

文章编号:1673-8926(2022)01-0024-10

DOI:10.12108/yxyqc.20220103

引用:屈童,高岗,徐新德,等.三角洲—浅海沉积体系泥质沉积规律模拟实验:以琼东南盆地崖南凹陷为例.岩性油气藏,2022,34(1):24-33.

Cite:QU T,GAO G,XU X D, et al. Simulation experiment of argillaceous sedimentary law of delta-shallow sea sedimentary system: A case study of Yanan Sag, Qiongdongnan Basin. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(1): 24-33.

## 三角洲—浅海沉积体系泥质沉积规律模拟实验 ——以琼东南盆地崖南凹陷为例

屈童<sup>1,2</sup>,高岗<sup>1,2</sup>,徐新德<sup>3</sup>,王瑞<sup>1,2</sup>,甘军<sup>3</sup>,梁刚<sup>3</sup>,游君君<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057)

**摘要:**三角洲—浅海沉积体系由于同时具有陆源有机及海洋有机质备受众多学者的关注,近年来南海地区油气勘探实践表明崖城组陆源海相泥岩是油气生成的重要来源之一,但由于深水区烃源岩埋深较大、现有钻井较少,极大地限制了该地区烃源岩研究与勘探进展。为了对泥质沉积物沉积与分布规律进行研究,本文以琼东南盆地崖南凹陷崖城组地质背景为基础,设计沉积模拟实验,对沉积物沉积过程进行观察,并对沉积体进行取样,测定样品粒度组成,结合定性观察与定量对比,对三角洲—浅海沉积体系泥质沉积物的沉积规律进行探究,对陆源海相烃源岩的优势发育部位进行揭示。研究表明,由物源向浅海方向,沉积物的泥质含量呈整体增大的趋势,在三角洲前缘斜坡处由于水动力条件的骤降出现突增,但沉积物的总量呈先增大后减小的趋势,使得泥质沉积物的总量向深水方向呈减少趋势;三角洲前缘斜坡—浅海沉积范围是泥岩发育的优势区域,在三角洲沉积体内局部低地势、弱水动力条件的部位也可沉积并保存泥质沉积物;地形坡度的增大有利于泥质沉积物向深水区搬运。三角洲前缘—浅海区是泥质沉积物堆积的主要部位,即近海盆地的近岸地区,这对琼东南盆地深水区陆源海相烃源岩优势发育部位的预测提供了重要依据与指导。

**关键词:**三角洲—浅海沉积体系;陆源海相烃源岩;泥质沉积物;沉积模拟实验;优势发育区;琼东南盆地  
**中图分类号:**TE122.2 **文献标志码:**A

### Simulation experiment of argillaceous sedimentary law of delta-shallow sea sedimentary system: A case study of Yanan Sag, Qiongdongnan Basin

QU Tong<sup>1,2</sup>, GAO Gang<sup>1,2</sup>, XU Xinde<sup>3</sup>, WANG Rui<sup>1,2</sup>, GAN Jun<sup>3</sup>, LIANG Gang<sup>3</sup>, YOU Junjun<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Zhanjiang Branch, CNOOC China Limited, Zhanjiang 524057, Guangdong, China)

**Abstract:** The delta-shallow sea sedimentary system has attracted the attention of many scholars due to its combi-

收稿日期:2021-06-25;修回日期:2021-09-18;网络发表日期:2021-11-12

基金项目:中海油“十三五”油气资源评价项目(编号:YXKY-2018-KT-01),自然资源部项目“中海油矿区油气资源评价”(编号:2017YQZY-PJ0109)联合资助

作者简介:屈童(1994—),男,中国石油大学(北京)在读博士研究生,研究方向为油气成藏与分布规律。地址:(102249)北京市昌平区府学路18号。Email:qutong1994@sina.com

通信作者:高岗(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事油气成藏与分布规律、资源评价等方面教学与研究工作。Email:gaogang2819@sina.com。

nation of terrestrial organic matter and marine organic matter. In recent years, oil and gas exploration practices in the South China Sea have shown that terrigenous marine mudstone of Yacheng Formation is one of the important sources of oil and gas generation. The source rocks are buried deep and there are few existing wells, which greatly limits the research and exploration progress of source rocks in this area. In order to study the deposition and distribution of argillaceous sediments, based on the geological background of Yacheng Formation in Yinnan Sag, Qiongdongnan Basin, a sedimentary simulation experiment was designed to observe the sedimentary process, and the sedimentary bodies were sampled to determine the particle size composition of the samples. Combined with qualitative observation and quantitative comparison, the sedimentary law of argillaceous sediments in delta shallow sea sedimentary system was explored, and the dominant development position of terrestrial marine source rocks was revealed. The results show that from the provenance to the shallow sea, the argillaceous content of sediments increases as a whole. At the delta front slope, the argillaceous content increases suddenly due to the sudden drop of hydrodynamic conditions, but the total amount of the sediments increases first and then decreases, which makes the total amount of the argillaceous sediments decrease to the deep water. The delta front slope-shallow sea sedimentary area is the dominant area for the development of terrestrial marine source rocks, and argillaceous sediments can also be developed in the low-lying and weak hydrodynamic parts of the delta sedimentary body. The increase of terrain slope is conducive to the transportation of argillaceous sediments to the deep-water area. The delta front-shallow sea area is the main part of argillaceous sediment accumulation, that is, the nearshore area near the sea basin, which provides an important basis and guidance for the prediction of the dominant development parts of continental marine source rocks in the deep-water area of Qiongdongnan Basin.

**Key words:** delta-shallow sea sedimentary system; terrestrial marine source rock; argillaceous sediment; sedimentary simulation experiment; dominant development area; Qiongdongnan Basin

## 0 引言

泥质沉积物的沉积对烃源岩的发育有重要意义,大量研究表明有机质通常以吸附态附着在沉积物颗粒表面,所吸附的量与沉积物的比表面积有关<sup>[1-3]</sup>,而单位质量所具有的总面积与沉积物的粒度成反比,即有机碳含量与沉积物碎屑粒度呈负相关关系<sup>[4-6]</sup>。因此,深入研究泥质沉积物的沉积规律十分重要。关于细粒沉积规律主要集中在对现代表层沉积的研究上<sup>[4,7-9]</sup>,主要是由于地质历史时期沉积特征的研究缺少样品,仅钻井处可以取样。沉积模拟实验技术是目前地质研究工作中少有的“正演”模拟研究方法,前人利用沉积模拟实验技术主要对砂体发育规律、储层甜点预测及其影响因素进行了较多研究<sup>[10-12]</sup>,本次将该方法应用于细粒沉积物沉积规律的研究中,观察沉积物沉积过程,分析泥质沉积规律。

琼东南盆地是我国南海深水区重要的油气勘探领域之一<sup>[13]</sup>,目前已在陵水、宝岛、长昌凹陷等取得重要勘探成果,勘探前景乐观<sup>[14-15]</sup>,而崖南凹陷自崖城 13-1 凸起上发现崖城 13-1 气田外,勘探成果极少,说明该区成藏地质条件较为复杂<sup>[16]</sup>。近年来,南海深水区油气勘探研究发现了陆源有机质的贡献<sup>[17]</sup>,崖南凹陷崖城组陆源海相泥岩具有巨大的

