

薄互层滩坝砂体的定量预测 ——以东营凹陷古近系沙四上亚段($E_{s4}^{\text{上}}$)为例

李国斌¹ 姜在兴² 王升兰³ 周浩玮² 王天奇¹ 张亚军¹

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020; 2. 中国地质大学 能源学院, 北京 100083;
3. 中海石油(中国)有限公司北京研究中心, 北京 100027)

摘要:薄互层砂体的定量预测是沉积学研究的难点之一。滩坝是滨浅湖区典型的薄互层砂体,其预测和勘探难度大。通过对东营凹陷古近系沙四上亚段滩坝的沉积特征、平面分布及控制因素等研究,认为滩坝的形成与分布主要受不同波浪带控制,即冲浪回流带控制沿岸滩坝(包括砾质滩坝)、碎浪带控制近岸滩坝、破浪带控制远岸滩坝。在建立了东营凹陷风动力砂体分布模型基础上,通过分析不同波浪带波浪参数变化,建立了破浪带和碎浪带砂体定量预测模型,对东营凹陷博兴注陷南部缓坡带近岸坝、远岸坝单砂体的厚度及宽度进行了定量预测计算,并对砂体的延伸长度通过微地貌恢复+风动力技术结合进行了计算。然后通过统计单个坝砂体厚度和连井对比对预测砂体厚度、宽度及长度进行了检验验证,二者吻合较好,证明预测方法切实可行。最后认为,6~8级风力最有利于滩坝的形成。该方法为薄互层砂体的定量预测研究提供了一种新的分析思路,对隐蔽油藏勘探有指导作用,但该方法不适用于明显受物源控制薄砂体的预测。

关键词:薄互层砂体;风动力模型;定量预测;模型检验;东营凹陷

中图分类号:P588.21*2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2010)06-1659-13

1 引言

碎屑岩滩坝是陆相断陷湖盆滨浅湖区常见的砂体类型。主要分布于湖泊边缘、湖中局部隆起和湖岸线拐弯等处的滨浅湖缓坡地区,经湖浪、湖流搬运、淘洗然后沉积而成^[1-3]。东营凹陷古近系沙四上地层中,滩坝比较发育,常成为有利的储集体^[6-8]。这类砂体常呈频繁的薄互层,砂层多但厚度薄,横向连续性差、变化大,常规的地震方法因分辨率限制不能有效识别。此类砂体在湖泊浅水地区受风浪作用可能大面积分布,但对单个砂体由于横向展布范围有限,钻遇同一单砂体的钻井很少,目前还没有有效手段预测滩坝的厚度及宽度等,因此加强这方面的研究非常必要。笔者对东营凹陷沙四上亚段滩坝的沉积特征、分布特点及控制因素等进行了综合研究,对该问

题进行了探讨。

目前,对薄互层砂体的预测,研究人员提出了许多方法。如利用时频分析理论的频谱分解^[9];利用叠前地震属性预测薄互层砂体^[10];利用地震瞬时谱属性进行薄互层分析^[11];王冠民等^[12]通过研究滩坝沉积受高频基准面升降旋回控制,结合同生断层产生的陡坎或隆起分布区对滩坝的分布位置进行预测。总体来看,上述方法多是基于地球物理参数特征而建立的,很少考虑到滩坝的地质特征和成因机制的复杂性,因此很难进行有效预测。

2 东营凹陷地质概况

2.1 构造背景

东营凹陷为典型的北断南超、北陡南缓的不对称箕状断陷盆地,南斜坡为盆地的缓坡地带。其东西

收稿日期:2010-05-14;改回日期:2010-07-28

基金项目:国家自然科学基金项目(40672078)资助。

作者简介:李国斌,男,1967年生,博士,高级工程师,主要从事沉积学、层序地层学综合研究;E-mail:ligb615@163.com。

长 90 km、南北宽 65 km。在构造单元上属于中国东部渤海湾盆地济阳拗陷南部的一个次级构造单元^[13] (图 1)。内部包括北部滨县陡坡带、利津洼陷、民丰洼陷、中央背斜带、牛庄洼陷、博兴洼陷及南部缓坡带等二级构造单元。伴随着凹陷的形成与发展,区内发育高青大断层、纯化草桥断层和博兴断层;受断裂控制,在博兴洼陷周围分别发育高青断裂带、平方王潜山披覆构造带、纯化—草桥鼻状构造带和金家鼻状构造带 4 个主要正向构造带,它们对东营凹陷滩坝的形成、分布和聚集成藏有重要的控制作用^[8]。

2.2 地层及层序地层划分

东营凹陷新生界地层发育完全,自下而上发育孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组和第四系平原组。沙河街组从下向上分为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段,而沙四段又细分为沙四上和沙四下两个亚段^[14-15]。沙四上亚段上部地层岩性为深灰色、褐灰色泥岩、油页岩、砂岩及灰岩互层,厚度较大,一般厚度近百米,向南受斜坡影响厚度逐渐减薄,电阻率呈高幅异常的尖刀状,特征明显;沙四上亚段下部地层岩性为深灰色泥岩、油页岩、砂岩和灰岩、白云岩互层,地层横向稳定,电阻率曲线呈梳状

尖齿和高幅异常的尖刀状。

运用 Vail 经典层序地层学理论^[16],在综合分析岩心、测井、录井及地震资料的基础上,将沙四上亚段划分为 1 个三级层序 3 个体系域 (LST、TST、HST),根据岩性组合及叠加样式进一步分为 7 个准层序组^[17-18](图 2)。

低位体系域主要为滩坝、滨浅湖泥岩,滩坝具有垂向多套叠置、平面分布范围广、横向可对比性较强的特点,以坝砂为主;湖侵体系域为半深湖泥岩、风暴滩坝和油页岩、灰岩组成,泥岩厚度大且分布广,构成向上变细的退积序列;高位体系域主要为滨浅湖—半深湖泥岩、滩坝以及薄层灰岩,具有典型的进积特点,滩坝垂向上多为单组沉积,厚度薄、平面分布范围窄,以滩砂为主。

3 滩坝沉积及分布特征

东营凹陷在沙四上时期,发育大面积滩坝,主要分布在北部陡坡带扇三角洲前部、利津洼陷向博兴洼陷过渡的中央低凸起带和博兴洼陷南部缓坡带,尤其博兴洼陷几乎是“满盆含砂”。下面对博兴洼陷滩坝沉积分布特征进行分析。

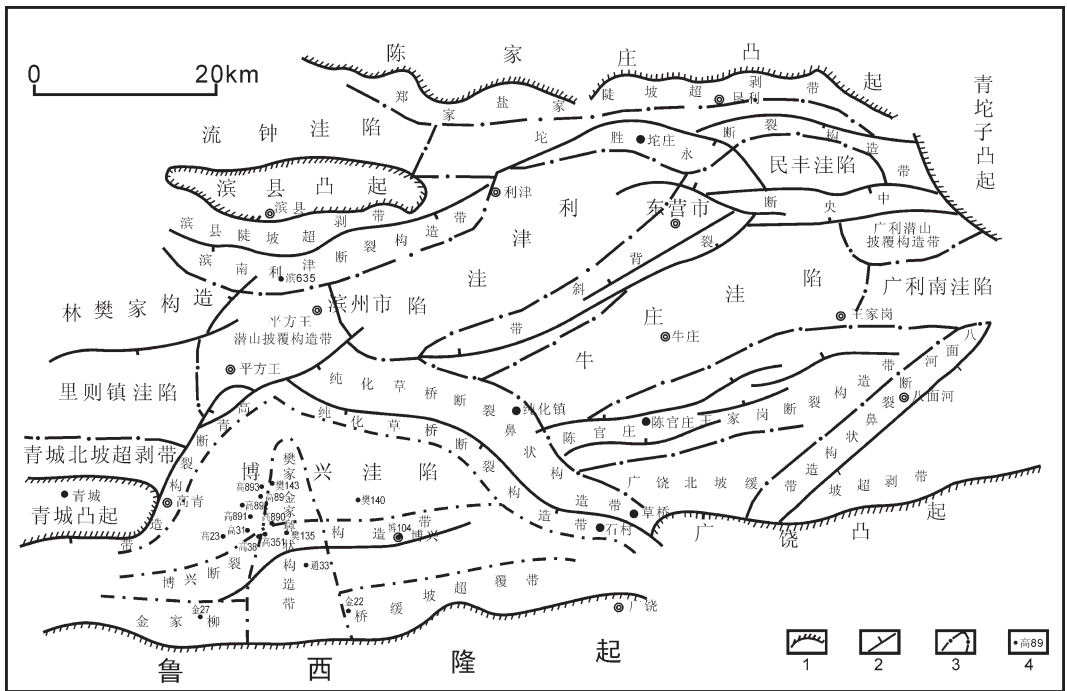


图 1 东营凹陷区域构造图(据文献[13]修改)

