

https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.106



南海北部湾盆地协调-非协调供源样式与沉积交互作用耦合响应:以涠西南凹陷 C 洼为例

周子强^{1,2}, 朱红涛^{1,2*}, 刘强虎^{1,2}, 刘 圣^{1,2}

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 断陷湖盆具有多物源注入和地貌复杂的特征, 开展从源到汇的分析有利于深化对有利砂体展布的认识. 以涠西南凹陷 C 洼及邻近凸起为例, 基于测井和地震资料刻画了源-汇系统的要素特征, 区分出协调和非协调两类供源样式, 明确了多物源汇聚下沉积体系的时空展布规律. 研究表明, 涠西南凹陷 C 洼流三段接受北部、南部短轴体系和西部长轴体系的联合供源, 南部体系可进一步划分为 S-I、S-II、S-III 三个次级体系. 其中, 长轴体系具有低缓的源区和宽缓的沟谷, 表现为常年稳定和牵引流主导的协调型供源样式, 在沉积区发育粒度和含砂率相关变化的辫状河体系; 短轴体系具有相对高陡的源区、深切的沟谷, 如 S-II 单元, 代表着脉冲式和重力流主导的非协调供源样式, 在沉积区发育厚层泥岩夹薄层砾岩的盆底扇和扇三角洲体系. 在流三下亚段沉积时期, 在南部短轴非协调体系的强烈供源下, 长轴协调体系主体被推离 C 洼南部而分布在中北部; 在流三上亚段沉积时期, 湖平面上升后短轴源区面积减小使得非协调体系供源减弱, 长轴协调体系则保持稳定的供源强度并向南部偏转以填充余出的可容空间. 通过对涠西南 C 洼及邻近凸起开展源-汇系统分析, 强调供源样式和沉积交互作用耦合控制了有利砂体的时空展布, 对涠西南凹陷 C 洼及相似断陷湖盆的油气勘探具有一定指导意义.

关键词: 源-汇系统; 协调供源; 非协调供源; 交互作用; 涠西南凹陷; 石油地质学.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2022)07-2521-15

收稿日期: 2022-01-16

Coupled Response of Concordant-Discordant Input Systems and Depositional Interactions within Beibuwan Basin, South China Sea: A Case Study from C Sag, Weixinan Depression

Zhou Ziqiang^{1,2}, Zhu Hongtao^{1,2*}, Liu Qianghu^{1,2}, Liu Sheng^{1,2}

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Lacustrine rift basin is characterized by multiple input systems and complex paleo-geomorphology, and a source-to-sink analysis can help improve sandstone prediction. Based on logging and 3D seismic data, this study distinguishes concordant and discordant input systems and establishes the spatio-temporal distribution pattern of depositional systems within the C Sag,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 42172127, 41872149).

作者简介: 周子强 (1997—), 男, 硕士研究生, 从事层序地层学和沉积学研究. ORCID: 0000-0002-0875-4355. E-mail: zidianzhou@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 朱红涛, E-mail: htzhu@cug.edu.cn

引用格式: 周子强, 朱红涛, 刘强虎, 刘圣, 2022. 南海北部湾盆地协调-非协调供源样式与沉积交互作用耦合响应: 以涠西南凹陷 C 洼为例. 地球科学, 47(7): 2521-2535.

Citation: Zhou Ziqiang, Zhu Hongtao, Liu Qianghu, Liu Sheng, 2022. Coupled Response of Concordant-Discordant Input Systems and Depositional Interactions within Beibuwan Basin, South China Sea: A Case Study from C Sag, Weixinan Depression. *Earth Science*, 47(7): 2521-2535.

Weixinan Depression. The results indicate that the C Sag was supplied by the northern and southern transverse input systems as well as the western axial system during deposition of the third member of Liushagang Formation, and the southern system can be further divided into three second-order subsystems (i.e., subsystems S-I, S-II, S-III). The axial system with gentle catchment and wide valley was characterized as a concordant input system with steady flux and tractive flow, as manifested by a braided delta with correlative grain size and sand ratio. In contrast, the discordant transverse input system, with a steep catchment and incised valleys (e.g., sub-system S-II) was characterized by sediment pulse and gravity flow, as manifested by basin floor fan and fan delta with thick mudstone intercalated with thin conglomerate-bearing layer. The axial braided delta developed in the lower part of third member of Liushagang Formation was distributed mostly in the northern C Sag, as a result of intensive transverse sediment contributions from southern Weixinan Low Uplift. The reduced sediment flux from transverse input system, however, resulted in southward shifted axial delta in the upper part of third member of Liushagang Formation. Through a source-to-sink analysis of the C Sag, this study demonstrates that different input systems and interactions between depositional systems have exerted important controls on the spatio-temporal distribution patterns of favorable sandstone, with implications for hydrocarbon explorations in C Sag and other lacustrine rift basins with similar characteristics.

Key words: source-to-sink system; concordant system; discordant system; depositional interaction; Weixinan Depression; petroleum geology.

0 引言

剥蚀地貌和沉积地貌之间被沉积物搬运路径联系在一起,共同构成地表的源-汇系统(Allen and Allen, 2013).从源到汇的分析是指将沉积物的剥蚀、搬运和堆积作为完整的系统,综合考虑包括自旋回和异旋回在内的多种控制因素,以期更好地理解盆地的沉积充填过程并预测油气储层的分布(朱红涛等,2017).其中,地貌坡度是影响源-汇过程的重要参数,故Helland-Hansen *et al.*(2016)将全球源-汇系统划分为近源-陡坡-深水、远源-缓坡-深水和远源-缓坡-浅水三类.近年来,陆相断陷盆地的源-汇系统研究也取得了长足的进展(徐长贵,2013;朱红涛等,2017).例如,徐长贵(2013)在渤海湾盆地提出了“山-沟-坡-面”时空耦合控砂理论,强调只有在四要素时空耦合的背景之下才有砂体的富集(董桂玉和何幼斌,2016);李顺利等(2017a)以沙垒田凸起及沙南凹陷沙河街组源-汇系统为例,进一步定量表征并建立了沉积体体积与地形高差、汇水面积和沟谷截面积间的定量公式.可见,前人研究多集中于构建单个源区与相应汇区间的定量耦合模式,强调从源到汇过程的通量守恒(Somme *et al.*, 2009a;Liu *et al.*, 2019);而少有研究探讨地貌坡度对沉积体系的控制作用(吴胜和等,1994;王星星等,2016),尤其对同期多个不同沉积体系间相互作用的研究还十分薄弱(Cullen *et al.*, 2020).

不同坡度地貌单元间的差异主要体现在碎屑物质的入湖频率和搬运流态上(Postma, 1990;

Allen and Hovius, 1998; Somme *et al.*, 2009a, 2009b),在本文统称为供源样式.例如,缓坡地貌下发育的常年稳定水系可通过牵引流主导的方式持续性供给砂泥,在沉积区表现为粒度与含砂率相协调的特征(如轴向辫状河三角洲;冯文杰等,2018);相反,陡坡背景下间歇发育的山涧溪流往往以重力流为主的形式向沉积区呈脉冲式供源,表现为大套泥岩背景下出现事件性的砾岩沉积(如短轴近岸水下扇和扇三角洲;吴胜和等,1994;Somme *et al.*, 2009b;王星星等,2016).为便于从地层记录中直接识别,本文根据不同供源样式下沉积产物的特征将两者分别表述为协调型和非协调型沉积.值得注意的是,在以复杂地貌和多物源为特征的断陷湖盆(朱红涛等,2017),两类供源样式可以同期发育且其沉积体系可发生相互作用(Connell *et al.*, 2012; Cullen *et al.*, 2020).例如,Connell *et al.*(2012)通过水槽模拟实验认为在短轴与长轴沉积体系共存时,两者的交互位置将主要受沉积通量差异的影响.换言之,在短轴体系通量增强的情况下,长轴体系将被“推离”先前位置,反之亦然(Cullen *et al.*, 2020).因此,开展源-汇视角下不同地貌单元沉积体系间相互作用的研究有助于完善断陷盆地的控砂模式,并对有利砂体的分布具有重要的指示作用.

涪西南凹陷作为典型的古近纪断陷湖盆,具有地貌差异大、多物源等特征,使得同一时期多个不同的沉积体系共存(秦春雨,2020).本文以北部湾盆地涪西南凹陷C洼流沙港组三段为例,结合测井及高精度三维地震资料,开展包括源区单元划分、沟谷

