



## 河控三角洲生长的动力和沉积模式

齐亚林, 赵彦德, 邵晓州, 楚美娟, 左静

### 引用本文:

齐亚林, 赵彦德, 邵晓州, 等. 河控三角洲生长的动力和沉积模式[J]. 沉积学报, 2021, 39(2): 374–382.

QI YaLin, ZHAO YanDe, SHAO XiaoZhou, et al. Dynamic and Sedimentary Models of River-dominated Delta Growth[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(2): 374–382.

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 陆相湖盆大型扇三角洲沉积特征与演化规律——以准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡区三叠系百口泉组为例

Sedimentary Characteristics and Evolution Law of a Lacustrine Large-scale Fan Delta: A case study from the Triassic Baikouquan Formation on the west slope of Mahu Sag

沉积学报. 2020, 38(5): 923–932 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.089>

#### 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

Depositional Model of Prograding Delta Confluences: A case from Es3m Members in the Paleogene Dongying Sag

沉积学报. 2016, 34(6): 1187–1197 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.06.016>

#### 再论水进型三角洲——兼论四川盆地须家河组巨厚砂层成因

Further Discussion on Water-transgression Delta: Genesis of great thickness large distributed sandstone of Xujiahe Formation in Sichuan Basin

沉积学报. 2015, 33(5): 845–854 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.05.001>

#### 潮汕地区全新世障壁海岸三角洲沉积演化与砂体展布

Sedimentary Evolution and Sand-Body Distribution of Holocene Period, Barrier-Coast Delta, Chaoshan Region

沉积学报. 2015, 33(4): 706–712 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.04.009>

#### 浅水湖盆河控三角洲前缘砂体分布特征与沉积模式探讨——以松辽盆地北部永乐地区葡萄花油层为例

Sandbody Distribution and Sedimentary Model in Shallow Lacustrine Fluvial-dominated Delta Front: A case study from Putaohua oil layer of Yongle area in Songliao Basin

沉积学报. 2015, 33(3): 439–447 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.03.002>

文章编号:1000-0550(2021)02-0374-09

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2020.029

# 河控三角洲生长的动力和沉积模式

齐亚林<sup>1</sup>, 赵彦德<sup>2</sup>, 邵晓州<sup>1,3</sup>, 楚美娟<sup>1</sup>, 左静<sup>1</sup>

1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018

2. 兰州城市学院培黎石油工程学院, 兰州 730070

3. 成都理工大学能源学院, 成都 610059

**摘要** 分析河口动力特征,进而揭示其控制下的三角洲前缘挟沙河流床沙载荷(推移质)搬运和沉积机制,是合理构建河控三角洲生长沉积模式的前提。运用流体力学的湍流理论从微观动力过程角度分析失去河床约束条件下依靠惯性作用流动的河水入湖过程中河、湖两类水体的相互作用机制及流动规律,结合水槽物理模拟及前人开展的数值模拟,并借鉴河流泥沙动力学理论成果,构建了受流体力学及河流泥沙动力学约束的河控三角洲生长的动力和沉积模式。结果表明:湍流的特点决定了两类水体界面处存在强烈的质量、动量、动能传递。河水入湖过程既不是圆形(轴对称)射流,也不是平面(二维)射流,而是矩形(三维)射流,流速沿程会以负指数快速衰减。河口是挟沙河流流速衰减的终点,其控制下的三角洲前缘是挟沙河流床沙载荷沉积的终点。三角洲平原砂体生长过程,是三角洲平原动力、沉积、地貌相互作用的过程,生长的动力和沉积模式可以概括为:河流末端水体流速沿程衰减→挟沙能力降低→泥沙沉积→河床抬高→堤岸决口→河流分叉→水体流速沿程衰减→挟沙能力降低→泥沙沉积。分流河道砂体构成三角洲平原的骨架砂体,地貌控制下河流的频繁摆动是三角洲平原砂体生长的重要机制。河控三角洲沉积的主体为平原环境,而非前缘环境。

**关键词** 湍流;动量射流;沉积过程;动力和沉积模式;河控三角洲

**第一作者简介** 齐亚林,男,1974年出生,高级工程师,碎屑岩沉积学、油气储层沉积学,E-mail: qiyi\_cq@petrochina.com.cn

**通信作者** 赵彦德,男,1973年出生,副教授,E-mail: zyd@lzcw.edu.cn

**中图分类号** P618.13 **文献标志码** A

## 0 引言

河控三角洲是以河流作用为主,波浪、潮汐作用微弱,建设作用远大于改造作用的三角洲类型,在我国陆相沉积盆地广泛发育<sup>[1]</sup>。构建相对合理的河控三角洲生长的沉积模式,对成矿规律预测,目标优选,以及丰富和完善三角洲的概念、内涵和成因具有重要的理论意义。其控制因素及成因已成为沉积学界研究的热点,研究者多利用岩芯、露头、现代沉积或测井曲线、实验等资料,采用反演方法,论证构造背景<sup>[2]</sup>、古地形和湖平面升降<sup>[3-4]</sup>、气候和物源<sup>[5-6]</sup>等因素对河控三角洲沉积特征与沉积模式的控制作用,构建成因模式并进行分类<sup>[7-8]</sup>。河控三角洲是河口对河流动力及其作用下泥沙(床沙载荷和悬浮载荷)运动的响应,是挟沙河流泥沙沉积的产物,挟沙河流具

有二相、三维、不恒定、非均匀、水沙不平衡等特性,其运动严格受物理规律的支配<sup>[9-10]</sup>。沉积过程分析和沉积模式构建必须得到流体力学及河流泥沙动力学的支持并经受其检验。采用正演方法构建受流体力学及河流泥沙动力学约束的河控三角洲的动力模式是合理构建生长的沉积模式的前提。在广泛调研国内外三角洲动力和沉积模式研究现状的基础上,运用流体力学的湍流理论从微观动力过程角度分析失去河床约束条件下依靠惯性作用流动的河水入湖过程中河、湖两类水体的相互作用机制及流动规律,结合针对河控三角洲生长过程进行的水槽物理模拟及前人开展的数值模拟,并借鉴河流泥沙动力学理论成果,构建了河控三角洲生长的动力和沉积模式,为我国陆相盆地河控三角洲砂体预测及油气勘探提供依据。

