

文章编号:1000-0550(2025)06-2168-19

内陆坳陷湖盆远岸砂质滩坝沉积模式

李嘉伟^{1,2},徐振华³,程立华⁴,尹艳树^{1,2}

1.长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室,武汉 430100

2.长江大学地球科学学院,武汉 430100

3.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249

4.中国石油勘探开发研究院,北京 100083

摘要 【目的】青海油田台南地区涩北组中上段发育典型的滩坝沉积,是重要的优质储集层。其滩坝砂体的形成机制与分布模式一直存在争议,限制了气田进一步勘探开发,亟需开展台南地区滩坝内部精细表征,明确沉积微相类型,建立对应的滩坝沉积模式。【方法】以沉积学为指导,考虑形成滩坝时水动力差异性,导致形成砂体粒度、渗透率不同,以粒度中值为纽带,总结岩石相的测井相响应模板,确定沉积微相测井解释标准与动态响应,更科学地划分滩坝沉积微相;基于现代沉积卫星图像类比、研究区密井网区砂体解剖,利用水平井和生产资料进行微相类型划分合理性验证后,考虑滩坝成因受多种因素控制,提出了适用于内陆坳陷湖盆的滩坝沉积模式。【结果】台南地区涩北组中上段滩、坝亚相可进一步划分为坝主体、坝缘、滩主体、滩缘微相,坝砂分布于滩砂之上,垂直于北西风向延伸,形态为透镜状、弯月形,长度约1250 m,宽度约250 m,坝砂长、宽呈线性正相关,值约为5;滩砂整体呈连片状垂直物源方向展布,仅低水位期出露;通过田吉兹湖滩坝现代沉积类比,坝砂延伸方向、分布规律、长宽比均有较好对应。古构造、古地貌、古季风、古物源、古水深共同控制了滩坝发育规模、坝砂发育形态及形成滩坝的地理位置。

【结论】提出“开阔浅湖、风浪改造、斜列式”滩坝的沉积模式,以期为内陆坳陷湖盆滩坝体系识别提供理论指导。

关键词 台南地区;滩坝;粒度;沉积微相;形成机制;沉积模式

第一作者简介 李嘉伟,男,1999年出生,硕士研究生,沉积学,E-mail: 489648718@qq.com

通信作者 尹艳树,男,教授,E-mail: yys@yangtzeu.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.017

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.017

0 引言

滩坝的研究始于20世纪初期,1986年由吴崇筠^[1]引入国内,其指出浅滩、砂坝也可存在于滨浅湖沉积环境中,但在当时并未引起学者重视。近年来,中国油气勘探进入隐蔽油气藏勘探阶段,滩坝砂体具有物性好且靠近油源的特点,具备形成中一大型油气田的条件,薄层的滩坝储集体逐渐受到国内学者重视,成为当下石油地质领域的研究热点。

陆源碎屑滩坝可分为砂质滩坝与砾质滩坝,陆源碎屑多由(扇)三角洲前缘浅水砂体或基岩等构成^[2]。砂质滩坝发育较砾质滩坝普遍,可形成潜力巨大的砂岩油气藏^[3-6]。不同滩坝成因与分布存在

差异,李国斌等^[7]提出了“气—源—盆”系统控制下的滩坝沉积模式;姜在兴等^[8]提出了“风—源—盆”系统控制下滩坝的沉积模式,为预测滩坝砂体的分布提供了很好的指导。然而,这些模式来源于沿海地区发育的砂质滩坝^[9]以及断陷湖盆的砂质滩坝^[10]研究;是否适用于内陆地区坳陷湖盆砂质滩坝还未验证。

三湖坳陷台南地区发育陆源碎屑滩坝,谢宗奎^[11]将台南涩北组滩坝归纳了三种能量单元,对应坝砂、滩砂和泥坪,但滩坝成因、坝砂形态及分布规律等一直存在争议,且未能明确滩坝储层内部砂体的结构特征、叠置样式和规模等。党玉琪等^[12]在研究台南地区沉积相时,由于缺乏连续岩心和储层非均质性资

收稿日期:2023-11-08;修回日期:2024-01-23;录用日期:2024-02-29;网络出版日期:2024-02-29

基金项目:中国石油大学(北京)科研启动基金项目(2462023YJRC034) [Foundation: Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing, No. 2462023YJRC034]

料,仅指出三湖地区第四纪发育湖泊相沉积,但未对微相细分展开研究,也未对三湖坳陷台南地区滩坝沉积总结模式。本文应用台南气田2007年后建立集气站后录取的大量动、静态资料以及台试5井完整的高压取心资料,基于沉积学原理,通过岩心、测井资料与现代沉积卫星影像类比,分析三湖坳陷台南地区涩北组中上段砂质远岸滩坝的沉积微相类型、滩坝展布形态,探寻适合内陆坳陷湖盆远岸砂质滩坝沉积模式,为台南气田滩坝砂体高效开发与利用奠定坚实基础,以期指导相似油田勘探开发。

1 区域地质概况

柴达木盆地西起船形丘状构造、东止南北霍布逊湖、北至陵间断裂、南抵昆仑山,面积约 $3.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。由于上新世末期新构造运动,柴达木盆地沉积中心由西向东整体迁移,使柴达木盆地更新世—全新世的地貌大大改变,第四纪更新世沉积速度达到最大,最大沉积厚度超过2 700 m,是一套稳定的、连续沉积的湖相沉积。台南地区位于青海省柴达木盆地中东部三湖地区(图1a)^[13],紧邻涩北气田,属于柴达木盆地中央坳陷带中部、低凸起背斜顶部,形成大型背斜构造天然气藏。

以台南地区第四纪沉积期为例,下更新世从上至下识别出K0~K13共14层标志层^[12](图1b),研究区沉积期处于K10~K1。台南地区第四纪沉积期物源来自南部昆仑山,在乌图美仁地区附近发育大量扇

三角洲,因常年受单一西北风影响,湖面形成较强的湖浪,湖浪将南部昆仑山物源区三角洲前缘砂体改造、二次搬运再沉积,砂体搬运过程中受古隆起的阻挡,在水下古隆起处形成了范围较大的远岸砂质滩坝,滩坝砂体主要岩性为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩等。垂向上多见砂泥互层。发育沉积构造多样,主要发育小型交错层理、波状层理,在泥岩中可见螺类化石、植物碎屑,指示了台南地区具有水体较浅及水动力较弱的特征。

台南气田主要含气层段为第四纪下更新世涩北组中上段(Q21),包括I~VI层系,21个层组、68个小层,本次研究目的层段为II~V层系,共42个小层,研究过程中应用了261口直井和47口水平井,共308口井的资料。单砂层厚度2~5 m,砂体连通条件好。第四纪成岩作用弱,砂体薄且疏松,储层平均孔隙度为22%,平均渗透率为 $45 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属中孔中低渗透层。2007年之前,研究区岩相、储层资料较为欠缺,台南气田多口取心井岩心采取率较低(<45%),导致生产开发较为困难。台南气田目前已进入全面开发调整阶段,2017—2021年,多数开发井日产水增加6 000 m³,水淹停产井逐年增多,出水形势日益严峻,严重影响了气田的高效开发和持续稳产,是目前台南气田面临的重大挑战。其问题主要聚焦在沉积微相类型不明确,滩坝沉积模式不完善,亟需开展台南地区滩坝内部精细表征,明确沉积微相类型,建立对应滩坝沉积模式。

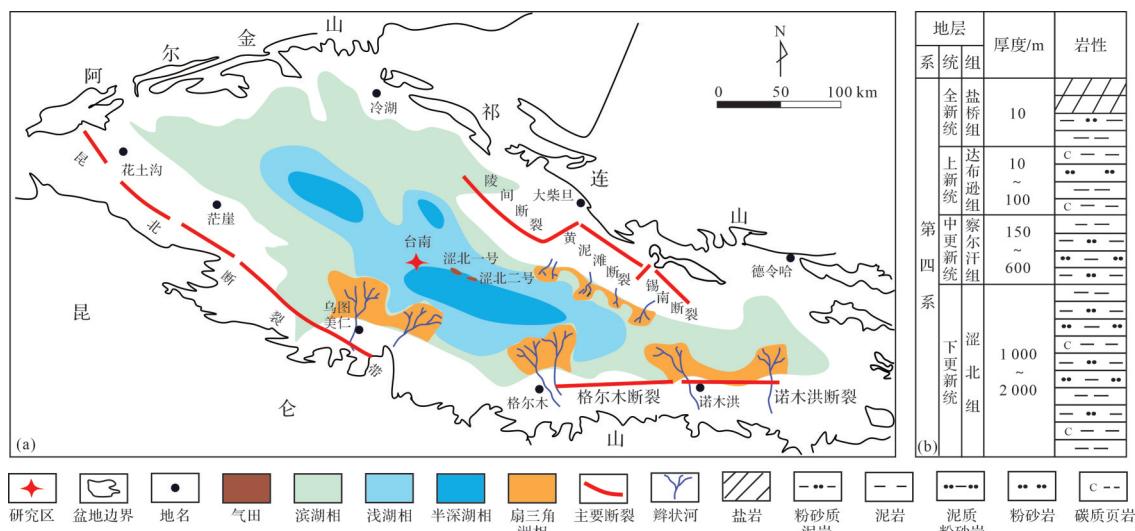


图1 (a)柴达木盆地台南地区第四纪沉积体系;(b)岩性地层综合柱状图(据文献[13]修改)

Fig.1 (a) Sedimentary system and (b) stratigraphic column of Quaternary period in Tainan area, Qaidam Basin
(modified from reference [13])

2 沉积学特征

2.1 岩石矿物特征

台南气田台试5井共分析64块样品,取心可见泥岩颜色为灰白色、浅灰色(图2),根据X射线衍射全岩分析,岩性主要为含泥粉砂岩,其次泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,可见砂泥互层,黏土含量介于10%~54%,平均为23.8%。

基于X射线衍射全岩分析,研究区岩石类型主要为岩屑石英砂岩,石英含量介于6%~50%,平均为34.5%;斜长石含量介于8%~32%,平均为20%;钾长石含量介于1%~20%,平均为7.5%。碎屑颗粒以粉砂为主,成分以石英、长石为主。从分选系数看,最小值为1.28,最大值为4.44,平均值为2.13,分选较好;炭屑普遍存在(图2a,c,d,f);部分泥岩可见植物碎屑(图2e),表明研究区水体可能较浅且水动力较弱。

经分析,方解石含量介于4%~78%,平均为12.9%;白云石含量介于1%~6%,平均为2.3%;铁白云石、石盐平均含量分别为0.3%、0.8%。分析44块黏土矿物相对含量发现,台试5井黏土矿物以伊/蒙混层为主,含量介于29%~63%,平均为43.8%;混层比介于55%~82%,平均为64.5%;其次是伊利石,含量介于24%~55%,平均为38.2%;绿泥石含量介于6%~17%,平均为10.6%;高岭石含量介于5%~10%,平均为7.4%。基于台试5井铸体薄片分析(图2),研究区砂体胶结能力差,泥质胶结物占比较大(图2a~i),其次为方解石,含少量黄铁矿、菱铁矿。泥质呈鳞片一星点结构(图2a~i),成分以伊利石为主。方解石呈泥晶结构(图2c,d),多与泥质相混;黄铁矿零散分布(图2c,d,f),菱铁矿呈泥晶结构,呈团块状分布(图2g);部分见云母碎屑,还可见变质岩岩屑(图2h,i)。

2.2 水动力特征

台南涩北组中上段以反映湖浪作用的沉积构造为特征(图3)。岩心上可见:(1)纯净泥岩,水平层理(图3a,i),可见黑色炭屑(图3a),表示水动力较弱;(2)纯净泥岩夹粉砂质泥,透镜状层理多见(图3b),体现了水体停滞、砂供应不足;(3)泥质粉砂岩、泥岩,砂岩泥质含量高,多见小型低角度交错层理、波状层理(图c,d,e,i),反映了波浪的冲刷作用,但未见冲洗交错层理,表明该地区波浪冲刷作用较弱;

