mid-Yangtze block

在峡东区,南沱组与下伏莲沱组为假整合—微角度不整合,反映了一次区域性以地壳隆升为主的构造运动,即雪峰运动(澄江运动).莲沱组与黄陵花岗岩呈不整合接触(或江西洞门组与九岭岩体呈角度不整合),这个不整合面代表了在华南诸省具有广泛影响的武陵运动(晋宁—四堡运动).晋宁运动終了,出现了扬子地台.经典的震旦系从莲沱组起,是作为第一个盖层存在的.

其他地区,莲沱组移地超覆新元古代(Pt_3)不同地层(扬子北缘莲沱组超覆在花山群之上,湖南溁水河组超覆板溪群张家湾组或马底驿组之上,浙皖赣地区休宁组、志棠组超覆于双桥山群或骆家门组等)地层之上,又被南华冰期的南沱组或长安组(扬子北缘为坪阡组,扬子东南缘为古城组、东山峰组、长安组、江口组)所覆盖.

这样形成两种绝然不同的观点:一种观点认为莲沱组是扬子地台上具陆相磨拉石建造特征的河流相沉积,板溪群是东南地槽区具类复理石—复理石建造特征的浅海相沉积,它们之间是地台相与地槽相之间的过渡,属同期异相沉积(刘鸿允, 1991),另一种观点则认为板溪群与莲沱组是新老关系,它们各自代表地史发展阶段中某一特定时期的岩石记录(马国干, 1989).

关于莲沱组的时代归属问题,一直以来都存在争议,林树基(1995)等认为莲沱组为南华冰期沉积的一部分,可与桂北富禄组对比;尹崇玉(2003)等认为莲沱组等同于溁水河组或长安组,基于岩石风化指数(CIA)地球化学研究,冯连君等(2004),王自强等(2006a, 2006b)也认为莲沱组和溁水河组为寒冷气候沉积.通过区域地层研究,然而刘鸿允等(1991)认为莲沱组可与板溪群对比,汪正江等(2008)则认为莲沱组仅相当于板溪群上部沉积单元.

由于莲沱组为一套具有正常水动力沉积作用标志的含砾粗砂岩—凝灰质砂泥岩组合,并且在湘鄂等部分地区与上覆、下伏地层都呈不整合接触关系,它的同位素年代学研究也一直未获得实质性的突破.

本次通山地区莲沱组底部获得锆石的最年轻年龄为780 Ma,顶部获得的最小年龄加权722 Ma,这与Du *et al.* (2013)报道的结果基本一致.峡东地区莲沱组年龄 748 ± 12 Ma,晋宁不整合面之下黄陵花岗岩年龄为 819 ± 7 Ma(马国干等, 1989),而溁水河组(相当莲沱组)上部凝灰岩的锆石定年结果为 758 ± 23 Ma,其下老山崖组为 809 ± 16 Ma(尹崇玉等, 2003).尹崇玉等(2003)明确指出南华系就是

原震旦系下统,并通过对湘西北杨家坪剖面溁水河组和张家湾组的锆石测年,认为溁水河组上部凝灰质岩 758 ± 23 Ma 的锆石 U-Pb 年龄可限定南华系古城冰期的下限,从而将溁水河组对比于莲沱组,均归入南华系中,并由此以溁水河的底界来推定南华系底界年龄约为 800 Ma.

王剑和潘桂棠(2009)认为,根据国际前寒武纪地层划分原则,南华系底界应放在晋宁造山运动不整合面之上;同时,根据板溪群及其相当层位地层底部一系列同位素年代学研究(Wang *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2008),底界年龄一般推定为 820 Ma (Wang *et al.*, 2003; 王剑和潘桂棠, 2009). Lan *et al.*, (2015) 获得溁水河组上部凝灰质粉砂岩的锆石 SIMS 年龄 619.9 ± 5.8 Ma, 溁水河组与黔东地区的两界河组,以及桂北、黔东南地区的富禄组进行对比. Du *et al.*, (2013) 在大洪山地区莲沱组的下部所采的凝灰岩获得的年龄为 779 ± 12 Ma,而在石门地区莲沱组的顶部凝灰岩年龄为 736 ± 5.8 Ma. 本次通山地区莲沱组顶部样品有一组较为年轻的加权年龄数据 724 ± 12 Ma (MSWD=0.047, 3 个数据加权).

