

马之力, 李建华, 张岳桥, 等. 浙江南部丽水盆地地层时代及构造演化[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 56-71.

Ma Zhili, Zhang Yueqiao, Li Jianhua, et al. Geochronological and structural constraints on the litho-stratigraphic units of the Lishui Basin, southeastern China[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 56-71(in Chinese with English abstract).

浙江南部丽水盆地地层时代及构造演化

马之力^{1,2} 李建华¹ 张岳桥¹ 董树文¹ 宋传中² 李 勇¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 合肥工业大学资源与环境科学系, 安徽 合肥 230009)

摘要: 位于浙江南部的丽水盆地是华南东部典型的白垩纪火山岩盆地。对盆地中 5 个凝灰岩夹层样品进行了锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 同位素年代学分析, 结果给出了(114±1) Ma, (114±2) Ma, (118±1) Ma, (122±1) Ma 和(112±1) Ma 的主体谐和年龄。结合区域沉积-构造接触关系, 本文将盆地内火山-沉积序列分为上、下 2 个组合: 下火山-沉积组合包括馆头组和朝川组, 其形成时代在 124~112 Ma; 上火山-沉积组合以方岩组为代表, 其时代在 104~91 Ma。这两套岩石组合的形成记录了盆地两期伸展-挤压旋回的构造演化过程, 每一旋回的古构造应力场均以 NW-SE 伸展和 NW-SE 挤压应力场的交替演化为特征。NW-SE 伸展事件控制了盆地的初始张开、断陷和沉积物充填作用, 其产生的动力背景与古太平洋板块俯冲过程中因俯冲板片后撤(roll-back)诱发的弧后扩张作用有关。NW-SE 挤压事件导致盆地的构造反转, 下白垩统普遍褶皱, 并形成区域角度不整合面, 其形成与俯冲板片的深部几何学变化或大陆碰撞的远程效应有关。丽水盆地伸展-挤压事件的幕式交替反映了弧后扩张过程中复杂的深部动力学背景。

关键词: 丽水盆地; 锆石 U-Pb; 华南; 白垩纪; 构造应力场

中图分类号: P597.3; P553; P534.53 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)01-0056-16

Geochronological and structural constraints on the litho-stratigraphic units of the Lishui Basin, southeastern China

MA Zhi-li^{1,2}, LI Jian-hua¹, ZHANG Yue-qiao¹,
DONG Shu-wen¹, SONG Chuan-zhong², LI Yong¹

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: The Lishui Basin is a typical Cretaceous volcanic basin developed in Zhejiang Province of southeastern China. Five rock samples collected from interbedded volcanic tuffs of this basin were analyzed by using LA-MC-ICPMS zircon U-Pb method, which yielded weighted mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages of (114±1) Ma, (114±2) Ma, (118±1) Ma, (122±1) Ma and (112±1) Ma, respectively.

收稿日期: 2014-12-06; 改回日期: 2015-03-09

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120115069501)、国家自然科学基金项目(41502197)、中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务项目(DZLXJK201403)和国家专项“深部探测与实验研究”(SinoProbe-08-01)联合资助。

作者简介: 马之力, 男, 1989 年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: mzl7777@163.com。

通讯作者: 张岳桥, 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 从事构造地质、盆地分析和活动构造研究工作; E-mail: yueqiao-zhang@sohu.com。

These dating results, in conjunction with regional sedimentary and structural contact relationships, led the authors to divide the volcano-sedimentary sequences into two rock suites: the lower rock suite, consisting of Guantou and Chaochuan Formations, was deposited in 124—112 Ma, whereas the upper rock suite, corresponding to Chaochuan Formation, was deposited in 104—91 Ma. Their generations resulted from two stages of crustal extensional events during the Early Cretaceous. These sedimentary data, coupled with structural analysis and tectonic stress field inversion, support the argument that the Lishui basin underwent two cycles of tectonic evolution, and each was dominated by alternate stress episodes of NW—SE extension and NW—SE compression. The NW—SE extension accommodated the initial opening and sediment infilling of the basin, which might have originated from the back—arc extension induced by the rollback of the subducted Paleo—Pacific slab during the Early Cretaceous. The NW—SE compression led to tectonic inversion, and was responsible for the unconformity between the Upper and Lower Cretaceous strata, which was probably associated with the variations of the subducted slab dynamics or the collision between the eastern Asian margin and the West Philippine Block. The alternate extensional and compressional episodes reflect variation of geometries and dynamics of subducted slab in a back—arc extensional setting.

Key words: Lishui Basin; zircon U—Pb; southeastern China; Cretaceous; tectonic stress field

About the first author: MA Zhi—li, male, born in 1989, master candidate, majors in mineralogy, petrology and economic geology; E—mail: mzl7777@163.com.

About the corresponding author: ZHANG Yue—qiao, male, born in 1963, senior researcher, mainly engages in the teaching and study of structural geology, tectonics, neotectonics and basin analysis; E—mail: yueqiao—zhang@sohu.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program(No.12120115069501), National Natural Science Foundation of China (No.41502197), Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences Basic Scientific Research Program (No. DZLXJK201403) and National Science and Technology Major Project “Deep Exploration and Research” (No. SinoProbe—08—01).

1 引言

华南大陆由扬子地块和华夏地块组成,两个地块之间为江南—雪峰基底隆起带。大陆北缘为著名的秦岭—大别—苏鲁碰撞造山带,西南缘为红河断裂带,东南缘濒临西太平洋沟—弧—盆系统。从大地构造上,华南大陆夹于特提斯碰撞造山构造域和滨太平洋俯冲增生造山构造域之间(图1)。中生代,古太平洋板片向亚洲大陆之下俯冲和印支—华南大陆间的俯冲/碰撞诱发了华南大陆内部广泛的陆内变形和岩浆事件,形成了复杂的盆—山构造系统^[1-4]。这两大板缘构造域的动力学过程如何在时间上和空间上交替,是了解华南大陆中生代构造演化的关键。白垩纪是华南大陆中生代陆内构造过程中的一个重要时期^[5]。期间,华南大陆发生了大规模的地壳伸展裂陷和岩浆活动,形成了一个壮观的“白垩纪伸展盆地和火成岩省(South China Extensional Basins and Igneous Province)”,面积约262 920 km²^[6-7],其规模与美国西部的盆岭省(Basin and Range province)可比^[8]。这些大面积分布的断陷盆地和岩浆岩是了解该大陆白垩纪构造演化的重要物质记录。尽管前人已做了大量的调查和研究,而关于盆

地的成因及深部动力机制等问题,仍存较大争议,提出了不同的地球动力学模型:(1) Gilder et al. (1996)^[9]提出了“左行拉分+同期大陆裂解”模型用来解释华南大陆白垩纪伸展盆地与岩浆岩的形成,但该模型难以解释岩浆活动的时空迁移规律^[10]。(2) 有些学者注意到,华南晚中生代岩浆弧呈北东走向展布,且岩浆年龄从内陆至沿海逐渐变年轻,据此认为华南晚中生代岩浆活动与俯冲的古太平洋板片的后撤作用(slab rollback)有关^[11-12]。结合台湾—江西的深部地球物理剖面,Zhou and Li (2000)^[13]证实岩浆弧的宽度从中侏罗世至早白垩世逐渐变窄,他们进一步提出太平洋板块的俯冲角度从中侏罗世至早白垩世逐渐变陡。(3) 上述与洋壳俯冲相关的动力学模型遭到了Li (2000)^[14]的质疑,他认为华南岩浆弧的宽度(>1000 km)远大于一般俯冲成因岩浆弧的宽度(300~400 km),并提出华南白垩纪岩浆岩的形成与大陆岩石圈伸展诱发的减压熔融作用有关,而与洋壳俯冲作用无关。(4) Li and Li (2007)^[10]提出了古太平洋板块的平俯冲模型,用以解释华南大约1300 km宽的陆内褶皱冲断带及250~190 Ma岩浆岩的形成。这些作者强调190~90 Ma岩浆活动与平俯冲板片的塌陷和拆沉作用相关^[4]。

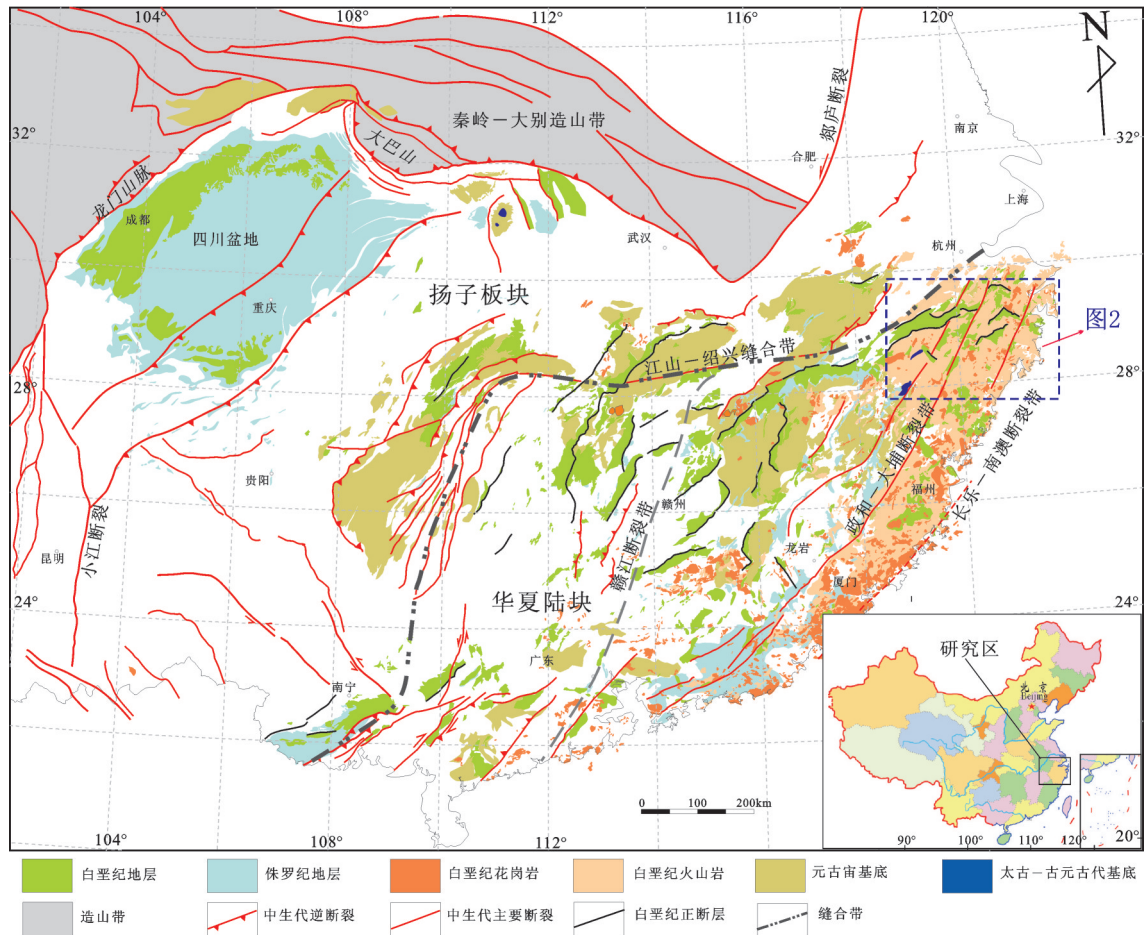


图1 华南大陆白垩纪盆地、岩浆岩和断裂分布简图

Fig.1 Simplified geological map showing the distribution of Cretaceous basins, magmatic rocks and faults of South China