(4)不纯净泥岩,可见螺类化石(图3f,g),表明水体较浅。粉砂质含量增高,此时泥岩纯净度降低,反映了水动力增强、水体动荡性增加、粒度增大、水深变浅。

总体来看,台南地区岩心指示水动力不强。取心段未见红色泥岩,表明台南整体位于湖内枯水面之下;基于台试5井岩心综合柱状图(图4),取心段砂岩整体粒度较细,沉积构造发育水平层理、小型交错层理、波状层理等,泥岩中可见螺类化石(图3f、图4),反映水体能量不高。另外,台南地区岩心中未见冲刷—充填构造,表明此处沉积距离三角洲沉积较远,属远岸沉积。

2.3 粒度特征

基于台试5井和台5-7井取心段所有样本粒度数据的粒度概率累积曲线图(图5a,b),台南地区的滩坝沉积粒度整体为三段式或者多段式,跳跃总体较低,约20%,悬浮总体含量较高,约80%,两者交切点为4.0~4.5 Φ ,反映了砂体粒度较细且搬运方式不同,体现了砂体形成时水动力条件不同。其特点是由3~4条斜率不同的线段构成总体,3.0~4.5 Φ 时累积概率小于等于10%,斜率为20°~30°,此时沉积物为跳跃组分,跳跃总体呈直线,体现了波浪长期回流冲刷改造砂体^[14-15];4.5~6.0 Φ 、6.0~8.0 Φ 范围内呈两段或者三段式,斜率为40°~60°,此时沉积物为明显的悬浮组分。研究样品明显缺乏滚动组分,且跳跃组分少,体现了研究区滨浅湖滩坝沉积物粒度细的典型特征。

参考潘树新等^[16]、王夏斌等^[17]对滩坝砂体粒度的研究,滩坝C-M图投点主要集中在C \in [100, 500]显区,M \in [40, 200]显区,明显区别于一般牵引流沉积。台试5井的C-M图表明(图5c),C \in [60, 300]显区,M \in [40, 100]显区,其投点区与前人研究基本重叠,并且也明显有别于一般的牵引流沉积,反映了水中携带的细粒悬浮砂质沉积物较多,并且受到湖浪反复淘洗。粒度累积概率曲线和C-M图表明研究区为远缘的滨浅湖滩坝沉积体系。

3 沉积微相类型与特征

3.1 岩石相划分

前人多利用岩性、测井曲线、砂体厚度综合考虑滩坝沉积微相划分^[18-20]。通常情况下,坝砂粒度较粗、厚度较大,自然伽马(GR)曲线多呈漏斗状、箱状,以反韵律为主,也可见均质韵律,对于坝砂的微相细

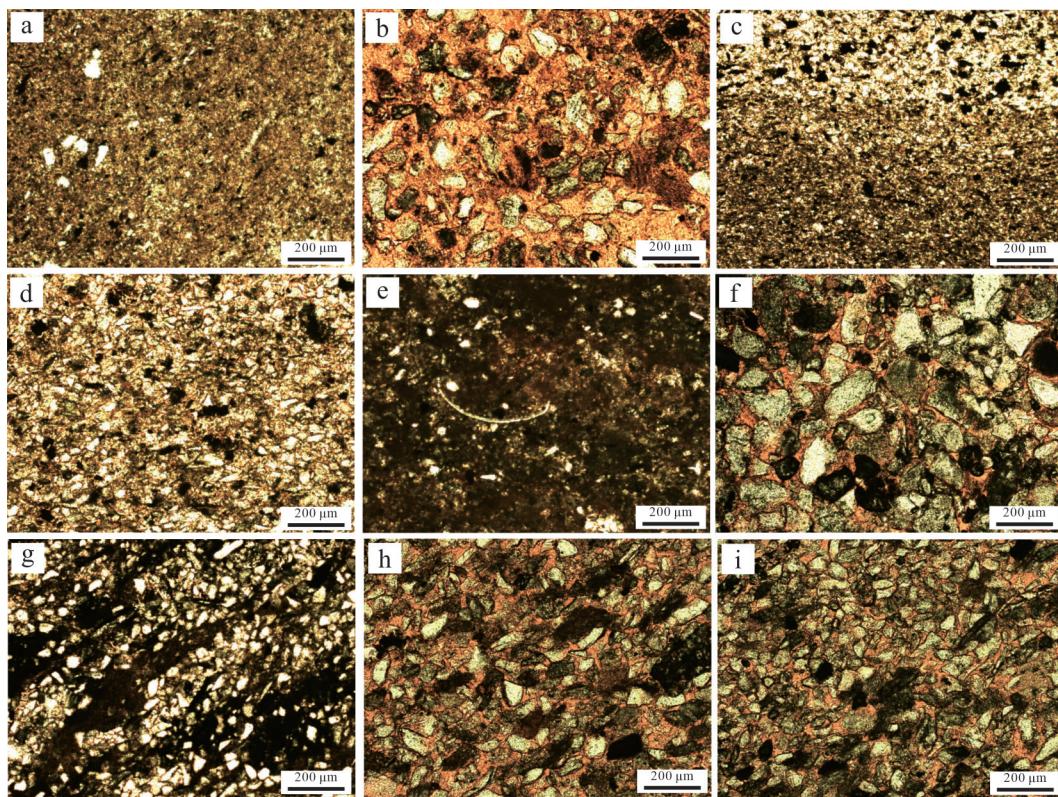


图2 台试5井铸体薄片照片

(a) 1 042.4 m, 粉砂质泥岩, 泥质星点—鳞片结构, 炭屑; (b) 1 042.9 m, 长石岩屑砂岩, 泥质鳞片—星点结构; (c, d) 1 044.4 m, 泥质粉砂岩, 泥质星点—鳞片结构, 黄铁矿零散分布, 炭屑; (e) 1 046.9 m, 泥质含粉砂灰岩, 泥质鳞片—星点结构, 植物碎屑; (f) 1 573.9 m, 含泥细粒长石岩屑砂岩, 泥质鳞片—星点结构, 黄铁矿零散分布, 炭屑; (g) 1 710.3 m, 含泥粉砂岩, 泥质鳞片—星点结构, 团块状菱铁矿; (h, i) 1 712.2 m, 含泥粉砂岩, 泥质鳞片—星点结构, 变质岩岩屑

Fig.2 Photographs of casting thin section, well Taishi 5

(a) 1 042.4 m, sandy mudstone, mud star-scale structure, charcoal; (b) 1 042.9 m, feldspar lithic sandstone, mud scale-star structure; (c, d) 1 044.4 m, muddy siltstone, mud star-scale structure, scattered distribution of pyrite, charcoal; (e) 1 046.9 m, muddy silt-bearing limestone, mud scale-star structure, plant debris; (f) 1 573.9 m, mud-bearing fine-grained feldspar lithic sandstone, mud scale-star structure, scattered distribution of pyrite, charcoal; (g) 1 710.3 m, muddy siltstone, mud scale-star structure, crumb-like siderite structure; (h, i) 1 712.2 m, muddy siltstone, mud scale-star structure, metamorphic rock debris

分多基于GR曲线的齿化程度和波动回返的细微差别;滩砂较坝砂粒度细、厚度薄,GR曲线多为中低幅尖刀状、指状。但坝砂之间有时厚度较相近,滩砂与坝砂的厚度有时也相近,二者之间GR曲线幅度变化并不明显,所以据此进行沉积微相划分过于主观,科学性不强。

台南地区砂岩粒度细,泥质粉砂岩、粉砂质泥岩交互发育,大面积连片分布,井间差异较小,测井曲线幅度差异较小,滩、坝划分不明显,微相细分难度较大。为了解决这一难题,基于研究区岩心、薄片等分析化验资料,发现粒度中值与泥质含量、分选系数有较好的相关性,与渗透率具有一定的相关性(图6),表明粒度中值可以反映其岩性及物性差异。坝砂顶部形成时,水动力最强,沉积物粒度最粗;滩砂边缘形成时,水动力最弱,沉积物粒度最细。据此提出一种新的划分方式,即利用粒度中值差异,反映砂

体形成时的水动力差异和岩性差异,进而反映岩石相差异,该方法不仅能够精细识别不同沉积微相类型,也可以反映砂体间物性的差异。

基于台试5井与台5-7井取心段所有样本的粒度中值累积概率图(图7),其呈明显的三段式,是沉积水动力条件差异的表现,粒度拐点界限值较明显,可以作为划分岩石相的依据。本次将粒度中值=40 μm与粒度中值=30 μm两个拐点值作为区分岩石相差异的两个粒度界限值,总结了四类岩石相特征与测井解释模板(图8),不同的岩相类型是对沉积微相的直接反映,不同沉积微相岩相类型基本不同,四类岩石相特征如下。

细砂岩相可以细分为细砂岩/细砂质粉砂岩相与含细砂粉砂岩相,前者粒度中值大于45 μm,分选系数小于2,渗透率可达 $80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中值压力小于0.3 MPa,压汞曲线平台期明显且平台值低,孔隙结构



图3 台试5井滩坝砂体沉积构造照片

(a) 1 336.8 m, 水平层理, 炭屑; (b) 1 569.6 m, 透镜状层理; (c) 1 338.6 m, 小型交错层理、波状层理; (d) 1 359.0 m, 小型交错层理; (e) 1 347.5 m, 小型交错层理、波状层理; (f) 1 045.3 m, 螺类化石; (g) 1 363.2 m, 螺类化石; (h) 1 697.8 m, 植物碎屑; (i) 1 567.5 m, 水平层理、小型交错层理

Fig.3 Photographs of sedimentary structure in beach-bar sandbody, well Taishi 5

(a) 1 336.8 m, horizontal bedding, charcoal; (b) 1 569.6 m, lenticular bedding; (c) 1 338.6 m, slight cross-bedding, wavy bedding; (d) 1 359.0 m, slight cross-bedding; (e) 1 347.5 m, slight cross-bedding, wavy bedding; (f) 1 045.3 m, spiral fossils; (g) 1 363.2 m, spiral fossils; (h) 1 697.8 m, plant debris; (i) 1 567.5 m, horizontal bedding, slight cross-bedding