生烃潜力,但由于深水区崖城组气源岩钻遇较少,且都受油基泥浆污染,很难对烃源岩进行准确的分析,因此,泥质沉积物沉积规律的研究不仅对南海地区烃源岩优势发育区的预测有重要的意义,更对未来油气勘探方向有重要的指导意义。

## 1 区域地质概况

崖南凹陷[图 1(a)]<sup>[18-19]</sup>位于琼东南盆地北部拗陷带的西南部,平面上呈喇叭状,剖面上为箕状断陷。琼东南盆地的基底由古近系的火成岩、变质岩及沉积岩组成,盆地主要发育古近系、新近系和第四系沉积盖层[图 1(b)]<sup>[20]</sup>。渐新统早期崖城组处于断陷晚期阶段,主要为海陆过渡相沉积,之后逐渐转变为海洋沉积环境,整体经历了水体由浅变深再变浅、沉积物由粗变细再变粗的完整层序演化过程,至崖城组中晚期以滨浅海相沉积为主,是盆地重要的烃源岩层段,由上到下依次可分为崖一段、崖二段和崖三段<sup>[21-22]</sup>。

崖城组作为盆地重要的烃源岩层一直是学者们研究的热点层段,崖城组底部普遍发育砾岩或含砾砂岩,向上粒度逐渐变细,主要发育灰白色、浅灰色粗砂岩及含砾砂岩,局部夹薄层深灰色粉砂质泥岩;向上至崖二段以灰白色薄层砂岩为主,由于水深逐渐增大,至崖二段上部发育深灰色厚层泥岩;

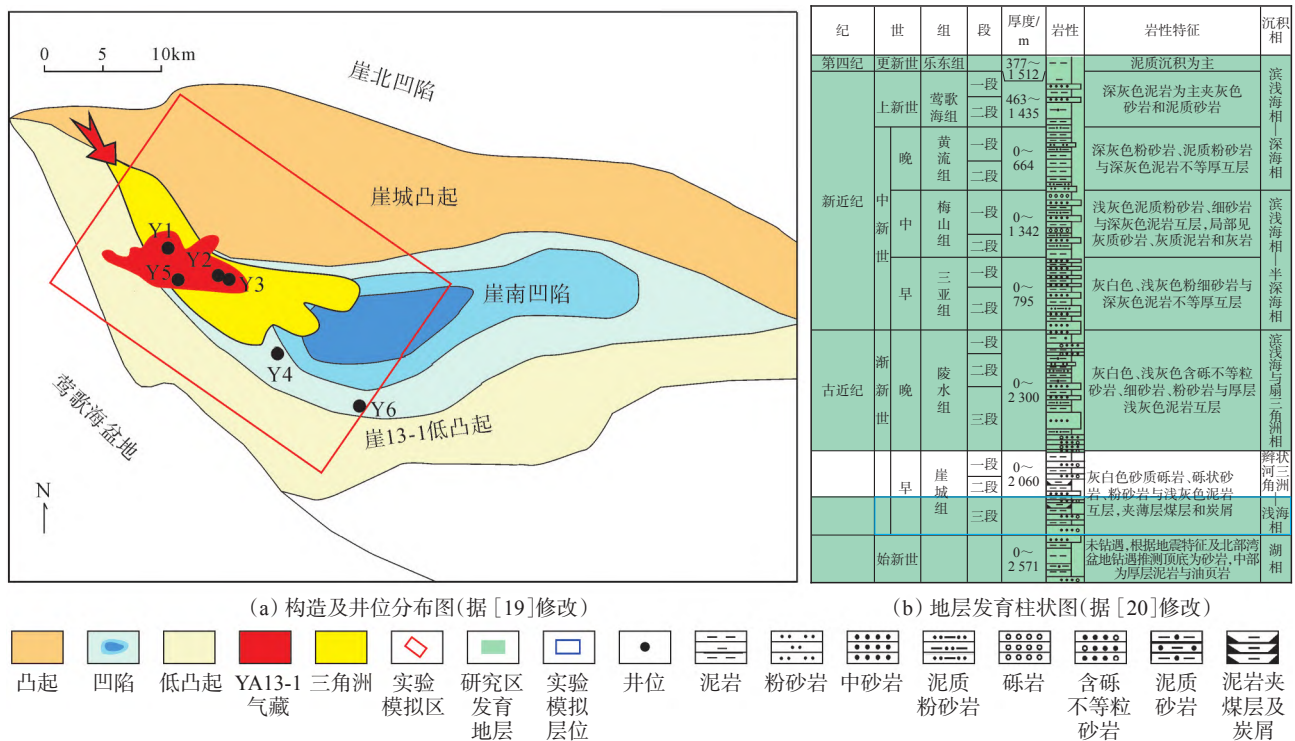


图1 琼东南盆地构造单元划分与地层发育柱状图

Fig. 1 Regional tectonic unit division and stratigraphic column of Qiongdongnan Basin

至崖一段沉积时期,水深逐渐变浅,发育灰白色砂岩、深灰色泥岩、砂质泥岩夹煤层和炭质泥岩<sup>[23]</sup>。本次实验的模拟区为崖南凹陷西北部的崖13-1气田区,近物源处崖城组崖一段及崖二段地层缺失,仅发育崖三段地层,以辫状河三角洲沉积为主,向深水方向逐渐过渡为滨浅海沉积环境<sup>[24-25]</sup>。崖南凹陷在崖城组时期持续水进,古地形整体呈东南倾向,物源方向由西北向东南方向,近物源处坡度约0.1°,向深水方向平均坡度约为0.06°<sup>[24, 26]</sup>。

## 2 实验设计与方法

本次研究以琼东南盆地崖南凹陷崖13-1气田区崖城组地质背景为实验原型,实验设计遵循几何相似、动力相似、运动相似等理论原则<sup>[27]</sup>。实验模拟的工区范围长50 km,宽30 km,根据实验室设备条件确定实验水槽有效范围为长5 m,宽3 m,几何比尺为 $\lambda = L_H/L_m \approx 10\ 000 : 1$ (H为原型,m为沉积模型,L为长度,m)。由于实际研究区古地形坡度小于0.1°,坡度过缓不利于短时间实验室模拟条件下三角洲沉积体的发育,因此分别设计底型坡度为1°~3°和3°~5°的2次坡度相对较陡的对比实验,2次实验仅坡度不同,其他条件均一致。

根据崖城组岩心粒度分析资料,崖城组沉积物粒度整体较粗,各沉积物粒级体积分数如表1所

列,据此设计实验用砂的粒度配比。研究区崖城组为整体水进期,崖三段沉积根据三级旋回划分为3期水进,为了避免底型砂对实验取样结果的影响,在水进之前首先进行1期辫状河三角洲沉积作为底型,记为第1期,崖城组实际沉积期次分别记为第2期,第3期,第4期,每期均经历2次“中水期—洪水期—中水期—枯水期”持续性供水模式,根据自然界洪水期、中水期和枯水期大致持续时间比例为1:3:6,对应设计洪水期、中水期和枯水期持续时间为1:3:6。供砂量与供水量需匹配,当供水量远大于供砂量时,沉积物将在近物源区无法沉积,而当供砂量远大于供水量时沉积物则大量堆积无法搬运,因此需通过预冲水实验确定不同供水阶段的水-砂比例,设计洪水期、中水期和枯水期的供水量为6:3:1,物源供给量对应为6:3:1,结合研究区崖三段持续海侵伴随短期海退的特征,设计各实验期次水体整体上涨,并伴随着间断性水退,实验设计参数见表2。