(5) Li et al. (2014)^[15] 综合分析了盆地沉积-变形、岩浆岩年龄与地球化学资料,证实华南大陆白垩纪构造演化并不是单一伸展过程,而是以幕式岩浆活动和伸展-挤压作用交替演化为特征,并揭示了华南白垩纪幕式演化既与古太平洋洋壳俯冲板片的动力作用有关,也与特提斯构造域俯冲-碰撞动力学有联系。

浙江地区广泛发育白垩纪火山岩盆地,是了解华南大陆白垩纪构造-岩浆演化的关键地域之一。Li et al. (2014)^[16]对这些盆地的沉积、变形和岩浆特征进行了系统观测分析,识别出了上、下白垩统之间的角度不整合面,建立了这些盆地的白垩纪四阶段伸展-挤压交替演化模式。然而,对浙南丽水盆地的地层时代及变形特征,尚缺乏详细的同位素年代学和构造变形资料制约。本文选择丽水盆地为研究对象,对盆地中的夹层凝灰岩进行了LA-MC-

ICP MS 锆石U-Pb定年,限定了盆地地层时代。在此基础上,结合区域沉积-构造接触关系,并利用断层滑动矢量分析和古构造应力场反演的方法,重建了盆地的沉积-构造演化过程,并探讨了构造演化的地球动力学机制。

2 区域构造背景

华南东部广泛发育白垩纪火山岩盆地(图2),相比于其他内陆盆地,这些盆地沉积物中玄武质和流纹质火山组显著增加^[15]。区域主要发育2条地壳尺度的一级断裂,即:政和一大埔断裂带和赣一杭裂谷带。前者为重要的地质边界,将内陆早古生代褶皱冲断带和沿海中生代岩浆带分隔开^[17],该断裂带宽>20 km,由多条平行展布NE-SW走向的二级断裂组成,这些断裂多为控制白垩纪火山岩盆地沉积和断陷作用的边界断裂(图2);后者代表了扬

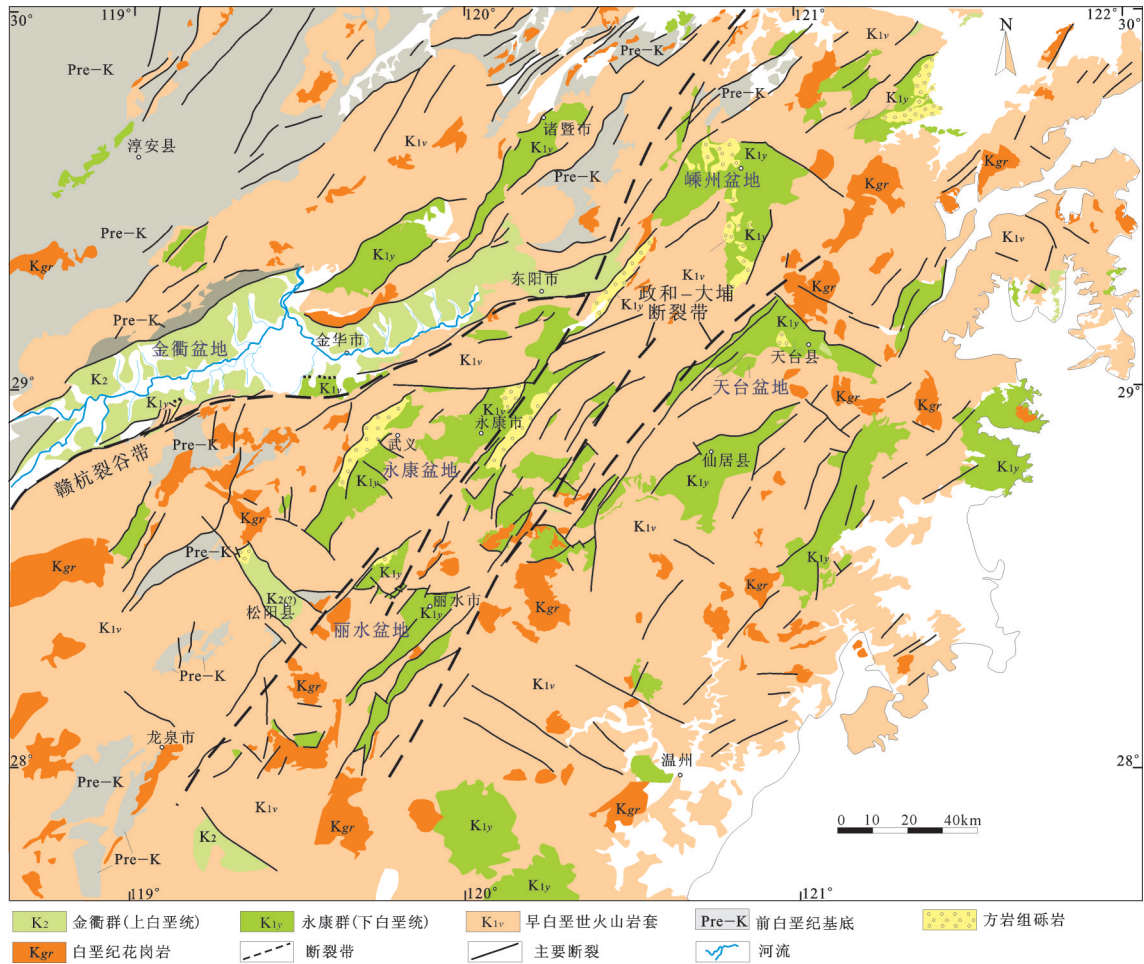


图2 华南东部浙江省白垩纪火山岩盆地、岩浆和断裂分布简图

Fig.2 Simplified structural map showing the distribution of volcanic basins, magmatic rocks and faults in Zhejiang Province of southeast China

子和华夏地块的界限——江绍缝合带^[18]的向西延伸,该断裂带在浙江地区走向NNE-SSW,沿金衢盆地展布,其为控制晚白垩世沉积的重要沉降中心带(图2)。区域发育的二级断裂可分为两类,分别走向NE和W-NW,长度约数十至数百千米,它们共同控制并调节白垩纪火山岩盆地群的形成和发展(图2)。

根据盆地边界断裂的几何学,可将火山岩盆地划分为3种类型。第一类盆地受NE走向正断裂控制,尤其沿着政和一大埔断裂带发育,为区内最显著的构造-地貌单元,如丽水盆地、永康盆地等;第二类盆地受E-W走向正断裂控制,它们构成了E-W走向赣-杭裂谷带,如金衢盆地,其记录了该裂谷带的白垩纪活化^[19];第三类盆地由NE和NW走向正断裂联合控制,盆地形态呈弧形,典型的有嵊州盆地、天台盆地(图2)。前人对这些盆地展开的沉

积学和地层学研究^[20-24],主要局限于单个盆地的地层单元,而缺乏盆地间的对比,所得出的地层序列和划分模式很难适用于其他盆地。因此,关于盆地的成因,一直缺乏系统认知。最近,Li et al.(2014)^[16]综合构造地质学和年代学等最新成果,对地层的划分和对比进行了新的阐述,证实第一和第二类盆地分别形成于早白垩世NW-SE向伸展事件和晚白垩世N-S向伸展事件,第三类盆地则是这两期事件的构造叠加。

