

https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.244



## 东海丽水凹陷早新生代沉积特征及物源演化

刘正华<sup>1</sup>, 侯元立<sup>2</sup>, 陈淑慧<sup>3</sup>, 廖凯飞<sup>2,4</sup>, 邵磊<sup>2</sup>, 朱伟林<sup>2</sup>

1. 上海自然博物馆(上海科技馆分馆), 上海 200041
2. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092
3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳 518054
4. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030

**摘要:** 东海陆架盆地新生代发育大型弧后盆地, 接受了海相及陆相沉积, 油气资源丰富, 勘探前景广阔。其中, 丽水凹陷发育了古新统-始新统扇三角洲、河流三角洲及滨浅海相沉积, 其沉积环境及沉积物源研究一直存在争议。通过古生物学和碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系综合分析, 对丽水凹陷古新统-始新统沉积环境及潜在源区进行系统的源汇对比研究。结果表明, 丽水凹陷古新统及下中始新统以滨浅海相为特征, 凹陷东侧海水较深, 沉积物主要来自周边燕山期岩浆岩古隆起。然而, 凹陷东、西次凹在沉积物源上存在明显差异, 西次凹沉积物锆石 U-Pb 年龄谱系仅发育燕山期单峰, 东次凹还存在明显的印支期物源; 特别是进入始新世, 东次凹温州组物源发生明显改变, 出现大量古老锆石, 沉积物来自北部渔山低隆起, 显示该时期在凹陷北侧发育较大规模的三角洲沉积。晚始新世, 由于玉泉运动, 丽水凹陷发生隆升剥蚀, 直到中新世再次接受沉积。丽水凹陷古新统-始新统以海陆过渡环境为主, 有利于烃源岩及储集体的发育, 具有良好的油气勘探潜力。

**关键词:** 东海; 丽水凹陷; 沉积环境; 物源; 锆石定年; 石油地质学。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2022)07-2562-11

收稿日期: 2022-05-27

## Early Cenozoic Sedimentary Characteristics and Provenance Evolution of Lishui Depression, East China Sea

Liu Zhenghua<sup>1</sup>, Hou Yuanli<sup>2</sup>, Chen Shuhui<sup>3</sup>, Liao Kaifei<sup>2,4</sup>, Shao Lei<sup>2</sup>, Zhu Weilin<sup>2</sup>

1. Shanghai Natural History Museum (Branch of Shanghai Science and Technology Museum), Shanghai 200041, China
2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China
3. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen 518054, China
4. Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200030, China

**Abstract:** The East China Sea Shelf Basin generated a series of back-arc basins with thick successions of marine- and terrestrial-facies sediments during Cenozoic. It is enriched with abundant oil and gas resources and is of great significance to the petroleum exploration undertakings. Therein, the Lishui Depression formed fan delta, fluvial delta and littoral-to-neritic facies sediments during Paleocene-Eocene, and the research on its sedimentary environment and sediment source has been controversial. Combining detrital zircon U-Pb age spectra patterns with paleontological assemblages, a source-to-sink comparative analysis was conducted to restore the sedimentary environment and provenance evolution of the Lishui Depression during Paleocene-Eocene. In

**基金项目:** 国家科技重大计划(No. 2018YFE0202400); 国家自然科学基金项目(Nos.42076066, 92055203)。

**作者简介:** 刘正华(1978-), 女, 助理研究员, 博士, 从事油气成藏、沉积学和地球化学研究。ORCID: 0000-0001-9839-1967. E-mail: liuzhtongji@tongji.edu.cn

**引用格式:** 刘正华, 侯元立, 陈淑慧, 廖凯飞, 邵磊, 朱伟林, 2022. 东海丽水凹陷早新生代沉积特征及物源演化. 地球科学, 47(7): 2562-2572.

**Citation:** Liu Zhenghua, Hou Yuanli, Chen Shuhui, Liao Kaifei, Shao Lei, Zhu Weilin, 2022. Early Cenozoic Sedimentary Characteristics and Provenance Evolution of Lishui Depression, East China Sea. *Earth Science*, 47(7): 2562-2572.

general, the Lishui Depression was dominated by littoral and neritic-facies environment during this time, corroborated by large abundance of benthic foraminifera, calcareous nanofossils and dinoflagellates. In addition, the eastern basin was featured with deeper water depths. The Lishui Depression was mainly influenced from the surrounding paleo-uplifts of Yanshanian magmatic rocks. However, its eastern area partly shows Indosinian populations compared to the dominance of Yanshanian clusters in the west. In particular, the Eocene Wenzhou sediments are characterized by increasingly plentiful Precambrian zircons in addition to the large Indosinian-Yanshanian peaks, indicating a possible impact from the Yushan Low Uplift to the east. Therefore, it is likely that the eastern Lishui Depression generated large river systems as well as deltas during this time. Due to the Yuquan Movement, the Lishui Depression experienced uplifting and exhumation in the late stage of the Late Eocene and sediments had not been deposited until Miocene. With transitional-facies depositions of Paleocene-Eocene, the Lishui Depression has great potential for source rock and oil-gas reservoir accumulation.

**Key words:** East China Sea; Lishui Depression; sedimentary environment; provenance; zircon dating; petroleum geology.

## 0 引言

东海陆架盆地紧邻我国经济发达的长三角地区,发育了巨厚的中-新生代沉积,累计最大厚度超  $2 \times 10^4$  m,具有良好的油气勘探前景。然而,由于中-新生代复杂的板块俯冲拼合过程(Li and Li, 2007; 李家彪等, 2017; 李三忠等, 2018; Cui *et al.*, 2021),造成盆地-造山带发生多次纵向、横向迁移,使盆地发育背景、类型及沉积充填过程存在很大争议。

新生代以来,西太平洋大陆边缘的性质从安第斯型逐渐转化为西太平洋型,亚洲大陆东部因张裂作用开始解体(李三忠等, 2018; 任建业, 2018; Cui *et al.*, 2019; Shao *et al.*, 2019)。东海陆架盆地受太平洋板块俯冲后撤作用影响,发生自西向东的迁移演变,盆内挤压背景下的构造反转也自西向东发生迁移,使东海陆架盆地呈明显的东西分带(周祖翼等, 2002; 张功成等, 2011; Zhang *et al.*, 2016; 蒋一鸣等, 2020);自西向东可分为台北拗陷、舟山隆起和浙东拗陷,沉积地层具有西薄东厚的特点(蒋一鸣等, 2020; 刘金水等, 2020)。

沉积地层是盆地构造演化的直接产物,记录了盆地发育过程的重要信息(邵磊等, 2009, 2019; 崔宇驰等, 2018)。沉积环境及物源恢复是沉积盆地研究中的核心内容(Meng *et al.*, 2021),锆石 U-Pb 年龄谱系分析成为沉积物源区域判断的有效方法,得到广泛应用(张连祥等, 2021)。已有的沉积物源研究成果表明,位于台北拗陷的丽水-椒江凹陷古新世为典型的近物源、多物源,源区为断陷盆地周缘隆起,主体为中生代岩浆岩(唐贤君等, 2018; 蒋一鸣等, 2020);位于浙东拗陷的西湖凹陷砂岩成分成熟度较高(刘金水等, 2020),  $>1\ 000$  Ma 的锆石组