1—古近系分布范围;2—主要断层;3—构造带界限;4—井位井名

Fig.1 Structural units in Dongying sag, Shandong Province

1—Paleogene distribution area;2—Main fault;3—Tectonic zone boundary;4—Well name and location

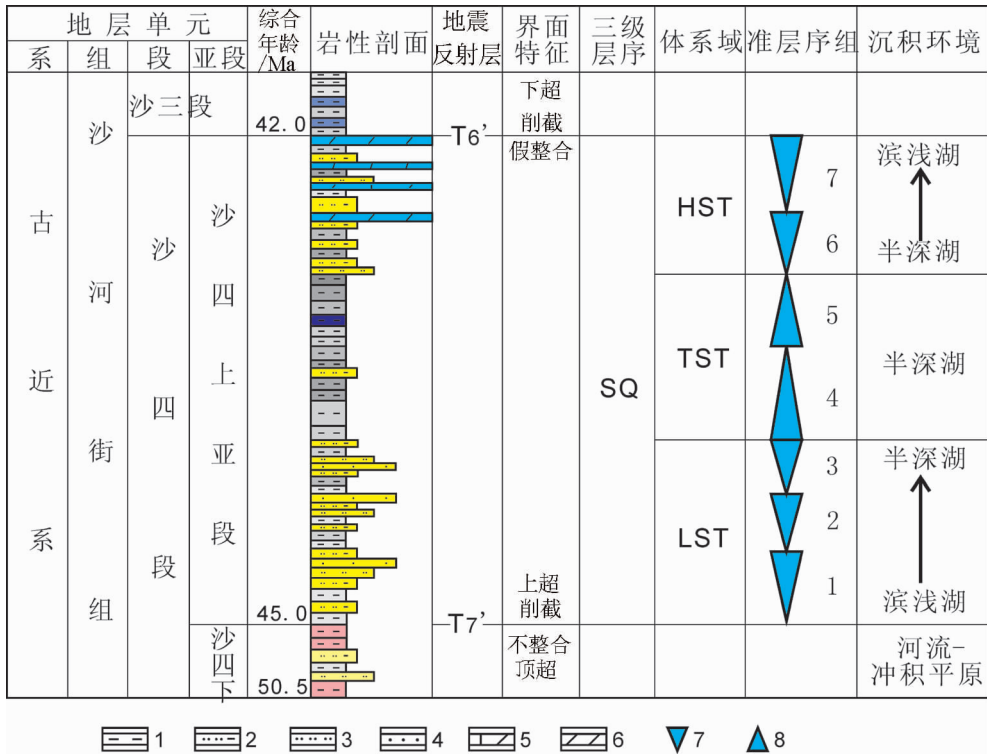


图 2 东营凹陷沙四上亚段层序地层划分

1—泥岩;2—泥质粉砂岩;3—粉砂岩;4—细砂岩;5—灰质云岩;6—白云岩;7—进积准层序组;8—退积准层序组 (HST—高位体系域;TST—湖侵体系域;LST—低位体系域)

Fig.2 Sequence stratigraphic classification of the Upper Submember of 4th Member of Shahejie Formation, Dongying sag

1—Mudstone;2—Pelitic siltstone;3—Siltstone;4—Fine sandstone;5—Calcareous dolomite;6—Dolomite;7—Progradation parasequence set;8—Retrogradation parasequence set; HST—Highstand systems tract;TST—Transgressive systems tract; LST—Lowstand systems tract

3.1 滩坝沉积特征

滩:主要以粉砂岩、泥质砂岩、砂质泥岩及泥岩沉积为主,具有单砂层厚度薄、泥岩夹层频繁发育的特点。沉积构造有冲洗交错层理、波状—微波状层理、低角度楔状层理、透镜状层理,可见波痕和生物扰动构造,生物潜穴发育,常见植物碎屑及成层分布的碳屑。电测曲线为高幅“尖刀状”指形密集组合,多呈反旋回,有时相序不明显(图 3)。

坝:主要以粉砂岩、细砂岩、粉细砂岩、砂质泥岩及泥岩沉积为主,具有单砂层厚度大、泥岩夹层薄的特点。沉积构造以发育多种波浪成因构造为典型特征,如:浪成沙纹层理、波状层理等,此外常见平行层理、楔状层理和块状层理等,可见波痕和生物潜穴。在测井曲线上多对应宽幅正向指形、齿化漏斗形或齿化箱形,显示反旋回特征,也有呈先正后反复合旋

回(图 3)。

3.2 滩坝分布特征

博兴洼陷沙四上低位域时水体较浅,沉积相有三角洲、砾质滩坝、滩和坝(图 4),其中滩和坝为主要沉积类型,呈“满盆砂”分布。

从图 4 看出,坝砂比较发育,滩砂沿坝砂边缘分布,范围较窄。砂岩累积厚度大于 20 m,砂地比大于 30%,发育较好处砂岩累积厚度超过 60 m,砂地比大于 50%,以高 89、樊 140 井区砂岩厚度最大。坝砂主要有两列,呈近东西向分布,由于其分布位置不同,所以表现出不同的沉积特征。从岩性上,靠近湖内一列(远岸坝)为细砂岩、粉砂岩、中砂岩和泥质粉砂岩,靠近湖岸边一列(近岸坝)为粉砂岩、泥质粉砂岩;从沉积物粒度上,湖内一列砂岩粒度大于湖岸边粒度;从矿物成分上,由湖岸边向湖内,石英含量增

