

## 东海陆架盆地丽水凹陷古新统源-汇系统耦合及时-空演化

朱珍君<sup>1</sup>,李琦<sup>1,2</sup>,陈贺贺<sup>1,2</sup>,李剑<sup>3</sup>,张卫平<sup>4</sup>,杨丰繁<sup>5</sup>,张迎朝<sup>6</sup>,覃军<sup>6</sup>,李凤勋<sup>7</sup>,单帅强<sup>7</sup>

[1. 中国地质大学(北京)海洋学院,北京 100083;2. 中国地质大学(北京)海洋与极地研究中心,北京 100083;3. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206;4. 中国石化新疆新春石油开发有限责任公司,山东 东营 257026;5. 云南省天然气有限公司,云南 昆明 650200;6. 中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200335;7. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214126]

**摘要:**受构造幕式多期活动和盆内外多物源水系影响,断陷湖盆源-汇系统形成过程复杂,但不同构造阶段的源-汇系统耦合及时-空演化仍处于初步研究阶段。以东海陆架盆地丽水凹陷古新统为例,基于地震、测井、岩心、薄片及重矿物等资料,综合盆地物源体系分析、搬运体系识别与定量追踪、沉积体系刻画及半定量表征,重建了源-汇系统。研究结果表明:断陷早期,盆地多孤立、小型沉积中心,构造活动速率较低,物源供给较少,陡坡带发育较多小规模扇三角洲,缓坡带受先存水系影响,发育小规模辫状河三角洲;断陷强烈期,受灵峰主断裂强烈活动影响,物源供给充足,陡坡带扇三角洲规模增大但数量减少,缓坡带辫状河三角洲规模增大并相互合并;断陷晚期,陡坡带源-汇系统逐渐消亡,缓坡带受全球海平面快速下降影响,河流下切作用增强,在坡折带下发育大规模盆底扇沉积体系。受构造-沉积格局、母岩类型及边界条件联合控制,丽水凹陷不同构造阶段共发育5种源-汇系统,分别为:①缓坡带北部变质岩为主-SE向U型古沟谷-远源辫状河三角洲;②缓坡带中-南部火山岩为主-NE向断槽/SE向V/U型古沟谷-远源辫状河三角洲/盆底扇;③灵峰凸起北段侵入岩为主-SW向古沟谷-近源扇三角洲;④灵峰凸起中-南段火山岩(早)-变质岩(晚)-SW向古沟谷/NE向断槽-近源扇三角洲;⑤雁荡凸起侵入岩和变质岩-SW/S向古沟谷-近源扇三角洲/辫状河三角洲。物源搬运通道参数半定量统计结果表明,缓坡带古沟谷/断槽宽、浅,陡坡带古沟谷/断槽窄、深;断陷早期和晚期物源搬运通道横截面积与盆内对应沉积体面积具有较好的正相关性。

**关键词:**断陷盆地;源-汇系统;构造-沉积;古新统;丽水凹陷;东海陆架盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

## Source-to-sink coupling and temporal-spatial evolution in the Lishui Sag of East China Sea Shelf Basin during the Paleocene

ZHU Zhenjun<sup>1</sup>, LI Qi<sup>1,2</sup>, CHEN Hehe<sup>1,2</sup>, LI Jian<sup>3</sup>, ZHANG Weiping<sup>4</sup>, YANG Fengfan<sup>5</sup>, ZHANG Yingzhao<sup>6</sup>, QIN Jun<sup>6</sup>, LI Fengxun<sup>7</sup>, SHAN Shuaiqiang<sup>7</sup>

[1. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), 100083, China; 2. Marine and Polar Research Center, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 4. Xinjiang Xinchun Petroleum Development Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257026, China; 5. Yunnan Natural Gas Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650200, China; 6. Shanghai Branch, CNOOC, Shanghai 200335, China; 7. Wuxi Branch of Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China]

**Abstract:** The source-to-sink systems in rifted basins are generally complex as a result of multi-stage tectonic activities and multiple provenances and drainage systems both within and outside the basins. The coupling relationship and spatial-temporal evolution of these systems in different tectonic stages are in need of in-depth study. Based on analyses of 3-D seismic data, well logging, cores, thin sections and heavy minerals of the Paleocene Lishui Sag in the East China Sea Shelf Basin, this study attempted to reconstructed the source-to-sink system for the Sag through sediment provenances analyses, transport channels identification and (quantitative) tracing, depositional system mapping and (half-quantitative) characterization. The results show that the early syn-rift stage was characterized by isolated sinks, small

收稿日期:2022-12-05;修订日期:2023-02-23。

第一作者简介:朱珍君(1987—),女,博士研究生,海洋地质学、沉积学。E-mail: 3011200003@cugb.edu.cn。

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0605400);国家自然科学基金项目(41576066);教育部产学研合作协同育人项目(202102072009);国家自然科学基金重点项目(42230816)。

depositional centers, low tectonic activity rate, and inadequate sediment supply, with small and numerous fan deltas well-developed in gentle slope zones and small braided river deltas developed in steep slope zones. The main syn-rift stage witnessed sufficient sediment supply, larger but fewer fans developed in steep slopes and the braided river delta enlarged and combined into larger ones in gentle slopes, due to intensive faulting activities. The late syn-rift stage experienced the gradual disappearance of fault-related source-to-sink systems and the development of large floor fans at the slope break zones due to the ever-incrementing river incision as the gentle slope zones were under the influence of rapidly dropping sea level. Under the joint control of tectono-sedimentary pattern, parent rock types and boundary conditions, five source-to-sink systems were developed during different tectonic stages: ① metamorphic rock-dominated parent rocks—SE-trending U-shaped paleo-valley—braided river delta in the northern gentle slope zone, ② volcanic rock-dominated parent rocks—NE-trending faulted-trough /SE-trending V/U-shaped paleo-valley—braided river delta/basin floor fan in the southern gentle slope zone, ③ intrusive rock-dominated parent rocks—SW-trending paleo-valley—fan delta in the northern part of the Lingfeng Uplift, ④ volcanic rock (in early stage)/metamorphic rock (in late stage)—SW-trending paleo-valley/NE-trending faulted-trough—proximal fan delta system in the southern section of Lingfeng Uplift, and ⑤ intrusive and metamorphic rocks—SW/S-trending paleo-valley—fan delta/braided river delta in the Yandang Uplift. Quantitative statistical results of sediment routing systems show that the paleo-valleys and faulted trough in gentle slope zones are wide and shallow, whereas those in the steep slope zones are narrow and deep. The cross-sectional areas of the sediment routings in the early and late syn-rift stages display a positive correlation with the areas of corresponding fan/delta complexes in the Sag.

**Key words:** rifted basin, source-to-sink system, tectonism-sedimentation, Paleocene, Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin

引用格式:朱珍君,李琦,陈贺贺,等.东海陆架盆地丽水凹陷古新统源-汇系统耦合及时-空演化[J].石油与天然气地质,2023,44(3):735-752. DOI:10.11743/ogg20230316.

ZHU Zhenjun, LI Qi, CHEN Hehe, et al. Source-to-sink coupling and temporal-spatial evolution in the Lishui Sag of East China Sea Shelf Basin during the Paleocene[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 735-752. DOI: 10.11743/ogg20230316.

源-汇系统研究将沉积学研究通过沉积物搬运通道扩展至物源区与沉积区<sup>[1-3]</sup>,已逐渐成为地球科学领域广为关注的重要课题。近年来,源-汇系统研究已经逐步从大陆边缘盆地走向断陷盆地,主要强调复杂地貌和构造作用对源-汇系统的影响,开展物源、搬运通道与沉积响应的定量-半定量研究<sup>[4-13]</sup>。受构造幕式多期活动和盆内外多物源水系影响,断陷湖盆源-汇系统过程复杂、沉积体系多变。现阶段断陷盆地构造-沉积演化研究多基于Gawthorpe等<sup>[14]</sup>的模型进行细化研究,强调源-汇系统内构造作用、海平面和气候等因素在盆地几何形态、沉降速率、沉积物通量、汇水盆地规模及形态等方面的控制作用,进而影响盆地内部层序充填和沉积体系展布<sup>[14-17]</sup>。然而,受限于深时源-汇系统物源区的保存程度及埋藏深度,断陷盆地从源到汇沉积物分散过程的研究难度较大。由于沉积物搬运剥蚀,以盆外水系为主导的断陷盆地缓坡带源区汇水盆地通常难以恢复,研究较少;而陡坡带源区面积一般较小,多个源区对应一个沉积区,因此其地貌学参数相关性较弱<sup>[6]</sup>。在盆地边缘,由于河流或三角洲分流河道进入湖盆/海盆后地形坡度变化,在盆缘或者断层陡坡带边

界往往发育不同程度的下切,这些下切在漫长的地质历史演化过程中相对容易保存,因此对这些沟谷体系的综合表征能够为盆地沉积充填提供限定<sup>[4,18]</sup>。

东海陆架盆地丽水凹陷古新统表现为典型断陷湖盆沉积特征。受控于灵峰主断裂幕式构造活动,丽水凹陷呈典型地堑、半地堑结构<sup>[19-23]</sup>。丽水凹陷油气资源潜力大,油气显示普遍且含油气系统的各地质要素发育良好。然而1997年后,丽水凹陷勘探停滞不前,至今未获工业油气流。通过对丽水凹陷勘探的整体解剖,认为长期勘探效果不理想的主要原因是所钻构造源-汇-聚条件不利。受钻井及地震资料限制,盆地内不同构造位置物源差异不明确<sup>[24-30]</sup>;前人对于丽水凹陷沉积体系的研究也已有一定认识,但多集中于丽水西洼明月峰组<sup>[31-34]</sup>,对于灵峰组及月桂峰组的沉积体系研究较少<sup>[35]</sup>;源-汇之间的搬运体系更是少有学者涉及。侯国伟等<sup>[29]</sup>以源-汇系统理论为指导,在丽水凹陷识别侵蚀沟谷、断面和断槽3种汇聚通道;Fu等<sup>[36]</sup>根据碎屑锆石U-Pb和重矿物资料重建了早古新世到始新世的物源分布及演化过程,并根据元素分析和微体古生物学等资料将丽水凹陷源-汇系统分为封闭湖

泊、开放式海洋和开放式海湾3类。但对源-汇系统的研究均未考虑丽水凹陷作为断陷盆地特有的幕式活动特征。因此亟需从盆地的构造-沉积背景出发,立足于对不同类型物源的分析,精细刻画多种沉积物搬运通道,建立不同构造阶段陡、缓坡源-汇系统耦合模式。本文基于盆内外物源特征、沉积碎屑搬运体系特征及沉积体系研究,从盆地构造演化出发,通过不同构造阶段源-汇系统地貌学参数半定量关系分析,明确丽水凹陷不同构造单元断陷期源-汇系统时-空耦合及其演化,为丽水凹陷中-深层陡、缓坡沉积体目标勘探提供坚实的沉积框架,同时对以盆外水系为主导的断陷盆地源-汇系统研究有一定的借鉴意义。