分占明显优势,应存在长距离搬运,但对其形成过程及源区范围争议较大,存在内部凸起、华北-朝鲜半岛及长江等多种观点(Kwon and Boggs, 2002; 秦兰芝等, 2017; Wang *et al.*, 2018)。

本文以丽水凹陷为重点,采用微体古生物及碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系分析的方法,针对东海陆架盆地台北拗陷古新-始新世沉积环境及物源演变开展研究,揭示凹陷沉积充填过程及其控制因素,为该地区油气资源勘探提供参考依据。

## 1 地质背景

丽水凹陷位于东海陆架盆地台北拗陷西南部(图1),西邻闽浙隆起区,东北经椒江凹陷、钱塘凹陷与海礁隆起相连,东界经福州、闽江凹陷与渔山低隆起相邻;是在中生代残留盆地基底上由拉张断陷形成的新生代单断箕状凹陷,总体表现为东断西超,盆地西部边缘坡度较缓。盆地内部被中央潜山-披覆构造带分割为东、西两个次凹,面积大约为  $1\ 500$  km<sup>2</sup>。

丽水凹陷新生代早期主要接受了古新统及中、下始新统沉积,缺失上始新统平湖组及渐新统花港组,中始新统与上覆中新统呈不整合接触(郭真等, 2015; 钟锴等, 2018)(图2)。下古新统月桂峰组为湖泊相沉积环境,与下伏中生界呈角度不整合接触,以暗褐色、黑褐色泥岩为主,夹浅灰色、灰白色细-中粒砂岩及黑色煤层;上古新统灵峰组为海相灰色-深灰色泥岩、灰白色粉砂岩和砂岩;上古新统明月峰组是一套海退环境的含煤岩系,由下细上粗的2个反旋回迭加而成,砂岩粒度由粉砂向上渐变为粗砂,顶部夹多层黑色煤层;下始新统瓯江组下部以灰白色、灰色细-中粒砂岩为主,夹灰色、褐色泥

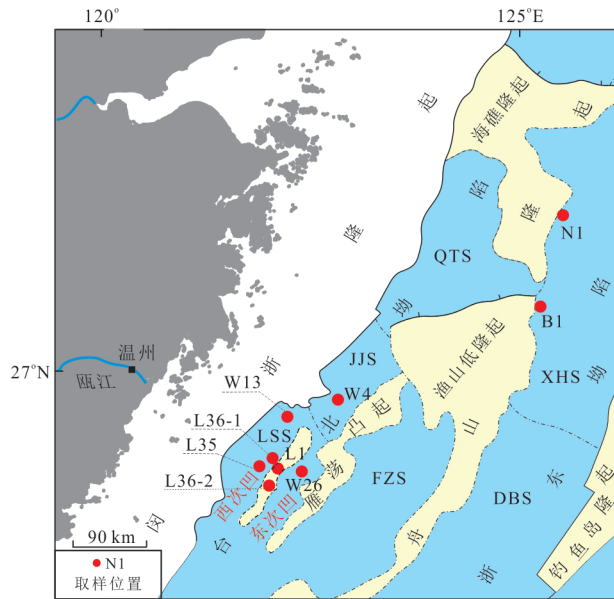


图 1 东海陆架盆地构造区划图及研究样品分布

Fig.1 Simplified geological map and sample location of the East China Sea Shelf Basin  
LSS. 丽水凹陷; JJS. 椒江凹陷; XHS. 西湖凹陷; FZS. 福州凹陷; DBS. 钓北凹陷; QTS. 钱塘凹陷

岩及多层黑色煤层和薄层钙质砂岩,上部以浅灰色、灰色泥岩为主,夹浅灰色砂质生物碎屑灰岩,自生海绿石发育;下始新统瓯江组与下伏地层呈角度不整合接触,空间上呈南薄(约 270 m)北厚(达 740 m),以灰白色、灰色细-中粒砂岩为主,夹灰色、褐色泥岩及多层黑色煤层和薄层钙质砂岩,上部以

浅灰色、灰色泥岩为主,夹浅灰色、灰白色微晶灰岩、砂质生物碎屑灰岩,含自生海绿石;中始新统温州组下段在台北拗陷广泛分布,并超覆在渔山低隆起之上,为广海相沉积,构成由滨浅海至滨岸沼泽环境的反旋回沉积序列,以灰色、浅绿灰色泥岩、粉砂质岩为主,夹砂岩,见多层 1~2 m 的黑色煤层;温州组上段在盆地中零星分布,岩性为浅灰色泥岩,底部为浅灰、灰白色含砾砂岩、砂岩富含灰质,局部含海绿石.

丽水凹陷潜在沉积物源区包括华南沿海、凹陷基底及周边隆起区,如北侧海礁隆起、东北侧渔山低隆起以及凹陷内部中生代岩浆岩. 研究表明,华南沿海地层以侏罗纪-白垩纪火山岩与火山碎屑岩为主,最老地层为前震旦系建瓯群区域变质岩,呈零星分布(Yu *et al.*, 2009). 有少量古生代加里东期片麻岩与变粒岩,同位素年龄分别为 400、339 Ma. 长江沉积物锆石年龄谱系除了高含量的印支期(261 Ma)及加里东期(417 Ma)峰值外,还含有相当数量的前寒武纪古老锆石,分别构成 2 469 Ma、1 828 Ma 的主要峰值以及 900 Ma 左右的次要峰值(Zheng *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2015). 靠近丽水凹陷的瓯江物源,碎屑锆石年龄谱系以极高的燕山期(136 Ma)和较弱的 1 847 Ma 双峰为特征,反映了华南沿海地区总体的母岩组合特征(Xu *et al.*, 2007). 丽水凹陷基底为中生代喷出岩、侵入岩与中元古代变质岩(刘金水等, 2020). 钻井资料揭示, L36-2 等

层序地层			年龄 (Ma)	研究样品	海平面 上升	构造演化阶段 (据钟锺等, 2018)
系	统	组				
新近系	中新统	龙井组(N <sub>1</sub> )				区域拗陷阶段
古近系	渐新统		23.3			沉积间断
	始新统	温州组(E <sub>2</sub> w)	41.2	● (2)	[海平面波动曲线]	拗陷阶段
		瓯江组(E <sub>2</sub> o)	47.8	● (1)		
	古新统	明月峰(E <sub>1</sub> m)	56	● (2)		断拗阶段
		灵峰组(E <sub>1</sub> l)	59.2	● (1)		
		月桂峰(E <sub>1</sub> j)	61.6	● (2)		
白垩系	上白垩统	石门潭组(K <sub>2s</sub> )	66	● (1)		
基底				● (3)		