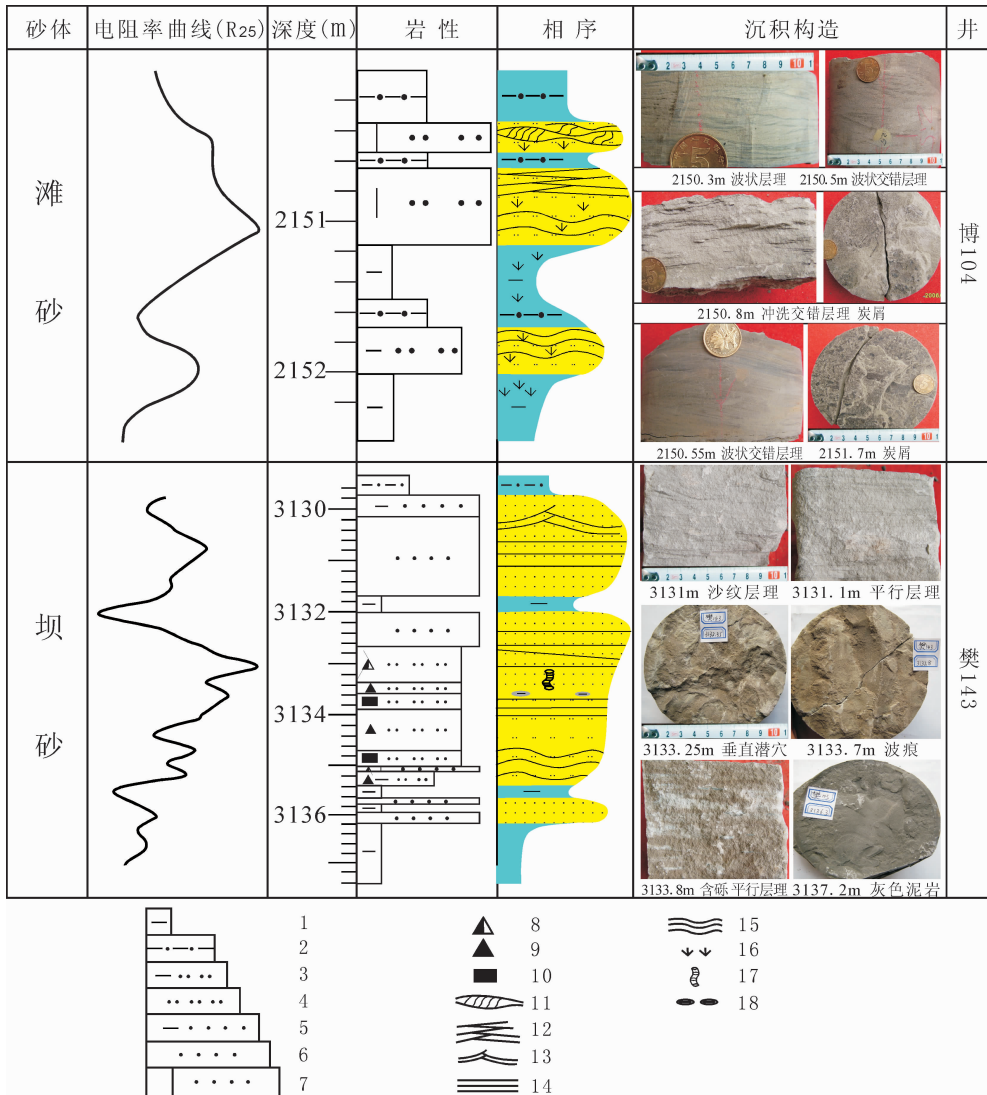


图3 滩坝岩心特征

1—泥岩;2—砂质泥岩;3—泥质粉砂岩;4—粉砂岩;5—泥质细砂岩;6—细砂岩;7—灰质砂岩;8—油迹;9—油斑;
10—油浸;11—透镜状层理;12—冲洗交错层理;13—浪成沙纹层理;14—平行层理;15—波状层理;
16—碳屑;17—生物钻孔;18—泥砾

Fig.3 Core characteristics of beach-bar

1—Mudstone;2—Sandy mudstone;3—Pelitic siltstone;4—Siltstone;5— Pelitic fine-sandstone;6—Fine sandstone;
7—Calcareous sandstone;8—Oil trace; 9—Oil patch;10—Oil filled place;11—Lenticular bedding;12—Washing cross bedding;
13—Wave ripple bedding;14—Parallel bedding;15—Wave bedding;16—Carbon chips;17—Burrow;18—Muddy pebble

大、长石含量减小,显示由湖岸边向湖内砂岩成分成熟度逐渐增加。从南北向连井砂体对比看(图5),靠湖内侧一系列坝砂(高892—高89—高893)明显比靠湖岸边一系列(高351—高890—高891)发育,砂层多、砂体横向延伸远、连通性好,但单砂层厚度差别不大。

在博兴南部缓坡带、靠近洼陷边缘的金家地区金27—金22—通33井区(图4),发育砾质滩坝,累计

厚度在20 m以上,砾岩含量大于20%,以金22井区厚度最大,累计厚度大于40 m。

从平面分布上看,由湖岸边的砾质滩坝到湖内的两列砂质滩坝,沉积物呈明显的分带性。而这些分带对应不同水动力带、受不同波浪带所控制,具体为由湖内向湖岸边分别受破浪带、碎浪带和冲浪回流带控制,破浪带、碎浪带分别控制远岸滩坝、近岸滩

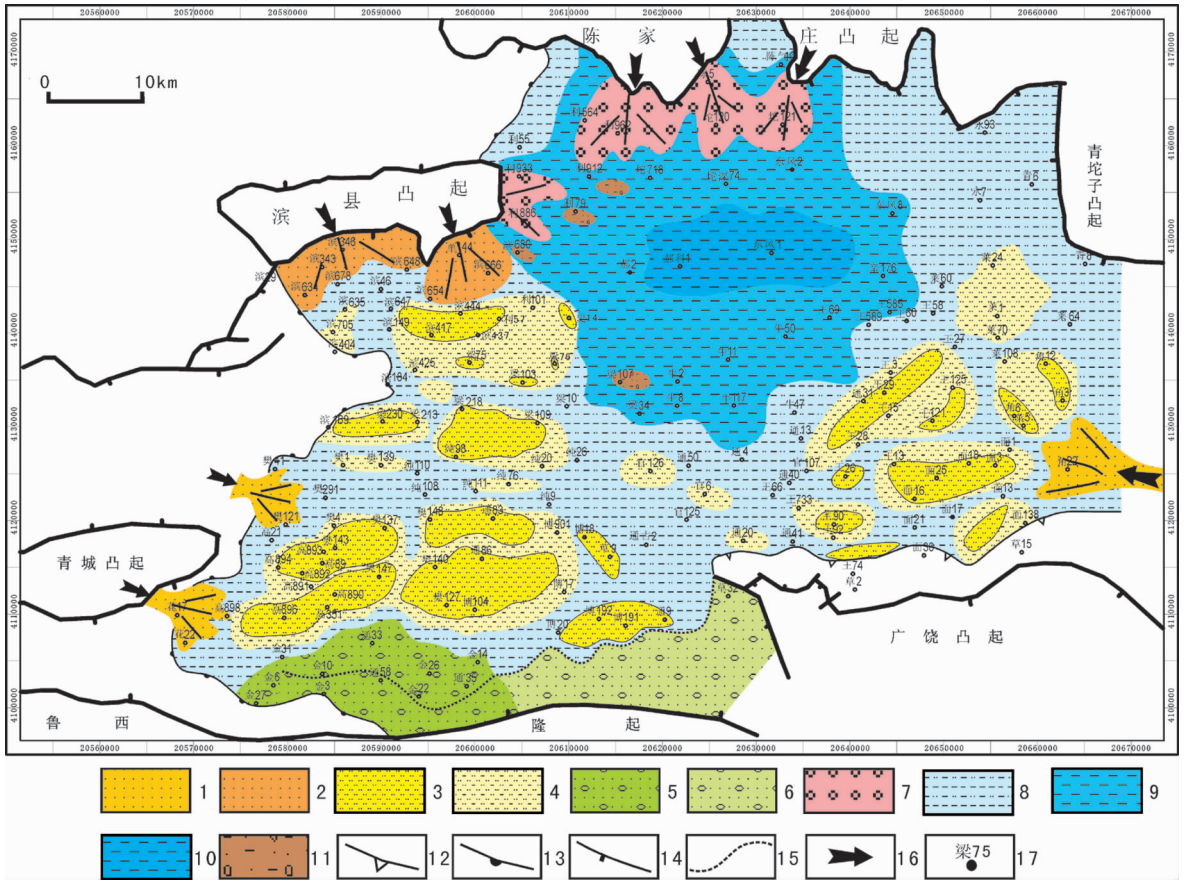


图 4 东营凹陷沙四上亚段低位域沉积相分布图

1—三角洲;2—扇三角洲;3—坝;4—滩;5—砾质滩坝;6—砾质滩坝(预测);7—近岸水下扇;8—滨浅湖;9—半深湖;10—深湖;11—浊积岩;12—尖灭线;13—超覆线;14—断层;15—湖岸线;16—物源方向;17—井位井名

Fig.4 The distribution of sedimentary facies of LST in the Upper Submember of the Sha-4 Formation
1-Delta;2-Fan delta;3-Bar;4-Beach;5-Pebble beach-bar;6- Pebble beach-bar(predicted);7- Nearshore subaqueous fan;8-Shore-shallow lake;9-Semi-deep lake;10-Deep lake;11-Turbidite;12-Pinching out line;13-Overlapping line;14-Fault;15- Lake strandline;16-Provenance orientation;17-Well name and location

