

文章编号:1000-0550(2014)05-0921-09

沙三中亚期东营三角洲—滑塌浊积体系预测模型研究^①

陈世悦¹ 毕明威¹ 刘惠民² 高永进² 张鹏飞²

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 山东青岛 266555; 2. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院 山东东营 257000)

摘要 沙三段中亚段沉积时期,东营凹陷物源供给充足,三角洲—滑塌浊积体系极为发育。研究发现,滑塌浊积岩厚度 $h(m)$ 与三角洲前缘沉积特征(前缘厚度 $H(m)$ 、砂岩百分含量 $x(%)$ 、斜坡坡角 $a(^{\circ})$)以及浊积岩滑移距离 $s(m)$ 可以建立定量关系。通过控制变量的方法建立单因素关系,即滑移距离 $s(m)$ 与浊积岩厚度 $h(m)$ 呈负相关,且相关性高,作为主因素;砂体厚度 $H(m)$ 、砂岩百分含量 $x(%)$ 及斜坡坡角 $a(^{\circ})$ 与 $h(m)$ 呈正相关,作为子因素。利用灰关联分析法,计算各子因素相对于主因素的权重系数,确定灰关联系数,建立滑塌浊积岩厚度 $h(m)$ 的定量预测模型: $h=55.359Q^{1.5223}$, $Q=0.355s'+0.223x'+0.221H'+0.201a'$ (Q 为综合评价系数, s' 、 x' 、 H' 、 a' 分别表经过最大值标准化后的滑移距离、前缘砂体厚度、百分含量以及斜坡坡角数据)。

关键词 东营凹陷 滑塌浊积岩厚度 灰关联分析 定量预测模型

第一作者简介 陈世悦 男 1963 年出生 博士 教授 沉积学及岩相古地理学 E-mail: chenshiyue@vip.sina.com

中图分类号 TE121.3 **文献标识码** A

随着含油气盆地勘探程度地提高,各类隐蔽型油气藏逐渐成为主要的勘探目标。沙三段沉积时期,东营凹陷东营三角洲前缘浊积沉积形成的非构造圈闭油气资源丰富,是东营凹陷储量增长和勘探开发的重要类型^[1-4]。三角洲前缘滑塌浊积沉积受到构造活动、古地形特征等多种地质因素的控制^[5-10],砂体横向分布较稳定,但厚度变化大,目前还没有有效手段预测滑塌浊积砂体的厚度,加强厚度预测研究十分必要。

目前对砂体厚度的预测方法可以分为两种:一是通过沉积物的供给速率、湖盆底形及构造活动等因素对滑塌浊积体进行定性的预测^[11-13];二是通过对地球物理综合处理,实现砂体的识别及厚度的预测^[14-17],但该类方法很少考虑到前缘滑塌砂体的地质及成因特征的复杂性,加上地球物理参数的精度问题,因此很难对砂体厚度进行有效预测。笔者通过对东营凹陷沙三中亚期三角洲—滑塌浊积体系发育特征的研究,分析沉积体系内部地质关系,建立浊积砂体厚度预测模型,为定量预测三角洲前缘岩性圈闭提供一种新的思路及方法。

1 地质概况

东营凹陷是典型的中新生代断陷湖盆,形态上为北断南超、北陡南缓的箕状凹陷^[18]。凹陷东接青坨子凸起,南部超覆于鲁西隆起、广饶凸起,向西以平南断

层和高青断层为界,与惠民凹陷毗邻,北部以陈南断层为界,与陈家庄凸起相邻^[19-22];可以划分为利津洼陷、民丰洼陷、牛庄洼陷、博兴洼陷等次级洼陷^[23,24]。

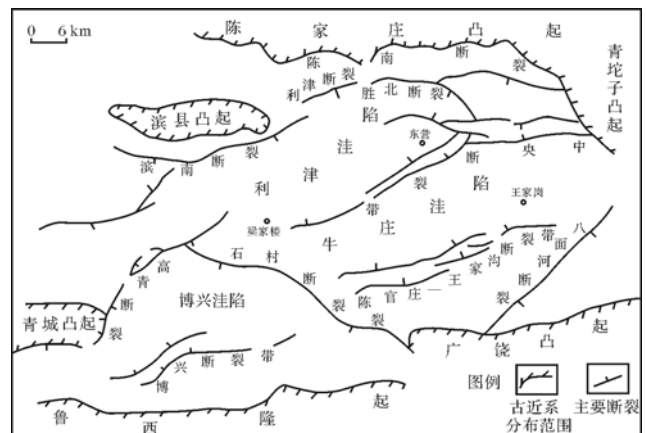


图1 东营凹陷构造区划图(据杨伟利等,2006)

Fig.1 The tectonic division of Dongying depression (according to Yang Weili, et al., 2006)

沙三段中亚段沉积时期,东营凹陷物源供给充足,东营三角洲沉积极其发育,自下而上可以划分为9个沉积期次(据胜利油田地质院)(图2)。随着三角洲不断向湖盆中央进积,导致沉积物在三角洲前缘斜坡处不断堆积,在自身重力、构造运动、水动力等多种因素的影响下,尚未完全固结的沉积物发生破裂、

^①胜利油田地质科学研究院合作项目“东营三角洲—浊积体系地质结构特征及预测模型研究”(编号:2008-2010)资助
收稿日期:2013-09-10;收修改稿日期:2013-12-12