● (3) 锆石定年样品及其数量

图 2 丽水凹陷古新-始新世地层构造演化综合图

Fig. 2 Paleocene-Eocene stratigraphic framework of the Lishui Depression

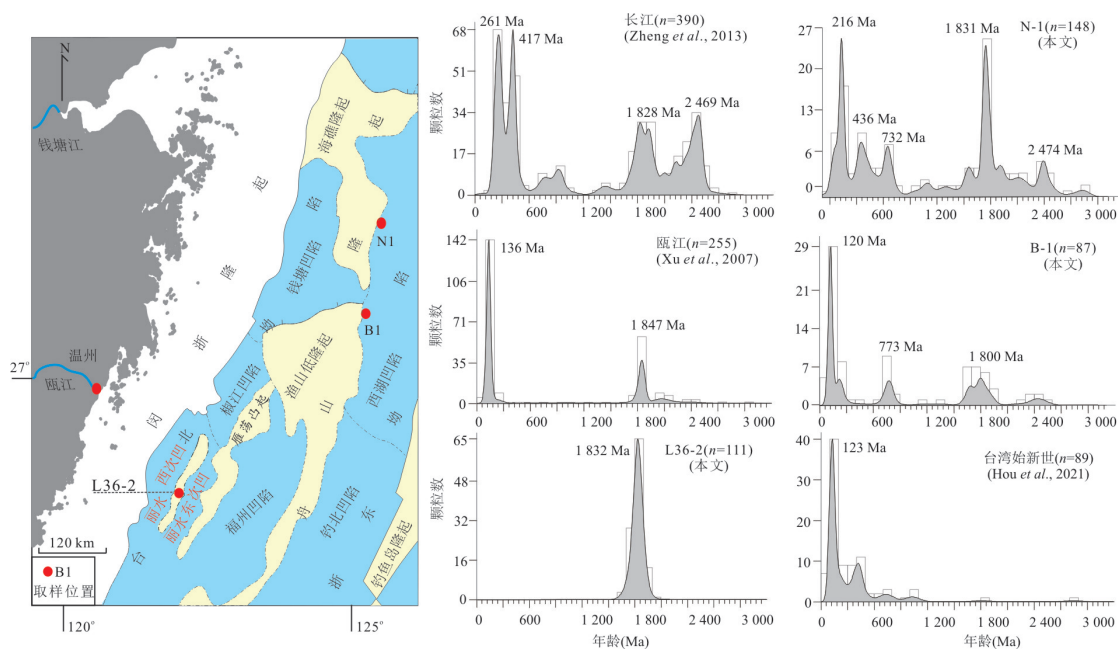


图3 丽水凹陷基底及周边潜在源区锆石年龄谱系特征

Fig. 3 Zircon U-Pb spectra of the Lishui Depression basement and potential source terranes

少数探井钻遇灰黑色黑云母角闪斜长片麻岩变质岩基底,片麻岩锆石 U-Pb 绝对年龄为 1 832 Ma (图 3); W4 等众多探井钻遇燕山期花岗岩(108~112 Ma)、花岗闪长岩及中性喷发岩。海礁隆起和渔山低隆起主要以中生代岩浆岩为主,海礁隆起以印支期岩浆岩为主,年龄峰值在 216 Ma,渔山低隆起则含有较多燕山期岩浆岩,年龄峰值在 120 Ma;两者地层中均夹有前寒武纪变质岩,形成 1 800~1 831 Ma 左右的主峰和 732~773 Ma 左右的次峰。但是,海礁隆起 1 800 Ma 以及 2 474 Ma 老锆石的占比明显高于渔山低隆起(图 3)。

## 2 材料方法

本文从东海新生代盆地基底和古新统一始新统(月桂峰组、明月峰组、瓯江组和温州组)中提取了 12 个钻孔样品进行碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系分析(图 1)。样品的地层年龄数据由中海石油(中国)有限公司上海分公司提供。锆石颗粒的采集、制靶、阴极发光(CL)成像和 LA-ICP-MS 同位素测年均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。其中锆石同位素定年采用 Thermo Elemental X-Series ICP-MS 相连的 213 nm 的激光剥蚀质谱仪。在激光剥蚀过程中,以氦气为载体、氩气作为补偿气体来调节灵敏度。激光束重复频率为 10 Hz,激光束斑直径采用 30  $\mu\text{m}$ 。每次测试分析选取 30 s 的空白信号和 70 s 的

样本信号,国际标准锆石 91500 ( $1\,065.4 \pm 0.3$  Ma) 为外标,以锆石标样 Plešovice (年龄为  $337.1 \pm 0.4$  Ma) 来进行校正。U-Pb 同位素比和年龄计算通过 ICPMSDataCal 软件完成,利用 Andersen(2002) 的方法进行普通 Pb 校正。轻于 1 000 Ma 采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  计算年龄(Cao *et al.*, 2017),而老于 1 000 Ma 采用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  计算年龄(Shao *et al.*, 2016, 2019)。实验获取的数据不一致性  $\leq 10\%$ ,不确定性  $\leq 10\%$ ,年龄协和度为 1  $\sigma$ 。

有孔虫、钙质超微以及沟鞭藻类化石是指示海洋环境的可靠指标。浮游有孔虫、大多数底栖有孔虫和钙质超微化石组合可以准确指示从陆架、陆坡到深海的各种海相环境。然而,在湖泊和微咸水环境中也发育有少量底栖有孔虫和沟鞭藻,成为弱海相环境或海侵影响的标志(汪品先等, 1982; Li *et al.*, 2017)。本次研究中采用有孔虫、钙质超微以及海相沟鞭藻组合法对 W13 井的 140 个样品开展沉积环境分析。由于样品均为钻井岩屑样品,存在沉积物掉样产生的误差,为了减少掉样产生的不利影响,选取定年化石的末次出现为证据开展研究,化石带时代参考 Gradstein *et al.* (2012) 的地质年代表。

### 3 结果

#### 3.1 海洋沉积记录

在东海陆架有多达 40 余口探井钻遇了含有古新世-始新世浮游有孔虫和钙质超微化石的海相地层,这些海相地层主要分布在台北拗陷西南部及南部的凹陷中. 钻孔 L1 和 W13 古新世晚期至早中始新世均发育有浮游有孔虫 *Pseudohastigerina pseudomenardii*、*Acarinina* spp. 和 *Morozovella* spp. 以及钙质超微化石 *Fasciculithus tympaniformis*、*Sphenolithus primus* 和 *Neochiastozygus* spp., 显示该地区古新世晚期至始新世为海相环境(图 4).

#### 3.2 碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系

本次研究中的碎屑锆石 U-Pb 定年样品采自 L35、L36-1 和 W26 钻孔岩屑样品(图 5). 其中钻孔 L35、L36-1 位于西部, 钻孔 W26 位于东部, 两者之间被低隆起分隔(图 1).