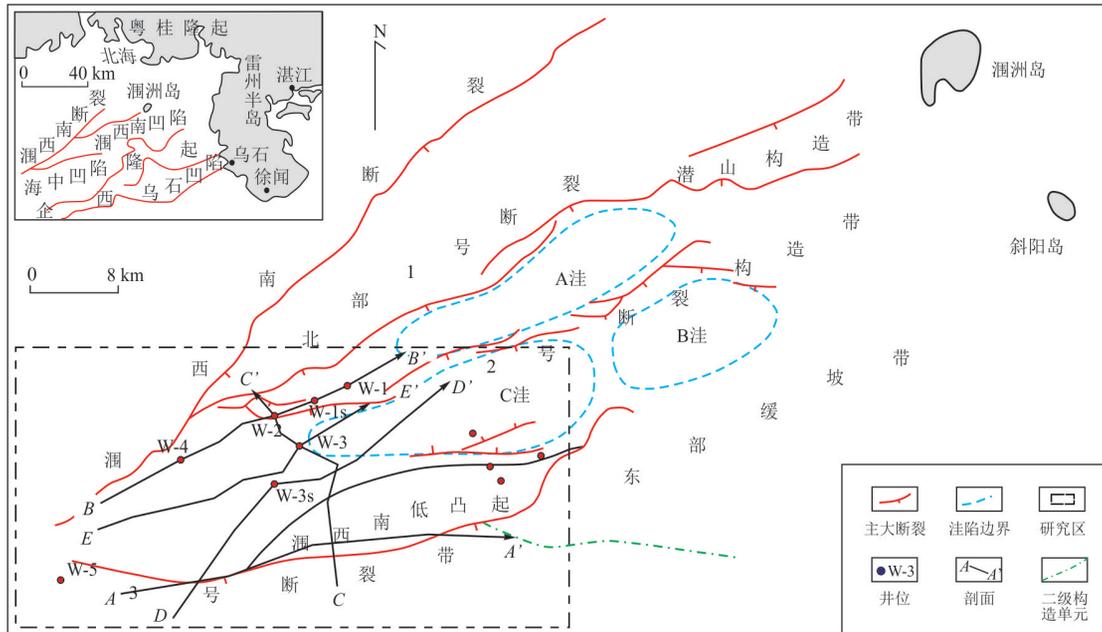


图1 涠西南凹陷构造位置(改自杨希冰等,2019)

Fig. 1 Structure location of Weixinan Depression (modified from Yang *et al.*, 2019)

通道刻画、沉积体系类型和展布解剖在内的源-汇系统分析,旨在通过从源到汇的分析来区分不同地貌单元的供源样式,明确物源体系间的相互作用及其控制下的沉积体展布特征,以期对涠西南凹陷或其他具有相似背景的断陷盆地的油气勘探提供指导。

1 区域地质概况

涠西南凹陷位于北部湾盆地北部坳陷带(图1),西北部与万山隆起相邻,西南缘以涠西南低凸起与海中凹陷相邻,东南部则与企西隆起相接(秦春雨,2020)。涠西南凹陷经历了古近纪的裂陷期和新近纪的裂后热沉降期,且裂陷作用表现为多幕裂陷的特征(葛家旺等,2021;刘一鸣等,2021)。在白垩纪末神狐运动的影响下,北部湾盆地古新世进入初始裂陷阶段,发育了涠西南断裂控制下的长流组沉积。始新世经历了第2幕裂陷,在区域拉张应力作用下,近北东向的一号断层控制着流三段至流二段的沉积;至流一段沉积时期,近东西向的二号断裂开始具有明显的控沉作用。渐新世区域构造应力顺时针偏转后凹陷进入了第3幕裂陷期,近东西向的二号断层进一步活化而成为了主控断裂,控制了涠洲组的沉积。中新世以来,凹陷进入裂后热沉降阶段,盆地整体下沉并接受海相沉积(张智武等,2013;秦春雨,2020;刘一鸣等,2021)。

始新统流沙港组三段是涠西南凹陷第2期裂陷

初期发育的一套以冲积扇及河流-扇三角洲体系为主的沉积地层,仅在沉积中心发育小范围的中深湖相泥岩(姜平等,2020)。作为此次研究的目的层段,流三段内以最大湖泛面(T88)为界可识别出psL32和psL31两个四级层序,分别称为流三下和上亚段(图2)。流三段沉积时期,小落差的断层广泛发育,尚不存在明显的控盆大断裂,因此湖泊整体范围相对较小且地层厚度较薄、尖灭快(秦春雨等,2020)。流三段在岩性上表现为含砾砂岩和泥岩的互层,向上粒度变细,在测井上以箱形和钟-箱复合型为主,在地震上以强振幅、低连续反射为特征(秦春雨等,2020)。值得注意的是,受古新世构造活动的影响,局部地区仍存在长流组的残余地层,在一定程度上影响着流三段的沉积。

2 源-汇系统要素分析

2.1 源-渠单元划分

源区面积和高差控制着沉积物通量,准确划分汇水单元是源-汇分析的基础。涠西南凹陷C洼具有3个一级供源单元,即北部万山隆起、西部长轴体系 and 南部涠西南低凸起(秦春雨等,2020)。其中,涠西南低凸起作为研究区可追踪的主要供源单元,其南部为三号断层所控制,北部邻近涠西南凹陷C洼,为一面积约67 km²的东西向延展的长条状凸起。

依据陆威延等(2020)建立的级次划分方法,相

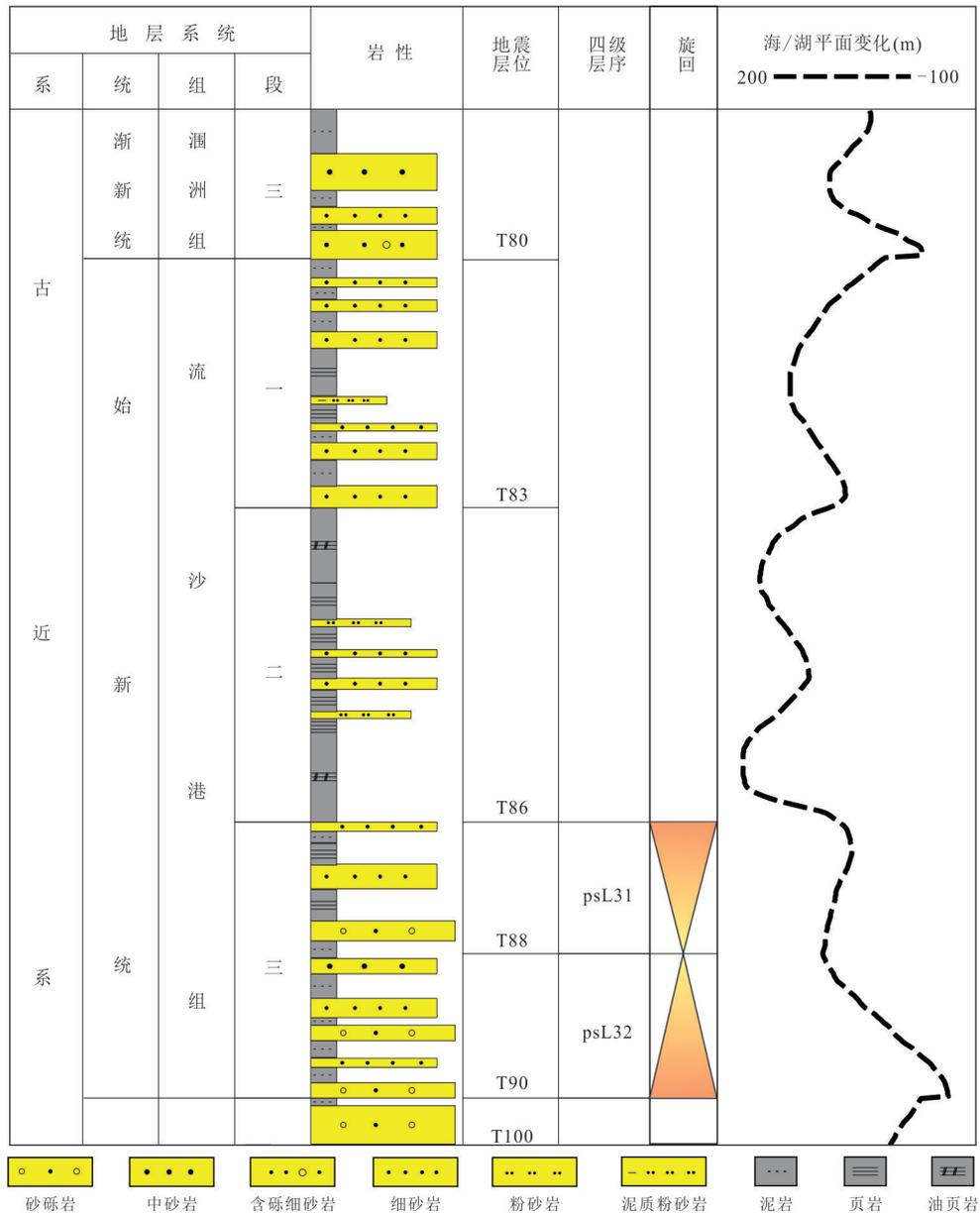


图 2 涇西南凹陷流沙港组地层综合柱状图(改自胡德胜等,2020)

Fig. 2 Integrated stratigraphic column of the Liushagang Formation in the Weixinan Depression (modified from Hu *et al.*, 2020)

应地识别出涇西南低凸起残余古地貌上的地貌高点及分水岭-分水线位置(图3). 将涇西南低凸起最高点连线作为分水岭,划分出南、北两个流域单元,各单元内水系相背分别流向海中凹陷和C洼;进一步拾取北部一级单元的局部地貌高点作为分水线,自东向西依次划分出S-I、S-II和S-III三个次级流域单元(图3). 整体来说,涇西南低凸起具有自东向西由高陡向低缓过渡的地势,S-I号和S-II号流域单元位于低凸起中东部,地势高陡;S-III号流域单元则处于低凸起的西部地区,由于底部残留着长流组的地层而使得地势相对低缓. 值得

注意的是,本文所分析的残余古地貌是基于T90界面来构建的,原因如下:(1)T90界面是全区可追踪的稳定界面;(2)凸起走向与后期变形方向相近(李才等,2021),在改造过程中古地貌的大体格局可能得到保留. 尽管存在一定的误差,但研究表明残余地貌具备开展汇水单元划分的条件(Elliott *et al.*, 2012). 同时,地层的充填特征也用于验证不同单元间的地貌差异,详见下文.