实验对沉积物搬运及沉积过程进行分析,精密切刻画最终沉积体切片并采取样品(图2),记录取样位置坐标、层位、特征等信息,最终采取样品210样次,其中实验1(坡度3°~5°)139样次,实验2(坡度1°~3°)71样次。样品粒度分析由Malvern Mastersizer 3000型激光粒度仪测定。

表 1 琼东南盆地崖南凹陷已有钻井崖城组沉积物粒度统计  
Table 1 Grain size of drilling sediments in Yanan Sag, Qiongdongnan Basin

井名	$\varphi$ (泥质)	$\varphi$ (粉砂)	$\varphi$ (细砂)	$\varphi$ (中砂)	$\varphi$ (粗砂)	$\varphi$ (砾石)
	(<0.004 mm)	(0.004~0.063 mm)	(0.063~0.250 mm)	(0.250~0.500 mm)	(0.500~2.000 mm)	(>2.000 mm)
Y2	(1.94~17.61)/ 6.49(33)	(1.23~34.14)/ 9.63(33)	(5.52~68.62)/ 25.36(33)	(3.47~41.34)/ 17.87(33)	(0.05~66.48)/ 32.78(33)	(0~41.48)/ 8.02(33)
Y3	(2.02~14.85)/ 7.79(9)	(1.23~23.71)/ 11.75(9)	(7.44~57.92)/ 32.91(9)	(3.47~30.07)/ 16.27(9)	(0.05~48.97)/ 24.47(9)	(0~29.10)/ 6.81(9)
Y5	(0.91~3.62)/ 1.88(15)	(4.12~19.65)/ 9.84(15)	(13.67~43.01)/ 22.01(15)	(12.36~35.86)/ 24.34(15)	(10.48~49.39)/ 35.73(15)	(0.14~14.74)/ 6.15(15)
Y6	(6.80~21.70)/ 14.20(14)	(15.20~46.30)/ 29.67(14)	(16.60~39.10)/ 29.64(14)	(1.20~40.20)/ 17.19(14)	(0~32.20)/ 9.11(14)	(0~1.40)/ 0.19(14)
平均	(0.91~21.70)/ 7.20(71)	(1.23~46.30)/ 13.89(71)	(5.52~68.62)/ 26.45(71)	(1.20~41.34)/ 18.90(71)	(0~66.48)/ 27.68(71)	(0~41.48)/ 5.93(71)

注:(1.94~17.61)/6.49(33)表示(最小值~最大值)/平均值(样品数/个)

表 2 实验设计参数  
Table 2 Experimental parameters

时期	流量/(L·s <sup>-1</sup> )			加沙量/(g·s <sup>-1</sup> )			加砂组成/%									历时/ h	水深/ cm			
	洪水期	中水期	枯水期	洪水期	中水期	枯水期	洪水期			中水期			枯水期							
							砾	中粗砂	细粉砂	砾	中粗砂	细粉砂	砾	中粗砂	细粉砂					
第1期	1.5~1.8	0.5~0.7	0.1~0.3	4.5~6.0	1.0~2.0	0.5~1.0	10	50	35	5	5	45	45	5	5	40	45	10	48	13
第2期	1.5~1.8	0.5~0.7	0.1~0.3	4.5~6.0	1.0~2.0	0.5~1.0	10	50	35	5	10	45	40	5	5	40	45	10	48	12
第3期	0.9~1.2	0.4~0.5	0.1~0.2	4.0~5.0	1.0~1.5	0~0.5	5	50	35	10	0	50	40	10	0	45	45	15	48	14
第4期	0.9~1.2	0.4~0.5	0.1~0.2	4.0~5.0	1.0~1.5	0~0.5	5	50	35	10	0	45	45	10	0	40	45	15	48	17

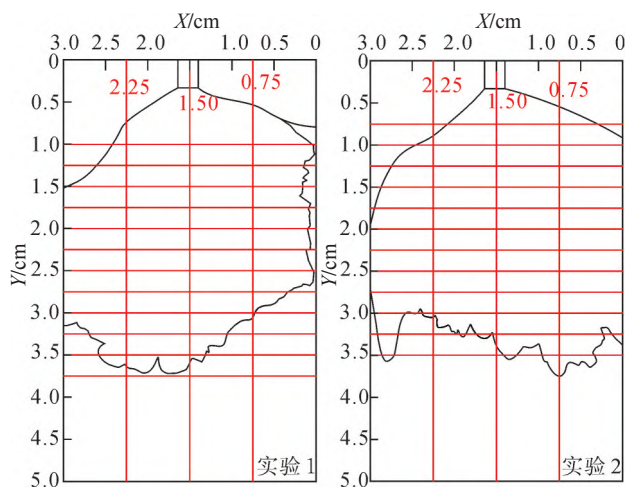


图 2 实验切片位置示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of experimental section position

### 3 实验结果分析

#### 3.1 实验定性观察与分析

实验 1 和实验 2 分别进行约 200 h,均分为 4 期。实验过程中,泥质沉积物通常不会在水流直接

流经的部位沉积,通常在河道间[图 3(a)—(b)]、河道侧缘的河漫部位及冲沟、凹槽等部位[图 3(c)]易于沉积,这是由于水流直接流经的部位水动力较强、泥质沉积物粒度过细难以悬浮搬运的方式沉积,而河道间低洼部位及河漫部位水流量较小,水动力较弱,冲沟、凹槽及下切部位由于地势较低,这里的水流流速极小或完全处于停滞状态,且后期易被掩埋保存,利于泥质沉积物的沉积与保存。

在三角洲平原两侧的漫溢部位,水流漫出呈面状溢流,水动力强度弱,泥质沉积物易于沉积[图 4(a)],但沉积过程是动态的,当河道摆动时,先前漫溢沉积的部位发育河道会使得早期沉积的泥质沉积物被破坏;在洪水期,物源供给充分,快速堆积使得泥质沉积物在近物源处得以保存。三角洲前缘河漫部位,水流呈漫溢状态流动,水动力强度极弱,泥质沉积物极易保存[图 4(b)],但与平原区一致。在后期河道摆动时,会将前期已经沉积的泥质沉积物冲刷到水体中去;在快速水退—水进过程中,沉积界面处会由于可容纳空间迅速增大使得沉积物快速堆积从而形成连续性较好的层状泥质沉积物。

