https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.093



# 南 堡 凹 陷 高 柳 及 四 号 构 造 带 沙 一 段 – 东 营 组 扇 体 的 精 细 刻 画 及 其 成 因 机 制

李潇鹏<sup>1</sup>,王 华<sup>1\*</sup>,甘华军<sup>1</sup>,马 乾<sup>2</sup>,陈 思<sup>1</sup>,赵忠新<sup>2</sup>,彭钰会<sup>3</sup>

1. 中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

2. 中国石油冀东油田公司,河北唐山 063000

3. 中国地质大学出版社有限责任公司,湖北武汉 430074

摘 要:准层序组格架下扇体的精细刻画对于揭示陆相断陷湖盆内部沉积充填演化历史、沉积与构造活动等的耦合关系等具 有重要意义,同时,也可为老油区的深入挖潜、细化勘探提供重要参考.利用岩心、测录井及三维地震资料,对南堡凹陷高柳及 四号构造带沙一段一东营组的扇体演化特征、扇体形态、结构和成因机制进行研究.结果表明,从时空演化上,沙一段沉积期高 柳地区扇体发育程度高,多位于中西部,到东营组沉积期4号构造带扇体发育规模逐渐增大.以外部形态和内部结构为依据, 可将发育扇体划分为4个类型,分别为:(1)"外宽内窄",平原河道稳定多分支,前缘河口坝靠近平原,在边界断裂断陷强度高 于湖盆中沉降速率的背景下形成;(2)"外窄内宽",平原河道少分支,河口坝数量多,单个规模小,在有逆牵引背斜区发育;(3) 长条状,平原河道少分支,前缘河道不稳定,河口坝数量多,铺开面积大,在湖盆沉降速率高于边界断裂断陷速率背景下形成; (4)"鸟足状",平原河道稳定,前缘河道多分支,河口坝数量少,单个规模大,在边界断陷速率与湖盆沉降速率相当的背景下形成;

关键词:南堡凹陷;沉积相;扇体演化;成因机制;沉积.

**中图分类号:** P512.2 **文章编号:** 1000-2383(2020)04-1295-13 **收稿日期:** 2019-04-20

# Identification and Formation Mechanism of Fans Developed in 1<sup>st</sup> Member of Shahejie and Dongying Formations, Gaoliu and No.4 Tectonic Belt, Nanpu Sag

Li Xiaopeng<sup>1</sup>, Wang Hua<sup>1\*</sup>, Gan Huajun<sup>1</sup>, Ma Qian<sup>2</sup>, Chen Si<sup>1</sup>, Zhao Zhongxin<sup>2</sup>, Peng Yuhui<sup>3</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Jidong Oil Field Branch, China Petroleum and Natural Gas Co. Ltd., Tangshan 063000, China

3. China University of Geosciences Press Co. Ltd., Wuhan 430074, China

**Abstract:** The identification of fans under the para-sequence framework helps to reveal the sedimentary filling history of continental rift basins, the relationship between sediment and tectonic activities, and to guide the further exploration for oil field. Cores, logging data, and seismic data are used to study the evolution process, shapes, internal architecture, and formation mechanism of fans. Fans are mainly developed in midwestern Gaoliu tectonic belt in 1<sup>st</sup> member of Shahejie Formation, and expand to No. 4 tectonic belt in Dongying Formation. The fans can be classified into 4 types based on shapes and internal

基金项目:国家油气重大专项(No.2016ZX05006-006-002).

**作者简介:**李潇鹏(1989-),男,博士研究生,从事层序地层学及沉积学研究.ORCID:0000-0002-8874-4236. E-mail: lixiaopeng@cug.edu.cn \* **通讯作者:**王华,E-mail: wanghua@cug.edu.cn

**引用格式:**李潇鹏,王华,甘华军,等,2020.南堡凹陷高柳及四号构造带沙一段一东营组扇体的精细刻画及其成因机制.地球科学,45(4): 1295-1307.

architectures: (1) the fans are wide in delta plain, and gradually narrow down in delta front, channels are well developed with multibranches in delta plain, mouth bars are deposited close to delta plain, and this type of fans is developed when the faulting rate of boundary faults is higher than subsidence rate in the lake; (2) the fans are narrow in delta plain, and gradually widen in delta front, the channels show limited branches in delta plain, the amount of mouth bars are large, but each mouth bar shows a small coverage area, and this type of fans is developed when the reverse drag anticlines appear; (3) the fans are elongated, the channels show limited branches in delta plain, the subaqueous channels are unstable, the mouth bars are large in quantity and total coverage area, and this type of fans is developed when the faulting rate of boundary faults is lower than the subsidence rate in the lake; (4) the fans are bird-foot shaped, channels are stable in delta plain, subaqueous channels show large amount of branches, the amount of mouth bars are small, but each mouth bar shows a large coverage area, and this type of fans is developed when the faulting rate of boundary faults is approximately equal with the subsidence rate in lake.

Key words: Nanpu sag; sedimentary facies; fans evolution; formation mechanism; sedimentation.

