

https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.973



# 下扬子地区早古生代晚期前陆盆地沉积特征与盆山过程

杨树锋<sup>1,2</sup>, 陈汉林<sup>1,2\*</sup>, 龚根辉<sup>1,2</sup>, 张耀<sup>1,2</sup>, 孟立丰<sup>1,2</sup>

1. 浙江大学地球科学学院, 浙江杭州 310027

2. 教育部含油气盆地构造研究中心, 浙江杭州 310027

**摘要:** 下扬子地区从晚奥陶世开始沉积特征发生了明显转变, 从浅海相转变为三角洲相沉积。这一沉积特征转变与早古生代晚期经历的强烈造山事件密切相关。通过下扬子地区晚奥陶世到志留纪沉积序列的沉积学和碎屑锆石年代学研究, 揭示沉积盆地的性质及其时空演化过程, 探讨沉积盆地发育与造山带隆升剥蚀之间的关系。下扬子地区早古生代晚期沉积学特征从东南向西北岩性由岩屑砂岩变为石英砂岩, 粒度由粗粒变为细粒; 沉积厚度等值线具有明显的不对称性, 靠近东南等值线密, 且沉积厚度大; 往西北等值线稀疏, 且沉积厚度小; 沉积中心呈狭长带状分布, 并从东南向西北方向迁移; 具有前陆盆地的沉积特征。上奥陶统到中志留统的碎屑锆石以 900~720 Ma 的年龄为主, 指示物源以下伏新元古代晚期裂谷层序为主; 从早志留世高家边组开始, 450~420 Ma 碎屑锆石年龄出现并逐渐增多, 表明同造山岩浆岩被剥露地表并开始提供物源; 碎屑锆石中没有出现明显的代表华夏地块基底 1.9~1.7 Ga 的特征年龄峰值, 表明华夏地块不是下扬子地区早古生代晚期前陆盆地的主要物源区。下扬子地区前陆盆地从晚奥陶世开始沉降, 晚奥陶世的构造沉降速率超过了沉积物的供给速率, 前渊沉积了巨厚的浅海相泥岩夹粉砂岩和砂岩; 晚奥陶世末造山带持续隆升并向西北方向扩展, 沉积速率加快, 沉积物粒度明显变粗, 沉积相也由浅海相转变成三角洲前缘相; 早志留世开始埋深较大的同造山岩浆岩开始遭受剥蚀, 导致前陆盆地中 450~420 Ma 的碎屑锆石含量明显增加。

**关键词:** 下扬子地区; 前陆盆地; 早古生代晚期; 沉积学; 碎屑锆石; 盆山过程。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2019)05-1494-17

收稿日期: 2019-04-30

## Sedimentary Characteristics and Basin-Orogen Processes of the Late Early Paleozoic Foreland Basins in the Lower Yangtze Region

Yang Shufeng<sup>1,2</sup>, Chen Hanlin<sup>1,2\*</sup>, Gong Genhui<sup>1,2</sup>, Zhang Yao<sup>1,2</sup>, Meng Lifeng<sup>1,2</sup>

1. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Structural Research Center of Oil and Gas Bearing Basin, Ministry of Education, Hangzhou 310027, China

**Abstract:** The sedimentary facies in the lower Yangtze area changed from the neritic facies to the delta facies in the Late Ordovician. This change of sedimentary facies is related to the orogenic event in the late Early Paleozoic. Based on the comprehensive study of sedimentology and detrital zircon geochronology from the Late Ordovician to the Silurian in the lower Yangtze area, this paper presents the nature and spatial-temporal evolution of the sedimentary basin and discusses the relationship between the basin evolution and the orogenic uplift and denudation. The lithology changed from lithic sandstone to quartz sandstone and grain size changed from coarse to fine from southeast to northwest in the lower Yangtze area. The basin morphology shows asymmetrical wedge shape in transverse cross-section. The sediments are thicker and the slope is steeper in the southeastern part than those in the northwestern part. The narrow subsidence center of the basin parallels to the orogenic belt and migrates from southeast to northwest. All these features indicate the characteristics of foreland basin for the late Early Paleozoic sedi-

**基金项目:** 国家科技重大专项 (Nos. 2017ZX05008001, 2016ZX05003001); 国家重点研发计划项目 (No. 2016YFC0601004)。

**作者简介:** 杨树锋 (1947-), 男, 博士, 教授, 中国科学院院士, 构造地质学专业, 主要从事大地构造研究。E-mail: yjsy-yzg@zju.edu.cn

\* **通讯作者:** 陈汉林, E-mail: hlchen@zju.edu.cn

**引用格式:** 杨树锋, 陈汉林, 龚根辉, 等, 2019. 下扬子地区早古生代晚期前陆盆地沉积特征与盆山过程. 地球科学, 44(5): 1494-1510.

mentary basin in the lower Yangtze area. The 900—720 Ma detrital zircons from the Upper Ordovician to the Middle Silurian indicate that the provenance of these strata is the sediments deposited in the rift basin in the Late Neoproterozoic. Occurrence and gradual increase of the 450—420 Ma detrital zircons in the Early Silurian Gaojiabian Formation indicate that the synorogenic magmatic rocks were exposed to provide materials. The absence of 1.9—1.7 Ga detrital zircons which are widespread in the Cathaysia Block might imply that the Cathaysia Block was not the sediment provenance of the late Early Paleozoic basins in the lower Yangtze area. The foreland basin in the lower Yangtze area began to develop in the Late Ordovician. The tectonic subsidence rate exceeded the rate of sediment supply, so thick neritic mudstone interbedded with siltstone and sandstone deposited in the foredeep. The sediments in the foreland basin in the Yangtze area became coarser and the sedimentary facies changed from the neritic facies to the delta front facies with the increasing uplift and northwestward propagation of the orogenic belt in the end of the Late Ordovician. In the Early Silurian, more synorogenic magmatic rocks were eroded, resulting in the increase of the 450—420 Ma detrital zircons in the foreland basin.

**Key words:** lower Yangtze area; foreland basin; late Early Paleozoic; sedimentology; detrital zircon; basin-orogen process.

## 1 概况

早古生代晚期华南经历了一次强烈的构造热事件,形成了长度超过 2 000 km 的 NE 走向的武夷—云开造山带(Ren, 1991);导致了华南地区上古生界与下伏下古生界、早古生代花岗岩以及前寒武纪基底之间的角度不整合(Ren, 1991;舒良树, 2006;舒良树等, 2008; Wang *et al.*, 2013);造成了岩浆岩大规模侵位,花岗岩以 S 型花岗岩为主,侵入时间为 460~400 Ma,集中出现在 440~420 Ma(徐克勤等, 1960; Wang *et al.*, 2011, 2013; Zhang *et al.*, 2011, 2012),是在后造山伸展和减压条件下的产物(Wang *et al.*, 2011, 2013; Zhang *et al.*, 2012);引起了沿诸暨—武夷—南岭—云开一线的强烈变质和韧性变形作用(于津海等, 2005; Wan *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009, 2011; Yang *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2012a),其变质作用主要集中在 450~430 Ma,韧性变形时间要略晚于变质作用时间(Li *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2012a).与此同时,在该造山带西北侧的沉积盆地区,沉积物沉积特征发生了根本性的转变,从浅海台地相沉积转变为三角洲相碎屑岩沉积,沉积物的厚度和沉积速率也发生了根本性的改变(Wang *et al.*, 2010; Shu *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2014, 2015).

造山带和盆地是在时空发展和形成机制上具有密切联系的构造系统.盆地和造山带在空间上相互依存、在物质上相互转换并且在地表形态上相互调整、均衡,盆地形成受周缘山脉构造作用控制,盆地沉降与山脉隆升表现为时间同步、空间毗邻,沉积盆地的沉降和沉积物的充填记录了盆缘造山带的构造作用过程(Ingersoll, 1988, 2012; Cawood *et al.*, 2003; Garzanti *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2010).因

此,从造山带相邻的盆地入手,可以为造山带演化的厘定提供重要的依据.

本文从下扬子地区(包括江西、浙江、江苏和安徽)晚奥陶世到志留纪的沉积序列入手,通过详细的野外露头调查和地层柱状对比图编制,研究沉积特征的时间演化和空间变化规律;通过沉积岩的碎屑锆石定年分析,研究沉积物源区;结合前人的造山带岩浆作用、变质作用和变形作用的研究成果,讨论盆地充填演化与造山带隆升剥蚀之间的关系.

## 2 上奥陶统一中志留统沉积特征对比

研究区位于下扬子地区的浙江西北部、江西的东北部、江苏南部和安徽的南部地区,早古生代晚期的地层属于两个大的地层分区,即下扬子地层分区和江南地层分区,其地层划分与对比关系见表 1.

为研究盆地沉积学特征在横向上的变化,本论文选取浙西北至皖南地区临安、黄山和巢湖 3 条沉积剖面(图 1),描述沉积物的岩性组合和沉积特征,分析其沉积环境和盆地的充填过程;在此基础上,综合相关幅 1:20 万区调报告和地质志资料(江西省地质矿产局, 1984;安徽省地质地矿局, 1987;浙江省地质地矿局, 1989),编制了晚奥陶世至中志留世地层的沉积厚度图和关键剖面的地层柱状对比图(图 2~图 6).论文中的地层组名采用了较为广泛接受的名称.