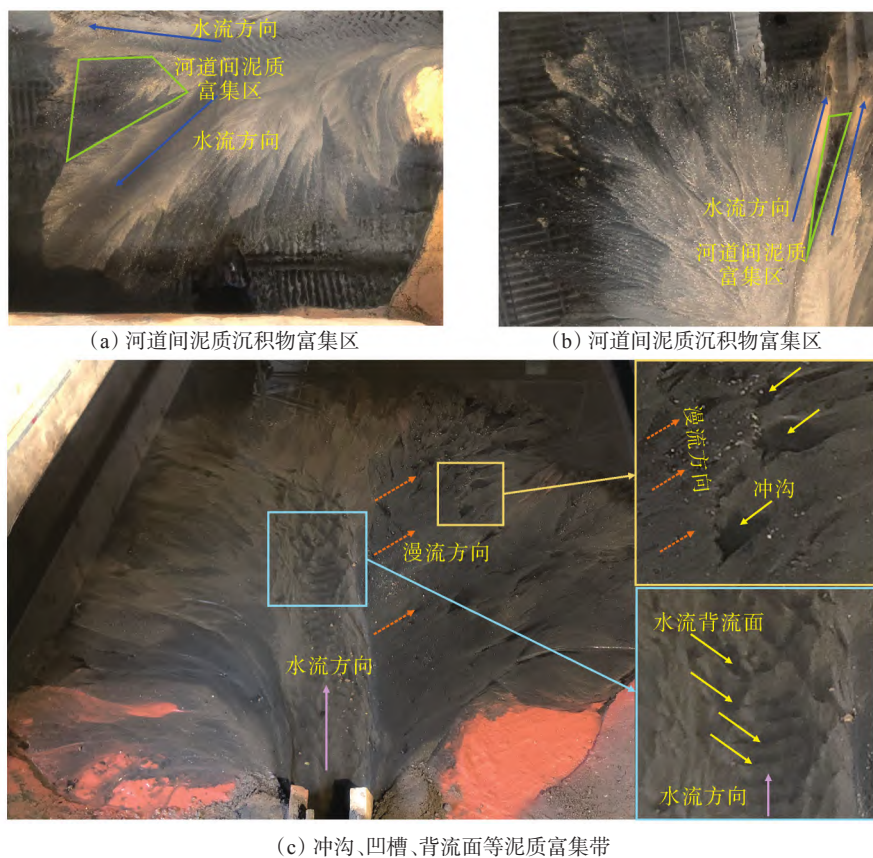


图3 沉积模拟实验过程照片  
 Fig. 3 Photos of sedimentary simulation experiment process

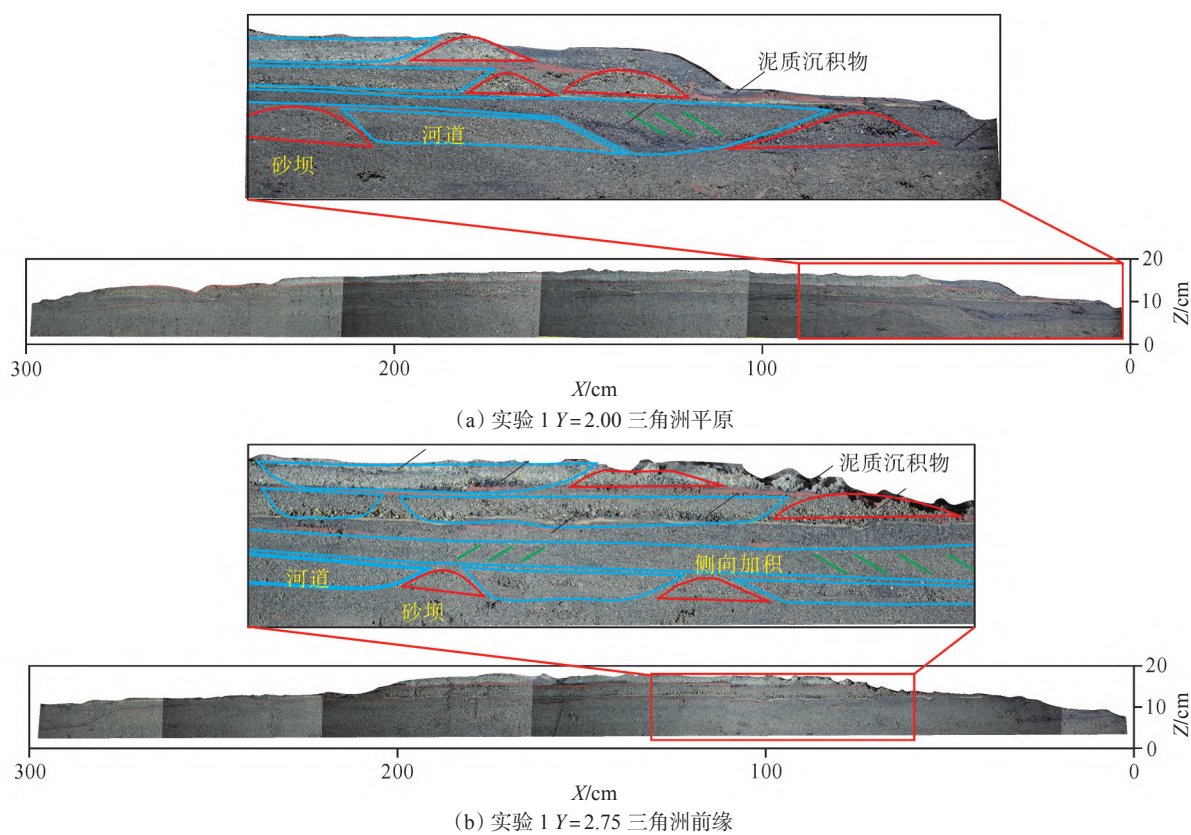


图4 沉积模拟实验泥质沉积物分布剖面图(剖面位置见图2)  
 Fig. 4 Distribution profile of argillaceous sediments in sedimentary simulation experiment

### 3.2 粒度分析测试结果

对采取的 210 样次样品进行粒度分析,结果显示,坡度较陡条件下,实验 1 第 2 期三角洲平原—前缘泥质体积分数可达 0.51%,远高于实验 2 同期的 0.02%,但实验 1 前三角洲—浅海区泥质体积分

数为 43.87%,明显低于实验 2 的 50.68%。表明相同供水流量情况下,陡坡条件水动力更强,使得三角洲前缘—浅海砾石和粗砂沉积物滑塌,泥质沉积物可以搬运到更远的地方沉积,因此陡坡条件下前三角洲—浅海范围泥质沉积物含量较低(表 3)。

表 3 不同粒径组分的占比统计  
Table 3 Proportion of components with different particle sizes

实验	沉积区	沉积期	φ(泥质)				%	
			(<0.004 mm)	(0.004~0.063 mm)	(0.063~0.250 mm)	(0.250~0.500 mm)	(0.500~2.000 mm)	(>2.000 mm)
实验 1	三角洲平原—前缘	第 2 期	(0~14.07)/ 0.51(32)	(0~40.27)/ 6.26(32)	(10.85~68.59)/ 35.80(32)	(11.01~57.91)/ 41.02(32)	(0.17~42.65)/ 14.22(32)	(0~9.73)/ 1.08(32)
		第 3 期	(0~0.35)/ 0.02(28)	(0~16.16)/ 2.80(28)	(4.97~62.88)/ 27.55(28)	(16.96~53.64)/ 37.78(28)	(3.68~61.32)/ 27.90(28)	(0~15.59)/ 3.95(28)
		第 4 期	(0~0.25)/ 0.03(29)	(0~10.30)/ 2.69(29)	(2.71~41.91)/ 19.43(29)	(15.29~56.98)/ 42.30(29)	(6.82~66.05)/ 32.88(29)	(0~15.92)/ 2.67(29)
		前三角洲—浅海	(0~62.61)/ 43.87(50)	(1.49~49.15)/ 41.17(50)	(1.89~39.55)/ 6.72(50)	(0~24.29)/ 2.53(50)	(0~27.06)/ 4.25(50)	(0~24.67)/ 1.46(50)
实验 2	三角洲平原—前缘	第 2 期	(0~0.33)/ 0.02(20)	(1.35~15.91)/ 6.42(20)	(21.57~49.92)/ 38.30(20)	(27.88~53.61)/ 44.30(20)	(3.55~33.26)/ 10.63(20)	(0~4.86)/ 0.34(20)
		第 3 期	(0~1.83)/ 0.14(21)	(1.19~43.31)/ 10.04(21)	(10.14~50.53)/ 28.49(21)	(8.51~49.72)/ 38.23(21)	(0.52~55.42)/ 21.06(21)	(0~11.72)/ 2.04(21)
		第 4 期	(0~0.45)/ 0.06(15)	(0~13.22)/ 3.88(15)	(2.29~42.56)/ 13.23(15)	(8.37~56.54)/ 33.87(15)	(6.80~67.39)/ 40.85(15)	(0~26.61)/ 8.10(15)
		前三角洲—浅海	(19.86~4.03)/ 50.68(15)	(25.31~56.91)/ 41.87(15)	(0.67~15.88)/ 4.52(15)	(0~5.79)/ 1.49(15)	(0~5.37)/ 1.35(15)	(0~0.67)/ 0.09(15)