# 0 前言

扇体内部的精确刻画对于厘清研究区的沉积 充填演化历史、预测有利区带具有十分重要的意义 (刘强虎等,2017).主要的刻画内容包括扇体沉积相 和空间展布的确定、扇体形态及内部结构的解剖 等,刻画的尺度不同,所能反映的扇体的演化过程 也不同(朱红涛等,2017).在经典层序地层学的范畴 下,以三级层序内体系域为基本研究单元的扇体刻 画最为常见(林畅松等,2003;蔡佳和王华,2011;廖 计华等,2012),将扇体的发育与层序结构、层序内 部充填特征进行匹配,空间上重点突出不同坡折类 型等对扇体形态及结构的影响,时间上突出扇体的 演化过程与层序结构演化的响应关系,这可以为研 究区油气勘探初期寻找有利区带提供依据(李增学 等,2018).

不论是在陆架坡折还是陆相断陷湖盆中,更高 精度的扇体刻画已经成为现今的研究热点.在三级 层序格架下,以准层序组为基本研究单元建立相同 成因的层序结构与沉积微相的对应关系,使得单期 次扇体的刻画更加精确. Doughty - Jones et al. (2017)在4个不连续准层序组中的深水扇体的展布 和演化特征,解剖了每个扇体中的补给河道和多个 扇体所形成的河道网络,其单个扇体的刻画精度可 达到 1.6 km×1.3 km. Vakarelov and Ainsworth (2013)将一个三级层序内部的地层细分出多个单 成因元素,并将相邻的成因上具有关联性的单元素 组成不同的元素集,并以此为基础与该层序内部发 育扇体的沉积属性结合,解剖扇体的内部结构特 征,该研究可以用来分析不同扇体的相似性和差异 性,判断扇体发育背景.三级层序尺度的扇体刻画 对于反映宏观的物源迁移、幕式构造变化等成因机 制具有较好的效果.而在准层序组格架内,扇体的 形态、结构等的差异可以反映出构造古地貌等的微 变化的直观影响.

南堡凹陷为已有几十年勘探历史的老油区,构 造沉积的基本认识丰富(徐安娜等,2006;姜华, 2009;史冠中等,2010;张翠梅,2010),精细勘探已 经是该陆相断陷含油气盆地的主要方向,精细层序 地层学、二维三次地震勘探、区域构造和沉积研究、 成图技术、储层描述、测井解释、油田地质和油藏研 究等一系列技术和手段的应用,为老探区挖潜、新 探区的油气发现起到了极为重要的科学指导意义. 因此,本文以岩心、测录井和地震资料为基础,在厘 清该地区发育沉积相特征的前提下,探索了适用于 研究区的以测井和地震资料为基础的扇体刻画技 术,分析高柳及四号构造带沙一段一东营组的扇体 展布及演化特征,对于扇体形态、结构等方面的微 差异性进行总结和成因机制的分析,可以为该地区 的精细勘探提供参考.

### 1 区域地质概况

南堡凹陷地处华北板块北部,是渤海湾盆地中 北部的一个富含油气资源的小型凹陷,面积约 1932 km<sup>2</sup>(图 1a).在侏罗纪早期,库拉板块的北西 向俯冲作用,导致该地区发生区域性的右旋剪切走 滑和基于软流圈隆起的裂陷作用,形成了南堡凹陷 的原始断陷雏形(周海民等,2000).从该时期开始, 南堡凹陷发育有中生界侏罗统、白垩统及新生界 地层.

自凹陷形成以来,宏观上发育有四幕断陷沉降 及其后续的一幕拗陷沉降.第1幕断陷沉降出现在 侏罗纪,在凹陷内表现为下侏罗统与中侏罗统以小



Fig. 1 Geological map (a), stratigraphic chart (b), and structural framework (c) of Nanpu sag 图 b 据王观宏 (2016)

型河湖相的含煤、碳质泥岩为特征的沉积地层,其 后,该幕断陷活动暂停,主要表现在上侏罗统地层 的普遍缺失(周海民等,2000);第2幕断陷对应于白 垩纪,凹陷内发育有以陆源碎屑岩和火山岩为特征 的下白垩统与上白垩统地层,该幕断陷活动在白垩 纪晚期结束,并持续到新生代古近纪中晚期,导致 南堡凹陷古近系中缺失了孔店组及沙四段地层(周 海民等,2000).从始新世开始,库拉板块倾没于亚洲 东部,导致南堡凹陷的区域应力场由原先的北西向 挤压转变为北西向拉张,在该阶段,凹陷的伸展断 陷作用达到了最大强度,沉积了数千米厚度的沙河 街组及东营组地层(周海民等,2000).从发育强度上 划分,第3幕构造断陷内凹陷沉积了沙河街组地层, 到沙一段的沉积末期断陷强度逐渐变弱(图1b),其 后第4幕断陷再度强化,发育东营组地层.第3幕断 陷从强度脉动的角度来分析,又可分为2个裂陷幕 (图1b).综合以上观点,本文将古近系构造演化归 纳出裂陷阶段的3个裂陷幕,分别为裂陷 I幕、裂陷 Ⅱ幕和裂陷Ⅲ幕,拗陷阶段的走滑拗陷(主要对应 馆陶组沉积地层)和加速沉降阶段(主要对应于明 化镇组沉积地层).本文的研究时期为裂陷Ⅱ幕作用 晚期一裂陷Ⅲ幕,分析在湖盆总体沉降速率及边界

断裂断陷强度变化较大的双重特征下(王观宏, 2016),高柳及四号构造带扇体发育的独特性.