### 2.1 晚奥陶世长坞组

长坞组的岩性和岩相在横向上变化不大,代表了一套浅海相沉积层序,以泥岩和粉砂质泥岩为主,在临安於潜地区发育了一套海相类复理石沉积(关尹文等, 1959).但是,长坞组的沉积厚度在横向上差异巨大,研究区东南部的浙西北地区厚度超过

表1 研究区上奥陶统-志留系划分与对比

Table 1 Stratigraphic division and comparison from the Upper Ordovician to the Silurian in the study area

地层分区	下扬子地层分区	江南地层分区		
		皖南	浙西北	
中志留统	茅山组	举坑组	唐家坞组	
	坟头组	畎村组	康山组	
下志留统	高家边组	河沥溪组	大白地组	
		霞乡组	安吉组	
上奥陶统	五峰组	新岭组	张村坞组	文昌组
			丁潜组	长坞组

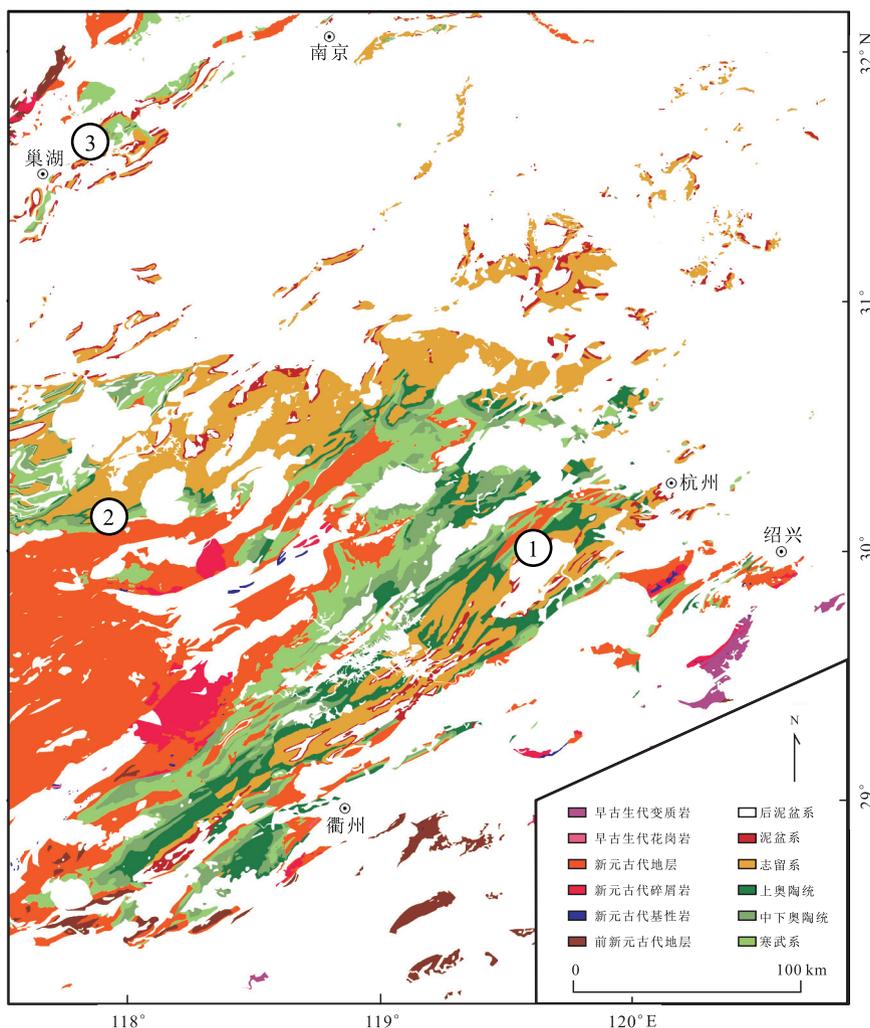


图 1 研究区区域地层分布与实测沉积剖面

Fig.1 Stratigraphic distribution and measured sections in the study area

①临安剖面;②黄山剖面;③巢湖剖面

1 000 m, 桐庐地区厚度达到 2 300 m, 往西北方向厚度骤减, 在皖南地区厚度很少超过 200 m (图 2a, 图 3)。长坞组沉积时的沉积中心位于桐庐—临安一线, 在衢州和玉山地区存在另一个相对较薄的沉降

