

柴达木盆地台南地区第四系滩-坝砂体特征及控制因素

易定红¹,刘应如¹,吴颜雄²,奎明清²,李积永²,李红哲¹,涂加沙²,张婷静¹,徐晓玲²

(1. 中国石油 勘探开发研究院 西北分院,甘肃 兰州 730020;2. 中国石油 青海油田公司,甘肃 敦煌 736202)

摘要:为深入评价柴达木盆地台南地区滨-浅湖滩-坝的天然气勘探开发前景,通过岩心观察和钻(测)井资料分析,结合岩石薄片、X射线衍射全岩矿物测试、粒度累积概率曲线、黏土矿物组合、泥岩岩屑氯离子含量和砂(灰)/地比等参数,系统研究了第四系七个泉组Ⅱ层系滩-坝沉积环境、平面展布、发育演化和控制因素。结果表明:①台南地区主要发育碎屑岩滩-坝,偶见碳酸盐岩滩-坝。碎屑岩滩-坝以含岩屑长石质细砂岩-粉砂岩为主,粒度曲线主要为“一跳一悬”两段式(占64.4%),其次为多段式(占11.9%)。发育水平层理、波状层理和低角度交错层理。碳酸盐岩滩-坝主要为具有粉-泥晶结构的含泥、含粉砂泥晶灰岩。②七个泉组Ⅱ层系碎屑岩滩-坝发育,单层厚度平均值为2.13 m,砂/地比平均值为0.34,单坝体规模较小,主要位于背斜核部,呈条带状展布。背斜东翼坝呈NE-SW向,西翼呈NW-SE向。碳酸盐岩滩-坝规模较小,灰/地比平均值为0.37,呈环形分布于背斜核部。③湖盆水体主要为半咸水-咸水,局部出现盐水。气候干旱寒冷且波动性强,黏土矿物主要为伊利石(占44.2%),其次为伊/蒙混层(占22.9%)和绿泥石(占19.6%)。台南地区滩-坝发育且迁移摆动明显,背斜两翼滩-坝演化差异大。干旱气候环境和低幅度同沉积背斜是滩-坝发育的主控因素。

关键词:沉积环境;沉积特征;滩-坝砂体;七个泉组;台南地区;柴达木盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Characteristics and controlling factors of the Quaternary beach-bar sand bodies in the Tainan area, Qaidam Basin

YI Dinghong¹, LIU Yingru¹, WU Yanxiong², KUI Mingqing², LI Jiyong², LI Hongzhe¹,
TU Jiasha², ZHANG Tingjing¹, XU Xiaoling²

(1. Northwest Branch, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: This study aims to thoroughly assess the prospects for natural gas exploration and exploitation in littoral-shallow lacustrine beach bars within the Tainan area, Qaidam Basin. To this end, we systematically investigate the sedimentary environments, spatial distribution, evolutionary development, and controlling factors of beach bars in sequence II of the Quaternary Qigequan Formation in the area using core observations and drilling (log) data analysis, as well as observations of rock thin sections, whole-rock mineral mineralogy via X-ray diffraction, grain-size cumulative probability curves, clay mineral assemblages, chloride content in mudstone cuttings, and net-to-gross (NTG) ratios of limestones (limestones). The results indicate that the Tainan area primarily exhibits clastic beach bars, with carbonate beach bars occasionally visible. The clastic beach bars consist primarily of lithic-feldspathic fine-grained sandstones and siltstones, with grain-size cumulative probability curves predominantly showing a saltation-suspension dual-segment mode (64.4%), followed by multi-segment modes (11.9%). Furthermore, the clastic beach bars exhibit horizontal, wavy, and low-angle cross bedding structures. The carbonate beach bars, on the other hand, are composed mainly of argillaceous and silty micrites with aphanocrystalline to very fine crystalline textures. Clastic beach bars are well

收稿日期:2025-04-24;修回日期:2025-08-19。

第一作者简介:易定红(1975—),男,高级工程师,储层沉积学。E-mail: dingyh2007@126.com。

基金项目:中国石油重大科技项目(2021DJ08,2021DJ1705)。

developed in sequence II of the Qigequan Formation, with an average single-layer thickness of 2.13 m, an average NTG ratio of 0.34, and relatively small sand bodies in individual bars. These clastic beach bars are mainly distributed in a banded pattern in the core of the Tainan anticline. Among these, bars on the east flank of the anticline have a NE-SW strike, while those on the west flank strike NW-SE. The carbonate beach bars in sequence II are limited in scale, with an average NTG of 0.37, and are distributed in a ring-like pattern in the anticline core. The lacustrine basin within the Tainan area is dominated by brackish to saline water, with localized occurrences of brine water. During the deposition of the Qigequan Formation, the Tainan area experienced an arid, cold climate with frequent fluctuations. The clay minerals in the area are primarily composed of illite (44.2%), followed by mixed-layered illite-montmorillonite (22.9%) and chlorite (19.6%). Therefore, beach bars are well developed in the Tainan area and show noticeable migration and swing, with significant evolutionary differences between the east and west flanks of the Tainan anticline. Factors controlling the beach bar development in the area mainly include the arid climate conditions and the low-amplitude, synsedimentary Tainan anticline.

Key words: sedimentary environment, depositional characteristics, beach-bar sand bodies, Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

引用格式:易定红,刘应如,吴颜雄,等. 柴达木盆地台南地区第四系滩-坝砂体特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 108-123. DOI: 10.11743/ogg20260108.

YI Dinghong, LIU Yingru, WU Yanxiong, et al. Characteristics and controlling factors of the Quaternary beach-bar sand bodies in the Tainan area, Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 108-123. DOI: 10.11743/ogg20260108.