**收稿日期**:2019-11-07; **收修改稿日期**:2020-04-26

**基金项目**:国家科技重大专项(2016ZX05050, 2017ZX05001002);甘肃省高等学校创新能力提升项目(2019B-175) [Foundation: National Science and Technology Major Project, No.2016ZX05050, 2017ZX05001002; The Project of Improving the Innovation Ability of Colleges and Universities in Gansu Province, No.2019B-175]

## 1 动力和沉积模式研究现状及问题

床沙载荷由静止状态转为运动状态时的临界流速为起动流速( $U_c$ ),床沙载荷由运动状态转为静止状态时的临界流速为止动流速( $U_c'$ ),水体能够流动不代表水体能搬运床沙载荷,足够大的流速是床沙载荷能够被搬运的前提条件。反映河流床沙载荷搬运能力的单宽输沙率正比于流速的4次方,或可搬运的最大床沙载荷粒径正比于流速的2次方<sup>[9-10]</sup>,流速的细微变化将影响床沙载荷的搬运和沉积行为<sup>[9]</sup>。动力控制了床沙载荷的搬运和沉积,动力模式决定了沉积模式。河控三角洲沉积由平原沉积和前缘沉积构成,前缘沉积形成的以床沙载荷为主的砂体规模对沉积模式的构建具有决定性作用。由此,研究者普遍通过分析河口动力特征并构建动力模式,进而在动力模式的约束下构建河控三角洲生长的沉积模式<sup>[11-13]</sup>。

### 1.1 动力和沉积模式研究现状

为构建不同类型三角洲生长的沉积模式,Bates<sup>[11]</sup>运用湍流射流理论对河口动力特征进行了分析,并对其控制下的泥沙搬运和沉积即三角洲生长的动力和沉积模式进行了探讨。Bates将河口比作水力学上的一个喷嘴,河流通过河口流入蓄水体时,形成自由射流,并分为圆形射流和平面射流两种流动类型,圆形射流(等密度流型)指河水与蓄水体水密度近等,两者的混合作用发生在三维空间(纵向的),其混合作用较快,致使河水流速快速衰减。平面射流(高密度流型、低密度流型)指河水的密度大于或小于蓄水体的密度,两者的混合作用仅发生在二维空间(表层水),其混合作用较慢,但可扩散到湖盆较远的地方。基于上述三种动力模式,相应的构建了三种三角洲沉积模式<sup>[11]</sup>。

借鉴 Bates<sup>[11]</sup>的动力和沉积模式,国内有研究者运用湍流射流理论对三角洲生长的动力和沉积模式进行了探讨。黄秀祯等<sup>[12]</sup>构建了基于二维平面射流的三角洲河口动力模式,其将入湖后流向中心线纵剖面上的流动视作二维平面射流,据此求出不同河湖动力条件下三角洲边界、纵剖面形态和沉积物分选性变化。顾晓忠等<sup>[13]</sup>分析了河口的动力场,构建了基于伴随射流的三角洲河口动力模式,认为河口三角洲砂体的形态和大小主要取决于河口的截面形态、河床坡度和挟带泥沙的组成。

上述动力和沉积模式,尤其是 Bates 的动力和沉积模式,长期主导着三角洲成因理论研究,对不同类型沉积盆地多种三角洲生长的沉积模式构建产生了广泛且深远的影响<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2 动力和沉积模式存在的问题

前人基于湍流射流理论的动力模式为三角洲生长的沉积模式和成因研究提供了新思路<sup>[11-13]</sup>,但由于其对湍流特性理解不够深入,无法从机理上理解湍流射流成因、控制因素及流动规律,导致其无法准确理解湍流射流理论并正确运用,由此构建的动力模式存在较多问题。

(1) Bates<sup>[11]</sup>认为河水与蓄水体的密度近等时,发生圆形射流;河水的密度大于或小于蓄水体的密度时,发生平面射流。实质上,圆形射流、平面射流是根据河流出口断面的形状而不是根据两类水体相对密度划分的。考虑到河流出口断面的形状,河水入湖、海既不是圆形射流,也不是平面射流,而是矩形射流,只是由于河流的宽深比较大,可以按照平面射流处理<sup>[16-17]</sup>。如果考虑密度因素,对于河水入湖或海过程,如果河水的密度等于湖水或海水的密度,完全依靠初始动量维持流动,属于等密度自由射流或动量射流;如果河水的密度小于湖水或海水的密度,兼受初始动量和浮力两种作用而流动的射流,属于变密度射流的浮射流;如果河水的密度大于湖水或海水的水密度,属于变密度射流的浓差射流,仍可视作动量射流,只是射流轴心线发生偏移<sup>[16-17]</sup>。上述三种情况,河水、湖水或海水均处于湍流状态<sup>[18-20]</sup>。湍流的特性决定了河水的密度无论是大于、等于或小于湖水或海水密度,两类水体间的相互作用机制本质上没有区别,无论是等密度条件下平面射流(实质为矩形射流),还是变密度条件下的平面射流(实质为矩形射流),两类水体的混合作用发生在三维空间而不是二维平面<sup>[21-24]</sup>,其混合作用较快,流速沿程快速衰减,仅仅依靠河流的惯性作用无法扩散到湖盆较远的地方。与 Bates 主张的平面射流时两类水体的混合作用仅发生在二维空间(表层水),混合作用较慢,可扩散到湖盆较远的地方的认识完全不同。

(2) Bates<sup>[11]</sup>尝试用湍流射流理论解决不同主控因素三角洲的动力成因。在湍流射流理论体系中,以出流动量为原动力的动量射流,也就是仅依靠惯性作用的流动<sup>[16-17]</sup>,可运用动量积分求解水体流动规律<sup>[16-17]</sup>。河控三角洲河口的动力主要为河水的惯性