通过对扬子地块大洪山地区、神农架地区、长阳地区,通山和黄陵背斜周边莲沱组典型剖面以及浙皖赣邻区的休宁兰田、上饶华坛、建德休宁组沉积古环境分析,结合同位素年代学研究,我们认为,中上扬子地区莲沱组的沉积时限为 790~720 Ma,相当于湘黔桂盆地内部板群溪群中上部五强溪组地层,华南新元古代裂谷盆地沉积充填序列的第 II 旋回(江新胜等, 2012). 莲沱组顶部年龄约 720 Ma,同时也制约了扬子地块 Sturtian 冰期的启动年龄不大于 720 Ma(附表 3).

成冰系的提出是以新元古代全球性冰期事件为依据,它的底界应放在新元古代比较公认的全局性冰期沉积地层的底部. 目前国际地层表以 Sturtian 冰期的启动, Marinoan 冰期的结束做为成冰纪的起始时间(Cryogenian 720~635 Ma). 究竟南华系是取意于刘鸿允“南华大冰期”,这一特殊时期的地质体;还是以板溪群与下伏地层的不整合面为底界,南沱组的结束为顶界面称为南华系. 王剑等(2005)认为第二方案比较符合国际地层委员会对元古宙中有关纪的划分原则,且其年代界限与国际地层划分标准 850 Ma 较为接近. Frimmel *et al.* (1996) 和 Borg *et al.* (2003) 等认为在 Sturtian 冰期

之前发育一次冰川事件即 Kaigas 冰期. 该冰期事件在非洲和中国西北均有所报道,赞比亚的 Kundelungu 冰期介于 765 ± 5 Ma 与 735 ± 5 Ma (Key *et al.*, 2001); 南非纳米比亚西南具有冰川沉积的特征 Port Nolloth Group, Frimmel *et al.* (1996) 和 Borg *et al.* (2003) 研究认为 Kaigas 冰期的年龄为 752 ± 6 Ma 和 741 ± 6 Ma; 中国西北部的塔里木陆块贝义西组杂砾岩沉积时代为 740 ± 7 Ma 与 725 ± 10 Ma (Xu *et al.*, 2009). 基于岩石风化指数(CIA)地球化学研究(冯连君等, 2004; 王自强等, 2006a, 2006b),也认为莲沱组和溁水河组为寒冷气候沉积, Huang *et al.* (2014) 通过对华南地区新元古代地层(820~720 Ma)高分辨率 CIA 研究,认为在 Sturtian 冰期之前已经存在多次气候变冷事件,这些事件与 $\delta^{13}\text{C}$ 的负漂、火山岩和变质岩的矿物中低 $\delta^{18}\text{O}$ 相耦合. 蔡雄飞(2018)认为南华系下统莲沱组 CIA 值为寒冷气候认识是值得商榷的. 那么莲沱组地层否为古城冰期之前寒冷气候下的沉积,如果在全球性冰川之前出现过气候变冷,或是冰川活动在不同大陆及古纬度存在明显的差异,那么成冰系底界年龄等时性还需进一步研究.

4.2 扬子东南缘新元古岩浆事件、古大陆演化及物源分析

太古宙陆壳物质在扬子陆块的各个区域均有分布,地壳生长发生在太古宙早期,古元古代年龄锆石的 Hf 同位素数据表明华南古元古代事件主要表现为古老地壳的再造;华南广泛产出新元古代岩浆岩,它们记录了华南在新元古代时期的生长和再造(郑永飞和张少兵, 2007).