3 盆地岩石地层序列

丽水盆地位于浙江省南部,为上述划分方案中典型的第一类盆地,由3个次一级单元组成:老竹、碧湖和岩寨地堑(图3-A)。

老竹地堑位于丽水西北地区,其西缘受NE-

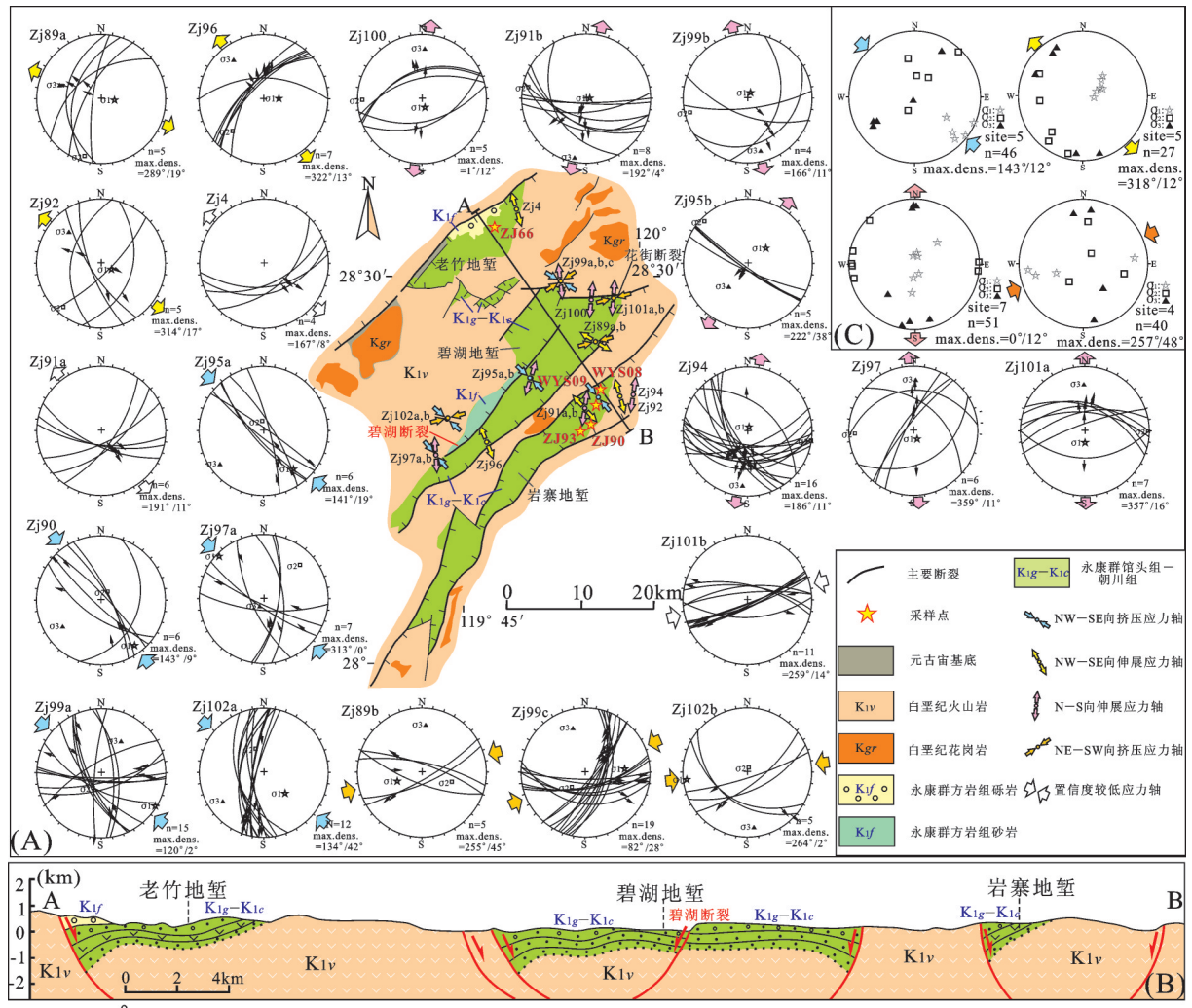


图3 丽水盆地构造纲要图和古构造应力场反演结果(A),横穿丽水盆地构造剖面(B)及四期构造应力场主应力轴极值统计图(C)
 Fig.3 (A) Simplified geological map of the Lishui basin, and computed stress axes from fault slip analyses showing alternate extensional and compressional regimes prevailing during basin formation and development; (B) Cross section based on field observations and measurements showing structural styles of the Lishui basin; (C) Stereonet showing statistical analyses of three principal stress axes and yielding four stages of tectonic stress field. σ_1 , σ_2 , and σ_3 represent maximum, intermediate and minimum compressive stress, respectively

SW走向正断层控制,东缘不整合覆盖在早白垩世火山岩之上,为典型的“西断东超”的半地堑,地堑内地层普遍向北西微倾。该地堑盆地由三套地层组成,下部为一套暗紫色、灰绿色含细砾砂岩(图4-A),其中有大量的虫迹化石,覆盖在下部早白垩世火山岩套(K_{1v})之上,相当于馆头组;中部为一套酸性火山岩(图4-B),局部见球泡流纹岩(图4-C),相当于朝川组;上部为一套砾岩,即方岩组上部砾岩(图4-D),砾石成分以火山岩为主,分选中-差,磨圆一般至较好,不整合覆盖在朝川组火山岩之上(图5)。

碧湖地堑位于丽水南部地区,受到3条平行的

NE-SW向正断层控制,北宽南窄,北端被E-W走向花街断裂截切。中间碧湖断裂是一条西倾的正断层,它构成了西部碧湖凹地和东部丘陵山区的地貌边界(图3-B)。该地堑主体由2套地层组成。下部为一套暗色、灰绿色和紫色含砾砂岩,局部夹暗色泥岩,产恐龙化石^[25],主要出露于碧湖断层下盘的丘陵地带,该地层已发生明显的挤压褶皱变形,其可与Li et al. (2014)^[16]介绍的永康盆地的馆头组和朝川组对比。上部为一套紫红色砂质砾岩层夹粗砂岩,产恐龙蛋化石^[25],其层位相当于方岩组下部,主要出露于碧湖断裂上盘的凹陷地区,地层相对平缓(图5)。



图4 丽水盆地野外地层岩性组成及构造变形照片

A—老竹地堑馆头组砂泥岩; B—老竹地堑朝川组流纹岩; C—老竹地堑朝川组球泡流纹岩;
D—老竹地堑方岩组砾岩; E—岩寨地堑地层陡立

Fig. 4 Field views showing lithological compositions and structures of the strata in the Lishui Basin

A—Guantou sandstone and mudstone, Laozhu graben; B—Chaochuan rhyolite, Laozhu graben; C—Chaochuan globular rhyolite, Laozhu graben;
D—Fangyan conglomerate, Laozhu graben; E—Steep-dipping volcano-sedimentary strata, Yanzhai graben

岩寨地堑位于丽水东部地区,受两条平行的NE-SW向正断裂控制,地形地貌上表现为丘陵,主要岩石地层单元为一套紫红色砂砾岩和砂岩组成,并夹多层流纹质火山岩,该套地层相当于馆头组和朝川组,可与老竹地堑方岩组下覆的流纹质砂砾岩相比(图5)。地层向北西陡倾,倾角 $>40^\circ$ (图4-E),表明已遭受较强的挤压变形。

4 盆地地层时代及区域对比

为了限定丽水盆地地层的沉积时代,本文对老竹地堑和岩寨地堑地层中的火山岩夹层进行LA-

MC-ICP MS 锆石U-Pb年代学分析,共采集了5个凝灰岩样品。其中,4个样品自上而下依次采自岩寨地堑不同层位的火山岩夹层中,1个样品采自老竹地堑朝川组火山岩中,采样位置见图3和图5。

4.1 分析方法

将测试样品破碎后,先后经重力分选和磁分选等方法,挑选出单颗粒锆石,然后在双目显微镜下进行人工精选。选出晶形和透明度较好的锆石,将其固定于环氧树脂上并进行抛光,然后进行透射光、反射光和阴极发光(CL)的照像工作,以此作为锆石测年分析的选点依据。照像工作由北京锆年

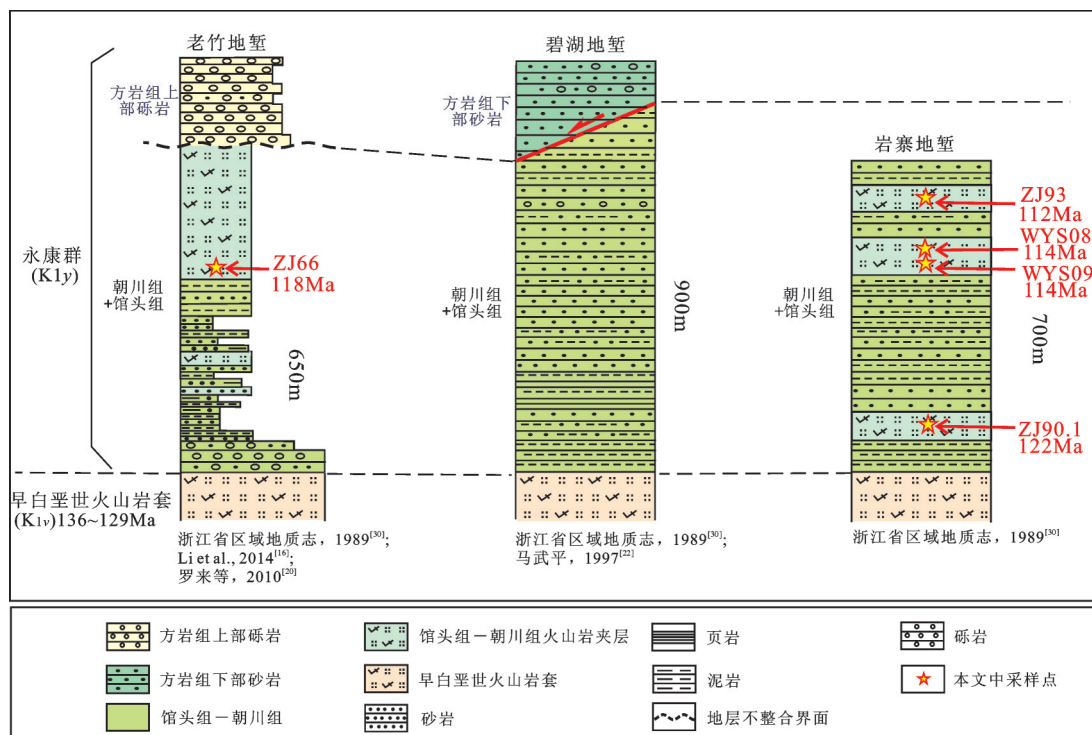


图5老竹、碧湖和岩寨地堑地层柱状对比分析图

Fig. 5 Representative stratigraphic columns showing the petrology, thickness and geochronology of major rock series in the Laozhu, Bihu and Yanzhai grabens

领航科技有限公司电子探针实验室完成。锆石U-Pb同位素分析在天津地质矿产研究所同位素实验室的激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)上进行,分析仪器为美国Thermo Fisher公司生产的NEPTUNE,激光器为美国ESI公司生产的NEW WAVE 193 nm FX ArF准分子激光器。实验分析详细流程见文献[26]。数据处理及锆石谐和图绘制分别采用ICPMSDataCal程序^[27]和Isoplot^[28]程序完成,普通铅校正采用Andersen^[29]的方法进行。

4.2 测试结果

这些岩样的LA-MC-ICPMS锆石U-Pb测年结果列于图6和表1中,年龄误差为 2σ 。每个样品的测年结果分析如下:

样品WYS08-1: 锆石为无色柱状,自形程度较好,透明-半透明。长度为100~200 μm ,宽度为50~100 μm ,长宽比为1:1~3:1。样品中大多数锆石在阴极发光照片中呈现出典型的韵律震荡环带(图6-A),反映被测锆石均为岩浆成因。本文共对18颗锆石进行了18个点的定年分析,这些点的Th含量为

$83 \times 10^{-6} \sim 410 \times 10^{-6}$,U含量为 $104 \times 10^{-6} \sim 383 \times 10^{-6}$,Th/U值为0.787~1.9(表1)。所有数据点都位于谐和线上或附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 (114 ± 1) Ma (MSWD=2.7)(图6-B)。其代表了火山喷发的年龄。

样品WYS09-1: 锆石为无色透明柱状、长柱状,自形或半自形。长度为100~250 μm ,宽度为60~100 μm ,长宽比为1:1~4:1。锆石显示出韵律震荡环带特征(图6-C),且具有较高的Th/U比值(0.71~1.36),为典型的岩浆结晶成因锆石。本文共对12颗锆石进行了12个点的定年分析,得出Th含量为 $79 \times 10^{-6} \sim 329 \times 10^{-6}$,U含量为 $86 \times 10^{-6} \sim 265 \times 10^{-6}$ (表1)。锆石点10.1的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏离谐和线较远,这可能与放射性成因铅丢失有关,故未参与计算。除锆石点10.1外,11个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 (114 ± 2) Ma (MSWD=2.4)(图6-D),代表了岩浆喷发的年龄。