作用,满足上述条件,能够定量预测水体流速的沿程变化( $u_{\max}/u_0$ ),进而推测床沙载荷的沉积区域。对于潮控、浪控等海洋三角洲,河口是河、海相互作用的部位,受入海河流、潮汐、波浪、沿岸流、风力等多种因素的影响,属开放的动力体系,河流的作用有限<sup>[18-20]</sup>。该环境下河水射入的方向与海水的流动方向成一定的角度,属于横流中的湍流射流,流动规律相当复杂,由于无法明确其他动力的特征和规律,解析方法难以求解流体流动规律<sup>[16-17]</sup>。横流中的湍流射流本质上是其他动力对河水动量射流的改造,难以定量预测水体流速沿程的变化( $u_{\max}/u_0$ ),无法据此推测床沙载荷的沉积区域。有鉴于此,该动力模式并不具有广泛的适用性。

(3) 水体流速的沿程变化( $u_{\max}/u_0$ ),圆形射流时取决于圆孔直径(D)与至出口断面的距离( $x$ ),平面射流时取决于出口断面的厚度( $2b_0$ )与至出口断面的距离( $x$ )<sup>[16-17]</sup>。湍流特性决定了相对流动的两类水体的界面处存在物质交换和动量传递,并导致水体流速的沿程变化<sup>[16-17,21-24]</sup>。该变化取决于上述界面处物质交换和动量传递的强度。相对流动的两类水体沿程同一断面不同界面处的物质交换和动量传递的强度近等,导致上述同一断面不同界面处水体流速的变化幅度近等。由于河流水体的深度远小于宽度,河流水体流速在深度方向首先衰减完毕并使水体趋于停止流动。失去河床约束条件下依靠惯性作用流动的河水入湖过程中,控制河流水体流速沿程变化( $u_{\max}/u_0$ )的出口断面高度( $2b_0$ )实质上是河流水体的深度。由于对湍流特性理解不够深入,无法从机理上理解湍流射流成因,Bates将河流宽度而非深度理解为平面射流时出口断面厚度( $2b_0$ )<sup>[11]</sup>,势必造成主流轴线流速( $u_{\max}$ )被放大,导致河流水体影响的范围被扩大。

鉴于Bates动力模式的上述不合理之处,导致以该动力模式为基础构建的河控三角洲生长的沉积模式不具有适用性<sup>[12-13]</sup>。

## 2 基于湍流理论的动力模式

为揭示前缘床沙载荷沉积形成砂体规模,构建相对合理的河控三角洲生长的沉积模式,运用湍流理论从微观动力过程角度分析失去河床约束条件下依靠惯性作用流动的河水入湖过程中河、湖两类水体的相互作用机制及流动规律并构建动力模式。

### 2.1 模式构建的途径及理论依据

河控三角洲河口动力主要为河水的惯性作用。分析河口动力特征要揭示失去河床约束条件下依靠惯性作用流动的河水在湖水中的流动规律,也就是水体流速沿程的变化( $u_{\max}/u_0$ )与至出口断面的距离( $x$ )的关系。由于该问题涉及两类水体间的微观作用机制及流动规律,需要运用湍流理论从微观动力过程角度进行分析<sup>[10,16-17,21-24]</sup>。

湍流是包括河水、湖水或海水在内的地表水体流动的主要形式,是由各种不同尺度的带有旋转结构涡叠合而成的流动,具有三维、非定常、随机、不规则、有旋、强扩散和强耗散的特性<sup>[10,16-17,21-22]</sup>(图1)。上述特性导致流场中不同尺度的流体微团不仅有横向脉动,而且有相对于总流动的反向流动;相邻流体层间不但有滑动,还有混合(图2);导致两类水体界面处存在强烈的质量、动量、动能传递<sup>[16-17,23-24]</sup>,从而决定了河口的动力特征及动力模式。

### 2.2 动力模式构建

对于河水入湖,湍流特性决定了,垂直总流动方

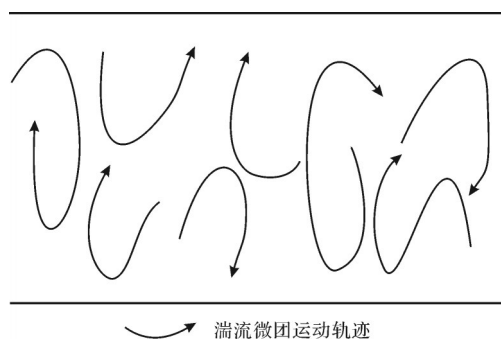


图1 湍流微团运动模式<sup>[24]</sup>

Fig.1 Motion model of turbulent microparticles<sup>[24]</sup>

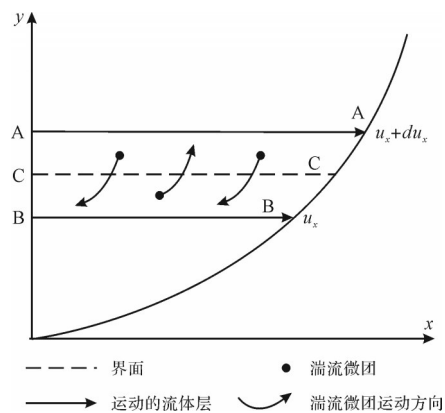


图2 湍流微团动量传递模式<sup>[24]</sup>

Fig.2 Momentum transfer model of turbulent microparticles<sup>[24]</sup>

向,依靠惯性作用流动的河水不同尺度流体微团会持续随机进入邻近的湖水并逐层传递动量,湖水不同尺度流体微团也会持续随机进入邻近的河水(图2),动量由高速流体层(河水)向相邻的低速流体层(湖水)传递<sup>[25-26]</sup>。在此过程中,系统的扰动被放大,湍流强度被进一步加强。湍流的强扩散性和强耗散性导致被卷吸或掺混进入流动系统的水体质量沿程会持续增多,流动水体动量和动能快速扩散进而耗散<sup>[23-25]</sup>。

该类水体的流动规律由湍流射流理论描述。湍流射流是指流体从管口、孔口、狭缝射出,并同周围环境流体掺混的流动,是特殊的流动类型,以其边界为流体区别于管流、明渠流等边界受限的其他流动类型<sup>[16-17]</sup>。根据湍流射流基本特征可对其进行多种分类,如按照湍流射流的物理性质分为等密度射流、变密度射流(图3)等,按湍流射流环境固体边界条件分为自由射流、非自由射流等,按湍流射流的原动力分为动量射流、浮射流等,按湍流射流断面形状分为平面(二维)射流、圆形(轴对称)射流、矩形(三维)射流等<sup>[16-17]</sup>。其中,平面射流指流体从狭长缝隙的外射

