

文章编号: 1671-1505(2025)04-0811-12 DOI:10.7605/gdxb.2025.089

三角洲—滩坝复合砂体沉积模式和成因机制研究进展与展望*

纪友亮^{1,2,3} 董志武¹ 许 瑞¹ 李易伦¹ 高崇龙^{1,3}
周 勇^{2,3} 刘君龙^{2,4} 任 影^{1,3}

1 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆克拉玛依 834000

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

4 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102200

摘要 三角洲—滩坝复合砂体, 是河流入(海)湖形成的三角洲砂体在(海)湖水动力改造、(海)湖平面频繁变化引起的岸线迁移等因素的共同作用下形成的一种特殊结构的砂体, 其分布规律很难用单成因的沉积模式进行描述, 但含油气盆地的勘探实践和现代沉积考察表明, 这种复合砂体在含油气盆地中广泛发育。在分析了大量研究实例、现代沉积考察的成果以及查阅了有关复合砂体的研究文献的基础上, 对三角洲—滩坝复合砂体的沉积模式和成因机制进行了综合分析。研究认为:(1)影响复合砂体发育的控制因素包括沉积旋回作用、复合水动力的相互作用、地形因素、混积作用和事件性沉积等;(2)三角洲—滩坝复合砂体的分布模式有 4 种类型, 分别为岸线迁移—三角洲侧缘—滩坝复合模式、三角洲前缘型河口坝—碎屑岩滩坝复合模式、三角洲分流河道—沿岸滩坝复合模式、三角洲前缘河口坝—碳酸岩滩坝叠置复合模式。

关键词 复合砂体 成因机制 水动力条件 沉积模式

第一作者简介 纪友亮, 男, 1962 年生, 1983 年获华东石油学院学士学位, 1991 年获石油大学(北京)博士学位, 现为中国石油大学(北京)地学院教授和中国石油大学(北京)克拉玛依校区特聘教授, 博士生导师, 主要从事石油地质学、沉积学和层序地层学方面的研究。E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

A review of research progress and prospects on depositional models and genetic mechanisms of delta-beach bar composite sand bodies

JI Youliang^{1,2,3} DONG Zhiwu¹ XU Rui¹ LI Yilun¹ GAO Chonglong^{1,3}
ZHOU Yong^{2,3} LIU Junlong^{2,4} Ren Ying^{1,3}

1 Karamay Campus, China University of Petroleum (Beijing), Xinjiang Karamay 834000, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

4 SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102200, China

* 国家自然科学基金项目(编号: 41272157, 42072115)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41272157, 42072115)]

收稿日期: 2025-03-22 改回日期: 2025-05-05

Abstract Delta-beach bar composite sand bodies represent a unique sedimentary architecture formed through the interplay of multiple factors. These include reworking by the hydrodynamic force of marine/lacustrine waters and shoreline migration caused by frequent sea/lake level fluctuations, which collectively act on deltaic sand bodies at river-sea/lake interfaces. Their complex distribution pattern cannot be characterized by a single-origin sedimentary model. However, these composite sand bodies are widely developed within clastic reservoirs of hydrocarbon-bearing basins. Through comprehensive analysis of numerous case studies, modern sedimentary investigations, and review of relevant research literatures on composite sand bodies, this paper systematically examines research advances in sedimentary models and genetic mechanisms of delta-beach bar composite sand bodies. Key findings are as follows: (1) Primary controlling factors on composite sand bodies development include sedimentary cyclicity, composite hydrodynamic interactions, topographic factors, mixed sedimentation, and event sedimentation, *etc.* (2) There are four types of distribution models for delta-bar complex sand bodies, namely: shoreline migration-delta lateral margin bar complex model, delta front estuarine bar-clastic bar complex model, delta distributary channel-coastal bar complex model, and delta front estuarine bar-carbonate bar superposition complex model.

Key words composite sand body, genetic mechanism, hydrodynamic condition, sedimentary model

About the first author JI Youliang, born in 1962, obtained a bachelor's degree from East China Petroleum Institute in 1983 and earned a PhD degree from China University of Petroleum (Beijing) in 1991. He is currently a professor at the School of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), a specially-appointed professor at the Karamay Campus of China University of Petroleum (Beijing), and a supervisor of doctoral students. His main research areas include petroleum geology, sedimentology, and sequence stratigraphy. E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn.

0 引言

三角洲—滩坝复合砂体,是由于河流入(海)湖形成的三角洲砂体在(海)湖水动力改造、(海)湖平面频繁变化引起的岸线迁移等因素的共同作用下形成的一种特殊结构的砂体,其分布规律很难用单成因的沉积模式进行描述,但含油气盆地的勘探实践和现代沉积考察表明,这种复合砂体在含油气盆地中的碎屑岩储集层中广泛发育,其不仅是油气勘探的重要目标,其沉积特征还可反演古水动力条件与古地理环境,因此,三角洲—滩坝复合砂体不仅是油气勘探的重要领域,也是沉积学者应该关注的研究课题之一(刘君龙等, 2015a, 2015b, 2018; 纪友亮等, 2016)。

虽然“复合砂体”在含油气盆地中的碎屑岩储集层中广泛发育,但对复合砂体的形成机制、沉积模式和分布规律的研究报道得不多。究其原因,笔者认为有如下几个方面:(1)对不同成因砂体之间关联性认识不足,研究相对孤立;(2)地质资料

存在多解性;(3)对已有沉积相模式理解不深刻,“复合砂体”没有得到重视。

因此,到目前为止,很多含油气盆地沉积相的编图工作都是在单成因模式的指导下完成的,为了使沉积盆地沉积相的编图更符合实际,就需要充分考虑地质历史时期不同环境所沉积的砂体之间成因联系。要反映不同环境所沉积的砂体之间成因联系和复合砂体的分布特征,就需要建立完善的“复合砂体”沉积模式,来指导沉积相的研究和古地理的编图工作。要做到这一点,就需要群策群力,通过将今论古和现代沉积考察,建立起完善的不同类型的“复合砂体”的沉积模式。

作者在分析了大量科研实例、现代沉积考察的成果以及查阅了有关复合砂体的研究文献的基础上,对复合砂体、尤其是三角洲—滩坝复合砂体的沉积模式和成因机制进行了综合分析,把三角洲—滩坝复合砂体的分布模式分为4种,分别是岸线迁移—三角洲侧缘滩坝复合模式、(扇)三角洲前缘

河口坝—滩坝复合模式、三角洲分流河道—滩坝复合模式和三角洲前缘—碳酸盐岩滩坝复合模式(图 1)。希望该成果和观点对复合砂体的形成机制、沉积模式和分布规律的研究方面有所启示,能起到抛砖引玉的作用。

1 单成因砂体与复合砂体的概念

1.1 单成因砂体

单成因砂体是指在沉积过程中,由单一成因的沉积作用形成的、相对独立且具有一定形态、规模和内部结构的砂岩体,是油气储集层研究中的最小单元(胡光义等,2018a,2018b,2021;肖大坤等2021;任梦怡等,2022)。单成因砂体有多种类型,例如:冲积扇辫状河道砂体;河流(辫状河、曲流河)的河道砂体、心滩和边滩砂体;各类三角洲的分流河道砂体、河口坝砂体;滩坝砂体;重力流水道砂体等。关于这些单(成因)砂体的展布特征、分布规律、形成机制、控制因素,前人已经做了大量的详细的研究工作,其沉积模式也已经非常成熟(Bhattacharya and Giosan, 2003; Larue and Legarre, 2004; Hickson *et al.*, 2005; Jerolmack and Swenson, 2007; 朱筱敏, 2008; Ambrose *et al.*, 2009; 操应长等, 2009, 2010; 冯增昭, 2009, 2013; Buatois *et al.*, 2012; 于兴河等, 2013; 胡晨林等, 2015; 姜在兴等, 2015),在指导油气勘探的实践中发挥了重要作用。