滩-坝是滩和坝的总称,其形成主要受波浪和沿岸流控制,是“风(风浪)-源(物源)-盆(盆地演化)”系统综合作用下的产物^[1]。其物源主要来自邻近地区三角洲或其他沿岸地区的砂体,在沿岸流和波浪作用下反复淘洗、搬运沉积而成^[2]。湖盆高能滨-浅湖地带发育的滩-坝砂体是石油和天然气的重要储集体,是中国陆相湖盆石油与天然气勘探的重要领域^[2]:一方面,波浪的持续冲洗改造作用使得砂体具备优越的物性条件;另一方面,滩-坝砂体与烃源岩侧向紧邻创造了得天独厚的源-储配置关系。目前,中国已在渤海湾盆地^[3-4]、苏北盆地^[5]、柴达木盆地^[6-8]和四川盆地^[9]等多个盆地中发现以滩-坝砂体为储集体的油气田,证实了滩-坝砂体重要的勘探价值。

国内外学者在滩-坝砂体的沉积特征^[10-11]、沉积环境^[1,12]和控制因素^[7,13-16]等方面取得了大量研究成果。针对柴达木盆地东部台南地区第四系七个泉组滩-坝砂体沉积物源、沉积环境和沉积相等方面,前人认为七个泉组沉积时期台南地区处于滨-浅湖沉积环境,滩-坝发育^[17-20]。滩-坝砂体物源主要来自于南面昆仑山的乌图美仁物源和格尔木物源,北面祁连山的绿梁山物源为次要补充,是一个多物源混合沉积区^[21]。然而,现有研究无法清晰明确台南地区七个泉组滩-坝砂体发育演化的主控因素,缺乏对台南地区滩-坝砂体沉积演化方面的精细解剖,特别是缺乏与沉积环境影响滩-坝砂体发育演化相关的精细研究,这严重制

约了气田的高效开发与产能建设。

本研究以台南地区第四系七个泉组II层系为目的层,在系统梳理前人研究成果的基础上,基于4口重点井85 m长度岩心的精细观察和原生沉积构造描述、8口井158个X射线衍射全岩矿物分析样品测试数据以及239口井砂岩厚度统计及砂/地比数据计算结果,系统分析了台南地区第四纪滩-坝砂体岩石学特征和沉积构造特征,明确了II层系滩-坝砂体平面分布规律和演化特征。基于7口井170个黏土矿物样品测试数据和13口井1544个泥岩岩屑氯离子数据,本文分析了研究区七个泉组黏土矿物含量变化与组合特征和氯离子数值纵向演化与平面分布特征,明确了研究区气候环境和水体盐度变化规律。同时结合区域古地理背景,探讨滩-坝砂体发育演化的控制因素,建立沉积模式。

1 区域地质背景

柴达木盆地是中国唯一一个位于青藏高原内部的新生代含油气盆地,周缘被昆仑山脉、祁连山脉和阿尔金山脉环绕,总面积约为 $12.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[22]。该地区气候环境条件恶劣,海拔普遍在2700 m以上。晚喜马拉雅运动(新近纪末—第四纪)导致盆地周缘山系剧烈隆升,西部地区基底抬升,沉积中心逐渐向东迁移。至第四纪早期,沉积中心已转移至盆地东部的三湖地

区^[20]。第四纪期间,柴达木湖盆经历了形成期、扩张-鼎盛期和萎缩期3个演化阶段,从盆地边缘山前至盆地中心,依次发育冲积扇、河流三角洲和湖泊相沉积^[17,19](图1a)。

台南地区位于柴达木盆地东部三湖坳陷的北斜坡与中央凹陷的过渡带,距盆地边缘较远(直线距离超过90 km),属于湖盆的中心区域,面积约40 km²。七个泉组为一套浅灰色、灰色-深灰色泥岩与灰色砂岩频繁互层沉积,未见红色地层,为滨-浅湖亚相沉积环境的产物,滩-坝砂体发育。岩性以粉砂岩为主,细砂岩次之,平均厚度为2 100 m,最大厚度超过2 700 m^[18]。七个泉组被分为8个开发层系,自上而下依次命名为O—Ⅶ层系。天然气主要产于Ⅰ—Ⅵ层系(大致对应K2—K10标准层)(图1b)。其中,目的层Ⅱ开发层系(大致对应K3—K4标准层)分为4个开发层组,自上而下依次命名为Ⅱ-1—Ⅱ-4层组。

2 滩-坝砂体沉积特征

2.1 沉积学特征

2.1.1 矿物组分特征

基于8口井158个样品X射线衍射全岩分析数据,

将台南地区七个泉组滩-坝按岩性将划分为碎屑岩滩-坝(149个样品,占比94.3%)和碳酸盐岩滩-坝(9个样品,占比5.7%)两类。

碎屑岩滩-坝矿物组分主要为陆源碎屑矿物(平均含量为47.06%),其次为黏土矿物(平均含量为32.59%)和碳酸盐矿物(平均含量为17.75%),氯化物和硫酸盐矿物含量低且不稳定(图2)。从Ⅶ—O开发层系,陆源碎屑矿物(尤其是石英)组分含量逐渐减少,方解石和氯化物含量增加,指示陆源碎屑供应量减少和湖盆水体盐度升高的趋势。这与黏土矿物和氯离子含量反演的干旱化气候演化趋势相吻合。

碳酸盐岩滩-坝(本研究首次确认)数量少,测井曲线形态呈指形,与碎屑岩滩-坝相比,其显著特征为GR曲线数值明显偏小(图3)。该类滩-坝集中分布于O层系和Ⅱ层系Ⅱ-1层组的第9小层,矿物组分主要为碳酸盐矿物(平均含量为59.89%),其次为陆源碎屑矿物(平均含量为21.56%)和黏土矿物(平均含量为16.89%,以伊利石和伊/蒙混层为主),氯化物含量低且不稳定,不含硫酸盐矿物(图2)。