莲沱组底部碎屑锆石年龄谱图(图 9), $>1\,000$ Ma 的锆石存在较小的峰值 2 700 Ma; $<1\,000$ Ma 较为明显的年龄峰值 846 Ma, 次峰值为 992 Ma. 莲沱组顶部碎屑锆石年龄谱图, $>1\,000$ Ma 的锆石存在 2 024 Ma 与 2 473 Ma 峰值;莲沱组上部碎屑锆石 $<1\,000$ Ma 存在明显的年龄峰值 760 Ma. 莲沱组顶底的物源发生了一些变化,底部沉积物源多为 840~1 000 Ma,顶部物源增加了古元古代(2 024 Ma 与 2 473 Ma)和新元古代中期 820 Ma 以后的锆石记录. 休宁组底部锆石年龄 935~778 Ma,而休宁组上部年龄具有较大的变化范围 2 543~731 Ma. 底部年龄相对集中,上部年龄存在 755 Ma、830 Ma、2 030 Ma、2 350 Ma、2 540 Ma 几个峰值. 休宁组底部年龄反映了物源来自于不整合面之下的下伏地层,而上部出现较多古老锆石年龄的趋势与莲沱组

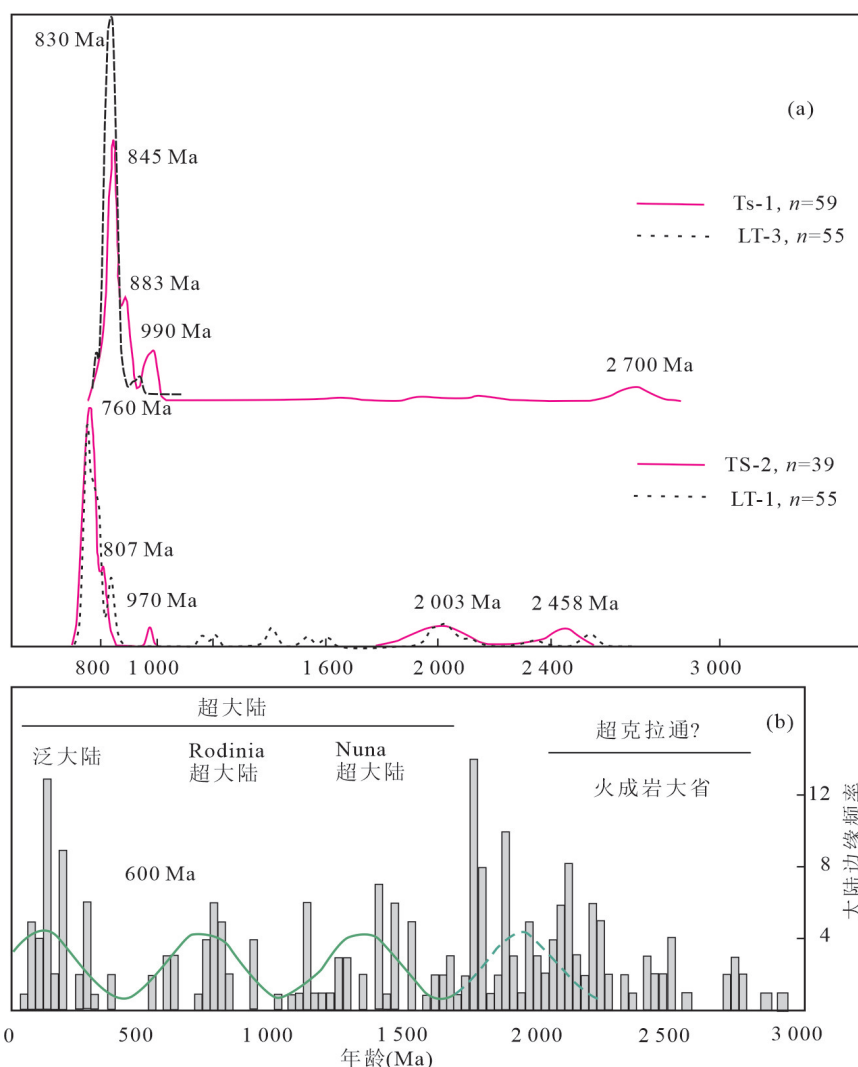


图9 (a)莲沱组、休宁组样品锆石年龄谱;(b)2 000 Ma以来超大陆旋回与地幔柱喷发事件耦合图(Li *et al.*, 2019)

Fig.9 (a)Histogram of from the Liantuo and Xiuning formations; (b) Supercontinent cycle (Nuna, Rodinia and Pangaea) since 2 000 Ma ago, coupled to a slightly phase-shifted ~600 Ma plume frequency cycle(Li *et al.*, 2019)