1.2 复合砂体

1.2.1 问题的提出

油气勘探实践、野外露头剖面观察和现代沉积考察表明,相当多的沉积盆地在地质历史时期,由于海(湖)浪和各种沿岸流的作用,三角洲砂体被侵蚀、完全破坏或不完全破坏和改造,沉积物被搬运、以滩坝的形式再次沉积,加上高频海(湖)平面的频繁变化引起的岸线的迁移,这些残留砂体和再沉积的砂体在垂向上和平面上复合在一起,其分布特征很难用单成因模式进行表达,在文献中也鲜见报道,研究这种复合砂体的分布规律,分析其控制因素,建立其成因模式,来指导沉积相的研究和古地理的编图工作和油气勘探,不仅具有理论意义,也有重要的实用价值。

1.2.2 复合砂体的概念

复合砂体是指不同成因的单成因砂体在垂向上和平面上相互交织、拼接、复合形成的形态复杂的砂体。其中,三角洲—滩坝复合砂体尤为典型,它是由于高频海(湖)平面的频繁变化、岸线的迁移、湖浪和沿岸流的改造,导致多期次平行于湖岸线的环带状滩坝砂体与垂直于湖岸线的树枝状的三角洲分流河道砂体及河口坝砂体交织叠加在一起,形成的生产实践中常见的具有特殊结构的“三角洲—滩坝复合砂体”(纪友亮等,2013,2016;刘君龙等,2015a,2015b,2018)。

2 复合砂体形成的控制因素

2.1 沉积旋回作用

沉积旋回作用包括自旋回作用和异旋回作用。自旋回作用在复合砂体形成中发挥着重要作用。以河流为例,河道的侧向迁移、摆动等自发的旋回过程,会使不同时期形成的砂体在空间上发生叠置。比如曲流河在长期演化过程中,点坝砂体的不断侧向迁移,新的点坝砂体叠置在旧的点坝砂体之上,这种自旋回作用使得砂体在垂向和侧向上呈现出复杂的组合关系(纪友亮等,2012)。又如三角洲分流河道的自旋回摆动对三角洲—滩坝复合砂体的形态和分布会产生重要影响(纪友亮等,2013)。

异旋回作用也是复合砂体形成的重要控制因素之一。比如海(湖)平面的变化引起的岸线的迁移就属于异旋回作用,由于气候变化、构造运动等原因,湖平面或海平面发生频繁升降变化,导致岸线位置不断频繁移动。在岸线迁移过程中,原本处于不同沉积环境的砂体相互叠置,构成了独特的“三明治”结构,这便是异旋回复合作用的典型表现(图 2)。当湖面上升,岸线向陆地方向推进,早期形成的三角洲砂体可能被后期的滨岸滩坝砂体覆盖;反之,湖面下降,岸线向湖盆中心迁移,滩坝砂体又可能暴露并接受新的三角洲沉积,这种岸线迁移引发的砂体叠置,丰富了复合砂体的构成模式(楼章华等,1998;纪友亮等,2003,2005,2016; Catuneanu, 2006; Ambrose *et al.*, 2009; 李元昊等,2009;刘君龙等,2015a,2015b,2018;郭文建等,2024)。

自旋回与异旋回的复合作用进一步增加了复合

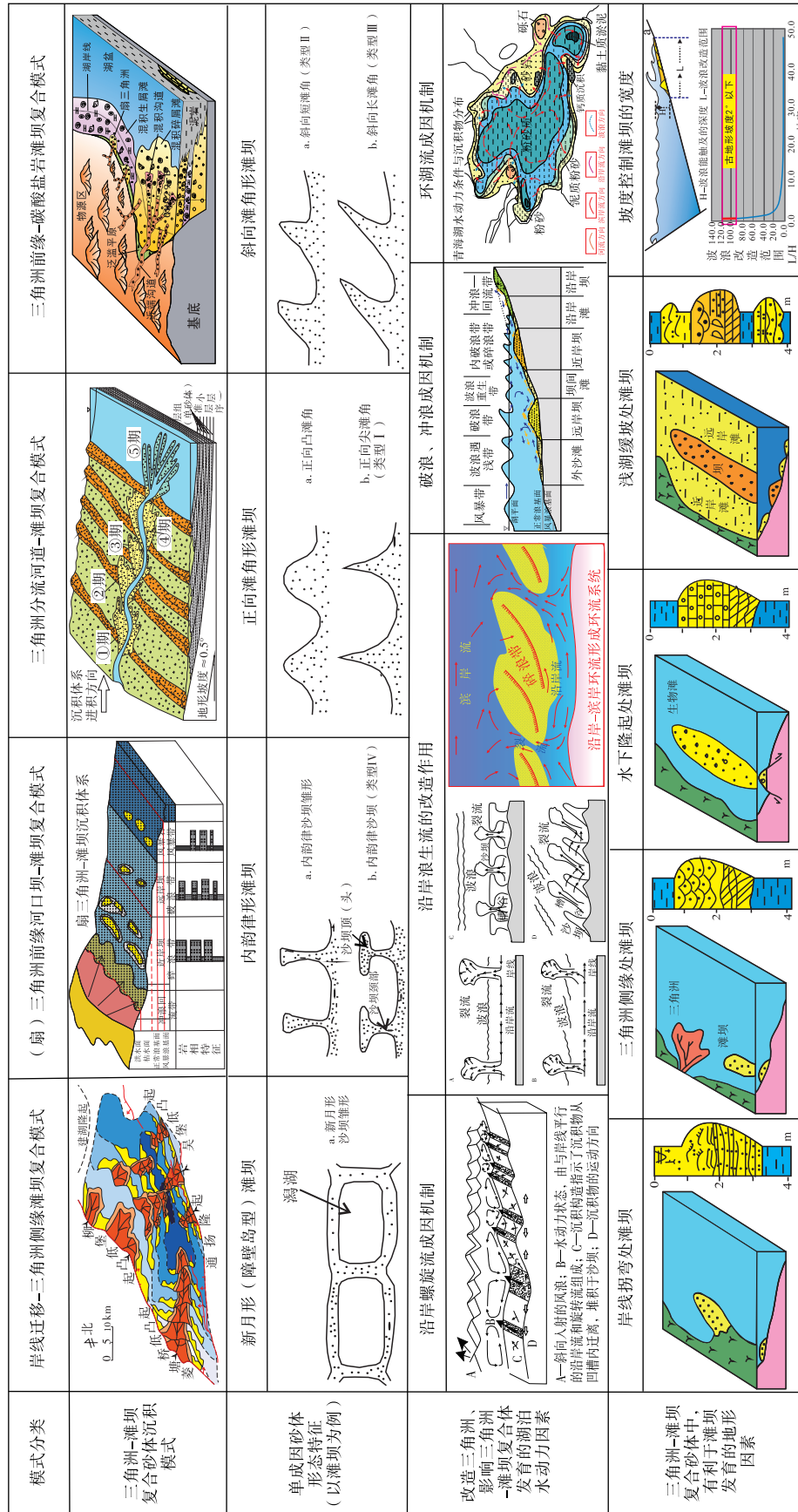


图 1 三角洲-滩坝复合砂体的沉积模式及发育的控制因素分类 (据朱筱敏, 2008; 纪友亮等, 2013, 2016; 胡晨林等, 2015; 姜在兴等, 2015; 杜晓峰等, 2020; 修改)