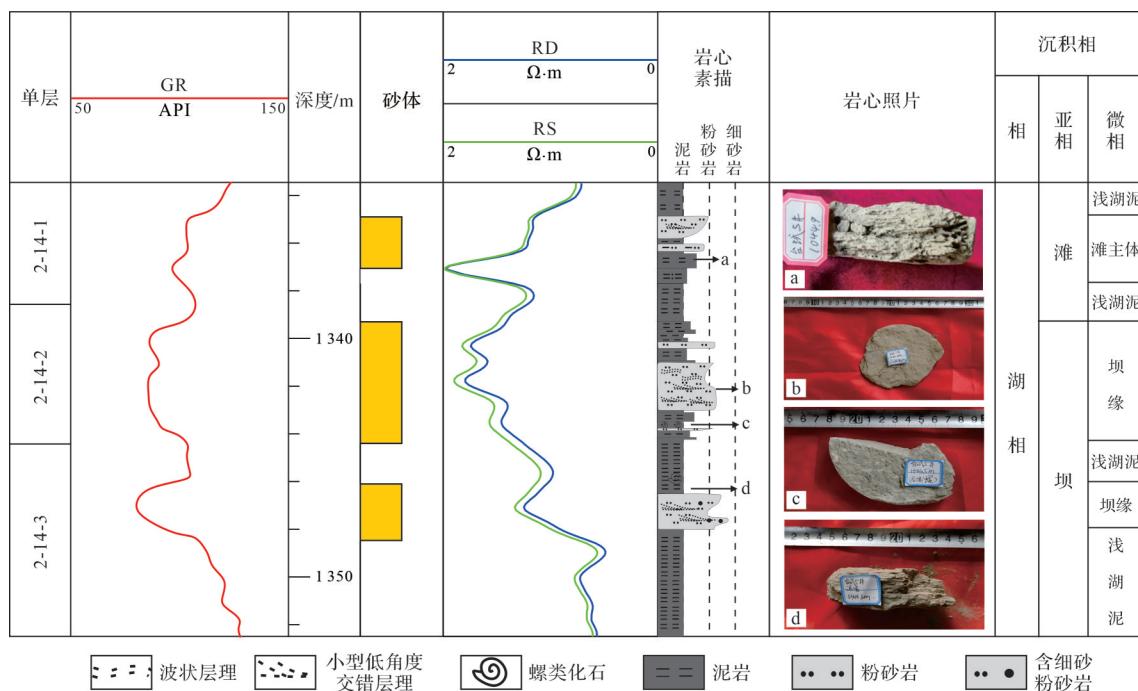


图4 台试5井综合柱状图

Fig.4 Comprehensive histogram of the well Taishi 5

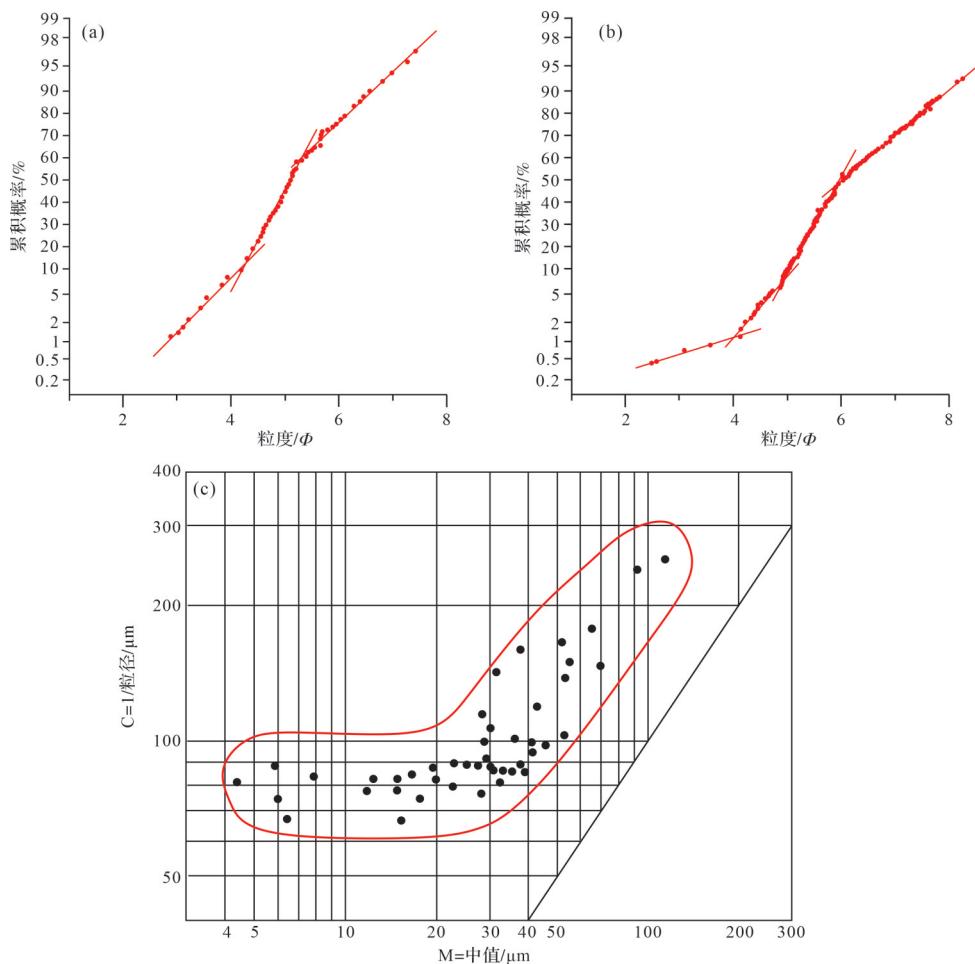


图5 台南地区粒度概率累积曲线图及C-M图

(a)台5井,1 042.8~1 716.7 m;(b)台5-7井,1 019.2~1 125.6 m;(c)台5井C-M图

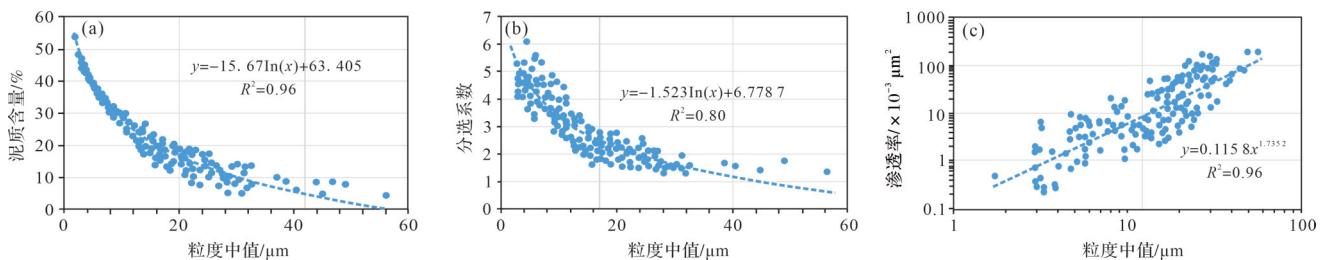
Fig.5 Grain size cumulative frequency curves and C-M diagram for Tainan area
(a) well Taishi 5, 1 042.8~1 716.7 m; (b) well Tai 5-7, 1 019.2~1 125.6 m; (c) C-M diagram for well Taishi 5

图6 粒度中值与(a)泥质含量、(b)分选系数、(c)渗透率的相关性

Fig.6 Median particle size vs. (a) mudstone content; (b) separation factor; and (c) permeability

以粒间孔为主,此时水动力最强,沉积厚度也最大;后者的粒度中值介于40~45 μm ,分选系数小于2,渗透率介于 $(60\sim80)\times10^{-3} \mu\text{m}^2$,中值压力介于0.3~0.8 MPa,其压汞曲线平台明显且平台值较低,孔隙类型以粒间孔为主,接触关系主要为点接触,也存在线接触,此两种岩相为相同环境下水动力细微差异所决定,渗透率高,分选好;粉砂岩相的主要岩性为粉

砂岩,粒度中值介于30~40 μm ,分选系数小于2,渗透率介于 $(40\sim60)\times10^{-3} \mu\text{m}^2$,中值压力介于0.8~1.2 MPa,压汞曲线平台变高,孔隙类型为残余粒间孔隙,渗透率中等,分选较好,接触关系为线接触;含泥粉砂岩相岩性为含泥粉砂岩,粒度中值介于15~30 μm ,分选系数介于2~4,渗透率介于 $(10\sim40)\times10^{-3} \mu\text{m}^2$,中值压力大于1.2 MPa,压汞曲线平台更高,孔

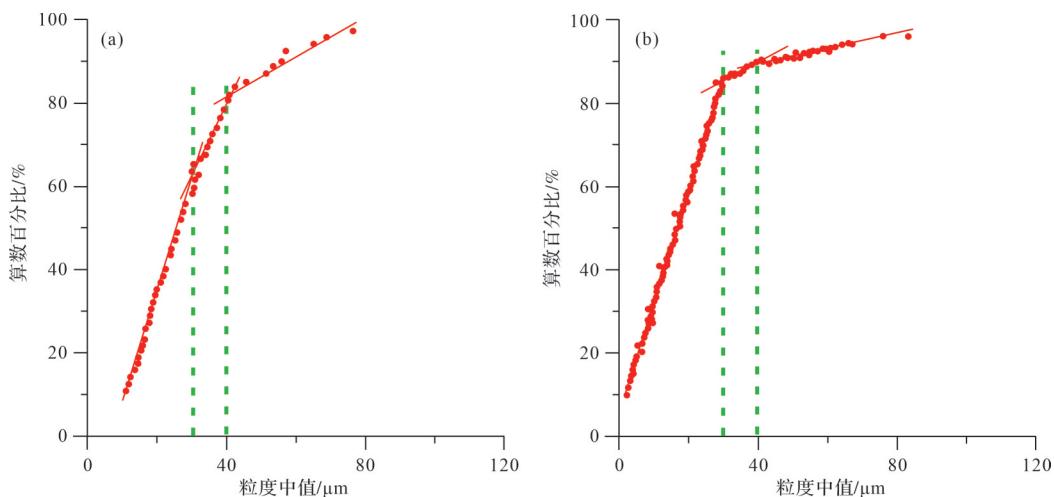


图7 台南地区粒度中值累积概率曲线图

(a)台试5井,1 042.8~1 716.7 m;(b)台5-7井,1 019.2~1 125.6 m

Fig.7 Cumulative frequency curves of median particle size for Tainan area

(a) well Taishi 5, 1 042.8-1 716.7 m; (b) well Tai 5-7, 1 019.2-1 125.6 m

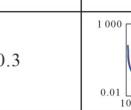
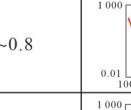
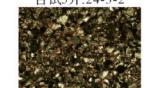
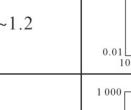
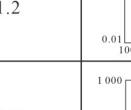
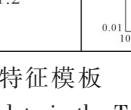
岩石相	岩性	粒度中值/μm	分选系数	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	中值压力/MPa	压汞曲线	铸体薄片	扫描电镜
细砂岩相	细砂岩/细砂质粉砂岩	>45	<2	>80	<0.3			—
	含细砂粉砂岩	40~45	<2	60~80	0.3~0.8			台5-7: 18 1/2-3-4B
粉砂岩相	粉砂岩	30~40	<2	40~60	0.8~1.2		—	台5-7: 18 1/2-3-4B
含泥粉砂岩相	含泥粉砂岩	15~30	2~4	10~40	>1.2			台5-7: 22 1/2-2-14
泥质粉砂岩相	泥质粉砂岩	<15	>4	<10	>1.2			台5-7: 11 1/2-2-7A

图8 台南地区岩石相特征模板

Fig.8 Rock facies characteristics template in the Tainan area

喉半径较小,孔隙类型以粒内孔为主;泥质粉砂岩相岩性为泥质粉砂岩,粒度中值小于15 μm,分选系数大于4,渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中值压力大于1.2 MPa,孔隙发育程度非常低,黏土含量高,孔隙类型多为晶间孔或溶孔,此时水动力最弱。

3.2 沉积微相划分

湖泊滩坝包括滩、坝两种沉积体^[21],滩是在湖泊侧缘形成的碎屑物,由波浪作用垂直岸线进行搬运,在滨浅湖地区形成席状、连片状的薄层砂体;坝也为

湖泊侧缘形成的碎屑物,由沿岸流、波浪作用共同主导平行或斜交岸线进行二次搬运后形成的条带状、透镜状或不规则形状的砂体,厚度较厚。

对于坝砂和滩砂的内部细分,前人将坝亚相划分为坝主体、坝中、坝中心、坝侧缘、坝侧翼微相等次级单元,将滩亚相划分为滩脊、内缘滩、近岸砂滩、滩、滩主体、滩席、外缘滩、远岸砂滩、滩间、滩缘等次级单元^[14,20-24],基于滩、坝之间并无真正的定量化界限值,可将湖泊基准面高低作为滩与坝的划分标准,滩