古近系沉积期,南堡凹陷内部可划分为10个三 级层序,主要沉积砂砾岩、砂岩与泥岩互层(图1b), 主要沉积相为扇三角洲、辫状河三角洲,层序结构 以箕状断陷为特征(图1c),凹陷北部沉积范围及层 序内部充填样式主要受西南庄断层、柏各庄断层、 高柳断层等一级控边断裂控制,南部为斜坡沉积, 来自沙垒田凸起等的物源经南部斜坡充填到南堡 凹陷.本文研究的目的层段为沙一段和东营组各个 三级层序,以层序格架内的准层序组为基本研究 单元.

# 2 沉积特征分析

通过覆盖全区的岩心观察得知,南堡凹陷发育 的沉积相具有较为明显的分带性,南部自沙河街组 到东营组地层均为辫状河三角洲、湖泊等沉积相互 层,而北部5号构造带、老爷庙、高柳及4号构造带 在古近系以扇三角洲沉积为特征.

具体到本文研究区,尤其是高柳断层的下降 盘,扇三角洲的亚相发育也具有一定的时间规律, 在沙三段-东三下段沉积期,以扇三角洲前缘沉积 为主,东三上段-东一段以扇三角洲平原沉积为 主,该现象与高柳断裂在裂陷Ш幕强烈活动有关 (王观宏,2016).下面以高21井沉积亚相相变区段 为例介绍这种沉积亚相的演化特征及其在岩心、测 井及地震上的主要响应特征.东三下沉积期,该井 所在位置主要发育扇三角洲前缘沉积相,GR、SP这 些岩性敏感曲线上多发育稳定低幅摆动直线型特 征、夹有漏斗形和钟形特征,整体上泥岩、粉砂质泥 岩、粉砂岩含量高,以灰黑色为主,发育的细砂岩具 有砂质纯净的特征,如No.6岩心所示(图2).到该段 的顶部,随着断陷强度增大,高北断块逐渐隆升为 物源区,该位置距离源区位置缩短,粗粒供应增多, 使得顶部前缘水下分流河大发育增多.到东三上段 沉积期,泥岩颜色由灰黑色转变为红褐色,反映原 来还原为主的沉积环境转变为氧化环境,说明水体



Fig. 2 Cores, and wireline log features of the sedimentary facies showing the changing of sub-facies in well Gao 21 平面位置见图 1a



图 3 过高 21 井顺物源方向典型沉积亚相演化区段地震相差异分析 Fig. 3 The differences of seismic facies for different sub-facies along the provenance direction across well Gao 21 平面位置见图 1a

深度减小或该地区已经处于间歇性淹没和暴露的 位置.在岩心上,砂泥岩裹挟不定向的杂色砾岩的 块状沉积(图2,岩心 No.4),变形构造(图2,岩心 No.5, No.6)的发育,强水动力条件下河道粗砂岩中 出现的较大的具有定向性的冲刷泥砾(图2,岩心 No.3),含有较大砾石的块状砂砾岩沉积(图2,岩心 No.2)以及红褐色泥岩中细节保存较为完整的植物 茎秆(图2,岩心 No.1)等,都反映了该时期强水动 力、近物源、快速堆积的沉积特征,结合该地区的断 层控边沉积背景,扇三角洲平原亚相为较合理的 解释.

在地震上这种沉积亚相转换所带来的响应特 征同样明显,如图3所示.其一,亚相转换界面 (SB8)上出现了局部的低角度不整合,不同亚相沉 积的不同水动力条件和碎屑堆积样式的差异性导 致了这种不整合的出现;其二,在下部前缘亚相沉 积时期,同相轴具有中等连续特征,且其顺物源的 走向具有一定的协调性,向湖盆方向不断堆积,而 在上部平原亚相中,这种平原沉积区的地震相表现 为杂乱反射、不连续特征,且不具有同相轴走向上 的明显的协调性.

# 3 扇体精细刻画技术

陆相湖盆与陆架坡折发育三角洲的主要区别 在于扇体发育不稳定,同等时间间隔内扇体发育期 次更多,单期次扇体规模较小,同时扇体的横向发 育位置不够稳定,这与物源的不稳定性、湖平面的 频繁变化密切相关(章诚诚,2018).具体到南堡凹陷,以高柳地区SQEd<sub>2</sub>三级层序的4个准层序组为例,可识别出多达5期扇体(图4).从扇体的展布位置来讲,扇体1主要发育在西部地区,延伸至该地区中部,而扇体3、扇体5的主发育区在高柳地区中部,扇体2、扇体4在高柳地区东部发育,不同扇体的规模、位置均不相同.从扇体发育的顺序来看,同一地区的扇体发育持续性较差,主扇体在不同时期的横向迁移特征明显.

在这种相变快,横向展布不稳定的背景下,只 用测录井资料是难以较好厘定扇体形态结构的,因 此,充分利用地震资料的横向分辨率就显得尤为重 要.不同的沉积体系在横向上多存在波阻抗反射强 度、连续性等差异性,将该差异性与其地质意义匹 配起来,就能合理地解释沉积体系的平面展布及时 空演化,这也正是利用地震资料进行扇体识别的理 论基础(曾洪流等,2012;朱筱敏等,2013;国景星 等,2018;刘海等,2018;殷文等,2018).