坝,冲浪回流带控制沿岸砾质滩坝。

4 风动力砂体分布模型

4.1 原理分析

通过对滩坝控制因素尤其博兴南部缓坡带分析,滩坝主要受不同水动力带控制,因此可建立不同水动力带与滩坝的对应分布模型(图 6)。

图 6 中,冲浪回流带对应沿岸坝,在博兴南斜坡对应为金家地区的砾质滩坝(图 4);碎浪带对应近岸坝,为博兴南坡靠岸边分布的一系列砂质滩坝(图 4);破浪带对应远岸坝,为博兴南坡靠湖内分布的一系列砂质滩坝(图 4);风暴带对应湖中心分布的零星风暴滩坝。图 6 中 H1、H2、H3 可看作不同带内受波

浪作用所形成的单个坝砂体最大厚度。

在湖泊中不同位置 and 不同水深区,波浪特征及对沉积物搬运、沉积作用不同,因而形成不同的沉积物分带^[9]。究其根本原因,是由于波浪在向湖岸边传播过程中,受古地形、水深等影响,波形指标发生变化,其波能也发生改变,进而控制不同波浪带滩坝的形成。

风暴动力带:位于风暴浪基面和正常浪基面之间。由于风暴作用,常形成较强风暴浪,受风暴回流作用,将沿岸、近岸或远岸砂体搅动搬运至正常浪基面以下发生沉积,形成风暴岩。

破浪带:在靠近浪基面附近,随着波浪向湖岸边传播,水深变小,但波高逐渐增大,当水深为波高的

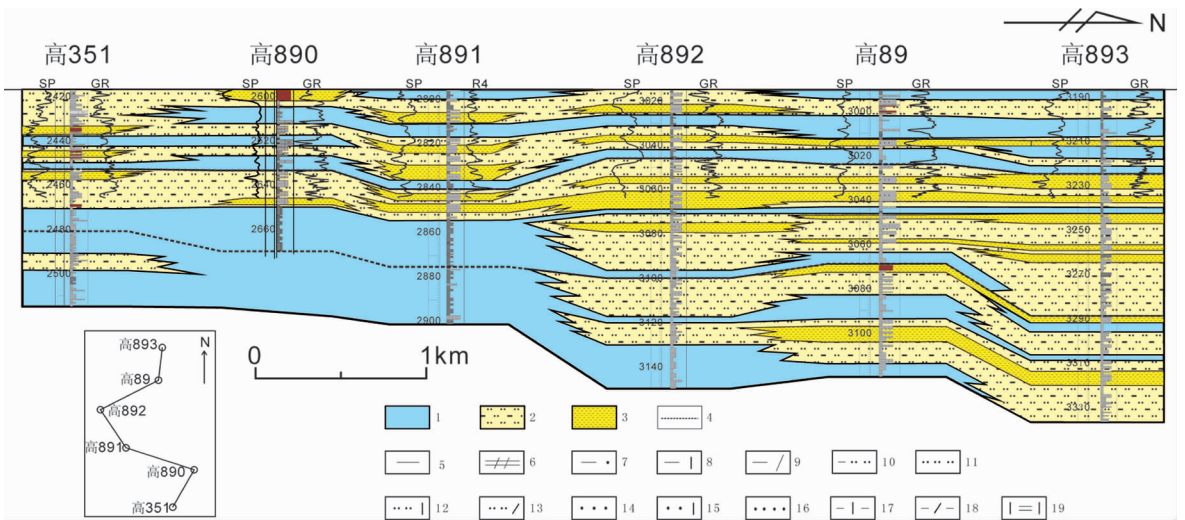


图5 高351—高890—高891—高892—高89—高893沙四上低位体系域连井砂体对比(南北向)
 1—滨浅湖;2—滩;3—坝;4—准层序组界限;5—泥岩;6—油页岩;7—砂质泥岩;8—灰质泥岩;9—云质泥岩;
 10—泥质粉砂岩;11—粉砂岩;12—灰质粉砂岩;13—云质粉砂岩;14—粉细砂岩;15—灰质砂岩;16—细砂岩;
 17—泥灰岩;18—泥质白云岩;19—页状灰岩

Fig.5 Correlation of NS-trending sand bodies of LST in wells Gao351 to Gao893 of the Upper Submember of the Sha-4 Formation

- 1- Shore-shallow lake;2- Beach sand;3- Bar sand;4- Parasequence set boundary;5- Mudstone;6- Oil shale;7- Sandy mudstone;
- 8- Calcareous mudstone;9- Dolomitic mudstone;10- Pelitic siltstone;11- Siltstone;12- Calcareous siltstone;13- Dolomitic siltstone;
- 14- Silt-fine sandstone;15- Calcareous sandstone;16- Fine sandstone;17- Muddy limestone;18- Argillaceous dolomite;19- Shaly limestone

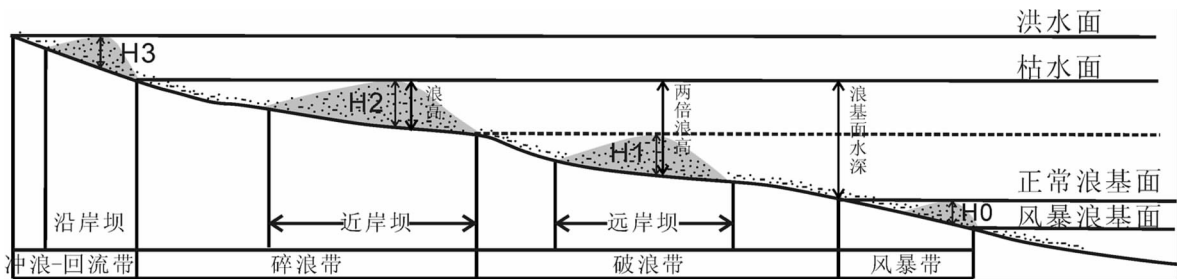


图6 东营凹陷博兴洼陷南部缓坡带滩坝与不同水动力带分布图

Fig.6 The distribution of hydrodynamic zone and beach-bar on the southern gentle slope of Boxing sag

两倍时,波浪开始倒卷和破碎,形成破浪带。此带内波浪变形强烈,对湖底的冲刷及对碎屑物质的簸选、淘洗强烈,该带内常形成较粗粒滩坝。图4中对应靠近湖内的一系列砂质滩坝,主要沉积细砂岩和粉砂岩,少量中砂岩。

碎浪带:当波浪进一步向湖岸方向传播,在水深度相当于一个波高时,波峰发生完全倒转和破碎,形成碎浪带。碎浪带宽度主要受地形坡度控制。博兴洼陷南坡地形平缓,可形成较宽的碎浪带。图4中对应靠近湖岸边的一系列砂质滩坝,该带沉积物比破浪带

粒度细,主要为粉砂岩和泥质粉砂岩。

冲浪回流带:当碎浪或涌浪进入滨岸带后,湖水借惯性力冲向岸边,形成“冲浪”,称为“冲浪带”,它包括惯性力作用下的进浪和重力作用下减速退浪或回流。当风吹过湖面产生波浪,因风与水面产生摩擦,在风的拖曳力的作用下,使湖水面升高,形成壅水。壅水水面高出原来水位的垂直距离称为风壅水面高度,也称为增水^[20-22]。因此,该带内既有湖平面的升高即风壅水面高度,又有碎浪或涌浪借惯性力作用形成的进浪和减速回流,水动力作用强且复杂。

该带内常形成沿岸坝,尤其在较平缓带,其外围湖岸边经常形成砾质滩坝带,图 4 中对应博兴洼陷湖岸边的砾质滩坝带。

另外,结合前人对始新世(古近纪中期)全球及中国古气候研究,始新世时期全球古气候呈明显的东西纬向分带性,表明当时古气候主要是受行星风系影响而非受季风影响^[23]。从渤海湾盆地所处地理位置和气候分区看,渤海湾盆地正处在行星风系西风带和副热带高压带接触带,由于行星风系作用,北半球西风带在遇到副热带高压带处常出现顺时针外旋的反气旋,风向发生偏转^[24-25],转为西北风或北风,所以在沙四上时期,受行星风系及反气旋作用渤海湾盆地主要盛行西北风或北风。基于以上分析,根据沙四上时期古风向和古地形特征,可以建立整个东营凹陷陡坡顺风带、中央振动带和缓坡迎风带的风动力砂体分布模型(图 7)。