极为相似。

华南以新元古代岩浆广泛产出为特征,但也同样存在古元古代—太古宙年龄(1.7~3.4 Ga)的岩石或者残骸,分别为在 1.9~2.0 Ga, 2.4~2.5 Ga 和 2.8~2.9 Ga 出现聚集(郑永飞, 2003)。近期对扬子东南缘前寒武纪碎屑锆石统计,扬子东部沉积岩中碎屑锆石年龄有两个显著的年龄峰:812 Ma 和 858 Ma, 另有几个相对小的峰: 1 600 Ma、1 850 Ma、2 000 Ma、2 480 Ma 和 2 660 Ma; 而 990 Ma 年龄峰值在扬子西缘前寒武纪沉积岩才有这显著的记录(李献华等, 2012)。

碎屑锆石可以很好地应用于物源分析,它记录和保存了大陆地壳增生及演化事件的重要信息。而莲沱组及相当层单元碎屑锆石记录了中国南方扬

子和华夏聚合与裂解事件的重要信息。扬子板块和华夏板块的拼合:一种意见认为造山作用的结束时间大致在 0.82~0.80 Ga, 主要是在区域上 0.86~0.83 Ga 冷家溪群(及相应地层)与 0.80 Ga 板溪群(及相应地层)之间的角度不整合(Du *et al.*, 2013)。冷家溪群(及相当地层)板溪群(及相应地层)在沉积建造,变形样式,变质作用方面有显著差异和明显的沉积作用间断。而且该时间 0.82 Ga 喷发了大规模 S 型花岗岩则属于“造山”型花岗岩(Zhou *et al.*, 2009)。另外一种意见认为田里片岩记录的最后一期变质变形作用时代为 0.94 Ga(Li *et al.*, 2007)、双溪坞岩浆弧最晚的岩浆作用时代大约 0.89 Ga 和西湾蛇绿混杂岩中的仰冲型花岗岩的年龄大约 0.88 Ga(Li *et al.*, 2008),而大约 0.85 Ga 的双峰式

火山岩、板内型辉绿岩脉和碱性杂岩代表了造山后或非造山岩浆作用(Li *et al.*, 2010).

Wang *et al.* (2013) 利用碎屑锆石和 Hf 同位素研究, 休宁组 850~750 Ma 的碎屑锆石主要来自于江南造山带的东缘. 其中一部分新元古代碎屑锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值; 约 2 000 Ma 锆石, T_{DM2} Hf 模式年龄大于 2 800 Ma, 其物源可能主要来自扬子地块. 近期一些学者通过系统的 U-Pb 年代学及 Hf 同位素、古地磁及地层记录研究, 认为华南在 Rodinia 超大陆重建中华南地块与北印度、南极洲东部联系密切(Hofmann *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013), 古大陆重建中位于 Rodinia 超大陆边缘不同位置(Wang *et al.*, 2013, 2018; Cawood *et al.*, 2018, 2020; Zhao *et al.*, 2018).

图 10 显示了扬子东南缘的碎屑锆石年谱在 ca. 800~1 000 Ma, ca. 1 800 Ma, ca. 2 400~2 500 Ma 与北印度很大的相似性. 莲沱组底部以 ca. 846 Ma 为主峰值, 另外一个相对较小的峰值为 ca. 992 Ma; 休宁组 ca. 830 Ma 为主峰值, 它的物源主要记录了四堡运动不整合面以下的地层物源, 反映了扬子板块与华夏板块的会聚事件. 虽然扬子东南缘有少量 ca. 840~850 Ma 的岩浆岩报道, 但远没有 ca. 800~820 Ma 的岩浆岩出露面积大. 莲沱组底部沉积物中保存了大量 ca. 840~850 Ma 的锆石记录, 这与扬子东南缘在 ca. 820 Ma 喷发大规模岩浆岩、裂谷盆地开启有所不同, 也可能反映了该区 ca. 850~1 000 Ma 岩浆岩或地层有较大规模的出露. 莲沱组 ca. 2 000 Ma 峰值与扬子地块东南缘年龄谱系一致, 其物源有很大相似性. 莲沱组、休宁组古元古碎屑锆石记录了扬子地块 2 024 Ma、2 473 Ma、2 700 Ma 岩浆事件, 这与 Li *et al.* (2010, 2019) 所报道的超大陆旋回周期是一致的. 莲沱组、休宁组上部以 ca. 760 Ma 为主峰, ca. 820 Ma, ca. 800 Ma, 甚至出现古元古代碎屑物源. 一方面是由于浙皖赣地区在 800~760 Ma 经历了与裂谷作用相关的幕式火山作用; 另一方面莲沱组沉积时该盆地在 780~760 Ma 经历了持续热隆升与地层剥蚀, 莲沱组与休宁组沉积时的盆地性质虽然是以沉降为主, 部分地区持续热隆升与剥蚀, 新的记录才得以保存.