运动,射流只能在垂直条缝长度的平面上作扩散运动;圆形射流指流体从管口、孔口等圆孔的外射运动,射流可作轴状扩散运动;矩形射流指流体从矩形断面的外射运动,射流在三维空间上扩散运动;对于矩形射流,当长宽比小于3时,按圆形射流考虑,当长宽比大于10时,按平面射流考虑。射流在形成稳定的流动形态后,根据流速变化( $u_{max}/u_0$ ),沿流动方向可划分为起始段和主体段。

河水入湖过程中,湍流特性决定了河水的密度无论是等于(图3a,b)、小于(图3c,d)或大于(图3e,f)湖水密度,两类水体间的相互作用机制本质上没有区别,两者在三维流场充分掺混(图3),属于矩形射流。考虑到河流的宽深比,矩形射流可按平面射流处理,湍流射流理论给出了等密度二维平面自由射流水体流速的变化( $u_{max}/u_0$ )与出口断面厚度( $2b_0$ )及至射流源距离( $x$ )的关系(公式1)<sup>[16-17]</sup>:

$$u_{max}/u_0 = 2.28(2b_0/x)^{0.5} \quad (1)$$

式中: $x$ 为至射流源的距离,m; $u_0$ 为出口断面平均流速,m/s; $u_{max}$ 为 mainstream 轴线流速,m/s; $b_0$ 为射流出口断面半厚度,m。

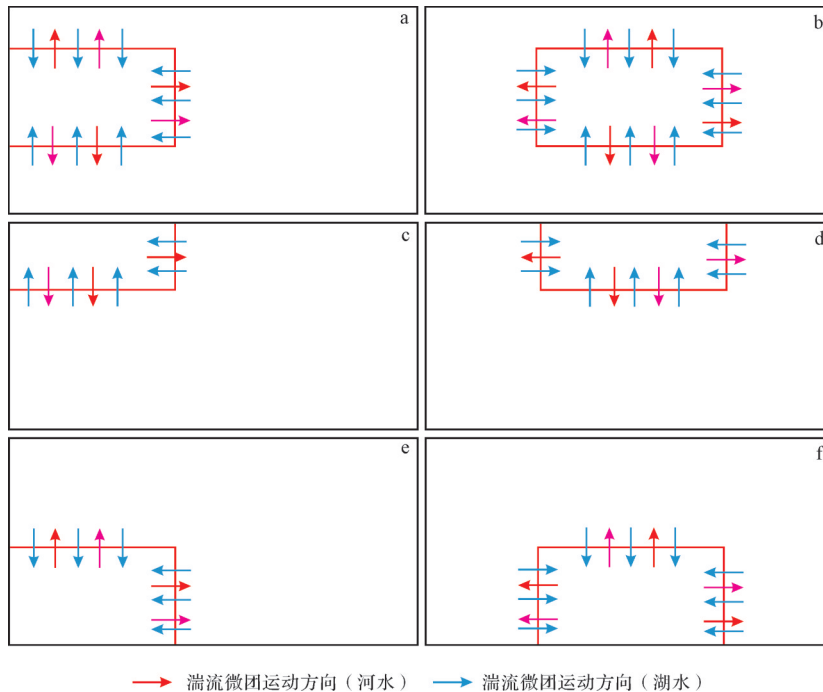


图3 河口动力模式

(a)等密度自由射流(等密度流型),侧视;(b)等密度自由射流(等密度流型),正视;(c)变密度射流(低密度流型),侧视;(d)变密度射流(低密度流型),正视;(e)变密度射流(高密度流型),侧视;(f)变密度射流(高密度流型),正视

Fig.3 Dynamic models of estuaries

(a) isodensity free jet (isodensity flow type), side view; (b) isodensity free jet (isodensity flow type), front view; (c) variable density jet (low density flow type), side view; (d) variable density jet (low density flow type), front view; (e) variable density jet (high density flow type), side view; (f) variable density jet (high density flow pattern), front view

由公式(1)可知,主流轴线的流速( $u_{\max}$ )与出口断面的平均流速( $u_0$ )成正比,出口断面平均流速( $u_0$ )越大,主流轴线的流速( $u_{\max}$ )越大;与至射流源的距离( $x$ )的平方根成反比,距至射流源的距离( $x$ )越大,主流轴线的流速( $u_{\max}$ )越小;与出口断面高度( $2b_0$ )平方根成正比,出口断面厚度( $2b_0$ )越大,主流轴线的流速( $u_{\max}$ )越大<sup>[16-17]</sup>。表明当河、湖两类水体等密度时,失去河床约束条件下依靠惯性作用流动的河水在湖水流动过程中,水体流速( $u_{\max}$ )与出口断面平均流速( $u_0$ )和水体深度( $2b_0$ )正相关,与至射流源或出口断面的距离( $x$ )负相关,水体流速( $u_{\max}$ )沿程会以负指数快速衰减(图4)。当河、湖两类水体不等密度时,水体流速的沿程变化( $u_{\max}/u_0$ )与河、湖两类水体等密度时具有类似的变化规律。

虽然不同类型沉积湖盆的构造背景、古地形和湖平面升降、气候和物源等控制因素存在差异,但所有的河控三角洲都涉及河、湖两类水体的相互作用。上述动力模式使不同主控因素的河控三角洲在动力作用机制上实现了统一。

### 3 河控三角洲生长的沉积模式

事件性洪水是泥沙搬运的主要形式,河控三角洲的生长主要发生在洪水期,其沉积体的生长过程是挟沙洪水泥沙在三角洲前缘和平原沉积的过程。在前述河控三角洲动力模式的约束下,结合针对河控三角洲生长过程进行的水槽物理模拟及前人开展的数值模拟,分析三角洲前缘和平原沉积机制并构建河控三角洲生长的沉积模式。