坝砂体较薄,但滩砂和坝砂之间厚度也存在差异(图9),为了更好地表征垂向上较厚滩坝之间的差异,有必要进行滩与坝的微相细分。

砂坝发育形态、规模及保存状况受多因素综合决定^[21]。在同一湖泊基准面下,有些坝砂明显呈凸起状出露水面,而有些坝砂仅略高于水面,此时用坝主体和坝缘来区别两种坝砂的物性差异;滩砂多沉积于水下或与湖岸线相接,呈席状、连片状展布,滩主体部分和边缘呈环带状或连片状分布于坝砂外围。台南地区处于开阔且地形宽缓的滨浅湖区域,在沿岸流、湖浪的作用下,将南部昆仑山的(扇)三角洲砂体改造再长距离搬运后形成远缘砂质滩坝,发育透镜状、弯月状砂体,几乎不发育条带状的坝脊,前人的命名并不适合台南,故参考邱隆伟等^[21]的微相划分方案,在台南地区滩、坝亚相的基础上,进一步识别了坝主体、坝缘、滩主体、滩缘、浅湖泥五种微相类型(图9)。同时考虑油气田后期开发,识别出坝主体的坝物性强于仅识别出坝缘的坝(取决于同一湖泊基准面砂体出露湖面高度),可以对垂向上较厚滩坝的物性差异较为准确地表征,以期为滩坝后期分层系生产开发提供指导。同时,以粒度中值为纽带,根据岩石相类型,建立岩相与测井曲线响应关系,确定微相测井解

释标准与动态响应。坝主体、坝缘、滩主体、滩缘、浅湖泥分别对应细砂岩相、粉砂岩相、含泥粉砂岩相与泥质粉砂岩相,具体特征如下。

坝主体粒度中值普遍大于45 μm ,渗透率大于 $80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,GR曲线幅度大,特征多为漏斗状或箱状,不见钟形,齿化程度弱,无阻流量多大于 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$;坝缘的粒度中值普遍在40~45 μm ,渗透率较大,普遍在 $60\sim 80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,GR曲线幅度较大,特征多为漏斗状或箱状,不见钟形,齿化程度较弱,无阻流量多大于 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$,二者粒度中值总体相差较小,可用渗透率大小界定微相类型,坝主体较坝缘渗透率高,与细砂岩/细砂质粉砂岩和含细砂粉砂岩两种岩性对应较好。滩砂的划分主要依据粒度中值、渗透率和GR曲线的形态进行界定,滩主体粒度中值较滩缘高,平均为30 μm ,渗透率平均值约为 $40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,GR曲线多为尖刀状、齿状,无阻流量多小于 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$;滩缘粒度中值基本在20 μm 或以下,渗透率最低,平均为 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,测井曲线多为齿状、指状,齿化程度高,无阻流量多小于 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$,滩缘较滩主体泥质含量高,分选差,与粉砂岩相和含泥粉砂岩相有较好的对应。浅湖泥不属于滩坝沉积体系,但上述特征与滩缘相近。

相	亚相	微相	粒度中值/ μm	GR幅度/API	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	曲线形态	无阻流量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	典型模板
滨 浅 湖	坝	坝主体	>45	>30	>80	漏斗状或箱状 少见钟形 齿化程度弱	>25	台6-27
		坝缘	40~45	20~30	60~80	漏斗状或箱状 少见钟形 齿化程度较弱	>20	台5-16
	滩	滩主体	30~40	10~23	30~60	齿状尖刀状	<20	台5-16
		滩缘	15~30	<10	10~30	齿状指状	<15	台5-16
浅湖泥			<10	<5	<10	低幅微齿状 或近平直	—	台6-30

图9 台南地区沉积微相特征与测井解释模板

Fig.9 Sedimentary microfacies characteristics and logging interpretation template in the Tainan area

4 沉积微相分布特征

对于沉积微相分布特征的研究,一般是以现代沉积、古代露头、研究区密井网的解剖、水平井段分析等进行指导。为了使得类比更加可靠,需要考虑类比对象的各类因素,例如类比地区的风速、古构造、水体深度、沉积环境、物源供给、沉积砂体发育形态等。

青海湖为断陷湖盆,从波浪传播方向看,青海湖常年盛行西北风,波浪自西向东传播,波浪作用较强,说明水动力可以控制滩坝砂体的形成,规模较大的滩砂主要发育在湖盆东岸(如洱海地区)、北岸及南岸。风浪的传播方向对滩坝沉积的分布格局有着显著的控制作用,正向入射波浪与斜交入射波浪分别形成平行岸线与斜交岸线砂坝的格局^[8]。综合考虑几项影响滩坝发育的因素,发现青海湖与研究区沉积背景有所差异(表1),主要为湖盆背景及水深与研究区差异较大,所以需要开展更加类似的现代沉积类比工作。田吉兹湖滩坝为三角洲前缘改造形成,物源供给充足;风力较强,风向单一,导致田吉兹湖滩坝数量多且形态不对称;田吉兹湖处于坳陷背景下,水体较浅,平均为7 m,导致了滩坝数量多且靠近湖盆中心发育;三角洲前缘供给的沉积物较细,导致了田吉兹湖滩坝的粒度也较细。基于以上的相似点(表1),本次选取田吉兹湖现代沉积滩坝进行类比,验证台南地区沉积微相分布的可靠性与合理性。

4.1 现代沉积类比

田吉兹湖位于哈萨克斯坦北部,主要环境为草原及半沙漠地区,本次选定卫星图像位于50°18' N, 69°01' E。该地区风向为北西向,风速达到4~6 m/s,风力较强,湖浪作用明显,湖浪方向沿着北西方向。田吉兹湖由努拉河流和库拉努特佩斯河供源形成了小规模的三角洲—滩坝沉积,物源供给较充足。在强西北风的作用下,湖浪作用随之变强,湖浪的强弱进一步控制砂体的发育形态。观察现代沉积卫星影像发现田吉兹湖滩坝发育面积较广,可发育于三角

洲前缘、侧缘,也可发育于湖盆中心(图10),受控于湖浪,坝砂垂直于西北风向延伸,延伸方向统一。

田吉兹湖受到单一风向(北西向)的影响,导致湖浪的流动方向也为北西向,现代沉积可见风浪控制的坝砂斜列式分布,可发育在沿岸部位,也可发育于湖中央。坝砂呈透镜状、弯月状,顺风向弯曲,长宽比呈线性正相关,长宽比平均约为5(图11)。在此湖泊基准面下,可见坝砂明显出露水面,分布于滩砂之上,本次将田吉兹湖明显出露湖泊基准面的坝砂顶部识别为较厚的坝主体微相,出露基准面较低的坝砂定义为较薄的坝缘;滩砂分布于坝砂周缘,呈较薄连片状,仅低水位期出露,长宽比低,可以细分为较厚滩主体与薄滩缘。

台南地区整体为坳陷的背景,其滩坝也由三角洲前缘改造而成,物源供给充足,风力较强,以北西单向风为主,沉积的坝砂数量多且形态不对称,水体较浅且地形平缓,可以沿岸形成滩坝也可以在湖盆中心形成滩坝;物源供给的沉积物粒度较细,所以形成的滩坝沉积砂体粒度较细。在此之前,滩坝的形态大多被描述为土豆状、条带状、椭圆状等^[25-28],但现代沉积可见田吉兹湖滩坝的坝砂呈透镜状、弯月状,且田吉兹湖与研究区滩坝的沉积背景最为相似,可为研究区滩坝沉积模式提供指导,其滩坝规模与研究区可能存在一定的差异,但坝砂的发育形态、长宽比可供参考。

4.2 密井网区砂体分布形态分析

4.2.1 剖面展布规律

以2-7-1单层为例,解剖该层两个坝砂,基于构型剖面(图12),砂体厚度为2~5 m,测井曲线形态多呈反韵律的漏斗状与指状。侧向上滩缘出现,意味着出现滩坝砂体的外侧,即存在复合滩坝边界;坝缘/滩主体表现为环带状绕坝主体分布。即滩主体是滩坝的外缘,坝缘是滩坝的内缘;坝主体砂体厚度较大,根据相序原则,坝主体与坝主体之间应至少存在坝缘微相。

在侧向划界综合解剖密井网区域后,可见滩砂

表1 研究区与田吉兹湖、青海湖相似性对比

Table 1 Similarity comparison between the study area and Tengiz Lake and Qinghai Lake

	风向	风力/(m/s)	水深/m	坝砂形态	沉积背景
研究区	北西	4	8~15	弯月形、透镜状(顺风向弯曲)	坳陷湖盆
田吉兹湖	北西	4~6	6~8	弯月形、透镜状(顺风向弯曲)	坳陷湖盆
青海湖	北西	4	21	弯月形(顺风向弯曲)	断陷湖盆

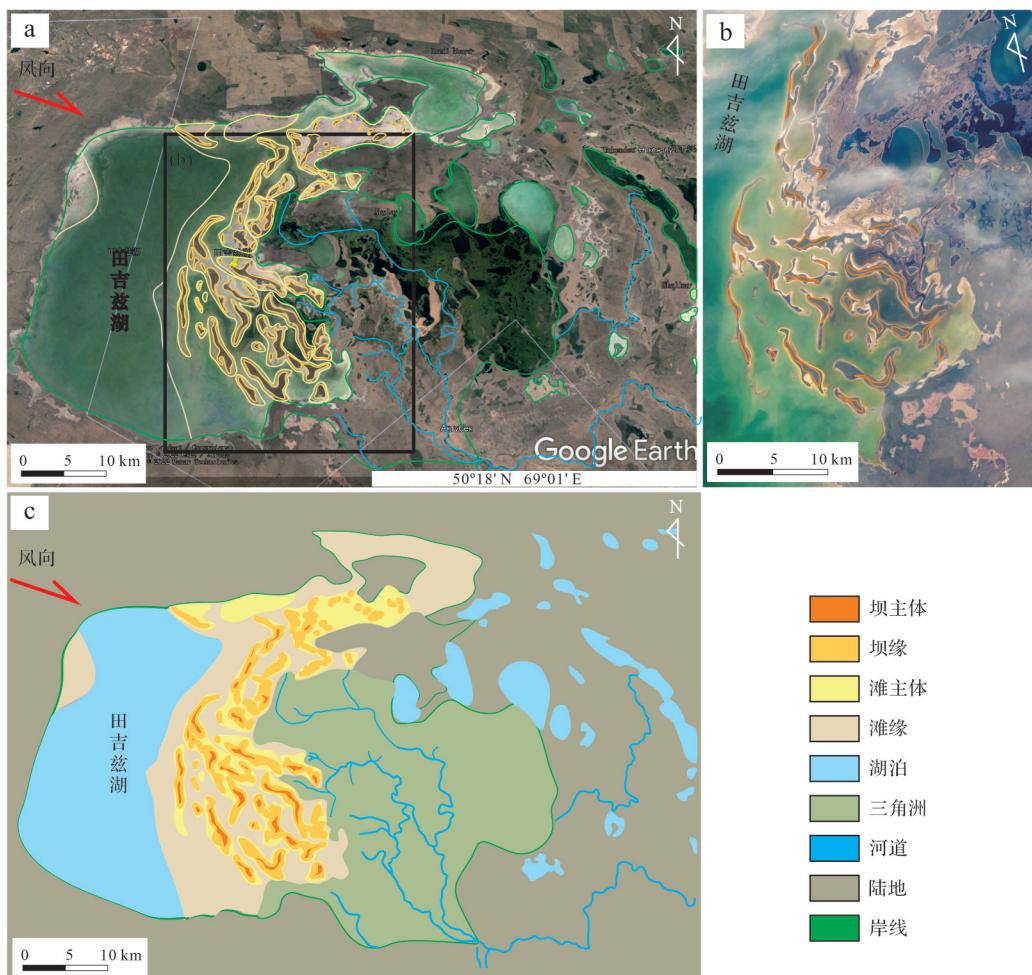


图10 (a)田吉兹湖三角洲—滩坝卫星影像;(b)田吉兹湖坝主体;(c)田吉兹湖沉积模式

Fig.10 (a) Satellite image of the Tengiz Lake delta-beach bar; (b) bar core in Tengiz Lake;
(c) depositional model of Tengiz Lake