5 结论

分布于扬子地块莲沱组及相当地层的沉积时限为 790~720 Ma, 是华南新元古代裂谷盆地沉积

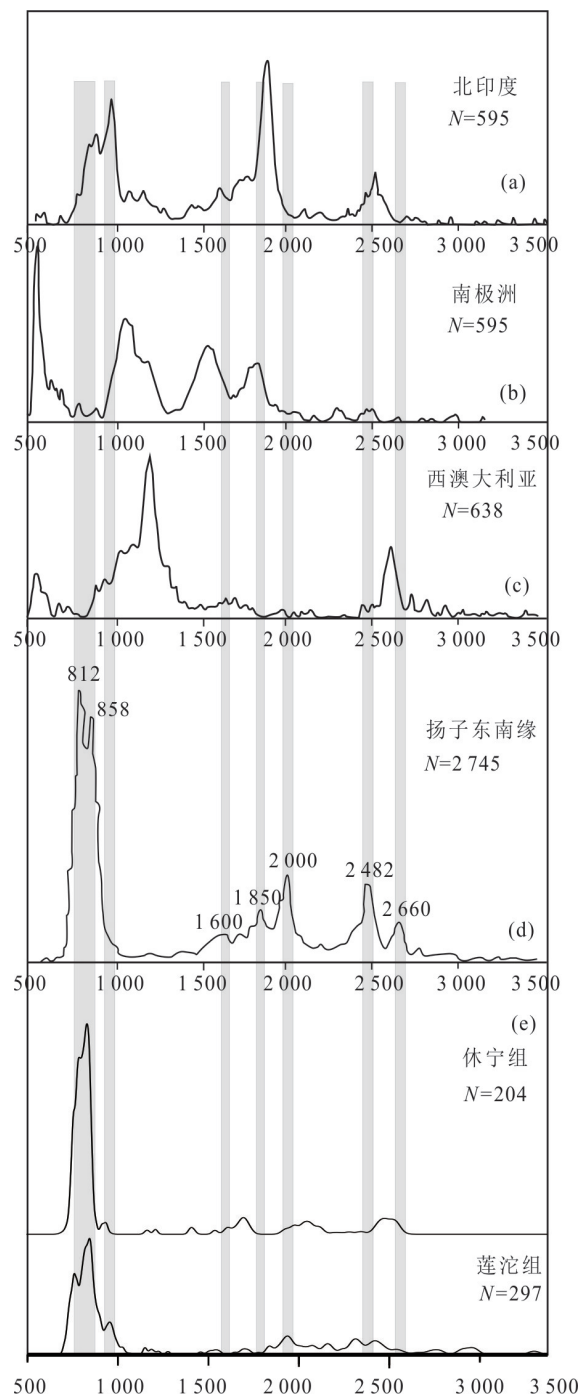


图 10 (a~c) 北印度、南极洲、西澳大利亚新元古代地层锆石年谱曲线(Wang *et al.*, 2018); (d) 扬子东缘沉积岩前寒武纪碎屑锆石年龄谱(李献华等, 2012); (e) 莲沱组、休宁组样品锆石年龄谱

Fig.10 (a~c) zircon U-Pb ages from this study and for other locations: northern India, Antarctica, western Australia (Wang *et al.*, 2018); (d) Detrital zircon age histograms for Precambrian sedimentary from eastern Yangtze block (Li *et al.* 2012); (e) histogram of from the Liantuo and Xiuning formations