在本文实际研究当中,尝试了叠后地震振幅相 关属性、瞬时类属性(图 5a)、频谱分析、波形聚类分 析、地震相分析等多种研究手段,并将其与测井资 料进行与实际地质含义的属性标定.研究区扇三角 洲沉积体系在叠后地震数据体上主要表现为:平原 区地震反射同相轴方向杂乱,反射强度不均一,连 续性极差,向凹陷方向到前缘区之后波形特征多 变,同相轴类型多样.一种沉积相发散对应多种波 形的情况,也存在一种波形对应多种沉积相类型的 情况,因此利用波形聚类的方法很难将地震的波形









特征与需要对应的沉积微相特征匹配起来.

频谱分解方法将地震数据的波形图通过一定 的算法转换为频率体.在地层岩性中有明显差异性 的地层中,如河道沉积、厚层泥岩中的甜点沉积等, 均可以用频率的异常体来加以识别.频谱调谐体相 较于其他地震处理手段来讲,最大的优势是其可以 提供10m甚至更高的分辨率,因此,对于分析薄储 层,描述沉积特性如河道或暗礁等,频谱分解具有 显著的效果,但对于扇三角洲沉积体系这种岩性混 杂,平面及纵向相变快,沉积环境极不稳定的地质 条件,其可发挥的作用十分有限.

叠后振幅类属性和瞬时类属性是较为公认的 岩性敏感属性(严皓等,2019),但是单一的某种属 性极易受到地下各种干扰信息影响,在利用单一属 性与钻井区进行岩性与属性相互校验的时候发现, 其相互的可对比性并不强,如图5a所示.但是,不论 是正相关或负相关,这些属性值与岩性均存在一定 的匹配关系,因此,在本次研究中,利用这些岩性敏 感属性值与自然伽马曲线值进行对比神经网络训 练,并得出一个预测属性算法,将该算法计算得出 的模拟自然伽马值与实际井旁自然伽马测井曲线 进行比对,如图5b所示,得到与岩性敏感曲线较为 一致的地震属性.利用该拟合属性算法区分不同四 级层序横向上的岩性变化,进一步识别刻画扇体具 有较好的应用效果,实际如图 5c 所示,砂泥岩的区 分性较好,扇体的形态清晰,可以用来进行扇体的 精细刻画.

# 4 扇体的时空演化

本文在进行扇体演化特征分析之前,首先采用 井震结合的方式来建立准层序组格架.如图6所示, 将目标层段的单井旋回特征与地震反射特征结合, 建立 SQEs<sub>1</sub>、SQEd<sub>3</sub><sup>\*</sup>、SQEd<sub>3</sub><sup>\*</sup>、SQEd<sub>2</sub>和 SQEd<sub>1</sub>共5 个三级层序的准层序组格架,识别出20个准层 序组.

在 SQEs<sub>1</sub>各准层序组内,高柳地区扇体持续发 育,中西部发育最为频繁,4号构造带扇体发育规模 逐渐增大;扇体结构上,边界断裂强断陷作用控制 形成"外宽内窄",扇三角洲平原沿边界断裂展布的 特点,如图7中PS2~PS4中期扇体平面展布为例. 到SQEd<sub>3</sub>\*各准层序组时,高柳地区扇体持续发育其 规模较大,早期中西部发育强度高,晚期中东部发 育强度高,4号构造带基本不发育扇体;扇体结构 上,扇三角洲前缘多发育水下分流河道不稳定,河 口坝在前缘堆积面积大,较为平铺的特点,如图7中 PS5早期-PS7扇体展布所示.到SQEd。"沉积期, 各准层序组内高柳地区扇体持续发育,4号构造带 晚期发育大规模扇体,扇体结构上,扇三角洲前缘 河口坝相互叠置连片,较为集中,局部河控较强的 扇体前缘河口坝发育严格依赖稳定的水下分流河 道,多呈"串珠状",如图7中PS12晚期扇体所示. SQEd<sub>2</sub>及SQEd<sub>1</sub>中扇体的平面展布特征及内部结构 较为相似,扇体发育规模大,前缘水下分流河道不 稳定,分支河道发育数量多,河口坝较为平铺,如图 7中PS19扇体.



#### 图6 准层序组识别流程图

Fig. 6 Flow chart of the approach for building the para-sequence framework 井位及剖面位置见图 1a



Fig. 7 Evolution features of fans in different para-sequences

### 5 扇体类型及内部结构

如概况中所介绍,SQEs<sub>1</sub>-SQEd<sub>1</sub>三级层序沉积 期,该地区具有强断陷和强拗陷的双强作用,该双 强的动态变化所形成的差异性构造古地貌是影响 扇体形态及内部结构的关键因素.本文以这20个准 层序组的扇体的平面展布形态、内部结构为依据, 总结出了4种扇体类型,不同类型扇体的外部形态 及内部结构对比如图8所示,扇体的详细内部解剖 如下文.