从图 7 中可以看出,北部陡坡顺风带发育扇三角洲、滩坝、风暴岩等,中央振动带发育滩坝,南部缓坡迎风带发育砾质滩坝和砂质滩坝。在南部缓坡带,呈带状分布的砂体与不同水动力带相匹配,也是此次重点研究区。

本次对砂体定量预测模型的建立有两个假设条件:第一,滩坝砂体完全受波浪作用控制而不受物源控制;第二,近岸坝单个坝砂体最大厚度近似等于形成该砂体波浪的波高,亦即近岸水深。

4.2 破浪带和碎浪带

由于破浪带、碎浪带的形成受浪基面、波高、水深等因素影响,而浪基面受古风力影响较大,因此要

确定破浪带、碎浪带深度范围,必须要计算不同风力所能影响的最大水深。表 1 为东营凹陷地区不同级别的风所能影响最大水深,该水深即为不同级别风所对应的浪基面深度,而浪基面水深等于 1/2 波长,因此可计算出不同级别的风所能形成波浪的最大波长(表 1),风级和风速按标准风速“蒲福风力等级(Beaufort scale)”计算,一般情况下以 6 级以上风力计算较为准确。

4.2.1 碎浪带(近岸坝)砂体定量预测

碎浪带形成在水深等于一个波高的条件下,因此如何确定波高是定量预测的关键所在。

波浪发生完全破碎有许多几何学指标,主要包括极限波陡指标、极限波峰顶角指标、相对水深指标和波形不对称性指标 4 种类型^[26]。最早关于波浪破碎指标研究来自于 Stokes^[26-28]。1849 年 Stokes 指出波陡应该有一个极限值^[27] $(H/L)_{lim}$ (H —代表波高, L —代表波长),大于这个极限波陡值的波浪是不存在的。1893 年,Michell 将 Stokes 提出的极限波陡值准确地计算出来。Michell 得到了深水时的极限波陡值^[28] $\alpha = (H/L)_{lim} = 0.141$,或 $(H/gT^2) = 0.027$ (T —波周期)。1944 年,Michell 得到了浅水区波浪极限波陡值 $\alpha = H_b/[L_b \tanh(2\pi d/L_b)] = 0.14$ 。这一结果与深水情况下的结果相比可以说是一致的。该结果日后也为许多非线性波浪的计算所证实。

本次对碎浪带水深等于一个波高的计算采用极限波陡值 $(H/L)_{lim} = 0.141$ 计算式,其中不同级别风力所能形成波浪的最大波长 L 值见表 1。近岸坝砂体最大厚度 H_2 约等于一个波高(图 6),以一个波高水

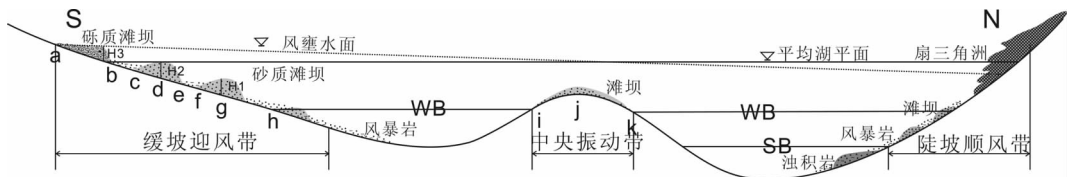


图 7 东营凹陷沙四上风动力砂体分布模型

WB—正常浪基面;SB—风暴浪基面;H1—远岸坝厚度;H2—近岸坝厚度;H3—沿岸坝厚度;a、b—沿岸滩坝分布范围;c、e—近岸滩坝分布范围;f、h—远岸滩坝分布范围;i、k—中央带滩坝分布区;d—近岸坝厚度最大点,g—远岸坝厚度最大点;j—中央带砂体厚度最大点

Fig.7 Wind dynamic sand body distribution model for the upper submember of the Sha-4 Formation
WB—Wave base, SB—Storm wave base, H1—Thickness of infralittoral bar, H2—Thickness of nearshore bar, H3—Thickness of longshore bar, a, b—Distribution of longshore beach-bar, c, e—Distribution of nearshore beach-bar, f, h—Distribution of infralittoral beach-bar, i, k— Distribution of central beach-bar, d—Point of maximum thickness of nearshore beach-bar, g—Point of maximum thickness of infralittoral beach-bar, j— Point of maximum thickness of central beach-bar

表 1 东营凹陷不同风级与影响水深、波长关系
Table 1 The relationship between wavelength and water depth at different wind scales in Dongying sag

风级	风速/(m/s)	影响水深 d/m	最大波长 L/m
0	0.0~0.2	0	0
1	0.3~1.5	0.4	0.8
2	1.6~3.3	1.6	3.2
3	3.4~5.4	3.5	7.0
4	5.5~7.9	6.5	13.0
5	8.0~10.7	10	20
6	10.8~13.8	14.5	29
7	13.9~17.1	20	40
8	17.2~20.7	26	52
9	20.8~24.4	33	66
10	24.5~28.4	39	78
11	28.5~32.6	46	92

深点为中心点,砂体向湖内或向岸发生堆积,向岸边可延伸至零水位即湖平面处,向湖内可延伸至破浪带与碎浪带接触带的中间处,结合缓坡带地形坡度可确定碎浪带坝砂体宽度。

4.2.2 破浪带(远岸坝)砂体定量预测

破浪带形成在两倍波高的水深处。远岸坝砂体最大厚度等于两倍波高减去碎浪带水深,即 $H1=2 \times \text{波高} - \text{波高} = \text{波高}$ (图 6),分布在浪基面之上至近岸坝向湖内延伸的最远点之间(图 6),即延伸宽度为 $(1/2) \times \text{波长} - \text{波高} = 0.36 \times \text{波长}$ 所限定的湖岸边坡范围。从预测模型看出,在同等风力条件下,远岸坝砂体厚度与近岸坝砂体厚度一致,但宽度远大于近岸坝(图 6),结合缓坡带地形坡度,可确定破浪带坝砂

体宽度(表 2)。

4.3 破浪带、碎浪带砂体延伸长度预测

砂体延伸长度是指砂体平行于湖岸线方向单砂体的分布范围。前面只是对不同波浪带单砂体的最大厚度和宽度进行了预测计算,但如何预测单砂体长度呢?本次采用微地貌恢复+风动力技术二者结合,即通过统计单井准层序(准层序组 3 划分为 2 个准层序,统计了底部 1 个准层序)的砂体厚度,经过压实校正后恢复古地形微地貌图,然后根据破浪带、碎浪带所能影响的水深,在古地貌正向地形中圈定所能影响的深度范围,其平行岸线方向的延伸长度就是砂体长度。如图 8,碎浪带中微地貌最高处为 10 m,根据碎浪带坝砂体最大厚度可看作形成该砂体的古水深,则碎浪带水深可看作为 10 m,按表 2 中 6~8 级风影响水深平均值 5 m,则可圈定出 5 m 等高线以上区域即为坝砂体的有利分布区。图 8 中碎浪带高 891 井区坝砂延伸长度约 5 km,高 23 井区延伸长度为 3 km;破浪带高 893、高 894 井区延伸长度约 3.8 km。图 8 表明,碎浪带砂体长度大于破浪带,而宽度则相反(与表 2 预测结果一致),也就是说湖岸微地貌形态对碎浪带坝砂的控制作用更为明显。

通过东西向、南北向准层序砂体连井对比(图 9)看出,东西向坝砂体仅在高 23、高 38 井区呈孤立状分布,井间为滩砂;南北向在高 38、高 891 和高 89 井区呈孤立状分布。与图 8 所圈定的坝砂分布区相