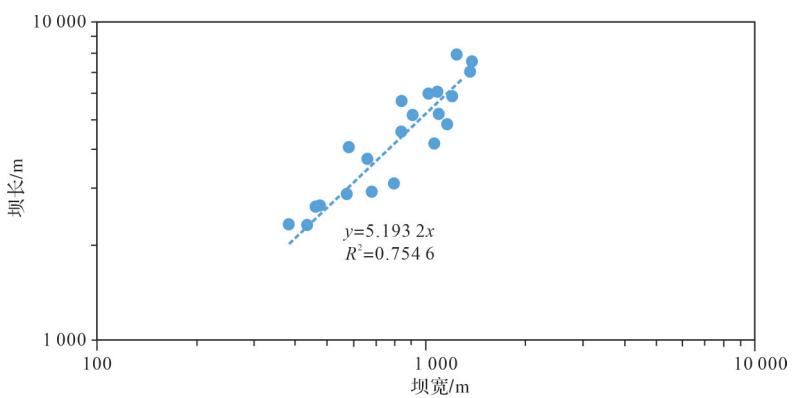


图11 田吉兹湖坝砂长—宽关系图
Fig.11 Length vs. width of sand bar in Tengiz Lake

与坝砂伴生。坝砂砂体厚度较厚(大于3 m),剖面形态呈底平顶凸、中部厚边部薄的特征,与滩砂侧向拼接;滩砂砂体厚度较薄(小于3 m),与坝砂侧向拼接,延伸较远,与现代沉积相符。

4.2.2 平面展布规律

涩北组中上段沉积时期台南地区地形宽缓,滩坝为主体沉积,台南全区发育。以现代沉积为指导,基于研究区砂体测井曲线特征、剖面特征(图12),

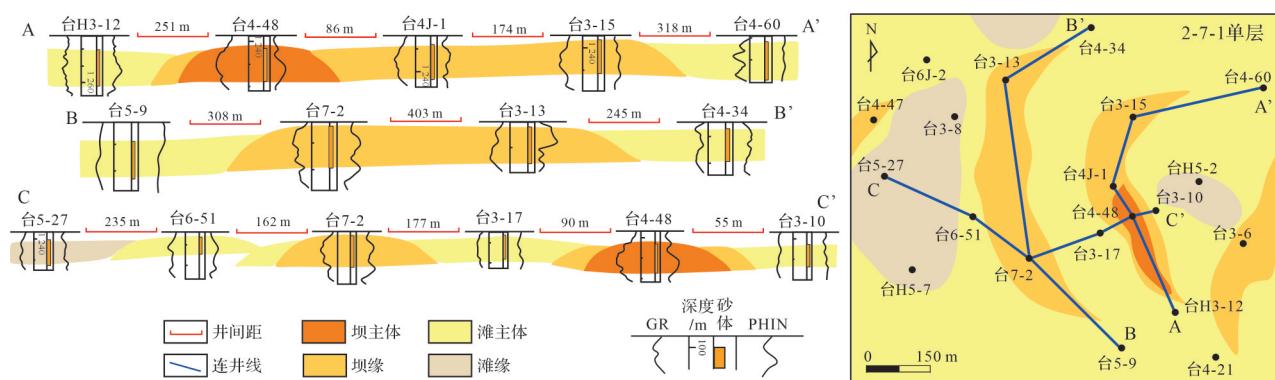


图 12 台南地区 2-7-1 单层平面及剖面构型解剖成果

Fig.12 Anatomy of 2-7-1 single-layer plane and well profiles in Tainan area

2-7-1 单层中(图 13a),研究区长轴方向为北西—南东向,坝砂呈透镜状、弯月状分布于滩砂中,坝主体发育于坝砂顶部,坝砂延伸方向垂直于北西方向;滩砂大面积分布于坝砂周缘,侧向上呈席状、连片状展布,展布方向与南部昆仑山物源方向垂直,与田吉兹湖滩坝发育形态近似。

考虑滩坝之间并无定量化界限值,在同一湖泊基准面下,出露湖平面的砂体识别为坝砂,以砂体出露湖面的高低作为判断每一个坝砂物性强弱的标准,识别出坝主体的坝砂(出露湖平面较高)物性强于识别出坝缘的坝砂(出露湖平面较低)。可见 2-14-3 单层中(图 13b),识别出坝主体的坝砂明显多于 2-7-1 单层,表明 2-14-3 单层坝砂整体物性强于 2-7-1 单层,体现了微相细分的意义;2-17-2 单层可见(图 13c),该单层内井的优势相为坝缘,坝主体呈弯月状分布于坝缘中,表明该单层砂体物性好,可作为后续重点开发层位。基于图 13 滩坝沉积微相形态可得,滩主体为研究区井网优势相的情况下,坝缘呈弯月状分布于滩主体之上,坝主体呈弯月状分布于坝缘之上,滩缘呈连片状分布于滩主体周缘;当坝缘为研究区井网的优势相时,坝主体呈弯月状分布于坝缘之上,滩主体及滩缘呈连片状、裙带状分布于坝砂周缘。

结合滩坝砂体剖面特征与平面特征,经统计,坝砂的平均长度约 1 250 m,平均宽度约 250 m(坝砂长宽比约为 5);坝主体发育于坝砂顶部,规模较小,平均长度约 600 m,平均宽度约 125 m。坝砂的长度、宽度呈线性正相关关系,与田吉兹湖现代沉积高度吻合。基于 2-7-1~2-17-2 单层的平面特征,由上到下体现了垂向上每一期坝砂的物性差异特征,表明细分滩、坝沉积微相可解决某些单层厚滩坝难以准确表征的问题。

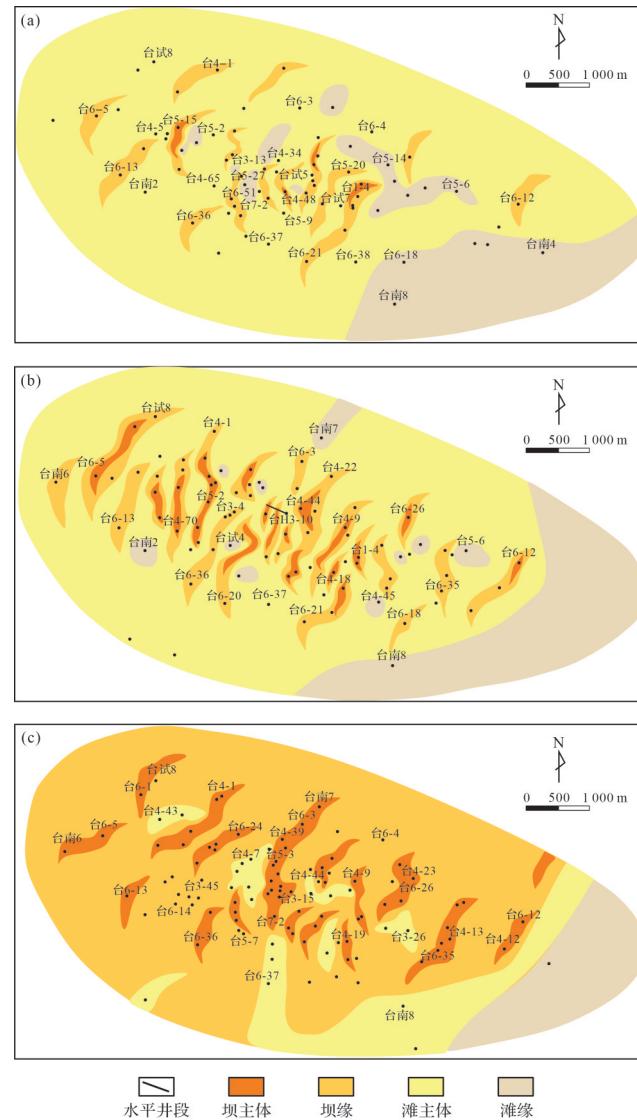


图 13 台南地区沉积相平面图

(a)2-7-1 单层;(b)2-14-3 单层;(c)2-17-2 单层

Fig.13 Sedimentary facies plane distribution

in the Tainan area

(a) 2-7-1; (b) 2-14-3; (c) 2-17-2

4.3 解剖结果验证

4.3.1 水平井段分析与验证

精细解剖台南气田密井网区后,根据剖面形态与平面展布规律确定了坝砂的形态和延伸方向,与现代沉积较相符。分析台H3-10水平井段GR曲线的变化,可以确定单一坝的边界。基于台H3-10井的测井资料,可以在水平井段2-14-3单层划分出两个坝砂,整体呈反韵律的漏斗形,其中坝主体的测井曲线幅度大,GR值表现极低,在坝砂中能够较好识别。

随着井深增加,可解释为滩主体—坝缘—坝主体—坝缘—滩主体—坝缘—滩主体的相序模式(图14),坝主体的宽度约为100 m。这一

解剖结果证明了研究区坝砂不呈连片状,可能为横向较薄的透镜状(图15),与剖面、平面特征较匹配。

4.3.2 生产动态验证

在油气藏生产开发中,示踪剂的推进受控于砂体渗透率高低影响,不同沉积微相渗透率不同,所以为了验证微相划分的准确性,可以利用示踪剂的推进方向、监测井见剂情况等进一步验证微相划分的合理性。台南气田针对IV-1层组2-17-2单层进行示踪剂分析(图16),以台4-43井组为例,注剂井为台4-43,监测井为台H4-9、台4-41、台H4-8、台3-43,与台4-43的井距分别为615 m、463 m、782 m、963 m,注剂时间为2020年12月21日,注入示踪剂为3,5-F2BA,注入量为17.5 kg。

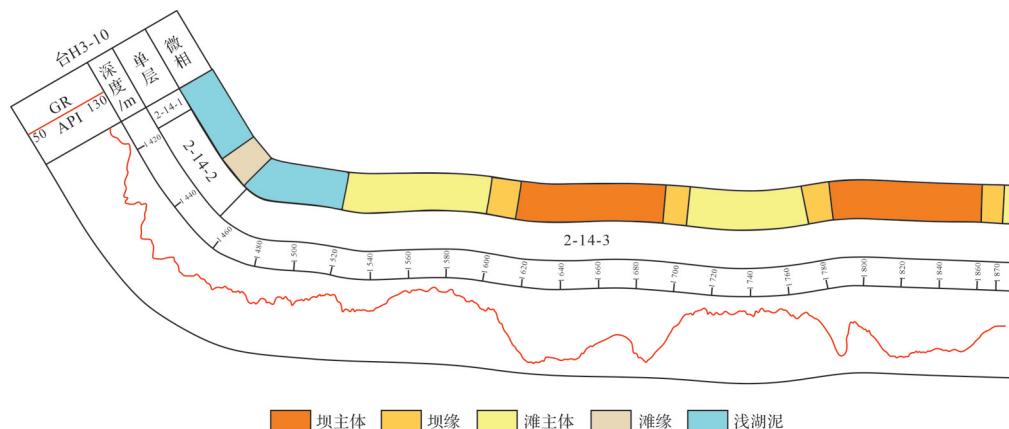


图14 台H3-10井单井解释图

Fig.14 Single-well interpretation diagram of well Tai H3-10

可见在此井组下,台H4-9井与台4-41井见剂(图16),注剂井台4-43处于滩主体微相中,台4-11、台H4-9两口监测井都处于坝缘微相中,且台H4-9井与台4-43井之间还有一个坝主体相隔,表明坝砂的延伸方向控制了示踪剂走向,表现为:从井间距上看,距离注剂井较近的监测井先见剂,较远端的监测井可能被储层之间渗流屏障拦截;从见剂方向上看,滩主体—坝缘的延伸走向优先,说明较高渗透率砂体是示踪剂运移的优势通道;从微相类型与渗透性上看,可见示踪剂向台H4-9井运移时,途经坝主体,使监测井台H4-9见剂,坝主体为强渗透率微相类型,即为示踪剂运移的优势通道;基于台6-6井至台5-12井形成坝主体的形态,在示踪剂流向台5-12井时,导致台4-41井优先见剂,可说明坝主体渗透率强于坝缘及其滩主体,也体现了坝砂微相细分的意义。