## 1 地质背景

### 1.1 盆地构造演化

丽水凹陷位于东海陆架盆地西南缘,北部与椒江凹陷相邻;东部毗邻雁荡凸起;西部与闽浙隆起区相接,呈NE-SW展布<sup>[37-38]</sup>(图1a),可划分为丽东洼陷、丽西洼陷、丽南洼陷和灵峰凸起4个次级构造单元(图1b)。

受太平洋板块的俯冲与后撤、菲律宾板块的楔入

影响<sup>[23, 39-40]</sup>,东海陆架盆地于晚白垩世开始裂陷,形成一系列断陷盆地<sup>[23]</sup>。丽水凹陷整体经历了断陷期、拗陷期、反转期和稳定沉降期,具有“幕式”渐进伸展特征<sup>[21, 23, 37]</sup>。丽水凹陷控盆边界断层——灵峰主断裂的分段生长、连接和衰亡控制盆地断陷期构造演化。断陷早期,灵峰主断裂分段生长,丽水凹陷为多个分散孤立小洼陷,呈隆-凹相间的构造地貌;灵峰凸起自基底开始出露地表,灵峰主断裂活动使得凸起遭受剥蚀并向盆内供源。断陷强烈期,灵峰主断裂强烈活动并侧向连接,使早期多个相对较小的次洼相连形成半地堑和地堑结构;灵峰主断裂活动速率在灵峰组下段达到峰值<sup>[23]</sup>,灵峰凸起持续遭受剥蚀。断陷晚期,灵峰主断裂活动减弱直至停止,凸起逐渐没于水下,各洼陷正式进入统一演化时期(图2)。

### 1.2 地层充填特征

丽水凹陷地层充填以新生代碎屑为主<sup>[41-42]</sup>。古新统自下而上发育了月桂峰组、灵峰组和明月峰组(图3)。

月桂峰组发育于断陷早期,地层呈东厚、西薄楔状分布(厚度300~3 000 m);岩性以大套泥岩为主,夹中-细砂岩,偶见砂砾岩。灵峰组发育于断陷强烈期,

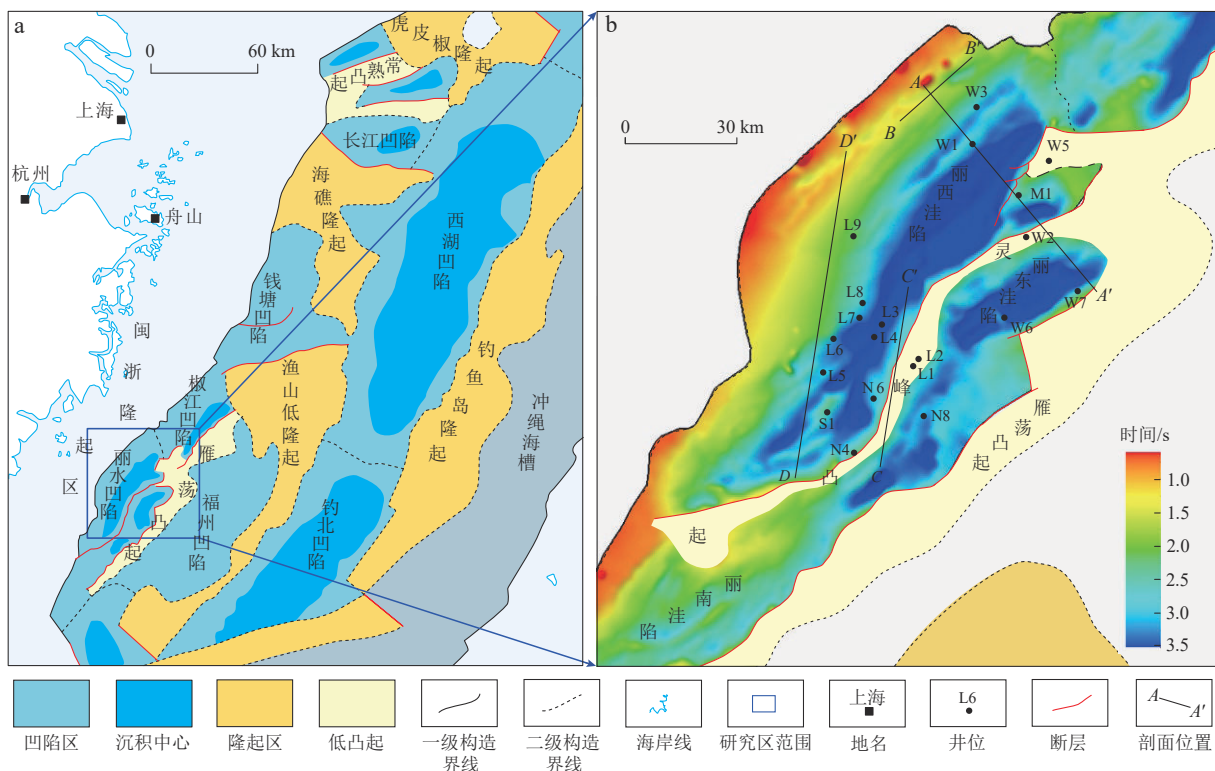


图1 东海陆架盆地丽水凹陷区域构造位置及盆地结构样式

Fig. 1 Regional tectonic location and basin structure of the Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin

a. 东海陆架盆地区域构造及研究区位置<sup>[39]</sup>; b. 丽水凹陷古新统底界构造

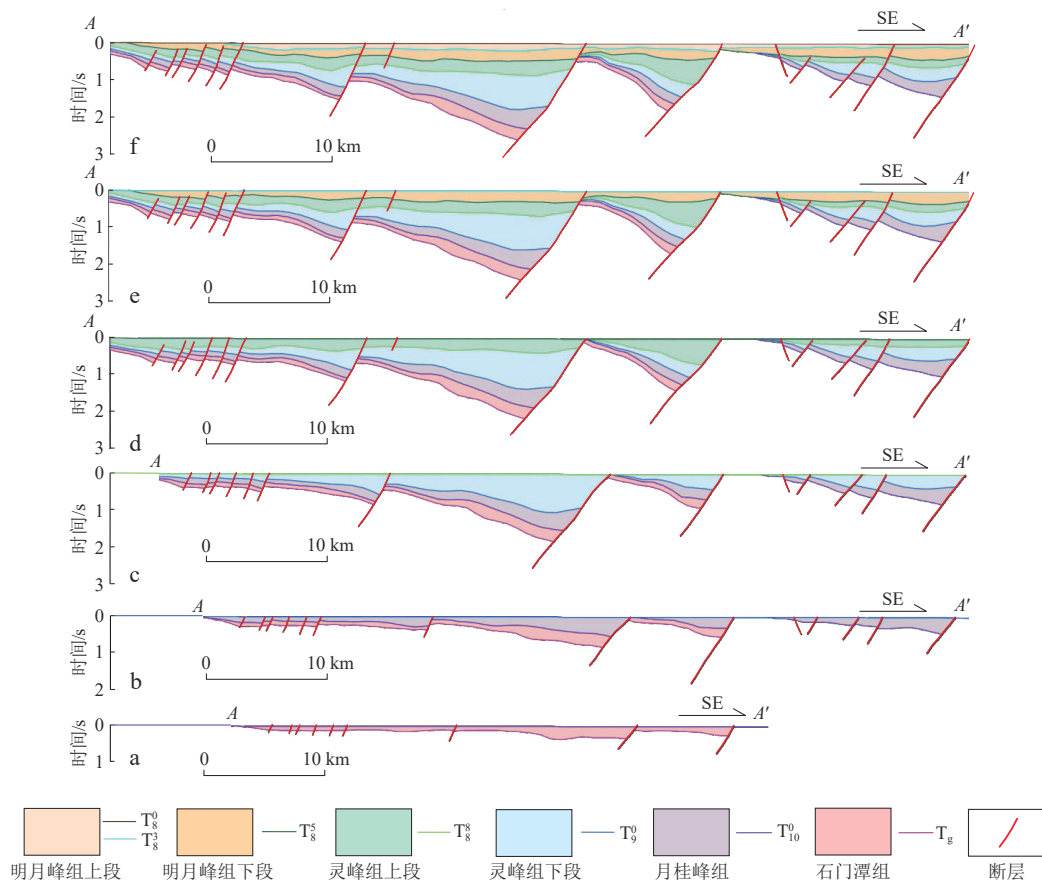


图2 东海陆架盆地丽水凹陷构造演化剖面

Fig. 2 Structural evolution sections along cross line AA' in the Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin

a. 石门潭组沉积期; b. 月桂峰组沉积期; c. 灵峰组下段沉积期; d. 灵峰组上段沉积期; e. 明月峰组下段沉积期; f. 明月峰组上段沉积期

地层渐厚充填,厚度最大约4 000 m;下部充填厚层细砂岩,向上岩性逐渐变细。明月峰组发育于断陷晚期,地层近似等厚充填,最大厚度约为2 000 m;岩性充填为“砂-泥-砂”组合特征,顶部夹煤层。

综合地震和测井层序边界识别划分及前人研究成果<sup>[43-44]</sup>,本次研究认为丽水凹陷古新统发育3个三级层序,月桂峰组、灵峰组和明月峰组各为一个三级层序,又细分为9个体系域(图3)。

## 2 物源体系特征

根据东海陆架盆地区域地质特征,丽水凹陷古新统沉积时期存在3大潜在物源区,分别为盆外闽浙隆起带、盆内中部灵峰凸起及盆内东侧雁荡凸起<sup>[24-30]</sup>。

### 2.1 基岩组成

丽水凹陷西侧闽浙隆起带广泛覆盖中生代火山岩,局部分布早-晚白垩世侵入岩(花岗岩)<sup>[24-30]</sup>。前人研究表明,丽水凹陷沉积区锆石U-Pb年龄谱系以单峰模式

为主,年龄集中在156~90 Ma,与闽浙隆起基岩年龄有较好的对应关系<sup>[26-27,30,45]</sup>。已钻井揭示,灵峰凸起基岩的主要岩石类型为花岗岩和片麻岩,其中北部W5井和M1井钻遇花岗岩,北部W2井钻遇片麻岩夹花岗岩,南部L1井和L2井钻遇片麻岩,南部N4井钻遇花岗岩片麻岩。付晓伟等<sup>[26]</sup>发现灵峰凸起附近钻井N6灵下段锆石年龄显示与月桂峰组继承性演化特征外,增加了变质锆石的年龄谱,表明灵峰凸起受中生代强烈岩浆侵入和火山喷发活动影响,变质岩基底上广泛分布中生代火山岩<sup>[23,43]</sup>。雁荡凸起已钻井揭示基底岩性均为花岗岩<sup>[29]</sup>。