注:(1.94~17.61)/6.49(33)表示(最小值~最大值)/平均值(样品数/个)

## 4 泥质沉积物分布规律

### 4.1 泥质沉积物分布特征

对沉积物粒度分布进行分析可得,自三角洲平原向前缘、浅海方向,粒度总体逐渐变细,河流一旦入海,河流与海水交汇能量抵消,水动力强度快速减弱,粒度将快速变细[图 5(a)—(d)]。实验 1(地形坡度较陡,水动力强度较强)条件下河道及砂坝更为发育,三角洲平原中部及侧缘常出现粒度中值的高值区[图 5(a)],这是由于在三角洲平原发育河道,河道附近常发育纵向砂坝与斜砂坝,在河口及侧缘常发育河口坝,河道及砂坝部位粒度均较粗,且泥质沉积物难以沉积[图 5(b)—(c)],较强的水动力条件同样导致深水区泥质沉积物具有非均一性的沉积特征[图 5(b)],而实验 2(地形坡度较缓,水动力强度较弱)条件下,河道及砂坝相对不发育,沉积物粒度及泥质含量变化趋势相对较为单一,呈单调递减趋势[图 5(d)—(e)],水动力较弱的条件使得三角洲前缘河道相对较宽,河道沉积物呈面状

展布较为明显,三角洲平原—前缘河漫、河道间等部位易于沉积泥质沉积物,前三角洲—浅海区泥质沉积规律相对更为单一[图 5(f)]。

实验中粒度中值与物源距离的相关性均较强,浅海区粒度明显减小,平原区河道或斜坡地区常富集砾石而粒度最大。坡度较陡时,河流水动力衰减更慢,使得沉积物可以搬运至更远处,因此实验 2 拟合公式的系数大于实验 1(图 6),即:坡度越大,沉积物粒度减小越慢,沉积物搬运距离越远,这与实验观察特征一致。

实验条件下沉积物粒度中值向远离物源方向呈快速减小趋势,这与研究区崖城组沉积物粒度变化趋势一致,崖城组 Y5 井为三角洲平原沉积,至 Y2、Y3 井的三角洲平原-前缘沉积向 Y6 井的浅海沉积方向,沉积物粒度中值呈明显减小趋势[图 7(a)]。研究区崖城组沉积时期为持续水进过程,垂向上沉积物粒度呈持续减小趋势[图 7(b)],实验模拟条件下,垂向上沉积物粒度也呈持续减小趋势[图 7(c)],与研究区沉积特征一致。

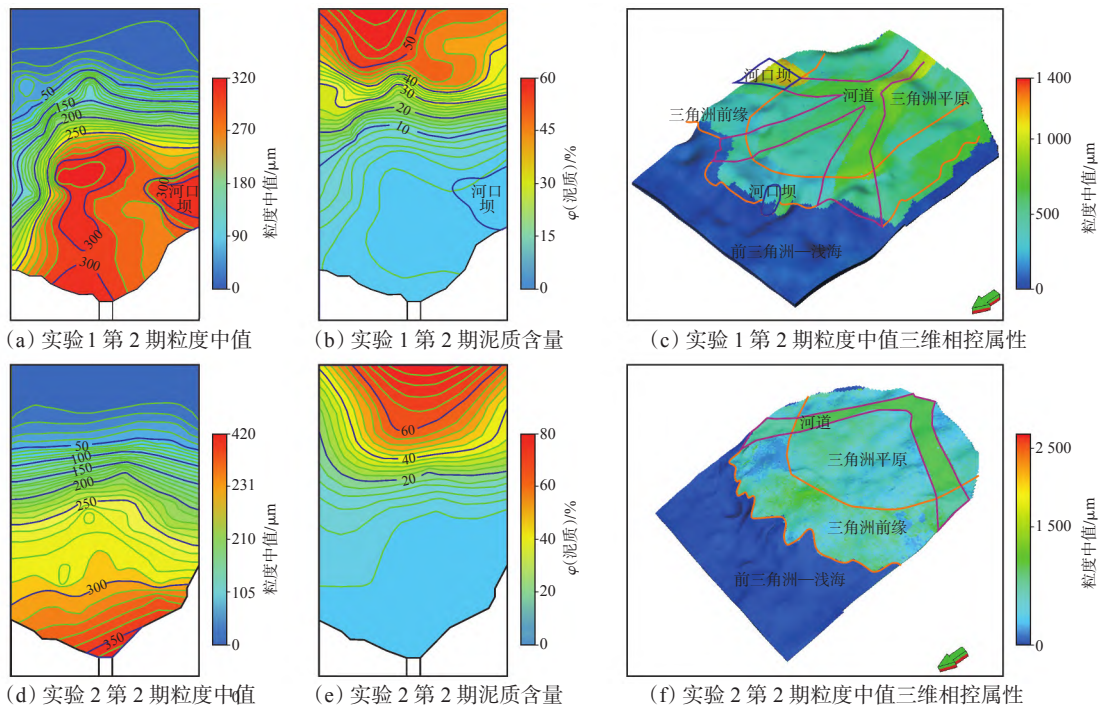


图5 沉积模拟实验粒度分布特征平面图

Fig. 5 Grain size distribution characteristics of sedimentary simulation experiment

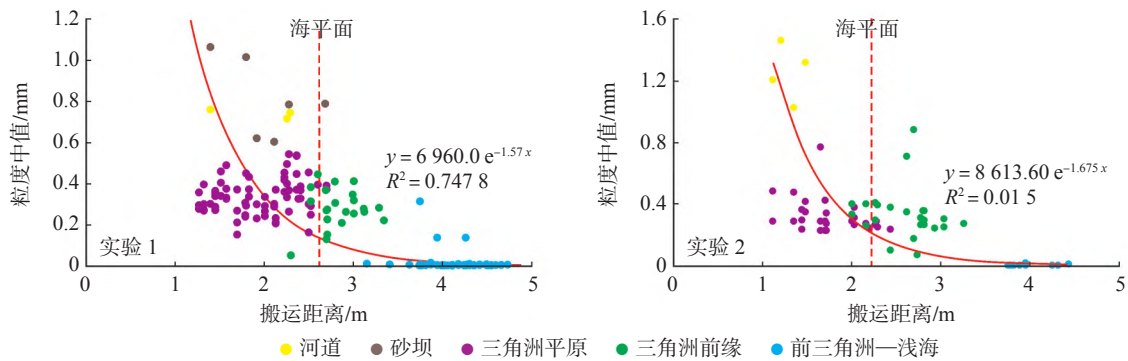


图6 实验中沉积物粒度中值随物源距离变化图

Fig. 6 Variation of sediment grain size median with provenance distance in the experiment