2.1.2 岩石学特征

台南地区七个泉组滩-坝砂体按照岩性可划分为陆源碎屑岩和内源碳酸盐岩两类(图4)。其中,陆源碎屑岩粒度偏细,以浅灰色、灰色、深灰色细砂岩、粉砂

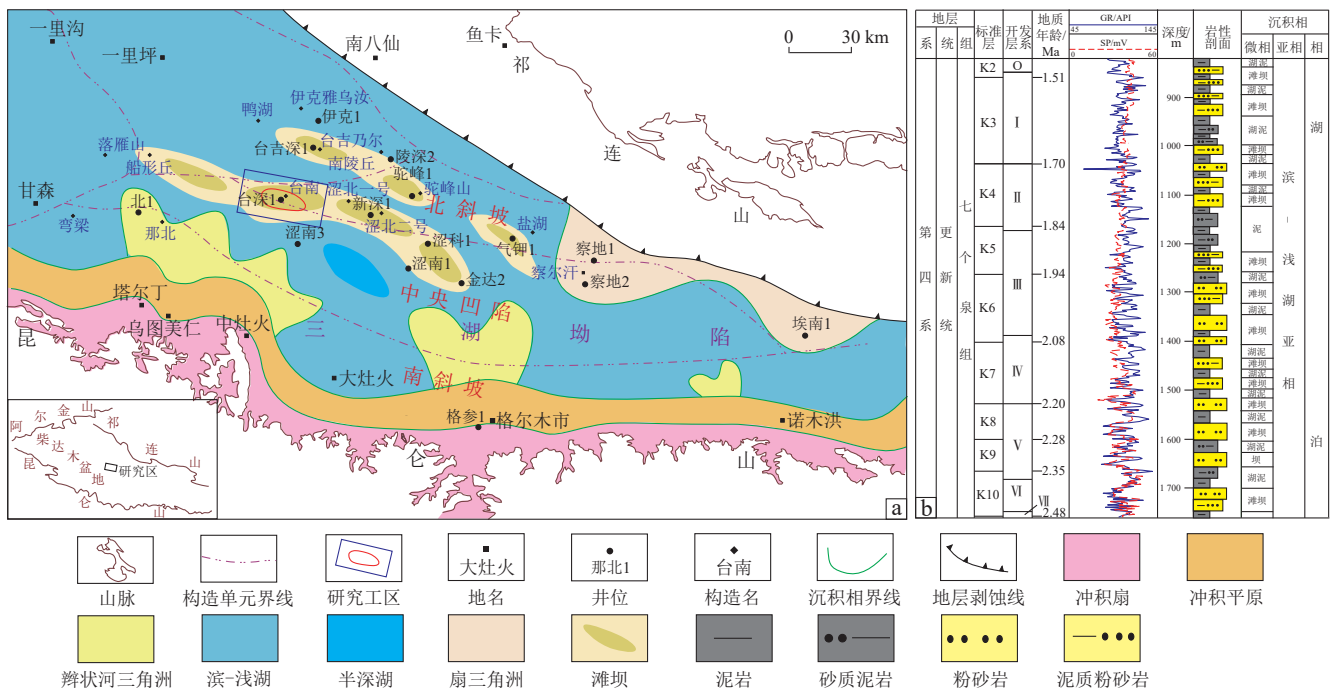


图1 柴达木盆地台南地区第四系七个泉组沉积古地理图(a)和地层综合柱状图(b)(据文献[21]修改)

Fig 1. Paleogeographic map (a) and composite stratigraphic column (b) of the Quaternary Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin (modified after reference [21])

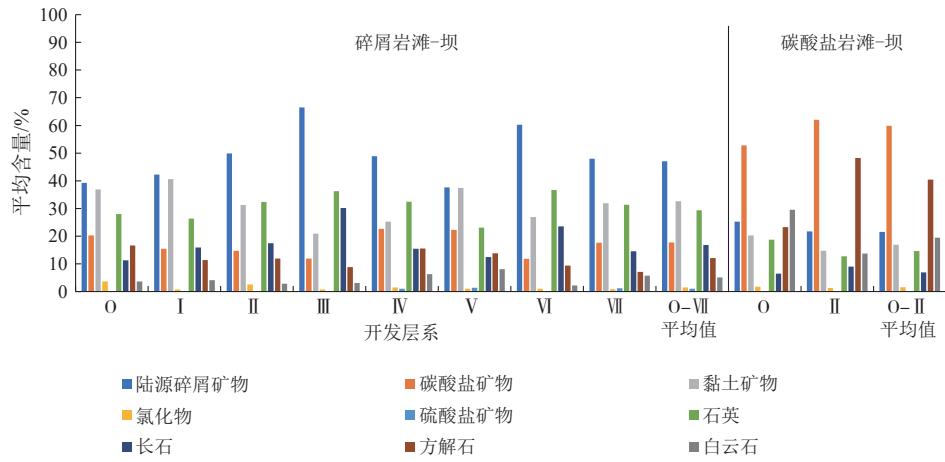


图2 柴达木盆地台南地区滩-坝砂体矿物组分平均含量柱状图

Fig. 2 Bar chart showing the average contents of mineral components in beach-bar sand bodies in the Tainan area, Qaidam Basin

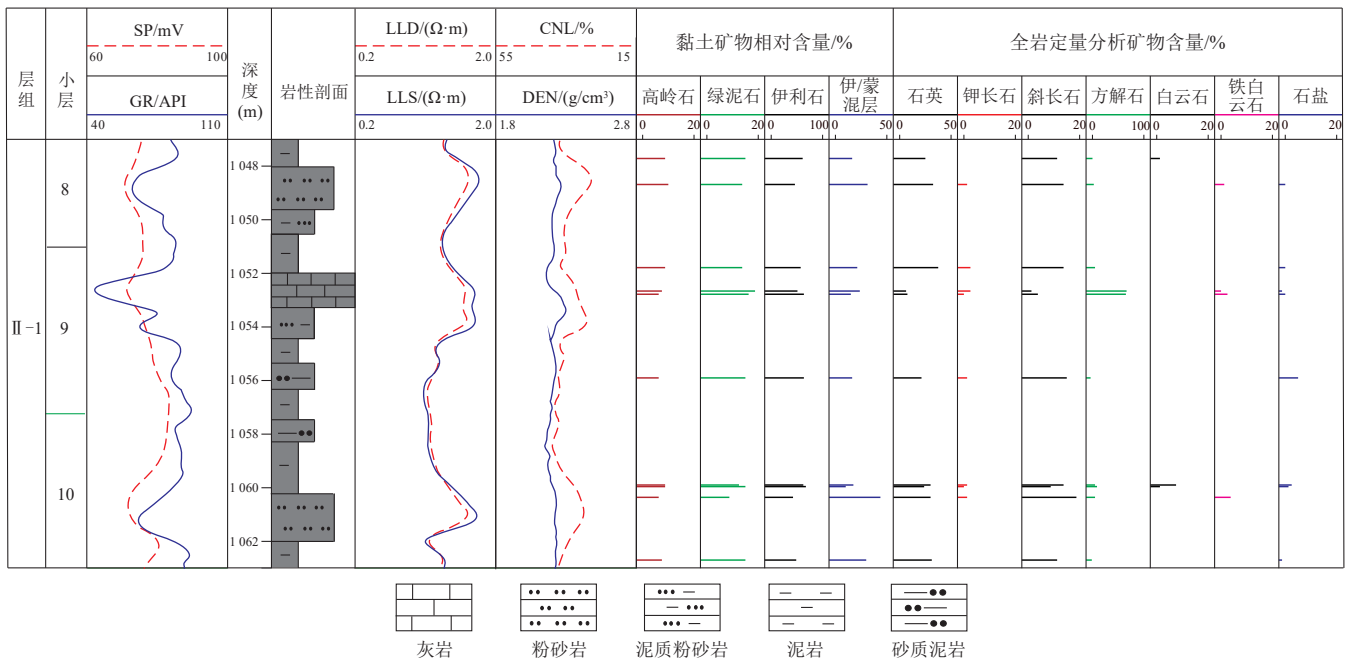


图3 柴达木盆地台南地区台5-7井滩-坝砂体岩-电特征及矿物组分含量杆状图

Fig. 3 Rock-electrical properties and stick plot of mineral components for beach-bar sand bodies across wells Tai 5 to Tai 7 in the Tainan area, Qaidam Basin