中心 (图 2a), 沉积中心大致与造山带平行。

## 2.2 晚奥陶世文昌组

文昌组的岩性和岩相在横向上差异较大, 以临安剖面为代表的浙西北地区, 以厚层—块状砂岩夹

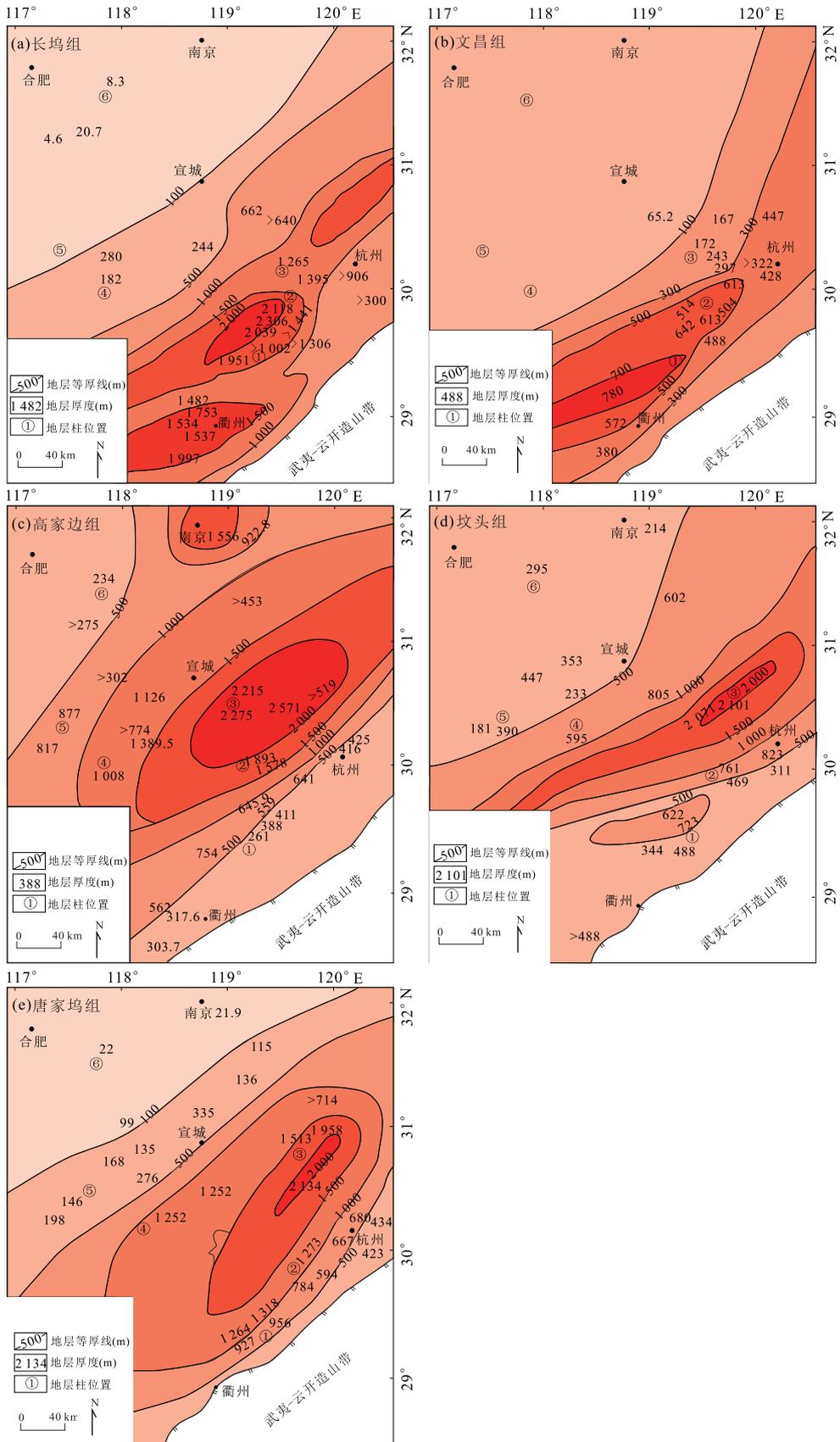


图 2 早古生代晚期盆地沉积厚度图

Fig.2 The thickness maps of the sedimentary basin in the late Early Paleozoic

各图幅范围与图 1 一致; ①建德; ②桐庐; ③临安堰口; ④黄山; ⑤贵池; ⑥巢湖

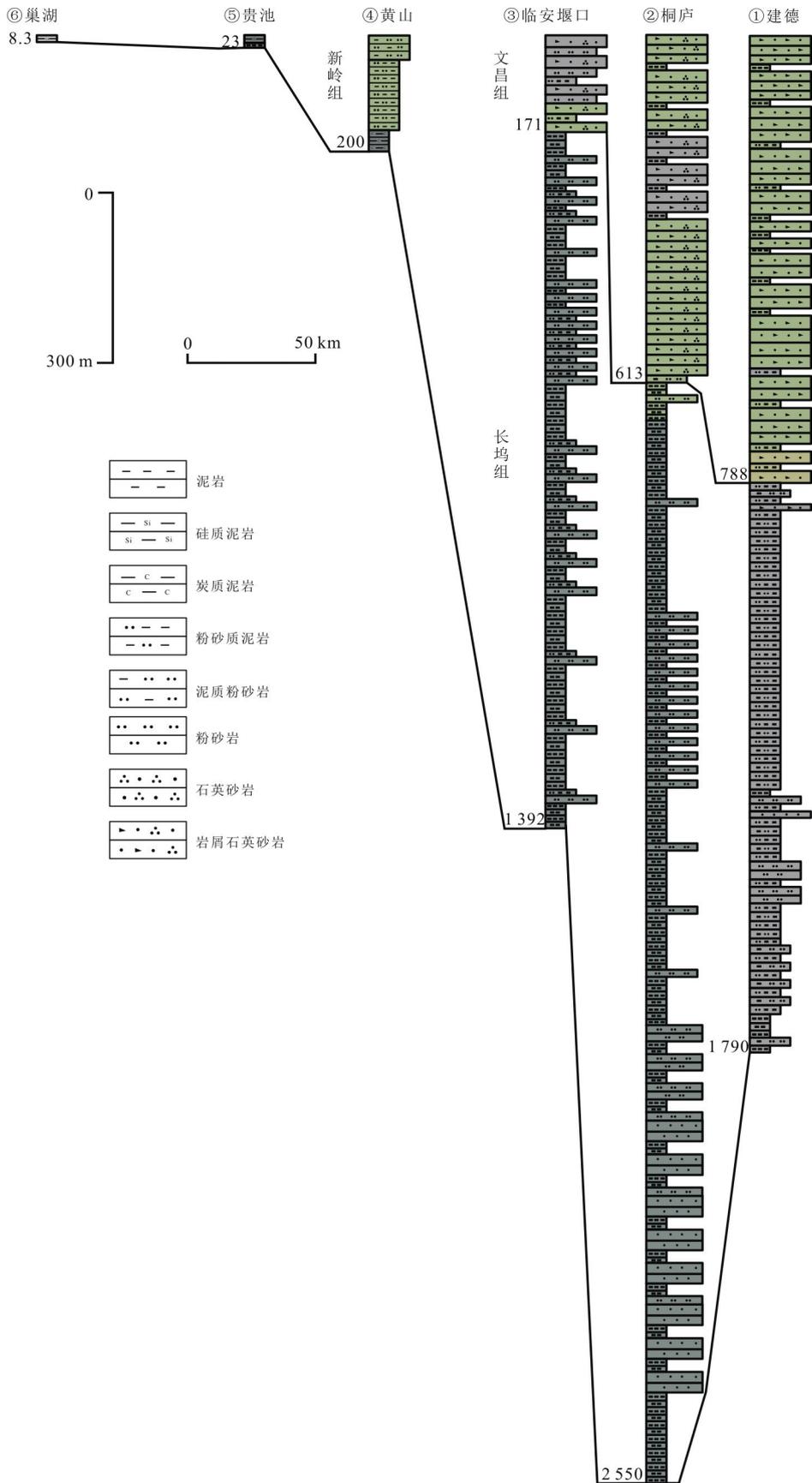


图 3 上奥陶统柱状对比图

Fig.3 Stratigraphic comparison of the Upper Ordovician strata  
剖面位置见图 2a,2b

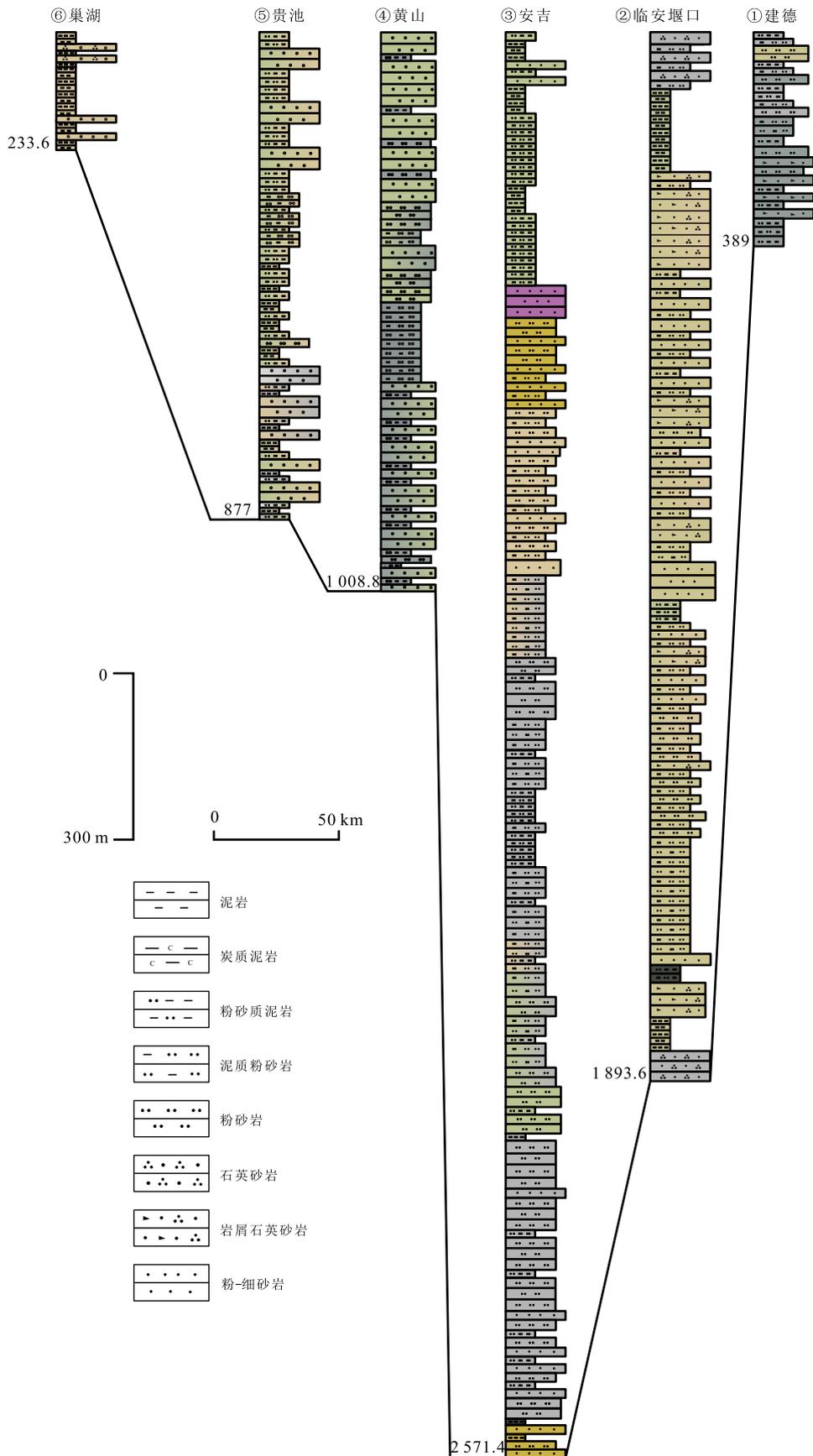


图 4 高家边组柱状对比图

Fig.4 Stratigraphic comparison of the Gaojiabian Formation

剖面位置见图 2c

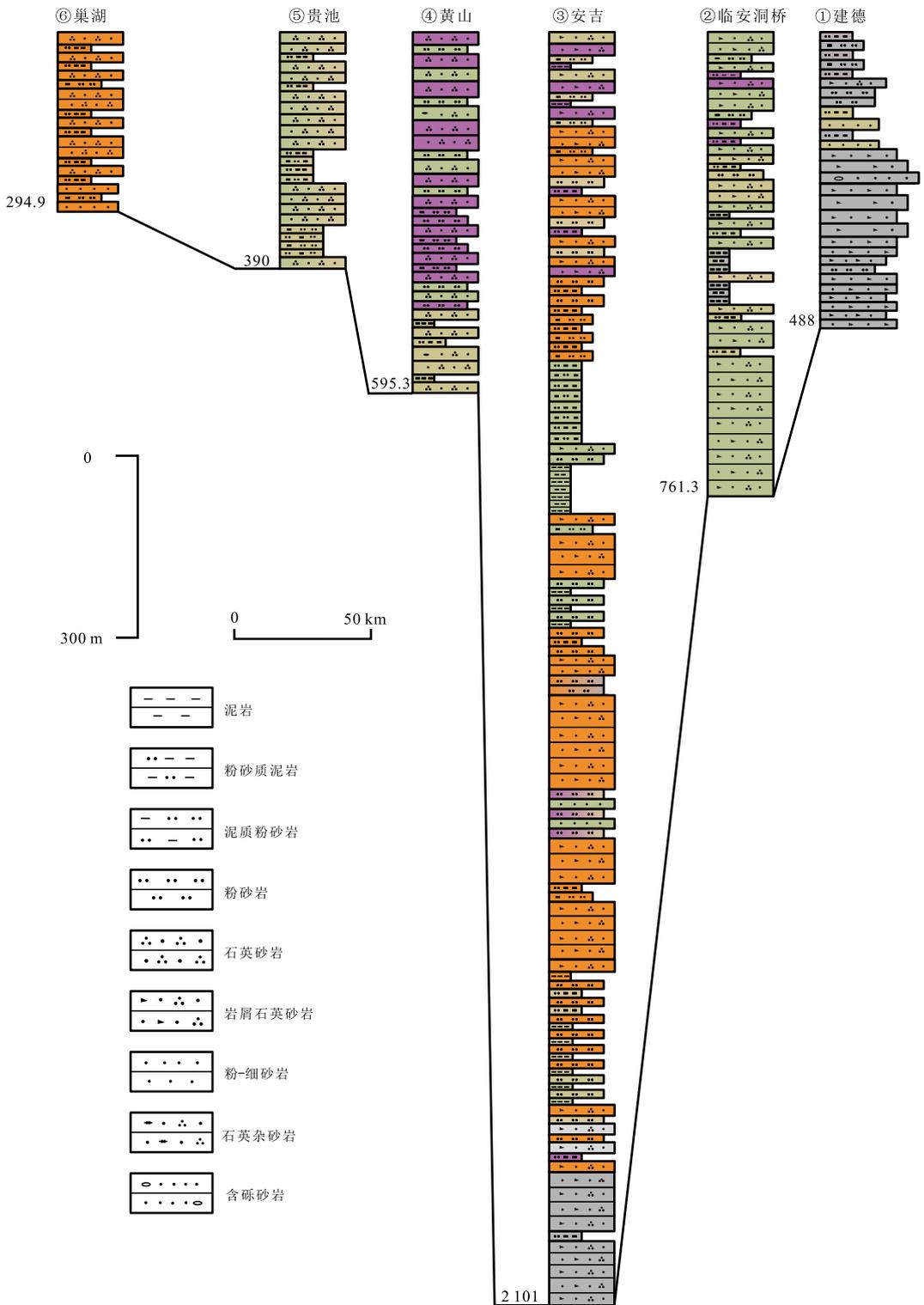


图 5 坟头组柱状对比图

Fig.5 Stratigraphic comparison of the Fentou Formation

剖面位置见图 2d

中—薄层泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩为特征；砂岩中发育了大型板状交错层理、楔状交错层理、平行层理和波状层理，指示三角洲前缘沉积环境。在研究