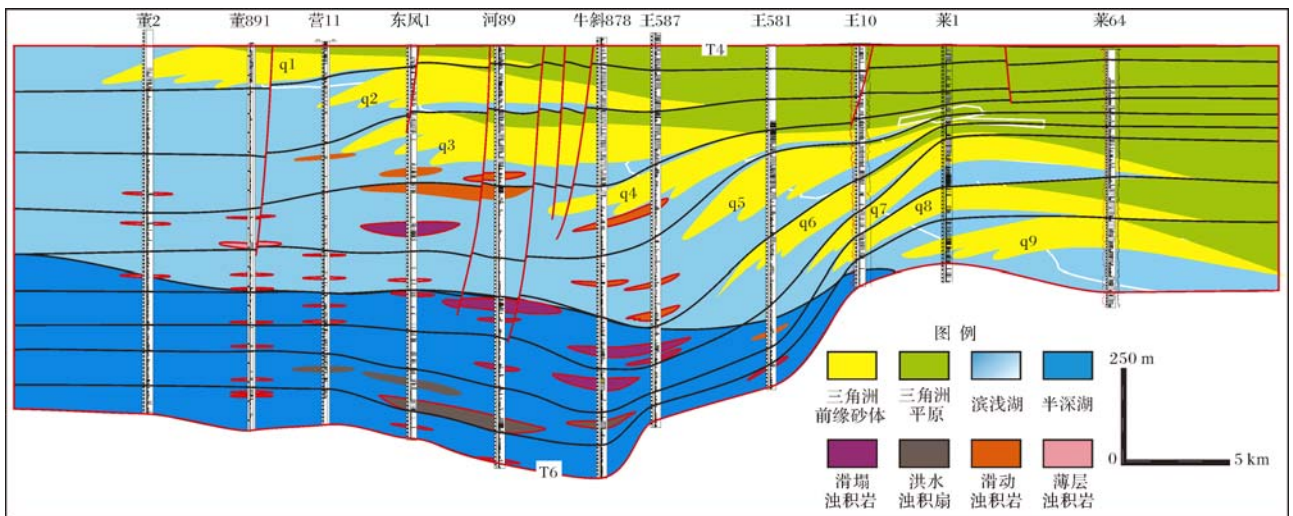


图 2 沙三中亚段东营三角洲东西向沉积相对比剖面

Fig.2 The east-west correlation of sedimentary facies of Dongying Delta in the middle Es³

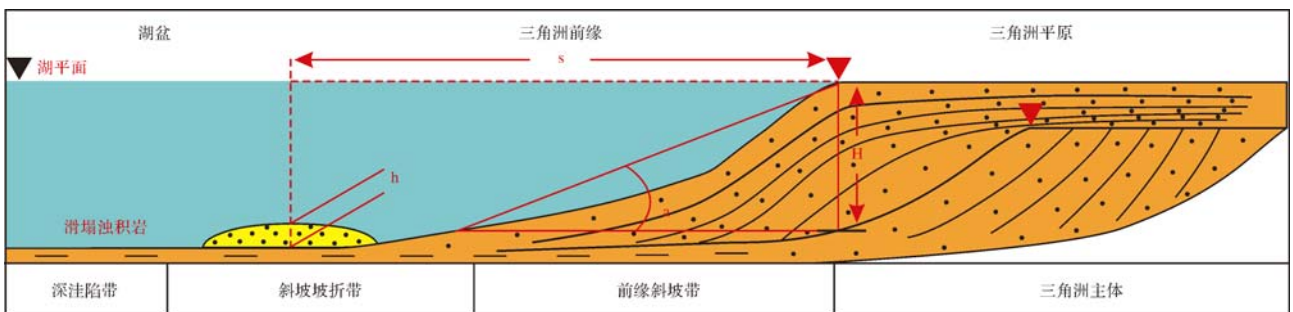


图 3 三角洲—滑塌浊积体系定量参数选定示意图

Fig.3 Schematic diagram of quantitative parameter selected for delta-fluxoturbidite depositional system

滑动等作用沿着斜坡下滑,沉积物在斜坡坡折带能量卸载形成滑塌浊积岩沉积^[25-29](图3)。

为了建立三角洲—滑塌浊积体系预测模型,设定了三条假设条件:①不考虑青坨子物源对东南物源和南部物源三角洲的影响;②不考虑构造活动、洼陷带可容空间大小等不可定量描述的因素的影响;③将浊积体细分为若干个独立的个体,假定每次选点都选取的是不同浊积体的最大厚度处(图3)。通过分析认为:可以通过建立三角洲前缘滑塌浊积岩厚度 $h(m)$ 与前缘地层厚度 $H(m)$ 、砂岩百分含量 $x(\%)$ 、浊积岩滑移距离 $s(m)$ 以及前缘斜坡坡角的大小 $a(^{\circ})$ 的定量关系,从而建立三角洲—滑塌浊积体系的预测模型^[30]。

2 东营三角洲—滑塌浊积体系预测模型研究

2.1 研究方法

本次研究以东营三角洲第四、五、六沉积期为

例,建立前缘滑塌浊积岩厚度的预测模型。对三角洲—前缘滑塌浊积体系地质模型的研究,是在单因素分析的基础上,利用灰关联分析法对前缘滑塌砂体的厚度进行定量预测。

(1) 利用控制变量的方法建立单因素关系。例如,寻找滑塌浊积体厚度 $h(m)$ 与滑移距离 $s(m)$ 的单因素关系,就要在前缘厚度 $H(m)$ 、砂岩百分含量 $x(\%)$ 以及斜坡坡角 $a(^{\circ})$ 为定值的情况下进行研究,消除它们对 $h-s$ 关系的影响。

(2) 得到单因素关系后(如 $h-s$ 、 $h-H$ 、 $h-x$ 、 $h-a$ 等),利用灰关联分析法对前缘滑塌砂体厚度 $h(m)$ 进行定量预测,建立预测模型。

2.2 灰关联分析法

灰关联分析法,即建立系统中各因素的主次关系,找出影响各项评价指标的重要因素,它包括主因素与子因素的选定、关联系数、关联度及权系数的计算等^[31]。

(1) 主因素与子因素的选定

利用单因素分析的方法,确定决定浊积体厚度大小的主要参数作为主因素,其余参数作为子因素处理。

(2) 确定单项指标定量化标准

本文采用极大值标准化的方法,对数据进行标准化处理。即以单项参数除以同类参数的极大值,使参数归一在 0~1 之间。对于其值愈大,反映浊积体厚度越大的参数,直接除以本参数的最大值;对于其值越小,反映厚度越大的参数,用本参数的极大值减去单项参数之差再除以最大值;对于取中间值时,反映厚度越大的参数,用单项参数减去中间值并求取绝对值,再用最大绝对值减去各项参数算得的绝对值之差再除以最大绝对值^[32]。