位于凹陷西次凹的 L35 井从古新世到始新世共采集了 4 个样品. L35-1 采样深度为上古新统月桂峰组(3 762.41 m), 锆石颗粒大多数呈自形-半自形, 显示出清晰的生长韵律结构. Th ( $1.702 \times 10^{-6}$ ~ $4.239.58 \times 10^{-6}$ ) 和 U ( $419.48 \times 10^{-6}$ ~ $1.148.82 \times 10^{-6}$ ) 含量变化范围较大, 获得的 Th/U 比值介于 0.20~3.69 之间, 总共获得 101 份来自岩浆岩的数据(图 6). 其中, 94 个数据点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄落在 65~

279 Ma 之间, 一个点落在 450 Ma, 其余 6 个点落在 1 278~1 829 Ma 之间.

总体而言, 样品 L35-1 的特征表现为约 109 Ma 的燕山期主峰, 少量分散分布的古元古代(约 1 815 Ma)的锆石(图 5). 样品 L35-2、L35-3 和 L35-4 采样深度分别为中古新统灵峰组(3 322.44 m)、上古新统明月峰组(1 856 m)和下始新统瓯江组(1 565 m). 锆石晶体呈半自形-次圆形, 具有清晰的同心环带. Th 和 U 含量分别为  $(53.29 \sim 4.089.54) \times 10^{-6}$  和  $(110.97 \sim 1.262.39) \times 10^{-6}$ , 均为岩浆岩成因, Th/U 比值大多数在 0.11~3.24 之间. 213 个数据点的  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  年龄几乎都落在了 78~167 Ma 之间, 只有 10 个点在 983~2 555 Ma 之间. 这些数据形成 3 个尖锐的峰值, 分别集中在 110 Ma、111 Ma 和 105 Ma.

样品 L36-1 位于 L35 井北侧, 取样层位为中始新统温州组(1 130 m). L36-1 的锆石颗粒大多为自形或半自形, 具有清晰的生长韵律结构, Th 的含量为  $(80.32 \sim 2.092.53) \times 10^{-6}$ , U 的含量为  $(51.94 \sim 1.358.19) \times 10^{-6}$ , Th/U 比值在 0.55~4.09 之间, 为岩浆岩成因锆石. 64 个数据确定的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在 90~162 Ma 之间, 有一个继承性锆石颗粒的  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  年龄为 1 884 Ma. L36-1 和 L35 井的样品类似, 在 108 Ma 形成尖锐的峰值(图 5).