区西北部的皖南地区则发育了以新岭组上段为代表的浅海相泥岩(图 3)。此外，在研究区东南部的浙西北地区文昌组，顶部往往发育一套砾岩，砾岩成分以

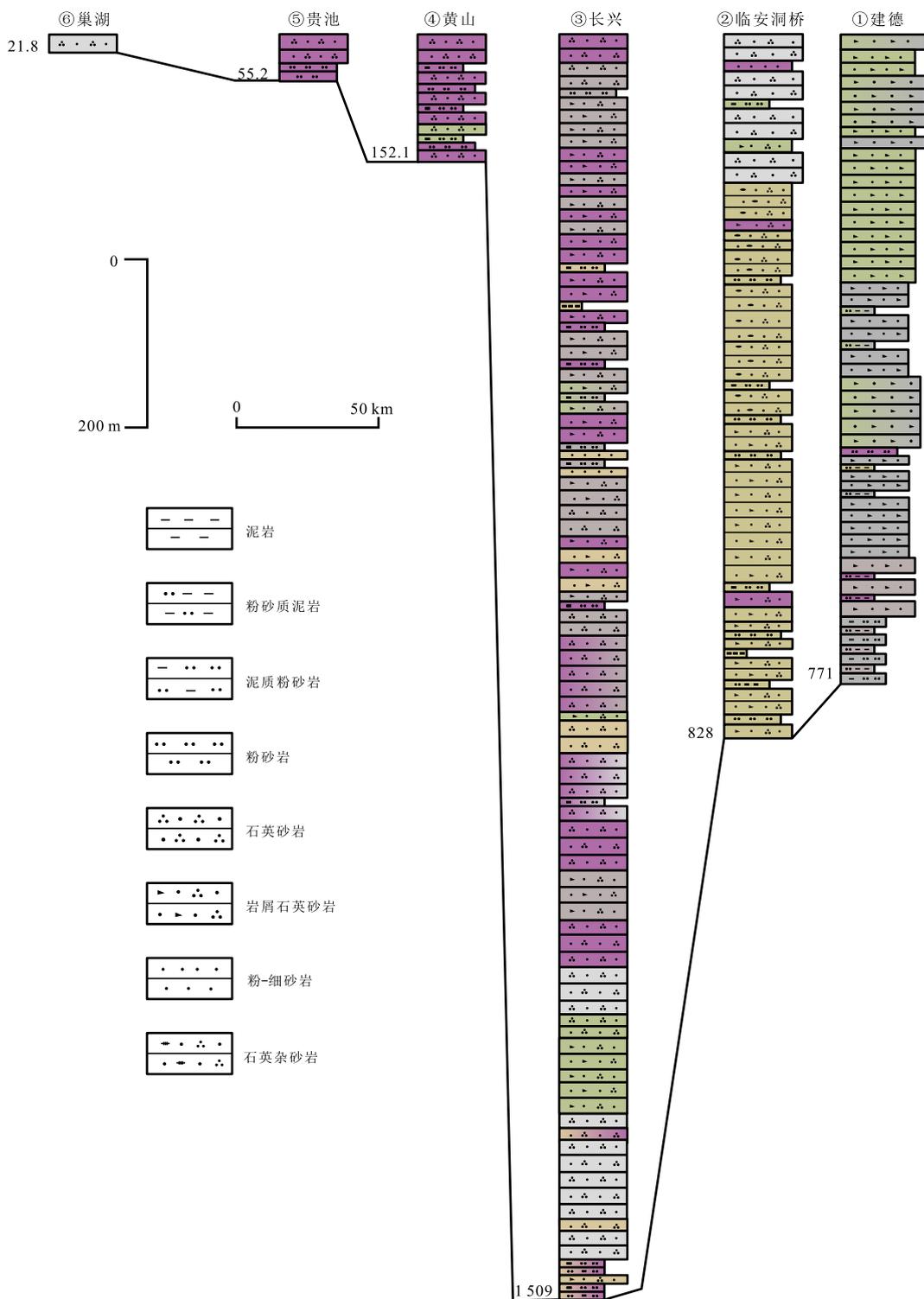


图 6 唐家坞组柱状对比图

Fig.6 Stratigraphic comparison of the Tangjiawu Formation  
剖面位置见图 2e

石英、燧石和石英砂岩为主,桐庐地区砾岩最大长轴达到 17 cm,平均值为 4 cm;往西北方向不但砾岩层厚度明显变小,粒径也明显变小.在沉积厚度图上,文昌组的等值线明显不对称,靠近东南侧等值线密

集,且沉积厚度大;往西北侧等值线稀疏,沉积厚度变小;沉积中心位于建德—开化一线(图 2b).

### 2.3 早志留世高家边组

高家边组的沉积特征在浙西北地区总体上与黄

山地区相似,都是以厚层一块状砂岩为特征,发育板状交错层理、平行层理以及波痕和大型透镜状砂体,为三角洲前缘亚相沉积环境.研究区西北部的高家边组粒度明显变细,巢湖剖面以泥岩为主体,夹薄—中层泥质粉砂岩和粉—细砂岩,代表浅海相环境.另外,高家边组的岩性在横向上由研究区东南部建德剖面的细粒岩屑砂岩过渡到临安堰口剖面的细粒岩屑石英砂岩以及安吉、黄山地区的粉—细砂岩,而到研究区西北部的巢湖地区则以泥岩为主(图 4).高家边组沉积中心在浙西北的安吉地区,厚度超过 2 000 m,呈北东向展布;往西北方向厚度骤减,在黄山地区厚 1 000 m 左右,在巢湖地区仅 230 m(图 2c).

#### 2.4 中志留世坟头组

坟头组的岩性在横向上存在明显的变化,最东南侧的建德地区以中—细粒岩屑砂岩为主,而临水和安吉地区则以细粒岩屑石英砂岩为主,而到了黄山实测剖面及其以西地区则以细粒石英砂岩为主(图 5).坟头组沉积相在横向上变化不大,总体为三角洲相沉积,砂岩常发育平行层理、大型板状交错层理和波痕,偶见大型透镜状砂体,指示三角洲平原亚相沉积环境,而巢湖地区则为三角洲前缘亚相与三角洲平原亚相过渡环境.坟头组沉积中心与高家边组基本相似,位于浙西北安吉地区,但等值线比高家边组密集(图 2d).高家边组的最大厚度超过 2 000 m,往西北方向厚度骤减,宣城以西厚度不超过 500 m(图 2d).

#### 2.5 中志留世唐家坞组

唐家坞组岩性在横向上的变化与坟头组比较类似,研究区东南部的建德地区以中—细粒岩屑砂岩为主,仅在顶部出现粗粒岩屑砂岩;中部的临水和长兴地区则以细粒岩屑石英砂岩为主,顶部出现石英砂岩;黄山实测剖面及其以西地区则主要为细粒石英砂岩(图 6).唐家坞组沉积相在盆地内总体以三角洲前缘亚相为主,横向上变化不大.唐家坞组沉积中心位于浙西北安吉地区,最大厚度超过 2 000 m,往西北方向厚度骤减,宣城以西厚度不超过 500 m(图 2e).

综合以上分析,可以发现研究区在晚奥陶世至志留纪期间具有以下沉积特征:(1)沉积物粒度由下往上逐渐变粗,沉积相由浅海相变为三角洲相;(2)沉积物总体上由研究区的东南部向西北部粒度变细,岩性由岩屑砂岩向岩屑石英砂岩和石英砂岩转变;(3)沉积厚度等值线具有明显的不对称性,靠近东南部等值线密,且沉积厚度大,往西北一侧等值线稀疏,且沉积厚度小;(4)盆地沉积中心由晚奥陶世的桐

庐—临安地区向西北迁移到志留纪的安吉地区.

### 3 沉积岩的碎屑锆石物源分析

#### 3.1 样品采集与实验方法

本文研究中碎屑锆石样品采自研究区东南部的浙西北桐庐地区(图 7),采样层位包括晚奥陶世长坞组和文昌组以及志留纪大白地组(高家边组上段)和唐家坞组,具体样品信息见表 2.

锆石的挑选由廊坊市诚信地质服务有限公司完成.锆石制靶、透射和反射拍照在浙江大学地球科学学院完成.锆石阴极发光照相在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 JXA-8100 电子探针显微分析系统完成,加速电压为 15 kV,电流为 20 nA,图像分辨率为 6 nm,束斑直径为 1  $\mu\text{m}$ .碎屑锆石 U-Pb 定年在中国地质调查局天津地质矿产研究所铀铅测年实验室 LA-MC-ICP-MS 仪器上完成,仪器配置和实验流程见李怀坤等(2009).

#### 3.2 碎屑锆石特征与 U-Pb 定年结果

(1)碎屑锆石特征.晚奥陶世长坞组的碎屑锆石

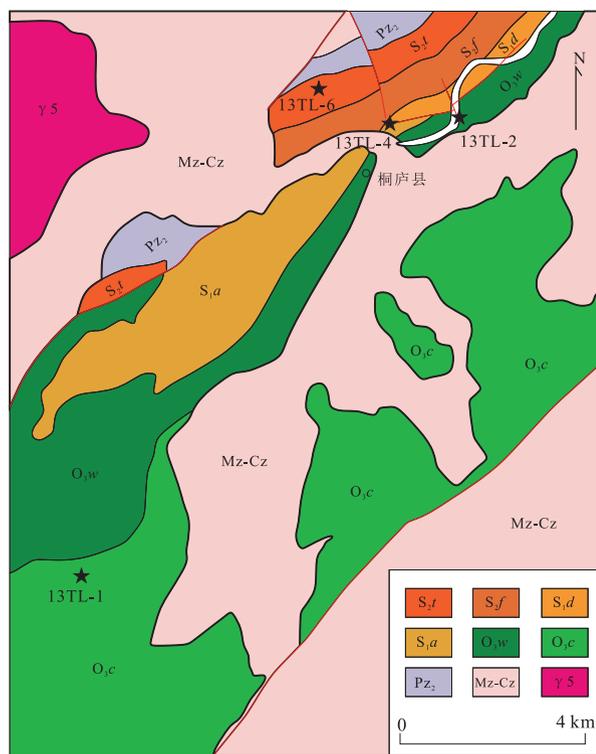


图 7 碎屑锆石样品采样点

Fig.7 Locations of detrital zircon samples

Pz<sub>2</sub>, 上古生界; Mz-Cz, 中生界; γ<sub>5</sub>, 燕山期花岗岩; S<sub>2</sub>t, 唐家坞组; S<sub>2</sub>f, 坟头组; S<sub>1</sub>d, 大白地组; S<sub>1</sub>a, 高家边组; O<sub>3</sub>w, 文昌组; O<sub>3</sub>c, 长坞组