渠道连接着源区和汇区,是刻画碎屑物质从源到汇过程的关键地貌单元. 其中,沟道(V、U和W型)的截面积和宽深比反映了沉积物的通量和搬运

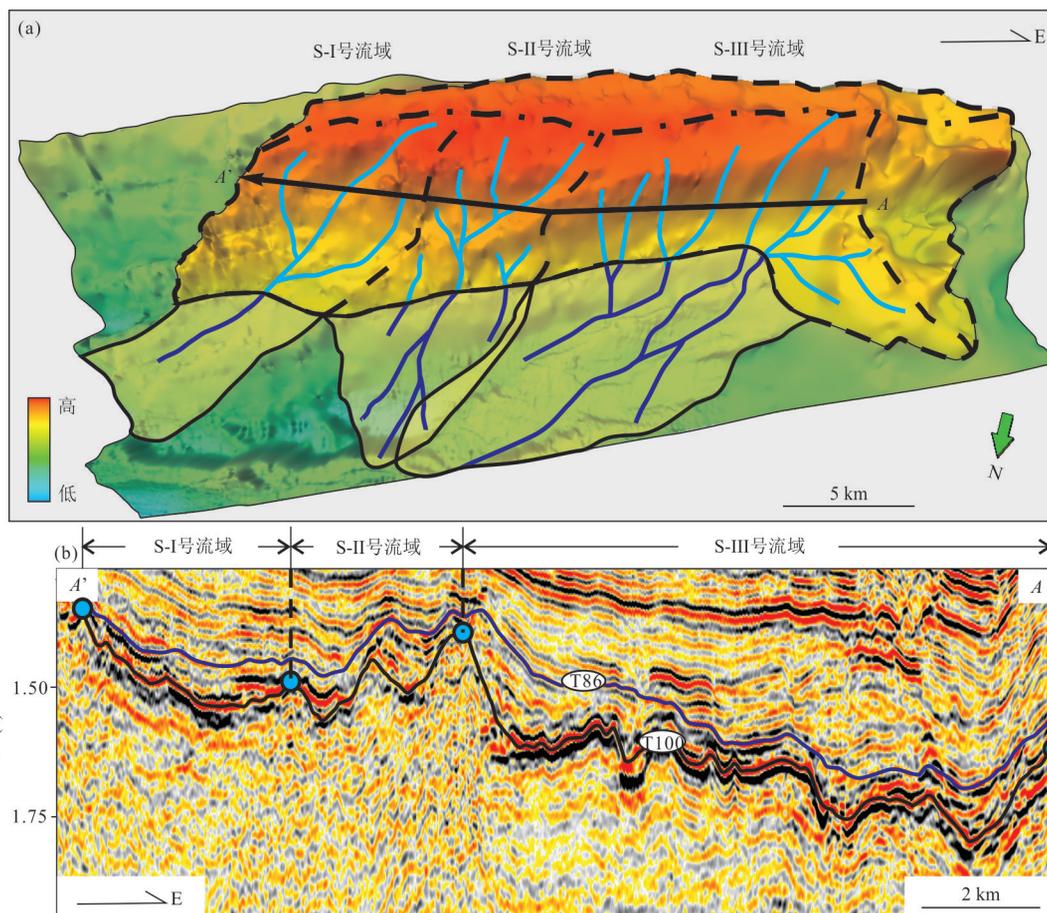


图3 南海北部湾盆地涠西南低凸起源-渠单元划分

Fig. 3 The subdivision of source-to-sink systems within the Weixinan Low Uplift, Beibuwan Basin, South China Sea

a. 三维地貌; b. 沟道特征

方式(李顺利等, 2017a, 2017b). 在涠西南低凸起, 不同流域单元间沟道存在差异. 其中, I号流域单元由3个宽缓的次级沟道合并为一条主沟道, II号则以V型下切沟道为特征, III号流域单元发育3个近U型的次级沟道, 局部发育小型下切沟道(图3).

2.2 沉积体系分析

在长轴和短轴物源的共同供给下, 涠西南凹陷C注流三段发育了不同类型的沉积体系(孙万华等, 2010; 秦春雨, 2020). 通过分析地震反射特征、测井曲线样式, 主要识别出辫状河三角洲、扇三角洲、盆底扇及滨浅-半深湖共四类沉积体系. 其中, 扇三角洲在地震剖面上表现为中低频、中弱振幅, 连续性较差, 多为楔形杂乱反射或者前积反射(图4). 向下倾方向发散的帚状前积常代表陡坡背景下的扇三角洲、冲积扇等; 楔形退积反射则与断层活动后可容空间的快速增长有关(张万选等, 1989). 辫状河三角洲在地震剖面上主要以中高频、中强振幅、连续性较好为特征, 常见前积反射结构; 在测井曲线上多为齿化

钟形、漏斗形和箱形的叠置; 砂岩粒度与整体含砂率(49.6%)相协调, 多为中细砂岩与杂色泥岩的互层, 局部夹含砾砂岩, 与葛家旺等(2019)描述的呈叠瓦状前积的辫状河三角洲具有相似的特点(图4). 盆底扇的地震反射特征为呈丘状的低频、弱振幅的杂乱反射; 测井曲线表现为舌形特征; 岩性上为厚层泥岩背景下出现薄层含砾砂岩, 明显突变的粒度显示出非协调供源的特征(图4). 值得注意的是, 盆底扇和扇三角洲相叠置的结构常在断控陡坡带出现, 代表了不同斜坡坡度下的产物(Chiarella *et al.*, 2021). 其中, 出现在断裂下降盘的盆底扇又被称为断崖底部沉积(base-of-scarp deposit), 其沉积与碎屑流、滑落和高密度浊流等重力驱动过程密切相关; 在沉积物堆积减缓斜坡坡度(低于 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$)后, 扇三角洲或毯式浅水三角洲得以发育(Chiarella *et al.*, 2021). 滨浅-半深湖沉积在地震上表现为中高频、中强振幅、连续性好的特征; 测井曲线则表现为高幅指状; 岩性上多为泥岩夹薄层粉细砂岩(图4).

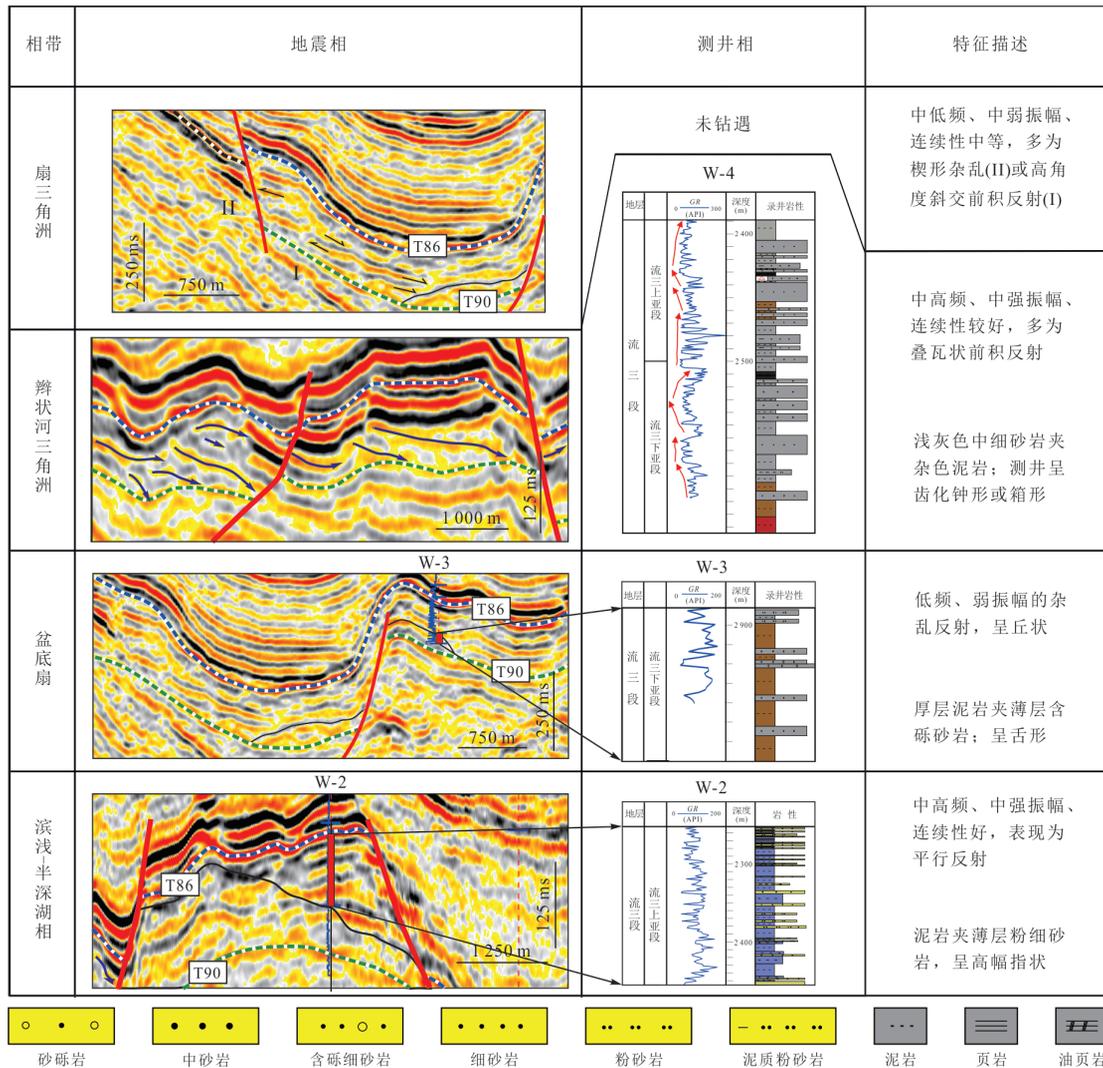


图 4 南海北部湾盆地涠西南凹陷 C 注流三段沉积体系类型

Fig. 4 Types of depositional systems of the third member of Liushagang Formation in the C Sag, Weixinan Depression, South China Sea

3 协调-非协调型源-汇系统特征

作为一个完整从源到汇的系统,源区构造强度或气候条件等改变所引起沉积物通量和供源样式的变化,最终将对下游沉积区沉积体系的性质(类型及体积等)产生重要的影响(Allen and Hovius, 1998; Sømme *et al.*, 2009b). 前人针对通量守恒开展过大量研究,建立了源区面积和高程、搬运区沟道截面积与汇区扇体面积和体积间的定性-定量关系(Sømme *et al.*, 2009a; 李顺利等, 2017a; Liu *et al.*, 2019). 因此,本次研究侧重于从供源样式的角度来探讨不同地貌单元下沉积体系的差异. 综合分析涠西南凹陷 C 注及周缘凸起地形地貌及沉积体系等特征,在研究区划分

出协调型和非协调型两类源-汇系统.