扇体类型一:总体上为"外宽内窄"形,在扇三 角洲的平原及前缘的近端,扇体覆盖面积大,向前 缘方向面积不断缩小.扇体的平原展布范围受断层 活动限制明显,平原的长轴方向基本平行于断层的 走向,且平原向前延伸距离较短,表现为陆源碎屑 进入湖盆之后很快进入稳定的水下环境.前缘在靠 近平原的区域展布面积大,向前迅速缩小,只在局 部有较远的延伸距离,所以在平面上多呈局部凸起 的形态,这与扇体内部的河道向前延伸的距离有关. 在扇体的平原发育区,河道多为近距离发育,在平 原区多出现分支,进入前缘后河道发育迅速消失, 只有在局部强出现强水动力河道,主水下分流河道 进入前缘出现多水下分流河道的现象并不明显,往 往是在靠近平原区河道发育迅速消亡,形成靠近平

		LL day with the					
类型	平面展布	外部形态			内部结构		
		扇体	平原	前缘	平原河道	前缘河道	河口坝
		"外宽 内窄"	沿控边 断裂分 布	近平原宽, 向前迅速 收窄	多分支,延 伸距离短	河道稳定, 少分支	"串珠 状",近 平原
1		"外窄 内宽"	沿控边 断裂分 布	近平原窄, 向前迅速 发散	少分支,延 伸距离长	河道不稳 定,多分 支	数量多, 铺开面积 大,单个 面积小
11		长条轴拉 条轴控裂 向	向湖盆 方向凸 出	向湖盆方 向凸出	少分支,河 道稳定,延 伸距离长	河道不稳 定,多分 支	数量多, 铺开面积 大
四		鸟足状	向湖盆 方向凸 出	呈"枝杈 状"	少分支,河 道稳定,延 伸距离长	河道稳定, 少分支	数量少,, 单个规模 大,铺开 面积小

图8 扇体形态及内部结构对比分析

Fig. 8 Comparison chart of the shapes and internal architectures of fans in different types

原的河口坝沉积,而在局部水动力较强的主河道进 入前缘之后可形成数量十分有限的水下分流河道, 并在河道末端形成河口坝沉积.总的来说,由于前 缘水下分流河道发育数量并不多,其河口坝展布范 围有限,其形态多呈"串珠状",严格受到河道发育 的限制,这类扇体在研究的目的层段发育十分频繁.

扇体类型二:形态总体上为"外窄内宽"形,在 扇三角洲的平原及前缘的近端覆盖面积小,前缘向 湖盆方向扇体逐渐铺开,面积增大.扇体的平原展 布范围同样受到断层活动限制,平原的长轴方向基 本平行于断层的走向,平原亚相的范围同样延伸距 离较短,该形态与类型一类似,主要是控边断裂断 陷活动较强所导致.前缘在靠近平原的区域展布面 积小,向前扩大,为较为传统的三角洲前缘朵体形 态.在扇体的平原发育区,河道延伸距离小,发育规 模较小,只在物源供给强度最大的中心区域河道向 前延伸才比较稳定.这种河道延伸距离短,分支河 道数量低的特征在前缘发生改变.在水动力较强的 中心河道进入到湖盆水下前缘范围后,开始形成数 量较多的前缘水下分流河道,这与类型一存在较大 的区别.这种大量发育的水下分流河道大量铺开, 形成了前缘的朵体形态.同时,这种大量发育的水 下分流河道形成了在前缘铺开面积较大的河口坝 沉积,不同于类型一中河口坝长轴与河道走向基本 一致的形态,在该类型扇体中,河口坝形态较为多

样,长轴方向差异性也较大,这与水下分流河道的 多方向性有关,这类扇体同样发育较为频繁,尤其 是在SQEd<sub>2</sub>及SQEd<sub>1</sub>各个准层序组中.

扇体类型三:形态总体上从平原到平原的扩展 范围稳定,扇体长轴方向与控边断裂走向垂直.扇 三角洲平原向湖盆方向凸出,其走向垂直于控边断 裂走向.平原发育的河道数量较前两种类型少,但 是在平原上发育的河道都比较稳定.前缘的展布范 围比平原大,主要是向着湖盆方向延伸,向多方向 发散的现象并不明显.主河道进入前缘之后,形成 一定数量的水下分流河道,表明主河道发育稳定性 变差,从而形成在前缘铺开面积较为广泛的河口坝 沉积.该类型扇体主要发育在边界断裂活动性小于 前端湖盆沉降速率的背景下,边界断裂的活动性对 于扇体形态和内部结构的控制作用减弱,高沉积速 率形成的古地貌及物源供给强度成为该扇体形态 形成的主要影响因素.前缘多分支河道表明河道发 育并不稳定,多摆动,向湖盆方向河道水动力强度 减弱较快.

扇体类型四:表现为鸟足状,在扇三角洲的平 原及前缘的近端覆盖面积小,前缘向湖盆方向扇体 逐渐铺开,面积增大.其平原特征与类型三相似,均 表现为凸起状,长轴方向与控边断裂走向垂直.前 缘向湖盆方向铺开的特征与类型三相似,但不同的 是在类型三中,前缘形态为近半椭圆形,而在该类 型中,前缘展布范围受河控作用明显,形状并不规则.在该种类型扇体的前缘,水下分流河道发育稳定,分支河道数量少,主河道发育规模较大,所形成的河口坝严格受河道的发育走向控制,长轴方向指向河道方向,分布较为集中,铺开面积小.