#### 3.1 三角洲前缘沉积特征

单期挟沙洪水向湖推进沉积形成的以床沙载荷为主的前缘砂体延伸长度极其有限,证据:

(1) 河控三角洲河口动力模式(图3,4)表明,失去河床约束条件下,依靠惯性作用流动的河水入湖后流速沿程快速衰减,从而导致床沙载荷快速沉积。

(2) 河水在湖水中推进时,水体深度沿程增大,流速沿程快速衰减,床沙载荷因所受上举力不足以克服有效重力而沉降,并因与水体流动方向不同而逐渐分离,缺乏继续向前牵引推进的动力条件(图5)。

(3) 为明确前缘沉积特征和三角洲生长过程,开展了河控三角洲生长过程的水槽物理模拟。主要参数为水槽长16.0 m,宽6.0 m,深0.8 m;湖盆前后设进(出)水口1个,两侧各设进(出)水口3个,控制河水流

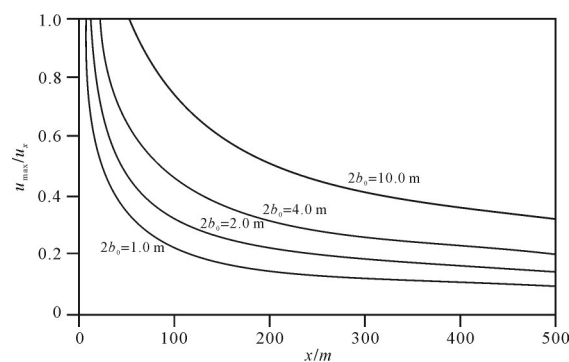


图4 河口水体流速的沿程变化( $u_{\max}/u_0$ )与至出口断面的距离( $x$ )关系

Fig.4 Relationship between the change of water velocity ( $u_{\max}/u_0$ ) and the distance ( $x$ ) to the outlet section of the estuary

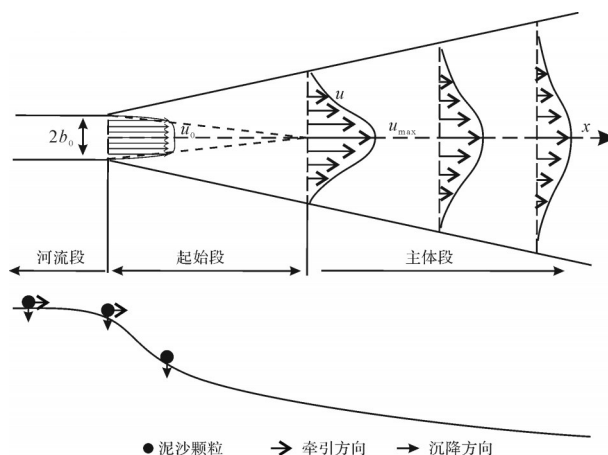


图5 河口动力场及泥沙运动模式(据文献[17]修改)

Fig.5 Dynamic field and sediment movement model of estuary (modified from reference[17])

速、流量、床沙载荷浓度、相对静止的蓄水体水位高低或湖岸线位置;其中,模拟所提供的河水的初始流速必须与床沙载荷粒径和浓度相匹配,这要求河水的初始流速足够大,以至于大于最大粒径床沙载荷的起动流速<sup>[25]</sup>;模拟装置设置4块活动底板(7.0~12.0 m),构成活动底板系统,能够实现同步升降,控制湖盆底形和坡降;沿水流方向的底形设计为,固定河道区(0~5.0 m)坡度约为0.6°,分流河道区(5.0~7.0 m)坡度约为1.2°,湖区(7.0~16.0 m)坡度约0.3°。过程数据显示,随模拟进行,床沙载荷在湖岸线附近快速卸载,表明河水向蓄水体短距离推进后,水体流速由于快速衰减已经足够小,以至于小于最小粒径床沙载荷的起动流速<sup>[25]</sup>;湖岸线严格控制着床沙载荷卸载的位置和砂体的展布(图6a, b);三角洲前缘沉积序列、砂体特征及其形成过程严格受水位变化的控制,水位下降是砂体推进的前提条件<sup>[27-29]</sup>。

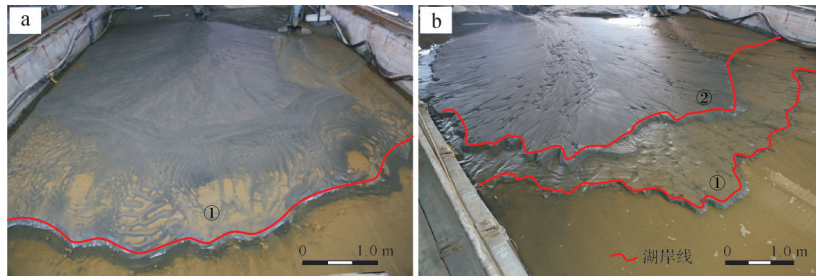


图6 水槽模拟显示的湖岸线与沉积体关系

Fig.6 Relationship between shorelines and sediments of flume simulation

(4) 河控三角洲生长过程的数值模拟表明,前缘沉积形成的以床沙载荷为主的砂体的分布与湖平面的相对变化存在确定的响应关系<sup>[30-31]</sup>,在前期模拟产生的河床变形对后续进行的模拟的影响可以忽略的条件下<sup>[32]</sup>,模拟在前缘形成的以床沙载荷为主的砂体规模非常有限。

床沙载荷在三角洲前缘因水体流速衰减至低于止动流速而沉积,再次搬运需要较此前止动流速更大的起动流速<sup>[9-10]</sup>。早期洪水在前缘沉积形成的以床沙载荷为主的砂体,或被晚期沉积的泥沙覆盖并埋藏,或被晚期更强的洪水再次搬运而改造。早期挟沙洪水在前缘沉积形成的以床沙载荷为主的砂体,与形成的地质年代无关,已经不具有在当期洪水作用下继续向前推进的动力条件。河口是河流流速衰减的终点,其控制下的前缘是挟沙河流床沙载荷沉积的终点。