充填序列的第Ⅱ旋回,相当湘黔桂盆地内部板溪群中上部的五强溪组地层。新元古早期由于火山活动,致使地壳抬升而又沉降,海水从南向北逐渐超覆,中上扬子地块从北向南展布了莲沱组陆相—海陆过渡相—海相不同的沉积单元。裂谷初期,盆地内部不同部位的差异构造作用,沉积充填变化显著。莲沱组并非南华大冰期之间冰期沉积,而是板溪群沉积晚期区域性均匀沉降背景下的沉积充填。莲沱组及休宁组碎屑锆石记录了莲沱组沉积时该盆地在780~760 Ma经历了持续热隆升与地层剥蚀。莲沱组顶部U-Pb最小年龄约720 Ma,制约了扬子地块Sturtian冰期的启动年龄约720 Ma。为南华系研究提供了精确的年代学证据,对认识中国南方构造演化具有重要意义。

致谢:2位审稿专家及编辑部提出了许多建设性的意见和建议,在此一并感谢。

附表见本刊官网:www.earth-science.net.

References

- Borg, G., Kamer, K., Buxton, M., et al., 2003. Geology of the Skorpion Supergene Zinc Deposit, Southern Namibia. *Economic Geology*, 98(4): 749—771. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.4.749>
- Cai, X.F., Ye, Q., Xiao, M.Y., 2018. Some Opinions Concerning the Understanding of CIA Cold Climate of the Liantuo Formation of Nanhua System: Exemplified by the Nanhua System from Shennongjia in Western Hubei and Western Hunan. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(4): 621—636 (in Chinese with English abstract).
- Cawood, P. A., Wang, W., Zhao, T. Y., et al., 2020. Deconstructing South China and Consequences for Reconstructing Nuna and Rodinia. *Earth-Science Reviews*, 204(1): 103—169. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103169>
- Cawood, P. A., Zhao, G. C., Yao, J. L., et al., 2018. Reconstructing South China in Phanerozoic and Precambrian Supercontinents. *Earth-Science Reviews*, 186(5—6): 173—194. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.001>
- 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. *Precambrian Research*, 233(3—5): 118—131. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.04.012>
- Du, Q. D., Wang, Z. J., Wang, J., et al., 2013. LA-ICP-MS U-Pb Ages of Detrital Zircons from the Neoproterozoic Chang'an Formation in Central Hunan and Its Geological Implications. *Geological Review*, 59(2): 332—344 (in Chinese with English abstract).
- Feng, L. J., Chu, X. L., Zhang, Q. R., et al., 2004. New Evidence of Deposition under Cold Climate for the Xieshuihe Formation of the Nanhua System in Northwestern Hunan, China. *Chinese Science Bulletin*, 49(2): 1172—1178 (in Chinese with English abstract).
- Frimmel, H. E., Klötzli, U. S., Siegfried, P. R., 1996. New Pb-Pb Single Zircon Age Constraints on the Timing of Neoproterozoic Glaciation and Continental Break-Up in Namibia. *The Journal of Geology*, 104(4): 459—469. <https://doi.org/10.1086/629839>
- 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(1/2/3/4): 176—187. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.01.012>
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012. A “Wire” Signal Smoothing Device for Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Analysis. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 78: 50—57. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.09.007>
- Huang, J., Feng, L. J., Lu, D. B., et al., 2014. Multiple Climate Cooling Prior to Sturtian Glaciations: Evidence from Chemical Index of Alteration of Sediments in South China. *Scientific Reports*, 4(1): 1—6. <https://doi.org/10.1038/srep06868>
- Jiang, X. S., Wang, J., Cui, X. Z., et al., 2012. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in Central Yunnan Province (SW China) and Its Geological Significance. *Science China: Earth Sciences*, 42(10): 1496—1507 (in Chinese with English abstract).
- Key, R. M., Liyungu, A. K., Njamu, F. M., et al., 2001. The Western Arm of the Lufilian Arc in NW Zambia and its Potential for Copper Mineralization. *Journal of African Earth Sciences*, 33(3/4): 503—528. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(01\)00098-7](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(01)00098-7)
- 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>
- Li, W. X., Li, X. H., Li, Z. X., et al., 2008. Obduction-Type Granites within the NE Jiangxi Ophiolite: Implications for the Final Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Gondwana Research*, 13(3): 288—301. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2007.12.010>