钻孔 W26 共有 4 个样品, 最底部的样品 W26-1

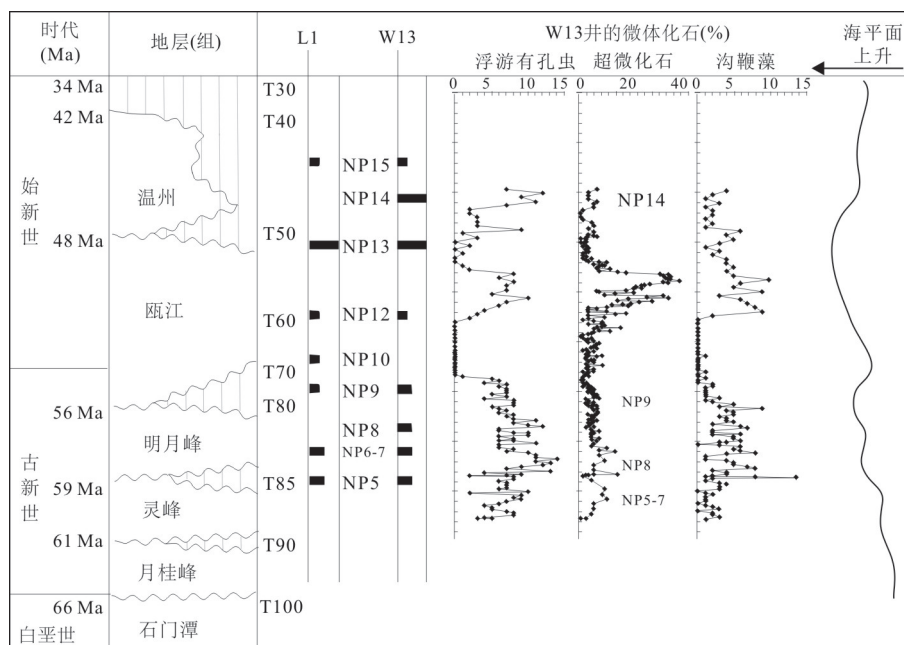


图 4 丽水凹陷的海洋化石记录和海平面变化

Fig. 4 Marine fossil records and sea-level changes of the Lishui Depression

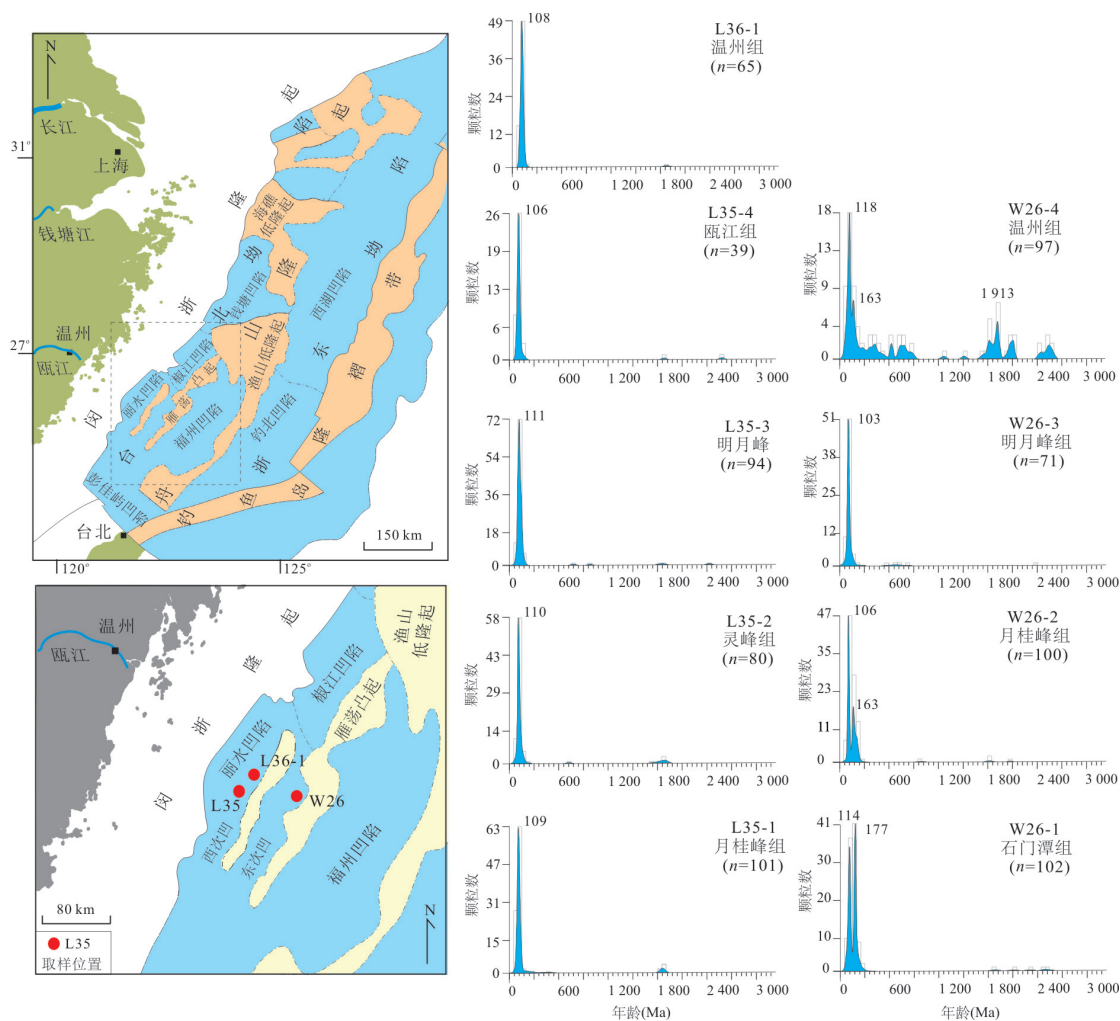


图 5 丽水凹陷白垩纪到晚始新世样品的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱图 ( $n$  代表有效数据点)

Fig.5 Detrital zircon U-Pb age spectra of Cretaceous to Late Eocene samples from the Lishui Depression ( $n$  represents effective analyses)

来自于石门潭组的 4 005 m 处(属于白垩纪). 102 个数据点的 Th 含量为  $(17.75 \sim 4\,437.80) \times 10^{-6}$ , U 含量为  $(27.97 \sim 1\,494.23) \times 10^{-6}$ . Th/U 比值在 0.42~2.97 之间, 只有一个值低于 0.1, 可能来源于变质岩. 97 个样品点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在 75~253 Ma 之间, 还有 5 个样点的年龄在 1 887~2 544 Ma 之间. W26-1 呈现出 114 Ma 和 177 Ma 双峰模式的特点, 印支期年龄峰值高于燕山期峰值. W26-2 取自下古新统月桂峰组(3 645.10 m). 97 个数据点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在 79~259 Ma 之间, 由 106 Ma 主峰和 163 Ma 次峰组成(图 5). W26-3 也为上古新统明月峰组(2 774.56 m), 获得 71 个有效样点, 锆石 Th/U 比值介于 0.21~1.86 之间, 指示为岩浆岩成因, 锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄谱系呈现出 103 Ma 燕山期典型的单峰模式. 最上部的 W26-4 样品采自中始新统温州

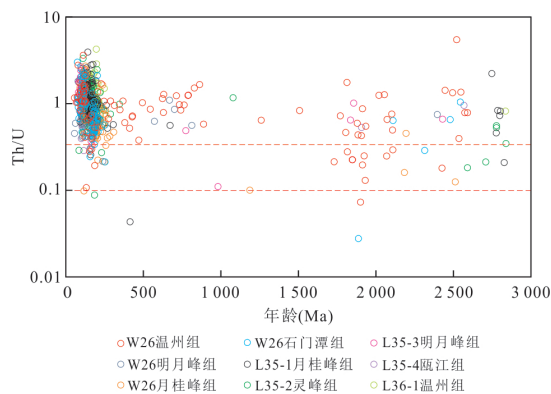


图 6 碎屑锆石 Th/U 比值与 U-Pb 年龄分布

Fig.6 Distribution of Th/U ratios and U-Pb ages of detrital zircon

组(1 620 m), 其中 97 个有效样点的 Th 含量为  $(41.78 \sim 1\,629.77) \times 10^{-6}$ , U 含量为  $(50.41 \sim$

$1.279.59) \times 10^{-6}$ , Th/U 比值介于 0.11~5.45 之间, 均为岩浆岩成因(图 6). 值得注意的是, 样品 W26-4 表现出独特的多峰模式, 除在 118 Ma 形成一个燕山期的主峰外, 还在 163~1 913 Ma 之间出现多个次峰(图 5).

## 4 讨论

### 4.1 潜在沉积物源区特征

丽水凹陷位于华南大陆东部边缘, 以中生代火成岩体和古生代沉积岩为主, 夹前寒武纪变质岩(杨文采等, 2022). 瓯江及长江等大中型河流贯穿其中, 其携带的沉积物代表了流域内母岩的总体组合特征(Xu *et al.*, 2007; Zheng *et al.*, 2013). 另一方面, 海礁隆起和渔山低隆起分别位于凹陷北部和东部. 一个大型的角度不整合出现在中生界甚至更古老的基底与古近系沉积盖层之间. 长期以来, 由于钻遇基底的钻孔数量有限, 加之测年技术的限制, 造成东海陆架新生代盆地基底性质及类型主要通过重磁资料和闽浙陆地露头来推断(陈冰等, 2002). 钻遇盆地基底岩浆岩的锆石 U-Pb 定年表明, 丽水凹陷基底主要为燕山期及印支期花岗岩体(郭真等, 2015), 含少量太古代变质岩. 钻孔 L1 基底样品为含黑云母斜长片麻岩, Rb-Sr 测年结果为 1 806~1 970 Ma, 和同样雁荡凸起上的 L36-2 井基底黑云斜长片麻岩 1 832 Ma 的锆石 U-Pb 年龄基本一致(图 3). 钻孔 N1 紧邻海礁隆起边缘, 采自盆地初始断陷后直接沉积的扇三角洲沉积物, 为近源搬运堆积的产物(图 3); 主要由泥岩、粉砂岩夹火山岩形成的泥砾岩组成, 代表了海礁隆起的物源特征, 其碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系具有含量近乎相等的印支期(约 216 Ma)和古元古代(约 1 831 Ma)两个主峰, 还发育了加里东期、晋宁期和太古代的次峰. 样品 B1 靠近渔山低隆起, 采自始新世近源扇三角洲砾岩胶结物, 代表了渔山低隆起的物源特征; 渔山低隆起受中生代岛弧岩浆作用的影响很大, B1 样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系以燕山期锆石为主, 包含一系列印支期、晋宁期以及元古代峰值(图 3).

### 4.2 古沉积环境演变

学者们通过岩心、地震、录井以及测井等资料, 对丽水凹陷古新统的沉积环境演变进行了分析, 认为在早古新世为湖泊环境(月桂峰组), 之后发生海侵, 沉积环境转变为海相环境(姜亮, 2003; 田兵等, 2012). 本文将有孔虫、钙质超微化石和沟鞭藻组合

作为判断海相环境的可靠指标, 对古新世-早中始新世的沉积环境进行了研究. 图 4 显示, 丽水凹陷古新世-早中始新世浮游有孔虫、钙质超微化石和沟鞭藻的丰度随时间发生明显改变, 指示了从灵峰组到温州组沉积过程的海陆交互作用. W13 井样品揭示, 在古新世-始新世期间丽水凹陷发育了钙质超微化石带 NP5-NP15, 总体呈现两个海侵最大时期(图 4). 此外, 在 61 Ma 左右灵峰组的底部同时出现浮游有孔虫和沟鞭藻, 反映了该时期海相环境开始发育, 在明月峰组和瓯江组晚期化石含量分别达到高峰, 是两个最大海侵作用时期; 在瓯江组早期化石含量接近于零, 代表了最大海退期. 丽水凹陷东次凹的 L-1 井微体古生物学分析结果与 W13 井样品完全相同, 反映了丽水凹陷该时期总体沉积环境演变特征完全相同(图 4).