表 2 东营凹陷不同风级与近岸坝、远岸坝砂体厚度关系
Table 2 The relationship between sand body thickness and wind scale in nearshore bar and infralittoral bar of Dongying sag

风级	最大波长	碎浪带	近岸坝最大	近岸坝斜	破浪带	远岸坝最大	远岸坝斜
	L/m	水深/m	厚度 H2/m	宽/m	水深/m	厚度 H1/m	宽/m
1	0.8	0.1	0.1	11.1	0.2	0.1	28.5
2	3.2	0.4	0.4	44.3	0.9	0.4	113.9
3	7.0	1.0	1.0	96.9	2.0	1.0	249.1
4	13	1.8	1.8	179.9	3.6	1.8	462.6
5	20	2.8	2.8	276.7	5.6	2.8	711.6
6	29	4.1	4.1	401.3	8.1	4.1	1031.9
7	40	5.6	5.6	553.5	11.2	5.6	1423.3
8	52	7.3	7.3	719.5	14.6	7.3	1850.2
9	66	9.2	9.2	913.3	18.5	9.2	2348.4
10	78	10.9	10.9	1077.3	21.8	10.9	2777.3
11	92	12.9	12.9	1275.0	25.8	12.9	3261.6

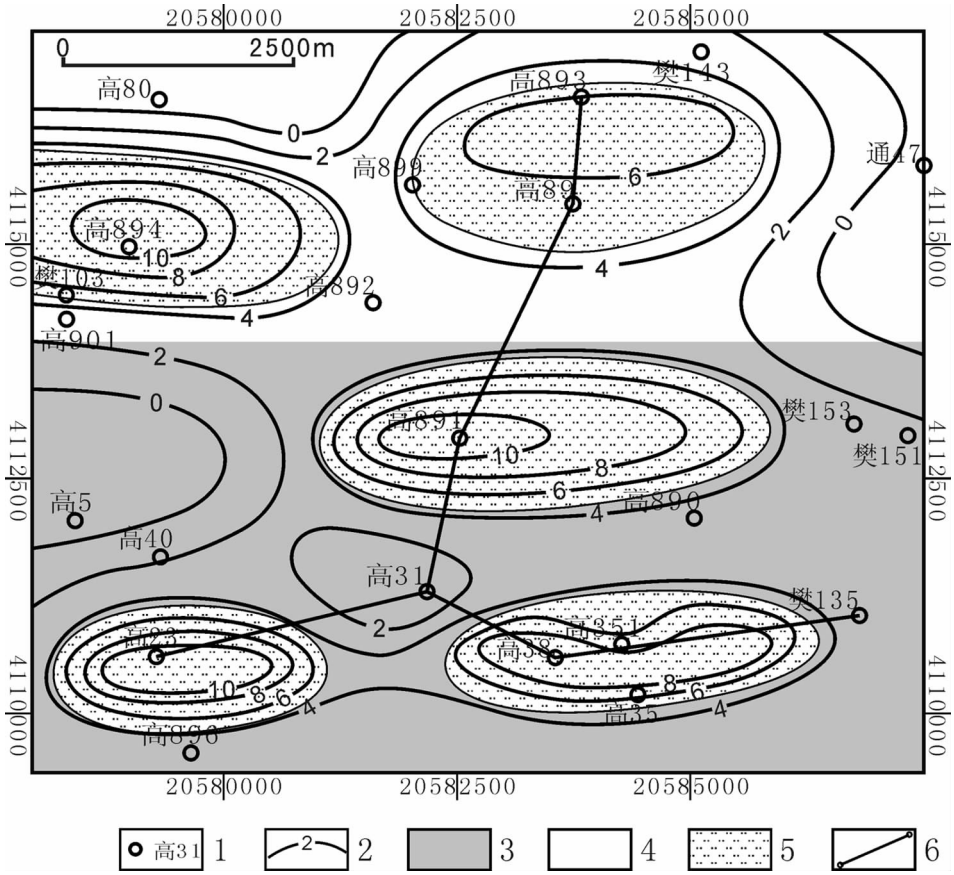


图 8 东营凹陷高 89 井区不同水动力带砂体延伸长度预测图

1—井位井名;2—砂岩等厚线(m);3—碎浪带;4—破浪带;5—坝砂分布区;6—剖面线

Fig.8 Prognosis of sandy bar extension length in different hydrodynamic zones in well Gao89 area

1—Well name and location;2—Sandstone thickness contour(m);3—Breaker zone;4—Broken zone;5—Distribution of bar sand;6—Profile line

吻合。

以上分析表明,通过微地貌恢复+风动力技术结合,可确定不同水动力带坝砂体的延伸长度。

5 模型检验

以上通过对东营凹陷博兴缓坡带滩坝控制因素分析,根据不同动力带波浪作用特点及波浪几何学参数变化,建立了不同带砂体的预测模型,对不同级别风所形成砂体的规模进行了定量计算。但如何检验这种预测方法的正确性呢?本次采用坝砂厚度统计法,即通过测井曲线在岩屑录井图中识别出坝砂体,然后统计所有单个坝砂体厚度值,对不同厚度分布区间(以 2 m 为间距)进行统计分析,与所预测的结果进行对比。

本次对博兴洼陷低位域近岸滩坝和远岸滩坝分布井单个坝砂体厚度值(H)进行了统计,结果见表 3。

从表 3 看出,近岸坝单砂层厚度主要在 2~8 m, 占统计总数的 87.5%,8~10 m 的占 9.6%,厚度大于 10 m 的砂层非常少;远岸坝单砂层厚度主要在 2~8 m,占统计总数的 92.8%,很少有大于 8 m 的单砂层。该统计结果与预测结果非常吻合。

在表 3 中,近岸坝、远岸坝单砂层厚度主要在 2~8 m,表 2 中近岸坝、远岸坝 4~8 级风对应单砂层厚度为 1.8~7.3 m,与实际统计主要厚度分布区间吻合较好,证明预测模型是可行的。在预测结果中,近岸坝大于 8 m 的单砂层较少,而如要形成 8 m 以上的砂层,则古风力要达到 8 级以上,但当风力过大时就会形成较强的风暴回流,又会导致对滩坝的强烈破坏。因此中等级别的风力是滩坝形成的理想条件,这也解释了为什么滩坝砂体都是薄互层的原因。