(3) 确定各项指标的权重,计算灰关联系数

定量标准化后的数据利用下列公式(公式①~④),计算出各子因素与主因素之间的灰关联系数为:

$$\xi_{i,0} = \frac{\Delta_{min} + \rho\Delta_{max}}{\Delta_i(t,0) + \rho\Delta_{max}}, i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$$\Delta_i(i,0) = |X_i^{(1)}(i) - X_i^{(2)}(0)| \quad (2)$$

$$\Delta_{max} = \max_i \max_i |X_i^{(1)}(i) - X_i^{(2)}(0)| \quad (3)$$

$$\Delta_{min} = \min_i \min_i |X_i^{(1)}(i) - X_i^{(2)}(0)| \quad (4)$$

$\rho \in [0.1, 1]$ 称为分辨系数,其作用在于提高灰关联系数之间的差异显著性,一般取 0.5。

$$r_{i,0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_{i,0} \quad (5)$$

$$\alpha_i = r_i / \sum_{i=1}^n r_{i,0} \quad (6)$$

$r_{i,0}$ 为子序列 i 与母序列 0 的灰关联度(公式(5)),经过归一化处理(公式(6)),所得到的结果即为各指标相对于浊积体厚度预测时的权重系数。

2.3 控制变量法建立单因素关系

按照沙三段中亚期东营三角洲的主推进方向,选取地质剖面(以第六期次为例,如图 4 所示),对三角洲及其前缘浊积体发育关系进行参数选取及定量研究(表 1)。

2.3.1 h-s 单因素关系

由于每条剖面三角洲前缘的 H 、 x 和 a 是定值,可以在单剖面的条件下,按照控制变量的方法,建立 h - s 的定量单因素关系。以第六期 6-2 剖面为例,得出该剖面的 h 与 s 的单因素关系(图 5)。

按照同样的方法建立其他剖面的 h - s 关系,可以得出相同的规律,即浊积体厚度与滑移距离之间呈线

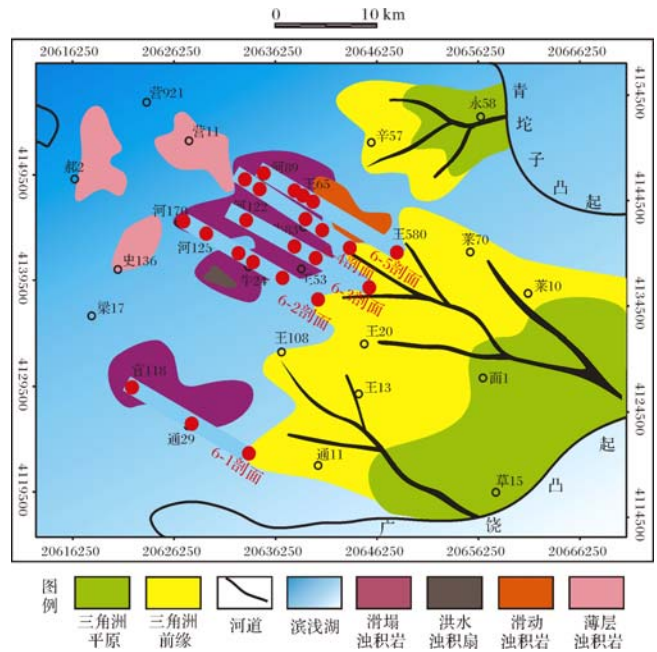


图 4 第六期次三角洲—滑塌浊积体系定量研究剖面位置图

Fig.4 The quantitative research profile location of delta-fluxoturbidite depositional system in the sixth stage

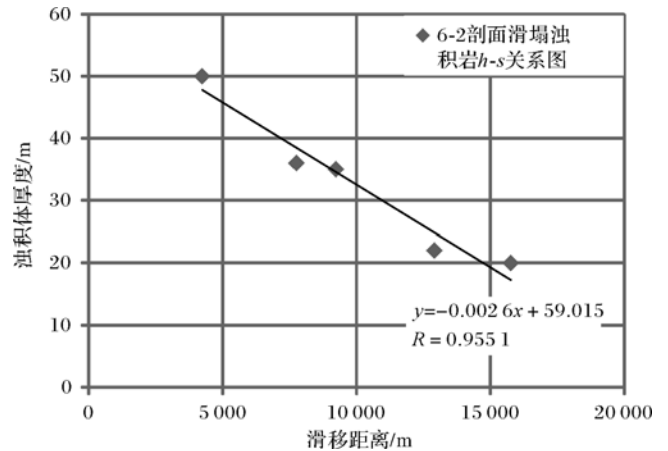


图 5 第六期次 6-2 剖面滑塌浊积体厚度 h 与滑移距离 s 单因素分析图

Fig.5 The chart of single factor analysis between fluxoturbidite thickness h and turbidite slip distance s of profile 6-2 in the sixth stage

性负相关关系,并且相关关系好。

2.3.2 h-H、h-x、h-a 单因素关系

在三角洲前缘相同位置前缘厚度 H 、砂岩百分含量 x 以及斜坡坡角 a 是一一对应的,讨论 h - H 、 h - x 、 h - a 单因素关系时,可以将 H 、 x 、 a 作为一个整体来考虑,而忽略 H 、 x 、 a 之间的相互影响。建立 h - H 、 h - x 、 h -

表1 第四、五、六期次三角洲—滑塌浊积体系定量参数数据表

Table 1 Data of quantitative parameter for delta-fluxoturbidite system from the fourth to sixth stage