Fig. 1 Classification of sedimentary models and development control factors of delta-beach bar composite sand bodies

(modified from Zhu, 2008; Ji *et al.*, 2013, 2016; Hu *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2015; Du *et al.*, 2020)

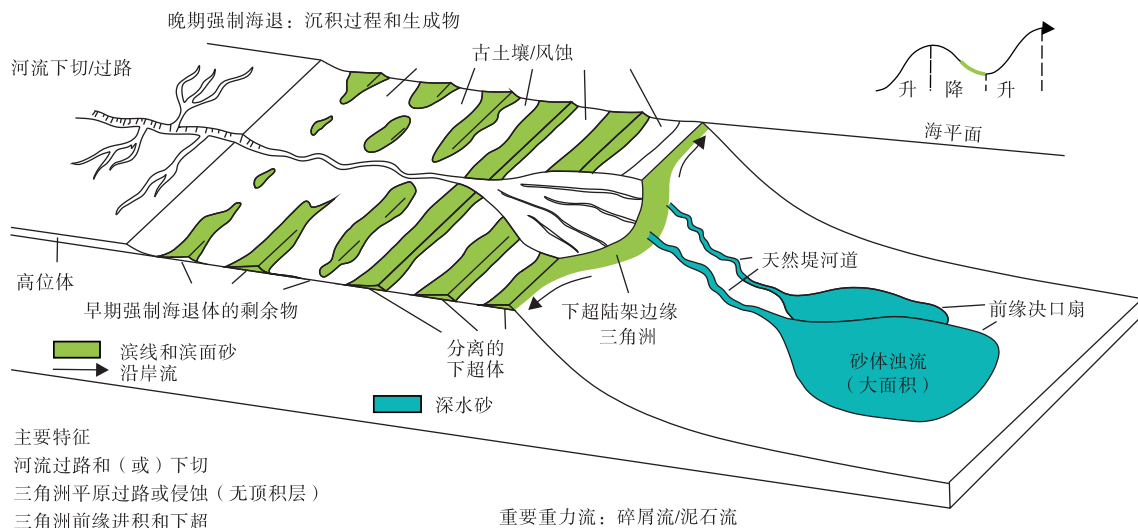


图 2 层序发育模式，显示海平面下降（下降期体系域晚期）一岸线迁移形成的三角洲—滩坝复合体模式（据 Catuneanu, 2006；有修改）

Fig. 2 Sequence development model, showing model of delta-bar complex formation due to sea-level fall (late stage of Falling Stage Systems Tract) –shoreline migration (modified from Catuneanu, 2006)

砂体形成的复杂性，二者的协同作用塑造出更为复杂多样的复合砂体形态（纪友亮等，2012，2016；刘君龙等，2015a，2015b，2018）。

2.2 水动力的相互作用

2.2.1 单水动力作用形成单成因砂体

比如河流的作用就属于单水动力作用，河流是将碎屑物质带入（海）湖水体的主要营力，沉积物进入湖泊后，在河口处形成三角洲。如果没有波浪—沿岸流—湖流等的改造或改造作用比较弱，三角洲分流河道砂体和河口坝砂体主要呈垂直岸线状态分布（朱筱敏，2008；操应长等，2009，2010；于兴河等，2013）。由于河流对三角洲发育的控制作用已经研究得很成熟，这里不再展开论述。

2.2.2 复合水动力作用形成复合砂体

（海洋）湖泊中的水动力复杂，多种多样，除了河流进入（海）湖中的单向水动力以外，还常见的有沿岸螺旋流、沿岸浪生流、破浪与冲浪以及环湖流等（胡晨林等，2015；姜在兴等，2015），这些复杂的水动力复合在一起，影响着三角洲的改造和不同形态的滩坝的形成，也影响着“复合砂体”的形态和分布。（海）湖水动力对（海）三角洲的改造作用详述如下。

（1）沿岸螺旋流在三角洲沉积物的单侧形成条带状平行于岸线分布的滩坝

沿岸螺旋流是一种特殊的水流形态，是改造三角洲和形成滩坝的重要因素之一（图 1）。它能有效地搬运沉积物，将三角洲沉积物冲刷、改造，沿着岸线以螺旋状路径输送。在螺旋流流速降低的区域，沉积物发生堆积，为滩坝的形成提供了物质基础，并且，沿岸螺旋流还能对已形成的滩坝进行改造，通过不断冲刷滩坝边缘，调整沉积物分布，使滩坝的形态更加规则，规模进一步扩大（姜在兴等，2015）。沿岸螺旋流形成的滩坝一般分布在三角洲沉积物的单侧，呈条带状平行于岸线分布。

（2）沿岸浪生流多形成垂直于岸线或斜交于岸线分布的滩角

沿岸浪生流是由波浪破碎引发的水流（图 1），在对（扇）三角洲的改造和滩坝的发育过程中也起着重要的作用。它不仅能够侵蚀（扇）三角洲分流河道和河口坝，使得沉积物再分配形成滩坝，它还能够重新分配已经形成的滩坝的沉积物，将滩坝顶部和向海一侧的较粗颗粒物质搬运至滩坝两侧或向陆一侧，使滩坝的粒度分布更加均匀。同时，沿岸浪生流还能侵蚀滩坝的边缘，塑造滩坝的轮廓。沿岸浪生流运动方向主要为垂直或斜交于岸线，形成向岸运动或离岸运动（裂流），局部平行岸线运动，形成的滩坝多为垂直于岸线或斜交于岸线分布的滩角。此外，沿岸浪生流与其他水流（如沿岸螺旋流）相互作用，进一步影响沉积物的

搬运和沉积过程，共同塑造出复杂多样的滩坝形态（姜在兴等，2015）。

(3) 破浪、冲浪作用在三角洲的前缘形成平行于岸线呈弧形分布的滩坝

破浪和冲浪是波浪在近岸区域的两种重要表现形式，也是（扇）三角洲被改造和滩坝发育的关键动力因素（图 1）。

当波浪传播至浅水区，水体变浅，形成破浪。破浪瞬间释放出巨大能量，对海底沉积物产生强烈的搅动和搬运作用；冲浪则是在破浪之后，破碎的波浪以较高速度冲向岸边形成的水流。在冲浪作用下，砂质物质在岸边堆积，逐渐形成滩坝的雏形。同时，冲浪还会对滩坝进行反复冲刷和堆积，使滩坝的坡度、粒度组成等不断调整（Bhattacharya and Giosan, 2003; Larue and Legarre, 2004; Hickson *et al.*, 2005; Jerolmack and Swenson, 2007; Buatois *et al.*, 2012; 姜在兴等，2015）。破浪、冲浪形成的滩坝一般分布在三角洲的前缘，平行于岸线呈弧形分布。

(4) 环湖流作用多在三角洲的单侧形成沿岸滩坝

在湖泊环境中，环湖流也是三角洲被改造和影响滩坝发育的重要动力因素。它同样能够将三角洲沉积物沿岸线搬运，在合适的位置堆积形成滩坝。在一些大型湖泊中，环湖流会沿着湖岸形成一系列的滩坝链，这些滩坝的分布和形态与环湖流的路径和强度密切相关。同时，环湖流还能对湖泊中的原有滩坝进行改造，通过侵蚀和沉积作用，调整滩坝的规模和形状，使其更好地适应湖泊的水动力环境（姜在兴等，2015）。