岩和泥质粉砂岩为主,主要岩石类型为长石细(粉)砂岩和岩屑长石细(粉)砂岩,含少量长石岩屑细(粉)砂岩。滩-坝砂体成分成熟度指数变化大,岩石颗粒分选性和磨圆度变化大^[21](图4a,b);内源碳酸盐岩岩性主要为含泥、含粉砂泥晶灰岩,集中发育在O层系和II层系II-1层组的第9小层。统计表明,台南地区211口井II-1层组的第9小层发育碳酸盐岩滩-坝,单层厚度平均值为2.08 m(介于1.08~3.00 m),灰/地比平均值为37.18%(介于17.42%~52.03%)。主要发育于背斜的核部区域,大致呈环形展布,具有粉-泥晶结构

(图4c,图5)。

2.1.3 沉积构造特征

台南地区七个泉组滩-坝砂体由于时代新,成岩作用弱,结构疏松、胶结程度差且易破碎^[19],导致部分典型沉积构造在较纯净的砂岩中难以保存。目前岩心观察所见的沉积构造大部分为反映浅水水动力条件波浪成因的沉积构造,如波状层理(图4d—g)和低角度交错层理(图4h),和反映较弱的水动力条件成因的水平层理(图4i,j)和似块状层理(图4k,l)。

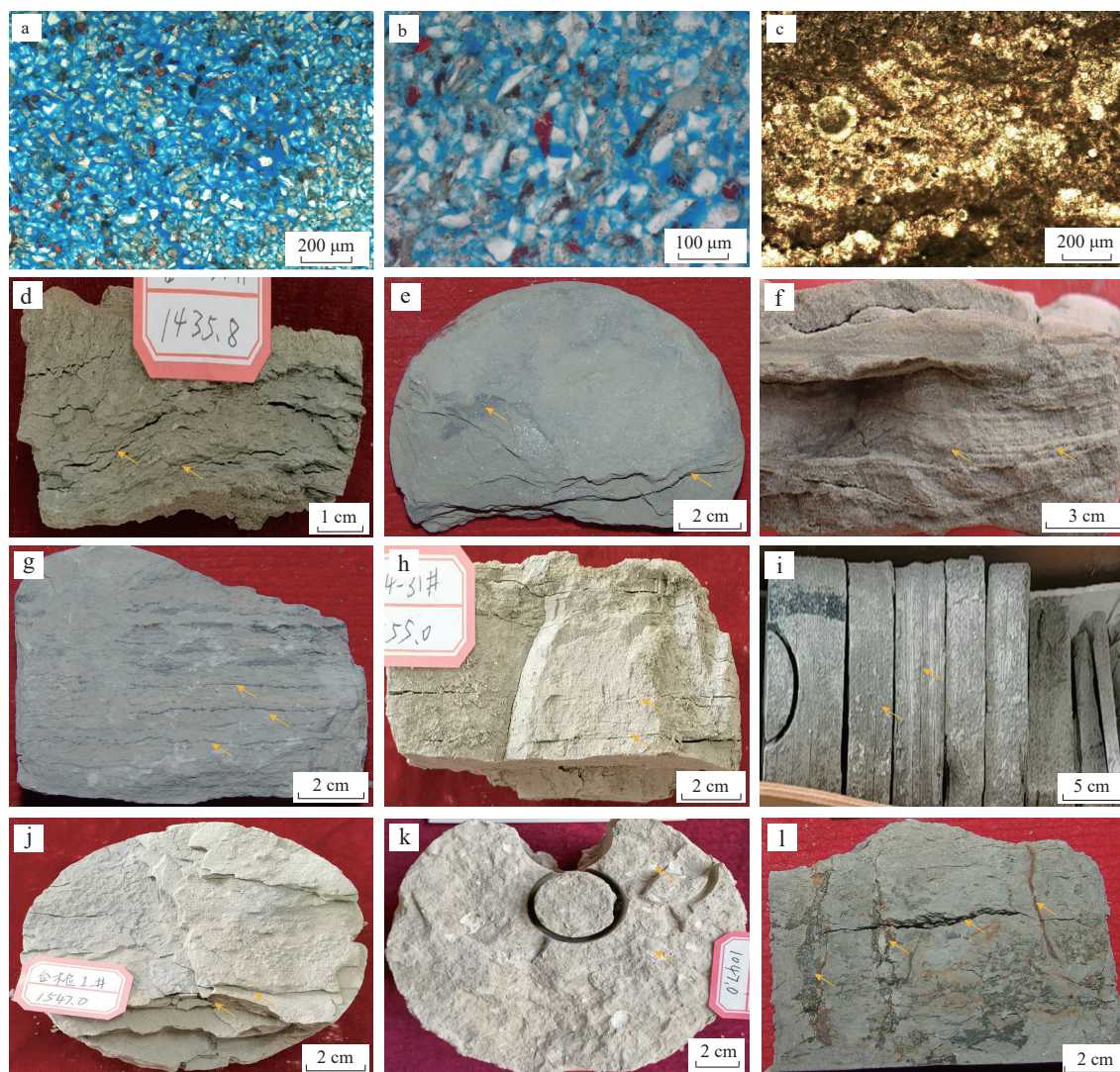


图4 柴达木盆地台南地区七个泉组典型岩心照片和显微照片

Fig. 4 Typical core photos and micrographs of the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

a. 含灰粉砂岩, 粉砂结构, 原生粒间孔发育, 磨圆度中等, 以次棱状、次圆-次棱状为主, 台检1井, 埋深1 586.84 m, 铸体薄片(-); b. 粉砂岩, 粉砂结构, 原生粒间孔发育, 磨圆度中等, 以次圆-次棱状为主, 台1-4井, 埋深1 868.40 m, 铸体薄片(-); c. 含粉砂泥质灰岩, 见粒间溶孔, 台试5井, 埋深1 046.87 m, 铸体薄片(-); d. 浅黄灰色泥质粉砂岩, 波状层理, 台4-31井, 埋深1 435.81 m, 岩心; e. 灰色粉砂岩, 波状层理, 见炭屑, 台南5井, 埋深1 436.88 m, 岩心; f. 浅黄灰色粉砂岩, 浪成沙纹层理, 台南8井, 埋深1 430.50 m, 岩心; g. 灰色粉砂质泥岩, 微波状层理, 台南5井, 1 581.26 m, 岩心; h. 黄灰色粉砂岩, 小型交错层理, 台4-31井, 埋深1 155.00 m, 岩心; i. 灰色砂质泥岩, 水平层理, 台4-31井, 埋深1 152.00 m, 岩心; j. 浅黄灰色泥质粉砂岩, 水平层理, 台检1井, 埋深1 547.00 m, 岩心; k. 灰色含粉砂泥质灰岩, 块状层理, 见螺化石, 台试5井, 埋深1 047.00 m, 岩心; l. 浅灰色粉砂质泥岩, 块状层理, 见植物根系、裂缝, 台南12井, 埋深1 816.10 m, 岩心