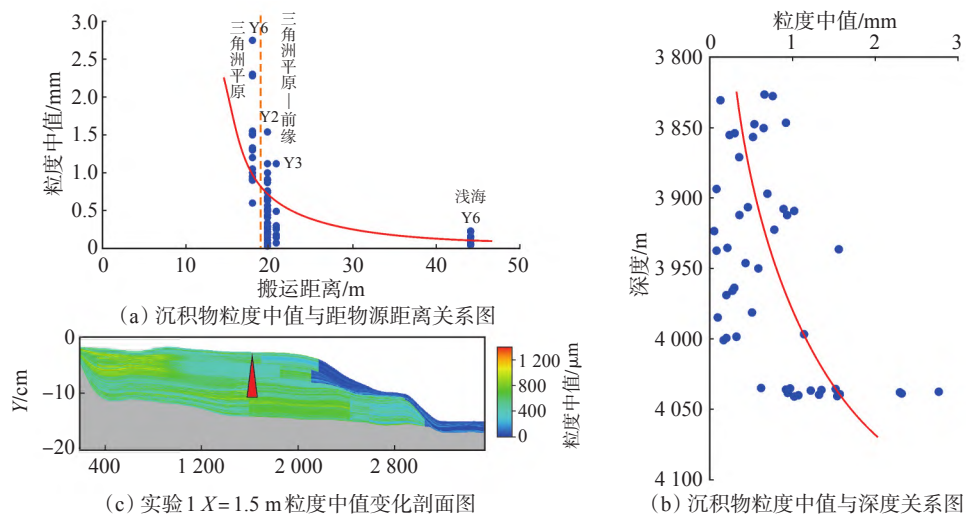


图7 崖南凹陷崖城组与沉积模拟实验粒度分布特征对比

Fig. 7 Comparison of grain size distribution characteristics between sedimentary simulation experiment and Yacheng Formation in Yanan Sag

### 4.2 泥质沉积物的搬运特征

泥质沉积物随河流搬运过程中多呈悬浮搬运,随着搬运距离的增大,河流水动力强度逐渐减小,悬浮总体的最大粒径也逐渐减小。因此,当悬浮总体最大粒径衰减为 0 时,即河流承载力消减殆尽,泥质沉积物无法被搬运而达到了最大搬运距离,因此可利用该关系确定泥质沉积物搬运的极限距离。沉积物悬浮总体与跳跃总体的界限值(即该水动力条件下可悬浮搬运的最大粒径)可利用粒度分析资料进行确定[图 8(a)],对 2 次实验及研究区崖城的沉积物悬浮总体最大界限进行统计,结果显示,沉积物悬浮总体最大界限与搬运距离呈明显的指数型递减趋势,相关性好。周迅等<sup>[28]</sup>以粒径 0.45 μm

作为悬浮态和溶解态区分界限,认为当粒径小于 0.45 μm 时为非颗粒态沉积物。因此,以 0.45 μm 确定泥质沉积物可搬运的最大距离,经计算实验 1(坡度 3°~5°)条件下泥质沉积物最大可搬运 8.39 m [图 8(b)],实验 2(坡度 1°~3°)条件下泥质沉积物最大可搬运 7.18 m [图 8(c)],崖城组(坡度约 0.1°)条件下泥质沉积物最大可搬运 63.94 km [图 8(d)]。将实验尺度按比例尺等比例放大 10 000 倍时,即坡度 3°~5° 时泥质沉积物最大可搬运 83.9 km,坡度 1°~3° 时泥质沉积物最大可搬运 71.8 km,坡度 0.1° 时泥质沉积物最大可搬运 63.94 km,随着坡度的减小,泥质沉积物的搬运距离逐渐减小,沉积范围也相应缩小。

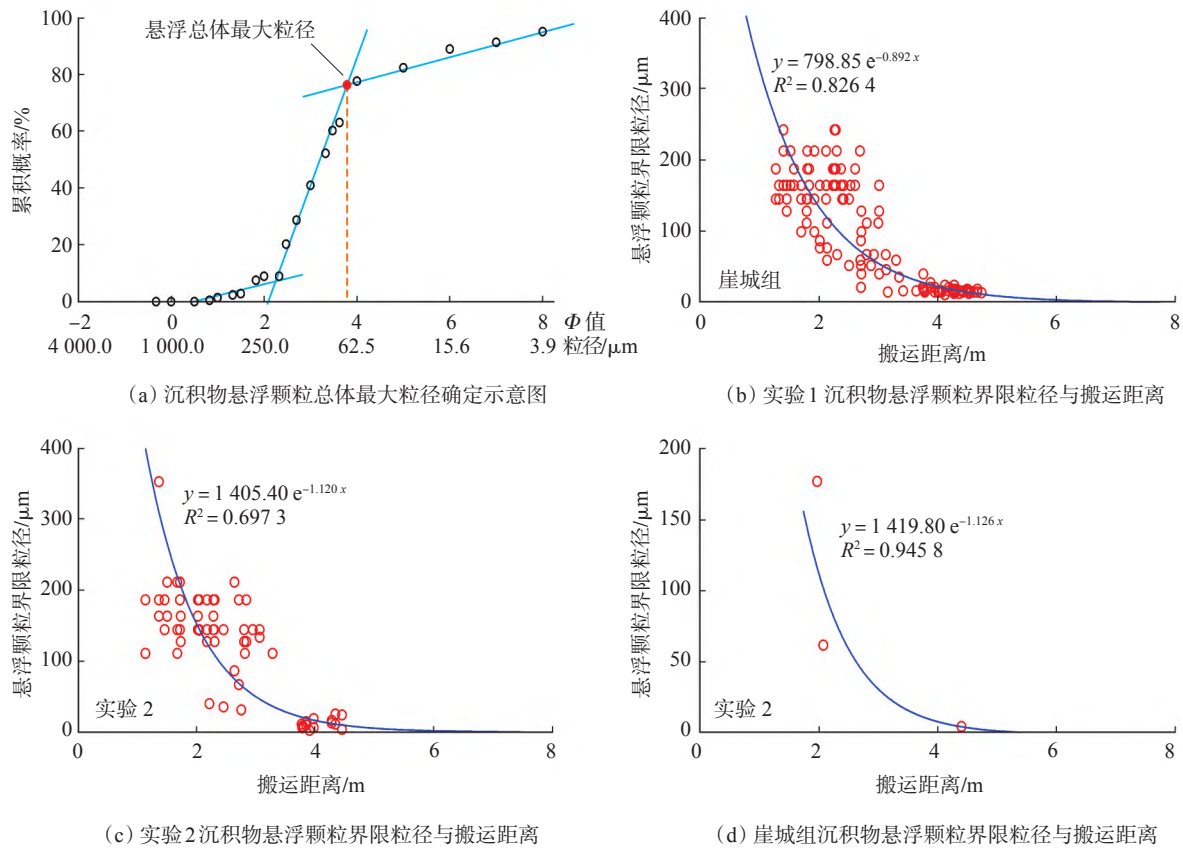


图 8 悬浮颗粒界限粒径的确定及其随搬运距离变化关系图

Fig. 8 Determination of boundary particle size of suspended particles and its relationship with transport distance