# 6 不同类型扇体成因机制及发育模式

扇体的展布位置多受控于物源及通道位置(张 建林等,2002;屈红军等,2011;孔凡翠等,2011;李 跃等,2018),扇体的前缘面积、扇体内部砂质碎屑 的特征等与湖平面、气候的周期性变化相关(方念 乔,1990;王冠民,2005;邹德江,2009;徐兆辉等, 2011),而本文所探讨的扇体形态及内部结构的差 异性则主要是受控于不同的构造古地貌发育背景. 根据这种动态的断陷及拗陷强度的差异性,总结出 4种不同类型扇体的主要发育机制,如图9所示.

类型一扇体发育在控边断裂的断陷速率高于 湖盆中的总沉降速率背景下,控边断裂根部强烈的 断陷活动限制了扇体平原的长轴展布方向,相对较 低的地势使得大多数平原分流河道在平原区就开 始分支并逐渐消亡,只有在扇体中心水动力最强的 河道才能远距离延伸发育.向湖盆中心延伸时,由 于湖盆中的相对地势要高于控边断裂根部,使得水 体的碎屑搬运能力迅速下降,形成近距离的水下分 流河道沉积与靠近平原的河口坝沉积.

类型二扇体发育在控边断裂的断陷速率与湖 盆中的总沉降速率均比较强,并且在这"双强"发育 区之间存在有相对较弱的活动区的背景下.这种较 弱的沉降区多是由于边界断裂的高强度活动所形 成的逆牵引背斜.该构造古地貌特征将扇体的平原 与前缘的展布特征区分开来,平原沉积被断裂根部 限制,其展布长轴方向基本平行于控边断裂的走 向,弱活动区的位置限制了平原的延伸范围,并且 对于大部分的平原河道起到了阻隔的作用.但是在 越过该弱活动区之后,部分较为稳定的分流河道由 于地势迅速降低的古地貌特征,开始不断发散,形 成数量增多的水下分流河道,扇体开始发散.

类型三扇体发育在控边断裂的断陷活动速率 低于湖盆中的总沉降速率的背景下,从地貌特征上 来讲,靠近控边断裂的位置地势相对较高,而进入 湖盆之后地势开始迅速降低,这就使得扇体进入湖 盆后主要向着湖盆中心运移,而不是在靠近控边断 裂根部发育,形成长轴方向基本垂直于断裂走向的 平原形态特征,前缘水下分流河道由于进入湖盆后 地势迅速降低,形成多个水下分流河道,且这些水 下分流河道主要向着湖盆中前端地势较低的方向



图 9 不同类型扇体发育机制及实例分析 Fig. 9 Formation mechanism and examples for different types of fans

发育,造成前缘呈"长条状",其长轴方向也基本垂 直于控边断裂的走向.因此,造成该类向湖盆方向 长距离延伸的扇体形态的主要因素应为向湖盆方 向快速变陡加深的古地貌特征.

类型四扇体发育在控边断裂的断陷活动速率 与湖盆中的总沉降速率相当的背景下.这就形成了 扇体发育期地势较为平坦的地貌特征,靠近控边断 裂的区域与湖盆中位置基本为等速沉降.物源进入 到该类特征的湖盆区域后,物源供给强度及水动力 强度成为扇体形态及内部结构的主控因素,一般持 续性的物源供给就会形成向湖盆凸起的扇体平原 形态,且前缘形态受稳定的水下分流河道发育的限 制明显,多形成这种"鸟足状".

### 7 结论

(1)研究区主要发育扇三角洲沉积,混杂堆积 及变形构造发育,含巨砾砂砾岩,扇三角洲平原在 地震上呈杂乱、不连续、定向性差的反射特征.

(2)裂陷 II 幕晚期高柳地区扇体较为发育,主 要集中在该地区的中西部,到裂陷 III 幕时高柳及4 号构造带扇体发育规模均比较大,这种大规模扇体 发育一直持续到该裂陷幕结束.空间位置上,扇体 的迁移频繁,在相邻的准层序组中扇体的发育强度 横向变化也较快.

(3)扇体从外部形态及内部结构上可分为4种 类型,不同的类型在在平原的主要延伸方向、平原 河道发育规模,前缘河口坝等特征均有所差异,这 种差异性主要与边界断裂断陷强度、湖盆中沉降速 率两者的动态变化相关,此外,在局部地区,剧烈的 边界断裂活动所形成的逆牵引背斜也对扇体的形 态及内部结构有较大影响.

(4)将岩性敏感测井曲线与地震属性进行拟合 对比,利用神经网络算法计算反映岩性的综合地震 属性,充分利用了地震资料横向分辨率来反映扇体 的平面形态,可以为研究区的精细勘探提供重要的 地质依据.

#### References

Cai, J., Wang, H., 2011. The Temporal and Spatial Configure Relation of Sedimentary Systems and Sequence Stratigraphic Framework of Lingshui Formation in Qiongdongnan Basin. *Offshore Oil*, 31(1): 16-21(in Chinese with English abstract).