### 3.2 三角洲平原沉积特征

河流是连接蚀源区和沉积区的主要输沙通道<sup>[9-10]</sup>,其搬运能力正相关于流速,而流速正相关于河床比降和水力半径(为过水断面面积与湿周长之比),反相关于河道表面的糙率。其中,河床比降和水力半径反相关。足够大的河床比降是河流克服沿程综合阻力并维持流动的的必要条件<sup>[9-10]</sup>。河流总是不断地通过自发调整其宽度、深度来调整水力半径,通过自发调整流动路径来调整河床比降,从而调整着与此对应的河流平面形态(河型)以使单位河长的能量耗散率最小<sup>[33]</sup>。上述规律控制了河流的动力特征及泥沙搬运和沉积机制。从源到汇,河床比降逐渐降低,河床展宽,水体流速衰减,搬运能力降低<sup>[33]</sup>。近湖岸线处的三角洲平原河床比降更小,河床更宽,水体流速更低,搬运能力更弱<sup>[33]</sup>。河控三角洲平原砂体生长的动力和沉积模式可以概括为河流末端水体流速沿程衰减→挟沙能力降低→泥沙沉积→河床抬高

→堤岸决口→河流分叉→水体流速沿程衰减→挟沙能力降低→泥沙沉积(图7)。证据是:

(1) 河控三角洲河口动力模式(图4)显示,河流入湖后流速沿程快速衰减,河流由此进入雍水状态并溯源近程传递,导致河床发生溯源沉积。

(2) 河控三角洲生长过程的水槽物理模拟显示,改变上游来沙量和下游水位(湖岸线)等条件,河流平面形态会交替演变,泥沙在河口发生沉积形成河口坝(前缘朵体)并导致地形抬高,河流进入雍水状态并溯源沉积;河床抬高导致水流越岸,形成新主流;当上游多沙和下游高水位时,河流平面形态变化周期历时变短,主流摆动角度变大,摆动点位置向上游移动,平原河流的横向迁移是三角洲演变过程中最常见的河流运动形式<sup>[34]</sup>。

(3) 河控三角洲生长过程的数值模拟显示,随着模拟进行,平原河流的河床因泥沙沉积而快速抬升<sup>[30]</sup>,导致堤岸决口进而河流改道。

分流河道砂体构成河控三角洲平原的骨架砂体。河流随湖岸线摆动往复进退,地貌控制下河流的横向迁移,是平原砂体生长的重要机制。平原砂体生长过程,是河流挟带的泥沙在动力、地貌控制下沉积的过程,是动力、沉积、地貌相互作用的过程,即动力自调整于地貌并控制沉积,沉积自适应于动力并塑造地貌,地貌为泥沙运动过程的响应并制约动力。准平原化是该环境下沉积的发展方向<sup>[32]</sup>。

### 3.3 沉积模式构建

上游来沙量影响河口坝(前缘朵体)纵向坡度,下游水位影响前缘河口坝砂体延伸,两者共同影响着河流流速减小的始发位置和范围,最终影响湖岸线的发育位置、河流的横向迁移、三角洲的发育形态和程度,河控三角洲是河流延伸和河口坝沉积而引起地形调整的结果<sup>[34]</sup>。构成河控三角洲的前缘和平原沉积中,沉积的主体是平原环境而非前缘环境

(图6,8)。地貌控制下河流的频繁摆动是平原砂体生长的重要机制(图7,8)。受控于湖岸线的迁移和可容空间的变化,某期洪水在平原和前缘沉积形成的以床沙载荷为主的砂体,或被后期洪水沉积的泥沙不同程度的覆盖并埋藏,或被后期洪水再次起动、搬运进而不同程度的改造,形成多种叠置或切割的砂体接触关系。

上述河控三角洲生长的沉积模式,是基于湍流理论对河、湖两类水体的相互作用机制进行微观动力过程分析,在揭示湍流射流成因、控制因素及流动规律的基础上构建的,并得到水槽物理模拟、数值模拟和河流泥沙动力学的支持,该沉积模式具有普遍的适用性。

## 4 结论

(1) 湍流是包括河水、湖水在内的地表水体流动的主要形式,湍流的特点决定了两类水体界面存在强烈的质量、动量、动能传递,控制着水体的流动规律。失去河床约束条件下依靠惯性作用流动的河水入湖过程既不是圆形轴对称射流,也不是平面(二维)射流,而是矩形(三维)射流,流速沿程会以负指数快速衰减。河口是挟沙河流流速衰减的终点,其控制下的三角洲前缘是挟沙河流床沙载荷沉积的终点。

(2) 早期洪水在三角洲前缘沉积形成的以床沙载荷为主的砂体,或被晚期沉积的泥沙覆盖并埋藏,或者被晚期更强的洪水再次搬运进而改造。早期挟沙洪水在前缘沉积形成的以床沙载荷为主的砂体,

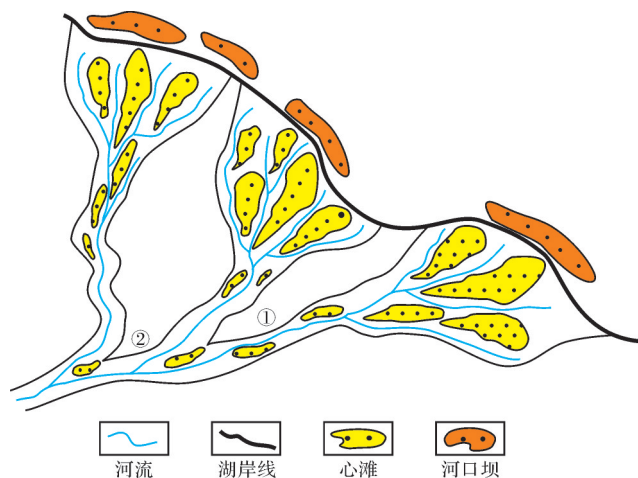


图7 河控三角洲生长的沉积模式(垂向)

Fig.7 Sedimentary model of river-dominated delta growth(vertical)