3.1 长轴协调型辫状河三角洲体系

由于三维地震资料范围有限,涠西南凹陷 C 注长轴体系的源区无法获取. 但前人研究认为,长轴体系往往具有相对宽缓的源区,常以辫状河的形式向沉积区提供充足且稳定的物源供给(Leeder and Mack, 2001; 朱秀等, 2017). 在进入停滞水体后,辫状河体系向湖盆方向逐渐分支、水动力相应减弱,搬运的砾、砂、泥沉积物也因此发生差异卸载(冯文杰等, 2018).

涠西南凹陷 C 注流三段长轴方向也发育一套辫状河三角洲沉积(孙万华等, 2010). 在地震剖面上,辫状河三角洲沉积体表现为叠瓦状前积发射,向远处过渡为连续、强振幅的滨浅湖相泥岩(图 5). 其

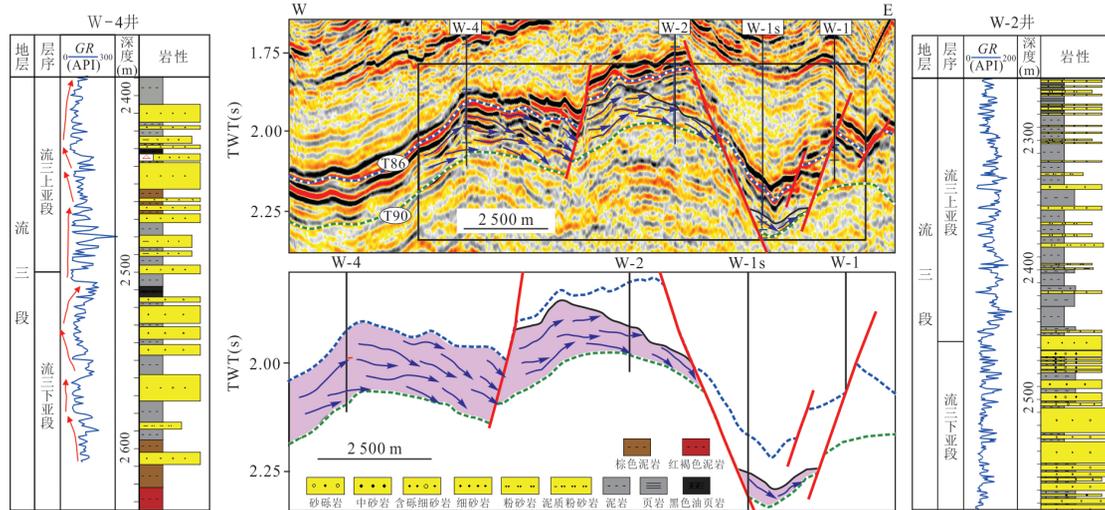


图5 顺长轴辫状河三角洲物源方向的低角度前积剖面(见图1中BB'剖面)

Fig. 5 Seismic profile along axial braided delta showing low-angle progradational reflection characteristics

中, W-4井钻遇到辫状河三角洲的前积主体区, 对应于含砾中-细砂岩夹杂色泥岩, 整体向上逐渐变细, 含砂率为49.6%, GR曲线呈齿化箱形和钟形; 泥岩颜色底部为褐色和棕色, 向上过渡为灰色, 局部甚至发育黑褐色油页岩, 推测为较浅水环境下的辫状河道侧翼沉积(葛家旺等, 2019); 向湖盆方向, W-2井底部揭示前积体前端为砂砾岩夹薄层泥岩, 含砂率高达69%, 测井曲线呈齿化箱形, 推测为辫状河三角洲主体; 近滨浅湖的W-1s井则表现为粉细砂岩与泥岩的互层, 局部出现薄层含砾中砂岩, 整体含砂率为36.5%。值得注意的是, 含砂率较高的W-2和W-4井分别发育砂砾岩及中细砂岩, 含砂率最低的W-1s井则由粉细砂岩主导, 表明轴向辫状河三角洲的砂体粒度和含砂率具有明显的相关性或协调性(冯文杰等, 2018)。

综合前人建立的轴向沉积体系的模式, 认为涠西南凹陷C洼长轴发育协调型辫状河三角洲体系。这类协调型源-汇系统的核心在于其供源具有常年稳定和牵引流主导的两大特征, 常年稳定意味着一定时期内河流具有相近的流量和搬运能力, 其搬运物由此具有相近的粒度组分(砾、砂和泥的混合比例)(Sømme *et al.*, 2009a); 牵引流主导的流态特征则使得砾、砂和泥在进入到停滞水体后, 将自近向远逐步填充可容空间(冯文杰等, 2018); 最终在录井上表现为粒度与含砂率相协调, 在剖面上表现为叠瓦状前积反射的特征(图5)。

3.2 短轴非协调型扇三角洲体系

涠西南低凸起作为研究区可追踪的源区单元,

可进一步划分为3个次级流域单元。其中, S-II号单元具有高陡的源区和深切的沟道, 在断层下降盘堆积形成丘状和前积反射叠置的地震相组合(图6)。Chiarella *et al.* (2021)认为这一结构的出现反映了地貌逐渐变缓的过程, 其中盆底扇的堆积指示斜坡早期坡度可能大于 25° , 与前文残余古地貌的分析结果相吻合。在涠西南凹陷C洼, 盆底扇的边部由W-3井揭示, 对应为一套滨浅湖泥岩夹砂砾岩-含砾细砂岩, 该段整体含砂率为23.9%, GR曲线呈舌状。可见, 在近源陡坡背景下厚层泥岩与含砾层频繁且快速的变换可能反映了短轴含砾物源“脉冲式”地进入湖盆(Sømme *et al.*, 2009a; 王星星等, 2016)。在断裂活动速率减缓或间洪期, 流速较缓的溪流只能携带粉细砂和泥级细粒碎屑, 使得沉积区出现大套的背景泥岩沉积; 但在断裂快速活动期或洪水期, 山崩作用形成的砾级碎屑经过洪水冲刷后可形成大规模泥石流(王星星等, 2016), 顺高陡的斜坡向下直接搬运至洼陷中心(Stevenson *et al.*, 2015)。此外, 其上发育的斜交型高角度前积反射上超于斜坡并具有向下倾方向发散的特征, 推测为湖扩背景下的一套近源快速堆积的扇三角洲(图6)。相比之下, S-III号单元在沉积区仅发育一套低角度进积的扇三角洲, 与其相对低缓的源区地貌和宽缓的水系相匹配(图7)。

与协调型源-汇系统相反, 在湖盆短轴发育的非协调型源-汇系统具有脉冲式供源和重力流主导两大特征。其中, 脉冲式供源使得同一搬运体系在相近的地质时期既能以粉砂和泥质的搬运为主, 偶

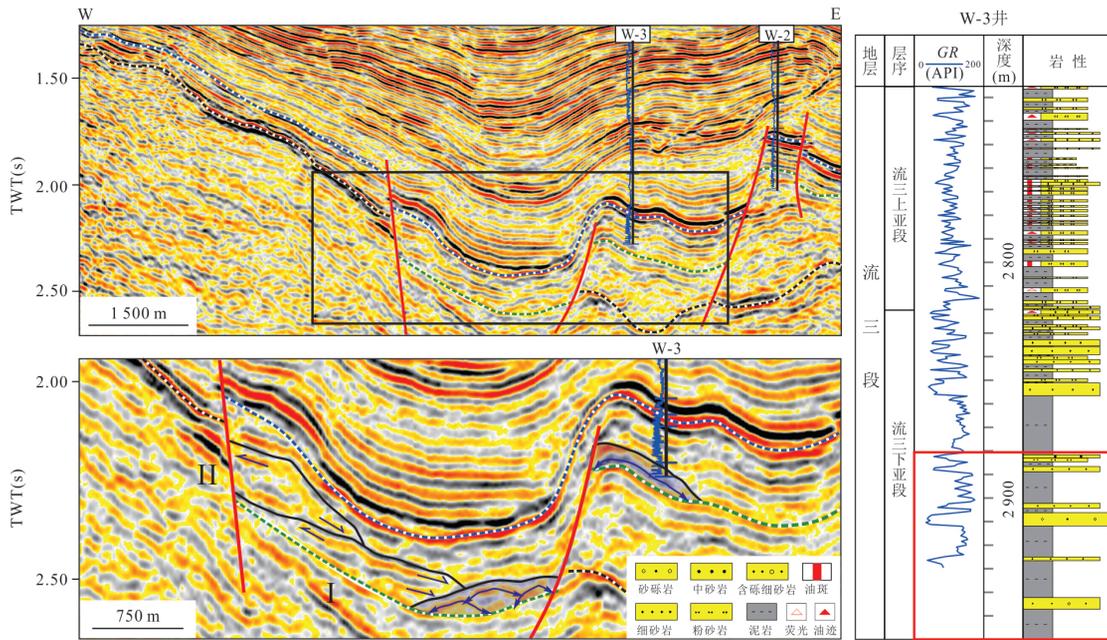


图6 顺涪西南低凸起S-II号流域单元高角度前积剖面(见图1中CC'剖面)