### 2.2 岩石学特征

母岩的岩石学特征在经过搬运和再旋回后,部分信息能够保存在沉积盆地的沉积岩中,因此对比地层中沉积岩的岩石学特征能够有效地指示沉积物的来源及其沉积物源区的影响范围<sup>[46-48]</sup>。以变质岩及侵入岩岩屑为主的砂岩多发育石英或长石,岩屑含量少,而火山岩岩屑组分为为主的砂岩则富集岩屑<sup>[49]</sup>。本次研究岩石薄片鉴定选取丽水凹陷16口井628个岩心样品,归

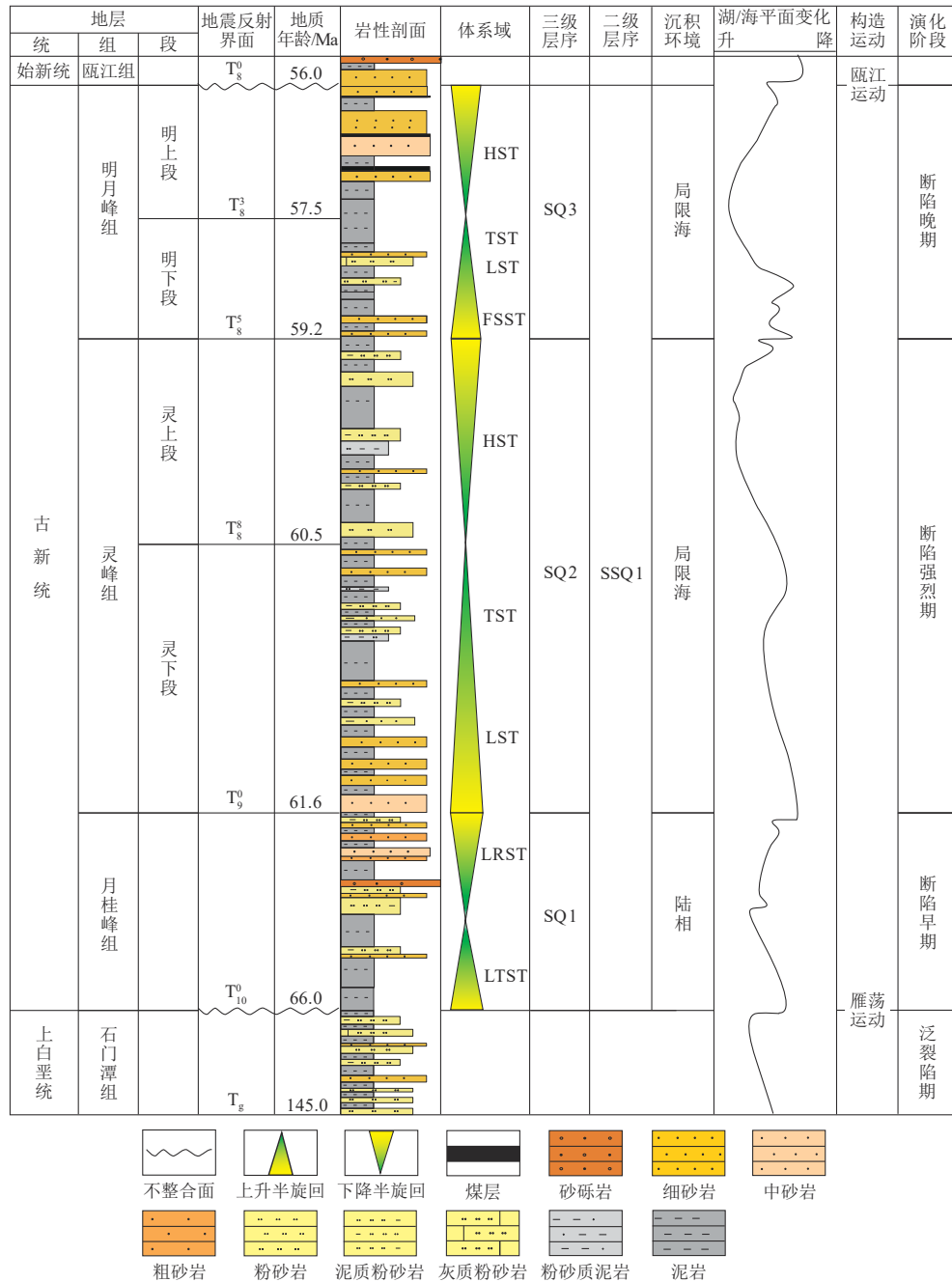


图3 东海陆架盆地丽水凹陷古新统地层综合柱状图

Fig. 3 Composite stratigraphic column of the Paleocene, Lishui sag, East China Sea Shelf Basin

HST. 高位体系域;TST. 海侵体系域;LST. 低位体系域;FSST. 强制海退体系域;LRST. 湖退体系域;LTST. 湖进体系域

位至月桂峰组—明月峰组后统计,结果表明:断陷早期丽水凹陷岩石学特征纵向上具有较好的继承性,但平面分布差异较大;其中丽西洼陷北部石英含量多,南部以岩屑砂岩为主,岩屑组分以火山岩为主(图4)。丽东洼陷则以岩屑长石砂岩、长石岩屑质石英砂岩为主,岩屑组分以侵入岩、变质岩为主,局部可见火山岩岩屑,与丽西洼陷差异较大(图4)。东西分异的岩石学特征表明了丽东洼陷和丽西洼陷沉积物源的不同。断陷高峰期和晚期,丽水凹陷不同构造单元岩石学特征与断陷

初期特征相似(图4)。灵峰凸起附近的N6,N4及S1井揭示,在灵峰组—明月峰组沉积时期岩屑组分中沉积岩岩屑含量逐渐增加(图4b),表明断陷早期—高峰期,盆内断隆剥蚀形成盆内物源区,近源碎屑增加。

### 2.3 重矿物特征

重矿物具有耐磨蚀、稳定性强的特征,通过长距离搬运,仍能保留较多的母岩特征<sup>[50]</sup>。本次研究重矿物分析选取丽水凹陷17口井397个样品,归位至月桂峰

峰组,认为灵峰组强烈断陷造成碎屑物质供给量大幅增加所致。明月峰沉积时期,锆石含量增加,且镜下锆石具磨圆特征,指示了盆外物源远距离搬运的特征。由锆石-电气石-金红石指数(*ZTR*指数)可知,湖盆中心(近灵峰凸起最高)*ZTR*指数高于东、西两侧,指示物源搬运方向。月桂峰组-灵峰组西洼低*ZTR*指数(图4a,b)进一步验证了该沉积时期锆石并不是沉积岩等再旋回物源,可能直接为火成岩类供源。

## 2.4 物源分区

结合碎屑锆石 U-Pb 年龄调研、岩矿及重矿物特征综合分析,丽水凹陷古新统沉积时期存在盆外(区域)闽浙隆起、盆内(局部)灵峰凸起和东部雁荡凸起多物源。盆外闽浙隆起物源由于剥蚀无法恢复,但盆内钻井岩石学特征的南、北差异指示了丽西洼陷南、北部由两个不同汇水盆地供源。缓坡带北部沉积物来自 A 物源区,物源区母岩以变质岩为主;缓坡带南部沉积物来自 B 物源区,物源区母岩以火山岩为主。灵峰低凸起根据基岩分布,北段划分为 C 物源区,以花岗岩基岩为主;中-南段 D 物源区以火山岩为主。雁荡凸起划分为 E 物源区,以侵入岩和变质岩为主。随着构造演化,灵峰凸起和雁荡凸起逐渐没于水下, C/D/E 物源范围从断陷早期到晚期逐渐减小。

## 3 搬运体系特征

沉积碎屑搬运体系是物源区与沉积区的连接,是向盆内输送沉积物的关键通道<sup>[48-50]</sup>。本次研究基于三维及二维地震解释结果,通过残余厚度法近似恢复丽水凹陷月桂峰组—明月峰组各沉积时期古地貌,并刻画物源搬运通道。丽水凹陷共识别两类物源搬运通道体系;古沟谷和断槽物源搬运通道。古沟谷物源搬运通道是断陷湖盆中最普遍的类型<sup>[51]</sup>,根据古沟谷深/宽比例不同,可进一步划分为 V 型、U 型和 W 型(图 5)。断槽搬运通道是指在盆地边缘部位因断裂活动而形成的相对处于低势区的槽道或断沟通道<sup>[11-12, 51-53]</sup>,是断陷湖盆沉积体系重要的搬运通道类型之一。

在丽水凹陷西部缓坡带垂直古沟谷延伸方向的地震剖面(图 6)显示,V 型古沟谷主要形成于古水系发育初始阶段,外部形态近似对称,内部多充填杂乱反射,下切作用强(图 5a,图 6)。U 型古沟谷主要发育于下游相对低势区,古水系交汇、合并后向“宽浅”U 型转化,内部地震反射呈垂向或侧向叠加(图 5b,图 6),指示水道频繁侧向摆动迁移。W 型古沟谷主要发育于近汇区地带,由于古水系晚期水动力减弱及汇区水体顶托作用影响,古沟谷向具有不对称外部形态的 W 型转化,内部呈侧向加积充填(图 5c,图 6)。丽水凹陷缓坡带南部和陡坡带南部垂直断槽延伸方向的地震剖面(图 6b, c)表明:断槽物源搬运通道主要受断层发育程度控制,与断层走向一致。地震上呈现不对称箕状充填结构,内部充填楔状、略显杂乱地震反射(图 4d,图 5c)。

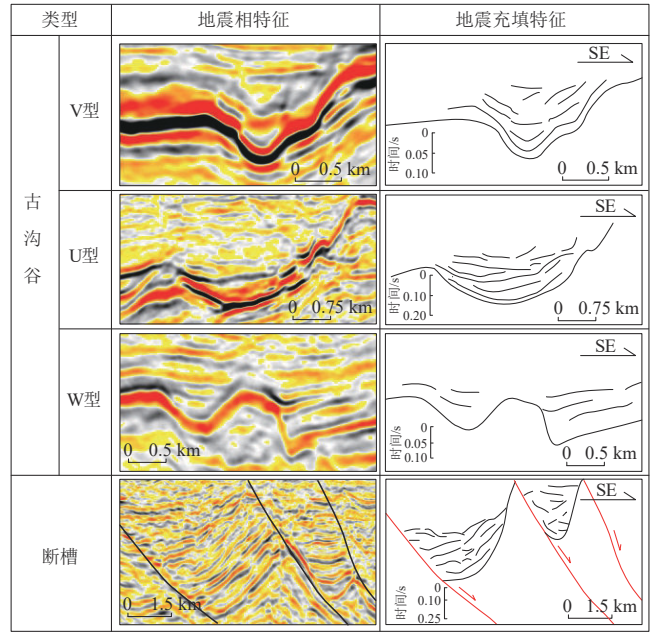


图5 东海陆架盆地丽水凹陷古新统物源搬运通道类型及充填样式

Fig. 5 Sediment transport channel types and filling styles of the Paleocene in the Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin

断陷早期受灵峰主断裂分段性控制,丽水凹陷隆洼相间的构造-沉积演化格局非常典型,洼陷周缘表现为多种物源搬运通道类型共存的组合特征。其中缓坡带中-南部发育断槽物源搬运通道,北部多为 U 型古沟谷(图 6a);陡坡带主要表现为 V 型古沟谷及断槽物源搬运通道组合类型(图 6a,图 6b,图 7a)。断陷强烈期,灵峰主断裂各分段断层快速生长连接,使得下降盘可容纳空间快速增大,湖平面迅速下降,打破上升盘的沉积侵蚀平衡形成下切,因此该沉积时期陡坡带物源搬运通道最为发育。缓坡带构造掀斜,地表出露进一步遭受侵蚀,导致搬运通道增加。随着断陷作用的持续增强和海水入侵,沉积物供给逐渐填补构造沉降提供的可容空间,古沟谷被充填,因此灵峰组搬运体系规模和密度小于月桂峰组(图 7b)。断陷晚期,断层活动减弱至停止,断槽型物源通道搬运能力逐渐减小并最终转为沉积空间;仅在丽西洼陷缓坡带中-南部发育古沟谷物源搬运通道(图 7c)。

## 4 沉积体系

沉积体系是物源供给、沉积物搬运及分散的综合响应<sup>[54]</sup>。受控盆断裂活动及多物源影响,断陷湖盆沉积体系复杂<sup>[14,17]</sup>。

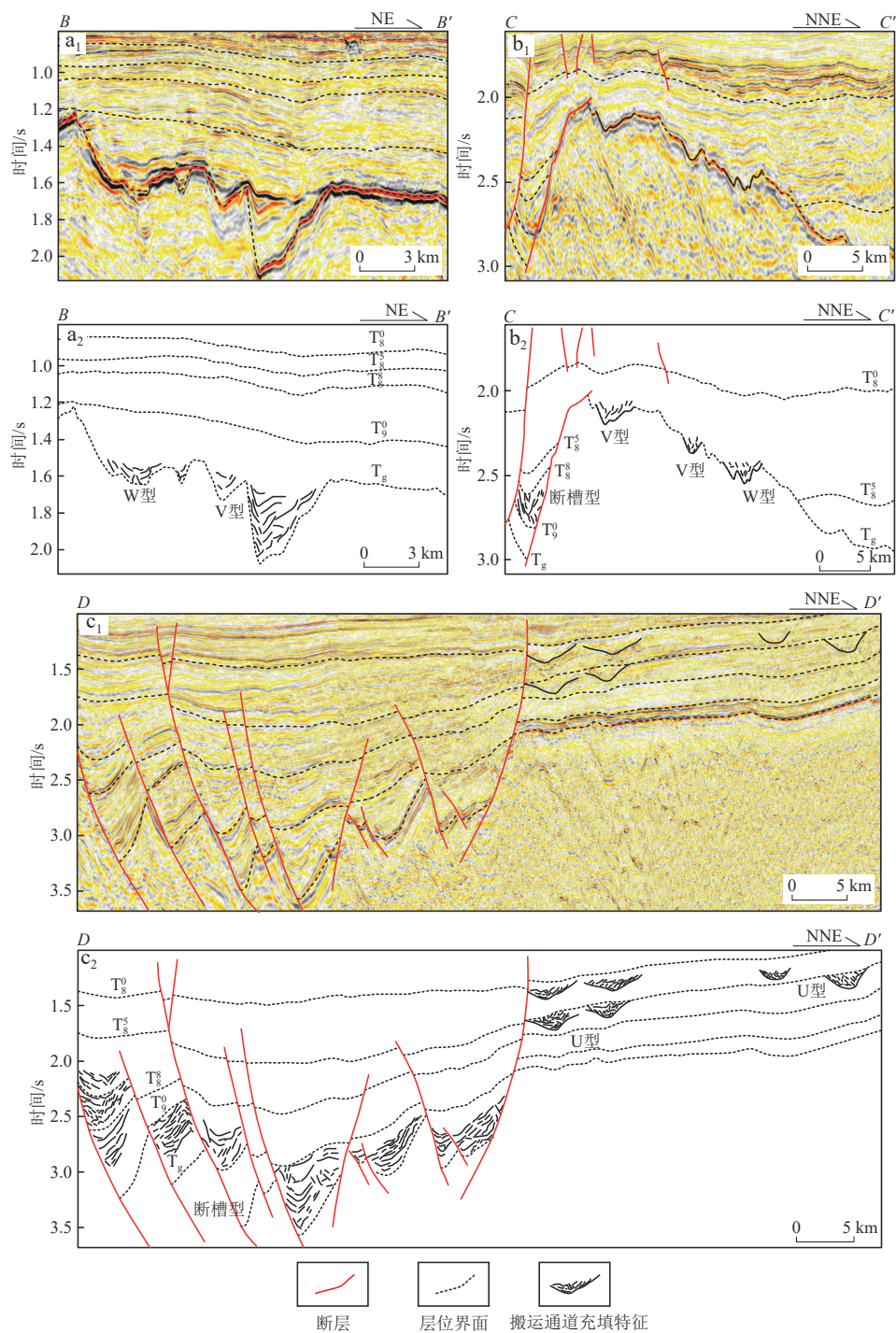


图6 东海陆架盆地丽水凹陷古新统物源搬运通道剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 6 Sections showing various sediment transport channels of the Paleocene, Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin (see Fig. 1b for the section location)

a<sub>1</sub>—c<sub>1</sub>. 搬运通道地震反射剖面; a<sub>2</sub>—c<sub>2</sub>. 地质解释

#### 4.1 沉积体系类型及特征

根据岩心、钻测井及地震资料,本次研究共识别扇三角洲、辫状河三角洲、盆底扇、滨浅湖及滨浅海5种沉积体系(图8)。

##### 4.1.1 扇三角洲

扇三角洲是丽水凹陷断陷早期和中期陡坡带主要沉积类型,湖退体系域发育最广。研究区扇三角洲以前缘亚相为主。地震反射表现为中-弱频、低连续

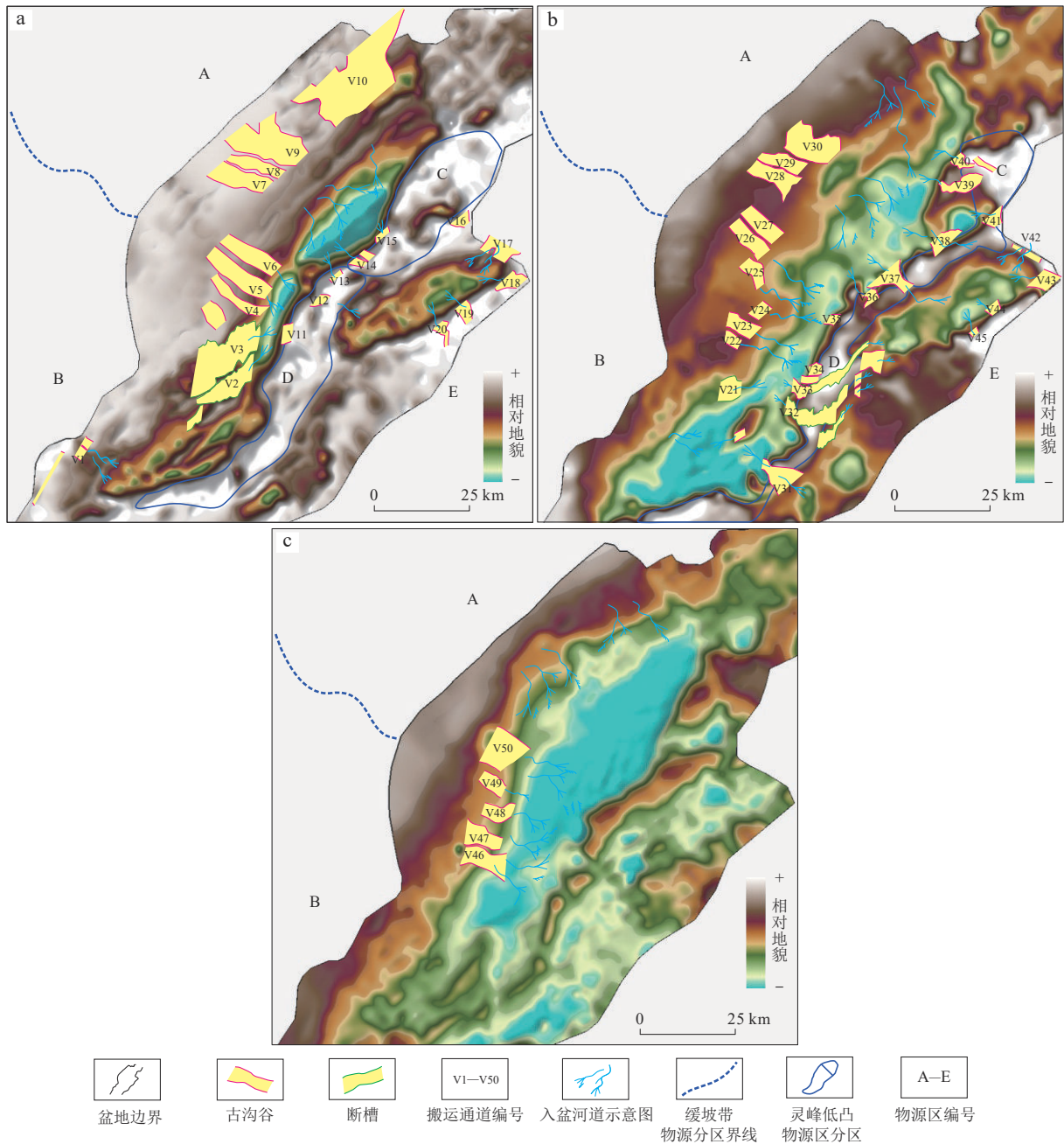


图7 东海陆架盆地丽水凹陷古新统近似古地貌及物源搬运通道分布

Fig. 7 Paleo-geomorphological characteristics and the sediment transport channels in the Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin

a. 断陷早期; b. 断陷强烈期; c. 断陷晚期

特征,外形呈楔状或帚状,内部反射杂乱,洼陷方向可见低角度前积或弱斜交型前积结构,指示物源供应充足且地形较陡的高能沉积环境。W6井(埋深3 644~3 646 m)、S1井(埋深2 582~2 584 m)等井的岩心以中砂岩、中-细砂岩和细砂岩为主,块状构造、层理发育,指示动荡水动力条件的高能前缘沉积环境。中-高幅齿状箱形或钟形GR曲线解释为水下分流河道沉积;中-高幅齿状漏斗形GR曲线则指示河口坝(图7a)。