表2 碎屑锆石样品采样信息  
Table 2 Information of detrital zircon samples

样品	采样地点	采样坐标	岩性	采样层位
13TL-1	桐庐桐君山	29° 43' 30.5" N, 119° 36' 59" E	粉-细砂岩	长坞组
13TL-2	桐庐桐君山	29° 48' 59.3" N, 119° 40' 25.7" E	岩屑石英砂岩	文昌组
13TL-4	桐庐桐君山	29° 49' 0.6" N, 119° 40' 13" E	岩屑石英砂岩	大白地组
13TL-6	桐庐桐君山	29° 49' 25.1" N, 119° 39' 40.3" E	岩屑石英砂岩	唐家坞组

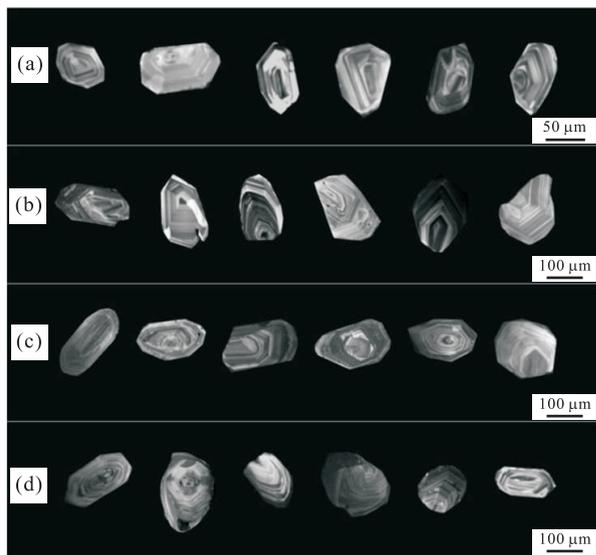


图 8 样品的碎屑锆石阴极发光图

Fig.8 Cathodoluminescence images of the detrital zircon grains

晶形主要以半自形短柱状和椭圆状为主,少量呈圆状,部分锆石形态破碎;锆石长度一般在 40~130 μm,绝大部分颗粒长度集中在 70~80 μm,长宽比在 1:1 到 2.5:1.阴极发光图像显示锆石具有清晰的环带结构,部分锆石具有继承核部(图 8a).晚奥陶世文昌组的碎屑锆石晶形以半自形长柱状、短柱状和椭圆状为主,绝大多数锆石形态完好,只有少

量锆石呈破碎状;锆石长度一般在 80~250 μm,绝大部分颗粒长度集中在 130~150 μm,长宽比在 1:1 到 2.4:1.阴极发光图像显示锆石具有清晰的环带结构(图 8b).早志留世大白地组的碎屑锆石晶形以自形、半自形柱状和椭圆状为主,绝大多数锆石形态完好,只有少量锆石呈破碎状;锆石长度一般在 100~270 μm,绝大部分颗粒长度集中在 150~170 μm,长宽比在 1:1 到 2.5:1.阴极发光图像显示锆石具有清晰的环带结构,少数锆石具有继承核部(图 8c).中志留世唐家坞组的碎屑锆石晶形大致可以分为 2 种,一种以半自形、自形长柱状为主,长度一般在 200~280 μm,长宽比在 1:1 到 2.8:1;另一种以短柱状或椭圆状为主,长度一般在 100~180 μm,长宽比在 1:1 到 1.3:1.阴极发光图像显示锆石具有较明显的环带结构,部分锆石具有继承核(图 8d).

(2)碎屑锆石 U-Pb 定年结果.长坞组样品共进行 72 颗锆石的 U-Pb 定年分析,获得 54 个谐和的锆石年龄(图 9a),锆石年龄分布介于 544~2 860 Ma,形成了 818 Ma、870 Ma 和 909 Ma 的主要年龄峰值以及 1 829 Ma 和 2 492 Ma 的次要年龄峰值(图 9b).

文昌组样品进行了 78 颗锆石的 U-Pb 定年分析,共获得 44 个谐和的锆石年龄(图 10a);锆石年龄分布介于 575~3 437 Ma,形成了 824 Ma 和 1 864 Ma 的主要年龄峰值以及 2 042 Ma、2 358 Ma 和 2 492 Ma 三个次要年龄峰值(图 10b).

大白地组样品进行了 86 颗锆石的 U-Pb 定年分析,共获得 49 个谐和的锆石年龄(图 11a).锆石年龄分布范围很广,介于 798~2 959 Ma,只有 832 Ma

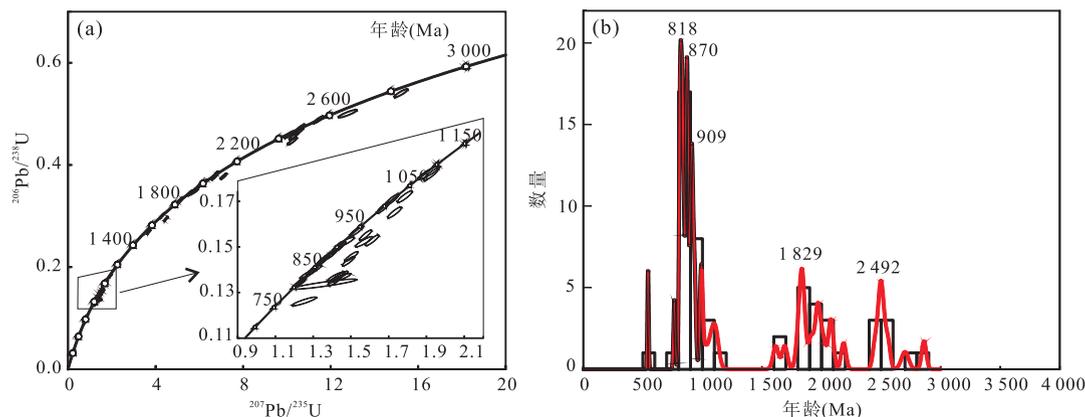


图 9 长坞组碎屑锆石年龄谐和图(a)和频谱图(b)

Fig.9 Concordia diagram (a) and spectrum (b) of the detrital zircons in the Changwu Formation

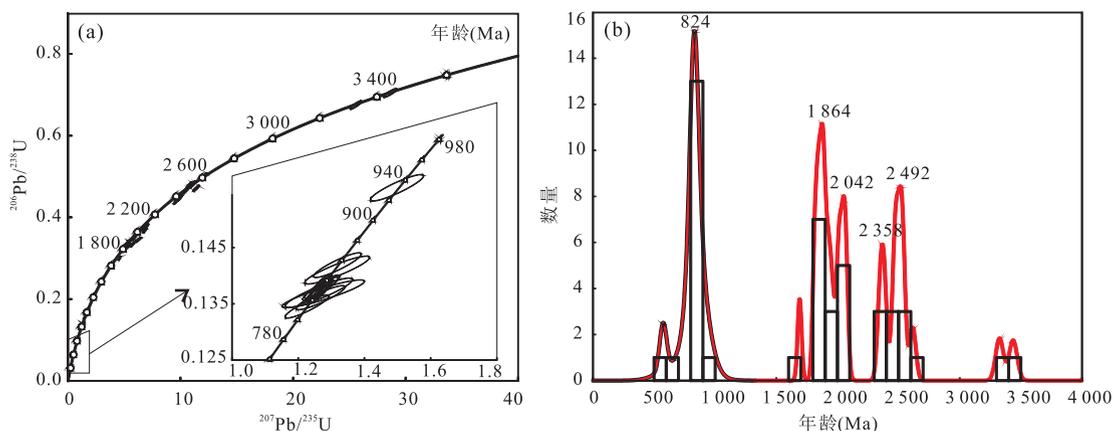


图 10 文昌组碎屑锆石年龄谐和图(a)和频谱图(b)

Fig.10 Concordia diagram (a) and spectrogram (b) of the detrital zircons in the Wenchang Formation

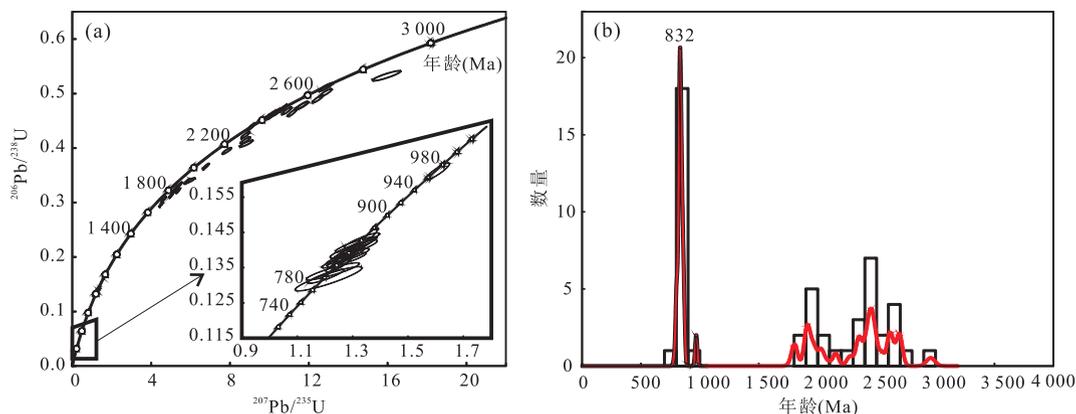


图 11 大白地组碎屑锆石年龄谐和图(a)和频谱图(b)

Fig.11 Concordia diagram (a) and spectrogram (b) of the detrital zircons in the Dabaidi Formation