综上所述，河流与破浪和冲浪、沿岸螺旋流、沿岸浪生流、环湖流等（海）湖水动力的相互作用影响着三角洲—滩坝复合砂体的形成。当河流输入能量与湖泊水动力的能量比值较高时，河流作用占主导，有利于三角洲的建设和扩展，分流河道砂体能够向湖盆更远处延伸；而当湖泊水动力的能量相对较强时，其对三角洲砂体进行彻底或不彻底的改造，将砂体搬运、重新堆积形成滩坝砂体，如笔者考察过的岱海西岸的泉子沟辫状河三角洲—滩坝复合砂体就是典型的例子。

2.3 地形因素对复合砂体发育的影响

复合砂体的发育除了受上述因素影响外，地形

因素也起着关键作用。不同的地形条件不仅影响着三角洲的改造，也影响着滩坝的分布、规模与形态，最终影响着复合砂体的发育。

2.3.1 岸线拐弯处（扇）三角洲容易被改造形成滩坝

当三角洲从湖岸的凸岸入湖，且单侧或双侧为凹岸时，上述（海）湖水的各种动力更容易把（扇）三角洲改造或侵蚀，在岸线拐弯处发育成滩坝（图 1）（朱筱敏，2008；姜在兴等，2015）。在平面形态上，岸线拐弯处滩坝常呈弧形或半弧形，与岸线拐弯的形状相呼应。坝体凸面朝向水流或波浪来向，凹面则与岸线贴合，所以，岸线拐弯处也是三角洲—滩坝复合砂体分布的场所。

2.3.2 三角洲侧缘处容易发育滩坝

三角洲侧缘为滩坝发育创造了得天独厚的条件。波浪和沿岸流在此相互作用，对三角洲前缘进行侵蚀和改造，将三角洲前缘的沉积物重新搬运至三角洲侧缘（图 1）（朱筱敏，2008；姜在兴等，2015）。在平面上，三角洲侧缘滩坝多呈条带状平行于岸线分布，长度可随沿岸流的搬运距离增大而延伸，宽度受沉积物供给、坡度和水动力强度的影响。

2.3.3 水下隆起处三角洲容易被改造发育成滩坝

当三角洲前进的方向上或其前缘部位恰为水下隆起，则三角洲容易被湖浪改造，形成三角洲—滩坝复合砂体，这是因为水下隆起改变了湖（海）盆底部的地形，当水流或波浪经过水下隆起时，波浪的强度增加，把沉积物搬运至水下隆起顶部、并且不断淘洗，在水下隆起顶部或环绕水下隆起形成滩坝（图 1）（朱筱敏，2008；姜在兴等，2015）。

2.3.4 广浅湖缓坡处容易形成“大型三角洲—滩坝复合砂体”

在大型三角洲入湖的广浅湖缓坡，往往也是滩坝容易发育的场所（朱筱敏等，2008；姜在兴等，2015）。在广浅湖环境中，水体较浅，湖底地形平缓，水动力条件相对较弱且稳定。河流携带的沉积物进入湖区后，不易快速扩散，在缓坡地带逐渐堆积，在湖浪的改造下，容易形成厚度小、分布广的滩坝砂体，配合岸线的迁移，容易形成大型三角洲—滩坝复合砂体（图 1）。

2.3.5 地形坡度控制着“三角洲—滩坝复合砂体”中滩坝的宽度

地形坡度是影响“三角洲—滩坝复合砂体”中

滩坝宽度的关键因素。在坡度较陡的区域，如陡坡带扇三角洲发育区，水流或波浪的能量强且集中，对沉积物的侵蚀和搬运能力强，加上坡度陡，沉积物堆积不稳定，导致滩坝宽度较窄(姜在兴等，2015)。

相反，在坡度平缓的区域，如缓坡带曲流河三角洲发育区，水流或波浪能量分散，沉积物有更多的空间沉积，滩坝宽度较大(姜在兴等，2015)。在一些大型湖泊的滨湖平原缓坡地带，滩坝宽度可达数千千米。因此，随着坡度从陡变缓，“(扇)三角洲—滩坝复合砂体”中滩坝的宽度逐渐增加(图 1)。

2.4 混积作用和事件性沉积

2.4.1 混积作用

混积作用指的是不同类型沉积物，如碎屑物质与碳酸盐等混合沉积的过程。在一些湖盆或海盆滨岸、坡折或水下隆起环境中，既发育有三角洲或滩坝碎屑砂体，湖侵时又存在生物作用形成的碳酸盐鲕粒滩坝或生物丘沉积物。当二者垂向上叠合时，会形成碎屑滩坝砂体—碳酸盐鲕粒滩坝复合体(纪友亮等，2017；杜晓峰等，2020；罗妮娜等，2020)。例如，在柴达木盆地西部狮子沟、跃进地区上干柴沟组和渤海油田石臼坨地区沙一段，在水

下隆起上发育了碎屑滩坝砂体—碳酸盐鲕粒滩坝复合体(图 3)，为该区油气储存创造了有利条件(纪友亮等，2017)。

2.4.2 事件性沉积

事件性沉积指由罕见且规模较大的地质事件(如地震、火山喷发、滑塌、海啸等)引发的快速沉积作用。这类沉积作用具有突发性、短暂性和高能量特征，形成的沉积物(如浊积岩、碎屑流沉积)虽频率低，但保存概率高，易在地层中识别。事件沉积(如地震滑塌形成的浊积砂体)与正常沉积(如三角洲前缘砂体)在时空上交叉叠置，形成复杂的复合结构(纪友亮等，2012)。

3 三角洲—滩坝复合砂体的分布模式

3.1 单成因砂体

单成因砂体的分布模式，如冲积扇砂体分布模式、河流砂体分布模式、(扇、辫状河、曲流河)三角洲砂体分布模式、滩坝砂体分布模式、重力流砂体分布模式等已经研究得非常成熟，这里不再详述。但由于滩坝砂体分布模式与文中介绍的三角洲—滩坝复合砂体有关，因此，有必要展开详述滩坝

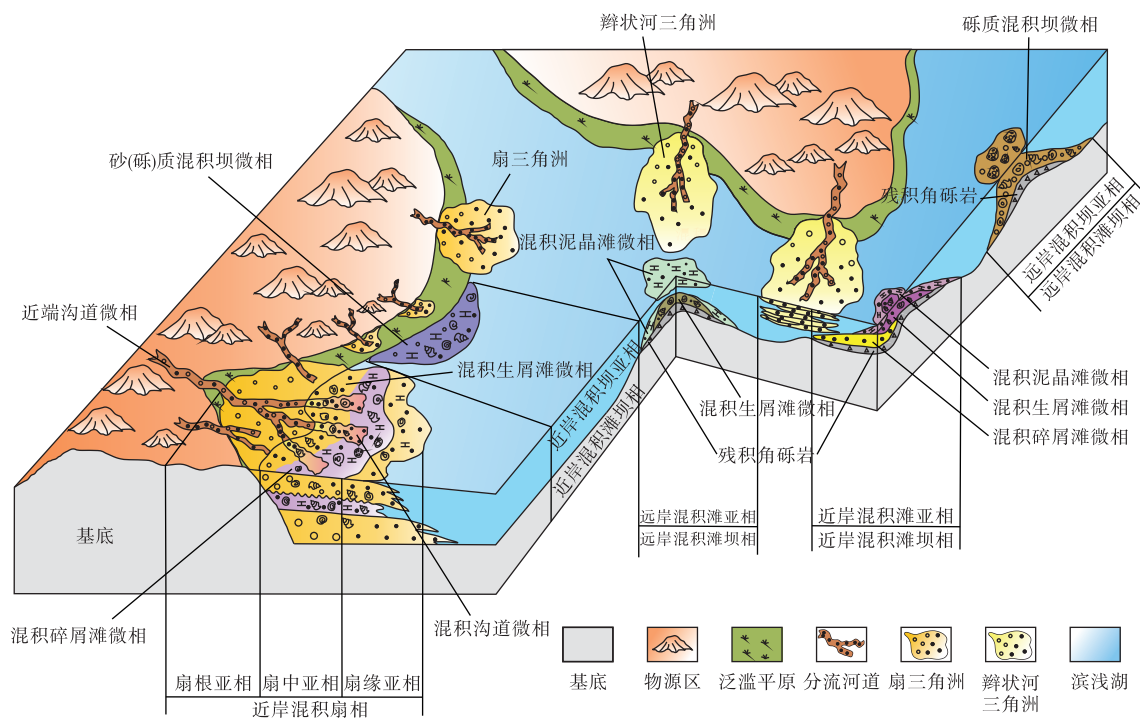


图 3 渤海油田古近系陆相断陷湖盆混积沉积模式，显示扇三角洲和碳酸盐岩滩坝叠合构成复合沉积体(据杜晓峰等，2020)