#### 4.1.2 辫状河三角洲

辫状河三角洲是丽水凹陷西部缓坡带、灵峰凸起缓坡带及断陷晚期陡坡带的主要沉积类型,各三级层序湖退/高位体系域发育最广。西部缓坡带辫状河三角洲规模大,以前缘-前三角洲亚相为主;凸起缓坡带则为小型辫状河三角洲。

辫状河三角洲平原主要发育西部缓坡带边缘,地震反射同相轴多为中-弱振幅,呈发散或亚平行展布。



前缘亚相地震反射特征表现为中-强振幅、中-高连续的S型、斜交前积,由斜坡带向盆地深洼带方向,前积反射厚度略有增加,可进一步分为内前缘和外前缘。L5井(埋深3 751~3 754 m)等岩心主要为浅灰色、灰色中-细砂岩正、反韵律递变层理发育,指示相对高能沉积环境;正韵律旋回末期,生物扰动强度高,含大量钙质生物碎屑,见垂直虫孔;泥岩以块状构造为主,虫孔发育,砂质回填,生物扰动中等。外前缘整体岩性较细,以细砂岩和砂泥互层为主要特征,单砂层厚度薄;发育透镜状、脉状、波状及交错层理等沉积构造。前缘GR曲线整体表现为齿化箱形,泥质含量高处以指状为主。前三三角洲以泥岩和砂质泥岩为主,水平层理发育,见生物扰动;GR曲线为低幅锯齿状或平直状。

#### 4.1.3 盆底扇

丽水凹陷古新统明月峰组发育较大规模盆底扇<sup>[33-34,55]</sup>。明月峰组下段沉积时期,相对海平面快速下降致使盆缘斜坡遭受剥蚀形成强烈下切,垂物源方向发育较大规模U型下切谷(图6c)。三角洲前缘沉积物在西洼坡折带之下洼陷带形成盆底扇。丽西洼陷带钻井(L3, L4和L7井)概率粒度曲线整体呈两段式,显示搬运方式为跳跃和悬浮,以悬浮为主,交点位于粒径 $\Phi$ 值2处;C-M图反映为重流沉积。地震剖面上,盆底扇表现为双向下超、“底平顶凸”的丘状体,内部呈中-中弱振幅、中频较连续-断续相,多位于S型、斜交前积反射地震相前缘。钻井揭示,岩性为厚层灰黑、灰褐色泥岩夹薄层粉-细砂岩,岩心可见包卷层理等变形特征及泄水、砂质碟状构造等,指示快速堆积重力流沉积。GR曲线以齿化-微齿化、中-高幅钟形-箱形和齿状漏斗形为特征。

#### 4.1.4 湖泊

湖泊沉积体系发育于月桂峰组,主要为滨浅湖亚相。地震反射多表现为中-弱振幅、中-低连续亚平行特征,指示低能沉积环境。钻井揭示含砂率较低,W6井(埋深3 646.40~3 648.16 m)岩心为块状暗色泥岩夹灰色粉砂质条带,发育水平层理,无明显粒序。GR曲线呈低幅平滑或锯齿状。

#### 4.1.5 海洋(滨浅海)

海洋沉积体系主要发育于灵峰组和明月峰组,以滨浅海为主。地震反射呈中强-中弱振幅、连续-较连续平行-亚平行特征。W6井(埋深2 768~2 771 m)岩心显示海相暗色泥岩、粉砂质泥岩夹粉-细砂岩,纹层厚度

薄,发育块状层理和水平层理,泥岩中含较多微体古生物化石和黄铁矿微粒。GR曲线呈低幅齿状或平直状。

### 4.2 沉积体系平面分布及纵向演化

#### 4.2.1 月桂峰组

月桂峰组沉积时期,丽水凹陷为滨浅湖沉积背景。断陷早期灵峰主断裂分段活动,盆地发育孤立、小型沉积中心。西部缓坡多个古水系发育,携带盆外闽浙隆起剥蚀沉积物入湖,发育辫状河三角洲沉积体系;灵峰凸起、雁荡凸起及盆内隆起陡坡带发育扇三角洲沉积体系;凸起缓坡带发育小型辫状河三角洲沉积体系(图9a)。

#### 4.2.2 灵峰组

灵峰组下段沉积时期,受全球海平面变化影响,海水由东南向北侵入凹陷<sup>[35]</sup>,盆地由湖相变为局限海沉积环境。断陷强烈期,灵峰主断裂快速活动导致盆地拉张,沉积中心规模增大。灵峰凸起强烈剥蚀,向陡坡带提供大量碎屑沉积物,发育大规模扇三角洲沉积。西部缓坡带受构造掀斜影响坡度增大,沉积物搬运能力增强<sup>[56]</sup>,发育大-中型辫状河三角洲沉积(图9b)。灵峰组上段沉积时期,随着灵峰主断裂活动减弱,盆内物源逐渐削弱,沉积体系规模变小。

#### 4.2.3 明月峰组

明月峰组沉积时期,盆地断陷地貌差异减小并连为整一盆地。西部缓坡带辫状河三角洲沉积体系继承性发育;其下段沉积时期相对海平面快速下降,导致三角洲前缘沉积物在西洼坡折带之下垮塌,形成较大规模盆底扇<sup>[33-34,55]</sup>(图9c)。随后海平面缓慢上升至稳定后下降,西部大型辫状河三角洲向盆地方向进积,沉积范围扩大。灵峰凸起和雁荡凸起逐渐没于水下,东洼局部发育规模较小的辫状河三角洲沉积体系。

## 5 断陷盆地源-汇系统时-空配置

### 5.1 不同构造阶段源-汇系统地貌学参数半定量关系

由于沉积物搬运剥蚀,源区汇水盆地通常难以恢复和定量表征<sup>[6-9, 18, 57-59]</sup>。前人研究表明,汇水盆地面积和搬运通道存在正相关性<sup>[18, 57-58, 60]</sup>。因此通过高分辨率地震数据,基于层序地层学、地震沉积学等理论方

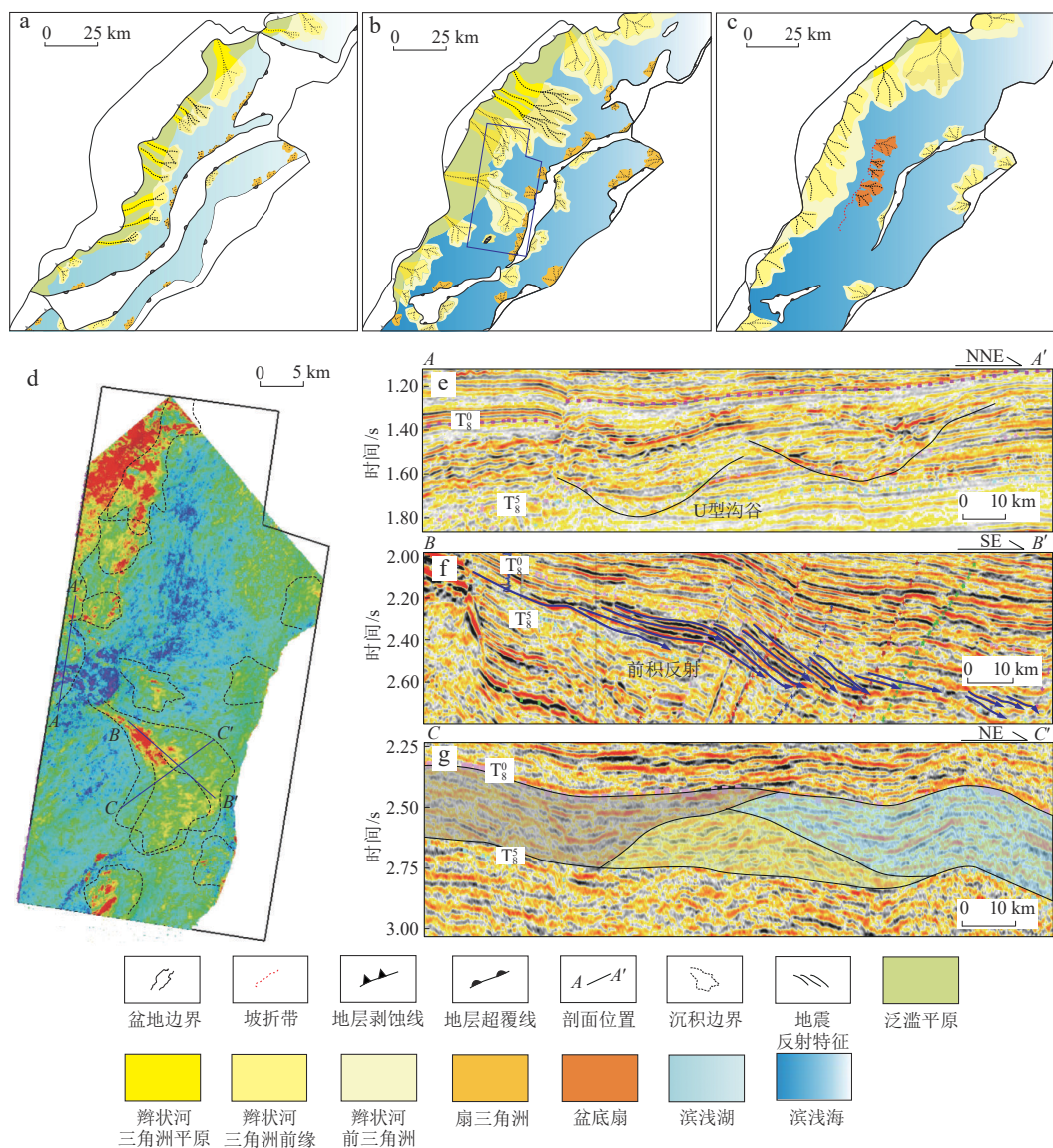


图9 东海陆架盆地丽水凹陷古新统沉积相平面图及典型地震切片解释

Fig. 9 Sedimentary facies distribution maps of the Paleocene and typical attribute slice interpretation of the upper E<sub>1</sub>l in the Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin

a. 月桂峰组; b. 灵峰组; c. 明月峰组; d. 灵峰组典型地震切片(切片位置见b); e. 古沟谷地震反射特征(剖面位置见d); f, g. 沉积体典型地震相特征(剖面位置见d)