- Li, W. X., Li, X. H., Li, Z. X., 2010. Ca. 850 Ma Bimodal Volcanic Rocks in Northeastern Jiangxi Province, South China: Initial Extension during the Breakup of Rodinia? *American Journal of Science*, 310(9): 951–980. <https://doi.org/10.2475/09.2010.08>
- Li, X.H., Li, W.X., He, B., 2012. Building of the South China Block and Its Relevance to Assembly and Breakup of Rodinia Supercontinent: Observations, Interpretations and Tests. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31: 543–559 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Q. L., et al., 2010. Petrogenesis and Tectonic Significance of the ~850 Ma Gangbian Alkaline Complex in South China: Evidence from in Situ Zircon U-Pb Dating, Hf-O Isotopes and Whole-Rock Geochemistry. *Lithos*, 114(1/2): 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.07.011>
- Li, Z. X., Mitchell, R. N., Spencer, C. J., et al., 2019. Decoding Earth's Rhythms: Modulation of Supercontinent Cycles by Longer Superocean Episodes. *Precambrian Research*, 323: 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.01.009>
- Li, Z. X., Wartho, J. A., Occhipinti, S., et al., 2007. Early History of the Eastern Sibao Orogen (South China) during the Assembly of Rodinia: New Mica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating and SHRIMP U-Pb Detrital Zircon Provenance Constraints. *Precambrian Research*, 159(1/2): 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.05.003>
- Lin, S.J., 1995. Correlation for Liantuo Formation to Banxi Group and Boundary between the Presinian and Sinian in Eastern Guizhou. *Guizhou Geology*, 12(1): 23–29 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H.Y., 1991. The System in China. Science Press, Beijing, 1–388(in Chinese).
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Ma, G.G., Zhang Z.C., Li, H.Q., et al., 1989. A Geochronostratigraphical Study of the Simian System in Yangtze Platform. *Bull. Yichang Inst. Geol. Mineral Resources, CAGA*, 14: 83–124 (in Chinese with English abstract).
- Wang J., Pan, G.T., 2009. Neoproterozoic South China Palaeocontinents: An Overview. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 818–825 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D., Wang, X. L., Zhou, J. C., et al., 2013. Unraveling the Precambrian Crustal Evolution by Neoproterozoic Conglomerates, Jiangnan Orogen: U-Pb and Hf Isotopes of Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 233(9): 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.05.005>
- Wang, J., 2005. New advances in the study of “the Nanhuaan System”: with Particular Reference to the Stratigraphic Division and Correlation of the Nanhuaan System, South China. *Geological Bulletin of China*, 24(6): 491–495 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Li Z.X., 2003. History of Neoproterozoic Rift Basins in South China: Implications for Rodinia Break-Up. *Precambrian Research*, 122(1/2/3/4): 141–158. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(02\)00209-7](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(02)00209-7)
- Wang, W., Zeng, M. F., Zhou, M. F., et al., 2018. Age, Provenance and Tectonic Setting of Neoproterozoic to Early Paleozoic Sequences in Southeastern South China Block: Constraints on its Linkage to Western Australia-East Antarctica. *Precambrian Research*, 309(1): 290–308. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.002>
- Wang, Z.J., 2008. A Proposal to Establish the Banxi System and Discussion on Its Foundations-Based Mainly on Studies in Eastern Guizhou Area. *Geological Review*, 54(3): 296–306 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. Q., Yin, C. Y., Gao, L. Z., et al., 2006a. Chemostratigraphic Studies to Explain Neoproterozoic Stratigraphic Division and Correlation. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 268–279 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. Q., Yin, C. Y., Gao, L. Z., et al., 2006b. The Character of the Chemical Index of Alteration and Discussion of Subdivision and Correlation of the Nanhua System in Yichang Area. *Geological Review*, 52(5): 577–585 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Xiao, S., Zou, H., et al., 2009. SHRIMP Zircon U-Pb Age Constraints on Neoproterozoic Quruqtagh Diamictites in NW China. *Precambrian Research*, 168(3/4): 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.10.008>
- Yin, C. Y., Liu, D. Y., Gao, L. Z., et al., 2003. Lower Boundary Age of the Nanhua System and the Gucheng Glacial Stage: Evidence from SHRIMP II Dating. *Chinese Science Bulletin*, 48(16): 1721–1725 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Wang, Y. J., Huang, B. C., et al., 2018. Geological Reconstructions of the East Asian Blocks: From the Breakup of Rodinia to the Assembly of Pangea. *Earth-Science Reviews*, 186(2): 262–286. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.10.003>
- Zheng, Y.F., 2003. Neoproterozoic Magmatic Activity and Global Change. *Chinese Science Bulletin*, 48: 1705–1720 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.F., Zhang, S.B., 2007. Formation and Evolution