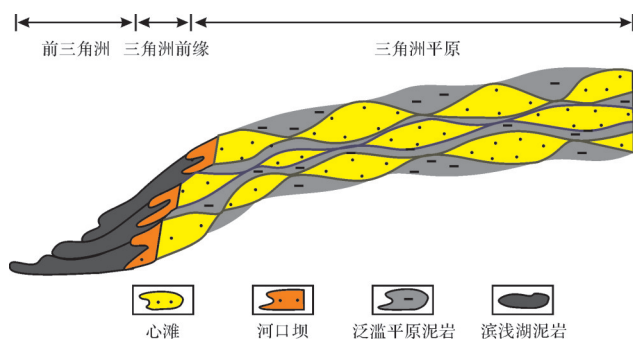


图8 河控三角洲生长的沉积模式(平面)

Fig.8 Sedimentary model of river-dominated delta growth(plane)

与形成的地质年代无关,已经不具有在当期洪水作用下继续向前推进的动力条件。单期洪水在前缘沉积形成的以床沙载荷为主的砂体规模非常有限。

(3) 河控三角洲沉积的主体是三角洲平原环境。三角洲生长的过程,是三角洲平原动力、沉积、地貌相互作用的过程,三角洲生长动力和沉积模式可以概括为河流末端水体流速沿程衰减→挟沙能力降低→泥沙沉积→河床抬高→水流越岸→河流分叉→水体流速沿程衰减→挟沙能力降低→泥沙沉积。地貌控制下的三角洲平原河流的频繁摆动是河控三角洲生长的重要机制,准平原化是该环境下沉积发展的方向。

致谢 本文写作过程中得到了中国石油勘探开发研究院西北分院李相博博士的悉心指导,评审专家对初稿的完善提供了诸多宝贵的意见,在此一并致以诚挚的感谢。

## 参考文献(References)

- [1] 王建功,王天琦,卫平生,等. 大型拗陷湖盆浅水三角洲沉积模式:以松辽盆地北部葡萄花油层为例[J]. 岩性油气藏,2007,19(2): 28-34. [Wang Jianguo, Wang Tianqi, Wei Pingsheng, et al. Sedimentary mode of shallow lacustrine delta of large continental basin: An example from Putaohua Formation in northern Songliao Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(2): 28-34.]
- [2] Donaldson A C. Pennsylvanian sedimentation of central sppls-svhians[J]. The Geological Society of America, 1974, 148(S): 47-48.
- [3] Garcia-Garcia F, Corbi H, Soria J M, et al. Architecture analysis of a river flood-dominated delta during an overall sea-level rise (early Pliocene, SE Spain) [J]. Sedimentary Geology, 2011, 237(1/2): 102-113.
- [4] 张新涛,周心怀,李建平,等. 敞流沉积环境中“浅水三角洲前缘砂体体系”研究[J]. 沉积学报,2014,32(2): 260-269. [Zhang Xintao, Zhou Xinhui, Li Jianping, et al. Unconfined flow deposits in front sandbodies of shallow water deltaic distributary sys-



- tems[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 260-269. ]
- [5] Lee K, McMechan G A, Gani M R, et al. 3-D architecture and sequence stratigraphic evolution of a forced regressive top-truncated mixed-influenced delta, Cretaceous wall creek sandstone, Wyoming, U. S. A[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(4): 303-323.
- [6] 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等. 大型拗陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 19-28. [Zhu Xiaomin, Deng Xiuqin, Liu Ziliang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: An example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 19-28. ]
- [7] Fisk H N. Bar-finger sands of Mississippi delta [M]//Peterson J A, Osmond J C. *Geometry of sandstone bodies*. Oklahoma: AAPG, 1961: 29-52.
- [8] Postma G. An analysis of the variation in delta architecture[J]. *Terra Nova*, 1990, 2(2): 124-130.
- [9] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 1-190. [Zhang Ruijin. *River sediment dynamics* [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1998: 1-190. ]
- [10] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 85-599. [Qian Ning, Wan Zhaohui. *Mechanics of sediment movement*[M]. Beijing: Science Press, 2003: 85-599. ]
- [11] Bates C C. Rational theory of delta formation[J]. *AAPG Bulletin*, 1953, 37(9): 2119-2162.
- [12] 黄秀祯, 王衡鉴, 谭启蔚. 湖泊三角洲数学模型[J]. *石油勘探与开发*, 1982(2): 59-72. [Huang Xiuzhen, Wang Hengjian, Tan Qiwei. *Mathematical model of a lake delta*[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1982(2): 59-72. ]
- [13] 顾晓忠, 马立桥. 三角洲沉积体系的数值模拟及其应用[J]. *石油学报*, 1993, 14(2): 1-11. [Gu Xiaozhong, Ma Liqiao. *Numerical simulation of a delta depositional system and its applications*[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1993, 14(2): 1-11. ]
- [14] 王良忱, 张金亮. 沉积环境和沉积相[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 145-175. [Wang Liangchen, Zhang Jinliang. *Sedimentary environment and sedimentary facies*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 145-175. ]
- [15] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京: 石油工业出版社, 2008: 291-293. [Zhu Xiaomin. *Sedimentary petrology* [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 291-293. ]
- [16] 平浚. 射流理论基础及应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1995: 74-211. [Ping Jun. *Jet theory and application* [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1995: 74-211. ]
- [17] 余常昭. 紊动射流[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 1-161. [Yu Changzhao. *Turbulent jet* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 1-161. ]
- [18] 薛鸿超, 顾家龙, 任汝述. 海岸动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1980: 1-443. [Xue Hongchao, Gu Jialong, Ren Rushu. *Coast dynamics* [M]. Beijing: China Communications Press, 1980: 1-443. ]
- [19] 赵今声, 赵子丹, 员瑛. 海岸河口动力学[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 308-482. [Zhao Jinsheng, Zhao Zidan, Yuan Ying. *Coast estuarine dynamics* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1993: 308-482. ]
- [20] 徐振山, 陈永平, 张长宽. 海岸动力环境下射流运动研究综述[J]. *水科学进展*, 2012, 23(3): 438-444. [Xu Zhenshan, Chen Yongping, Zhang Changkuan. *Review of hydrodynamics of jet flow in coastal waters*[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(3): 438-444. ]
- [21] 陈懋章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社出版社, 1993: 293-357. [Chen Maozhang. *Foundation of viscous fluid dynamics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 293-357. ]
- [22] 阎超, 钱翼稷, 连祺祥. 粘性流体力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 103-145. [Yan Chao, Qian Yiji, Lian Qixiang. *Viscous fluid mechanics* [M]. Beijing: Beihang University Press, 2005: 103-145. ]
- [23] 梁文懂, 肖时钧. 传递现象基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 1-209. [Liang Wendong, Xiao Shijun. *Basis of transmission phenomenon* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 1-209. ]
- [24] Welty J R, Wicks C E, Wilson R E, et al. *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*[M]. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2008: 1-545.
- [25] 齐亚林, 楚美娟, 程党性, 等. 内陆湖盆沉积过程物理模拟的动力学分析[C]//中国矿物岩石地球化学学会第17届学术年会论文摘要集. 杭州: 中国矿物岩石地球化学学会, 2019: 598-599. [Qi Yalin, Chu Meijuan, Cheng Dangxing, et al. *Dynamic analysis of physical simulation of sedimentary process in inland lake basin*[C]//*Proceedings of the 17th annual meeting of mineral and rock geochemistry society of China*. Hangzhou: Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019: 598-599. ]
- [26] 齐亚林, 刘显阳, 杨时雨, 等. 内陆湖泊三角洲河口区水动力特征及地质意义[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(3): 49-55. [Qi Yalin, Liu Xianyang, Yang Shiyu, et al. *Hydrodynamic characteristics and geological significance of estuaries of inland lake delta* [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(3): 49-55. ]
- [27] 张春生, 刘忠保, 施冬, 等. 三角洲分流河道及河口坝形成过程的物理模拟[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 168-176. [Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. *Physical simulation of formation process in distributary channels and debouch bars in delta*[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 168-176. ]
- [28] 朱永进, 张昌民, 尹太举. 叠覆式浅水三角洲沉积特征与沉积模拟[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(3): 59-65. [Zhu Yongjin, Zhang Changmin, Yin Taiju. *Characteristics of superimposed shallow-lacustrine delta and its experimental simulation*[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(3): 59-65. ]
- [29] 刘飞, 张小峰, 邓安军. 内陆河三角洲堆积体形成发展过程