剖面名称	期次	前缘厚度 H/m	前缘砂岩百分含量 $x/\%$	坡角 $a/^\circ$	滑移距离 s/m	浊积体厚度 h/m	浊积体位置
6-1 剖面	第六沉积期次	32	21.22	2.017	10 420.412	14	(6-1-1)
			21.22	2.017	12 093.448	10	(6-1-2)
6-2 剖面		95	45.16	1.985	4 232.476	50	(6-2-1)
			45.16	1.985	7 752.054	36	(6-2-2)
			45.16	1.985	9 232.854	35	(6-2-3)
			45.16	1.985	12 912.122	22	(6-2-4)
			45.16	1.985	15 760.706	20	(6-2-5)
6-3 剖面		85	40	1.837	4 514.339	45	(6-3-1)
			40	1.837	8 542.348	25	(6-3-2)
			40	1.837	13 900.826	17	(6-3-3)
6-4 剖面		140	66.33	2.261	3 433.239	45	(6-4-1)
			66.33	2.261	5 639.069	54	(6-4-2)
			66.33	2.261	11 218.125	32	(6-4-3)
			66.33	2.261	12827.857	20	(6-4-4)
6-5 剖面		80	40.71	2.684	10 442.429	35	(6-5-1)
			40.71	2.684	10 795.403	30	(6-5-2)
			40.71	2.684	11 887.704	26	(6-5-3)
			40.71	2.684	15 305.785	12	(6-5-4)
5-1 剖面	第五沉积期次	102	58.54	2.434	13 965.442	20	(5-1-1)
			58.54	2.434	15 168.607	18	(5-1-2)
			58.54	2.434	19 094.262	12	(5-1-3)
5-2 剖面		112	61.23	2.62	8 801.325	37	(5-2-1)
			61.23	2.62	9 999.906	30	(5-2-2)
			61.23	2.62	11 518.188	23	(5-2-3)
			61.23	2.62	13 329.01	20	(5-2-4)
5-3 剖面		110	59	2.731	10 064.576	27	(5-3-1)
			59	2.731	12 913.763	22	(5-3-2)
			59	2.731	15 649.433	20	(5-3-3)
5-4 剖面		78	50.3	2.914	14 141.644	18	(5-4-1)
			50.3	2.914	15 854.568	16	(5-4-2)
			50.3	2.914	18 419.417	10	(5-4-3)
4-1 剖面	第四沉积期次	105	54	3.138	4 448.135	40	(4-1-1)
			54	3.138	7 029.417	30	(4-1-2)
4-2 剖面		138	83.7	3.235	5 192.124	41	(4-2-1)
			83.7	3.235	10 673.244	31	(4-2-2)
			83.7	3.235	13 523.814	26	(4-2-3)
			83.7	3.235	15 158.613	21	(4-2-4)
4-3 剖面		112	65.1	3.235	7 122.876	36	(4-3-1)
			65.1	3.235	12 538.6	25	(4-3-2)

表2 $s=10\ 795\ m$ 时第六期三角洲—滑塌浊积体系定量参数数据表Table 2 Data of quantitative parameter for delta-fluxoturbidite system in the sixth stage, $s=10\ 795\ m$

剖面名称	期次	前缘厚度 H/m	前缘砂岩百分含量 $x/\%$	坡角 $a/^\circ$	滑移距离 s/m	浊积体厚度 h/m	浊积体位置
6-1 剖面	第六沉积期次	32	21.22	2.017	10 795	12.610	等距离点 1
6-2 剖面		95	49.16	1.985		31.642	等距离点 2
6-3 剖面		65	40.00	1.837		22.946	等距离点 3
6-4 剖面		140	66.33	2.261		30.773	等距离点 4
6-5 剖面		80	45.71	2.684		30.000	(6-5-2)

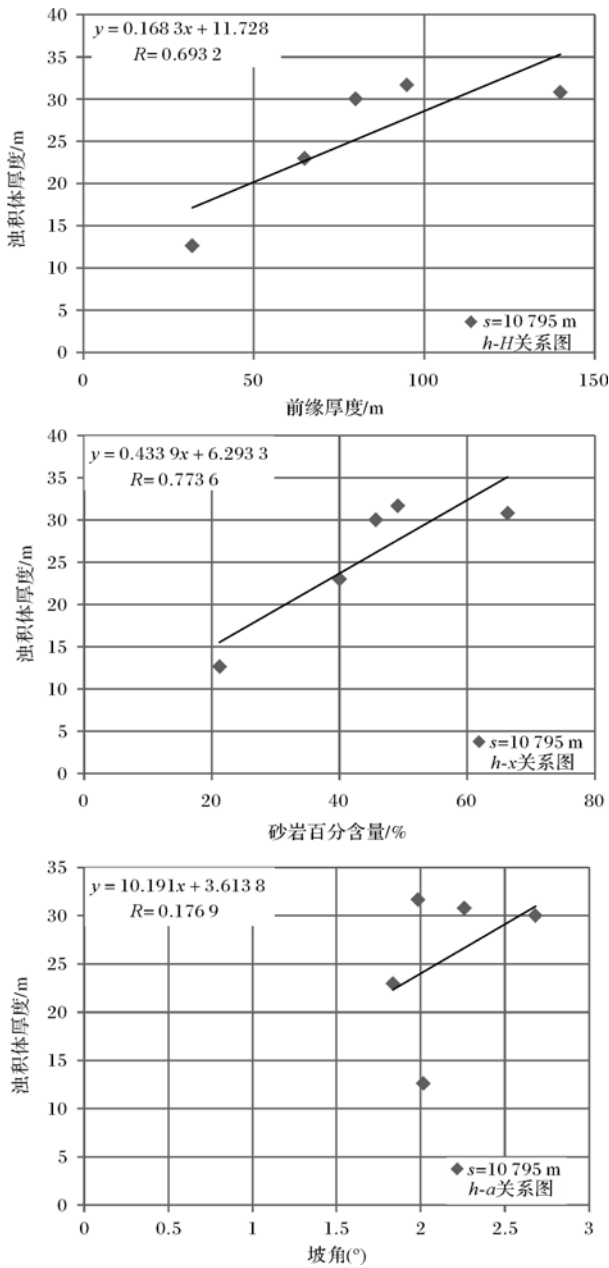


图 6 $s = 10795$ m 时第六期次滑塌浊积体厚度 h 与前缘厚度 H 、砂岩百分含量 x 、斜坡坡角 a 单因素分析图
 Fig.6 The chart of single factor analysis between fluxoturbidite thickness h and delta front thickness H , sandstone percentage content x , slope angle a in the sixth stage

a 的单因素关系,即寻找滑移距离 s 相等的滑塌浊积岩进行研究。

为了寻找相同滑移距离(s)下的 h - H 关系,根据各剖面各期次得到的 h - s 的线性关系式,插入一些“等距离的数据点”。例如建立 $s = 10795$ m 时滑塌浊积岩 h - H 、 h - x 、 h - a 的单因素关系(表 2)。