样品ZJ66: 锆石为柱状,透明-半透明,自形-半自形。长度为80~150 μm ,宽度为60~100 μm ,长宽比为1:1~2.5:1。所有锆石显示出弱震荡环带特征(图6-E),表明锆石为岩浆成因。本文共对22颗

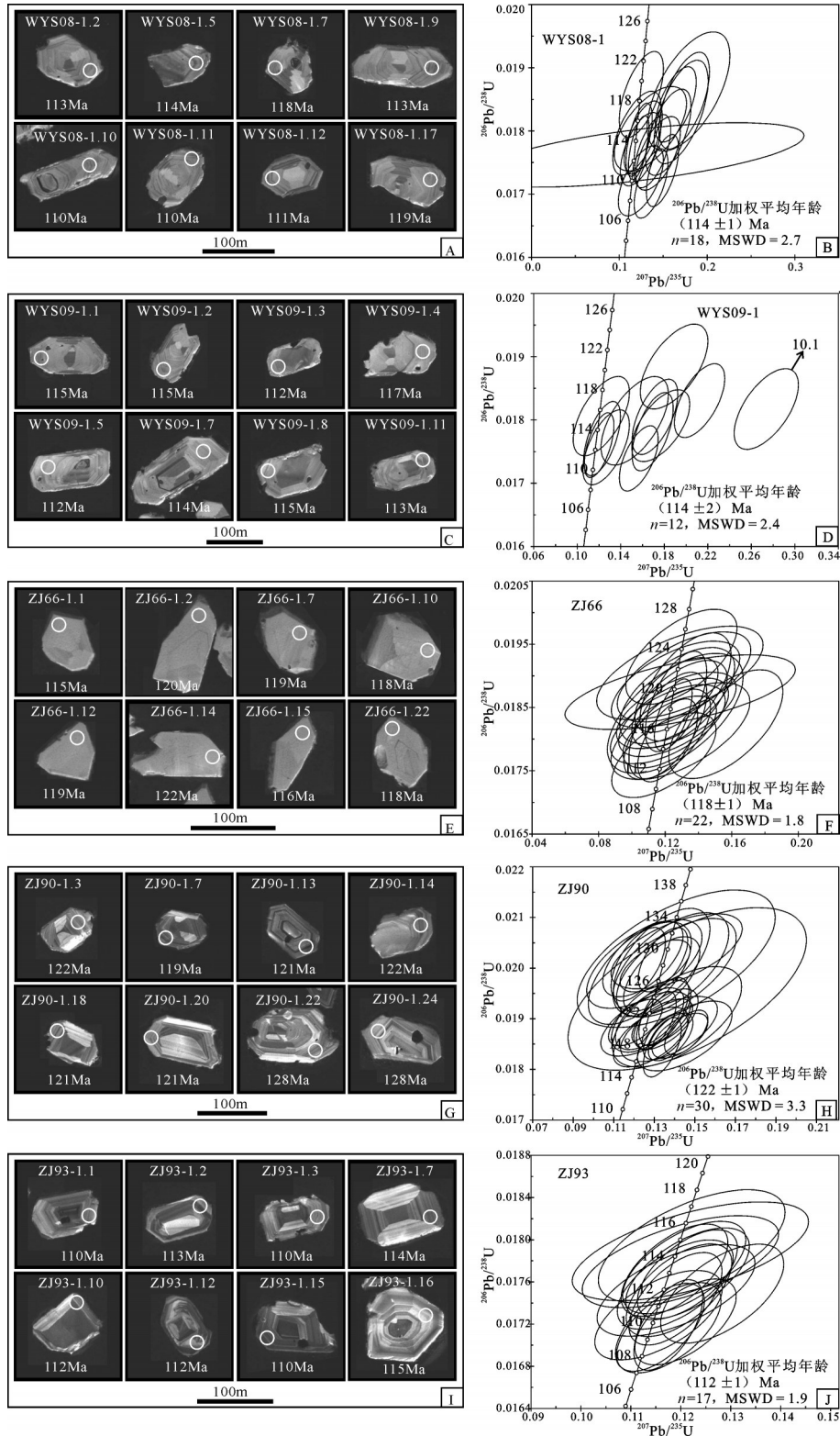


图6 丽水盆地夹层凝灰岩锆石阴极发光图像和LA-MC-ICPMS 锆石U-Pb年龄谐和图
 Fig.6 Cathodoluminescence (CL) images and zircon U-Pb concordia diagrams of the volcanic rocks within Lishui basin. MSWD, mean square of weighted deviates

表1 丽水盆地火山岩锆石LA-MC-ICPMS分析数据

Table 1 LA-MC-ICPMS zircon U-Pb isotopic data of zircons from the volcanic rocks within the Lishui basin

点号	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Pb*/ 10^{-6}	Th/U	$^{207}\text{Pb}^*/$ $^{206}\text{Pb}^*$	1σ	$^{207}\text{Pb}^*/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}^*/$ ^{238}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma
WYS08-1 岩寨地堑凝灰岩											
wys08.1	403	211	4.2	1.909	0.0508	0.0383	0.1235	0.0764	0.0176	0.0002	113±1.3
wys08.2	126	151	2.4	0.835	0.0593	0.0042	0.1442	0.0104	0.0176	0.0002	113±1.5
wys08.3	102	130	2.3	0.787	0.0488	0.0040	0.1251	0.0103	0.0186	0.0003	119±1.8
wys08.4	159	142	2.5	1.120	0.0485	0.0045	0.1202	0.0113	0.0180	0.0003	115±1.7
wys08.5	225	174	2.9	1.287	0.0497	0.0024	0.1225	0.0061	0.0179	0.0002	114±1.5
wys08.6	235	170	2.9	1.382	0.0516	0.0036	0.1273	0.0088	0.0179	0.0002	114±1.5
wys08.7	162	144	2.4	1.130	0.0647	0.0037	0.1643	0.0095	0.0184	0.0002	118±1.6
wys08.8	83	104	1.8	0.793	0.0545	0.0068	0.1354	0.0168	0.0180	0.0003	115±1.7
wys08.9	190	149	2.4	1.272	0.0566	0.0034	0.1379	0.0085	0.0177	0.0002	113±1.5
wys08.10	244	199	3.2	1.222	0.0575	0.0033	0.1362	0.0079	0.0172	0.0002	110±1.4
wys08.11	172	178	3.0	0.969	0.0525	0.0045	0.1246	0.0105	0.0172	0.0002	110±1.4
wys08.12	212	188	3.0	1.127	0.0623	0.0029	0.1493	0.0075	0.0174	0.0002	111±1.5
wys08.13	129	135	2.2	0.953	0.0629	0.0042	0.1559	0.0106	0.0180	0.0003	115±1.8
wys08.14	133	125	2.1	1.067	0.0675	0.0047	0.1704	0.0126	0.0183	0.0003	117±2.1
wys08.15	189	181	3.1	1.047	0.0509	0.0038	0.1243	0.0094	0.0177	0.0002	113±1.5
wys08.16	127	126	2.2	1.009	0.0682	0.0044	0.1739	0.0118	0.0185	0.0003	118±2.0
wys08.17	193	159	2.7	1.216	0.0696	0.0074	0.1789	0.0192	0.0186	0.0004	119±2.5
wys08.18	410	383	6.2	1.069	0.0500	0.0019	0.1222	0.0048	0.0177	0.0002	113±1.3
WYS 09-1 岩寨地堑凝灰岩											
wys09.1	102	132	2.2	0.775	0.0689	0.0033	0.1715	0.0086	0.0180	0.0002	115±1.6
wys09.2	85	110	1.8	0.771	0.0616	0.0052	0.1528	0.0127	0.0180	0.0003	115±1.8
wys09.3	329	265	4.5	1.243	0.0495	0.0022	0.1201	0.0056	0.0176	0.0002	112±1.3
wys09.4	136	157	2.7	0.866	0.0842	0.0036	0.2125	0.0095	0.0183	0.0002	117±1.5
wys09.5	114	132	2.1	0.863	0.0522	0.0035	0.1265	0.0087	0.0176	0.0002	112±1.5
wys09.6	119	141	2.5	0.842	0.1093	0.0050	0.2738	0.0121	0.0182	0.0003	116±1.7
wys09.7	129	146	2.4	0.886	0.0689	0.0030	0.1693	0.0077	0.0178	0.0003	114±1.6
wys09.8	104	126	2.1	0.826	0.0491	0.0042	0.1222	0.0105	0.0181	0.0003	115±1.6
wys09.9	164	144	2.4	1.139	0.0716	0.0042	0.1768	0.0109	0.0179	0.0002	114±1.5
wys09.10	126	124	2.2	1.013	0.0728	0.0047	0.1890	0.0127	0.0188	0.0003	120±1.7
wys09.11	171	151	2.4	1.134	0.0503	0.0028	0.1228	0.0069	0.0177	0.0002	113±1.5
wys09.12	207	166	2.7	1.243	0.0653	0.0029	0.1566	0.0073	0.0174	0.0002	111±1.3
ZJ66 老竹地堑凝灰岩											
zj66.1	57	66	1.2	0.859	0.0490	0.0029	0.1215	0.0073	0.0180	0.0003	115±1.7
zj66.2	51	73	1.5	0.697	0.0485	0.0069	0.1263	0.0158	0.0189	0.0003	120±1.8
zj66.3	44	65	1.4	0.675	0.0502	0.0064	0.1313	0.0164	0.0190	0.0003	121±1.9
zj66.4	46	84	1.6	0.543	0.0491	0.0046	0.1227	0.0115	0.0181	0.0002	116±1.5
zj66.5	46	58	1.2	0.795	0.0509	0.0044	0.1322	0.0112	0.0188	0.0003	120±2.2
zj66.6	65	81	1.5	0.797	0.0492	0.0018	0.1248	0.0046	0.0184	0.0002	117±1.5
zj66.7	40	63	1.2	0.633	0.0503	0.0048	0.1286	0.0117	0.0186	0.0003	119±1.8
zj66.8	37	62	1.1	0.588	0.0517	0.0069	0.1292	0.0171	0.0181	0.0003	116±2.0
zj66.9	62	84	1.6	0.734	0.0484	0.0057	0.1216	0.0141	0.0182	0.0003	116±1.6
zj66.10	44	78	1.5	0.567	0.0498	0.0059	0.1267	0.0147	0.0185	0.0002	118±1.6
zj66.11	76	91	1.8	0.834	0.0492	0.0040	0.1268	0.0102	0.0187	0.0002	119±1.5
zj66.12	28	52	0.9	0.540	0.0493	0.0030	0.1265	0.0075	0.0186	0.0003	119±2.1
zj66.13	31	61	1.2	0.514	0.0488	0.0053	0.1298	0.0136	0.0193	0.0003	123±2.0
zj66.14	37	63	1.2	0.596	0.0491	0.0080	0.1288	0.0204	0.0190	0.0003	122±1.9
zj66.15	47	67	1.1	0.704	0.0484	0.0037	0.1216	0.0096	0.0182	0.0003	116±2.2
zj66.16	50	66	1.2	0.768	0.0494	0.0055	0.1272	0.0141	0.0187	0.0003	119±2.0
zj66.17	69	80	1.4	0.862	0.0486	0.0043	0.1212	0.0106	0.0181	0.0003	115±1.9
zj66.18	62	73	1.4	0.851	0.0494	0.0055	0.1251	0.0135	0.0183	0.0003	117±1.6
zj66.19	42	60	1.0	0.706	0.0622	0.0055	0.1564	0.0140	0.0182	0.0004	117±2.2
zj66.20	51	64	1.1	0.791	0.0487	0.0053	0.1192	0.0128	0.0177	0.0003	113±1.7
zj66.21	82	95	1.9	0.866	0.0499	0.0114	0.1290	0.0283	0.0187	0.0002	120±1.5
zj66.22	61	64	1.2	0.942	0.0497	0.0068	0.1261	0.0167	0.0184	0.0004	118±2.5
ZJ90 岩寨地堑凝灰岩											
zj90.1	51	46	1.3	1.1154	0.0541	0.0075	0.1462	0.0240	0.0196	0.0007	125±4.2
zj90.2	173	190	4.5	0.9059	0.0530	0.0036	0.1373	0.0098	0.0188	0.0003	120±1.7
zj90.3	158	142	3.6	1.1122	0.0489	0.0026	0.1285	0.0080	0.0191	0.0003	122±1.9
zj90.4	146	148	4.1	0.9827	0.0488	0.0023	0.1337	0.0077	0.0199	0.0003	127±2.0
zj90.5	181	162	3.9	1.1185	0.0554	0.0019	0.1427	0.0056	0.0187	0.0002	119±1.2
zj90.6	208	223	5.2	0.9330	0.0527	0.0013	0.1340	0.0038	0.0184	0.0002	118±1.5
zj90.7	196	238	5.5	0.8244	0.0537	0.0015	0.1381	0.0045	0.0186	0.0002	119±1.2
zj90.8	144	118	3.5	1.2283	0.0503	0.0038	0.1410	0.0132	0.0203	0.0003	130±1.9
zj90.9	165	161	4.2	1.0248	0.0510	0.0017	0.1347	0.0050	0.0191	0.0003	122±1.8
zj90.10	340	150	4.7	2.2688	0.0564	0.0033	0.1450	0.0095	0.0187	0.0003	119±1.8
zj90.11	239	237	6.7	1.0063	0.0441	0.0014	0.1221	0.0055	0.0201	0.0003	128±1.9
zj90.12	244	191	4.9	1.2776	0.0500	0.0026	0.1284	0.0076	0.0186	0.0002	119±1.5
zj90.13	329	132	3.9	2.4927	0.0487	0.0023	0.1277	0.0069	0.0190	0.0002	121±1.6
zj90.14	111	69	2.1	1.6055	0.0538	0.0044	0.1413	0.0130	0.0190	0.0004	122±2.6
zj90.15	287	248	6.9	1.1551	0.0448	0.0030	0.1229	0.0104	0.0199	0.0004	127±2.6
zj90.16	52	110	2.6	0.4710	0.0481	0.0031	0.1336	0.0097	0.0202	0.0004	129±2.7
zj90.17	207	197	4.8	1.0509	0.0564	0.0015	0.1457	0.0044	0.0187	0.0002	120±1.1
zj90.18	234	203	5.2	1.1555	0.0462	0.0018	0.1207	0.0054	0.0189	0.0002	121±1.2
zj90.19	139	130	3.2	1.0691	0.0483	0.0031	0.1258	0.0091	0.0189	0.0003	121±1.7
zj90.20	107	128	2.9	0.8395	0.0518	0.0023	0.1357	0.0065	0.0190	0.0002	121±1.6