### 4.3 沉积物源分析

研究表明, 丽水凹陷沉积物源主要来自凹陷西侧的闽浙隆起和东侧的雁荡凸起区(刘俊海等, 2004). 也有学者对丽水凹陷东、西次凹在古新世时期的物源进行分析, 认为其分别来源于东部的渔山隆起区和西部的闽浙隆起区(陈春峰等, 2017). 本次研究揭示, 丽水凹陷东西次凹从古新世至始新世具有不同的沉积物源及搬运途径.

从古新世到始新世, 位于丽水西次凹的 L35 和 L36-1 钻孔样品锆石年龄谱系均表现为简单的单峰模式, 年龄集中在 105~111 Ma(图 5), 与瓯江样品呈现的燕山期(136 Ma)和古元古代(1 847 Ma)有显著差异. 显然, 丽水西次凹沉积物源完全受盆地附近燕山期岩浆岩的影响, 可以排除如瓯江等内陆河流搬运沉积物的可能.

位于丽水东次凹的 W26 钻孔在石门潭组和明月峰组(晚白垩世-晚古新世)沉积物碎屑锆石 U-Pb 定年年龄谱系与丽水西次凹存在显著差异. 样品 W26-1 中存在印支期(177 Ma)和燕山期(114 Ma)两个显著的峰, 印支期峰值占比明显高于燕山期峰值; 样品 W26-2 有一个显著的燕山期(106 Ma)主峰和一个印支期(163 Ma)次峰; 样品 W26-3 只有一个燕山期(103 Ma)的单峰. 因此, 该时期丽水东次凹沉积物来源与西次凹明显不同, 其主要源自凹陷东部地区近源的燕山-印支期岩浆岩母岩, 并且流域范围随时间发生改变, 从早期印支期岩浆岩为主要母岩逐步转为燕山期岩浆岩为主.

进入始新世, 丽水东次凹沉积物源与古新统有

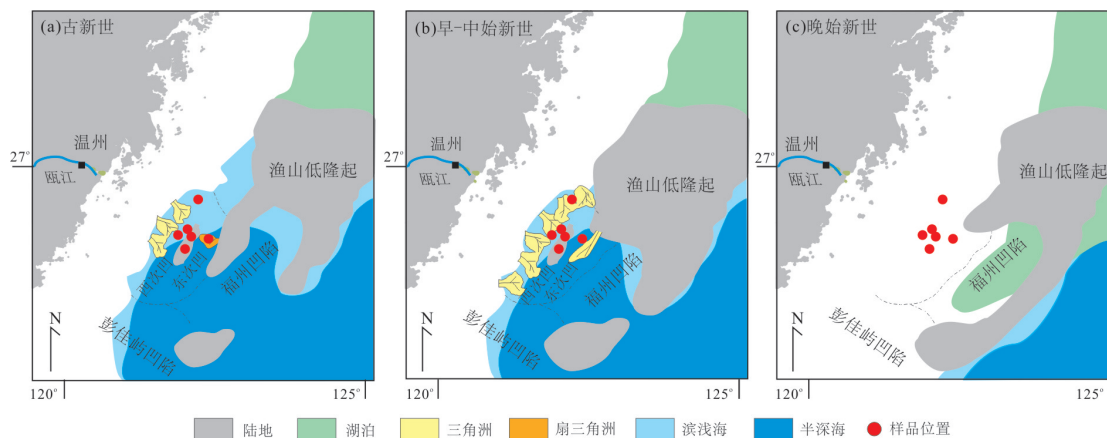


图7 古新世到始新世古环境演化阶段

Fig.7 Evolutionary stages of sedimentary environment from Paleocene to Eocene

着显著的差异。W26-4温州组的碎屑锆石年龄谱系显示,除了燕山期主峰(118 Ma)外,还包含了163 Ma和1 913 Ma等次峰的多峰特征,与代表渔山低隆起源区特征的B1井样品完全相同(图3、图5)。因此,渔山低隆起该时期成为丽水东次凹的沉积物源区,为东次凹提供了碎屑沉积物。地球物理资料揭示,该时期丽水凹陷北侧发育大型河流三角洲,将沉积物从凹陷北部渔山低隆起运移到盆地中,与本文源汇研究认识完全吻合。

#### 4.4 沉积环境演化

丽水凹陷晚中生代为弧后盆地(索艳慧等, 2012),接受了大量源自岛弧岩浆岩的近源沉积。古新世盆地为海相沉积环境,盆地西侧发育一系列小型三角洲,东侧发育近源扇三角洲(图7a)。早中始新世,沉积环境基本稳定,持续维持海相沉积环境,盆地西侧河流三角洲规模略有增大,沉积物源以浙江沿岸燕山期花岗岩为主;但盆地东侧沉积物源发生改变,发育了源自渔山低隆起的大型河流,在盆地东北侧形成较大规模的三角洲沉积(图7b)。晚始新世发生玉泉运动,丽水凹陷整体发生抬升,海水向东退出,盆地处于暴露剥蚀状态,缺失晚始新世-渐新世沉积(图7c),直到中新世盆地重新接受沉积(张功成等, 2013a, 2013b)。由于丽水凹陷古新世-早中始新世以海陆过渡环境为主,有利于烃源岩及储集体的发育,具有良好的油气勘探潜力。

## 5 结论

(1)通过微体古生物综合分析,发现丽水凹陷古新世及早中始新世发育了大量底栖有孔虫,钙质超微以及海相沟鞭藻,指示凹陷晚古

新世-早中始新世为滨浅海相沉积环境,且经历了两次明显的高海平面事件。

(2)通过沉积物源汇对比分析,认为丽水凹陷古新统沉积物主要来自周边燕山期岩浆岩古隆起。但东、西次凹在物源上存在一定差异,东侧明显存在印支期物源;进入始新世,丽水西次凹沉积物源区仍然是闽浙沿海燕山期岩浆岩带,形成106~108 Ma的单峰;东次凹沉积物则除了燕山-印支期中生代锆石外,还出现大量前寒武纪的古老锆石,沉积物来自渔山低隆起。

(3)始新世温州期,丽水凹陷东北侧发育大型河流,把源自渔山低隆起的沉积物搬运到盆地中,形成较大规模的三角洲。

## References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)
- Cao, L. C., Shao, L., Qiao, P. J., et al., 2017. Geochemical Evolution of Oligocene-Middle Miocene Sediments in the Deep-Water Area of the Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 80: 358-368. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.12.010>
- Chen, B., Wang, J.L., Wu, J.S., et al., 2002. Study on the Basement Properties of the South Haijiao Uplift in the East China Sea Shelf Basin. *Experimental Petroleum Geology*, 24(4): 301-305 (in Chinese with English abstract).
- Chen, C.F., Zhong, K., Zhu, W.L., et al., 2017. Provenance of Sediments and Its Effects on Reservoir Physical