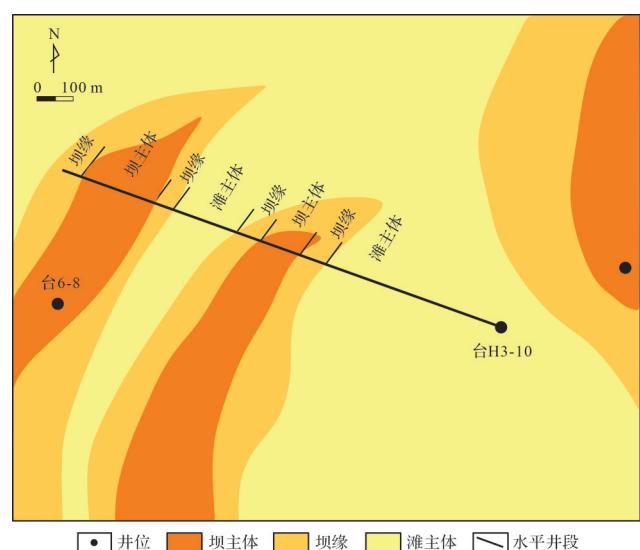


图15 台H3-10井2-14-3单层水平段附近

沉积微相平面图

Fig.15 Microfacies plan near the 2-14-3 single-layer horizontal section of well Tai H3-10

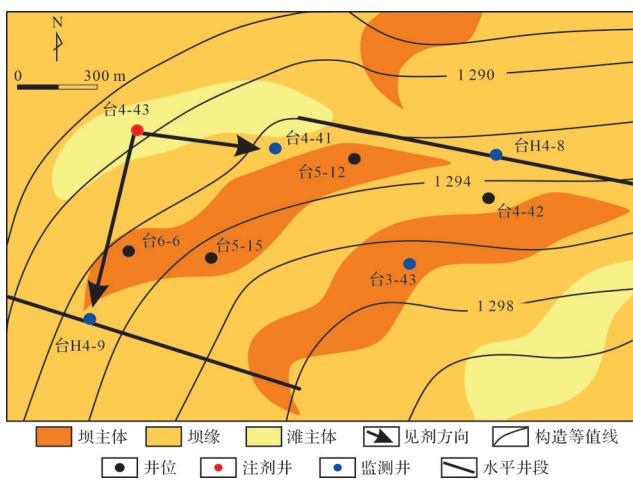


图 16 台 4-43 井组见剂情况

Fig.16 Tracer distribution in well group well Tai 4-43

5 滩坝砂体形成机制及模式

滩坝砂体广泛发育于古代、现代湖盆中,古地貌、古构造、古季风、古水深、古物源等均对滩坝砂体的形成有较大影响^[2,18,29-31]。因此,将各类影响滩坝发育因素耦合,可为解释滩坝砂体成因及建立沉积模式提供良好的理论指导。

5.1 古构造与古地貌

盆地构造运动影响陆相湖盆滩坝体系发育,例如济阳坳陷的碎屑岩滩坝沉积体系发育最迅速的两个时期,一为强烈的裂陷作用时期,二为断坳转换期^[32]。同理,湖盆经过强烈构造运动之后形成的宽缓古地貌特征,同样对滩坝发育及分布有着重要影响^[33],湖盆坳陷期,湖泊面积较大、水体较浅、地貌宽缓,最有利于滩坝沉积的形成^[34]。1993年,Cohen *et al.*^[35]对断陷湖盆的滩坝沉积进行分析后得出,地形较为宽缓的滩坝砂体分布广,达数百米,地貌较陡的地形的滩坝砂体分布局限于几十米左右,表明湖泊的地貌越宽缓,越有利于形成滩坝。从湖盆微观古地貌来看,不同微观古地貌在不同的物源供给条件下对滩坝的形成有不同的控制作用,总体,滩坝发育最有利的部位有水下古隆起地貌、鼻状构造等。

喜山运动晚期以后,由于青藏高原强烈隆升,大大改变了湖盆的古地貌,湖盆的沉积中心逐渐转移到三湖地区,自此三湖地区形成了宽缓的古地貌。K13~K11时期,第四纪开始沉积,驼峰山西至伊克雅乌汝已经形成背斜构造;K11~K10时期,涩北二号背

斜构造开始形成;K10~K9时期,涩北二号、盐湖地区同沉积背斜形态更加明显,台南地区地层相对较厚,此时背斜尚未形成;K9~K7时期,台南同沉积背斜开始形成,在北斜坡所有同沉积背斜中形成时间最晚;K7~K1沉积时期,台南同沉积背斜在接受沉积的同时逐渐隆升,形成了古隆起地貌^[36]。当湖泊逐渐侵入盆地时,湖水面积逐渐变大,且形成了非常宽缓的湖泊沉积相带,台南地区处于坳陷湖盆的中央部位,离湖岸较远,受湖浪、岸流的共同作用,水中的同沉积背斜低角度隆起,阻挡了砂体推进,在此处形成滩坝^[37]。

5.2 古季风

亚洲气候以东部的湿润季风气候和西部的干旱气候为主。柴达木盆地自喜山运动晚期之后,青藏高原隆升,特提斯海萎缩,导致陆地面积增大,海陆热力差异明显增大,使季风作用显著增强;至晚渐新世,可能受到喜马拉雅山的生长、高原隆升以及全球增温的多种因素作用的控制,季风快速向北西方向推进,进入温带可达北纬约36度以北的区域,自此类似现代季风系统格局形成^[38]。

施雅风等^[39]提出在25~17 Ma青藏高原面隆升达到2 000 m高度,与当时大陆和海洋环境耦合,激发了亚洲季风,替代了先前的行星风系,导致古近纪中期我国季风环境大变化。孙湘君等^[40]提出古近纪宽阔的干旱带由西向东横跨中国大陆,而新近纪至今的干旱区带仅局限在中国的西北部地区;安芷生等^[41]综合上述地质记录和数值模拟结果,再现了中新世以来青藏高原阶段性生长事件。在24~20 Ma和16~14 Ma,喜马拉雅山脉和青藏高原中南部隆升生长,造成亚洲季风的初步建立和发展,西北内陆干旱区出现并扩展。在随后10~7 Ma以及3.6~2.6 Ma的青藏高原,尤其是北部和东北部区域经历了二次明显的构造隆升和生长事件,导致东亚地区的冬、夏季风的强烈发展以及内陆干旱区的扩大和干旱程度的显著加剧,奠定了我国现代季风—干旱环境的格局,干旱的环境更易于沉积物被改造。

为了验证柴达木盆地东、西部主风向的差异,根据柴达木盆地内5个区域自动站(日森、涩北、香日德、纳赤台和克鲁克)风向资料^[42]发现区域自动站之间亦具有差异,即东部主风向为偏东风、较分散,西部主风向为偏西风且较集中,盆地南部各站主风向为偏西风。主风向频率介于10.82%~19.25%;最大为

诺木洪站,最小为大柴旦站。从区域来看,北部各站的主风向频率小于南部各站点,东部站的主风向频率介于盆地南部和北部之间。下更新世涩北组沉积期的古季风方向可以类比现代季风系统,但强弱略有差异,柴达木盆地的古风向为西北风,约为北偏西45°。台南地区2023年平均风速为4 m/s,最大风速可达22 m/s。

综上,台南地区风速较大,较强的风力有利于形成较大的湖浪,而湖浪的强弱对滩坝砂体的形成与分布有控制作用。以青海湖为例,作为内陆断陷湖盆,常年盛行西北风,形成了较强的湖浪,可在沿岸形成滩坝,坝砂呈透镜状顺西北方向弯曲,而台南地区风向、风速均与青海湖地区的风向、风速相似,故台南地区也可能发育由西北风控制的滩坝沉积。

5.3 古物源

物源是控制沉积物形成的物质基础。对于开阔滨浅湖的滩坝沉积,物源区砂体主要受湖浪作用的改造,所以物源供给充足与否,决定了形成滩坝的类型^[2,8]。在物源富集处,砂质滩坝非常发育,在物源匮乏处,常形成碳酸盐岩滩坝。

三湖坳陷周缘可见昆仑山、阿尔金山、祁连山、埃姆尼克山等,均有为台南主力气田区提供物源的能力。刘群明^[29]通过台南地区重矿物相对丰度、重矿物稳定性、重矿物组合类型和砂地比进行分析,得出台南主力气田区的物源供给来自南部的昆仑山,物源供给充足。昆仑山前由间歇性洪水等作用形成冲积扇后到中部由辫状河水道进行运输,在昆仑山前向盆地中部形成了大面积的(扇)三角洲沉积,三角洲沉积规模较大可从格尔木、乌图美仁地区延伸到那北区域,与台南气田距离相距不远。所以三角洲前缘砂体受较强的湖浪作用改造、搬运,受台南地区古隆起阻挡,在古隆起处形成了大面积的滩坝沉积。

5.4 古水深

依据水深的变化范围,在湖泊中可识别出四个水动力分带面,分别为洪水面、枯水面、正常浪基面、风暴浪基面,据此将湖泊相划分为滨岸、浅湖和深湖三个亚相^[18]。其中滨岸相处于正常浪基面之上,水动力复杂而强烈,是发育滩坝的主力场所。

古近纪喜山作用后,柴达木盆地东部古地形平缓,因此,当湖水侵入本区时,湖水面积就一直较大,形成了相当宽缓的湖泊沉积相带。更新世初期,湖

泊水体自西向东变浅,除台南一线以西因沉降较快处于浅湖一半深湖相带外,大部分地区水体动荡,时常发生大面积的湖进、湖退。大约在早更新世晚期,由于大气降水补给减少,湖盆开始缓慢退化萎缩,半深湖区逐步减少,区域沉积以滨浅湖沉积为主,河流三角洲从盆地南北缘向坳陷部位推进;湖泊中心转移到布逊湖附近,滨浅湖仅限于中央坳陷区。更新世中期(K9~K5),这一时期三湖地区湖泊范围进一步扩大,此时发育浅湖的范围也为空前,湖泊边缘的环状滨湖继承了更新世早期特征,但范围有所扩大。晚更新世(K5~K2),湖泊沉积稳定,湖泊面积大,台南地区始终处于滨浅湖相带内,水深维持在8~15 m,较浅的古水深为台南地区滩坝的发育提供了有利环境。

5.5 沉积模式

基于田吉兹湖现代沉积类比、密井网区解剖、水平井分析和生产动态验证的结果。考虑滩坝砂体成因并非单因素控制,古构造、古地貌、古季风的风力和风向、古物源充足与否、古水深的深浅,以上多因素共同控制了滩坝砂体的发育。古环境因素决定砂体受湖浪改造作用为主,台南地区古湖盆环境为坳陷背景、古低隆起之上的开阔浅湖环境,地貌宽缓,为滩坝提供了良好的发育场所;台南地区第四纪以来风向以单向的西北风为主,风力较强,湖浪动力作用大,湖浪的水动力分带控制坝砂的形态与分布,为砂体的筛选和二次搬运提供动力,易形成远岸砂质滩坝,所以认为古季风的风向及风力为研究区坝砂发育形态的主控因素;同时昆仑山前部三角洲前缘物源供给充足,由湖浪作用二次搬运的砂体被台南地区水下古隆起阻挡,砂体易在古隆起附近进行沉积,形成远岸砂质滩坝。本文基于研究区滩坝特征提出了“开阔浅湖、风浪改造型、斜列式”滩坝分布模式(图17),沉积特点如下。