续表 1

点号	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Pb*/ 10^{-6}	Th/U	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	1 σ	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma
zj90.21	658	255	8.0	2.5841	0.0527	0.0015	0.1356	0.0045	0.0187	0.0002	119±1.2
zj90.22	261	224	6.4	1.1667	0.0511	0.0026	0.1409	0.0121	0.0200	0.0004	128±2.5
zj90.23	178	194	4.8	0.9183	0.0513	0.0020	0.1339	0.0061	0.0189	0.0002	121±1.2
zj90.24	171	145	4.2	1.1803	0.0472	0.0022	0.1305	0.0071	0.0200	0.0002	128±1.3
zj90.25	256	229	5.3	1.1179	0.0501	0.0014	0.1310	0.0040	0.0190	0.0002	121±1.5
zj90.26	91	66	2.5	1.3748	0.0506	0.0049	0.1408	0.0199	0.0202	0.0006	129±3.5
zj90.27	101	101	2.9	0.9952	0.0499	0.0033	0.1382	0.0117	0.0201	0.0004	128±2.7
zj90.28	241	99	3.3	2.4450	0.0452	0.0036	0.1251	0.0116	0.0201	0.0004	128±2.3
zj90.29	323	226	6.7	1.4320	0.0483	0.0013	0.1343	0.0050	0.0202	0.0003	129±1.7
zj90.30	131	132	3.7	0.9927	0.0447	0.0024	0.1244	0.0081	0.0202	0.0003	129±1.9
ZJ93 岩寨地堑凝灰岩											
zj93.1	1093	506	8.9	2.162	0.0496	0.0011	0.1175	0.0028	0.0172	0.0002	110±1.1
zj93.2	443	376	6.6	1.179	0.0498	0.0020	0.1214	0.0051	0.0177	0.0002	113±1.1
zj93.3	791	426	7.8	1.857	0.0489	0.0015	0.1158	0.0036	0.0172	0.0002	110±1.1
zj93.4	560	360	6.2	1.556	0.0497	0.0017	0.1176	0.0043	0.0172	0.0002	110±1.1
zj93.5	503	424	7.5	1.184	0.0485	0.0020	0.1156	0.0052	0.0173	0.0002	110±1.1
zj93.6	430	310	5.7	1.386	0.0493	0.0026	0.1190	0.0065	0.0175	0.0002	112±1.1
zj93.7	383	333	6.2	1.150	0.0489	0.0033	0.1199	0.0080	0.0178	0.0002	114±1.1
zj93.8	536	523	9.4	1.025	0.0498	0.0016	0.1213	0.0041	0.0177	0.0002	113±1.1
zj93.9	470	415	7.1	1.132	0.0486	0.0017	0.1187	0.0044	0.0177	0.0002	113±1.1
zj93.10	517	440	7.4	1.177	0.0495	0.0016	0.1197	0.0043	0.0175	0.0002	112±1.1
zj93.11	469	395	7.1	1.189	0.0494	0.0020	0.1207	0.0050	0.0177	0.0002	113±1.1
zj93.12	410	356	5.7	1.151	0.0532	0.0018	0.1283	0.0050	0.0175	0.0002	112±1.2
zj93.13	287	336	6.2	0.855	0.0494	0.0039	0.1219	0.0097	0.0179	0.0002	114±1.2
zj93.14	555	467	8.8	1.188	0.0491	0.0019	0.1189	0.0047	0.0176	0.0002	112±1.1
zj93.15	1133	552	11.0	2.054	0.0509	0.0017	0.1209	0.0041	0.0172	0.0002	110±1.1
zj93.16	313	203	3.9	1.540	0.0494	0.0031	0.1222	0.0076	0.0179	0.0002	115±1.4
zj93.17	323	292	4.9	1.107	0.0495	0.0015	0.1189	0.0038	0.0174	0.0002	111±1.1

注: Pb*表示放射性铅;普通铅校正采用 ^{206}Pb 校正法。

锆石进行了22个点的定年分析,这些点的Th含量为 $28\times 10^{-6}\sim 111\times 10^{-6}$,U含量为 $86\times 10^{-6}\sim 265\times 10^{-6}$,Th/U比值为0.51~1.12(表1)。所有测试点都位于谐和线上或附近,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为(118±1) Ma (MSWD=1.8)(图6-F),其代表了火山喷发的年龄。

样品ZJ90: 锆石多为柱状或长柱状,无色、透明、自形。长度为90~150 μm ,宽度为60~100 μm ,长宽比为1:1~2.5:1。在阴极发光照片(CL)中,锆石可见清晰的韵律震荡环带结构(图6-G),表明为典型的岩浆成因。本文共对30颗锆石进行了30个点的定年分析,这些点的Th含量为 $51\times 10^{-6}\sim 657\times 10^{-6}$,U含量为 $46\times 10^{-6}\sim 255\times 10^{-6}$,Th/U比值为0.47~2.58(表1)。所有分析结果都投影在谐和线上或附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(122±1) Ma (MSWD=3.3)(图6-H),其代表了火山喷发的年龄。

样品ZJ93: 锆石颗粒无色透明,晶型呈自形-半自形的柱状或长柱状。长度为100~200 μm ,宽度为60~120 μm ,长宽比为1:1~3:1。在阴极发光照片(CL)中,锆石具典型的韵律震荡环带结构(图6-I),表明为岩浆成因。本次共对17颗锆石进行了17个点的定年分析,Th含量为 $50\times 10^{-6}\sim 1133\times 10^{-6}$,U含

量为 $56\times 10^{-6}\sim 716\times 10^{-6}$,Th/U比值为0.85~2.51(表1)。所有点的分析结果位于谐和线上或附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(112±1) Ma (MSWD=1.9)(图6-J),代表了火山喷发的年龄。

4.3 盆地地层对比

盆地地层对比不仅是关联不同盆地间沉积-构造演化过程的重要基础,更是重建区域大地构造演化过程的关键。本文资料表明,丽水盆地内的火山-沉积岩石序列可划分为3个主要岩石地层单元:火山岩套(K_{IV}),馆头-朝川组($K_{Ig}-K_{Ic}$),方岩组(K_{If})。综合区域同位素年代学和地层资料^[16],本研究重新梳理了这些岩石地层单元与其他盆地火山-沉积岩石序列之间的关系(图7)。