- Properties in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(5): 963–972 (in Chinese with English abstract).
- Cui, Y.C., Cao, L.C., Qiao, P.J., et al., 2018. Provenance Evolution of Paleogene Sequence (Northern South China Sea) Based on Detrital Zircon U-Pb Dating Analysis. *Earth Science*, 43(11): 4169–4179 (in Chinese with English abstract).
- Cui, Y. C., Shao, L., Li, Z. X., et al., 2021. A Mesozoic Andean-Type Active Continental Margin along Coastal South China: New Geological Records from the Basement of the Northern South China Sea. *Gondwana Research*, 99: 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.06.021>
- Cui, Y. C., Shao, L., Qiao, P. J., et al., 2019. Upper Miocene-Pliocene Provenance Evolution of the Central Canyon in Northwestern South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 40(2): 223–235. <https://doi.org/10.1007/s11001-018-9359-2>
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Hilgen, F. J., 2012. On the Geologic Time Scale. *Newsletters on Stratigraphy*, 45(2): 171–188. <https://doi.org/10.1127/0078-0421/2012/0020>
- Guo, Z., Gao, S.L., Wang, J.Q., et al., 2015. U-Pb Dating of the Zircon from Cenozoic Basement Rock and Its Tectonic Significance in the Lishui Sag of the East China Sea Shelf Basin. *Marine Science Bulletin*, 34(6): 675–687 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Y. L., Zhu, W. L., Qiao, P. J., et al., 2021. Sediment Source and Environment Evolution in Taiwan Island during the Eocene - Miocene. *Acta Oceanologica Sinica*, 40(2): 114–122. <https://doi.org/10.1007/s13131-021-1756-8>
- Jiang, L., 2003. Exploration Status and Perspective of Petroleum Resources in East China Sea Shelf Basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 17(1): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.M., Zou, W., Liu, J.S., et al., 2020. Genetic Mechanism of Inversion Anticline Structure at the End of Miocene in Xihu Sag, East China Sea: A New Understanding of Basement Structure Difference. *Earth Science*, 45(3): 968–979 (in Chinese with English abstract).
- Kwon, Y. I., Jr Boggs, S., 2002. Provenance Interpretation of Tertiary Sandstones from the Cheju Basin (NE East China Sea): A Comparison of Conventional Petrographic and Scanning Cathodoluminescence Techniques. *Sedimentary Geology*, 152(1–2): 29–43. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00284-6](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00284-6)
- Li, J.B., Ding, W.W., Wu, Z.Y., et al., 2017. Origin of the East China Sea. *Scientia Sinica Terrae*, 47(4): 406–411 (in Chinese).
- Li, Q. Y., Wu, G. X., Zhang, L. L., et al., 2017. Paleogene Marine Deposition Records of Rifting and Breakup of the South China Sea: An Overview. *Science China Earth Sciences*, 60(12): 2128–2140. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-0163-x>
- Li, S.Z., Suo, Y.H., Li, X.Y., et al., 2018. Mesozoic Plate Subduction in West Pacific and Tectono-Magmatic Response in the East Asian Ocean-Continent Connection Zone. *Chinese Science Bulletin*, 63(16): 1550–1593 (in Chinese).
- Li, Z. X., Li, X. H., 2007. Formation of the 1 300-km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, 35(2): 179–182. <https://doi.org/10.1130/g23193a.1>
- Liu, J.H., Yang, X.H., Wu, Z.X., et al., 2004. Zircon Tracing Application of Paleocene - Eocene in Lishui Sag of the East China Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(1): 85–92 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.S., Xu, H.Z., Jiang, Y.M., et al., 2020. Mesozoic and Cenozoic Basin Structure and Tectonic Evolution in the East China Sea Basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 675–691 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. B., Shao, L., Cui, Y. C., et al., 2021. Sedimentary Records from Hengchun Accretionary Prism Turbidites on Taiwan Island: Implication on Late Neogene Migration Rate of the Luzon Subduction System. *Marine and Petroleum Geology*, 124: 104820. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104820>
- Qin, L.Z., Liu, J.S., Li, S., et al., 2017. Characteristics of Zircon in the Huagang Formation of the Central Inversion Zone of Xihu Sag and Its Provenance Indication. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(4): 498–504, 526 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J.Y., 2018. Genetic Dynamics of China Offshore Cenozoic Basins. *Earth Science*, 43(10): 3337–3361 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Cao, L. C., Pang, X., et al., 2016. Detrital Zircon Provenance of the Paleogene Syn-Rift Sediments in the Northern South China Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(2): 255–269. <https://doi.org/10.1002/2015GC006113>
- Shao, L., Cui, Y.C., Qiao, P.J., et al., 2019. Implications on the Early Cenozoic Palaeogeographical Reconstruction of SE Eurasian Margin Based on Northern South