- Doughty-Jones, G., Mayall, M., Lonergan, L., 2017. Stratigraphy, Facies, and Evolution of Deep-Water Lobe Complexes within a Salt - Controlled Intraslope Minibasin. AAPG Bulletin, 101(11): 1879-1904. https://doi.org/ 10.1306/01111716046
- Fang, N.Q., 1990. Climatic and Glacio-Eustatic Control over the Recent Quaternary Sedimentation in the Northeast Ganges Deep Sea Fan. *Geoscience*, 4(1): 10-22(in Chinese with English abstract).
- Guo, J.X., Wang, X.T., Liu, W.K., et al., 2018. Application of the Seismic Sedimentology Based on the Attribute Waveform Classification. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 37(6):125-131(in Chinese with English abstract).
- Jiang, H., 2009. Tectono-Sequence Stratigraphic Analysis in Dongying Formation of Nanpu Sag and Its Petroleum Geological Significance(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 154 (in Chinese with English abstract).
- Kong, F.C., Yang, R.D., Han, X.T., et al., 2011. Analysis of Sediment Provenance and Sedimentary Control Factors in Yaoshang Formation, Weining County in Guizhou Province. *Geoscience*, 25(3): 464-475(in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Meng, Q., Li, J.H., et al., 2018. The Characteristics of Provenance System and Their Control on Sedimentary System of Nantun Formation in the Beier Depression, Northern China. Acta Sedimentologica Sinica, 36(4): 756-767(in Chinese with English abstract).
- Li, Z.X., Song, G.Z., Wang, D.D., et al., 2018. Characteristics of (Fan) Braided River Delta in Oligocene Coal Measures of Qiongdongnan Basin. *Earth Science*, 43(10): 3471-3484(in Chinese with English abstract).
- Liao, J. H., Wang, H., Xiao, J., et al., 2012. Episodic Rifting and Integrated Response Process of Tectonic, Sequence Stratigraphy and Sedimentary Filling in Paleogene of Qiongdongnan Basin, South China Sea. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 42(4): 970-983(in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Zheng, H. R., Ren, J. Y., et al., 2003. The Controlling of Syn-Faults on Sedimentary Fillings in Dongying and Zhanhua Depression, Early Tertiary, Bohai Bay Basin. Science in China (Series D), 11: 1025-1036 (in Chinese).
- Liu, H., Lin, C.Y., Dong, C.M., et al., 2018. Sedimentary Facies of Complex Meandering Belt Based on Seismic Sedimentology. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 42(6): 30-39(in Chinese

with English abstract).

- Liu, Q.H., Zhu, X.M., Liu, Q.H., et al., 2017.Source-to-Sink System of the Steep Slope Fault in the Western Shaleitian Uplift. *Earth Science*, 42(11): 1883-1896(in Chinese with English abstract).
- Qu, H.J., Ma, Q., Gao, S.L., et al., 2011. Controls of Provenance and Depositional Facies on Sandbody Distributions of the Upper Paleozoic in Southeast Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(5): 825-834(in Chinese with English abstract).
- Shi, G.Z., Wang, H., Xu, B., et al., 2010. Activity of Baigezhuang Fault of Nanpu Depression and Its Controlling on Sedimentation. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, (2):69-74(in Chinese with English abstract).
- Vakarelov, B. K., Ainsworth, R. B., 2013. A Hierarchical Approach to Architectural Classification in Marginal-Marine Systems: Bridging the Gap between Sedimentology and Sequence Stratigraphy. AAPG Bulletin, 97(7): 1121-1161. https://doi.org/10.1306/11011212024
- Wang, G. H., 2016. "Double Intense Effect" of Tectonic Activity and Its Control on Deposition in Dongying Formation, Nanpu Sag(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 174 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G.M., 2005. The Sedimentary Control to Mudstone and Shale in Lacustrine High-Frequency Cycle by Paleoclimate Change(Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Xu, A. N., Zheng, H. J., Dong, Y. X., et al., 2006. Sequence Stratigraphic Framework and Sedimentary Facies Prediction in Dongying Formation of Nanpu Sag. *Petroleum Exploration and Development*, 33(4): 437-443(in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.H., Hu, S.Y., Wang, Z.C., et al., 2011. Restoration of Paleoclimate and Its Geological Significance: As an Example from Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 29(2): 235-244(in Chinese with English abstract).
- Yan, H., Li, B., Li, J., et al., 2019. Quantitative Prediction of Mid - Deep Thin Sand Thickness with Seismic Attributes: A Case Study of Bohai Oilfield. *Progress in Geophysics*, 34(1): 401-405(in Chinese with English abstract).
- Yin, W., Zhu, J.B., Li, Y., et al., 2018. Thin Reservoir Prediction Based on Seismic Segmented - Frequency Band Tune and Wheeler Transformation. *Oil Geophysical*

Prospecting, 6(53):1269–1282 (in Chinese with English abstract).