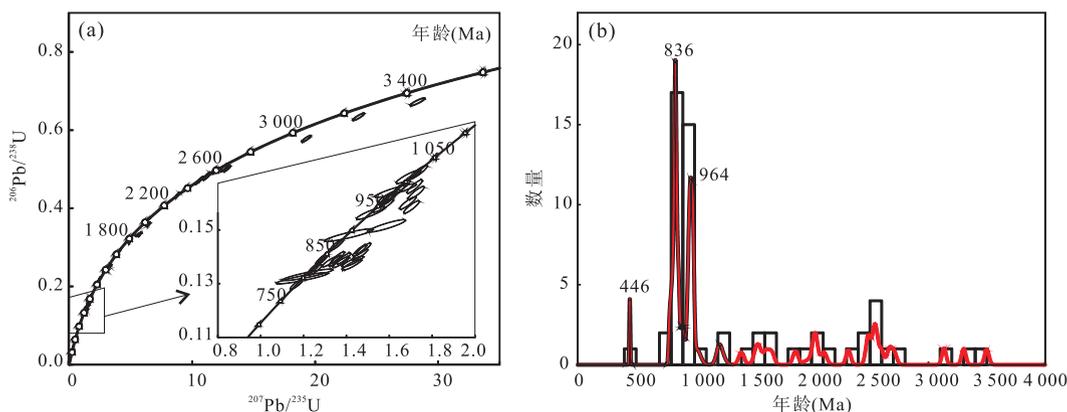


图 12 唐家坞组碎屑锆石年龄谐和图(a)和频谱图(b)

Fig.12 Concordia diagram (a) and spectrogram (b) of the detrital zircons in the Tangjiawu Formation

的年龄峰最为显著(图 11b),其他的锆石年龄分散,不形成显著的峰值。

唐家坞组样品进行了 88 颗锆石的 U-Pb 定年分析,共获得 60 个谐和的锆石年龄(图 12a)。锆石年龄分布范围很广,介于 447~3 499 Ma,形成了

836 Ma和 964 Ma 的显著年龄峰值,其他年龄分布较为分散、不形成峰值(图 12b)。最年轻的一颗锆石年龄为 446±19 Ma。

### 3.3 碎屑锆石年代学特征对物源区的指示

为了更好地揭示研究区沉积物的物源,将本研究

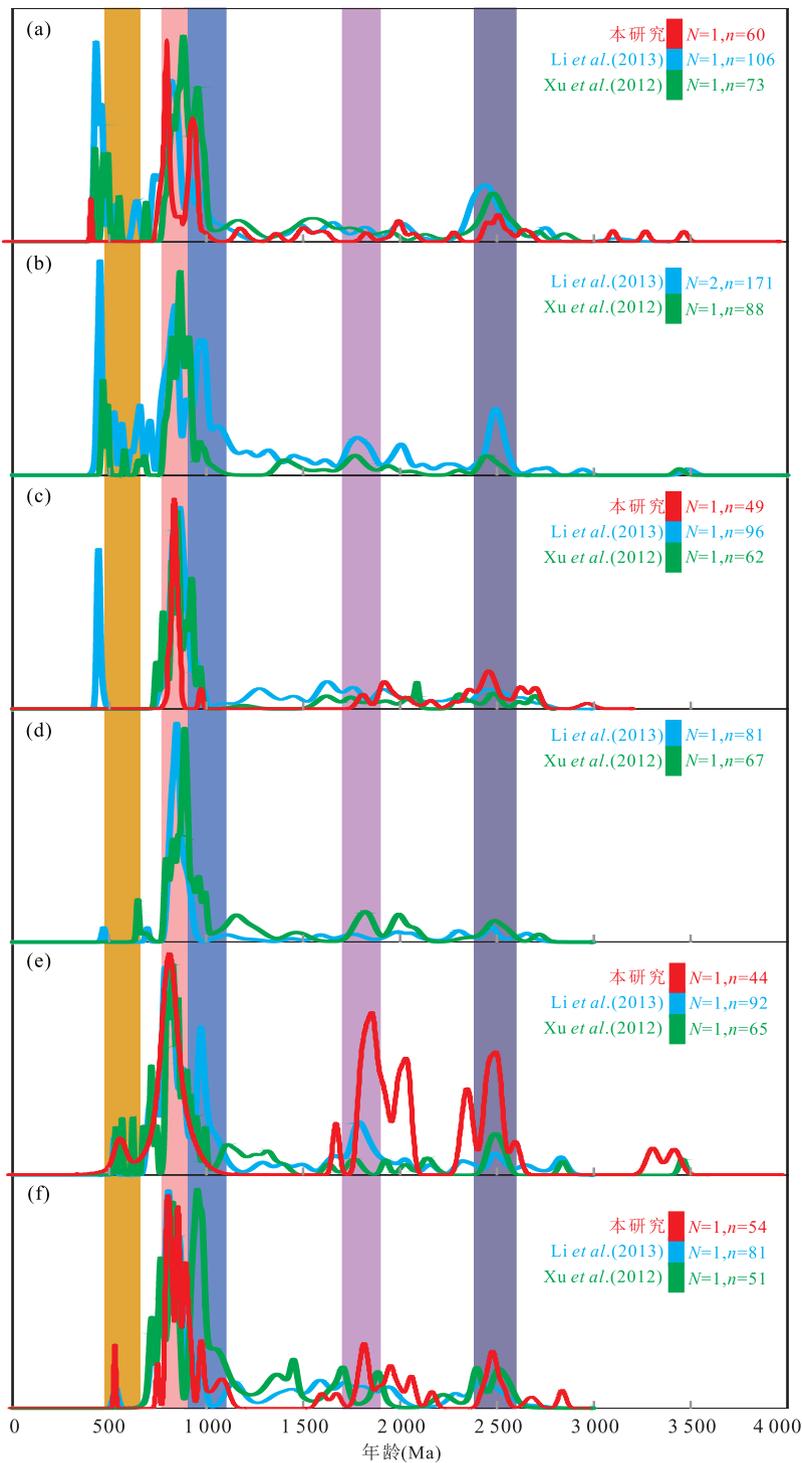


图 13 研究区上奥陶统一志留系碎屑锆石年谱对比

Fig.13 Comparison of the detrital zircon ages from the Upper Ordovician to the Silurian in the study area

a.塘家坞组;b.康山组;c.大白地组;d.安吉组;e.文昌组;f.长坞组

的谐和碎屑锆石年代学数据与前人的研究结果(Xu *et al.*, 2012;Li *et al.*, 2013)相结合,综合绘制成研究区上奥陶统一志留统碎屑锆石年谱图(图 13)。图 13 显示出不同作者获得的碎屑锆石年代学结果有很好的相似性,上奥陶统一志留统样品的碎屑锆石年龄

都存在明显的 900~720 Ma 主要年龄峰值,没有出现明显的代表华夏地块基底 1.9~1.7 Ga 的特征年龄峰值(图 13),而大白地组至塘家坞组还出现 450~420 Ma 的年龄信息(图 13a,13b,13c)。

上奥陶统碎屑锆石以 900~720 Ma 为最主要

年龄峰值(图 13e, 13f), 与下伏新元古代罗迪尼亚超大陆裂解的裂谷层序的锆石年龄特征相符, 表明裂谷层序在晚奥陶世被抬升到地表遭受剥蚀, 并为盆地提供物源. 碎屑锆石中含有少量 1 100~900 Ma 的锆石年龄, 这一特征与震旦系至中奥陶统沉积岩的碎屑锆石年龄谱相一致(Li *et al.*, 2013), 因此, 震旦系至中奥陶统沉积岩也可能在晚奥陶世为研究区的沉积提供少量物源. 研究区上奥陶统沉积岩碎屑锆石中没有出现同造山岩浆作用的年龄信息, 表明此时与造山作用相关的岩浆岩并未剥露地表.

高家边组(安吉组和大白地组)碎屑锆石相对于下伏上奥陶统沉积岩碎屑锆石有两个鲜明特征. 第一是高家边组碎屑锆石出现了 450~420 Ma 的年龄信息(图 13c, 13d), 表明同造山岩浆岩已经被剥露至地表, 并为盆地提供少量碎屑物质; 第二是高家边组碎屑锆石基本呈单峰分布, 以 900~720 Ma 为峰值(图 13c, 13d; Xu *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2013), 表明物源仍旧以下伏新元古代罗迪尼亚超大陆裂解的裂谷层序的剥蚀为主.

坟头组(康山组)和唐家坞组沉积岩的碎屑锆石 450~420 Ma 的年龄信息相对高家边组更加明显, 表明同造山岩浆岩已经被较大规模剥露至地表, 并为盆地提供物源; 同时又重新出现了 1 100~900 Ma 的年龄信息(图 13a, 13b), 表明震旦系至中奥陶统沉积岩在坟头组和唐家坞组沉积时重新为盆地提供物质.

上奥陶统一中志留统样品的碎屑锆石中没有出现明显的代表华夏地块基底 1.9~1.7 Ga 的特征年龄峰值, 表明华夏地块在早古生代隆升剥蚀并为盆地提供物源的可能性很小.

## 4 早古生代晚期盆地性质与构造演化

### 4.1 早古生代晚期沉积盆地的性质

研究区自震旦纪西峰寺组沉积开始即进入稳定的构造演化阶段, 沉积物主要以碳酸盐岩和钙质泥岩为主, 岩性稳定、沉积厚度较薄, 这一稳定构造背景一直持续到晚奥陶世早期黄泥岗组沉积期. 自上奥陶统长坞组沉积开始, 沉积特征发生了显著改变, 沉积物以陆源碎屑岩为主; 沉积厚度相对下伏地层急剧增加; 同时长坞组的沉积速率是下伏硯瓦山组和黄泥岗组沉积速率的 20~30 倍(Chen *et al.*, 2012b). 上述 2 套地层沉积特征的变化预示其沉积环境和构造背景发生了显著的转变(Chen *et al.*,

2010, 2012b; Rong *et al.*, 2010).

通过上述分析可以发现, 研究区上奥陶统至中志留统沉积具有以下特征: (1) 沉积厚度等值线具有明显的不对称性, 靠近研究区东南部等值线密, 且沉积厚度大; 往西北侧等值线稀疏, 且沉积厚度小(图 2); (2) 沉积物以陆源碎屑岩为主, 沉积物呈现下细上粗的韵律, 并且沉积物颜色由下部的灰黑色、青灰色和灰绿色为主向上部转变为以黄绿色、紫红色和杂色为主(图 3~图 6); (3) 沉积相由下部浅海相向上部过渡为三角洲相; (4) 沉积中心由靠近研究区东南部的桐庐地区向西北侧的安吉方向迁移(图 2); (5) 沉积学特征在横向上差异显著, 总体由研究区东南部向西北部粒度变细, 岩性由岩屑砂岩向石英砂岩转变; (6) 研究区的物源具有双向性, 以造山带为主要物源区, 西北侧的克拉通为次要物源区; (7) 研究区的沉积中心呈狭长带状分布与造山带基本平行, 同时沉积特征转变的时间与造山带的隆升时间耦合(Li *et al.*, 2009; Charvet *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2012a), 沉积特征变化受到造山带的控制. 以上特征表明研究区早古生代晚期沉积盆地为前陆盆地.