火山岩套(K_{IV})位于丽水盆地底部,在整个东南沿海分布极其广泛,厚度极大,区域上称之为“磨石山群”,系浙江省石油地质大队1959年所创建,以酸性、中酸性火山岩为主,主要由灰色熔结凝灰岩和紫色流纹岩组成,局部保留有气孔构造,所含生物化石包括孢粉、轮藻、介形类、叶肢介、双壳类、腹足类、昆虫、鱼类、爬行类等^[30-31],与浙西北地区“建德群”相当^[32]。早期基于古生物对比结果,将这一岩石单元定为晚侏罗世^[33]。最近,Li et al.(2014)^[16]对永

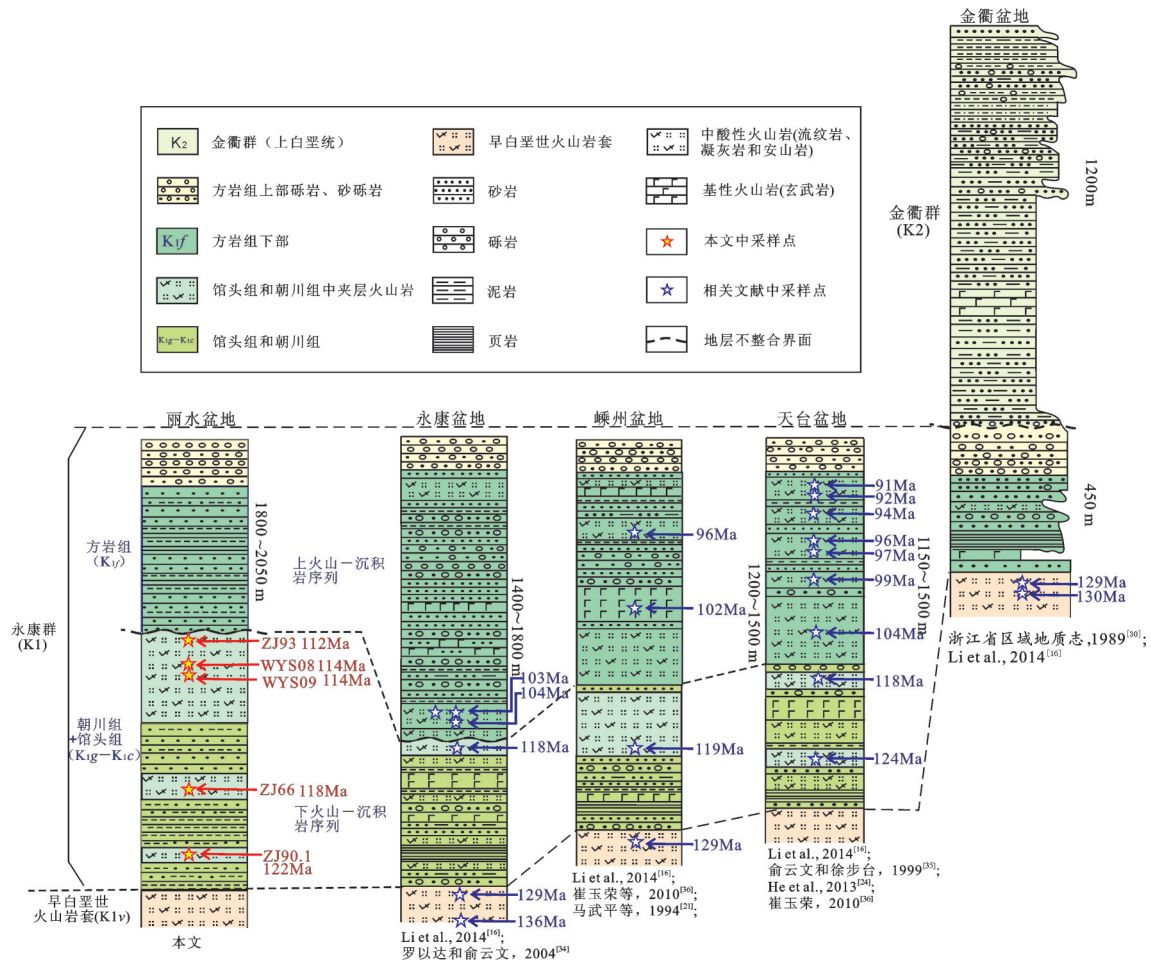


图7 华南东部白垩纪火山岩盆地地层柱状对比图

Fig.7 Regional comparisons between stratigraphic columns of the Lishui, Yongkang, Shengzhou, Tiantai and Qinqu basins in eastern South China

康、嵊州和金衢盆地底部的火山岩套进行了锆石 U-Pb 定年,结果表明,这些火山岩喷发的时代为早白垩世,喷发年龄在 136~129 Ma (图 7)。

馆头-朝川组(K_{1g}-K_{1c})代表了丽水盆地的主体沉积-火山地层单元,出露较广(图 3)。老竹地堑朝川组 1 个凝灰岩样品(Zj66)的锆石 U-Pb 定年结果表明,其下部馆头组含细砾砂岩层的沉积上限为 118 Ma(图 7)。岩寨地堑内 4 个凝灰岩样品的锆石 U-Pb 定年结果表明,馆头-朝川组火山-沉积地层序列的时代大致为 122~112 Ma(图 7)。区域上,浙江火山岩盆地群内的地层可划分为上、下火山-沉积序列两个岩石单元^[21,34-35]。锆石 U-Pb 定年结果显示,永康、嵊州和天台盆地的下火山-沉积序列中的凝灰岩分别形成于 118 Ma, 119 Ma 和 124~118 Ma,上火山-沉积序列中的凝灰岩和玄武岩分别形

成于 104~103 Ma, 102~96 Ma 和 104~91 Ma^[16,24,36]。对比分析可知,丽水盆地的馆头-朝川组(K_{1g}-K_{1c})与永康、嵊州和天台盆地的下火山-沉积序列相当;而碧湖断裂西侧方岩组下部的紫红色砂质砾岩层则与永康、天台和嵊州盆地的上火山-沉积序列相当,沉积时代为 104~91 Ma(图 7)。

综上所述,浙江地区火山岩盆地内的早白垩世火山-沉积序列可分为上、下 2 个组合:下组合以含细砾砂岩、油页岩、球泡流纹岩等为主,包括了原来的馆头组和朝川组,主要出露在丽水盆地、永康盆地、新昌盆地、天台盆地西缘等,火山喷发时代在 124~112 Ma;上组合以砂砾岩为主夹多层火山岩,即方岩组,主要发育在碧湖地堑、天台盆地、嵊州盆地等,其中的火山岩喷发年龄在 104~91 Ma。方岩组上部的砾岩代表上组合的顶部地层,其沉积时代

最晚,在丽水盆地以北的永康盆地、嵊州盆地、天台盆地和金衢盆地均有发育,是盆地间地层对比的标志层位(图7)。

5 构造变形分析和古构造应力场反演

5.1 古构造应力场反演方法和原理

地壳在某一特定演化阶段,古构造应力场的方向是稳定的,且具有区域一致性;因此,可通过古构造应力场的反演来约束某一特定区域的构造变形和演化历史^[37-38]。常用的古构造应力场反演的方法是测量断层面及其上的滑动矢量^[39-41]。为建立丽水盆地古构造应力场演化序列,本文在对野外露头点断裂变形几何学和运动学观察的基础上,系统测量了不同地层单元中发育的断层面及擦痕,并利用构造指向标志,如新生的石英和方解石生长矿物、阶步、羽列剪节理和吕德尔面等,判断断层的运动方向。为保证反演结果的真实客观,采用不同形态的

箭头进行了可信度分类:实心箭头,可信度较高;空心箭头,可信度较低(图3-A)。同时,借助断层或擦痕的切割关系,梳理了古构造应力场的活动期次,进一步约束区域构造变形事件的演化序列。本次研究采用了法国南巴黎大学开发的反演软件FAULT来计算各观测点的三轴主应力方向^[39-40]。详细的断层滑动矢量分析过程及古构造应力场反演原理请参阅文献[42]。

5.2 断层运动学分析和构造应力场反演结果

本文利用吴氏网下半球投影方法将断层滑动矢量投影在图3-A中(弧线,代表断层面;箭头,代表擦痕,其指示了断层上盘的运动方向)。基于野外观测和软件反演结果,本文建立了丽水盆地四期古构造应力场,分别为:NW-SE向伸展,NW-SE向挤压和N-S向伸展,NE-SW向挤压。

NW-SE伸展应力场主要被NE-NNE走向正断层所记录(图8-A),这些断层控制了盆地的初始张开和永康群的充填,它们大部分倾角中等(40°~

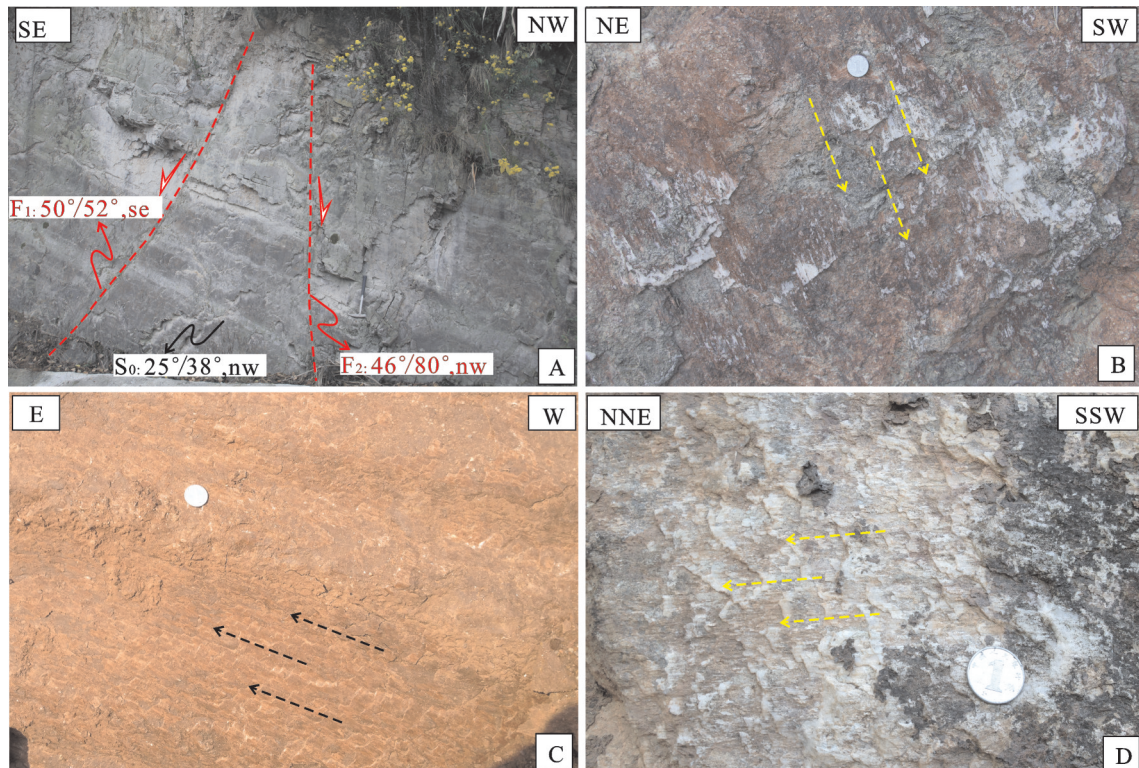


图8 丽水盆地野外构造变形照片

A—盆地内正断层(F_1, F_2)产状与地层(S_0)产状; B,C,D—断层面上发育的擦痕(箭头指向代表对盘运动方向)