2.1.4 沉积水动力条件

碎屑岩滩-坝砂体的颗粒分布情况反映了沉积水动力条件^[1]。12口井295个样品粒度分析数据统计表明, 台南地区七个泉组碎屑岩滩-坝砂体粒度概率累积曲线呈6种样式, 主要为“一跳一悬”两段式(占比73.2%), 其次为“多跳一悬”多段式(占比11.9%), 第三为“两跳一悬”式(占比7.5%)^[23]。粒度累积概率曲线主要特征为跳跃总体和悬浮总体发育较好, 而滚动

总体发育较差, 跳跃总体斜率变化较大, 常发育2个、3个或多个次总体, 表明滩-坝砂体沉积时期处于复杂的水动力环境。

分析表明, 台南地区不同区域水动力条件不同。其中, 背斜的核部区域水动力条件相对简单, 以波浪作用为主, 粒度累积概率曲线主要为“一跳一悬”两段式组合; 背斜翼部区域的水动力条件相对复杂, 除受波浪作用外, 还受多向湖流作用影响, 粒度概率累积曲线主要表现为多段式组合和多段式+“滚动-跳跃-悬浮”

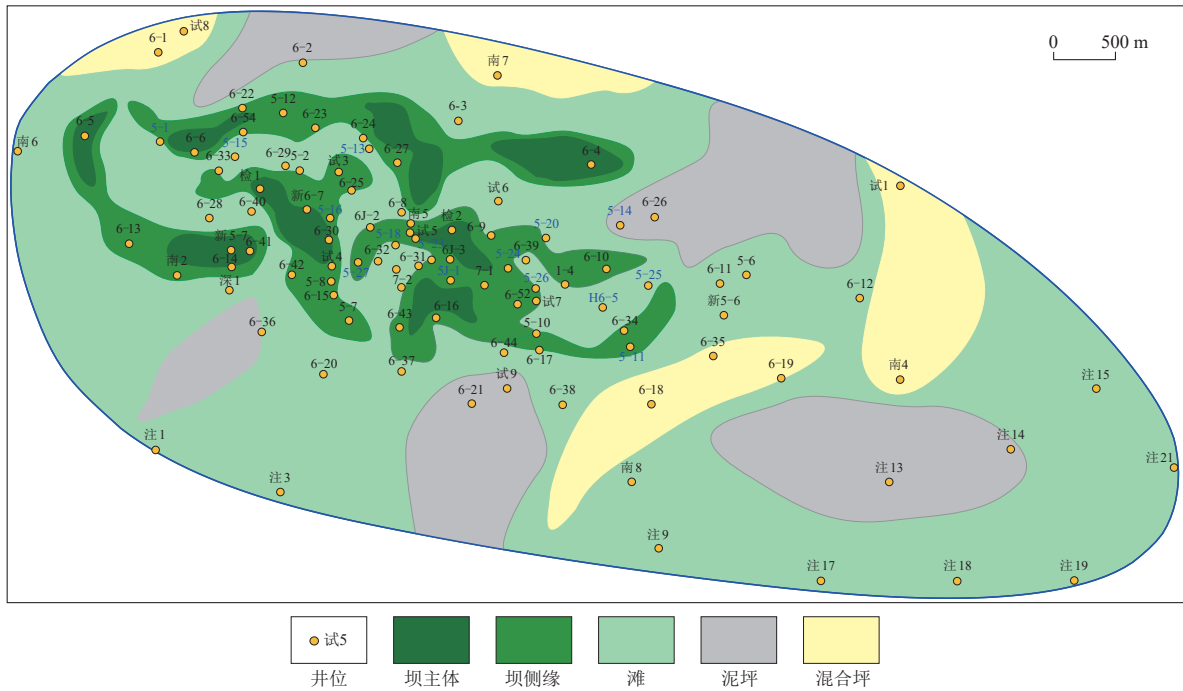


图5 柴达木盆地台南地区七个泉组 II-1 层组第9 小层碳酸盐岩滩-坝平面分布

Fig. 5 Map showing the distribution of carbonate beach bars in the 9th sublayer of the II-1 layer group of the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

三段式 + “一跳一悬”两段式组合(图6)。

2. 1. 5 相序组合特征

陆相湖盆滩-坝砂体的沉积特征在不同部位存在差异。为了深入揭示这种差异性,沉积学家尝试对滩-坝砂体进行沉积微相研究。鉴于滩-坝砂体沉积演化受控因素众多且研究角度各不相同,目前学术界

存在多种微相划分方案^[1,3,24]。笔者在参照前人划分方案的基础上,依据测井曲线形态特征(主要为GR曲线和SP曲线),结合砂/地比范围,将七个泉组碎屑岩滩-坝砂体划分坝主体、坝侧缘和滩微相(滩砂体微相不再细分),并识别出泥坪微相。