Fig. 3 Mixed sedimentation model of the Paleogene continental rift lacustrine basin in Bohai Oilfield, showing that fan deltas and carbonate bars overlap to form a composite sedimentary body (after Du *et al.*, 2020)

砂体的分布模式。

滩砂与坝砂在不易区分情况下统称为滩坝砂体。其中，坝砂相对较厚，多表现为与湖岸线斜交或平行的窄条带状砂体，在平面上被包围于滩砂之中，包括沙嘴、沿岸沙坝、堡岛和障壁岛等。滩砂相对较薄，平行岸线分布，呈较宽缓的条带状或席状（姜在兴等，2015），面积较大。

湖泊滩坝砂体的形态类型多样，按平面形态，可分为条带状、弧状、羽状、舌状、新月形等。按剖面形态，有双凸型、底平顶凸透镜状、楔型等。Komar（1976）通过对不同的海岸和湖岸实地考察，在总结前人成果的基础上发现了滩角、内韵律沙坝、新月形沙坝（图 1）等几种常见的韵律地形（胡晨林等，2015；姜在兴等，2015）。

3.2 三角洲—滩坝复合砂体

相同成因或不同成因的单砂体在垂向上叠合，形成了不同类型的叠合模式（图 4），根据三角洲—滩坝复合砂体的平面分布特征，总结了如下 4 种分布模式。

3.2.1 岸线迁移—三角洲侧缘滩坝复合砂体分布模式

三角洲前缘受波浪、沿岸流等水动力侵蚀，沉积物被重新搬运，在三角洲两侧形成沿岸滩坝。由

于湖（海）平面的频繁变化或在（扇）三角洲向湖（海）盆推进过程中，岸线不断迁移，当岸线每次迁移时，在三角洲侧缘，沿岸流和波浪沿着新的岸线方向搬运砂质，不断形成新的滩坝（图 1；图 5）（纪友亮等，2016）。平面上，岸线迁移造成（扇）三角洲侧缘的滩坝多呈长条状平行于岸线多排分布（图 1；图 5）。长度可达数千米甚至更长（纪友亮等，2016）。

3.2.2 三角洲前缘河口坝—滩坝复合模式

在三角洲前缘，波浪从开阔水域不断冲击，将砂质物质改造形成滩坝雏形，并在后期不断地发育、生长和延伸（杨勇强等，2011；石良等，2014；姜在兴等，2015；郭文建等，2024）。

平面上，（扇）三角洲前缘的滩坝形态多样，有平行于岸线的条带状，也有围绕分流河口的弧状（图 1；图 6）。条带状滩坝受沿岸流控制明显，弧状滩坝则主要由波浪作用形成（杨勇强等，2011；金振奎等，2014；石良等，2014；姜在兴等，2015；郭文建等，2024）。

3.2.3 三角洲分流河道—沿岸滩坝复合模式

在波浪作用比较强的情况下，波浪与三角洲分流河道水流相互作用。分流河道水流形成了垂直岸线的分流河道砂体，波浪作用将河道两侧及河口附近的砂质物质搬运、分选，在合适位置堆积形成沿

砂体成因分类	叠置模式		特征	地层单元级别	时间尺度 /a	
单成因砂体	同期同相自旋回叠置模式		同一期河道侧向迁移，同一期河口坝、滩坝相互叠置	8	10 ⁴ ~10 ⁵	
	不同期同相异旋回叠置模式	低可容空间		低可容空间下，不同期河道等砂体相互切割	9	10 ⁵ ~10 ⁶
		高可容空间		高可容空间下，不同期河道等砂体相互切割	9	10 ⁵ ~10 ⁶
复合砂体	同期异相自旋回叠置模式		同一期河道、河口坝、滩坝等砂体相互叠置	8	10 ⁴ ~10 ⁵	
	不同期不同相异旋回叠置模式		不同时期形成的不同类型河道、河口坝、滩坝等砂体间垂向相互叠置	≥9	10 ⁶ ~10 ⁷	

图 4 单成因砂体和复合砂体的垂向叠合模式（据刘君龙等，2015b；有修改）

Fig. 4 Vertical superposition patterns of single-genetic sand bodies and composite sand bodies (modified from Liu *et al.*, 2015b)

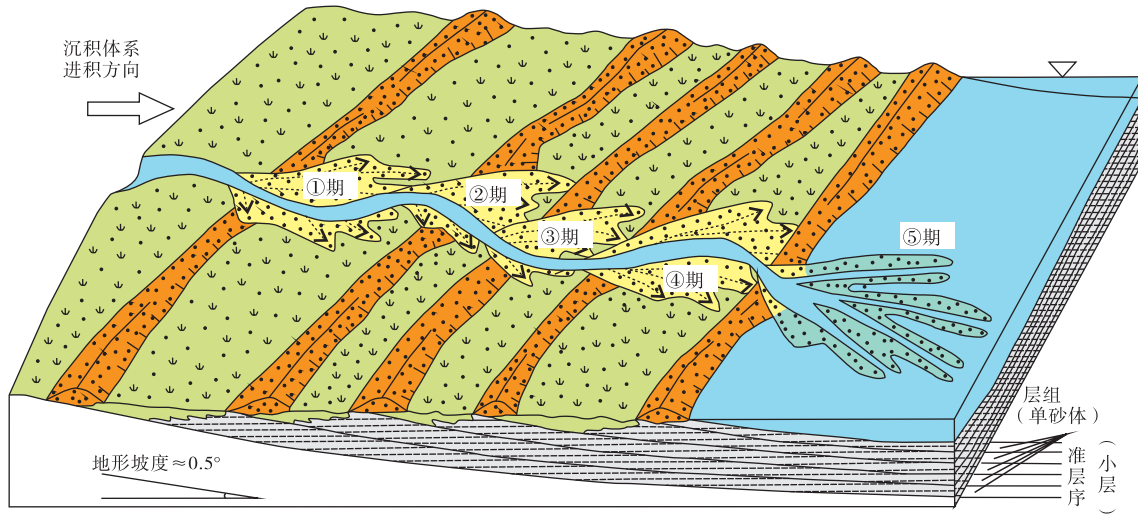


图 5 陆相湖盆岸线迁移—三角洲侧缘滩坝复合砂体分布模式 (据纪友亮等, 2016)

Fig. 5 Distribution model of composite sand bodies of shoreline migration-delta lateral margin bars in continental lacustrine basin (after Ji *et al.*, 2016)