Fig. 6 Seismic profile along the catchment II showing high-angle progradational reflection characteristics

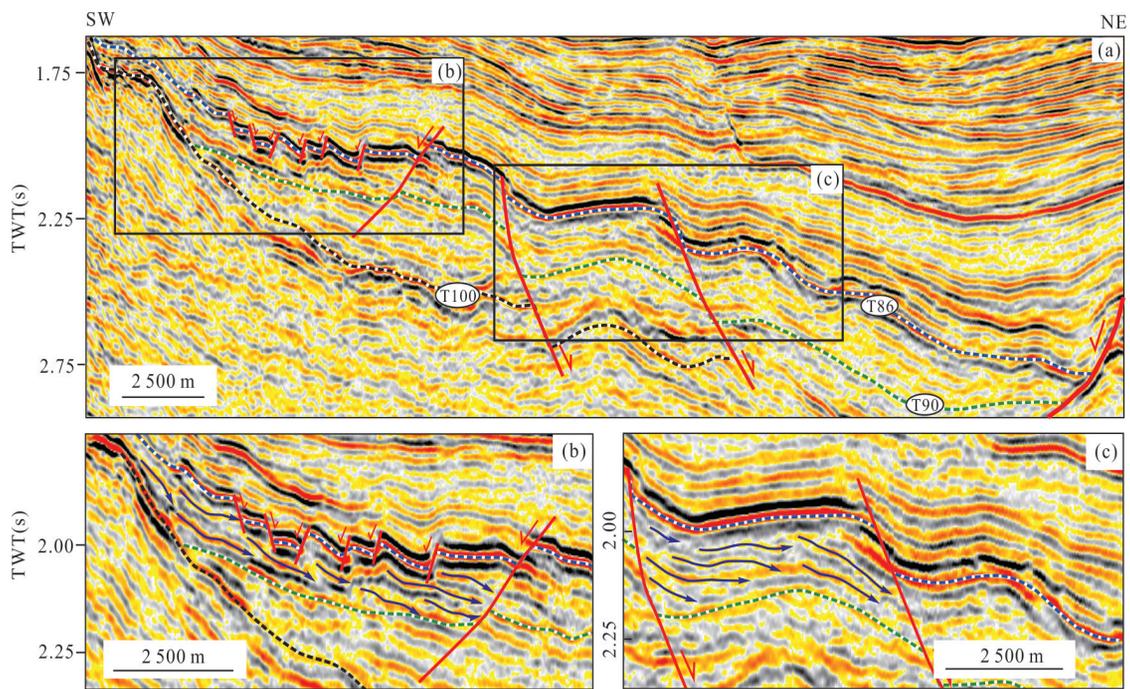


图7 顺涪西南低凸起S-III号流域单元低角度前积剖面(见图1中DD'剖面)

Fig. 7 Seismic profile along the catchment III showing low-angle progradational reflection characteristics

尔也具备携带砾石的能力 (Somme *et al.*, 2009a);重力流主导的流体流态则确保了砾级碎屑能向湖盆推进相当长的距离 (Stevenson *et al.*, 2015);最终在录井上表现为大套泥岩背景下出现砾级粗碎屑岩层,在地震剖面上则表现为丘状盆底扇和切线形前积状扇三角洲的叠置(图6).

3.3 地貌单元与供源样式

地貌坡度影响着沉积物的入湖频率和搬运流态,进而控制了碎屑物质进入沉积区时的供源样式. Somme *et al.* (2009a)在调研29个近现代的源-汇系统后,指出大型的宽缓源区能形成稳定的物源供给,陡峭的小型源区提供的沉积通量则往往在短

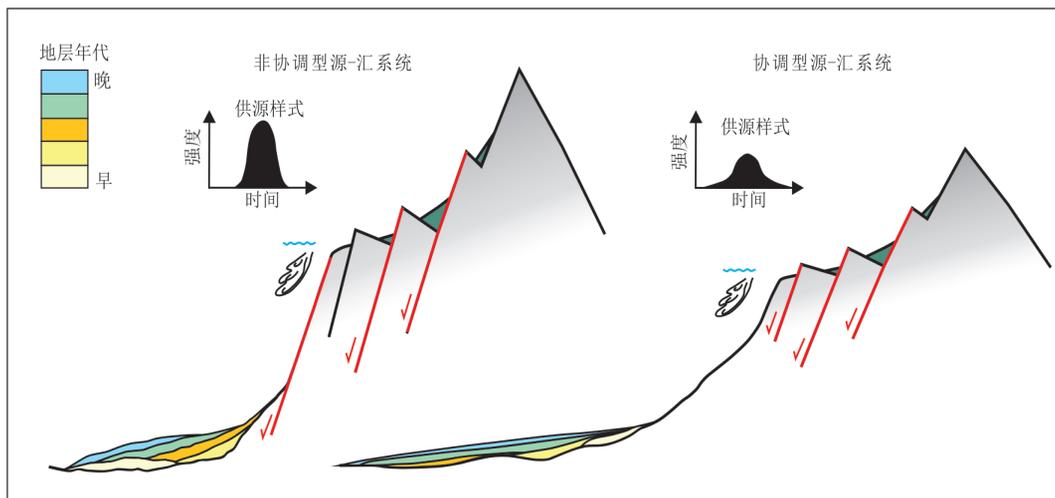


图 8 协调-非协调型源-汇系统模式(改编自 Sømme and Jackson, 2013)

Fig. 8 Conceptual model of concordant-discordant source-to-sink systems (modified from Sømme and Jackson, 2013)

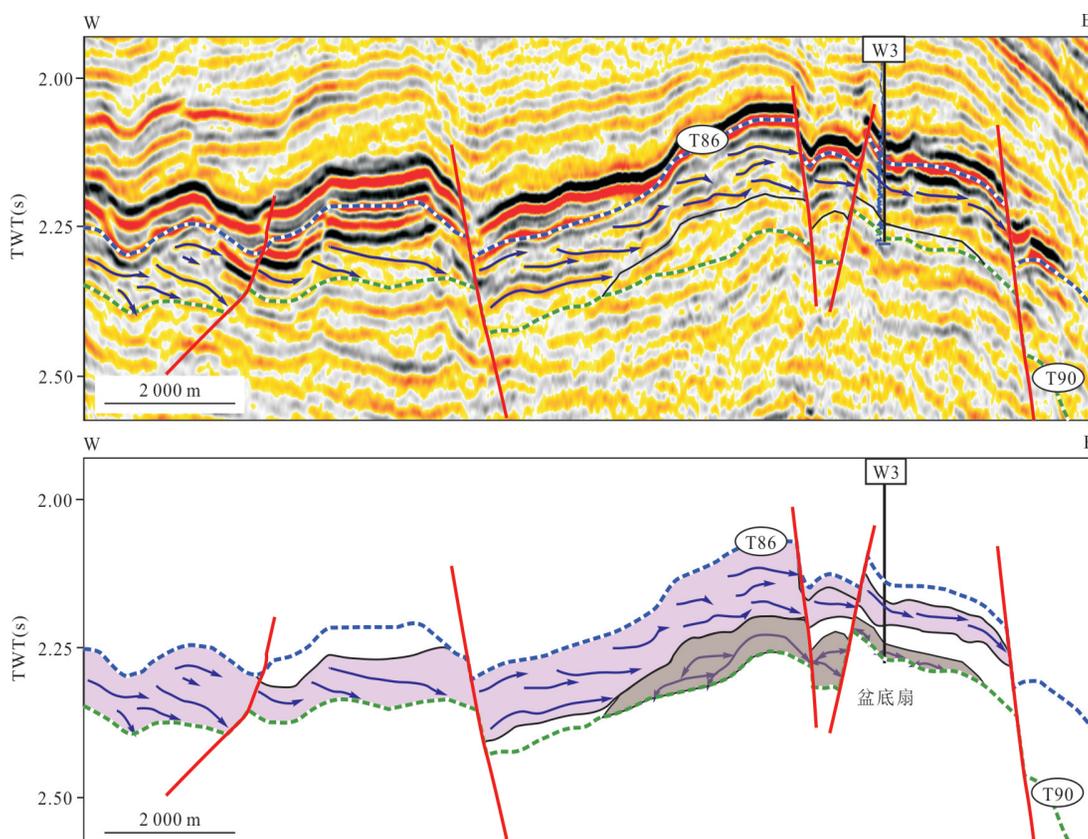


图 9 顺长轴方向剖面显示 W-3 井的快速相变(见图 1 中 EE' 剖面)

Fig. 9 Seismic profile along axial braided delta showing abrupt facies evolution in Well W-3

时间内变化迅速. 前人的研究也表明,地貌坡度对沉积物的搬运流态具有重要控制作用,进而影响着沉积体系的性质(Postma, 1990),如 Allen and Hovius(1998)在研究美国西南部断陷盆地时发现,断裂陡坡带发育碎屑流主导的冲积扇,而缓坡冲积扇则

以片流为主;国内学者吴胜和等(1994)也注意到即便同在断裂陡坡带,不同坡度下的扇三角洲仍表现出不同的主导流态并对储层质量具有显著影响.