$s = 10795$ m 等距离下 h - H 、 h - x 、 h - a 关系为(图 6)：

$$h = 0.1683H + 11.728, R^2 = 0.6932$$

$$h = 0.4339x + 6.2933, R^2 = 0.7736$$

$$h = 10.191x + 3.6138, R^2 = 0.1769$$

利用同样的研究方法,对其它剖面进行 h - H 、 h - x 、 h - a 单因素分析。

研究发现,滑塌浊积体厚度 h (m) 与滑移距离 s (m) 呈正相关,与前缘厚度 H (m)、前缘砂岩百分含量 x (m)、前缘斜坡坡角 a (°) 呈负相关,且 h (m) 与 s (m) 相关关系最好,因此本文将滑移距离 s (m) 作为控制浊积体厚度 h (m) 的主因素,其他参数作为子因素来处理。

2.4 灰关联分析法建立浊积体预测模型

通过极大值标准化的方法,对所选的参数数据进行标准化处理(表 3)。以滑移距离 s (m) 做为主因素,进行灰关联分析,最终得到 s (m)、 x (%)、 H (m) 及 a (°) 的灰关联度分别为:1、0.628、0.623、0.563;经过归一化处理后得到各参数对应的权重系数分别为:0.355、0.221、0.223、0.201。

最终得到四、五、六沉积期次三角洲前缘滑塌浊积岩厚度预测模型(图 7)：

$$h = 55.359Q^{1.5223}, R^2 = 0.761$$

$$Q = 0.355s' + 0.223x' + 0.221H' + 0.201a'$$

Q 为综合评价系数, s' 、 H' 、 x' 、 a' 分别代表经过极大值标准化后的滑移距离、前缘砂体厚度、百分含量以及斜坡坡角数据。

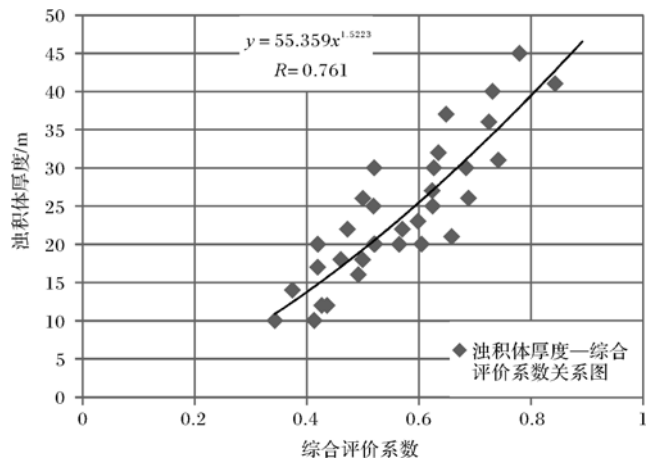


图 7 第四、五、六期次东营三角洲前缘滑塌浊积岩厚度预测模型

Fig.7 Prediction model for fluxoturbidite thickness of Dongying delta front from 4 to 6 stage

通过对数学模型 h - s' - H' - x' - a' 误差验证发现,预测厚度与实测厚度之间满足: $|h' - h|/h < 35\%$, $|h' - h|/h$ 均值等于 0.15 预测结果较为准确。

表3 第四、五、六期次三角洲—滑塌浊积体系预测模型灰关联分析成果表

Table 3 Gray relational analysis result of prediction model for delta-fluxoturbidite system from 4 to 6 stage

剖面名称	期次	s'	H'	x'	a'	h/m	h'/m	$[h-h']/h$
6-1 剖面	第六沉积期次	0.454	0.200	0.238	0.576	14	12.395	0.115
		0.367	0.200	0.238	0.576	10	10.861	0.086
6-2 剖面		0.778	0.594	0.506	0.566	50	27.675	0.447
		0.594	0.594	0.506	0.566	36	23.447	0.349
		0.516	0.594	0.506	0.566	35	21.741	0.379
		0.324	0.594	0.506	0.566	22	17.699	0.196
6-3 剖面		0.175	0.594	0.506	0.566	20	14.771	0.261
		0.764	0.531	0.448	0.524	45	25.034	0.444
		0.553	0.531	0.448	0.524	25	20.389	0.184
6-4 剖面		0.272	0.531	0.448	0.524	17	14.738	0.133
		0.820	0.875	0.743	0.645	45	37.916	0.157
		0.705	0.875	0.743	0.645	54	34.923	0.353
6-5 剖面		0.412	0.875	0.743	0.645	32	27.740	0.133
		0.328	0.875	0.743	0.645	20	25.775	0.289
		0.453	0.500	0.456	0.766	35	20.877	0.404
		0.435	0.500	0.456	0.766	30	20.483	0.317
5-1 剖面	第五沉积期次	0.377	0.500	0.456	0.766	26	19.278	0.259
		0.269	0.638	0.656	0.695	12	15.676	0.306
		0.206	0.638	0.656	0.695	20	20.581	0.029
5-2 剖面		0.000	0.638	0.656	0.695	18	19.253	0.070
		0.539	0.700	0.686	0.748	12	15.140	0.262
		0.476	0.700	0.686	0.748	37	28.684	0.225
		0.397	0.700	0.686	0.748	30	27.198	0.093
5-3 剖面		0.302	0.700	0.686	0.748	23	25.356	0.102
		0.473	0.688	0.661	0.779	20	23.218	0.161
		0.324	0.688	0.661	0.779	27	26.990	0.000
5-4 剖面		0.180	0.688	0.661	0.779	22	23.579	0.072
		0.259	0.488	0.563	0.832	20	20.456	0.023
		0.170	0.488	0.563	0.832	16	18.839	0.177
4-1 剖面	第四沉积期次	0.035	0.488	0.563	0.832	18	17.016	0.055
		0.767	0.656	0.605	0.896	40	34.443	0.139
4-2 剖面		0.632	0.656	0.605	0.896	30	31.066	0.036
		0.728	0.863	0.937	0.923	41	42.736	0.042
		0.441	0.863	0.937	0.923	31	35.131	0.133
		0.292	0.863	0.937	0.923	26	31.382	0.207
4-5 剖面		0.206	0.863	0.937	0.923	21	29.298	0.395
		0.627	0.700	0.729	0.923	36	33.959	0.057
		0.343	0.700	0.729	0.923	25	27.050	0.082
灰关联度		1	0.623	0.629	0.563			
权重系数		0.355	0.221	0.223	0.201			