法,最大程度的近似恢复深时源-汇系统中的古地貌,并通过三维地震数据精细刻画沉积物搬运通道几何参数<sup>[6, 18, 51, 58]</sup>,可以间接反映汇水盆地地貌。沉积物搬运通道量化表征可以通过测量不同类型通道的宽度、深度及宽/深比,近似计算其横截面积,进而表征沉积物进入盆地之前的搬运方式及物源输送的能力大小和速率<sup>[18, 58, 60]</sup>。本次研究开展了50条主要搬运通道定量分析,结果显示:丽水凹陷古新统缓坡带24条搬运通道宽度为2.79~13.15 km,平均深度约120 m,平均宽/深比约55.5;陡坡带26条搬运通道宽度为1.62~5.90 km,平均深度约160 m,平均宽/深比约

26.8(表1)。整体上,缓坡带物源搬运通道宽/深比大于陡坡带,其规模较大。

为了进一步研究物源搬运通道与沉积体的耦合关系,将追踪的所有沟谷/断槽横截面积(宽度×深度÷2)之和取平均值,设为 $x$ ,其对应的盆地方向的沉积体面积设为 $y$ ,求取线性关系。结果表明:物源搬运通道横截面积与盆内对应沉积体面积具有一定的正相关性,断陷晚期相关性最高, $R^2$ 为0.884 1( $R$ 为相关系数),断陷早期次之( $R^2=0.803$  1),断陷高峰期相关性最差, $R^2$ 仅为0.030 0(图10a)。对不同构造单元搬运通道-沉积体相关性对比分析表明(图10b),

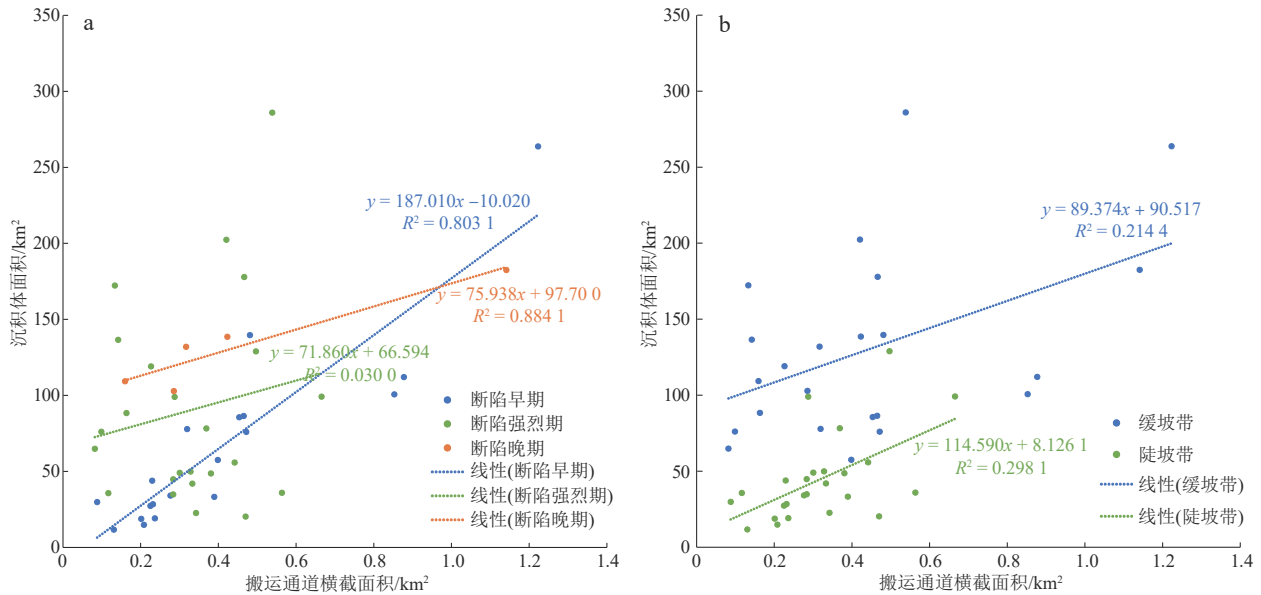


图 10 东海陆架盆地丽水凹陷古新统物源搬运通道横截面积与沉积体面积参数半定量关系

Fig. 10 Semi-quantitative relationship between cross sectional areas of the sediment transport channels and the areas delta/fan complexes in the Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin

a. 不同构造阶段; b. 不同构造单元

陡坡带( $R^2=0.298$ )相关性略好于缓坡带( $R^2=0.214$ ),表明近源供给的陡坡带源-汇耦合系统受断层活动性影响明显,但其沉积体系发育规模仍与物源搬运体系呈正相关关系(图10)。缓坡带源-汇系统整体相关性弱,但整体沉积通量和沟谷横截面积均较大,指示长距离、大规模远源搬运形成的源-汇系统优势较大。断陷早期以先存水系为主导,断陷晚期断层活动甚弱,进一步证实断层活动性对以盆外水系为主导的断陷盆地缓坡带源-汇系统的影响。因此,在无断层活动前提下,沟谷和沉积体有较好的相关性,即沟谷越大,沉积体越大。

## 5.2 不同构造阶段源-汇系统时-空耦合及其演化

丽水凹陷古新统受构造-沉积格局、边界条件及母岩类型联合控制,形成多种类型的沉积体系,从而形成不同类型的源-汇系统。即不同构造阶段,构造活动强度、湖(海)平面变化及古气候等差异,形成的源-汇系统不尽相同。此外,断陷盆地内部陡坡带与缓坡带作为独立的次级构造单元,形成过程和地貌结构不同,进而导致相应源-汇系统要素也存在差异。

### 5.2.1 断陷早期

断陷早期,构造活动速率整体较低,但平面差异性明显,局部强烈活动的断层下降盘形成若干彼此分散、水体较浅的小湖盆,控沉积断层分段控制陡坡带盆地充填,但物源供给量较少,主要发育小型扇三角洲沉积

体系。断裂陡坡带汇盆地主要发育于盆内灵峰凸起北段、中南段和雁荡凸起构造带。灵峰凸起北部C物源区以侵入岩母岩为主,灵峰凸起中南段D物源区以火山岩为主,雁荡凸起E物源区以侵入岩和变质岩为主;搬运体系以V型及U型古沟谷为主,受断陷初期灵峰主断裂活动北强南弱特征影响,北段搬运体系规模相对较大。因此断陷早期陡坡带源-汇系统分为3种:①灵峰凸起北段侵入岩母岩-SW向古沟谷-近源扇三角洲体系;②灵峰凸起中-南段火山岩母岩-SW向古沟谷/NE向断槽-近源扇三角洲体系;③雁荡凸起侵入岩及变质岩母岩-SW/S向古沟谷-近源扇三角洲/辫状河三角洲体系。

缓坡带源-汇系统主要受控于湖平面升降和物源供给。断陷初期,湖平面较低,先存水系供源形成小型辫状河三角洲。缓坡带北部母岩类型以变质岩(A物源区)为主,在盆地缓坡带以发育U型古沟谷为主,古水系顺古沟谷向丽西洼陷北部搬运供源。缓坡带中-南部以火山岩母岩为主(B物源区),受NE向断裂带影响,发育断槽物源通道(图11)。因此将断陷早期缓坡带源-汇系统分为2种:①缓坡带北部变质岩母岩为主-SE向U型古沟谷-远源辫状河三角洲;②缓坡带中-南部火山岩母岩-NE向断槽-小型辫状河三角洲。

物源搬运通道横截面积与盆内对应沉积体面积相关性表明(表1;图10),断陷早期源-汇系统受断层控制程度较弱,主要受控于先存水系及盆地地貌。断陷

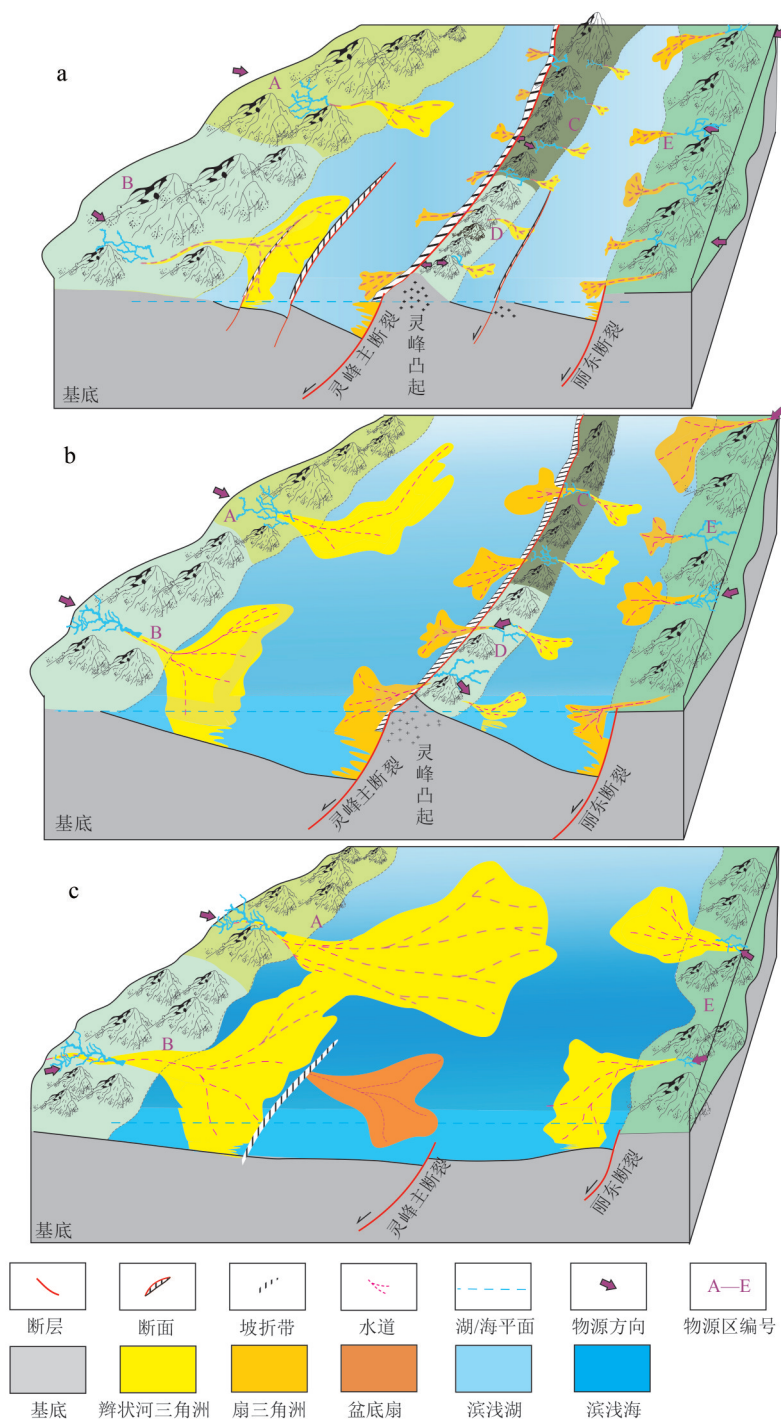


图 11 东海陆架盆地丽水凹陷古新统不同构造阶段源-汇系统耦合模式

Fig. 11 S2S system coupling patterns of the Paleocene in the Lishui Sag, East China Sea Shelf

a. 断陷早期; b. 断陷强烈期; c. 断陷晚期

早期丽水凹陷隆-洼相间, 孤立小洼陷分隔, 形成多而小的源-汇系统(图 11a)。

### 5.2.2 断陷强烈期

断陷强烈期, 灵峰主断裂持续活动并侧向生长连接, 使得湖盆快速拉张发生深陷, 形成分布面积广且深

的半地堑; 同时灵峰凸起强烈剥蚀提供大量沉积碎屑, 使得陡坡带早期多个小型源-汇系合并, 规模变大。随着物源区持续剥蚀, 灵峰凸起中-南段局部中生代火山岩剥蚀殆尽, 出露元古宇变质岩(图 4b), 因此灵峰凸起中-南段源-汇系统与早期不同。