本次研究对涪西南凹陷 C 洼开展源-汇系统分析,强调断陷湖盆不同地貌单元具有差异的供源样

式,最终影响了沉积体的性质.其中,具有宽缓源区地貌的长轴物源体系常表现为协调型供源,牵引流主导的搬运体系在入湖后总是优先充填近端可容空间,并在沉积物的稳定供给下向湖盆中心逐渐进积(图5,图8,图9);具有高陡源区地貌和深切搬运通道的短轴S-II号流域则为典型的非协调型源-汇体系,在断裂活动期或洪水期供源体系的通量和粒度达到鼎盛,可通过重力流的搬运机制先在湖盆中心处堆积,在供源强度减弱后才在近端沉积(图6,图8);此外,W-3井差异的油气显示可能反映了协调-非协调沉积体间不同的储层质量(图6).更重要的是,本次研究在一定程度上拓展了前人基于通量守恒的源-汇系统分析思路,强调对凸起区地貌坡度的研究有助于识别沉积物的供应样式,进而为预测储层质量提供指导.例如,短轴S-III号流域单元在长流组的填平补齐下,相对S-II号单元具有较低的地貌坡度,可能是有利砂体发育的潜在区域(图7;吴胜和等,1994).

4 涪西南凹陷C洼长短轴沉积交互作用

作为典型的断陷湖盆,涪西南凹陷C洼具有多个物源注入口,包括由北部万山隆起、南部涪西南低凸起供源的短轴体系以及西部的长轴体系.3个不同方向的物源体系同期共存,以不同的供源样式和通量向C洼分别提供沉积物质,形成辫状河三角洲、扇三角洲、盆底扇及滨浅-半深湖相四类沉积体系.在有限的可容空间下,长轴和短轴体系相互影响使得沉积体系的展布范围在时空上存在明显迁移.

4.1 流三下亚段

流三段下层序沉积时期,凹陷仍处于湖盆发育的初始阶段,以落差较小的断层广泛分布为特征(Gawthorpe and Leeder, 2000;葛家旺等, 2018;秦春雨等,2020).该时期湖盆范围相对局限,水体较浅,在W-4井表现为近10 m厚的褐红色泥岩的发育(图5).在盆地周缘粗碎屑物质的供应下,短轴和长轴体系同时发育.其中,具有非协调供源样式的短轴源区产生了大量泥砾混杂的碎屑物质,在C洼堆积形成盆底扇和扇三角洲,可延伸至湖盆中央.具体来说,坡度最陡的涪西南低凸起S-II号单元沉积区发育双向下

超的丘状盆底扇,在录井上表现为厚层泥岩夹薄层含砾粗碎屑层;随后由高角度进积的扇三角洲所覆盖(图6).相比之下,由于S-III号单元底部为长流组残余地层,地貌坡度相对平缓,在剖面上表现为一套低角度进积的扇三角洲(图7).另一方面,具有宽缓源区的长轴体系以协调型样式向洼陷供给砂砾,形成大型的辫状河三角洲,在W-2井底部形成厚层的箱状砂砾岩(图5).值得注意的是,由于洼陷南侧可容空间为短轴扇体所占据,长轴辫状河三角洲的展布范围整体偏向C洼中北部(图10a).

4.2 流三上亚段

流三段上层序沉积时期,各方向物源体系继承性发育,但湖盆范围相对扩大,水体也逐渐加深,例如在W-4井发育了黑褐色的油页岩(图5).在湖盆范围持续扩张的情况下,盆内凸起面积相应萎缩,使得短轴物源的供给能力明显减弱,扇体的面积和延伸距离也显著缩小(图10b).另一方面,湖平面上升不影响盆外凸起的供源能力,因此长轴辫状河三角洲面积和延伸距离均保持相对稳定.然而,南侧短轴扇体的萎缩使得其先前占据的可容空间余出,辫状河三角洲前端由此向南侧发生相应摆动(图10b).这使得位于C洼南侧的W-3和W-3s井发生了快速的相变,由下亚段的陡坡非协调物源转变为协调供源背景下的辫状河三角洲沉积(图9).同时,长轴体系在填充南侧可容空间时消耗了大量的沉积通量,由此使得洼陷北侧的W-2井相应由辫状河主导的厚层箱状砂砾岩转变为滨浅湖相的粉砂-泥岩(图5).

4.3 沉积交互与砂体展布

涪西南凹陷C洼在流三段沉积时期接受着长轴和短轴体系的同期供源,且随着湖平面的逐渐上升,短轴和长轴体系的主导范围在时空上存在迁移.例如,W-3井流三段下层序为短轴S-II号单元提供的非协调型物源所主导,在地震上表现为丘状杂乱反射(图6);在上层序则过渡为长轴协调性沉积主导,在地震上表现为微弱的前积反射(图9).林畅松等(2000)指出同沉积断裂可以通过改变盆地底形进而控制沉积体系的展布方向.但考虑到流三段时期断裂落差较小且广泛分布(秦春雨,2020),可能难以控制大

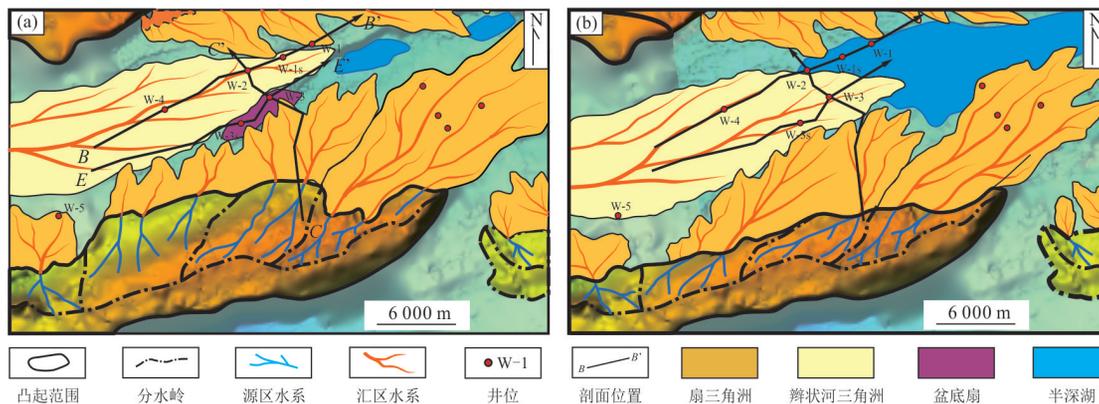


图 10 古地貌与沉积体系叠合模式

Fig. 10 The coupled paleo-geomorphology-depositional system model

a. 流三下亚段; b. 流三上亚段

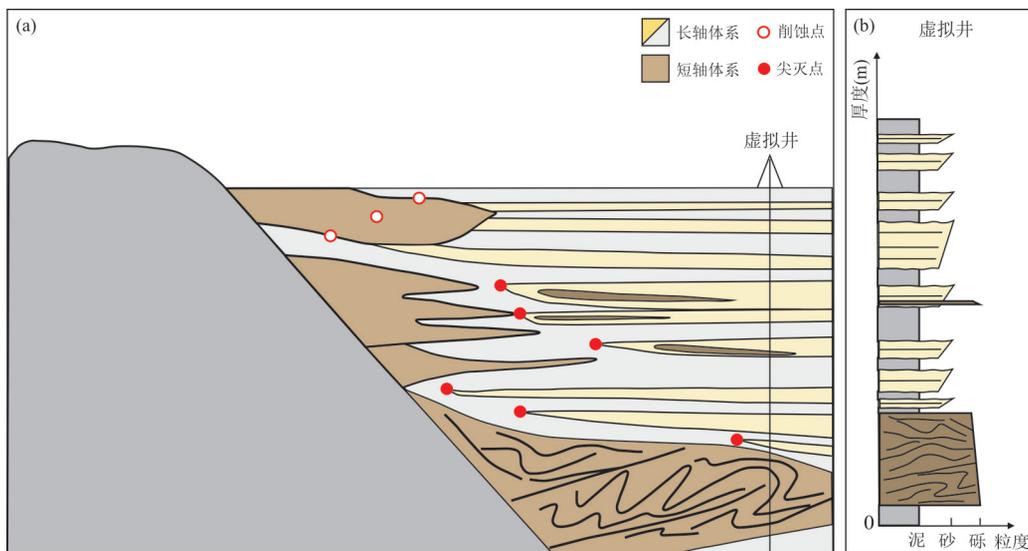


图 11 长短轴沉积体系交互模式图(改自 Cullen *et al.*, 2020)

Fig. 11 A conceptual model for interactions between transverse and axial depositional systems (modified from Cullen *et al.*, 2020)

型的轴向体系向一侧有规律的偏转. 另一方面, 同一时期短轴扇三角洲出现退积的地层叠置样式, 表明涠西南低凸起的供源能力相对减弱, 这可能与湖平面上升后源区面积减小或构造活动减弱有关 (Henstra *et al.*, 2016; 李顺利等, 2017a). Connell *et al.* (2012) 通过水槽模拟实验揭示在短轴与长轴沉积体系共存时, 两者的交互区将主要受沉积通量差异的影响. 因此, 本次研究将沉积体系展布方向的偏转归因于物源体系间的相互作用. 在流三段下层序沉积时期, 涠西南低凸起上断裂的活化触发了大量的粗粒碎屑, 占据了 C 洼的可容空间, 使得长轴辫状河三角洲被推离出洼陷南侧而主要分布在中北部 (图 10a, 图 11); 在湖平面上升或断层活动减弱

后, 短轴源区供源能力明显减弱使得扇体推进范围相应变小, 长轴辫状河三角洲随之向南偏转以占据多出的可容空间 (图 10b, 图 11).