对单个坝砂体的延伸宽度,可以通过连井砂体对比进行验证检验。选取南北向高 351—高 890—高

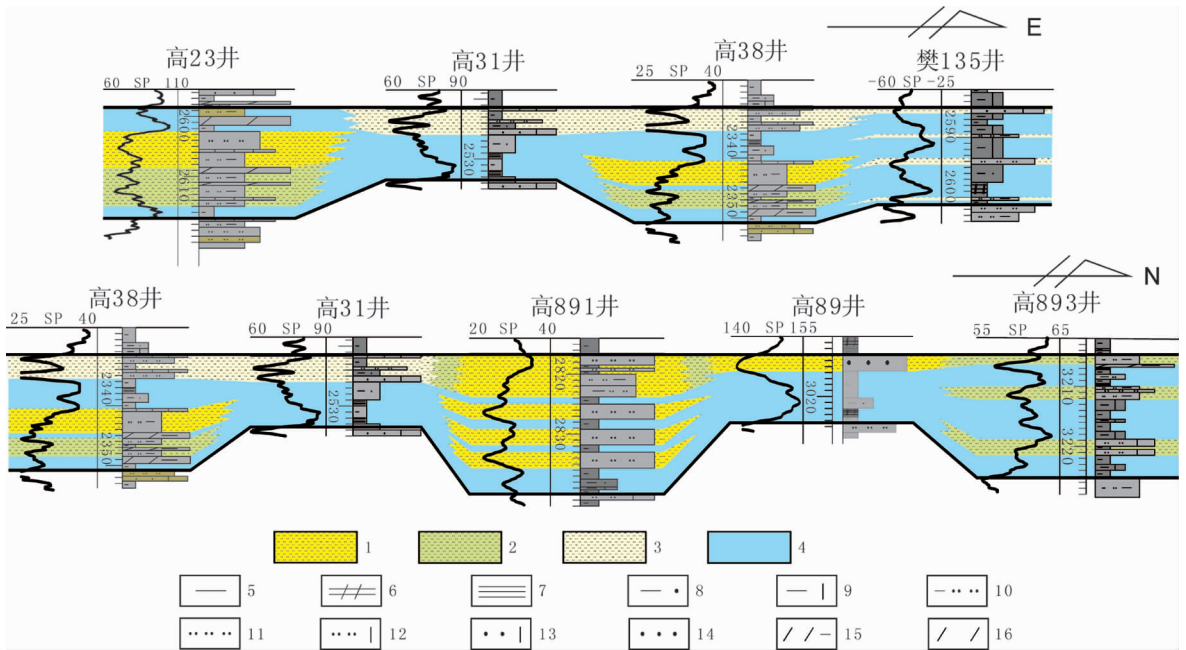


图9 东营凹陷高89井东西向(上)、南北向(下)连井砂体对比

1—坝主体;2—坝侧缘;3—滩砂;4—滩坝间;5—泥岩;6—油页岩;7—页岩;8—砂质泥岩;9—灰质泥岩;10—泥质粉砂岩;
 11—粉砂岩;12—灰质粉砂岩;13—灰质砂岩;14—粉细砂岩;15—泥质白云岩;16—白云岩

Fig.9 The well connecting EW-trending (upper) and N-S trend (lower) sand body correlation in well Gao89 area
 1— Bar body;2—Bar lateral margin;3—Beach sand;4—Inter-beach-bar;5—Mudstone;6—Oil shale;7—Shale;8—Sandy mudstone;
 9—Calcareous mudstone;10— Pelitic siltstone; 11—Siltstone;12—Calcareous siltstone;13—Calcareous sandstone;
 14—Silt-fine sandstone;15—Argillaceous dolomite;16—Dolomite

表3 不同类型坝砂体单层厚度分布统计(单位:m)

Table 3 Statistics of single layer thicknesses of bar sand bodies of different types (unit: m)

滩坝类型	井数	坝砂层数	2≤H<4	4≤H<6	6≤H<8	8≤H<10	10≤H<12	12≤H<14
近岸坝	19	104	12(11.5%)	39(37.5%)	40(38.5%)	10(9.6%)	3(2.9%)	0
远岸坝	13	56	13(23.2%)	28(50.0%)	11(19.6%)	3(5.4%)	1(1.8%)	0

891—高892—高89—高893剖面低位域砂体进行对比分析(图5),其中高351、高890、高891位于碎浪带,高892、高89、高893位于破浪带,井间距为1~1.3 km(南北向直距)。从砂体连井对比看出,高892、高89、高893三口井区坝砂比较发育,单砂层延伸远,井间互相连通,也就是说单砂层宽度大于1~1.3 km;高351、高890、高891三口井区坝砂发育较差,坝砂呈孤立状,井间互相不连通,也就是说单砂层宽度小于1 km。从预测结果看(表2),以4~8级风为例,近岸坝宽度180~720 m、远岸坝宽度460~1850 m。预测的坝砂层延伸宽度与实际连井砂体对比分析结果相吻合。

综合分析认为,前文所述预测方法对浪控砂质滩坝的定量预测是可行的。另外,利用此方法,通过在岩

屑录井图识别出单个坝砂体厚度,即可大致推算出其宽度和长度以及形成这套砂体时的古风力,有助于横向单砂层的追踪对比与评价,也可反演古气候。

6 讨论

本次通过对东营凹陷博兴洼陷南部缓坡带沙四上亚段滩坝砂体的解剖研究,认为滩坝主要受波浪作用所控制,与不同的水动力带即破浪带、碎浪带和冲浪回流带密切相关,从而形成远岸滩坝、近岸滩坝和沿岸滩坝;结合不同水动力带波浪作用特点和波浪几何学指标,建立了不同水动力带砂体的定量预测模型,对不同古风力条件下所能形成砂体规模进行了定量计算,最后通过对实际砂体的厚度统计和连井砂体对比,对预测结果进行检验,结果比较吻

合。又利用微地貌恢复+风动力技术结合,大致确定了破浪带、碎浪带砂体延伸长度,通过东西向、南北向准层序砂体连井对比进行了验证分析。

通过分析与实际对比,认为滩坝形成的最佳古风力应为 6~8 级,风级太低,不能产生强波浪,也不能形成滩坝;而相反,风级太高,会形成强风暴浪,会破坏早期形成的滩坝砂体。这种现象也解释了为什么滩坝砂体都是薄互层的原因。

综合分析认为,本次所建立的预测模型较为可靠,可对薄互层滩坝砂体进行定量预测,具有实用性和可行性,但该方法未考虑沉积物供给的影响,不能对“源控”砂体进行预测。该预测方法为薄层砂体的定量预测提供了一种新思路,是对砂体定量预测方法的补充。

参考文献 (References):

- [1] Christopher H, Brian G. Hydrodynamics and Sediment Transport within the Inner Surf Zone of A Lacustrine Multiple-Barred Nearshore[J]. Marine Geology, 2005, 218:37-63.
- [2] R M Flores. Pictured Cliffs Sandstone Upper Cretaceous distributary-channel, delta-front, and beach-bar deposits, southwestern San Juan Basin, New Mexico[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(3):451-452.
- [3] Heathershaw A D, Davies A G. Resonant wave reflection by transverse bedforms and its relation to beaches and offshore bars[J]. Marine Geology, 1985, 62(3/4):321-338.
- [4] J J Williams, Conner D C, Peterson K E. Piper oil field, North Sea; fault-block structure with upper Jurassic beach-bar reservoir sands [J]. AAPG Bulletin, 1975, 59:1585-1601.
- [5] 朱筱敏, 信荃麟, 张晋仁. 断陷湖盆滩坝储集体沉积特征及沉积模式[J]. 沉积学报, 1994, 12(2):20-27.
Zhu Xiaomin, Xin Quanlin, Zhang Jinren. Sedimentary characteristics and models of the beach-bar reservoirs in faulted down Lacustrine Basins [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12 (2):20-27. (in Chinese with English abstract).
- [6] 赵澄林, 张善文, 袁静. 胜利油区沉积储层与油气[M]. 北京:石油工业出版社, 1999.
Zhao Chenglin, Zhang Shanwen, Yuan Jing. Depositional Reservoir and Hydrocarbon of Shengli oil Region [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1999(in Chinese).
- [7] 袁俊俊. 湖盆砂体类型及其沉积特征与含油性 [C] //胡文瑞, 赵政璋, 吴国干, 等主编. 岩性地层油气藏勘探理论与实践. 北京:石油工业出版社, 2005:72-127.
Yuan Xuanjun. The lake basin sand body type and its sedimentary characteristics and oil-bearing features[C] // Hu Wenrui, et al. The Exploration Theory and Practice of Lithostratigraphy Hydrocarbon Reservoir. Beijing:Petroleum Industry Press, 2005:72 -127 (in Chinese).
- [8] 孙锡年, 刘渝, 满燕. 东营凹陷西部沙四段滩坝砂岩油气藏条件[J]. 国外油气田工程, 2003, 19(7) :24-25.
Sun Xinian, Liu Yu, Man Yan. The oil-pool forming condition of beach-bar sand of Sha-4 Member in western Dongying Sag [J]. External Oilfield Engineering, 2003, 19(7):24-25 (in Chinese with English abstract).
- [9] 蒋龙聪. 薄互层储层地震响应时频分析研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 2008:1-2.
Jiang Longcong. The Method of Time-frequency Analysis Applied in Thin Interbedded Reservoir [D]. Wuhan: Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences(Wuhan), 2008:1-2(in Chinese with English abstract).
- [10] 刘金平, 侯亚彬, 杨懋新, 等. 叠前地震属性在薄互层储层预测中的应用[J]. 天然气工业, 2007, 27(增刊 A):262-264.
Liu Jinping, Hou Yabin, Yang Maoxin, et al. Application of pre-stack seismic attributes in thin interbedded reservoir Prediction[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27 (Supp.):262-264 (in Chinese with English abstract).
- [11] 高静怀, 陈凤, 陈树民. 利用地震瞬时谱属性进行薄互层分析[J]. 煤田地质与勘探. 2005, 33(3):67-70.
Gao Jinghuai, Chen Feng, Chen Shumin. Using seismic instantaneous attributes to analyze thin interbeds [J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33 (3):67-70 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王冠民, 高亮, 林旭梅, 等. 东营凹陷南斜坡沙四段高频沉积轮回对滩坝砂体的沉积控制作用 [J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1):44-48.
Wang Guanmin, Gao Liang, Lin Xumei, et al. High frequency cycles and its control action to Lacustrine Shoal-Bar in the 4th Member of Shahejie Formation in Southern Slope of Dongying Depression[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30 (1):44-48(in Chinese with English abstract).
- [13] 李丕龙, 庞雄奇, 张善文, 等. 陆相断陷盆地隐蔽油气藏形成——以济阳拗陷为例[M]. 北京:石油工业出版社, 2004.
Li Pilong, Pang Xiongqi, Zhang Shanwen, et al. The Formation of Subtle Hydrocarbon Reservoir in Terrigenous Fault Basin—A Case of Jiyang Depression [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2004 (in Chinese).
- [14] 戴朝强, 张金亮. 鲁北济阳拗陷东营凹陷南坡沙河街组第四段上亚段高分辨率层序地层格架 [J]. 地质通报, 2006, 25(9/10):1168-1174.
Dai Zhaoqiang, Zhang Jinliang. High-resolution sequence stratigraphic framework of the Upper Submember of the Fourth Member of the Shahejie Formation on the southern slope of the Dongying subbasin, northern Shandong, China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25 (9/10):1168-1174 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张德武, 冯有良, 邱以钢, 等. 东营凹陷下第三系层序地层研究与隐蔽油气藏预测[J]. 沉积学报, 2004, 22(1):67-72.
Zhang Dewu, Feng Youliang, Qiu Yigang, et al. Lower Tertiary