Fig. 8 Field views showing structure styles of the Lishui Basin

A—Field view of the NE-trending normal faults (F_1, F_2) and the attitude of strata (S_0) in the Lishui basin; B,C,D—Field view of the striations on faults (the arrows point to the direction of the other side of the fault)

60°), 断层面上擦痕的侧伏角较大(>70°) (图 8-B)。断层滑动矢量测量点共计 5 个(Zj89a, Zj96, Zj92, Zj4, 和 Zj91a), 测得擦痕 27 组(表 2), 获得三轴主应力分布为: 最小主应力轴(σ_3)近水平, 其极密区位于 318°/12°; 中间主应力轴(σ_2)近水平, 走向 NE-SW; 最大主应力轴(σ_1)近垂直(图 3-C)。

NW-SE 挤压应力场主要被共轭的 N-S 向左行断层和 NW-SEE 向右行断层所记录, 断层大部分倾角较陡(>60°), 擦痕侧伏角较小(<20°) (图 8-C)。断层滑动矢量测量点共计 5 个(Zj95a, Zj90, Zj97a, Zj99a, 和 Zj102a), 测得擦痕 46 组(表 2), 获得三轴主应力分布为: 最大主应力轴(σ_1)近水平, 其极密区位于 143°/12°; 中间主应力轴(σ_2)近垂直; 最小主应力轴(σ_3)为 NE 走向, 近水平(图 3-C)。

N-S 伸展应力场主要被 E-W 走向正断层记录, 如碧湖地堑北缘的花街断裂, 这些断层大部分倾角中等—陡(50~80°), 断层面上擦痕的侧伏角较大(>70°)。断层滑动矢量测量点共计 7 个(Zj100, Zj91b, Zj94, Zj99b, Zj95b, Zj97 和 Zj101a), 测得擦

痕 51 组(表 2), 获得三轴主应力分布为: 最小主应力轴(σ_3)近水平, 其极密区位于 0°/12°; 中间主应力轴(σ_2)近水平, 走向 E-W; 最大主应力轴(σ_1)近垂直(图 3-C)。

NE-SW 挤压应力场主要被共轭的 N-S 向右行断层和 E-W 向左行断层所记录, 断层大部分倾角较陡(>60°), 擦痕侧伏角较小(<20°) (图 8-D)。断层滑动矢量测量点共计 4 个(Zj101b, Zj99c, Zj89b 和 Zj102b), 测得擦痕 40 组(表 2), 获得三轴主应力分布为: 最大主应力轴(σ_1)近水平, 其极密区位于 257°/48°; 中间主应力轴(σ_2)近垂直; 最小主应力轴(σ_3)近水平, 为 NW-SE 走向(图 3-C)。

6 讨论: 丽水盆地早白垩世盆地沉积-构造演化及动力学机制

锆石 U-Pb 测年结果表明, 华南东部大规模火山喷发集中在 136~129 Ma, 构成了白垩纪盆地群下部火山岩套(K_{iv}, 即“磨石山群”)的主体^[6]。这期巨量的火山作用导致了浙闽火山弧的形成, 其记录了

表 2 丽水盆地断层滑动矢量与构造应力场反演结果

Table 2 Results of fault-slip analysis and calculated stress fields dominating the formation and development of the Lishui Basin

位置	岩性	擦痕数	σ_1 (az/pl)	σ_2 (az/pl)	σ_3 (az/pl)	$R=(\sigma_2-\sigma_1)/$ $(\sigma_3-\sigma_1)$	构造应力场
Zj89b2	砂岩(永康群)	5	255°/45°	105°/40°	2°/15°	0.87	NE-SW 挤压
Zj99c	火山岩(早白垩世)	19	82°/28°	227°/56°	343°/16°	0.655	
Zj101b	砾岩(永康群)	11	259°/14°	358°/32°	148°/53°	0.873	
Zj102b2	火山岩(早白垩世)	5	264°/2°	5°/78°	174°/10°	0.383	
Zj91b	砂岩(永康群)	8	51°/84°	282°/3°	192°/4°	0.83	N-S 伸展
Zj94	火山岩(早白垩世)	16	355°/78°	96°/2°	186°/11°	0.496	
Zj95b	砂岩(永康群)	5	46°/51°	314°/1°	222°/38°	0.455	
Zj97b	火山岩(早白垩世)	6	157°/77°	268°/4°	359°/11°	0.496	
Zj99b	火山岩(早白垩世)	5	8°/77°	257°/4°	166°/11°	0.141	
Zj100	粉砂岩(永康群)	5	169°/77°	270°/2°	1°/12°	0.558	
Zj101a	砾岩(永康群)	7	184°/73°	88°/2°	357°/16°	0.676	
Zj90	火山岩(早白垩世)	6	143°/9°	27°/69°	236°/18°	0.823	NW-SE 挤压
Zj95a	砂岩(永康群)	6	141°/19°	349°/68°	234°/9°	0.968	
Zj97a	火山岩(早白垩世)	9	313°/0°	44°/14°	220°/75°	0.716	
Zj99a	火山岩(早白垩世)	15	120°/2°	215°/61°	28°/28°	0.725	
Zj102a	火山岩(早白垩世)	6	134°/42°	340°/44°	237°/13°	0.875	
Zj4	砾岩(永康群)	4	62°/59°	262°/28°	167°/8°	0.622	
Zj89a	砂岩(永康群)	5	91°/69°	197°/5°	289°/19°	0.388	
Zj91a	砂岩(永康群)	6	85°/62°	292°/24°	191°/11°	0.847	
Zj92	火山岩(早白垩世)	5	114°/71°	222°/6°	314°/17°	0.525	
Zj96	泥岩(永康群)	7	81°/64°	226°/21°	322°/13°	0.683	

注: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别表示最大、中间和最小主应力轴方位; az、pl 分别表示倾伏向、倾伏角。

古太平洋俯冲洋壳的后退和弧后扩张作用^[13]。

在火山岩套(K_v)的上部,丽水盆地内部的早白垩世火山-沉积序列可分为上、下2个岩石组合,即馆头-朝川组和方岩组,区分这2套岩石组合的沉积-构造接触关系是理解丽水盆地早白垩世构造演化的基础。在碧湖地堑西部,馆头-朝川组与方岩组沿碧湖断裂呈正断层接触关系;在老竹地堑,方岩组砾岩不整合覆盖在朝川组火山岩上(图5)。这些接触关系表明,这两套火山-沉积岩石组合的形成与两期独立的伸展事件相关,而两个岩石组合之间对应一个重要的地层界面,代表构造事件转换界面。在地层对比分析的基础上,根据本文获得的火山岩年龄和古构造应力场数据,并结合天台、嵊州和永康盆地的沉积和变形资料^[16,23,34],笔者认为丽水盆地早白垩世共经历了两个伸展-挤压旋回的构造演化过程。I期伸展-挤压构造旋回发生于124~112 Ma,古构造应力场以NW-SE伸展和相继出现的NW-SE挤压为主。前者导致火山岩盆地初始张开,控制了馆头组和朝川组的沉积,奠定了火山岩盆地的雏形格局;后者导致盆地构造反转,下白垩统普遍倾掀和褶皱。II期伸展-挤压构造旋回发生于104~91 Ma,其古构造应力场方向与I期很难区分,仍以NW-SE伸展和NW-SE挤压为主。前者导致丽水盆地沿碧湖断裂再次发生伸展断陷,并控制了方岩组的沉积,形成碧湖断裂上盘方岩组和下盘朝川组的正断层接触关系,并奠定了断裂西部凹地和东部丘陵山区的截然地貌边界。后者导致区域再次发生构造反转,下白垩统广泛褶皱,并在金衢盆地形成了方岩组与晚白垩世金衢群之间的角度不整合接触关系^[16]。

本文在丽水盆地识别出的NW-SE向地壳伸展事件具有区域意义,其影响波及整个华南大陆,导致大规模断陷盆地(大约85 490 km²)和伸展穹隆构造的形成^[4,7,43],并诱发了巨量的岩浆侵入和火山活动(大约139 920 km²)^[6,13]。这期伸展的应力场方向与古太平洋板块早白垩世的NW俯冲方向一致^[44-45],暗示二者之间存在必然的联系。因此,本文认为这期伸展作用可能与古太平洋板块俯冲过程中因俯冲板片后撤(roll-back)诱发的弧后扩张作用有关。这一解释与华南白垩纪岩浆岩省的时空展布规律和地球化学特征相符:(1)岩浆岩带呈北东走向展布,且岩浆

岩年龄从内陆至沿海逐渐变年轻^[6];(2)岩浆岩具明显岛弧特征^[13];(3)从内陆至沿海,岩浆岩的 T_{CD}^M 模式年龄逐渐变年轻,而 $e_{Nd(t)}$ 值逐渐增高^[9,11,12]。

伸展-挤压事件的幕式交替反映了弧后扩张过程中复杂的深部动力学背景。早白垩世NW-SE向挤压事件不仅影响了丽水盆地,其中下扬子、东南沿海和大别山等地区均有记录,造成华南下白垩统普遍倾掀,形成上、下白垩统之间角度不整合面^[4,15],并诱发长乐-南澳带发生左行走滑^[46,47]。同时,挤压作用终止了与伸展相关的岩浆活动,导致110~100 Ma岩浆活动宁静期的出现^[15]。这期挤压事件的动力学机制可能与(1)古太平洋板块俯冲角度由陡向缓变化,或(2)菲律宾微板块与亚洲大陆的碰撞作用有关^[15,48]。