缓坡带南部断槽通道受断层活动影响以及早期沉

积物充填,其输砂通道的作用及影响能力逐渐减小。但受构造掀斜作用遭受广泛暴露剥蚀,缓坡带下切古沟谷数量增多,沉积物供给充足,使得缓坡带源-汇系统规模扩大。因此断陷强烈期源-汇系统受断层活动控制显著,物源搬运通道横截面积与盆内对应沉积体面积相关性差(表1;图10)。

### 5.2.3 断陷晚期

断陷晚期,断层逐渐停止侧向生长且活动性减弱。灵峰凸起逐渐没于水下,使得陡坡带汇水盆地从明月峰组沉积早期开始先南后北逐渐消失,沉积体系由扇三角洲向辫状河三角洲转换,形成近源辫状河三角洲源-汇系统。缓坡带受强制海退和坡折共同影响,发育大规模盆底扇(图9c,图11c)。断陷晚期源-汇系统受构造影响小,水系和地貌为主要控制因素。

## 6 结论

1) 丽水凹陷古新统存在盆外(区域)闽浙隆起、盆内(局部)灵峰凸起和东部雁荡凸起等多个物源。基岩组成和岩石学特征指示丽水凹陷物源母岩区存在分异,其中缓坡带北部物源母岩以变质岩为主,南部以火山岩为主;灵峰凸起北段以花岗岩基岩为主,南段则为变质岩基岩,其上覆盖大量中生代火山岩;雁荡凸起以侵入岩和变质岩为主。灵峰凸起和雁荡凸起在断陷晚期逐渐没于水下,盆地以闽浙隆起为主要物源区。

2) 丽水凹陷发育古沟谷和断槽物源输送通道,其中丽西洼陷缓坡带以U型谷为主,沟谷体系规模最大,具有较大的宽/深比;陡坡带搬运体系在断陷高峰期时开始显著发育,随着断层活动性减弱,下切作用逐渐停止并被充填。不同构造阶段搬运体系的规模和密度各有不同,与断层活动性和原始盆地水系配置有关。沟谷体系的综合表征能够为盆地沉积充填提供限定。

3) 丽水凹陷沉积充填可分为3个演化阶段:断陷早期,盆地发育孤立、小型沉积中心,充填辫状河三角洲-扇三角洲-湖泊沉积;断陷强烈期,沉积规模增大、连通性增强,海水侵入,充填扇三角洲-辫状河三角洲-滨浅海沉积;断陷晚期,丽水凹陷连为一体,主要发育辫状河三角洲-滨浅海沉积。

4) 受构造-沉积格局、母岩类型及边界条件联合控制,丽水凹陷古新统不同构造阶段继承性发育5种源-汇系统,不同阶段略有变化。断陷晚期,盆内断隆相关的近源源-汇系统逐渐消亡。

## 参 考 文 献

- [1] MEADE R H. Sources, sinks, and storage of river sediment in the Atlantic drainage of the United States[J]. The Journal of Geology, 1982, 90(3): 235-252.
- [2] ALLEN P A. From landscapes into geological history[J]. Nature, 2008, 451(7176): 274-276.
- [3] 朱红涛, 朱筱敏, 刘强虎, 等. 层序地层学与源-汇系统理论内在关联性与差异性[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 763-776.
- [4] ZHU Hongtao, ZHU Xiaomin, LIU Qianghu, et al. Sequence stratigraphy and source-to-sink system: Connections and distinctions[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 763-776.
- [5] SØMME T O, HELLAND-HANSEN W, MARTINSEN O J, et al. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: A basis for predicting semi-quantitative characteristics in subsurface systems[J]. Basin Research, 2009, 21(4): 361-387.
- [6] SØMME T O, JACKSON C A L. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Møre-Trøndelag area of southern Norway: Part 2-sediment dispersal and forcing mechanisms[J]. Basin Research, 2013, 25(5): 512-531.
- [7] SØMME T O, JACKSON C A L, VAKSDAL M. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Møre-Trøndelag area of southern Norway: Part 1-depositional setting and fan evolution[J]. Basin Research, 2013, 25(5): 489-511.
- [8] NYBERG B, HELLAND-HANSEN W, GAWTHORPE R L, et al. Revisiting morphological relationships of modern source-to-sink segments as a first-order approach to scale ancient sedimentary systems[J]. Sedimentary Geology, 2018, 373: 111-133.
- [9] 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等. 沙垠田凸起前古近系基岩分布及源-汇过程[J]. 地球科学, 2016, 41(11): 1935-1949.
- [10] LIU Qianghu, ZHU Xiaomin, LI Shunli, et al. Pre-Palaeogene bedrock distribution and source-to-sink system analysis in the Shaleitian uplift[J]. Earth Science, 2016, 41(11): 1935-1949.
- [11] 朱红涛, 杨香华, 周心怀, 等. 基于地震资料的陆相湖盆物源通道特征分析: 以渤中凹陷西斜坡东营组为例[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(1): 121-129.
- [12] ZHU Hongtao, YANG Xianghua, ZHOU Xinhua, et al. Sediment transport pathway characteristics of continental lacustrine basins based on 3-D seismic data: An example from Dongying Formation of western slope of Bozhong Sag[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2013, 38(1): 121-129.
- [13] 朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 等. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1851-1870.
- [14] ZHU Hongtao, XU Changgui, ZHU Xiaomin, et al. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin[J]. Earth Science, 2017, 42(11): 1851-1870.

- [11] 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 1-11.  
XU Changgui, DU Xiaofeng, XU Wei, et al. New advances of the “source-to-sink” system research in sedimentary basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 1-11.
- [12] 李忠诚, 鲍志东, 魏兆胜, 等. 箕状断陷湖盆初始裂陷期层序地层与沉积充填特征——以松辽盆地梨南洼槽下白垩统火石岭组二段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 670-681.  
LI Zhongcheng, BAO Zhidong, WEI Zhaosheng, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary filling characteristics of a half-graben rift lake basin during the initial rifting period: A case study of the 2nd member of Lower Cretaceous Huoshiling Formation, Linan Sag, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 670-681.
- [13] 张自力, 李琦, 朱筱敏, 等. 陆相断陷湖盆滩坝沉积特征与地震沉积学响应——以渤海湾盆地霸县凹陷古近系沙河街组一段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 970-989.  
ZHANG Zili, LI Qi, ZHU Xiaomin, et al. Sedimentary characteristics and seismic sedimentologic responses of beach-bar deposits in a downfaulted lacustrine basin: A case study of Es<sup>1</sup> in the Palaeogene Baxian Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 970-989.
- [14] GAWTHORPE R L, LEEDER M R. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins[J]. Basin Research, 2000, 12(3/4): 195-218.
- [15] LEEDER M R, MACK G H, SALYARDS S L. Axial-transverse fluvial interactions in half-graben: Plio-Pleistocene Palomas Basin, southern Rio Grande Rift, New Mexico, USA[J]. Basin Research, 1996, 8(3): 225-241.
- [16] RAVNÅS R, STEEL R J. Architecture of marine rift-basin successions[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(1): 110-146.
- [17] 林畅松. 盆地沉积动力学: 研究现状与未来发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 685-700.  
LIN Changsong. Sedimentary dynamics of basin: Status and trend[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 685-700.
- [18] CHEN Hehe, WOOD L J, GAWTHORPE R L. Sediment dispersal and redistributive processes in axial and transverse deep-time source-to-sink systems of marine rift basins: Dampier sub-basin, Northwest Shelf, Australia[J]. Basin Research, 2021, 33(1): 227-249.
- [19] 王毅, 姜亮, 杨伟利. 丽水-椒江凹陷断裂构造运动学[J]. 地质科学, 2000, 35(4): 441-448.  
WANG Yi, JIANG Liang, YANG Weili. Kinematical analysis on faults in the Lishui-Jiaojiang Sag[J]. Chinese Journal of Geology, 2000, 35(4): 441-448.
- [20] 杨伟利, 王毅. 丽水-椒江凹陷伸展运动分析[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(3): 8-10.  
YANG Weili, WANG Yi. The analysis of the basin's extension in the Lishui-Jiaojiang sag[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(3): 8-10.
- [21] 葛和平, 高顺莉, 周平, 等. 东海丽水凹陷断陷结构特征及其油气地质意义[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(11): 1025-1035.  
GE Heping, GAO Shunli, ZHOU Ping, et al. Fault structural characteristics and its petroleum geological significance of Lishui Sag in Donghai Basin[J]. Advances in Geosciences, 2019, 9(11): 1025-1035.
- [22] 蔡周荣, 夏斌, 孙向阳, 等. 丽水-椒江凹陷断裂构造特征与成盆机制的关系[J]. 海洋地质动态, 2007, 23(10): 1-5.  
CAI Zhourong, XIA Bin, SUN Xiangyang, et al. The relationship between tectonic feature and formation mechanism of Lishui-Jiaojiang Depression[J]. Marine Geology Frontiers, 2007, 23(10): 1-5.
- [23] 刘欢, 许长海, 申雯龙, 等. 东海陆架盆地丽水凹陷构造演化特征[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 949-957, 985.  
LIU Huan, XU Changhai, SHEN Wenlong, et al. Tectonic evolution characteristics of Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(6): 949-957, 985.
- [24] 刘俊海, 杨香华, 吴志轩, 等. 东海盆地丽水凹陷古新统锆石示踪作用分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(1): 85-92.  
LIU Junhai, YANG Xianghua, WU Zhixuan, et al. Zircon tracing application of Paleocene-Eocene in Lishui Sag of the East China Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(1): 85-92.
- [25] 付晓伟, 朱伟林, 陈春峰, 等. 丽水-椒江凹陷西斜坡明月峰组上段碎屑锆石物源[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(12): 1987-2001.  
FU Xiaowei, ZHU Weilin, CHEN Chunfeng, et al. Detrital zircon provenance of Upper Mingyuefeng Formation in west slope of Lishui-Jiaojiang Sag, the East China Sea[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2015, 40(12): 1987-2001.
- [26] 付晓伟, 朱伟林, 钟楷, 等. 东海丽水凹陷晚古生代碎屑锆石的发现及其意义[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 924-931.  
FU Xiaowei, ZHU Weilin, ZHONG Kai, et al. Discovery of Late Paleozoic detrital zircons in Lishui Sag, East China Sea, and its significance[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(6): 924-931.
- [27] 陈春峰, 钟楷, 朱伟林, 等. 东海丽水凹陷物源及其对储层物性影响[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 963-972.  
CHEN Chunfeng, ZHONG Kai, ZHU Weilin, et al. Provenance of sediments and its effects on reservoir physical properties in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 963-972.
- [28] 陈春峰, 朱伟林, 付晓伟, 等. 东海椒江凹陷晚古新世物源变化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(10): 1522-1530, 1548.  
CHEN Chunfeng, ZHU Weilin, FU Xiaowei, et al. Provenance