台南地区处于宽缓的滨浅湖相带,在强湖浪作用的控制下,受古隆起的阻挡,被改造、搬运的砂体在古隆起处形成砂质滩坝,分布面积广,且离岸较远;台南地区受到北西向的季风,风力较强导致波浪较强,控制了坝砂的延伸形态,总体来看坝砂的形态呈透镜状、弯月状,顺风向弯曲;滩坝亚相可分为坝主体、坝缘、滩主体、滩缘四种沉积微相;滩砂发育面积广且较为连片,滩砂内部可发育多个孤立分散状的坝砂。

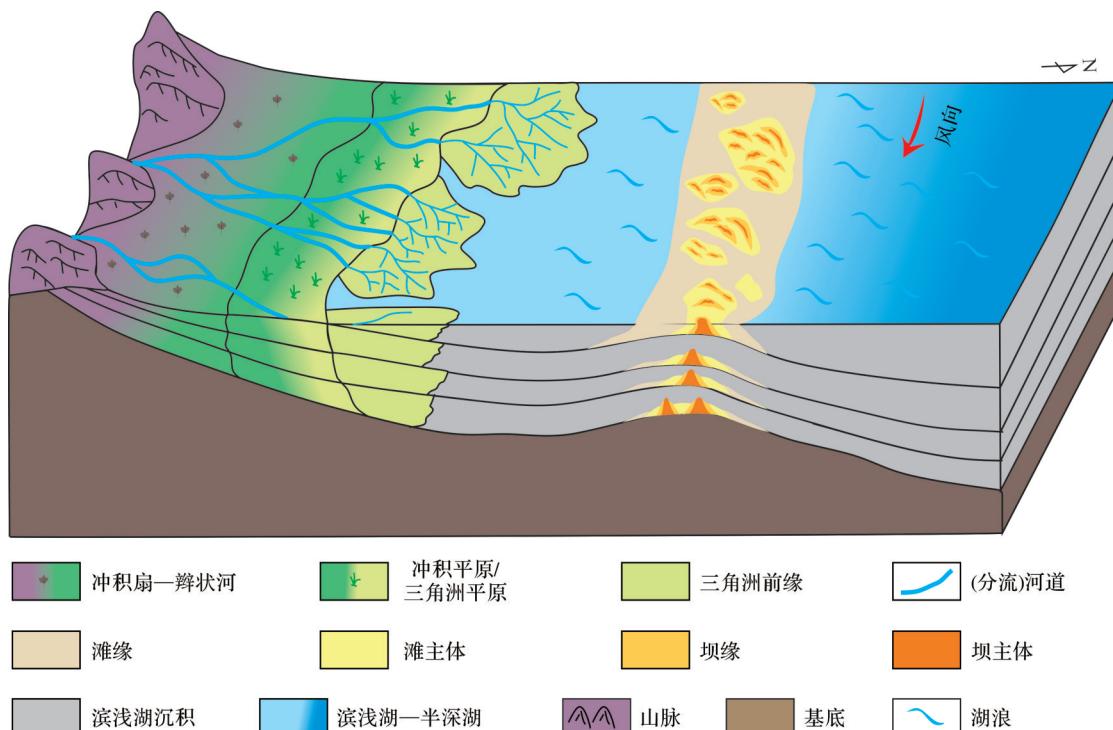


图 17 开阔浅湖、风浪改造型、斜列式滩坝沉积模式

Fig.17 Oblique beach-bar depositional model of shallow lake, sculpted by wind and wave action

6 结论

(1) 滩砂与坝砂在沉积过程中表现出不同的水动力特征。台南地区滨浅湖滩坝可识别四种沉积微相:坝主体、坝缘、滩主体和滩缘,不同微相的粒度中值与泥质含量、分选系数、渗透率呈较好的相关性。

(2) 滩坝在垂向与平面上均表现出稳定的构型特征。剖面上,坝砂普遍厚于滩砂,形态呈“底平顶凸”,滩砂则以薄层席状侧向与坝砂拼接;平面上,不同时段的优势相控制了滩坝组合方式:当滩主体占优势时,坝砂多以透镜状或弯月状嵌置于滩主体之中;当坝缘占优势时,坝主体呈弯月状叠置于坝缘之上,而滩主体和滩缘则环带状或连片状分布于其外侧。统计结果显示,坝砂平均长度约1 250 m、宽度约250 m(坝砂长宽比约为5),呈线性正相关关系,与田吉兹湖现代沉积特征高度吻合,验证了台南地区滩坝沉积微相划分的可靠性。

(3) 三湖坳陷台南地区滩坝沉积体系的形成受古地貌、古构造、古季风、古物源以及古水深多因素耦合控制。基于上述主控因素,构建了“开阔浅湖、风浪改造型、斜列式”滩坝沉积模式,可为同类坳陷湖盆滩坝砂体的识别与预测提供理论参考。

参考文献(References)

- [1] 吴崇筠. 湖盆砂体类型[J]. 沉积学报, 1986, 4(4): 1-27. [Wu Chongyun. Sandbodies in lake basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1986, 4(4): 1-27.]
- [2] 杨勇强, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 陆相断陷湖盆滩坝沉积模式:以东营凹陷古近系沙四上亚段为例[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 417-423. [Yang Yongqiang, Qiu Longwei, Jiang Zaixing, et al. A depositional pattern of beach bar in continental rift lake basins: A case study on the upper part of the Fourth member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 417-423.]
- [3] 邓宏文, 马立祥, 姜正龙, 等. 车镇凹陷大王北地区沙二段滩坝成因类型、分布规律与控制因素研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 715-724. [Deng Hongwen, Ma Lixiang, Jiang Zhenglong, et al. Sand bank generation types and its controls on their distribution, the Second member of Shahejie Formation, Lower Tertiary, Dawangbei, Chezhen Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 715-724.]
- [4] Jiang Z X, Liu H, Zhang S W, et al. Sedimentary characteristics of large-scale lacustrine beach-bars and their formation in the Eocene Boxing Sag of Bohai Bay Basin, East China[J]. Sedimentology, 2011, 58(5): 1087-1112.
- [5] 赵宁, 邓宏文. 沾化凹陷桩西地区沙二上亚段滩坝沉积规律及控制因素研究[J]. 沉积学报, 2010, 28(3): 441-450. [Zhao Ning, Deng Hongwen. Beach-bar depositional laws and controls

- of the 2nd member of Shahejie Formation in Zhuangxi area, Zhanhua Sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(3): 441-450.]
- [6] 赵东娜,朱筱敏,林金成,等.南海琼东南盆地崖13-1气田古近系陵水组海陆过渡带沉积特征及演化[J].古地理学报,2014,16(3):385-400. [Zhao Dongna, Zhu Xiaomin, Lin Jincheng, et al. Sedimentary characteristics and evolution of transitional belt of the Paleogene Lingshui Formation in Ya13-1 gasfield of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(3): 385-400.]
- [7] 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 sub-member of the Fourth member of the Shahejie Formation in the Lijin subbasin[J]. *Geology in China*, 2008, 35(5): 911-921.]
- [8] 姜在兴,王俊辉,张元福.滩坝沉积研究进展综述[J].古地理学报,2015,17(4):427-440. [Jiang Zaixing, Wang Junhui, Zhang Yuanfu. Advances in beach-bar research: A review[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(4): 427-440.]
- [9] Tamura T. Beach ridges and prograded beach deposits as palaeoenvironment records[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114(3/4): 279-297.
- [10] 宋春晖,王新民,师永民,等.青海湖现代滨岸沉积微相及其特征[J].沉积学报,1999,17(1):51-57. [Song Chunhui, Wang Xinmin, Shi Yongmin, et al. Sedimentary characteristics and microfacies of shore zone in Qinghai Lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(1): 51-57.]
- [11] 谢宗奎.柴达木台南地区第四系细粒沉积岩相与沉积模式研究[J].地学前缘,2009, 16(5): 245-250. [Xie Zongkui. Research on the Quaternary fine-fraction lithofacies and sedimentation model in Tainan area, Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(5): 245-250.]
- [12] 党玉琪,张道伟,徐子远,等.柴达木盆地三湖地区第四系沉积相与生物气成藏[J].古地理学报,2004,6(1):110-118. [Dang Yuqi, Zhang Daowei, Xu Ziyuan, et al. Sedimentary facies and biogenic gas pool of the Quaternary of Sanhu area in Qaidam Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(1): 110-118.]
- [13] 司马立强,马骏,刘俊丰,等.柴达木盆地涩北地区第四系泥岩型生物气储层孔隙有效性评价[J].岩性油气藏,2023,35(2):1-10. [Sima Liqiang, Ma Jun, Liu Junfeng, et al. Evaluation of pore effectiveness of Quaternary mudstone biogas reservoirs in Sebei area, Qaidam Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(2): 1-10.]
- [14] 操应长,王健,刘惠民,等.东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体的沉积特征及模式[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(6):5-10. [Cao Yingchang, Wang Jian, Liu Huimin, et al. Sedimentary characteristics and models of beach-bar sandbodies in the upper part of the Fourth member of Paleogene in the south slope of Dongying Depression[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2009, 33(6): 5-10.]
- [15] 路慎强,王健,操应长,等.车西洼陷沙二段滩坝砂体粒度特征及其水动力学意义[J].油气地质与采收率,2013,20(3):26-29. [Lu Shenqiang, Wang Jian, Cao Yingchang, et al. Study on characteristics and hydrodynamic significance of grain size components of beach-bar sandbodies, Second member of Shahejie Formation, Chexi Sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(3): 26-29.]
- [16] 潘树新,王建功,刘彩燕,等.坳陷湖盆沿岸坝沉积特征、分布规律及成藏机制:以松辽盆地南部青山口组为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(增刊2):70-78. [Pan Shuxin, Wang Jiangong, Liu Caiyan, et al. Sedimentary features, distribution pattern and accumulation mechanism of lakeshore bar: Taking the Qingshankou Formation in the southern Songliao Basin as an example[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(Suppl. 2): 70-78.]
- [17] 王夏斌,姜在兴,胡光义,等.辽河盆地西部凹陷古近系沙四上亚段沉积相及演化[J].吉林大学学报(地球科学版),2019,49(5):1222-1234. [Wang Xiabin, Jiang Zaixing, Hu Guangyi, et al. Sedimentary facies and evolution of upper Fourth member of Paleogene Shahejie Formation in Western Sag of Liaohe Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(5): 1222-1234.]
- [18] 姜在兴,刘晖.古湖岸线的识别及其对砂体和油气的控制[J].古地理学报,2010,12(5):589-598. [Jiang Zaixing, Liu Hui. Lacustrine palaeoshoreline and its controls on sandbodies and hydrocarbon[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(5): 589-598.]
- [19] 罗红梅,朱毅秀,穆星,等.渤海湾渤南洼陷深层湖相滩坝储集层沉积微相预测[J].石油勘探与开发,2011,38(2):182-190. [Luo Hongmei, Zhu Yixiu, Mu Xing, et al. Seismic facies prediction of lacustrine beach and bar reservoirs in the deep zone of the Bonan subsag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(2): 182-190.]
- [20] 张萱,林小兵,杨华童,等.塔北隆起牙哈地区吉迪克组滩坝沉积微相迁移规律及岩性组合[J].大庆石油地质与开发,2023,42(6):26-33. [Zhang Xuan, Lin Xiaobing, Yang Huatong, et al. Migration laws and lithologic assemblages of beach bar sedimentary microfacies of Jidike Formation in Yaha area of Tahei uplift[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(6): 26-33.]
- [21] 邱隆伟,李欣,杨勇强,等.湖泊碎屑岩沙坝成因机制及构型表征研究进展[J].古地理学报,2022,24(2):191-209. [Qiu Longwei, Li Xin, Yang Yongqiang, et al. Research progresses of the genetic mechanism and architecture characterization on lake bars[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(2): 191-209.]
- [22] 商晓飞,段太忠,侯加根,等.湖泊滨岸砂坝沉积砂泥空间配置关系及其地质意义[J].石油勘探与开发,2019,46(5):902-915. [Shang Xiaofei, Duan Taizhong, Hou Jiagen, et al. Spatial configuration of sand and mud in the lacustrine nearshore sand