表4 第七期次三角洲前缘滑塌浊积岩厚度预测模型验证数值表

Table 4 Numerical table of prediction model for fluxoturbidite thickness of delta front in the seventh stage

剖面名称	期次	前缘厚度	前缘砂岩百分含量	坡 a°	滑移距离	浊积体厚度	浊积体位置	预测厚度	$(h'-h)/h$
		H/m	$x/\%$		s/m	h/m		h'/m	
7-1 剖面	第七沉积期次	29.000	37.500	1.626	10 047.077	26.000	(7-1-1)	19.289	0.150
7-2 剖面		72.000	48.571	1.715	4 294.390	47.000	(7-2-1)	32.167	0.120
		72.000	48.571	1.715	6 089.562	40.000	(7-2-2)	29.704	0.039
		72.000	48.571	1.715	13 169.511	24.000	(7-2-3)	19.990	-0.152
7-3 剖面		80.000	39.250	1.620	13 820.341	17.500	(7-3-1)	18.673	-0.304
7-4 剖面		75.000	38.667	1.676	8 061.429	35.000	(7-4-1)	25.602	0.069
		75.000	38.667	1.676	12 082.824	22.000	(7-4-2)	20.212	-0.212
		75.000	38.667	1.676	15 306.137	16.500	(7-4-3)	15.891	-0.343
7-5 剖面		89.000	48.889	1.731	11 164.220	32.000	(7-5-1)	24.156	-0.047
		89.000	48.889	1.731	13 960.620	23.000	(7-5-2)	20.283	-0.274
$ h'-h /h$ 均值									0.171

3 预测模型的验证

利用预测模型 ($h = 55.359Q^{1.522^3}$, $Q = 0.355s' + 0.223x' + 0.221H' + 0.201a'$) 对第七沉积期次三角洲—滑塌浊积体系进行验证(图8),可以发现: $|h' - h|/h$ 为 0.039~0.343, $|h' - h|/h$ 均值等于 0.171, 滑塌浊积岩的预测厚度与实测厚度误差较小, 预测模型在第七期次具有较高的预测精度(表4)。因此,通过对东营三角洲—浊积体系建立的滑塌浊积岩预测模型,具备推广的潜力。

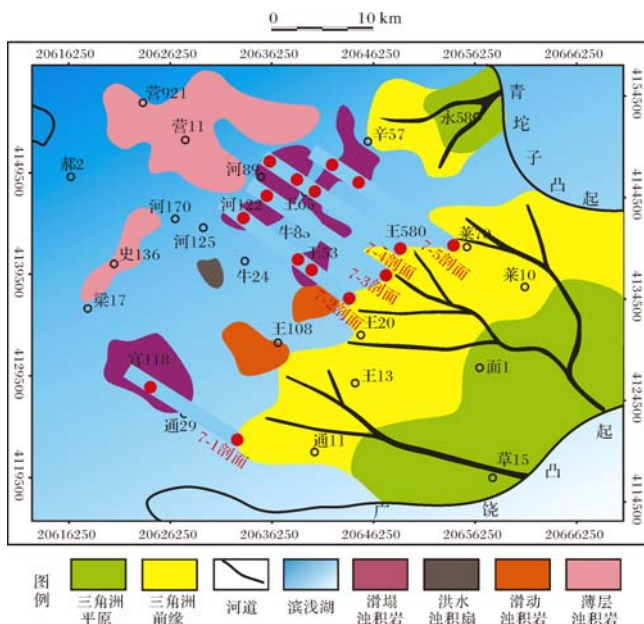


图8 第七期次三角洲—滑塌浊积体系定量研究剖面位置图

Fig.8 The quantitative research profile location of delta-fluxoturbidite depositional system in the seventh stage

4 小结

本文在单因素分析的基础上,利用灰关联分析法建立三角洲—滑塌浊积体系预测模型:

(1) 滑移距离 $s(m)$ 与浊积体厚度 $h(m)$ 呈负相关关系,且相关关系好,作为主因素;

(2) 砂体厚度 $H(m)$ 、砂岩百分含量 $x(\%)$ 及斜坡坡角 $a(^{\circ})$ 与 $h(m)$ 呈正相关关系,作为子因素;

(3) 通过计算各子因素相对于主因素的权重系数,确定灰关联系数,建立滑塌浊积岩厚度 $h(m)$ 的定量预测模型: $h = 55.359Q^{1.522^3}$, $Q = 0.355s' + 0.223x' + 0.221H' + 0.201a'$ (Q 为综合评价系数, s' 、 x' 、 H' 、 a' 分别表经过最大值标准化后的滑移距离、前缘砂体厚度、百分含量以及斜坡坡角数据)。

参考文献 (References)