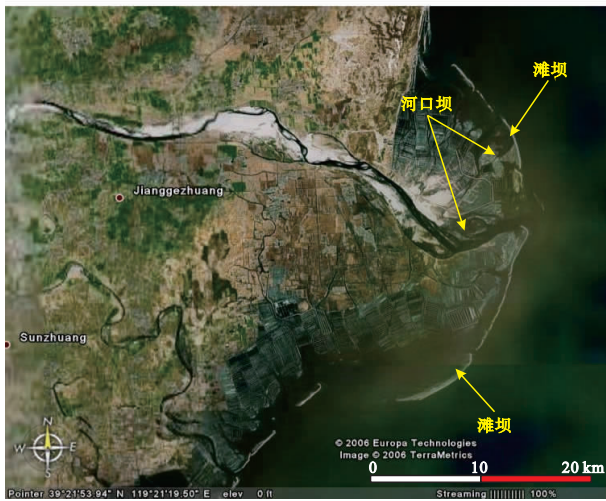


图 6 滦河三角洲前缘河口坝—沿岸滩坝复合砂体 (卫星照片)

Fig. 6 Composite sand body of estuarine bar-coastal bar at front of Luanhe River delta (satellite image)



图 7 岱海西岸泉子沟辫状河三角洲分流河道—沿岸滩坝复合砂体

Fig. 7 Composite sand body of Quanzigou braided river delta distributary channel-coastal bar on west bank of Daihai Lake

岸滩坝(图 1)。形成了三角洲分流河道砂体与沿岸滩坝砂体交织的复合模式(图 7)(纪友亮等, 2016)。

平面上, 分流河道呈树枝状从河口向湖(海)盆延伸, 沿岸滩坝在河道两侧呈条带状平行于岸线分布, 与河道相互交织。在平行岸线的剖面上, 分流河道砂体呈顶平底凸的透镜状, 底部以冲刷面与下伏地层接触, 中部粒度粗, 顶部变细。沿岸滩坝具有下粗上细结构, 在垂直岸线剖面上呈顶凸底平的透镜状与分流河道砂体在垂向上相互叠置。砂体内部, 分流河道发育交错层理、平行层理, 反映较

强水流作用; 沿岸滩坝则有浪成波痕、小型交错层理等, 体现波浪与沿岸流的影响(纪友亮等, 2016)。

3.2.4 三角洲前缘河口坝—碳酸盐岩滩坝叠置复合模式

在陆相湖盆或海盆边缘的坡折带或水下隆起的部位, 河流携带大量碎屑物质注入湖泊或海洋, 形

成扇三角洲或三角洲前缘的河口坝（纪友亮等，2013；杜晓峰等，2020）。

当湖平面上升时，物源后退，在原来沉积扇三角洲或三角洲前缘的河口坝的位置，处于适合碳酸盐鲕粒滩坝、生物碎屑滩坝发育的水体暖、浅、清且湖浪发育的环境，在三角洲前缘河口坝之上，沉积覆盖了碳酸盐鲕粒滩坝、生物碎屑滩坝；当湖平面下降时，（扇）三角洲前缘河口坝又会叠置在碳酸盐岩滩坝之上，形成了（扇）三角洲前缘河口坝—碳酸盐岩滩坝叠置复合模式（图 1；图 3）（纪友亮等，2013；杜晓峰等，2020）。

4 讨论和展望

4.1 讨论

对于单成因砂体如冲积扇砂体、河流砂体、（扇、辫状河、曲流河）三角洲砂体、滩坝砂体、重力流砂体等的展布特征、分布规律、形成机制、控制因素，前人已经做了大量的很详细的研究工作，其沉积模式也已经非常成熟，在指导油气勘探的实践中发挥了重要作用。

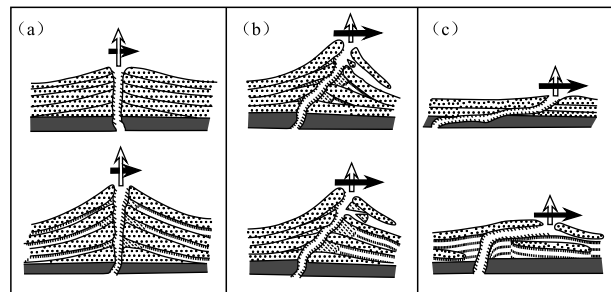
但实际上，在沉积盆地地质历史发展过程中，由于海（湖）浪和各种沿岸流的作用，使得（扇、辫状河、曲流河）三角洲砂体被侵蚀、完全破坏或不完全破坏、改造，沉积物被搬运、以滩坝的形式再次沉积，加上高频海（湖）平面的变化引起的岸线的迁移，这些残留三角洲砂体和再沉积的滩坝砂体在垂向上和平面上复合在一起，其分布特征很难用单成因模式进行表达，但这种复合成因的砂体分布很广泛，油气勘探实践、野外露头剖面观察和现代沉积考察，也证明了这一点。那么，为什么到目前为止，在文献中“复合成因的砂体”鲜有报道，而其所有沉积盆地中编制的沉积相图上，只有单成因砂体？究其原因，笔者认为有如下的几个方面：

1) 对不同成因砂体之间关联性认识不足，研究相对孤立，特别是对于地下砂体成因的认识，要么归为三角洲，要么归为滩坝，凡此等等，很少把三角洲和滩坝等不同成因的砂体看作一个“关联体”，并对其成因和分布规律进行全面分析。

2) 地质资料存在多解性，尤其在深埋藏区，无法直接观测，加上地震资料品质欠佳，只能依靠

有限的沉积模式对砂体的分布进行推测，而教科书上仅有单成因砂体的沉积相模式，缺乏复合砂体分布模式。

3) 对已有沉积相模式理解不深刻，“复合砂体”没有得到重视。例如，现有的三角洲模式中，有浪成三角洲的沉积模式（金振奎等，2014），这个模式中已经显示了分流河道和浪成的滩坝砂体是“复合”在一起的（图 8），但对这种“复合的概念”并没有特别强调。又如，在现有的层序地层学模式中（图 2），在海（湖）平面的下降和上升过程中，不同时期的滩坝和三角洲是“复合”或“关联”在一起的，这一点也没有得到重视。



a—对称型；b—非对称型；c—超非对称型

图 8 浪控三角洲分类图，显示浪控三角洲发育复合砂体（据 Bhattacharya 和 Giosan, 2003；有修改）

Fig. 8 Classification map of wave-dominated deltas, showing that wave-dominated deltas develop composite sand bodies (modified from Bhattacharya and Giosan, 2003)

4.2 展望

1) 为了使沉积盆地沉积相的编图更符合实际，就需要充分考虑地质历史时期不同环境沉积的砂体之间的成因联系；要反映复合砂体的分布特征，就需要建立完善的“复合砂体”沉积模式，来指导沉积相的研究和古地理的编图工作。要做到这一点，就需要群策群力，通过将今论古和现代沉积考察，建立起完善的不同类型的“复合砂体”的沉积模式。

2) 沉积动力学机制的深化研究。要研究“复合砂体”的成因机制和分布模式、特别是（扇）三角洲—滩坝复合砂体的成因机制和分布模式，需进一步聚焦于沉积动力学机制的解析，通过多尺度模拟技术揭示不同水动力条件下（扇）三角洲改造和滩坝砂体的形成与演化规律。目前，针对波浪、沿岸流、螺旋流等水动力类型的物理模拟和数值模拟已取得初步进展，但需加强对复杂动力系统

的耦合分析。例如，结合野外露头观测、现代沉积调查与数值模拟，建立多参数控制下的（扇）三角洲—滩坝“复合砂体”的成因模型，明确物源供给、海（湖）平面变化对（扇）三角洲—滩坝“复合砂体”叠置模式的影响。