前人研究多侧重建立单个源区与相应汇区的通量守恒模型, 少有人探讨多个物源体系间的相互作用. 事实上, 由于断陷湖盆具有多物源注入的特征, 国内外多个研究实例对这类沉积体系间的相互作用进行了不同程度的报导. 例如, 陈杰等 (2016) 通过岩心观测、录井和地震资料分析, 认为沙三中亚段不断进积的东营三角洲和永安三角洲在东营凹陷发生了交汇; Sun *et al.* (2020) 则通过重矿物和碎屑锆石进一步重建了胶东和辽东半岛物源的交汇过程, 认为胶东方向的体系逐渐成为新近系

渤东地区的主导。可见,沉积体系间相互作用是断陷湖盆中广泛存在却长期被忽视的一种重要的控砂机制(Cullen *et al.*, 2020)。考虑到不同沉积体系往往具有差异的储层特征(如长轴协调和短轴非协调沉积),明确沉积体系间的相互作用将对多物源注入下断陷湖盆的有利砂体预测具有启示意义。

5 结论

(1)从碎屑物质的入湖频率和搬运流态区分了协调和非协调供源样式,明确了涪西南凹陷C注不同地貌单元源-汇系统的差异。其中,西部长轴体系代表着协调型供源样式,具有常年稳定和牵引流主导的特征,在测井上呈现出粒度与含砂率相协调,地震上多表现为叠瓦状前积反射;南部短轴体系则代表非协调供源,以脉冲式供源和重力流主导为特征(如S-II号次级系统),在测井上呈现出整体泥岩背景下局部发育含砾层,地震上表现为丘状反射和切线型前积反射。

(2)涪西南凹陷C注存在长轴协调和短轴非协调物源体系的相互作用,进而控制着沉积体系的时空展布。在流三段下层序沉积时期,在南部涪西南低凸起S-II号源区的强烈供源下,长轴辫状河三角洲主体分布在C注中北部;流三段上层序沉积时期,湖平面上升使得S-II号源区供源减弱,短轴扇三角洲面积减小后长轴辫状河三角洲也相应向南偏转。

(3)本次研究对涪西南凹陷C注开展源-汇系统分析,强调了凸起区地貌坡度对沉积区储层质量的影响,突出了沉积体系间相互作用对砂体展布的控制作用,可为其他具有多物源注入口和复杂地貌背景的陆相断陷盆地提供一定的参考。

References

- Allen, P.A., Allen, J.R., 2013. Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Allen, P. A., Hovius, N., 1998. Sediment Supply from Landslide-Dominated Catchments: Implications for Basin-Margin Fans. *Basin Research*, 10(1): 19–35. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2117.1998.00060.x>
- Connell, S. D., Kim, W., Paola, C., et al., 2012. Fluvial Morphology and Sediment-Flux Steering of Axial-Transverse Boundaries in an Experimental Basin. *Journal of Sedimentary Research*, 82(5): 310–325. <https://doi.org/10.2110/jsr.2012.27>
- Chen, J., Liu, C.H., Tan, M.Y., et al., 2016. Depositional Model of Prograding Delta Confluences: A Case from E₃^m Members in the Paleogene Dongying Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(6): 1187–1197 (in Chinese with English abstract).
- Chiarella, D., Capella, W., Longhitano, S. G., et al., 2021. Fault-Controlled Base-of-Scarp Deposits. *Basin Research*, 33(2): 1056–1075. <https://doi.org/10.1111/bre.12505>
- Cullen, T. M., Collier, R. E. L., Gawthorpe, R. L., et al., 2020. Axial and Transverse Deep-Water Sediment Supply to Syn-Rift Fault Terraces: Insights from the West Xylokastro Fault Block, Gulf of Corinth, Greece. *Basin Research*, 32(5): 1105–1139. <https://doi.org/10.1111/bre.12416>
- Dong, G.Y., He, Y.B., 2016. Mechanism of Sand Body Prediction in a Continental Rift Basin by Coupling Paleogeomorphic Elements under the Control of Base Level. *Petroleum Exploration and Development*, 43(4): 529–539 (in Chinese with English abstract).
- Elliott, G. M., Wilson, P., Jackson, C. A. L., et al., 2012. The Linkage between Fault Throw and Footwall Scarp Erosion Patterns: An Example from the Bremstein Fault Complex, Offshore Mid-Norway. *Basin Research*, 24(2): 180–197. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2011.00524.x>
- Feng, W.J., Lu, F.M., Wu, S.H., et al., 2018. Reservoir Architecture Analysis of Braided Delta Front Developed in the Long-Axis Gentle Slope of Faulted Basin: A Case Study of the Fifth Zaoyuan Formation, Zaonan Fault Block, Zaoyuan Oilfield, Dagang. *Journal of China University of Mining & Technology*, 47(2): 367–379 (in Chinese with English abstract).
- Gawthorpe, R. L., Leeder, M. R., 2000. Tectono-Sedimentary Evolution of Active Extensional Basins. *Basin Research*, 12(3–4): 195–218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2000.00121.x>
- Ge, J.W., Zhu, X.M., Lei, Y.C., et al., 2021. Tectono-Sedimentary Development of Multiphase Rift Basins: An Example of the Lufeng Depression. *Earth Science Frontiers*, 28(1): 77–89 (in Chinese with English abstract).
- Ge, J.W., Zhu, X.M., Wu, C., et al., 2019. Sedimentary Characteristics and Genetic Difference of Braided Delta:

- A Case Study of Enping Formation in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 40(S1): 139—152 (in Chinese with English abstract).
- Ge, J.W., Zhu, X.M., Zhang, X.T., et al., 2018. Tectono-Sedimentation Model of the Eocene Wenchang Formation in the Lufeng Depression, Pearl River Mouth Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 47(2): 308—322 (in Chinese with English abstract).
- Henstra, G. A., Grundvåg, S. A., Johannessen, E. P., et al., 2016. Depositional Processes and Stratigraphic Architecture within a Coarse-Grained Rift-Margin Turbidite System: The Wollaston Forland Group, East Greenland. *Marine and Petroleum Geology*, 76: 187—209. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.018>
- Helland-Hansen, W., Sømme, T. O., Martinsen, O. J., et al., 2016. Deciphering Earth's Natural Hourglasses: Perspectives on Source-to-Sink Analysis. *Journal of Sedimentary Research*, 86(9): 1008—1033. <https://doi.org/10.2110/jsr.2016.56>
- Hu, D.S., Fan, C.W., Zhu, H.T., et al., 2020. Sedimentary Characteristics and Exploration Significance of Sub-Lacustrine Fan of Highstand System Tract in the First Member of Liushagang Formation in the Weixinan Sag. *China Petroleum Exploration*, 25(5): 23—31 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, P., Qin, C.Y., Yang, X.B., et al., 2020. Sedimentary Architecture, Distribution Features and Genesis of Steep Slope Fan in Upper Liushagang Formation, Weixi'nan Sag. *Earth Science*, 45(2): 534—546 (in Chinese with English abstract).
- Leeder, M. R., Mack, G. H., 2001. Lateral Erosion ('Toe-Cutting') of Alluvial Fans by Axial Rivers: Implications for Basin Analysis and Architecture. *Journal of the Geological Society*, 158(6): 885—893. <https://doi.org/10.1144/0016-760000-198>
- Li, C., Fan, C.W., Hu, L., et al., 2021. Tectonic Evolution Characteristics and Genesis of Weixi'nan Low Uplift in Beibu Gulf Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 26(4): 319—325 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.L., Zhu, X.M., Li, H.Y., et al., 2017a. Quantitative Characterization of Elements and Coupling Mode in Source-to-Sink System: A Case Study of the Shahejie Formation between the Shaleitian Uplift and Shanan Sag, Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 29(4): 39—50 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.L., Zhu, X.M., Liu, Q.H., et al., 2017b. Evaluation and Prediction of Favorable Reservoirs in Source-to-Sink Systems of the Palaeogene, Shaleitian Uplift. *Earth Science*, 42(11): 1994—2009 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C.S., Pan, Y.L., Xiao, J.X., et al., 2000. Structural Slope-Break Zone: Key Concept for Stratigraphic Sequence Analysis and Petroleum Forecasting in Fault Subsidence Basins. *Earth Science*, 25(3): 260—266 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. H., Zhu, H. T., Zhu, X. M., et al., 2019. Proportional Relationship between the Flux of Catchment-Fluvial Segment and Their Sedimentary Response to Diverse Bedrock Types in Subtropical Lacustrine Rift Basins. *Marine and Petroleum Geology*, 107: 351—364. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.05.031>
- Liu, Y.M., Wu, Z.P., Yan, S.Y., et al., 2021. Identification of Eocene Tectonic Transition and Its Geological Significance of Rift Basins Offshore China: A Case Study in Weixi'nan Sag, Beibu Bay Basin. *Earth Science*, 46(6): 2145—2156 (in Chinese with English abstract).
- Lu, W.Y., Zhu, H.T., Xu, C.G., et al., 2020. Methods and Applications of Level Subdivision of Source-to-Sink System. *Earth Science*, 45(4): 1327—1336 (in Chinese with English abstract).
- Postma, G., 1990. An Analysis of the Variation in Delta Architecture. *Terra Nova*, 2(2): 124—130. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1990.tb00052.x>
- Qin, C.Y., 2020. The Paleogene Evolution of Double-Layer Structure and the Response of Sedimentation of Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Qin, C.Y., Wang, H., Jiang, P., et al., 2020. Boundary Fault Evolution of Weixinan Sag and Its Effect on Strata Filling. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(2): 318—327 (in Chinese with English abstract).
- Sømme, T. O., Helland-Hansen, W., Martinsen, O. J., et al., 2009a. Relationships between Morphological and Sedimentological Parameters in Source-to-Sink Systems: A Basis for Predicting Semi-Quantitative Characteristics in Subsurface Systems. *Basin Research*, 21(4): 361—387. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00397.x>
- Sømme, T. O., Martinsen, O. J., Thurmond, J. B., 2009b. Reconstructing Morphological and Depositional Characteristics in Subsurface Sedimentary Systems: An Example from the Maastrichtian-Danian Ormen Lange System, Møre Basin, Norwegian Sea. *AAPG Bulletin*, 93(10):