通过对台南地区 239 口井 II-4—II-1 共 4 个层组的系统分析,建立了沉积微相识别标志与砂/地比

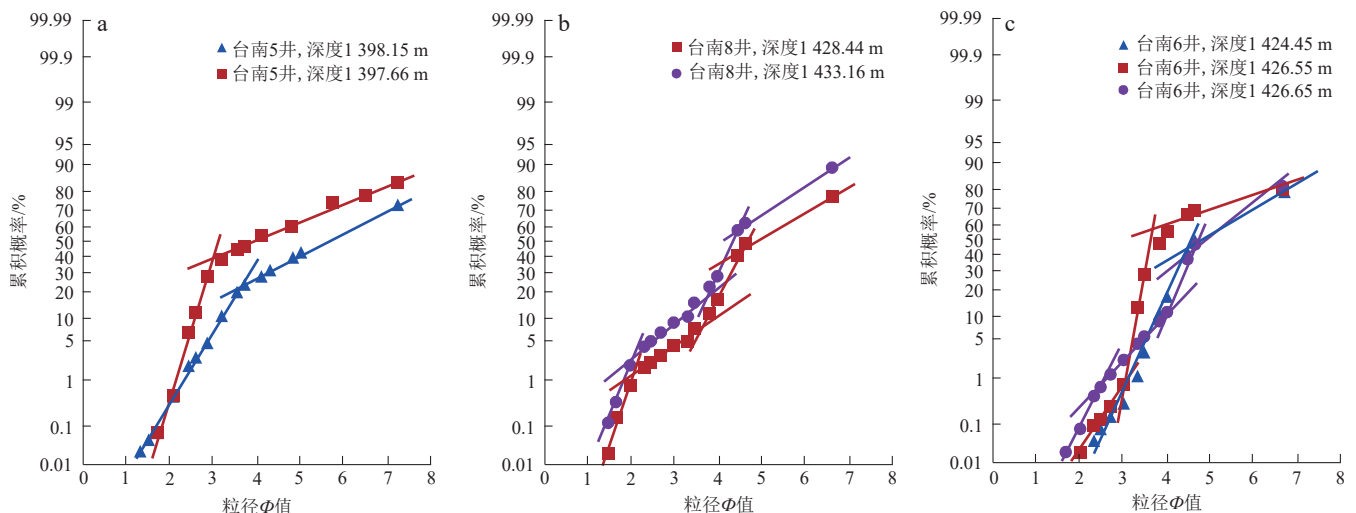


图6 柴达木盆地台南地区七个泉组 II-1 层组典型粒度累积概率曲线组合

Fig. 6 Typical grain-size curve assemblages of the II-1 layer group of the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

a. 背斜核部区域,“一跳一悬”两段式组合; b. 背斜东南翼部区域,多段式组合;c. 背斜西南翼部区域,多段式 + “滚动-跳跃-悬浮”三段式 + “一跳一悬”两段式组合

值的定量关系:坝主体微相测井曲线呈(齿化)箱形,砂/地比一般大于35%;坝侧缘微相测井曲线为(齿化)漏斗形,砂/地比一般介于35%~25%;滩微相测井曲线为(齿化)指形,砂/地比一般介于25%~10%;泥坪微相测井曲线为(齿化)平直形,砂/地比一般小于10%。

七个泉组滩-坝砂体共有“泥坪+坝侧缘+泥坪”“泥坪+坝侧缘+坝主体+泥坪”“泥坪+坝侧缘+坝主体+坝侧缘+泥坪”“泥坪+坝主体+坝侧缘+泥坪”“泥坪+坝主体+泥坪”和“泥坪+滩+泥坪”6种相序组合方式。这些组合可归纳为进积式、退积式和复合式3种沉积序列,其中以复合式为主(图7)。

不同层系的沉积序列演化规律不同。Ⅵ层系沉积时期处于长期基准面旋回上升的中期,以退积式和复合式沉积序列为主,沉积微相组合以“泥坪+坝侧缘+泥坪”和“泥坪+坝主体+泥坪”为主;Ⅳ层系沉积时期处于长期基准面旋回上升至下降的转换期,以复合式沉积序列为主,沉积微相组合以“泥坪+坝侧缘+泥坪”和“泥坪+坝主体+坝侧缘+泥坪”为主,其次为“泥坪+坝侧缘+坝主体+坝侧缘+泥坪”和“泥坪+坝主体+泥坪”;Ⅰ-Ⅱ层系沉积时期处于长期基准面旋回下降的中晚期,以进积式和复合式沉积序列为主,沉积微相组合以“泥坪+坝侧缘+泥坪”和“泥坪+滩+泥坪”为主,其次为“泥坪+坝侧缘+坝主体+泥坪”“泥坪+坝侧缘+坝主体+坝侧缘+泥坪”和“泥坪+坝主体+泥坪”(图7)。

2.2 发育演化特征

2.2.1 滩-坝砂体厚度变化特征

在岩心观察的基础上,结合GR和SP测井曲线,首先对钻穿Ⅱ层系的239口井进行滩-坝砂体识别,接着分层组进行砂体厚度统计,根据地层厚度计算出相应层组的砂/地比并统计其分布区间,得出台南地区239口井Ⅱ层系Ⅱ-4—Ⅱ-1层组的滩-坝砂体厚度和砂/地比统计表(表1)。

结果表明,Ⅱ层系沉积时期台南地区滩-坝砂体单层厚度偏小。其中,碎屑岩滩-坝砂体平均厚度为2.13 m(介于0.57~8.04 m),主要分布在1.00~3.00 m(占比81.99%);碳酸盐岩滩-坝砂体平均厚度为2.08 m(介于1.08~3.00 m),主要分布在1.50~2.50 m(占比82.94%)。滩-坝砂体发育程度中等至较好。其中,碎屑岩滩-坝砂/地比平均值为0.34(介于0.26~0.44),主要分布区间为0.30~0.40(占比85.36%);碳酸盐岩滩-坝灰/地比平均值为0.37(介于0.17~0.52),主要分布区间为0.25~0.45(占比83.41%)。从Ⅱ-4—Ⅱ-1层组,砂/地比及其主要分布区间均呈现减小的趋势,表明从Ⅱ层系早期到晚期,滩-坝砂体发育程度减弱,砂体规模的差异性减小(表1)。