- China Sea Palaeo-Drainage System Evolution. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 21(2): 216–231 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Cui, Y. C., Statterger, K., et al., 2019. Drainage Control of Eocene to Miocene Sedimentary Records in the Southeastern Margin of Eurasian Plate. *GSA Bulletin*, 131(3–4): 461–478. <https://doi.org/10.1130/B32053.1>
- Shao, L., Qiao, P. J., Pang, X., et al., 2009. Nd Isotopic Variations and Its Implications in the Recent Sediments from the Northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 54(1): 98–103 (in Chinese)
- Suo, Y.H., Li, S.Z., Dai, L.M., et al., 2012. Cenozoic Tectonic Migration and Basin Evolution in East Asia and Its Continental Margins. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2602–2618 (in Chinese with English abstract).
- Tang, X.J., Jiang, Y.M., Zhang, S.L., 2018. Tectonic Environment of Volcanic Rocks in the Pinghu Slope Belt and Its Petroleum Geological Significance. *Geological Science and Technology Information*, 37(1): 27–36 (in Chinese with English abstract).
- Tian, B., Li, X.Y., Pang, G.Y., et al., 2012. Sedimentary Systems of the Superimposed Rift-Subsidence Basin: Taking Lishui-Jiaojiang Sag of the East China Sea as an Example. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(4): 696–705 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P.X., Min, Q.B., Bian, Y.H., 1982. On the Sedimentary Environments of the Paleogene Strata in Oil-Bearing Basins in the Eastern Part of China. *Geological Review*, 28(5): 402–412 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Bidgoli, T., Yang, X. H., et al., 2018. Source-to-Sink Links between East Asia and Taiwan from Detrital Zircon Geochronology of the Oligocene Huagang Formation in the East China Sea Shelf Basin. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(10): 3673–3688. <https://doi.org/10.1029/2018GC007576>
- Xu, X. S., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2007. The Crust of Cathaysia: Age, Assembly and Reworking of Two Terranes. *Precambrian Research*, 158(1–2): 51–78. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.010>
- Yang, W.C., He, L.J., Jiang, J.S., et al., 2022. A Synthetic Study of the Crust Structures of Zhejiang Province. *Acta Geologica Sinica*, 96(1): 95–103 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. H., Wang, L. J., O'Reilly, S. Y., et al., 2009. A Paleoproterozoic Orogeny Recorded in a Long-Lived Cratonic Remnant (Wuyishan Terrane), Eastern Cathaysia Block, China. *Precambrian Research*, 174(3–4): 347–363. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.08.009>
- Zhang, G.C., Deng, Y.H., Wu, J.F., et al., 2013a. Coal Measure Source-Rock Characteristics and Gas Exploration Directions in Cenozoic Superimposed Faulted Depressions, Offshore China. *China Offshore Oil and Gas*, 25(6): 15–25 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.C., Miao, S.D., Chen, Y., et al., 2013b. Distribution of Gas Enrichment Regions Controlled by Source Rocks and Geothermal Heat in China Offshore Basins. *Natural Gas Industry*, 33(4): 1–17 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.C., Mi, L.J., Qu, H.J., et al., 2011. A Basic Distributional Framework of Global Deepwater Basins and Hydrocarbon Characteristics. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 369–378 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. P., Li, S. Z., Suo, Y. H., 2016. Formation, Tectonic Evolution and Dynamics of the East China Sea Shelf Basin. *Geological Journal*, 51(S1): 162–175. <https://doi.org/10.1002/gj.2808>
- Zhang, L.X., Liu, P.H., Wang, Y.L., et al., 2021. Depositional Timing and Provenance Characteristics of the Cretaceous Linsishan Formation in the Shewopo Area, Jiaolai Basin: New Evidence from Detrital Zircon U-Pb Dating and REE Composition. *Earth Science*, 46(3): 1119–1132 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M., Shao, L., Liang, J. S., et al., 2015. No Red River Capture since the Late Oligocene: Geochemical Evidence from the Northwestern South China Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 122: 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2015.02.029>
- Zheng, H. B., Clift, P. D., Wang, P., et al., 2013. Pre-Miocene Birth of the Yangtze River. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(19): 7556–7561. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216241110>
- Zhong, K., Zhu, W.L., Gao, S.L., et al., 2018. Key Geological Questions of the Formation and Evolution and Hydrocarbon Accumulation of the East China Sea Shelf Basin. *Earth Science*, 43(10): 3485–3497 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.Y., Jia, J.Y., Li, J.B., et al., 2002. Quantitative Study on Inversion Structures in Xihu Depression, East China Sea: Constraints from Fission Track Analysis Data. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(1): 63–67 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

陈冰, 王家林, 吴健生, 等, 2002. 东海陆架盆地海礁凸起南

- 块基底性质研究. 石油实验地质, 24(4): 301—305.
- 陈春峰, 钟楷, 朱伟林, 等, 2017. 东海丽水凹陷物源及其对储层物性影响. 石油与天然气地质, 38(5): 963—972.
- 崔宇驰, 曹立成, 乔培军, 等, 2018. 南海北部古近纪沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及物源演化. 地球科学, 43(11): 4169—4179.
- 郭真, 高顺莉, 王建强, 等, 2015. 东海丽水凹陷新生代基底岩体锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 海洋通报, 34(6): 675—687.
- 姜亮, 2003. 东海陆架盆地油气资源勘探现状及含油气远景. 中国海上油气(地质), 17(1): 1—5.
- 蒋一鸣, 邹玮, 刘金水, 等, 2020. 东海西湖凹陷中新世末反转背斜构造成因机制: 来自基底结构差异的新认识. 地球科学, 45(3): 968—979.
- 李家彪, 丁巍伟, 吴自银, 等, 2017. 东海的来历. 中国科学: 地球科学, 47(4): 406—411.
- 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等, 2018. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造-岩浆响应. 科学通报, 63(16): 1550—1593.
- 刘俊海, 杨香华, 吴志轩, 等, 2004. 东海盆地丽水凹陷古新统锆石示踪作用分析. 海洋地质与第四纪地质, 24(1): 85—92.
- 刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等, 2020. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化. 地质学报, 94(3): 675—691.
- 秦兰芝, 刘金水, 李帅, 等, 2017. 东海西湖凹陷中央反转带花港组锆石特征及物源指示意义. 石油实验地质, 39(4): 498—504, 526.
- 任建业, 2018. 中国近海海域新生代成盆动力机制分析. 地球科学, 43(10): 3337—3361.
- 邵磊, 崔宇驰, 乔培军, 等, 2019. 南海北部古河流演变对欧亚大陆东南缘早新生代古地理再造的启示. 古地理学报, 21(2): 216—231.
- 邵磊, 乔培军, 庞雄, 等, 2009. 南海北部近代沉积物钪同位素分布及意义. 科学通报, 54(1): 98—103.
- 索艳慧, 李三忠, 戴黎明, 等, 2012. 东亚及其大陆边缘新生代构造迁移与盆地演化. 岩石学报, 28(8): 2602—2618.
- 唐贤君, 蒋一鸣, 张绍亮, 2018. 平湖斜坡带火山岩层发育构造环境及油气地质意义. 地质科技情报, 37(1): 27—36.
- 田兵, 李小燕, 庞国印, 等, 2012. 叠合断陷盆地沉积体系分析: 以东海丽水—椒江凹陷为例. 沉积学报, 30(4): 696—705.
- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 1982. 关于我国东部含油盆地早第三纪地层的沉积环境. 地质论评, 28(5): 402—412.
- 杨文采, 何良军, 江金生, 等, 2022. 浙江省地壳构造综合研究. 地质学报, 96(1): 95—103.
- 张功成, 邓运华, 吴景富, 等, 2013a. 中国近海新生代叠合断陷煤系烃源岩特征与天然气勘探方向. 中国海上油气, 25(6): 15—25.
- 张功成, 苗顺德, 陈莹, 等, 2013b. “源热共控”中国近海天然气富集区分布. 天然气工业, 33(4): 1—17.
- 张功成, 米立军, 屈红军, 等, 2011. 全球深水盆地群分布格局与油气特征. 石油学报, 32(3): 369—378.
- 张连祥, 刘平华, 王义龙, 等, 2021. 胶莱盆地蛇窝泊地区白垩纪林寺山组沉积时代与物源特征: 来自碎屑锆石 U-Pb 测年与稀土元素组成的新证据. 地球科学, 46(3): 1119—1132.
- 钟锴, 朱伟林, 高顺莉, 等, 2018. 东海陆架盆地形成演化及油气成藏关键地质问题. 地球科学, 43(10): 3485—3497.
- 周祖翼, 贾健谊, 李家彪, 等, 2002. 东海西湖凹陷反转构造定量研究: 来自裂变径迹分析数据的约束. 海洋地质与第四纪地质, 22(1): 63—67.