7 结 论

本文对丽水盆地内凝灰岩样品进行了LA-MC-ICPMS 锆石U-Pb定年,并结合区域沉积-构造接触关系,将盆地内早白垩世火山-沉积序列分为上、下2个组合:下火山-沉积组合包括馆头组和朝川组,其形成时代在124~112 Ma;上火山-沉积组合以方岩组为代表,其时代在104~91 Ma。这两套岩石组合的形成记录了盆地两期伸展断陷事件。结合区域构造变形和古构造应力场资料,本文认为丽水盆地早白垩世经历了两个伸展-挤压旋回的构造演化过程,每一旋回的古构造应力场均以NW-SE伸展和NW-SE挤压的交替出现为典型特征。NW-SE伸展事件控制了盆地的初始张开、断陷和沉积物充填作用,其动力学背景与古太平洋板块俯冲过程中因俯冲板片后撤(roll-back)诱发的弧后扩张作用有关。NW-SE挤压事件导致盆地的构造反转,下白垩统普遍褶皱,并形成区域角度不整合面,这期事件与俯冲板片的几何学变化或大陆碰撞的远程效应有关。

参考文献(References):

- [1] McKenzie D. Active tectonics of Mediterranean region[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1972, 30: 109-185.
- [2] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision[J]. Science, 1975, 189: 419-426.
- [3] Ren J, Kensaku T, Lim S, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting

- and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 2002, 344: 175–205.
- [4] Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, et al. Late Mesozoic–Early Cenozoic deformation history of the Yuanma Basin, central South China[J]. *Tectonophysics*, 2012, 570–571: 163–183.
- [5] 吴根耀. 白垩纪: 中国及邻区板块构造演化的一个重要变换期[J]. *中国地质*, 2006, 33(1): 64–77.
Wu Genyao. Cretaceous: A key transition period of the plate tectonic evolution in China and its adjacent areas[J]. *Geology in China*, 2006, 33(1): 64–77 (in Chinese with English abstract).
- [6] Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 2006, 29: 26–33.
- [7] Shu L S, Zhou X M, Deng P, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Southeast China Block: New insights from basin analysis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34: 376–391.
- [8] Gilder S A, Keller G R, Luo M, et al. Eastern Asia and the western Pacific timing and spatial distribution of rifting in China[J]. *Tectonophysics*, 1991, 197: 225–243.
- [9] Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 16137–16154.
- [10] Li Zhengxiang, Li, Xianhua. Formation of the 1300–km–wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat–slab subduction model[J]. *Geology*, 2007, 35: 179–182.
- [11] Jahn B M, Chen P Y, Yen T P. Rb–Sr ages of granitic rocks in southeastern China and their tectonic significance[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1976, 87(5): 763–776.
- [12] Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*, 1998, 284(1/2): 101–133.
- [13] Zhou Xinmin, Li Wuxian. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 2000, 326: 269–287.
- [14] Li Xianhua. Cretaceous magmatism and lithosphere extension in southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18: 293–305.
- [15] Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, et al. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis[J]. *Earth–Science Reviews*, 2014, 134: 98–136.
- [16] Li Jianhua, Ma Zhili, Zhang Yueqiao, et al. Tectonic evolution of Cretaceous extensional basins in Zhejiang Province, eastern South China: Structural and geochronological constraints[J]. *International Geology Review*, 2014, 56(13): 1602–1629.
- [17] Liu Q, Yu J H, Wang Q, et al. Ages and geochemistry of granites in the Pingtan–Dongshan Metamorphic Belt, Coastal South China: New constraints on late Mesozoic magmatic evolution[J]. *Lithos*, 2012, 150: 268–286.
- [18] 汪建国, 余盛强, 胡艳华, 等. 江山—绍兴结合带榴闪岩的发现及岩石学、年代学特征[J]. *中国地质*, 2014, 41(4): 1356–1363.
Wang Jianguo, Yu Shengqiang, Hu Yanhua, et al. The discovery, petrology and geochronology of the retrograde eclogite in Jiangshan–Shaoxing suture zone[J]. *Geology in China*, 2014, 41(4): 1356–1363(in Chinese with English abstract).
- [19] Jiang Y H, Zhao P, Zhou Q, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S– and A–type granites in the northwest of the Gan–Hang rift, SE China[J]. *Lithos*, 2011, 121: 55–73.
- [20] 罗来, 向芳, 田馨, 等. 浙江丽水老竹盆地白垩系沉积特征及沉积环境[J]. *沉积与特提斯地质*, 2010, 30(2): 19–25.
Luo Lai, Xiang Fang, Tian Xin, et al. Sedimentary characteristics and environments of the Cretaceous deposits from the Laozhu Basin, Lishui Zhejiang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2010, 30(2): 19–25 (in Chinese with English abstract).
- [21] 马武平. 论浙江中生代晚期地层划分[J]. *地层学杂志*, 1994, 18(2): 91–101.
Ma Wuping. Division of the Late Mesozoic strata in Zhejiang[J]. *Journal of Stratigraphy*, 1994, 18(2): 91–101 (in Chinese with English abstract).
- [22] 马武平. 浙江省中生代晚期地层多重划分对比新认识[J]. *中国区域地质*, 1997, 16(2): 12–18.
Ma Wuping. New ideas about the stratigraphic division of the late Mesozoic in Zhejiang[J]. *Regional Geology of China*, 1997, 16(2): 12–18 (in Chinese with English abstract).
- [23] 蔡正全, 俞云文. 浙江白垩系上部地层的划分与对比[J]. *地层学杂志*, 2001, 25(4): 259–266.
Cai Zhengquan, Yu Yunwen. Subdivision and correlation of the upper beds of the Cretaceous system in Zhejiang[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2001, 25(4): 259–266 (in Chinese with English abstract).
- [24] He H Y, Wang X L, Wang Q, et al. SIMS zircon U–Pb dating of the Late Cretaceous dinosaur egg–bearing red deposits in the Tiantai Basin, southeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 62: 654–661.
- [25] 俞云文, 金幸生, 邬祥林, 等. 浙江恐龙和蛋化石的时代[J]. *中国地质*, 2010, 37(1): 94–100.
Yu Yunwen, Jin Xingsheng, Wu Xianglin, et al. The epochs of dinosaurs and fossil eggs from Zhejiang Province[J]. *Geology in China*, 2010, 37(1): 94–100(in Chinese with English abstract).
- [26] 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA–MC–ICP–MS)测定锆石 U–Pb 同位素年龄的研究[J]. *矿物学报*, 2009, (增刊): 600–601.
Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, et al. A new study on using LA–MC–ICP–MS method to date zircon U–Pb isotopic age[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, (supp): 600–601 (in Chinese with English abstract).

- [27] Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-north China orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1&2): 537-571.
- [28] Ludwig K R. ISOPLLOT 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003.
- [29] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [30] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 166-188.
Zhejiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of the Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 166-188 (in Chinese).
- [31] 汪庆华. 试论浙江建德群和磨石山群时代[J]. *火山地质与矿产*, 2001, 22(3): 163-169.
Wang Qinghua. Discussion of ages of the Jiande Group and the Moshishan Group in Zhejiang[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 2001, 22(3): 163-169 (in Chinese with English abstract).
- [32] 刘季辰, 赵亚曾. 浙江西部之地质[R]. *地质汇报*, 1927: 9.
Liu Jichen, Zhao Yazeng. Geology of Western Zhejiang [R]. Geological Report, 1927: 9 (in Chinese).
- [33] 顾知微. 中国侏罗纪地层对比表及说明书[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 223-240.
Gu Zhiwei. Stratigraphic Correlation and Description of the Jurassic Strata in China[M]. Beijing: Science Press, 1982: 223-240 (in Chinese).
- [34] 罗以达, 俞云文. 试论永康群时代及区域地层对比[J]. *中国地质*, 2004, 31(4): 395-399.
Luo Yida, Yu Yunwen. Age of the Yongkang Group and regional stratigraphic correlation[J]. *Geology in China*, 2004, 31(4): 395-399 (in Chinese with English abstract).
- [35] 俞云文, 徐步台. 浙江中生代晚期火山-沉积岩系层序和时代[J]. *地层学杂志*, 1999, 23(2): 58-67.
Yu Yunwen, Xu Butai. Stratigraphical sequence and geochronology of the upper Mesozoic volcano-sedimentary rock series in Zhejiang[J]. *Journal of Stratigraphy*, 1999, 23(2): 58-67 (in Chinese with English abstract).
- [36] 崔玉荣, 谢智, 陈江峰, 等. 浙东晚中生代玄武岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *高校地质学报*, 2010, 16(2): 198-212.
Cui Yurong, Xie Zhi, Chen Jiangfeng, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Late Mesozoic basalts in eastern Zhejiang Province and its geological significance [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(2), 198-212 (in Chinese with English abstract).
- [37] Mercier J L, Armijo R, Tapponnier P, et al. Change from Late Tertiary compression to Quaternary extension in southern Tibet during the India-Asia collision[J]. *Tectonics*, 1987, 6 (3): 275-304.
- [38] Mercier J L, Sorel D, Simeakis K. Changes of the state of stress in the overriding plate of a subduction zone: The Aegean arc from the Pliocene to the Present[J]. *Ann. Tecton.*, 1987, 1(1): 20-39.
- [39] Carey E. Recherche des directions principales de contraintes associées au jeu d'une population de failles[J]. *Revue de géologie dynamique et de Géographie Physique*, 1979, 21: 57-66.
- [40] Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89: 5835-5848.
- [41] Gapais D, Cobbold P R, Bourgeois O, et al. Tectonic significance of fault-slip data[J]. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22: 881-888.
- [42] Sperner B, Zweigel P. A plea for more caution in fault-slip analysis[J]. *Tectonophysics*, 2010, 482: 29-41.
- [43] Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, et al. The Hengshan low angle normal fault zone: structural and geochronological constraints on the Late Mesozoic crustal extension in South China[J]. *Tectonophysics*, 2013, 606: 97-115.
- [44] Engebretson D, Cox A, Gordon R G. Relative plate motions between ocean and continental plates in the Pacific basin[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 1985, 206: 1-59.
- [45] Maruyama S, Seno T. Orogeny and relative plate motions: example of the Japanese Islands[J]. *Tectonophysics*, 1986, 127: 305-329.
- [46] Charvet J, Faure M, Xu J W, et al. La zone tectonique de Changle-Nanao, Chine du sud-est[J]. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 1990, 310(2): 1271-1278.
- [47] 崔建军, 张岳桥, 董树文, 等. 华南陆缘晚中生代造山及其地质意义[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 86-105.
Cui Jianjun, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, et al. Late Mesozoic orogenesis along the coast of Southeast China and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 86-105 (in Chinese with English abstract).
- [48] Charvet J, Lapierre H, Yu Yunwen. Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of southeastern China[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*[J], 1994, 9 (4): 387-396.