2.2.2 滩-坝砂体平面展布及演化规律

以层组为单元研究台南地区滩-坝砂体沉积发育

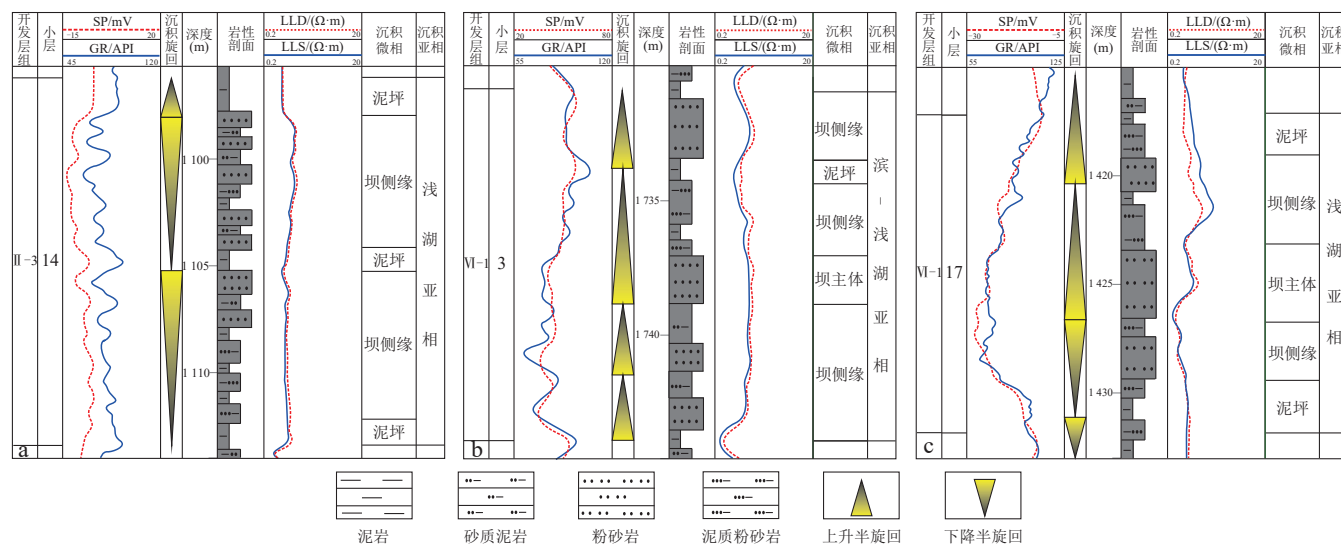


图7 柴达木盆地台南地区七个泉组滩-坝砂体相序组合特征

Fig. 7 Characteristics of facies sequence assemblages of beach-bar sand bodies in the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

a. 进积式组合(台5-13井); b. 退积式组合(台南8井); c. 复合式组合(台南6井)

表 1 柴达木盆地台南地区七个泉组 II 层系滩-坝砂体单层厚度与砂/地比统计

Table 1 Statistics of single-layer thicknesses and NTG ratios of beach-bar sand bodies in sequence II of the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

类别	层系,层组/小层	最小值		最大值		平均值		主要分布区间		主要分布 区间占比/%		统计次数	
		单层 厚度/m	砂/地 比	单层 厚度/m	砂/地 比	单层 厚度/m	砂/地 比	单层厚度	砂/地比	单层 厚度	砂/地 比	单层 厚度	砂/地 比
碎屑岩滩-坝	II-1	0.88	0.20	3.56	0.37	2.00	0.28	1.5~2.5	0.20~0.35	86.76	96.65	725	239
	II-2	0.57	0.14	4.68	0.47	1.76	0.31	1.0~2.0	0.20~0.40	71.90	94.14	1463	239
	II-3	0.78	0.26	7.75	0.57	2.44	0.38	1.0~3.5	0.30~0.45	91.44	84.93	2114	239
	II-4	0.63	0.13	8.04	0.59	2.15	0.36	1.0~3.0	0.20~0.50	84.09	92.04	955	239
	II	0.57	0.26	8.04	0.44	2.13	0.34	1.0~3.0	0.30~0.40	81.99	85.36	5265	239
碳酸盐岩滩-坝	II-1/9	1.08	0.17	3.00	0.52	2.08	0.37	1.5~2.5	0.25~0.45	82.94	83.41	211	211

特征。结果表明,II层系沉积时期,台南地区滩-坝砂体发育,滩与坝共生,以滩为主(4个层组累积总面积为64.62 km²),其次为坝(累积总面积为38.76 km²)(表2)。

坝主要发育在背斜核部区域(台试5井区),翼部次之,西翼(台试5井区以西区域)坝发育程度优于东翼(台试5井区以东区域)。背斜构造两翼坝砂体延伸方向存在差异,东翼坝延伸方向主要为NE-SW向,西翼则呈NW-SE向展布(图8)。

台南地区II层系单个坝体平均面积为0.52 km²,平均长度为1390 m,平均宽度为482 m,平均长/宽比为2.98。进一步对比发现,背斜西翼发育的坝体数量较多,但规模相对较小(单个坝体平均面积为0.46 km²,平

均长度为1330 m,平均宽度为436 m);而东翼坝体虽然数量较少,但单个坝体规模较大(单个坝体平均面积为0.62 km²,平均长度为1470 m,平均宽度为548 m)(表2)。

台南气田坝体发育程度从II-4至II-1层组呈减弱趋势。具体表现为,II-4层组坝砂体总面积达10.48 km²(坝主体面积为3.35 km²),至II-1层组减少至9.15 km²(坝主体面积为2.09 km²)。值得注意的是,虽然坝体总面积与坝主体总面积均呈现减小趋势,但单个坝体的面积、长度和宽度等参数变化趋势不一,变化规律性较弱。

背斜两翼的坝体演化过程存在显著差异。其中,东翼坝体发育程度不断减弱,II-4层组坝砂体总面积

表 2 柴达木盆地台南地区七个泉组 II 层系滩-坝砂体分布面积统计

Table 2 Statistics of areas of beach-bar sand bodies in sequence II of the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

构造区域	层系,层组	全部坝体		单个坝体(平均值)				坝体 个数	泥坪 面积/km ²	泥坪 个数	滩面积/ km ²
		坝体总 面积/km ²	坝主体 面积/km ²	面积/km ²	长度/km	宽度/m	长/宽比				
背斜整体	II	38.76	11.00	0.52	1.39	482	2.98	74	20.26	40	64.62
	II-1	9.15	2.09	0.48	1.31	456	2.98	19	6.51	13	15.25
	II-2	9.76	2.69	0.61	1.62	472	3.49	16	4.55	10	16.60
	II-3	9.37	2.87	0.52	1.31	523	2.62	18	6.52	10	15.02
	II-4	10.48	3.35	0.50	1.33	477	2.94	21	2.68	7	17.75
背斜西翼	II	20.24	5.83	0.46	1.33	436	3.09	44	7.00	22	34.58
	II-1	5.75	1.36	0.44	1.35	397	3.39	13	1.48	7	8.23
	II-2	5.81	1.65	0.53	1.43	457	3.23	11	2.72	6	6.93
	II-3	4.52	1.50	0.45	1.28	457	2.83	10	1.87	6	9.07
	II-4	4.16	1.32	0.42	1.24	443	2.81	10	0.93	3	10.37
背斜东翼	II	18.52	5.17	0.62	1.47	548	2.84	30	13.26	18	30.04
	II-1	3.40	0.73	0.57	1.24	583	2.09	6	5.03	6	7.03
	II-2	3.95	1.04	0.79	2.05	504	4.05	5	1.83	4	9.68
	II-3	4.85	1.37	0.61	1.35	606	2.35	8	4.65	4	5.96
	II-4	6.32	2.03	0.57	1.42	507	3.05	11	1.75	4	7.39