- 隋淑玲,谭俊敏. 东营凹陷低位三角洲砂体隐蔽油气藏研究[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(2): 25-29 [Sui Shuling, Tan Junmin. Study on the subtle oil gas reservoir of low stand system tract delta sandstone in Dongying sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(2): 25-29]
- 朱德艳. 东营凹陷古近系岩性圈闭分布及成藏条件[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(3): 32-35 [Zhu Deyan. Palaeogene lithologic traps distribution and hydrocarbon accumulation conditions in Dongying depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(3): 32-35]
- 邱桂强,王居峰,张昕,等. 东营三角洲沙河街组三段中亚段地层格架初步研究及油气勘探意义[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 569-574 [Qiu Guiqiang, Wang Jufeng, Zhang Xin, et al. Preliminary study on stratigraphic architecture of Middle-Sha3n Dongying delta and its significance to hydrocarbon exploration[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 569-574]
- 王金铎,韩文功,于建国,等. 东营凹陷沙三段浊积岩体系及其油气勘探意义[J]. 石油学报, 2003, 24(6): 24-29 [Wang Jinduo, Han Wengong, Yu Jianguo, et al. Turbidity system in the third section of Shahejie Formation of Dongying sag and its implications on petroleum prospecting[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(6): 24-29]
- Bai Guoping, Zhang Shanwen. Depositional patterns and Oil/Gas accumulation features of Sha-3 Member turbidites in Dongying depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Science, 2004, 1(2): 105-110
- Stow D A V, Mayall M. Thematic set on deepwater sedimentary systems: new models for the 21st century[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2): 125-135
- 高永进,邱桂强,陈冬霞,等. 牛庄洼陷岩性油藏含油气性及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 284-287 [Gao Yongjin, Qiu Guiqiang, Chen Dongxia, et al. Oil/gas shows in lithologic reservoirs in Niuzhuang sag and their main controlling factors[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(3): 284-287]
- 赵密福,信荃麟,刘泽容. 惠民凹陷临南洼陷滑塌浊积岩分布规律及其控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(5): 14-17 [Zhao Mifu, Xin Quanlin, Liu Zerong. Distribution rule and its controlling factors of slump turbidite of Linnan subsag in Huimin sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(5): 14-17]
- 张世懋,丁晓琪. 鄂尔多斯盆地延长组浊积岩特征及其影响因素[J]. 测井技术, 2011, 35(6): 594-598 [Zhang Shimao, Ding Xiaoci. Characteristics and controlling factors of turbidites in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(6): 594-598]
- 王志坤,钟建华,艾合买提江·阿布都热合曼,等. 东营河 125 断层几何学特征及其对浊积扇和油藏的控制作用[J]. 地球学报, 2008, 29(1): 95-102 [Wang Zhikun, Zhong Jianhua, Ahmatjan · Abdurahman, et al. Geometric characteristics of the He-125 Fault and its control over sediment and reservoir distribution, Dongying[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(1): 95-102]
- 陈永红. 惠民凹陷沙三段三角洲前缘滑塌浊积体发育规律与油气