3) 针对“复合砂体”储集层原型模型稀缺的问题，需整合地下密井网资料、地震数据及实验室模拟，利用储集层精细表征技术，构建适用于不同沉积环境的“复合砂体”定量构型模式，为油气勘探提供理论支撑。

参考文献 (References)

- 操应长,王健,刘惠民,贾光华,万念明. 2009. 东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体的沉积特征及模式. 中国石油大学学报(自然科学版),33(6): 5-10. [Cao Y C, Wang J, Liu H M, Jia G H, Wan N M. 2009. Sedimentary characteristics and models of beach-bar sandbodies in the upper part of the fourth member of Paleogene in the south slope of Dongying depression. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 33(6): 5-10]
- 操应长,韩敏,王艳忠,谭明友,张营革. 2010. 济阳拗陷车镇凹陷沙二段浅水三角洲沉积特征及模式. 石油与天然气地质,31(5): 576-582,601. [Cao Y C, Han M, Wang Y Z, Tan M Y, Zhang Y G. 2010. Sedimentary characteristics and models of shallow-water delta deposits in the second member of the Shahejie Formation in the Chezhen Sag, the Jiyang Depression. Oil & Gas Geology, 31(5): 576-582,601]
- 杜晓峰,徐长贵,朱红涛,解习农,朱筱敏,刘可禹,姜在兴,曾洪流. 2020. 陆相断陷盆地陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究进展. 地球科学,45(10): 3509-3526. [Du X F, Xu C G, Zhu H T, Xie X N, Zhu X M, Liu K Y, Jiang Z X, Zeng H L. 2020. Research advances of mixed siliciclastic and carbonate sediments in continental rift basins. Earth Science, 45(10): 3509-3526]
- 冯增昭. 2009. 中国古地理学的定义、内容、特点和亮点. 古地理学报,11(1): 1-11. [Feng Z Z. 2009. Definition, content, characteristics and bright spots of Palaeogeography of China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 11(1): 1-11]
- 冯增昭. 2013. 中国沉积学(第二版). 北京:石油工业出版社,743-746. [Feng Z Z. 2013. Sedimentology of China (Second Edition). Beijing: Petroleum Industry Press, 743-746]
- 郭文建,郭瑞婧,唐勇,纪友亮,马铮涛,刘笑语,梁涛,马玉龙. 2024. 准噶尔盆地二叠系上乌尔禾组退覆式扇(辫状河)三角洲前缘—滩坝复合砂砾岩沉积特征及控制因素. 古地理学报,26(3): 584-599. [Guo W J, Guo R J, Tang Y, Ji Y L, Ma Z T, Liu X Y, Liang T, Ma Y L. 2024. Sedimentary characteristics, controlling factors and genesis of retrogradational fan (braided) delta front-beach bar composite gravel body in the Permian Upper Urho Formation in Junggar Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(3): 584-599]
- 胡晨林,张元福,姜在兴,王敏,高勇,白一鸣. 2015. 风浪作用下鄱阳湖现代滨岸滩坝的形态变化. 石油学报,36(12): 1543-1552. [Hu C L, Zhang Y F, Jiang Z X, Wang M, Gao Y, Bai Y M. 2015. Morphologic changes in modern onshore beach bar of Poyang Lake under wind and wave actions. Acta Petrolei Sinica, 36(12): 1543-1552]
- 胡光义,范廷恩,陈飞,井涌泉,宋来明,梁旭,肖大坤. 2018a. 复合砂体构型理论及其生产应用. 石油与天然气地质,39(1): 1-10. [Hu G Y, Fan T E, Chen F, Jing Y Q, Song L M, Liang X, Xiao D K. 2018a. Theory of composite sand body architecture and its application to oilfield development. Oil & Gas Geology, 39(1): 1-10]
- 胡光义,范廷恩,梁旭,宋来明,井涌泉,陈飞,肖大坤. 2018b. 河流相储层复合砂体构型概念体系、表征方法及其在渤海油田开发中的应用探索. 中国海上油气,30(1): 89-98. [Hu G Y, Fan T E, Liang X, Song L M, Jing Y Q, Chen F, Xiao D K. 2018b. Concept system and characterization method of compound sandbody architecture in fluvial reservoir and its application exploration in development of Bohai oilfield. China Offshore Oil and Gas, 30(1): 89-98]
- 胡光义,王海峰,范廷恩,高玉飞,陈飞,肖大坤,张显文. 2021. 海上油田河流相复合砂体构型级次解析. 古地理学报,23(4): 810-823. [Hu G Y, Wang H F, Fan T E, Gao Y F, Chen F, Xiao D K, Zhang X W. 2021. Analysis of fluvial compound sand-body architecture hierarchy in offshore oil field. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(4): 810-823]
- 纪友亮,冯建辉,王声朗,张宏安,王德仁. 2003. 东濮凹陷沙三段高频湖平面变化及低位砂体预测. 高校地质学报,9(1): 99-112. [Ji Y L, Feng J H, Wang S L, Zhang H A, Wang D R. 2003. High frequency lake-level change of 3rd Member of Shahejie Formation and prediction of lowstand sand body in Dongpu Depression. Geological Journal of China Universities, 9(1): 99-112]
- 纪友亮,冯建辉,王声朗,张宏安,王德仁. 2005. 东濮凹陷古近系沙河街组沙三段沉积期湖岸线的变化及岩相古地理特征. 古地理学报,7(2): 145-156. [Ji Y L, Feng J H, Wang S L, Zhang H A, Wang D R. 2005. Shifting of lake shoreline and lithofacies palaeogeographic characters during sedimentary period of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Dongpu Sag. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 7(2): 145-156]
- 纪友亮,吴胜和,张锐. 2012. 自旋回和异旋回的识别及其在油藏地层对比中的作用. 中国石油大学学报(自然科学版),36(4): 1-6. [Ji Y L, Wu S H, Zhang R. 2012. Recognition of auto-cycle and allo-cycle and its role in strata correlation of reservoirs. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 36(4): 1-6]
- 纪友亮,卢欢,刘玉瑞. 2013. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组一段浅水三角洲和滩坝沉积模式. 古地理学报,15(5): 729-740. [Ji Y L, Lu H, Liu Y R. 2013. Sedimentary model of shallow water delta and beach bar in the Member 1 of Paleogene Funing Formation in Gaoyou sag, Subei Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 15(5): 729-740]
- 纪友亮,刘君龙,王天云,刘大卫,程同冉. 2016. 陆相湖盆三角洲—滩坝复合砂体分布模式及编图方法. 古地理学报,18(4): 615-630. [Ji Y L, Liu J L, Wang T Y, Liu D W, Cheng T R. 2016. Distributing pattern and mapping method of delta and beach-bar composite sand-bodies in continental lacustrine basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 18(4): 615-630]
- 纪友亮,马达德,薛建勤,王鹏,吴颜雄,曾力,金力. 2017. 柴达木盆地西部新生界陆相湖盆碳酸盐岩沉积环境与沉积模式. 古地理学报,19(5): 757-772. [Ji Y L, Ma D D, Xue J Q, Wang P, Wu Y X, Zeng L, Jin L. 2017. Sedimentary environments and sedimentary model of carbonate rocks in the Cenozoic lacustrine basin, western