对实验 1 和实验 2 的沉积物沉积厚度统计发现,沉积厚度与搬运距离之间存在较好的相关性,三角洲前缘部位是沉积厚度最大的部位[图 9(a)—(b)],同时,沉积物泥质含量随搬运距离的增大呈指数型增长,在前三角洲—浅海区泥质含量突然增多,这是由于河流入海后与海水交锋,水动力突然降低所致[图 9(c)—(d)].河流入海后,水动力强

度骤降,导致泥质含量的快速增大,但同时也使得沉积物总量快速的持续减少,因此泥质沉积物的优势沉积区应为沉积厚度和泥质含量均相对较大部位,即前三角洲—浅海范围的近岸海域,远离海岸方向虽然泥质含量的百分比持续增大,但沉积物的总量在不断减少,从而使得泥质沉积物的总量依然呈减少趋势。



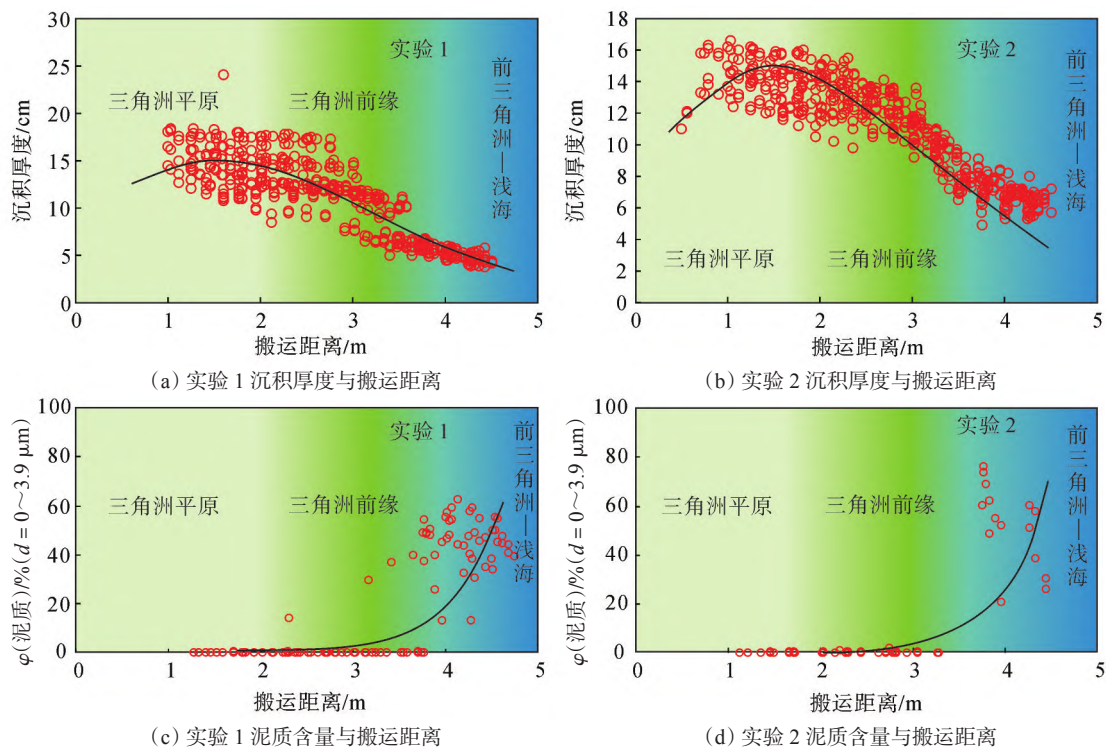


图9 沉积物沉积厚度及泥质含量与搬运距离关系图

Fig. 9 Relationships of transportation distance with sedimentary thickness and argillaceous content

## 5 结论

(1) 将沉积模拟实验应用于泥质沉积物分布规律的研究中,通过实验过程观察可得,泥质沉积物主要沉积于水动力较弱、地势较低的部位,如三角洲分流河道之间、早期冲沟与凹槽、河漫滩及三角洲前缘等。

(2) 实验分析结果显示,地形坡度较陡条件下河道及砂坝更为发育,这些部位粒度均较粗,且泥质沉积物难以沉积,深水区泥质沉积物具有非均一性的沉积特征,而地形坡度较缓条件下,沉积物粒度及泥质含量变化趋势相对较为单一。坡度越缓,水动力越弱,沉积物搬运距离越小,沉积范围越小。

(3) 利用粒度资料对泥质沉积物的最大搬运距离进行计算,实验1(坡度 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ )条件下泥质沉积物最大可搬运8.39 m,实验2(坡度 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ )条件下最大可搬运7.18 m,崖城组(坡度约 $0.1^{\circ}$ )条件下沉积物最大可搬运63.94 km,将实验条件按比例尺等比例放大与研究区崖城组计算结果对比可得,随着坡度的减小,泥质沉积物的搬运距离逐渐减小,沉积范围也相应缩小,但泥质沉积物沉积厚度更大,泥质沉积物沉积中心位于前三角洲—浅海过渡区,这也是陆源海相泥岩发育的位置,对陆缘盆地烃源岩的研究有重要指导意义。

## 参考文献:

- [1] GALY V, FRANCE-LANORD C, LARTIGES B. Loading and fate of particulate organic carbon from the Himalaya to the Ganga-Brahmaputra delta. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(7): 1767-1787.
- [2] TANOUE E, HANDA N. Differential sorption of organic matter by various sized sediment particles in recent sediment from the Bering Sea. *Journal of Oceanography*, 1979, 35(5): 199-208.
- [3] 傅强, 李璟, 邓秀琴, 等. 沉积事件对深水沉积过程的影响:以鄂尔多斯盆地华庆地区长6油层组为例. *岩性油气藏*, 2019, 31(1): 20-29.  
FU Q, LI J, DENG X Q, et al. Influence of sedimentary events on deep water sedimentation process: A case of Chang 6 reservoir in Huaqing area, Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(1): 20-29.
- [4] RAMASWAMY V, BIRGIT G, SHIRODKAR P V, et al. Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopic signatures in sediments from the Ayeyarwady (Irrawaddy) continental shelf, northern Andaman Sea. *Marine Chemistry*, 2008, 111(3/4): 137-150.
- [5] HU L M, SHI X F, BAI Y Z, et al. Recent organic carbon sequestration in the shelf sediments of the Bohai Sea and Yellow Sea, China. *Journal of Marine Systems*, 2016, 155: 50-58.
- [6] CHENU C, PLANTE A F. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: Revisiting the concept of the "primary organo-mineral complex". *European Journal of Soil Science*, 2010, 57(4): 596-607.
- [7] 孙书文. 渤海及邻近海域表面沉积物中木质素的分布特征及其陆源有机质示踪意义. 青岛:中国海洋大学, 2012.  
SUN S W. Distribution characteristics of lignin in surface sediments of Bohai Sea and its adjacent waters and its significance