- 1347–1377. <https://doi.org/10.1306/06010909038>
- Sømme, T. O., Jackson, C. A. L., 2013. Source-to-Sink Analysis of Ancient Sedimentary Systems Using a Sub-surface Case Study from the Møre-Trøndelag Area of Southern Norway: Part 2—Sediment Dispersal and Forcing Mechanisms. *Basin Research*, 25(5): 512–531. <https://doi.org/10.1111/bre.12014>
- Stevenson, C. J., Jackson, C. A. L., Hodgson, D. M., et al., 2015. Deep-Water Sediment Bypass. *Journal of Sedimentary Research*, 85(9): 1058–1081. <https://doi.org/10.2110/jsr.2015.63>
- Sun, W.H., Wang, R.L., Liu, M.Q., et al., 2010. The Analysis of Well WZ10-8-1 after Drilling in Liushagang Formation, Weixinan Depression, Beibuwan Basin. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 36(24): 213–216 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z. H., Zhu, H. T., Xu, C. G., et al., 2020. Reconstructing Provenance Interaction of Multiple Sediment Sources in Continental Down-Warped Lacustrine Basins: An Example from the Bodong Area, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104142. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104142>
- Wang, X.X., Zhu, X.M., Song, S., et al., 2016. “Source-to-Sink” System of the Lower Member 3 of Paleogene Shahejie Formation in Steep Slope Zone of Western Chechen Sub-Sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(1): 65–79 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S.H., Xiong, Q.H., Gong, Y.J., et al., 1994. Steep and Gentle Slope-Pattern Fan Deltas and Their Potential as Hydrocarbon Reservoir. *Acta Petrolei Sinica*, 15(S1): 52–59 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C.G., 2013. Controlling Sand Principle of Source-Sink Coupling in Time and Space in Continental Rift Basins: Basic Idea, Conceptual Systems and Controlling Sand Models. *China Offshore Oil and Gas*, 25(4): 1–11, 21, 88 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X.B., Zhao, Y.P., Lu, J., et al., 2019. Sedimentary Characteristics and Controlling Factors of Sublacustrine Fans in Sag C, Weixinan Depression, Beibuwan Basin. *Geological Science and Technology Information*, 38(1): 18–28 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W.X., Zeng, H.L., Zhang, H.F., 1989. Models of Seismic Facies for Continental Mono-Faulted Basins in Eastern China. *Petroleum Geology & Experiment*, 11(2): 125–135 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.W., Liu, Z.F., Zhang, G.C., et al., 2013. The Chasmic Stage and Structural Evolution Features of Beibuwan Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 35(1): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H.T., Xu, C.G., Zhu, X.M., et al., 2017. Advances of the Source-to-Sink Units and Coupling Model Research in Continental Basin. *Earth Science*, 42(11): 1851–1870 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X., Zhu, H.T., Zeng, H.L., et al., 2017. Subdivision, Characteristics, and Varieties of the Source-to-Sink Systems of the Modern Lake Erhai Basin, Yunnan Province. *Earth Science*, 42(11): 2010–2024 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈杰, 刘传虎, 谭明友, 等, 2016. 进积型三角洲交汇区沉积模式: 以东营凹陷沙三中亚段为例. *沉积学报*, 34(6): 1187–1197.
- 董桂玉, 何幼斌, 2016. 陆相断陷盆地基准面调控下的古地貌要素耦合控砂机制. *石油勘探与开发*, 43(4): 529–539.
- 冯文杰, 芦凤明, 吴胜和, 等, 2018. 断陷湖盆长轴缓坡辫状河三角洲前缘储层构型研究: 以大港枣园油田枣南断块孔一段枣 V 油组为例. *中国矿业大学学报*, 47(2): 367–379.
- 葛家旺, 朱筱敏, 雷永昌, 等, 2021. 多幕裂陷盆地构造-沉积响应及陆丰凹陷实例分析. *地质前缘*, 28(1): 77–89.
- 葛家旺, 朱筱敏, 吴陈冰洁, 等, 2019. 辫状河三角洲沉积特征及成因差异: 以珠江口盆地陆丰凹陷恩平组为例. *石油学报*, 40(S1): 139–152.
- 葛家旺, 朱筱敏, 张向涛, 等, 2018. 珠江口盆地陆丰凹陷文昌组构造-沉积演化模式. *中国矿业大学学报*, 47(2): 308–322.
- 胡德胜, 范彩伟, 朱红涛, 等, 2020. 涪西南凹陷流一段高位体系域湖底扇沉积特征及勘探意义. *中国石油勘探*, 25(5): 23–31.
- 姜平, 秦春雨, 杨希冰, 等, 2020. 涪西南凹陷一号断裂陡坡带扇体沉积展布特征及主控因素. *地球科学*, 45(2): 534–546.
- 李才, 范彩伟, 胡林, 等, 2021. 北部湾盆地涪西南低凸起构造演化特征及其成因. *海相油气地质*, 26(4): 319–325.
- 李顺利, 朱筱敏, 李慧勇, 等, 2017a. 源-汇系统要素定量表征及耦合模式: 以沙垒田凸起与沙南凹陷沙河街组为例. *中国海上油气*, 29(4): 39–50.
- 李顺利, 朱筱敏, 刘强虎, 等, 2017b. 沙垒田凸起古近纪源-汇系统中有利储层评价与预测. *地球科学*, 42(11): 1994–2009.
- 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等, 2000. “构造坡折带”: 断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念. *地球科学*, 25(3): 260–266.

刘一鸣, 吴智平, 颜世永, 等, 2021. 中国近海裂陷盆地始新世构造变革的厘定及地质意义: 以北部湾盆地涠西南凹陷为例. 地球科学, 46(6): 2145-2156.

陆威延, 朱红涛, 徐长贵, 等, 2020. 源-汇系统级次划分方法及应用. 地球科学, 45(4): 1327-1336.

秦春雨, 2020. 北部湾盆地涠西南凹陷古近系双层构造演化及沉积响应(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.

秦春雨, 王华, 姜平, 等, 2020. 涠西南凹陷边界断层演化及其对地层充填的控制. 中国矿业大学学报, 49(2): 318-327.

孙万华, 王瑞丽, 刘明全, 等, 2010. 北部湾盆地涠西南凹陷 WZ10-8-1 井流沙港组三段勘探实践分析. 内蒙古石油化工, 36(24): 213-216.

王星星, 朱筱敏, 宋爽, 等, 2016. 渤海湾盆地车西洼陷陡坡带古近系沙河街组沙三下段“源-汇”系统. 古地理学报, 18(1): 65-79.

吴胜和, 熊琦华, 龚姚进, 等, 1994. 陡坡型和缓坡型扇三角洲及其油气储层意义. 石油学报, 15(S1): 52-59.

徐长贵, 2013. 陆相断陷盆地源-汇时空耦合控砂原理: 基本思想、概念体系及控砂模式. 中国海上油气, 25(4): 1-11, 21, 88.

杨希冰, 赵彦璞, 陆江, 等, 2019. 北部湾盆地涠西南凹陷 C 注湖底扇沉积特征及控制因素分析. 地质科技情报, 38(1): 18-28.

张万选, 曾洪流, 张厚福, 1989. 中国东部陆相单断式盆地地震相模式. 石油实验地质, 11(2): 125-135.

张智武, 刘志峰, 张功成, 等, 2013. 北部湾盆地裂陷期构造及演化特征. 石油天然气学报, 35(1): 6-10.

朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 等, 2017. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展. 地球科学, 42(11): 1851-1870.

朱秀, 朱红涛, 曾洪流, 等, 2017. 云南洱海现代湖盆源-汇系统划分、特征及差异. 地球科学, 42(11): 2010-2024.

《地球科学》

2022年8月 第47卷 第8期 要目预告

中国钴地球化学异常特征、成因及找矿远景区预测.....刘东盛等

中蒙边界地区战略性矿产资源锂区域地球化学分布及控制因素.....刘汉粮等

老挝表层沉积物 69 种元素地球化学背景值.....王 玮等

黎府构造带北部南莫溪蛇绿混杂岩的发现及其地质意义.....吴松洋等

大兴安岭北段免渡河地区晚石炭世二长花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和地球化学证据.....许逢明等

二连盆地土壤微细粒铀地球化学分布特征及找矿方向.....严桃桃等

蒙古国东部砂卡岩型铁多金属矿床成矿岩体年代学及地球化学.....张莉莉等

南蒙古古生代岛弧地体中酸性岩石锆石年代学、Hf 同位素特征及地质意义.....张伟波等

实验岩石学发展现状与趋势.....倪怀玮等

实验地球化学的发展历史和研究展望.....杨晓志等