- Zeng, H.L., Zhu, X.M., Zhu, R.K., et al., 2012. Guidelines for Seismic Sedimentologic Study in Non-Marine Postrift Basins. *Petroleum Exploration and Development*, 39(3): 275-284(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. C., 2018. Evolution of the Basin Fill and Its Control Factors of Lower Cretaceous Xiagou Formation in the Qingnan Subsag, Jiuquan Basin, Northwestern China(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 160 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. M., 2010. Tectono-Sedimentary Analysis of Nanpu Sag in the Bohaiwan Basin(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 130 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.L., Lin, C.S., Zheng, H.R., 2002. Controlling Action of Fractures, Palaeogeomorphology and Material Sources of Rift Lake Basin on Sedimentary System—Taking Es3 Gubei Subsag as Example. Oil & Gas Recovery Technology, 4: 24-27 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. M., Wei, Z. W., Cao, Z. H., et al., 2000. Relatioship between Formation, Evolution and Hydrocarbon in Nanpu Sag. Oil & Gas Geology, 21(4):345-349(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.M., Zhao, D.N., Zeng, H.L., et al., 2013. Sedimentary Characteristics and Seismic Sedimentologic Responses of Shallow - Water Delta of Qingshankou Formation in Qijia Area, Songliao Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 31(5):889-897(in Chinese with English abstract).
- Zou, D.J., 2009. Controlling Mechanism on Sandbody and Favorable Prospecting Directions in Fault Lacustrine Basin, Take Shenxian Sag, Jizhong Depression, Bohaiwan Basin for an Example(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 蔡佳,王华,2011.琼东南盆地陵水组层序格架及沉积体系的 时空配置关系.海洋石油,31(1):16-21.
- 方念乔,1990.恒河深海扇东北区域晚第四纪气候和海平面 变化对沉积作用的控制.现代地质,4(1):10-22.
- 国景星,王霄霆,刘文凯,等,2018.基于属性波形分类的地震 沉积学应用.大庆石油地质与开发,37(6):125-131.

第4期

- 姜华,2009.南堡凹陷东营组构造层序地层分析及其油气地 质意义(博士学位论文).武汉:中国地质大学,154.
- 孔凡翠,杨瑞东,韩晓形,等,2011.贵州威宁窑上组沉积物物 源特征及沉积控制因素分析.现代地质,25(3): 464-475.
- 李跃,蒙启安,李军辉,等,2018.贝尔凹陷南屯组物源特征及 其对沉积体系的控制.沉积学报,36(4):756-767.
- 李增学, 宋广增, 王东东, 等, 2018. 琼东南盆地渐新统煤系 (扇)辫状河三角洲特征. 地球科学, 43(10):3471-3484.
- 廖计华,王华,肖军,等,2012.琼东南盆地古近纪幕式裂陷及 构造、层序和沉积的综合响应过程.吉林大学学报(地球 科学版),42(4):970-983.
- 林畅松,郑和荣,任建业,等,2003. 渤海湾盆地东营、沾化凹 陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制.中国 科学(D辑:地球科学),33(11):1025-1036.
- 刘海,林承焰,董春梅,等,2018.基于地震沉积学的复杂曲流 带沉积相研究.中国石油大学学报(自然科学版),42(6): 30-39.
- 刘强虎,朱筱敏,李顺利,等,2017.沙全田凸起西部断裂陡坡 型源-汇系统.地球科学,42(11):1883-1896.
- 屈红军,马强,高胜利,等,2011.物源与沉积相对鄂尔多斯盆 地东南部上古生界砂体展布的控制.沉积学报,29(5): 825-834.
- 史冠中,王华,徐备,等,2010.南堡凹陷柏各庄断层活动特征 及对沉积的控制.北京大学学报(自然科学版),(2): 69-74.
- 王观宏,2016.南堡凹陷东营组堆积期构造活动的"双强效 应"及其对沉积的控制(博士学位论文).武汉:中国地质 大学.
- 王冠民,2005.古气候变化对湖相高频旋回泥岩和页岩的沉积控制——以济阳坳陷古近系为例(博士学位论文).广州:中国科学院广州地球化学研究所.

- 徐安娜,郑红菊,董月霞,等,2006.南堡凹陷东营组层序地层 格架及沉积相预测.石油勘探与开发,33(4):437-443.
- 徐兆辉,胡素云,汪泽成,等,2011.古气候恢复及其对沉积的 控制作用——以四川盆地上三叠统须家河组为例.沉 积学报,29(2):235-244.
- 严皓,李宾,李久,等,2019.基于地震属性的中深层薄砂层厚度定量预测——以渤海A油田为例.地球物理学进展, 34(1):401-405.
- 殷文,朱剑兵,李援,等,2018.基于地震分频调谐体和Wheeler转换技术的薄储层预测方法.石油地球物理勘探,6 (53):1269-1282.
- 曾洪流,朱筱敏,朱如凯,等,2012.陆相坳陷型盆地地震沉积 学研究规范.石油勘探与开发,39(3):275-284.
- 张翠梅,2010. 渤海湾盆地南堡凹陷构造一沉积分析(博士学 位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 张建林,林畅松,郑和荣,2002.断陷湖盆断裂、古地貌及物源 对沉积体系的控制作用——以孤北洼陷沙三段为例. 油气地质与采收率,4:24-27.
- 章诚诚,2018.酒泉盆地青南次凹下沟组沉积充填演化及其 控制因素研究(博士学位论文).武汉:中国地质大 学,160.
- 周海民,魏忠文,曹中宏,等,2000.南堡凹陷的形成演化与油 气的关系.石油与天然气地质,21(4):345-349.
- 朱红涛,徐长贵,朱筱敏,等,2017.陆相盆地源一汇系统要素 耦合研究进展.地球科学,42(11):1851-1870.
- 朱筱敏,赵东娜,曾洪流,等,2013.松辽盆地齐家地区青山口 组浅水三角洲沉积特征及其地震沉积学响应.沉积学 报,31(5):889-897.
- 邹德江,2009. 断陷湖盆控砂机制研究与有利勘探方向 优选——以冀中坳陷深县凹陷为例(博士学位论文). 北 京:中国地质大学.