### 4.2 盆地与造山带演化

早古生代早期华南地块位于东冈瓦纳板块边缘(Usuki *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2013, 2014; Yao *et al.*, 2014), 接受来自印度西北部(包括少量澳大利亚西部)的陆源碎屑物. 晚奥陶世开始, 随着华南地块与冈瓦纳板块持续碰撞拼贴(Yao *et al.*, 2015), 碰撞的远程效应传播至华南地块内部, 形成了一条 NE 走向的陆内造山带(Li *et al.*, 2009; Charvet *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010). Li *et al.* (2009) 对浙西北地区陈蔡杂岩进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年, 以及角闪石和黑云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 定年研究, 提出了华夏地块早古生代向西北逆冲推覆造山模式. Gong *et al.* (2016) 运用磁组构方法对江山-绍兴断裂带北东段糜棱岩带和陈蔡杂岩进行韧性变形研究, 认为糜棱岩带和陈蔡杂岩经历了强力的构造挤压变形, 并提出江山-绍兴断裂带北东段经历了 2 期构造变形, 第 1 期为强烈的北西向逆冲挤压, 第 2 期为左旋走滑改造. 逆冲推覆的巨大构造负载使得造山带西北侧地层发生挠曲沉降, 形成陆内前陆盆地(Xu *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2013; Yao *et al.*, 2015).

晚奥陶世是前陆盆地演化早期阶段, 盆地构造沉降速率大于沉积物供给速率, 前渊地区沉积物虽然巨厚, 但以浅海相泥岩为主(图 14b). 晚奥陶世末, 造山带持续隆升并向克拉通方向迁移, 前陆盆地

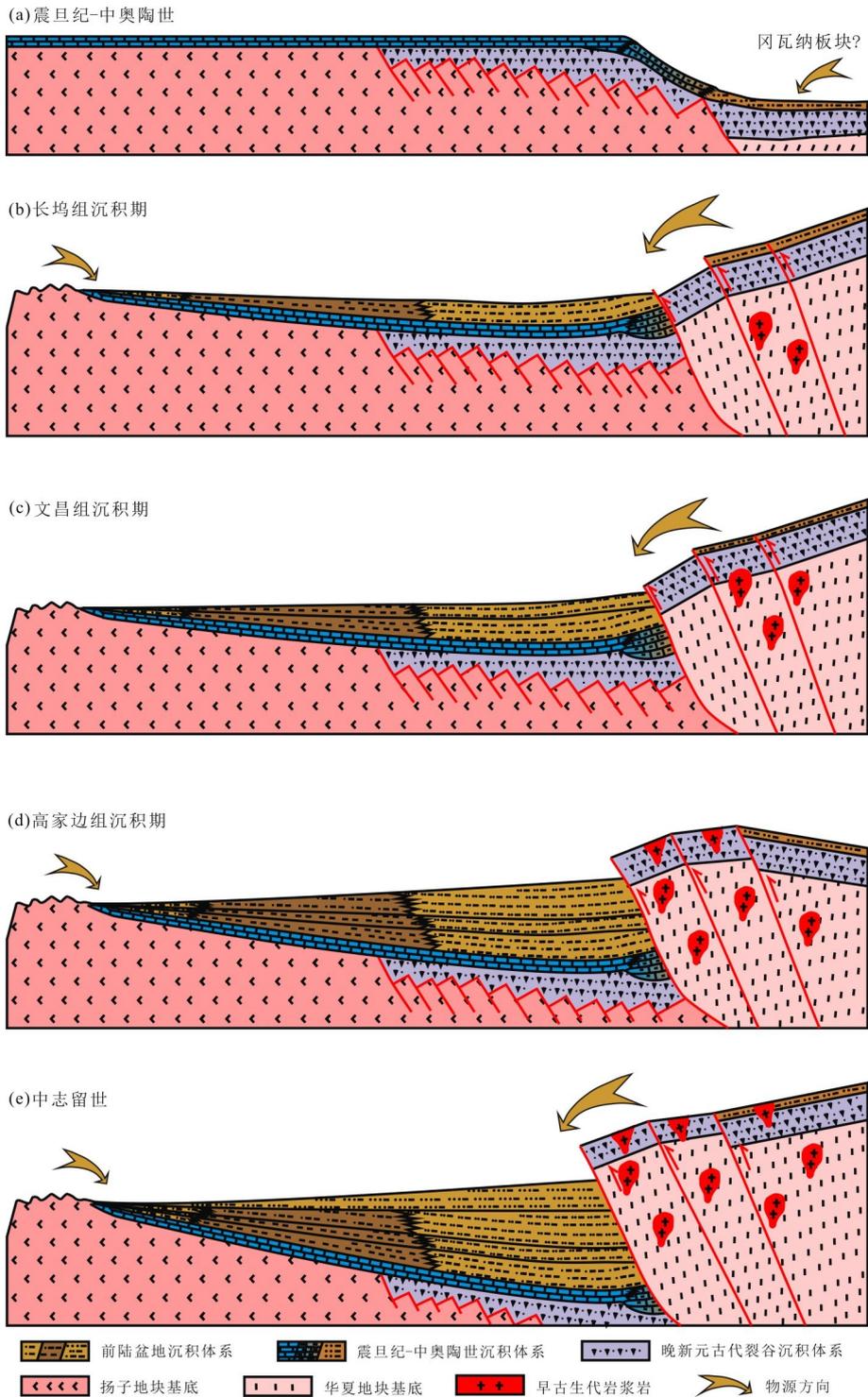


图 14 下扬子地区晚奥陶世—中志留世盆山过程模式

Fig.14 Sketch map of the mountain-basin evolution from the Late Ordovician to the Middle Silurian in the lower Yangtze area

沉积物供应充足,沉积物粒度明显变粗,沉积相也由浅海相转变成三角洲前缘相(图 14b,14c);盆地古水流方向表明此时前陆盆地的物源主要来自东南侧造山带(Wang *et al.*, 2010;Shu *et al.*, 2014);上奥陶统沉积岩碎屑锆石以 900~720 Ma 为最主要年

龄区间,与下伏新元古代罗迪尼亚超大陆裂解的裂谷层序的锆石年龄特征相符,表明裂谷层序在晚奥陶世被抬升到地表为盆地提供物源(图 14b,14c);震旦系至中奥陶统沉积岩也可能为研究区晚奥陶世前陆盆地提供少量物质,导致盆地沉积岩碎屑锆石

中含有少量 1 100~900 Ma 的锆石年龄。

早志留世高家边组沉积开始,新元古代裂谷层序仍旧是盆地的主要物源,但沉积岩的碎屑锆石年龄出现了 450~420 Ma 的年龄信息,表明同造山岩浆岩已经被剥露至地表,并为前陆盆地提供少量碎屑物质(图 14d)。到中志留世,随着冲断抬升作用的继续加强,同造山岩浆岩被大规模剥露,导致坟头组和唐家坞组沉积岩相对高家边组 450~420 Ma 的年龄信息更加明显(图 14e,14f)。

## 5 结论

(1)下扬子地区上奥陶统及志留系沉积物以陆源碎屑岩为主,盆地沉积相由下部浅海相向上部三角洲相过渡。沉积学特征从东南向西北岩性由岩屑砂岩变为石英砂岩,粒度由粗粒变为细粒;沉积厚度等值线具有明显的不对称性,靠近东南等值线密,且沉积厚度大;往西北等值线稀疏,且沉积厚度小;沉积中心呈狭长带状分布,并从东南向西北方向迁移;具有前陆盆地的沉积特征。

(2)下扬子地区上奥陶统到中志留统的碎屑锆石主要以 900~720 Ma 的年龄为主,指示物源以下伏新元古代晚期裂谷层序为主;从高家边组开始,450~420 Ma 碎屑锆石年龄的出现,并逐渐增多,表明同造山岩浆岩已经被剥露地表,并提供了一定物源;碎屑锆石中没有出现明显的代表华夏地块基底 1.9~1.7 Ga 的特征年龄峰值,表明华夏地块不是下扬子地区早古生代晚期前陆盆地的主要物源区。

(3)下扬子地区前陆盆地从晚奥陶世开始沉降,晚奥陶世的构造沉降速率超过了沉积物的供给速率,前渊沉积了巨厚的浅海相泥岩夹粉砂岩和砂岩;晚奥陶世末造山带持续隆升并向西北方向扩展,沉积物粒度明显变粗,沉积相也由浅海相转变成三角洲前缘相;早志留世开始埋深较大的同造山岩浆岩开始遭受剥蚀,导致前陆盆地中 450~420 Ma 的碎屑锆石含量逐渐增加。

## References

Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province, 1987. Regional Geology of Anhui Province. Geological Publishing House, Beijing, 1-221 (in Chinese).  
Bureau of Geology and Mineral Exploration of Jiangxi Province, 1984. Regional Geology of Jiangxi Province. Geological Publishing House, Beijing, 1-921 (in Chinese).