- change and its influence in Late Paleocene, Jiaojiang Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(10): 1522-1530, 1548.
- [29] 侯国伟, 刘金水, 蔡坤, 等. 东海丽水凹陷古新统源-汇系统及控砂模式[J]. 地质科技情报, 2019, 38(2): 65-74.
- HOU Guowei, LIU Jinshui, CAI Kun, et al. Source-to-sink system and sand-controlling model of Paleocene in Lishui Sag, East China Sea Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(2): 65-74.
- [30] 刘正华, 侯元立, 陈淑慧, 等. 东海丽水凹陷早新生代沉积特征及物源演化[J]. 地球科学, 2022, 47(7): 2562-2572.
- LIU Zhenghua, HOU Yuanli, CHEN Shuhui, et al. Early Cenozoic sedimentary characteristics and provenance evolution of Lishui Depression, East China Sea[J]. Earth Science, 2022, 47(7): 2562-2572.
- [31] 刘景彦, 陈志勇, 林畅松, 等. 东海丽水西次凹古新统明月峰组层序—体系域分析及沉积体系展布[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 380-386.
- LIU Jingyan, CHEN Zhiyong, LIN Changsong, et al. Analysis on sequence-tracts and distribution of depositional systems of Paleocene Mingyuefeng Formation in West Lishui Sag, East China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 380-386.
- [32] 王存武, 梁建设, 田兵, 等. 丽水—椒江凹陷明月峰组多因素综合取证沉积体系分析[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(4): 31-37, 48.
- WANG Cunwu, LIANG Jianshe, TIAN Bing, et al. Analysis of depositional systems of Mingyuefeng Formation in the Lishui-Jiaojiang Sag based on comprehensive multiple-factor studies[J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(4): 31-37, 48.
- [33] 王红岩. 丽水凹陷远岸水下扇体识别及特征分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(4): 924-931.
- WANG Hongyan. Characteristic analysis and identification of far shore underwater fan in Lishui Depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(4): 924-931.
- [34] 蔡坤, 徐东浩, 袁悦, 等. 东海丽水凹陷西次凹明月峰组海底扇沉积特征及沉积模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(1): 22-30.
- CAI Kun, XU Donghao, YUAN Yue, et al. Sedimentary features and depositional model of the submarine fan of Mingyuefeng Formation in the Western Lishui Sag, East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(1): 22-30.
- [35] 田兵, 李小燕, 庞国印, 等. 叠合断陷盆地沉积体系分析——以东海丽水—椒江凹陷为例[J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 696-705.
- TIAN Bing, LI Xiaoyan, PANG Guoyin, et al. Sedimentary systems of the superimposed Rift-Subsidence basin: Taking Lishui-Jiaojiang Sag of the East China Sea as an example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(4): 696-705.
- [36] FU Chao, LI Shengli, LI Shunli, et al. Source-to-sink transformation processes between closed setting, semiopen setting, and opening setting: A case study of the West-East China Sea from the Paleocene to the Eocene[J]. Marine Geology, 2021, 442: 106640.
- [37] 刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化[J]. 地质学报, 2020, 94(3): 675-691.
- LIU Jinshui, XU Huaizhi, JIANG Yiming, et al. Mesozoic and Cenozoic basin structure and tectonic evolution in the East China Sea Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(3): 675-691.
- [38] 贾成业, 夏斌, 王核, 等. 东海陆架盆地丽水凹陷构造演化及油气地质分析[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(3): 397-401.
- JIA Chengye, XIA Bin, WANG He, et al. Characteristic of tectonic evolution and petroleum geology in Lishui Sag, East China Sea Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(3): 397-401.
- [39] ZHU Weilin, ZHONG Kai, FU Xiaowei, et al. The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: A new view[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 190: 89-111.
- [40] 李三忠, 曹现志, 王光增, 等. 太平洋板块中—新生代构造演化及板块重建[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 642-677.
- LI Sanzhong, CAO Xianzhi, WANG Guangzeng, et al. Mesozoic tectonic evolution and plate reconstruction of the Pacific plate[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 642-677.
- [41] 李德勇, 郭太宇, 姜效典, 等. 东海陆架盆地南部剥蚀厚度恢复及构造演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 913-923.
- LI Deyong, GUO Taiyu, JIANG Xiaodian, et al. Erosion thickness recovery and tectonic evolution characterization of southern East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 913-923.
- [42] 覃军, 张迎朝, 刘金水, 等. 东海陆架盆地丽水—椒江凹陷古新统L气田成藏过程与主控因素[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(4): 605-617.
- QIN Jun, ZHANG Yingzhao, LIU Jinshui, et al. Hydrocarbon accumulation process and main controlling factors of Paleocene L Gas Field in Lishui-Jiaojiang Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(4): 605-617.
- [43] 张银国, 葛和平, 杨艳秋, 等. 东海陆架盆地丽水凹陷古新统层序地层的划分及控制因素[J]. 海相油气地质, 2012, 17(3): 33-39.
- ZHANG Yinguo, GE Heping, YANG Yanqiu, et al. Division and controlling factors of Paleocene sequence strata in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(3): 33-39.
- [44] 刘丽娟, 陈建文, 张银国. 东海陆架盆地丽水凹陷古新统明月峰组层序地层学模式[J]. 世界地质, 2008, 27(2): 198-203.
- LIU Lijuan, CHEN Jianwen, ZHANG Yinguo. Sequence stratigraphy model of Paleocene Mingyuefeng Formation in Lishui Sag of the East China Sea shelf basin[J]. Global Geology, 2008, 27(2): 198-203.
- [45] GUO Feng, FAN Weiming, LI Chaowen, et al. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces[J]. Lithos, 2012, 150: 62-84.

- [46] 徐杰, 姜在兴. 碎屑岩物源研究进展与展望[J]. 古地理学报, 2019, 21(3): 379-396.  
XU Jie, JIANG Zaixing. Provenance analysis of clastic rocks: Current research status and prospect [J]. Journal of palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(3): 379-396.
- [47] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 409-415.  
ZHAO Hongge, LIU Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 409-415.
- [48] 杨仁超, 李进步, 樊爱萍, 等. 陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势[J]. 沉积学报, 2013, 31(1): 99-107.  
YANG Renchao, LI Jinbu, FAN Aiping, et al. Research progress and development tendency of provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1): 99-107.
- [49] DICKINSON W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones [M]//ZUFFA G G. Provenance of Arenites. Dordrecht: Springer, 1985: 333-361.
- [50] 吴柘锟, 李琦, 张迎朝, 等. 东海陆架盆地丽水凹陷古新统物源分析及地质意义[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 122-134.  
WU Zhekun, LI Qi, ZHANG Yingzhao, et al. Provenance analysis and geological significance of Paleocene in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(1): 122-134.
- [51] ZHU Hongtao, YANG Xianghua, LIU Keyu, et al. Seismic-based sediment provenance analysis in continental lacustrine rift basins: An example from the Bohai Bay Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(10): 1995-2018.
- [52] ZENG Zhiwei, ZHU Hongtao, YANG Xianghua, et al. Multistage progradational clinoform-set characterisation and evolution analysis of the Early Oligocene in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 112: 104048.
- [53] 杨棵, 董艳蕾, 朱筱敏, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷埕岛东坡古近系东营组二段下部源-汇系统[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1280-1292.  
YANG Ke, DONG Yanlei, ZHU Xiaomin, et al. Analysis of the "source-to-sink" system in the 2nd member of the Paleogene Dongying Formation in the eastern slope of Chengdao in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1280-1292.
- [54] 操应长, 徐琦松, 王健. 沉积盆地“源-汇”系统研究进展[J]. 地质前缘, 2018, 25(4): 116-131.  
CAO Yingchang, XU Qisong, WANG Jian. Progress in "source-to-sink" system research [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(4): 116-131.
- [55] 侯国伟, 刘金水, 周瑞华, 等. 丽水凹陷低位扇群沉积模式[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(5): 240-244.  
HOU Guowei, LIU Jinshui, ZHOU Ruihua, et al. Sedimentary model of lowstand fan group in Lishui Sag [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(5): 240-244.
- [56] 谈明轩, 朱筱敏, 张自力, 等. 构造掀斜主导的断陷湖盆缓坡层序“源-汇”正演模拟定量研究[J]. 沉积学报, 2022, 40(6): 1481-1493.  
TAN Mingxuan, ZHU Xiaomin, ZHANG Zili, et al. Source-to-sink quantitative stratigraphic forward modeling on the tilted hanging-wall sequence architecture of a tectonically-driven lacustrine rift basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(6): 1481-1493.
- [57] HELLAND-HANSEN W, SØMME T O, MARTINSEN O J, et al. Deciphering earth's natural hourglasses: Perspectives on source-to-sink analysis [J]. Journal of Sedimentary Research, 2016, 86(9): 1008-1033.
- [58] LIU Qianghu, ZHU Xiaomin, YANG Yong, et al. Sequence stratigraphy and seismic geomorphology application of facies architecture and sediment-dispersal patterns analysis in the third member of Eocene Shahejie Formation, slope system of Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 78: 766-784.
- [59] PATRUNO S, HAMPSON G J, JACKSON C A L, et al. Clinoform geometry, geomorphology, facies character and stratigraphic architecture of a sand-rich subaqueous delta: Jurassic Sognefjord Formation, offshore Norway [J]. Sedimentology, 2015, 62(1): 350-388.
- [60] 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等. 沙垒田凸起西部断裂陡坡型源-汇系统[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1883-1896.  
LIU Qianghu, ZHU Xiaomin, LI Shunli, et al. Source-to-sink system of the steep slope fault in the western Shaleitian uplift [J]. Earth Science, 2017, 42(11): 1883-1896.

(编辑 梁 慧)