- of Precambrian Continental Crust in South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(1): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, C. M., 2016. Neoproterozoic Lithostratigraphy and Correlation across the Yangtze Block, South China. *Journal of Stratigraphy*, 40(2): 120—135 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, C. M., Tucker, R., Xiao, S. H., et al., 2004. New Constraints on the Ages of Neoproterozoic Glaciations in South China. *Geology*, 32(5): 437. <https://doi.org/10.1130/g20286.1>
- Zhou, J. C., Wang, X. L., Qiu, J. S., 2009. Geochronology of Neoproterozoic Mafic Rocks and Sandstones from Northeastern Guizhou, South China: Coeval Arc Magmatism and Sedimentation. *Precambrian Research*, 170(1/2): 27—42. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.11.002>
- ### 附中文参考文献
- 蔡雄飞, 叶琴, 肖明元, 2018. 对南华系下统莲沱组 CIA 值寒冷气候认识的几点商榷——以鄂西神农架、湘西北南华系莲沱组为例. *岩石矿物学杂志*, 37(4): 621—636.
- 杜秋定, 汪正江, 王剑, 等, 2013. 湘中长安组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义. *地质论评*, 59(2): 332—344.
- 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等, 2004. 湘西北南华系溁水河组寒冷气候成因的新证据. *科学通报*, 49(2): 1172—1178.
- 江新胜, 王剑, 崔晓庄, 等, 2012. 滇中新元古代澄江组锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义. *中国科学: 地球科学*, 42(10): 1496—1507.
- 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. *岩石岩石地球化学通报*, 31: 543—559.
- 林树基, 1995. 板溪群与莲沱组对比问题与震旦/前震旦界限. *贵州地质*, 12(1): 23—29.
- 刘鸿允, 1991. 中国震旦系. 北京: 科学出版社, 1—388.
- 马国干, 张自超, 李华芹, 等, 1989. 扬子地台震旦系同位素年代地层学研究. *中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊*, 14: 83—124.
- 汪正江, 2008. 关于建立“板溪系”的建议及其基础的讨论. *地质论评*, 54(3): 296—306.
- 王剑, 2005. 华南“南华系”研究新进展——论南华系地层划分与对比. *地质通报*, 24(6): 491—495.
- 王剑, 潘桂堂, 2009. 中国南方古大陆研究进展与问题评述. *沉积学报*, 27(5): 818—825.
- 王自强, 尹崇玉, 高林志, 等, 2006a. 用化学地层学研究新元古代地层划分和对比. *地学前缘*, 13(6): 268—279.
- 王自强, 尹崇玉, 高林志, 等, 2006b. 宜昌三斗坪地区南华系化学蚀变指数特征及南华系划分、对比的讨论. *地质论评*, 52(5): 577—585.
- 尹崇玉, 刘敦一, 高林志, 等, 2003. 南华系底界与古城冰期的年龄: SHRIMP II 定年证据. *科学通报*, 48(16): 1721—1725.
- 郑永飞, 2003. 新元古代岩浆活动与全球变化. *科学通报*, 48: 1705—1720.
- 郑永飞, 张少兵, 2007. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化. *科学通报*, 52(1): 1—10.
- 周传明, 2016. 扬子区新元古代前震旦纪地层对比. *地层学杂志*, 40(2): 120—135.