- sequence stratigraphy study and the forecast of subtle reservoir in Dongying Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 67-72.
- [16] Vail P R, Mitchum R M, Thompson S. Global cycles of relative changes of sea level [C]//Payton C E. *Seismic Stratigraphy Application to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Memoir 26, 1977:99-116.
- [17] 李国斌, 姜在兴, 陈诗望, 等. 利津洼陷沙四上亚段滩坝沉积特征及控制因素分析[J]. *中国地质*, 2008, 35(5):911-921.
Li Guobin, Jiang Zaixing, Chen Shiwang, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of beach bars in the Upper Submember of the Fourth Member of the Shahejie Formation in the Lijin subasin [J]. *Geology in China*, 2008, 35 (5):911-921(in Chinese with English abstract).
- [18] 李国斌, 姜在兴, 杨双, 等. 利津洼陷沙四上亚段沉积相及演化研究[J]. *特种油气藏*, 2008, 15(5):35-39.
Li Guobin, Jiang Zaixing, Yang Shuang, et al. Sedimentary facies and evolvement in Upper Es4 of Lijin Sag [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2008, 15(5):35-39(in Chinese with English abstract).
- [19] 姜在兴. *沉积学*[M]. 北京:石油工业出版社, 2003.
Jiang Zaixing. *Sedimentology* [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2003(in Chinese).
- [20] Toshiyuki H, Kinjiro K. Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche)in Nagasaki Bay [J]. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 1982, 38, 172-182.
- [21] Tintore J D, Gomis S Alonso, et al. A theoretical study of Large Sea Level oscillation in the Western Mediterranean [J]. *J. G. R.*, 1988, 93, 10797-10803.
- [22] Wang X, Li K, Yu Z, et al. Statistical Characteristics of seiches in Longkou Harbour[J]. *J. Phys. Oceanogr.* 1987, 17, 1063-1065.
- [23] 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性[J]. *第四纪研究*, 1998, 18 (3):194-204.
Liu Dongsheng, Zheng Mianping, Guo Zhengtang. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with the ice -sheet growth and the Tectonic Movements in Asia [J]. *Quaternary Sciences*, 1998, 18 (3):194-204 (in Chinese with English abstract).
- [24] 伍光 and 田连恕, 胡双熙, 等. *自然地理学(第三版)*[M]. 北京:高等教育出版社, 2002:30-45
Wu Guanghe, Tian Lianshu, Hu Shuangxi, et al. *Physical Geography (the third edition)*[M]. Beijing:China Higher Education Press, 2002:30-45(in Chinese).
- [25] 潘树荣, 伍光 and 陈传康, 等. *自然地理学(第二版)*[M]. 北京:高等教育出版社, 1985:162-170
Pan Shurong, Wu Guanghe, Chen Chuankang, et al. *Physical Geography (the second edition)* [M]. Beijing:China Higher Education Press, 1985:162-170(in Chinese).
- [26] 于洋, 李玉成, 杨建民. 基于波形不对称性的波浪破碎指标[J]. *海洋工程*, 2006, 24(2):89-94.
Yu Yang, Li Yucheng, Yang Jianmin. Wave breaking indices based on asymmetry of wave profiles [J]. *The Ocean Engineering*, 2006, 24(2):89-94 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李玉成, 肖辉, 于洋. 波形不对称性对破碎指标的影响 [J]. *中国海洋平台*, 2006, 21(2):5-10.
Li Yucheng, Xiao Hui, Yu Yang. The influence of wave asymmetry on breaker indices [J]. *China Offshore Platform*, 2006, 21(2):5-10 (in Chinese with English abstract).
- [28] Marshall P T, Jiyue J L. On the breaking of energetic waves[J]. *International Journal of Off shore and Polar Engineering*, 1992, 2 (1):46-53.

The quantitative prognosis of thin interbedded beach-bar sandbodies: a case study of the upper 4th submember of the Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag

LI Guo-bin¹, JIANG Zai-xing², WANG Sheng-lan³,
ZHOU Hao-wei², WANG Tian-qi¹, ZHANG Ya-jun¹

(1. Northwest Branch of PetroChina Exploration & Development Research Institute, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 10083, China ; 3. Research Center of CNOOC, Beijing 100027, China)

Abstract: The quantitative prognosis of thin interbedded sandbodies is one of the difficulties in sedimentological research. The beach-bar is a typically thin interbedded sand body in shore-shallow lake whose prediction and exploration are very difficult. Based on the study of sedimentary characteristics, plane distribution and controlling factors of beach-bar in the upper 4th submember of the Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag, the authors consider that the development and distribution of beach-bar are mainly controlled by different wave zones, i.e., the surfing-backflowing zone controls pebble beach-bar and longshore beach-bar, the breaker zone controls nearshore beach-bar and the broken zone controls infralittoral shore beach-bar. Based on the wind-dynamic sandbodies distribution model and the analysis of wave parametric variation in different zones, the authors established the quantitative prognostic models of the sand body in the broken zone and the breaker zone, and calculated the thickness and width of sandy bar distribution in nearshore and infralittoral shore. In addition, using wind-dynamic mixed microtopography recovering technique, the authors obtained the extension length of the sandy. By employing statistics of single layer bar thickness and well connecting correlation, the authors examined the predicted results and proved them to be reliable and reasonable. It is demonstrated that the 6-8 wind scale is favorable for the development of the beach-bar. This method provides a new insight for the prediction of thin sand body and is useful to the exploration of subtle reservoirs; nevertheless, it is not suitable for the prediction of the thin sand body mainly controlled by the provenance.

Key words: thin interbedded sand body; wind-dynamic model; quantitative prognosis; model verification; Dongying Sag

About the first author: LI Guo-bin, male, born in 1967, senior engineer and Ph.D, engages in the study of sequence stratigraphy and sedimentology; E-mail: ligb615@163.com.