- 聚集关系[D]. 北京:中国科学院研究生院,2006[Chen Yonghong. The developing rule of delta-forward creeping turbidite sandbody and its oil-gas accumulation relationship of Sha 2 Member in Huimin depression[D]. Beijing: School of the Chinese Academy of Sciences, 2006]
- 12 封从军,鲍志东,张吉辉,等. 扶余油田中区泉四段基准面旋回划分及对单砂体的控制[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2012,42(2):62-69[Feng Congjun, Bao Zhidong, Zhang Jihui, *et al.* Dividing of base-level cycle and its controlling on single sandbody in the Fourth Member of Quantou Formation in Fuyu oilfield[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(2): 62-69]
 - 13 崔龙涛,冯栋,秦雁群,等. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长7古地貌与砂体分布特征[J]. 岩性油气藏,2013,25(5):65-69[Cui Longtao, Feng Dong, Qin Yanqun, *et al.* Palaeogeomorphology reconstruction and sandbody distribution of Chang 7 reservoir in Zhenbei area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(5): 65-69]
 - 14 穆立华,彭仕宓,尹志军,等. 井间砂体定量预测的泛克里格法[J]. 石油勘探与开发,2004,31(4):73-75[Mu Lihua, Peng Shimi, Yin Zhijun, *et al.* Universal Kriging method for quantitative sandstone prediction between wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(4): 73-75]
 - 15 袁书坤,王英民,卢双舫,等. 陈家洼陷沙三段砂体沉积及其与油气的关系[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(6):15-38[Yuan Shukun, Wang Yingmin, Lu Shuangfang, *et al.* Sedimentary characteristics and their relation to petroleum for the sandbodies in Sha No.3 Member of Chenjia sag[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(6): 15-38]
 - 16 Sun Luping, Zheng Xiaodong, Shou Hao, *et al.* Quantitative prediction of channel sandbodies based on seismic peak attributes in the frequency domain and its application[J]. Applied Geophysics, 2010, 7(1): 10-17
 - 17 王家华,夏吉庄. 三维地震约束多点建模降低井间砂体预测的不确定性[J]. 沉积学报,2013,31(5):878-888[Wang Jiahua, Xia Jizhuang. Multi-point statistical modeling constrained by 3D seismic data reducing uncertainty of sandbody prediction[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 878-888]
 - 18 潘继平,金之钧. 中国油气资源潜力及勘探战略[J]. 石油学报,2004,25(2):1-6[Pan Jiping, Jin Zhijun. Potentials of petroleum resources and exploration strategy in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(2): 1-6]
 - 19 叶兴树,王伟锋,戴俊生,等. 东营凹陷沙三—东营期断裂活动特征[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(4):7-11[Ye Xingshu, Wang Weifeng, Dai Junsheng, *et al.* Characteristics of fault activities of Sha-3 member and Dongying periods in Dongying depression[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(4): 7-11]
 - 20 孔凡仙. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体的勘探[J]. 石油地球物理勘探,2000,35(3):669-676[Kong Fanxian. Prospecting for sand-gravel body in northern steep slope of Dongying depression[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(3): 669-676]
 - 21 武法东,陈建渝,刘从印,等. 东营凹陷第三纪层序地层格架及沉积体系类型[J]. 现代地质,1998,12(4):559-566[Wu Fadong, Chen Jianyu, Liu Congyin, *et al.* Tertiary sequence stratigraphic framework and sedimentary system types in Dongying depression[J]. Geoscience, 1998, 12(4): 559-566]
 - 22 王志刚. 东营凹陷北部陡坡构造岩相带油气成藏模式[J]. 石油勘探与开发,2003,30(4):10-12[Wang Zhigang. Pooling model of steep slope structure and lithological zone in north Dongying sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(4): 10-12]
 - 23 李丕龙,翟庆龙,荣启宏,等. 东营凹陷中央背斜带油气运移聚集特征[J]. 石油勘探与开发,2000,27(4):64-67[Li Pilong, Zhai Qinglong, Rong Qihong, *et al.* Migration and accumulation of hydrocarbons in the central anticline belt of Dongying depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(4): 64-67]
 - 24 马丽娟,郑和荣. 渤海湾盆地东营凹陷中央隆起带构造特征[J]. 石油实验地质,2006,28(2):103-108[Ma Lijuan, Zheng Herong. Structural characteristics of the central uplift belt of the Dongying sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(2): 103-108]
 - 25 Fang Yong, Deng Hongwen, Massimo Sarti, *et al.* Characteristics of evolution and distribution of lithologic trap in Dongying Delta, Shengli Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 123-126
 - 26 饶孟余,钟建华,王夕宾,等. 东营凹陷东部沙三段滑塌浊积砂体沉积特征[J]. 煤田地质与勘探,2004,32(3):15-17[Rao Mengyu, Zhong Jianhua, Wang Xibin, *et al.* Sedimentary characteristics of creeping turbidite sandbody of the Member 3 of Shahejie Formation in eastern Dongying depression[J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(3): 15-17]
 - 27 王居峰,贾光华,刘军锴,等. 史南地区沙三段浊积砂体成因模式探讨[J]. 油气地质与采收率,2003,10(4):8-10[Wang Jufeng, Jia Guanghua, Liu June, *et al.* Discussion on the genesis model for turbidites of Es³ in Shinan area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(4): 8-10]
 - 28 张关龙,陈世悦,鄢继华,等. 三角洲前缘滑塌浊积体形成过程模拟[J]. 沉积学报,2006,24(1):50-55[Zhang Guanlong, Chen Shiyue, Yan Jihua, *et al.* Simulation of luxoturbidite in front of delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1): 50-55]
 - 29 鄢继华,陈世悦,宋国奇,等. 三角洲前缘滑塌浊积岩形成过程初探[J]. 沉积学报,2004,22(4):573-578[Yan Jihua, Chen Shiyue, Song Guoqi, *et al.* Preliminary study on the formation of fluxoturbidite in front of delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4): 573-578]
 - 30 李宇志,毕明威,刘惠民,等. 沙三中亚期东营三角洲前缘滑塌浊积岩定量预测[J]. 地学前缘,2012,19(1):146-155[Li Yuzhi, Bi Mingwei, Liu Huimin, *et al.* Quantitative prediction of slump turbidites of the Dongying delta front in the mid Es₃[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 146-155]
 - 31 刘吉余,彭志春,郭晓博. 灰色关联分析法在储层评价中的应用——以大庆萨尔特油田北二区为例[J]. 油气地质与采收率,2005,12(2):13-16[Liu Jiyu, Peng Zhichun, Guo Xiaobo. Application of grey correlation analysis method in reservoir evaluation——a case study of the North Second Area of the Daqing Salter Oilfield[J]. Oil Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(2): 13-16]

tion of grey relation analysis to reservoir evaluation-taking Bei 2 area, Saertu oilfield, Daqing as an example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(2): 13-16]

32 赵加凡,陈小宏,张勤. 灰关联分析在储层评价中的应用[J]. 勘

探地球物理进展, 2003, 26(4): 282-286 [Zhao Jiafan, Chen Xiaohong, Zhang Qin. Application of grey association analysis in reservoir evaluation[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(4): 282-286]

Quantitative Prediction Model for the Dongying Delta-fluxoturbidite Depositional System in the Middle Es³ Period

CHEN Shi-yue¹ BI Ming-wei¹ LIU Hui-min² GAO Yong-jin² ZHANG Peng-fei²

(1. Earth Science and Technology Institute of China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555;

2. Geological Science Research Institute of China Petrochemical Shengli Oilfield Branch, Dongying, Shandong 257000)

Abstract: Delta-fluxoturbidite depositional system has been well developed for the abundant sediment supply in Dongying depression in the middle Es₃ period. The study has found that fluxoturbidite thickness $h(m)$ can be established the relationship with delta front characteristics (thickness of the front delta strata $H(m)$, sandstone percentage content $x(\%)$ and slope angle of delta front $a(^{\circ})$) and distance of turbidite slip $s(m)$. Using the control variable method to research the single factor analysis to find that distance $s(m)$ which is primary factor, is high negative correlation with fluxoturbidite thickness $h(m)$. The sub-factors which include thickness of the delta front strata $H(m)$, sandstone percentage content $x(\%)$ and slope angle $a(^{\circ})$, are positively related with $h(m)$. Using the gray relational analysis to calculate the weight coefficients of sub-factors related to the primary factor, to ascertain the gray relation coefficient, and establishes the quantitative prediction model of thickness of fluxoturbidite $h(m)$: $h = 55.359Q^{1.5223}$, $Q = 0.355s' + 0.223x' + 0.221H' + 0.201a'$ (Q is the comprehensive evaluation indices. s' , x' , H' and a' are distance of turbidite slip, sandstone percentage content, thickness of the front delta strata and slope angle of delta front, which are calculated by using maximum normalization method).

Key words: Dongying depression; fluxoturbidite thickness; gray relational analysis; quantitative prediction model