- Qaidam Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(5): 757-772]
- 姜在兴, 王俊辉, 张元福. 2015. 滩坝沉积研究进展综述. *古地理学报*, 17(4): 427-440. [Jiang Z X, Wang J H, Zhang Y F. 2015. Advances in beach-bar research: a review. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 17(4): 427-440]
- 金振奎, 高白水, 李桂仔, 刁丽颖, 闫伟, 李燕, 张森. 2014. 三角洲沉积模式存在的问题与讨论. *古地理学报*, 16(5): 569-580. [Jin Z K, Gao B S, Li G Z, Diao L Y, Yan W, Li Y, Zhang M. 2014. Problems and discussions about delta depositional models. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 16(5): 569-580]
- 李元昊, 刘池洋, 独育国, 王秀娟, 黄锦绣. 2009. 鄂尔多斯盆地西北部上三叠统延长组长 8 油层组浅水三角洲沉积特征及湖岸线控砂. *古地理学报*, 11(3): 265-274. [Li Y H, Liu C Y, Du Y G, Wang X J, Huang J X. 2009. Sedimentary characteristics of shallow water delta and lake shoreline control on sand bodies of Chang 8 oil-bearing interval of the Upper Triassic Yanchang Formation in north-western Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 11(3): 265-274]
- 刘君龙, 纪友亮, 杨克明, 周勇, 陈贤良, 高崇龙, 贾浪波. 2015a. 浅水湖盆三角洲岸线控砂机理与油气勘探意义: 以川西坳陷中段蓬莱镇组为例. *石油学报*, 36(9): 1060-1073, 1155. [Liu J L, Ji Y L, Yang K M, Zhou Y, Chen X L, Gao C L, Jia L B. 2015a. Mechanism of lake shoreline control on shoal water deltaic sandbodies and its significance for petroleum exploration: a case study of Penglaizhen Formation in the middle part of western Sichuan depression. *Acta Petrolei Sinica*, 36(9): 1060-1073, 1155]
- 刘君龙, 杨克明, 纪友亮, 朱宏权, 黄富祥, 贾浪波. 2015b. 川西坳陷上侏罗统浅水漫湖沉积特征与砂体叠置模式. *古地理学报*, 17(4): 503-516. [Liu J L, Yang K M, Ji Y L, Zhu H Q, Huang F X, Jia L B. 2015b. Sedimentary characteristics and sand-body superposed patterns of flood-overlake deposits of the Upper Jurassic in Chuanxi Depression. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 17(4): 503-516]
- 刘君龙, 孙冬胜, 纪友亮, 朱宏权, 于海跃, 王天云. 2018. 川西晚侏罗世前陆盆地浅水三角洲砂体分布特征与叠置模式. *石油与天然气地质*, 39(6): 1164-1178. [Liu J L, Sun D S, Ji Y L, Zhu H Q, Yu H Y, Wang T Y. 2018. Distribution characteristics and superimposition pattern of the Late Jurassic shallow water deltaic sand body in the foreland basin of Western Sichuan Depression. *Oil & Gas Geology*, 39(6): 1164-1178]
- 楼章华, 卢庆梅, 蔡希源, 董百万, 张立庆. 1998. 湖平面升降对浅水三角洲前缘砂体形态的影响. *沉积学报*, 16(4): 27-31. [Lou Z H, Lu Q M, Cai X Y, Dong B W, Zhang L Q. 1998. Influence of lake level fluctuation on sandbody shapes at shallow-water delta front. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(4): 27-31]
- 罗妮娜, 侯守探, 纪友亮, 吕文睿, 张艺楼, 陈佩磊, 李圣明, 张兰. 2020. 渤海湾盆地饶阳凹陷大王庄地区古近系沙三上亚段混积模式研究. *沉积学报*, 38(5): 1037-1048. [Luo N N, Hou S T, Ji Y L, Lü W R, Zhang Y L, Chen P L, Li S M, Zhang L. 2020. Sedimentary model of mixed rocks in the upper Es₃ of paleogene in the Dawangzhuang area, Raoyang Sag, Bohai Bay basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(5): 1037-1048]
- 任梦怡, 胡光义, 范廷恩, 范洪军. 2022. 秦皇岛 32-6 油田北区新近系明化镇组下段复合砂体构型及控制因素. *岩性油气藏*, 34(6): 141-151. [Ren M Y, Hu G Y, Fan T E, Fan H J. 2022. Composite sand body architecture and controlling factors of the lower Minghuazhen Formation of Neogene in northern Qinhuangdao 32-6 oilfield. *Lithologic Reservoirs*, 34(6): 141-151]
- 石良, 金振奎, 李桂仔, 高白水, 闫伟. 2014. 内蒙古岱海现代辫状河三角洲沉积特征及沉积模式. *天然气工业*, 34(9): 33-39. [Shi L, Jin Z K, Li G Z, Gao B S, Yan W. 2014. Depositional characteristics and models of the modern braided river delta in the Daihai Lake, Inner Mongolia. *Natural Gas Industry*, 34(9): 33-39]
- 肖大坤, 范廷恩, 范洪军, 张显文, 张利军, 张晶玉. 2021. 河流相复合砂体不连续界限等效表征方法探讨. *中国海上油气*, 33(2): 114-122. [Xiao D K, Fan T E, Fan H J, Zhang X W, Zhang L J, Zhang J Y. 2021. Discussion on the equivalent characterization method of fluvial facies complex sand body discontinuity boundaries. *China Offshore Oil and Gas*, 33(2): 114-122]
- 杨勇强, 邱隆伟, 姜在兴, 银熙炉. 2011. 陆相断陷湖盆滩坝沉积模式: 以东营凹陷古近系沙四上亚段为例. *石油学报*, 32(3): 417-423. [Yang Y Q, Qiu L W, Jiang Z X, Yin X L. 2011. A depositional pattern of beach bar in continental rift lake basins: a case study on the upper part of the fourth member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 32(3): 417-423]
- 于兴河, 李胜利, 李顺利. 2013. 三角洲沉积的结构: 成因分类与编图方法. *沉积学报*, 31(5): 782-797. [Yu X H, Li S L, Li S L. 2013. Texture-genetic classifications and mapping methods for deltaic deposits. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(5): 782-797]
- 朱筱敏. 2008. *沉积岩石学 (第四版)*. 北京: 石油工业出版社, 296-316. [Zhu X M. 2008. *Sedimentary Petrology (Forth Edition)*. Beijing: Petroleum Industry Press, 296-316]
- Ambrose W A, Hentz T F, Bonnaffé F, Loucks R G, Brown J, Wang F P, Potter E C. 2009. Sequence-stratigraphic controls on complex reservoir architecture of highstand fluvial-dominated deltaic and lowstand valley-fill deposits in the Upper Cretaceous (Cenomanian) Woodbine Group, East Texas field: regional and local perspectives. *AAPG Bulletin*, 93(2): 231-269.
- Bhattacharya J P, Giosan L. 2003. Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction. *Sedimentology*, 50(1): 187-210.
- Buatois L A, Santiago N, Herrera M, Plink-björklund P, Steel R, Espin M, Parra K. 2012. Sedimentological and ichnological signatures of changes in wave, river and tidal influence along a Neogene tropical deltaic shoreline. *Sedimentology*, 59(5): 1568-1612.
- Catuneanu O. 2006. *Principles of sequence stratigraphy*. Amsterdam: Elsevier, 375.
- Hickson T A, Sheets B A, Paola C, Kelberer M. 2005. Experimental test of tectonic controls on three-dimensional alluvial facies architecture. *Journal of Sedimentary Research*, 75: 710-722.
- Jerolmack D J, Swenson J B. 2007. Scaling relationships and evolution of distributary networks on wave-influenced deltas. *Geophysical Research Letters*, 34(23): 1-5.
- Komar P D. 1976. *Beach Processes and Sedimentation*. Upper Saddle River, N. J. Prentice Hall, 249-283.
- Larue D K, Legarre H. 2004. Flow units, connectivity, and reservoir characterization in a wave-dominated deltaic reservoir: Meren reservoir, Nigeria. *AAPG Bulletin*, 88(3): 303-324.