- for tracing terrigenous organic matter. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [ 8 ] 王华新, 线薇薇. 长江口表层沉积物有机碳分布及其影响因素. 海洋科学, 2011, 35(5): 24-31.  
WANG H X, XIAN W W. Distribution of the total organic carbon of surface sediment and its influence factors in the Yangtze River estuary. Marine Sciences, 2011, 35(5): 24-31.
- [ 9 ] 张凌. 珠江口及近海沉积有机质的分布、来源及其早期成岩作用研究. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2006.  
ZHANG L. Distribution, source and early diagenesis of sedimentary organic matter in the Pearl River estuary and offshore. Guangzhou: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 2006.
- [ 10 ] 刘忠保, 赖志云. 辫状河—扇三角洲形成及演变的水槽实验. 大庆石油地质与开发, 1994, 13(2): 58-62.  
LIU Z B, LAI Z Y. A flume experiment on formation and evolution of braided stream-fan delta. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1994, 13(2): 58-62.
- [ 11 ] 王泽中, 汪崎生, 刘忠保. 含沙河流入湖后沙体形成、发展的水槽实验. 石油与天然气地质, 1991, 12(4): 426-438.  
WANG Z Z, WANG Q S, LIU Z B. Flume experiment on the formation and development of sand body after the sand bearing river flows into the lake. Oil & Gas Geology, 1991, 12(4): 426-438.
- [ 12 ] 魏康强, 张元福, 李媛, 等. 利用水槽实验对不同流速下三角洲发育区别的探究. 复杂油气藏, 2017, 10(3): 6-11.  
WEI K Q, ZHANG Y F, LI Y, et al. Study on difference of delta development under different flow velocities by flume experiment. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2017, 10(3): 6-11.
- [ 13 ] 吴时国, 袁圣强. 世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景. 天然气地球科学, 2005, 16(6): 693-699.  
WU S G, YUAN S Q. Advance of exploration and petroleum geological features of deep-water hydrocarbon in the world. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(6): 693-699.
- [ 14 ] 王振峰, 李绪深, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地深水油气成藏条件和勘探潜力. 中国海上油气, 2011, 23(1): 7-13.  
WANG Z F, LI X S, SUN Z P, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in the deep-water region, Qiongdongnan Basin. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(1): 7-13.
- [ 15 ] 武爱俊, 徐建永, 滕彬彬, 等. “动态物源”精细刻画方法与应用: 以琼东南盆地崖南凹陷为例. 岩性油气藏, 2017, 29(4): 55-63.  
WU A J, XU J Y, TENG B B, et al. Fine description method of dynamic provenance and its application: A case from Yanan Sag, Qiongdongnan Basin. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(4): 55-63.
- [ 16 ] 卢骏, 刘震, 张功成, 等. 南海北部小型海陆过渡相断陷地震相分析及沉积充填演化史研究: 以琼东南盆地崖南凹陷崖城组为例. 海洋地质前沿, 2011, 27(7): 13-22.  
LU J, LIU Z, ZHANG G C, et al. Seismic facies analysis and filling history reconstruction of small faulted depressions in northern South China Sea: A historical case on Yacheng Formation in Yanan Depression of the Qiongdongnan Basin. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(7): 13-22.
- [ 17 ] 黄合庭, 黄保家, 黄义文, 等. 南海西部深水大气田凝析油成因与油气成藏机制: 以琼东南盆地陵水 17-2 气田为例. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 380-388.  
HUANG H T, HUANG B J, HUANG Y W, et al. Condensate origin and hydrocarbon accumulation mechanism of the deepwater giant gas field in western South China Sea: A case study of Ling-shui 17-2 gas field in Qiongdongnan Basin, South China Sea. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 380-388.
- [ 18 ] 孔敏. 琼东南盆地油气运移动力特征分析. 武汉: 中国地质大学, 2010.  
KONG M. Characteristics of oil and gas migration in Qiongdongnan Basin. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [ 19 ] 毛雪莲, 朱继田, 姚哲, 等. 琼东南盆地深水区中央峡谷砂体成因与展布规律. 岩性油气藏, 2017, 29(6): 60-68.  
MAO X L, ZHU J T, YAO Z, et al. Sandbody genesis and distribution regularity of central canyon in deepwater area of Qiongdongnan Basin. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(6): 60-68.
- [ 20 ] 蔡佳. 琼东南盆地长昌凹陷新近系三亚组沉积相. 岩性油气藏, 2017, 29(5): 46-54.  
CAI J. Sedimentary facies of Neogene Sanya Formation in Changchang Sag, Qiongdongnan Basin. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(5): 46-54.
- [ 21 ] 邵磊, 李昂, 吴国璋, 等. 琼东南盆地沉积环境及物源演变特征. 石油学报, 2010, 31(4): 548-552.  
SHAO L, LIAO J, WU G X, et al. Evolution of sedimentary environment and provenance in Qiongdongnan Basin in the northern South China Sea. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 548-552.
- [ 22 ] 刘传联. 琼东南盆地渐新统烃源岩微观沉积特征与沉积环境. 石油学报, 2010, 31(4): 573-578.  
LIU C L. Sedimentary environment and micro-sediment characteristics of Oligocene source rocks in Qiongdongnan Basin. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 573-578.
- [ 23 ] 廖静. 琼东南盆地崖南凹陷有利勘探区研究. 内江科技, 2013, 34(5): 43-44.  
LIAO J. Study on favorable exploration area of Yanan Sag in Qiongdongnan Basin. Neijiang Technology, 2013, 34(5): 43-44.
- [ 24 ] 尚鲁宁, 吕大炜, 李增学, 等. 琼东南盆地崖南凹陷崖城组辫状河三角洲沉积特征及油气地质意义. 油气地质与采收率, 2013, 20(5): 4-9.  
SHANG L N, LYU D W, LI Z X, et al. Sedimentary characteristics and petroleum geological significance of braided river delta of Yacheng Formation in Yanan Sag, Qiongdongnan Basin. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(5): 4-9.
- [ 25 ] 李莹, 张功成, 吕大炜, 等. 琼东南盆地崖城组沉积特征及成煤环境. 煤田地质与勘探, 2011, 39(1): 1-5.  
LI Y, ZHANG G C, LYU D W, et al. Depositional characteristics and coal forming environment of Yacheng Formation, Qiongdongnan Basin. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(1): 1-5.
- [ 26 ] 杜同军. 琼东南盆地层序地层和深水区沉积充填特征. 青岛: 中国海洋大学, 2013.  
DU T J. Sequence stratigraphy and sedimentary filling characteristics of deep water area in Qiongdongnan Basin. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [ 27 ] 尚飞. 鄂尔多斯盆地盒 8 期沉积模拟实验研究. 荆州: 长江大学, 2012.  
SHANG F. Sedimentary simulation experiment of He 8 period in Ordos Basin. Jingzhou: Yangtze University, 2012.
- [ 28 ] 周迅, 刘林, 叶永红. 南通市沿江地区潜水稀土元素地球化学特征及其指示意义. 地质科技情报, 2018, 37(3): 210-218.  
ZHOU X, LIU L, YE Y H. Contents and distribution pattern of rare earth elements in phreatic water from Nantong area along the Yangtze River and their hydrochemical indication significance. Bulletin of Geological Science and Technology, 2018, 37(3): 210-218.

(编辑: 李霞魁)