Bureau of Geology and Mineral Exploration of Zhejiang Province, 1989. Regional Geology of Zhejiang Province. Geological Publishing House, Beijing, 1-688 (in Chinese).  
Cawood, P. A., Nemchin, A. A., Freeman, M., et al., 2003. Linking Source and Sedimentary Basin: Detrital Zircon Record of Sediment Flux along a Modern River System and Implications for Provenance Studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 210 (1-2): 259-268. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00122-5)  
Charvet, J., Shu, L. S., Faure, M., et al., 2010. Structural Development of the Lower Paleozoic Belt of South China: Genesis of an Intracontinental Orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39 (4): 309-330. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2010.03.006>  
Chen, C. H., Liu, Y. H., Lee, C. Y., et al., 2012a. Geochronology of Granulite, Charnockite and Gneiss in the Poly-Metamorphosed Gaozhou Complex (Yunkai Massif), South China: Emphasis on the In-Situ EMP Monazite Dating. *Lithos*, 144-145: 109-129. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.009>  
Chen, X., Zhang, Y. D., Fan, J. X., et al., 2012b. Onset of the Kwangsi Orogeny as Evidenced by Biofacies and Lithofacies. *Science China Earth Sciences*, 55 (10): 1592-1600. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4490-4>  
Chen, X., Zhang, Y. D., Fan, J. X., et al., 2010. Ordovician Graptolite-Bearing Strata in Southern Jiangxi with a Special Reference to the Kwangsi Orogeny. *Science China Earth Sciences*, 53 (11): 1602-1610. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-4117-6>  
Garzanti, E., Doglioni, C., Vezzoli, G., et al., 2007. Orogenic Belts and Orogenic Sediment Provenance. *The Journal of Geology*, 115 (3): 315-334. <https://doi.org/10.1086/512755>  
Gong, G. H., Chen, H. L., Wang, F., et al., 2016. The Ductile Deformation Characteristics of Caledonian Intracontinental Orogeny in the Northeastern Jiangshan-Shaoxing Tectonic Zone: Insights from Magnetic Fabric Study and Its Geodynamic Implication. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90 (1): 75-87. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12643>  
Guan, Y. W., Qiu, Y. X., Gu, B. R., 1959. The Discovery of the Flysch Formation in the Upper Ordovician in Western Zhejiang and Southern Anhui. *Acta Geologica Sinica*, 39 (2): 188-212 (in Chinese).  
Ingersoll, R. V., 1988. Tectonics of Sedimentary Basins. *Geological Society of America Bulletin*, 100: 1704-1719. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1704:TOSB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1704:TOSB>2.3.CO;2)

- Ingersoll, R. V., 2012. Composition of Modern Sand and Cretaceous Sandstone Derived from the Sierra Nevada, California, USA, with Implications for Cenozoic and Mesozoic Uplift and Dissection. *Sedimentary Geology*, 280: 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.022>
- Li, H. B., Jia, D., Wu, L., et al., 2013. Detrital Zircon Provenance of the Lower Yangtze Foreland Basin Deposits: Constraints on the Evolution of the Early Palaeozoic Wuyi-Yunkai Orogenic Belt in South China. *Geological Magazine*, 150(6): 959–974. <https://doi.org/10.1017/s0016756812000969>
- Li, H. K., Geng, J. Z., Hao, S., et al., 2009. Using LA-MC-ICPMS to Constrain Zircon U-Pb Age. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(Suppl.): 77 (in Chinese).
- Li, L. M., Sun, M., Wang, Y. J., et al., 2011. U-Pb and Hf Isotopic Study of Zircons from Migmatized Amphibolites in the Cathaysia Block: Implications for the Early Paleozoic Peak Tectonothermal Event in Southeastern China. *Gondwana Research*, 19(1): 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.03.009>
- Li, Z. X., Li, X. H., Wartho, J. A., et al., 2009. Magmatic and Metamorphic Events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, Southeastern South China: New Age Constraints and Pressure-Temperature Conditions. *Geological Society of America Bulletin*, 122(5–6): 772–793. <https://doi.org/10.1130/b30021.1>
- Park, H., Barbeau, Jr. D. L., Rickenbaker, A., et al., 2010. Application of Foreland Basin Detrital-Zircon Geochronology to the Reconstruction of the Southern and Central Appalachian Orogen. *The Journal of Geology*, 118(1): 23–44. <https://doi.org/10.1086/648400>
- Ren, J. S., 1991. On the Geotectonics of Southern China. *Acta Geologica Sinica*, 4(2): 111–130. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.1991.mp4002001.x>
- Rong, J. Y., Zhan, R. B., Xu, H. G., et al., 2010. Expansion of the Cathaysian Oldland through the Ordovician-Silurian Transition: Emerging Evidence and Possible Dynamics. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 53(1): 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-0005-3>
- Shu, L. S., 2006. Predevonian Tectonic Evolution of South China: From Cathaysian Block to Caledonian Period Folded Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418–431 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L. S., Jahn, B. M., Charvet, J., et al., 2014. Early Paleozoic Depositional Environment and Intraplate Tectono-Magmatism in the Cathaysia Block (South China): Evidence from Stratigraphic, Structural, Geochemical and Geochronological Investigations. *American Journal of Science*, 314(1): 154–186. <https://doi.org/10.2475/01.2014.05>
- Shu, L. S., Yu, J. H., Jia, D., et al., 2008. Early Paleozoic Orogenic Belt in the Eastern Segment of South China. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1581–1593 (in Chinese with English abstract).
- Usuki, T., Lan, C. Y., Wang, K. L., et al., 2013. Linking the Indochina Block and Gondwana during the Early Paleozoic: Evidence from U-Pb Ages and Hf Isotopes of Detrital Zircons. *Tectonophysics*, 586: 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.11.010>
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Xu, M. H., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology and Geochemistry of Metavolcanic and Metasedimentary Rocks in Northwestern Fujian, Cathaysia Block, China: Tectonic Implications and the Need to Redefine Lithostratigraphic Units. *Gondwana Research*, 12(1–2): 166–183. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.016>
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhang, G. W., et al., 2013. Phanerozoic Tectonics of the South China Block: Key Observations and Controversies. *Gondwana Research*, 23(4): 1273–1305. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.019>
- Wang, Y. J., Zhang, A. M., Fan, W. M., et al., 2011. Kwangsi Crustal Anatexis within the Eastern South China Block: Geochemical, Zircon U-Pb Geochronological and Hf Isotopic Fingerprints from the Gneissoid Granites of Wugong and Wuyi-Yunkai Domains. *Lithos*, 127(1–2): 239–260. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.027>
- Wang, Y. J., Zhang, F. F., Fan, W. M., et al., 2010. Tectonic Setting of the South China Block in the Early Paleozoic: Resolving Intracontinental and Ocean Closure Models from Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Tectonics*, 29(6): TC6020. <https://doi.org/10.1029/2010tc002750>
- Xu, K. Q., Liu, Y. J., Yu, S. J., et al., 1960. The Discovery of Caledonian Granite in Southern Jiangxi Province. *Geological Review*, 20(3): 112–114 (in Chinese).
- Xu, Y. J., Cawood, P. A., Du, Y., et al., 2013. Linking South China to Northern Australia and India on the Margin of Gondwana: Constraints from Detrital Zircon U-Pb and Hf Isotopes in Cambrian Strata. *Tectonics*, 32(6): 1547–1558. <https://doi.org/10.1002/tect.20099>
- Xu, Y. J., Cawood, P. A., Du, Y. S., et al., 2014. Early Paleozoic Orogenesis along Gondwana's Northern Margin Constrained by Provenance Data from South China. *Tectonophysics*, 636: 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.08.022>
- Xu, Y. J., Du, Y. S., Cawood, P. A., et al., 2012. Detrital Zircon Provenance of Upper Ordovician and Silurian Strata in the Northeastern Yangtze Block: Response to Orogenesis in

- South China. *Sedimentary Geology*, 267 – 268: 63 – 72. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.05.009>
- Yang, D.S., Li, X.H., Li, W.X., et al., 2010. U-Pb and  $^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}$  Geochronology of the Baiyunshan Gneiss (Central Guangdong, South China): Constraints on the Timing of Early Palaeozoic and Mesozoic Tectonothermal Events in the Wuyun (Wuyi-Yunkai) Orogen. *Geological Magazine*, 147 (4): 481 – 496. <https://doi.org/10.1017/s0016756809990811>
- Yao, W.H., Li, Z.X., Li, W.X., et al., 2014. From Rodinia to Gondwanaland: A Tale of Detrital Zircon Provenance Analyses from the Southern Nanhua Basin, South China. *American Journal of Science*, 314 (1): 278 – 313. <https://doi.org/10.2475/01.2014.08>
- Yao, W.H., Li, Z.X., Li, W.X., et al., 2015. Detrital Provenance Evolution of the Ediacaran-Silurian Nanhua Foreland Basin, South China. *Gondwana Research*, 28 (4): 1449 – 1465. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.10.018>
- Yu, J. H., Zhou, X. M., O'Reilly, Y. S., et al., 2005. Formation History and Protolith Characteristics of Granulite Facies Metamorphic Rock in Central Cathaysia Deduced from U-Pb and Lu-Hf Isotopic Studies of Single Zircon Grains. *Chinese Science Bulletin*, 50(16): 1758 – 1767 (in Chinese).
- Zhang, F.F., Wang, Y.J., Zhang, A.M., et al., 2012. Geochronological and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Middle Paleozoic (Kwanghsian) Massive Granites in the Eastern South China Block. *Lithos*, 150: 188 – 208. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.03.011>
- Zhang, Y., Shu, L.S., Chen, X.Y., 2011. Geochemistry, Geochronology, and Petro-Genesis of the Early Paleozoic Granitic Plutons in the Central-Southern Jiangxi Province, China. *Science China Earth Sciences*, 54 (10): 1492 – 1510. <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4249-3>

### 附中文参考文献

- 安徽省地质矿产局, 1987. 安徽省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 721.
- 江西省地质矿产局, 1984. 江西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 921.
- 浙江省地质矿产局, 1989. 浙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 688.
- 关尹文, 丘元禧, 顾宝荣, 1959. 浙西、皖南上奥陶系复理石建造的发现. *地质学报*, 39(2): 188 – 212.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等, 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子质谱仪 (LA-MC-ICPMS) 测定锆石 U-Pb 年龄的研究. *矿物学报*, 28(增刊): 77.
- 舒良树, 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. *高校地质学报*, 12(4): 418 – 431.
- 舒良树, 于津海, 贾东, 等, 2008. 华南东段早古生代造山带研究. *地质通报*, 27(10): 1581 – 1593.
- 徐克勤, 刘英俊, 俞受均, 等, 1960. 江西南部加里东期花岗岩的发现. *地质评论*, 20(3): 112 – 114.
- 于津海, 周新民, O'Reilly, Y. S., 等, 2005. 南岭东段基底麻粒岩相变质岩的形成时代和原岩性质: 锆石的 U-Pb-Hf 同位素研究. *科学通报*, 50(16): 1758 – 1767.