- [J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 378-387. [Liu Fei, Zhang Xiaofeng, Deng Anjun. Formation and development process of inland river delta deposition [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 378-387. ]
- [30] 王杨君, 尹太举, 邓智浩, 等. 水动力数值模拟的河控三角洲分支河道演化研究[J]. 地质科技情报, 2016, 35(1): 44-52. [Wang Yangjun, Yin Taiju, Deng Zhihao, et al. Terminal distributary channels in fluvial-dominated delta systems from numerical simulation of hydrodynamics [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(1): 44-52. ]
- [31] 曾灿, 尹太举, 宋亚开. 湖平面升降对浅水三角洲影响的沉积数值模拟实验[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 2095-2104. [Zeng Can, Yin Taiju, Song Yakai. Experimental on numerical simulation of the impact of lake level plane fluctuation on shallow water delta [J]. Earth Science, 2017, 42(11): 2095-2104. ]
- [32] 齐亚林, 赵彦德, 李元昊, 等. 泥沙动力学研究方法、技术、进展及沉积学意义[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(1): 92-98. [Qi Yalin, Zhao Yande, Li Yuanhao, et al. Sedimentology significance from sediment dynamics of research method, technology, progress [J]. Advances in Geosciences, 2018, 8(1): 92-98. ]
- [33] 倪晋仁, 马蔼乃. 河流动力地貌学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998: 320-347. [Ni Jinren, Ma Ainai. River dynamic geomorphology [M]. Beijing: Peking University Press, 1998: 320-347. ]
- [34] 白玉川, 胡晓, 徐海珏, 等. 入湖浅水三角洲形成过程实验模拟分析[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 549-560. [Bai Yuchuan, Hu Xiao, Xu Haijue, et al. Experimental analysis of the formation process of lacustrine shallow-water delta [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(5): 549-560. ]

## Dynamic and Sedimentary Models of River-dominated Delta Growth

QI YaLin<sup>1</sup>, ZHAO YanDe<sup>2</sup>, SHAO XiaoZhou<sup>1,3</sup>, CHU MeiJuan<sup>1</sup>, ZUO Jing<sup>1</sup>

1. Exploration and Development Institute of Changqing Oilfield, Xi'an 710018, China

2. BaiLie School of Petroleum Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China

3. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract:** Analysis of the hydrodynamic characteristics of estuaries, and examination of the bedload transport and deposition processes of a sediment-carrying river in a delta front controlled by the estuary, are the premises of this study of the growth patterns of river-dominated deltas. Turbulence theory is applied from the perspective of microscopic dynamic processes to analyze the interaction mechanism and movement process of a river flowing into a lake. In this process, the river flows into the lake by inertia and without the constraints of a riverbed. Combining physical flume modeling and numerical simulation carried out for the growth process of a river-controlled delta with reference to the theory of fluvial sediment dynamics, the dynamic and sedimentary models of river-delta growth are established in terms of fluid dynamics and river sediment dynamics. The results show that the characteristics of turbulence determine the strong inertial mass, momentum and kinetic energy transfer between the two water bodies. The process of river water entering the lake is neither a circular (an axial), nor a plane (two-dimensional) jet, but a rectangular (three-dimensional) jet. The flow velocity in the lake is rapidly negative-exponentially attenuated. The estuary marks the termination of the sediment-carrying river, and the delta front under its control is its bedload terminal point. The growth process of delta plain sedimentary bodies consists of the delta plain power and the sedimentary and geomorphological interaction processes. The dynamic and sedimentary patterns may be summarized as: end of river-water flow; velocity attenuation along with reduction in carrying capacity and sediment deposition; river plate drive up to a bank run; river-tributary flow velocity with lower sedimentation; and distributary channel sandbodies. These produce the skeleton of sandbodies in a delta plain region. Frequent oscillation determined by river topography is also an important mechanism for the growth of delta plain sedimentary bodies. The main body of river-dominated delta deposition is determined by the plain environment, not the front environment.

**Key words:** turbulence; momentum jet; sedimentation process; dynamic and sedimentary patterns; river-dominated delta