- bar deposits and its geological implications[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 902-915.]
- [23] 张天舒,陶士振,吴因业,等. 层序演化对三角洲—滩坝沉积体系有利储层类型与分布的控制作用:以四川盆地中部侏罗系凉高山组为例[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(9): 1286-1300. [Zhang Tianshu, Tao Shizhen, Wu Yinye, et al. Control of sequence stratigraphic evolution on the types and distribution of favorable reservoir in the delta and beach-bar sedimentary system: Case study of Jurassic Lianggaoshan Formation in central Sichuan Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(9): 1286-1300.]
- [24] 胡光明,何幼斌,李积永,等. 滨浅湖单一坝沉积微相精细刻画方法:以柴达木盆地扎11井区N₂¹IV-10小层为例[J]. *断块油气田*, 2020, 27(2): 171-175. [Hu Guangming, He Youbin, Li Jiyong, et al. Detailed description of single bar sedimentary microfacies in shore and shallow lake: A case of N₂¹ IV -10 individual reservoir in Zha 11 wellblock in Qaidam Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(2): 171-175.]
- [25] 陈彬滔,史忠生,薛罗,等. 古潜山周缘滩坝沉积模式与岩性油藏勘探实践:以南苏丹Melut盆地Ruman地区Galhak组为例[J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(6): 37-44. [Chen Bintao, Shi Zhongsheng, Xue Luo, et al. Depositional models and lithologic reservoir exploration of sandy beach-bar around buried-hill: A case from Galhak Formation in Ruman region of Melut Basin, South Sudan[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(6): 37-44.]
- [26] 商晓飞,董越,唐力,等. 渤海湾盆地板桥凹陷沙二段滩坝沉积地层与砂体展布特征[J]. *地层学杂志*, 2021, 45(4): 532-544. [Shang Xiaofei, Dong Yue, Tang Li, et al. Characteristics of sedimentary stratigraphy and sand bodies distribution of beach-bar in the Second member of Shahejie Formation in Banqiao Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2021, 45(4): 532-544.]
- [27] 周立宏,韩国猛,马建英,等. 渤海湾盆地歧口凹陷歧北斜坡古近系沙二段滨浅湖滩坝沉积模式与勘探实践[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(3): 64-77. [Zhou Lihong, Han Guomeng, Ma Jianying, et al. Depositional pattern and exploration practice of shallow shore lake beach bar sand body in the Second member of Shahejie Formation in Qibei slope in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(3): 64-77.]
- [28] 隋立伟,杨文璐,李军辉,等. 断陷湖盆滩坝沉积特征及其控藏作用:以塔南凹陷白垩系铜钵庙组为例[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(5): 100-109. [Sui Liwei, Yang Wenlu, Li Junhui, et al. Sedimentary characteristics and reservoir control of beach bar in faulted lake basin: A case study of Cretaceous Tongbomiao Formation in Tanan Sag[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(5): 100-109.]
- [29] 刘群明. 柴东第四系综合物源分析及主力气田区岩性圈闭预测[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2009: 9-25. [Liu Qunming. Quaternary comprehensive provenance analysis of eastern Qaidam Basin and lithologic trap predication of main gas field area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009: 9-25.]
- [30] 肖波. 大王庄地区沙二段层序地层特征与滩坝发育的关系[J]. *矿物岩石*, 2017, 37(3): 55-60. [Xiao Bo. The relationship between sequence stratigraphy and beach bar sandstones of Palaeogene Sha2 member in the Dawangzhuang area[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2017, 37(3): 55-60.]
- [31] 王菁,李相博,刘化清,等. 陆相盆地滩坝砂体沉积特征及其形成与保存条件:以青海湖现代沉积为例[J]. *沉积学报*, 2019, 37(5): 1016-1030. [Wang Jing, Li Xiangbo, Liu Huaqing, et al. Study of the development and preservation of lacustrine beach and bar: Based on the modern sedimentary characteristics of Qinghai Lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 1016-1030.]
- [32] 林会喜,邓宏文,秦雁群,等. 层序演化对滩坝储集层成藏要素与分布的控制作用[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 680-689. [Lin Huixi, Deng Hongwen, Qin Yanqun, et al. Control of sequence stratigraphic evolution on the distribution and hydrocarbon accumulation of beach and bar reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 680-689.]
- [33] 常德双,卢刚臣,孔凡东,等. 大港探区湖泊浅水滩、坝油气藏勘探浅析[J]. *中国石油勘探*, 2004, 9(2): 26-32. [Chang Deshuang, Lu Gangchen, Kong Fandong, et al. Analysis on exploration of lake shallow-water beach and bar oil and gas reservoirs in Dagang exploration area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2004, 9(2): 26-32.]
- [34] 孙锡年,刘渝,满燕. 东营凹陷西部沙四段滩坝砂岩油气成藏条件[J]. *国外油田工程*, 2003, 19(7): 24-25. [Sun Xinian, Liu Yu, Man Yan. Reservoir-forming conditions of beach-bar sandstone in Sha4 member, west Dongying Depression[J]. *Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry*, 2003, 19(7): 24-25.]
- [35] Cohen A S, Soreghan M J, Scholz C A, et al. Estimating the age of formation of lakes: An example from Lake Tanganyika, East African Rift system[J]. *Geology*, 1993, 21(6): 511-514.
- [36] 郭泽清,孙平,张绍胜,等. 柴达木盆地三湖地区第四系构造发育历史及其勘探意义[J]. *高校地质学报*, 2012, 18(2): 372-378. [Guo Zeqing, Sun Ping, Zhang Shaosheng, et al. Study on the Quaternary tectonic evolution and its significance for exploration in the Sanhu area, Qaidam Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, 18(2): 372-378.]
- [37] 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): 20-28. [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): 20-28.]
- [38] 王海涛,吴福莉,方小敏,等. 中中新世气候适宜期西北内陆干旱区气候演化特征[J]. *地球环境学报*, 2020, 11(1): 45-65. [Wang Haitao, Wu Fulì, Fang Xiaomin, et al. Climate evolution of the Northwest China during Middle Miocene climatic

- optimum[J]. *Journal of Earth Environment*, 2020, 11(1): 45-65.]
- [39] 施雅风, 汤懋苍, 马玉贞. 青藏高原二期隆升与亚洲季风孕育关系探讨[J]. *中国科学: 地球科学*, 1998, 28(3): 263-271. [Shi Yafeng, Tang Maocang, Ma Yuzhen. Study on the relationship between the second-stage uplift of Qinghai-Tibet Plateau and the breeding of Asian monsoon[J]. *Science China Earth Sciences*, 1998, 28(3): 263-271.]
- [40] 孙湘君, 汪品先. 从中国古植被记录看东亚季风的年龄[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(9): 1137-1143, 1159. [Sun Xiangjun, Wang Pinxian. How old is the Asian Monsoon system?: Palaeobotanical constraints from China[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, 33(9): 1137-1143, 1159.]
- [41] 安芷生, 张培震, 王二七, 等. 中新世以来我国季风—干旱环境演化与青藏高原的生长[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 678-693. [An Zhisheng, Zhang Peizhen, Wang Erqi, et al. Changes of the monsoon-arid environment in China and growth of the Tibetan Plateau since the Miocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 678-693.]
- [42] 陈宗颜, 董治宝, 汪青春, 等. 柴达木盆地风况及输沙势特征[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 195-203. [Chen Zongyan, Dong Zhibao, Wang Qingchun, et al. Characteristics of wind regime and sand drift potential in Qaidam Basin of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(1): 195-203.]

A Depositional Model of a Sandy Beach Bar on the Far Bank of an Inland Depression Lake Basin

LI JiaWei^{1,2}, XU ZhenHua³, CHENG LiHua⁴, YIN YanShu^{1,2}

1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

Abstract: [Objective] In the Tainan region of Qinghai oil field, within the middle to upper strata of the Sebei Group, notable beach-bar sedimentary sand bodies form key high-quality reservoirs. The genesis and spatial distribution of these beach-bar sands have long been debated, creating a bottleneck in further exploration and exploitation of the gas field. This scenario underscores an imperative need for in-depth characterization within the Tainan area's beach-bar structures. It's essential to precisely identify the various sedimentary microfacies and to construct an appropriate beach-bar depositional model, which will significantly enhance our understanding and utilization of these vital geological resources. [Methods] Informed by the principles of sedimentology, this methodology takes into account the varying hydrodynamic conditions prevalent during the formation of beach-bar systems, which consequentially result in differing grain sizes and permeability of the sand bodies. By centering on the median grain size as a pivotal metric, we synthesize a log response template for lithofacies, thereby establishing refined standards and dynamic responses for well-log interpretations of sedimentary microfacies. This advanced approach facilitates a more nuanced and scientifically grounded delineation of beach-bar sedimentary microfacies. Leveraging insights from modern sedimentary analogues and through a meticulous analysis of sand bodies within regions of dense well networks, the study employs horizontal well and production data to validate the rationality of microfacies classifications. Acknowledging the multi-faceted genesis of beach-bars, influenced by a spectrum of environmental and geological factors, this research culminates in the proposition of a sophisticated beach-bar depositional model tailored for inland rift lake basins. This model reflects a deep integration of complex formation processes and characteristics unique to such environments. [Results] In the Tainan region, nestled within the middle and upper stratifications of the Sebei Group, a remarkable differentiation of beach and bar subfacies emerges. These can be intricately divided into distinct microfacies, including the bar core, bar margin, beach core, and beach margin. The bar sands, strategically overlaid on the beach sands, distinctly orient perpendicular to the prevailing northwest winds. Their morphology is characterized by either lens-like

or crescent shapes, stretching an impressive length of approximately 1 250 meters and spanning a width of around 250 meters. This results in a linear length-to-width correlation, approximately 5, a ratio that harmoniously aligns with modern sedimentary environments. The beach sands exhibit a seamless, contiguous spread, predominantly extending in a perpendicular fashion relative to the source direction. This pattern becomes particularly pronounced during periods of low water levels. In drawing parallels with the beach-bar deposits found in Tengiz Lake, there is a notable correspondence in the extension direction, distribution patterns, and the critical length-width ratios of the bar sands. This comparative analysis underscores the similarity in sedimentary processes across diverse geographical locales. Furthermore, the abundant supply of source materials lays a robust foundation for the genesis and evolution of these beach-bar structures. A confluence of multifaceted factors, including the nuances of ancient tectonics, the intricacies of paleogeography, the dynamics of ancient monsoons, and the variances in past water depths, collectively weave a complex tapestry that dictates the developmental scale, the morphological characteristics, and the precise geographic localization of these beach-bar formations. **[Conclusions]** A "shallow lake, wave modification, oblique-arrangement" depositional model for beach-bar systems is proposed, offering theoretical guidance for identifying beach-bar systems in inland rift lake basins. This model encapsulates the dynamic interplay of wind-driven waves and shallow lake environments in shaping the beach-bar structures, emphasizing the importance of understanding both the physical processes and the sedimentological context in these unique settings. This approach provides a comprehensive framework for analyzing and interpreting beach-bar systems within inland rift basins, enriching the understanding of their formation and distribution.

Key words: Tainan area; beach-bar; grain size; sedimentary microfacies; formation mechanism; depositional model