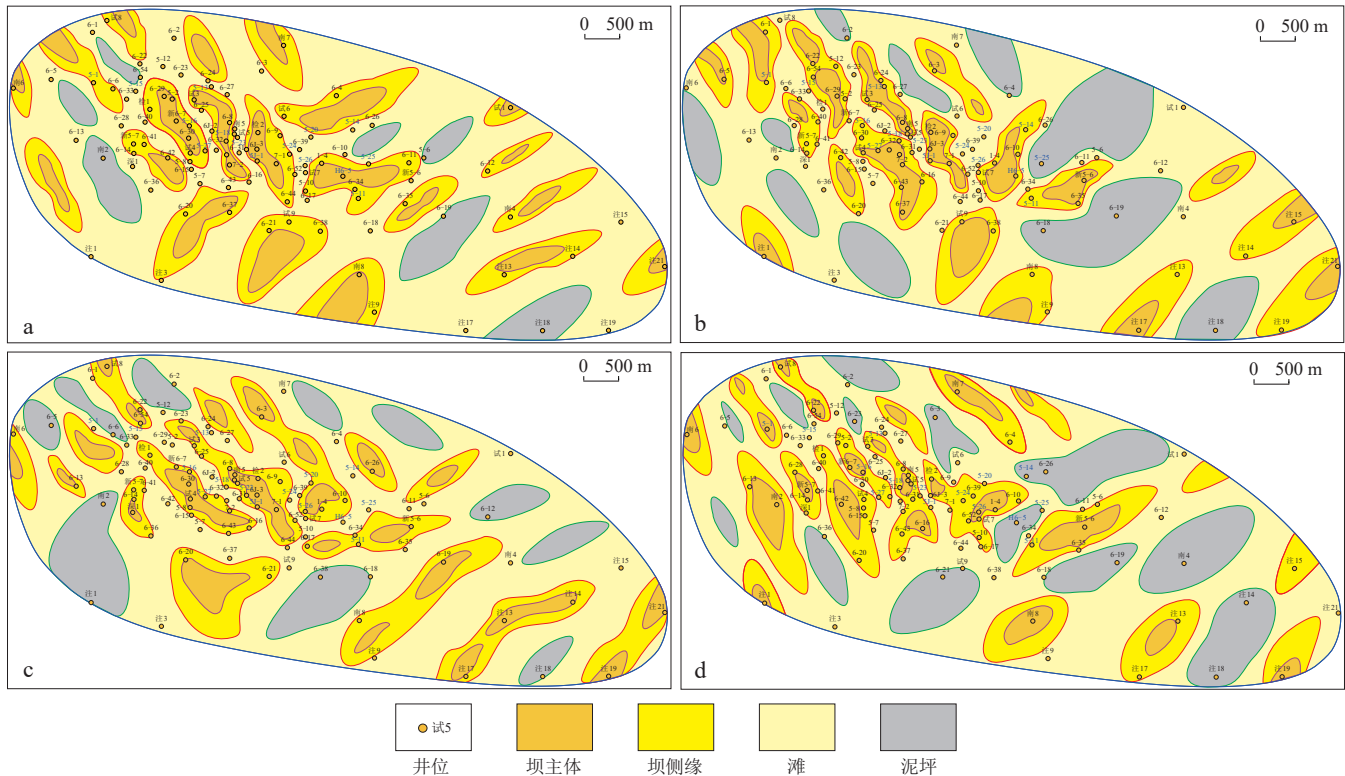


图8 柴达木盆地台南地区七个泉组Ⅱ层系滩-坝砂体平面分布

Fig. 8 Maps showing the planar distributions of beach-bar sand bodies in sequence II of the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

a. Ⅱ-4层组; b. Ⅱ-3层组; c. Ⅱ-2层组; d. Ⅱ-1层组

为 6.32 km^2 (坝主体面积为 2.03 km^2), 至Ⅱ-1层组减少至 3.40 km^2 (坝主体面积为 0.73 km^2), 坝体总面积和坝主体总面积不断减小; 西翼坝砂体发育程度先增强后减弱, 从Ⅱ-4至Ⅱ-2层组, 坝体总面积、坝主体面积和单个坝体平均面积等参数均持续增大, 而Ⅱ-2至Ⅱ-1层组则转为减小 (表2)。需要特别指出的是, 西翼单个坝体长/宽比平均值在整个演化过程中持续增大, 且统计分析显示坝砂体长度、宽度和长/宽比均与面积呈显著正相关关系。

2.2.3 台试4井区坝砂体平面展布及迁移特征

本文选取台试4井区坝体为研究对象, 解剖台南地区Ⅱ层系坝体平面展布及迁移规律。研究对象的选取基于以下两方面考虑: ① 台试4井区位于背斜的南翼, 临近背斜的核部 (台试5井区), 对湖平面变化响应敏感, 同时是坝体的主要发育区, 坝体的发育演化具有区域代表性; ② 台试4井区的坝体附近区域井控程度高, 坝体展布范围受钻井严格约束 (图9)。

Ⅱ-4层组沉积时期, 坝体呈近NW-SE向展布的纺锤形, 长度为 1.46 km , 面积为 0.57 km^2 。西北端至台6-54井附近, 东南端达台5-7井以北。坝主体分布在台6-29井至台试4井之间, 面积为 0.21 km^2 。

Ⅱ-3层组坝体规模增大且向东南方向迁移, 呈近NW-SE方向展布的弯月形, 长度为 1.74 km , 面积为 0.86 km^2 。西北端迁移 610 m 至台新6-7井附近, 东南端迁移 870 m 至台6-37井以南。坝主体分布在台6-32井至台6-37井之间, 面积为 0.31 km^2 。

Ⅱ-2层组坝体向西北方向回迁摆动, 规模减小, 同时伴有小幅度逆时针方向旋转, 坝体呈NW-SE方向展布的纺锤形, 长度为 2.02 km , 面积为 0.68 km^2 。西北端迁移 730 m 至台6-33井附近, 东南端迁移 770 m 至台6-16井以东。坝主体分布在台6-16井至台新6-7井之间, 面积为 0.27 km^2 。

Ⅱ-1层组坝体向西南方向扭动, 坝体面积增大而坝主体面积减小, 坝体呈近南北方向展布的纺锤形, 长度为 2.01 km , 面积为 0.77 km^2 。西北端迁移幅度不大, 迁移至台6-33井至台检1井之间, 东南端迁移 1000 m 至台6-20井以东。坝主体分布在台6-42井区域, 面积为 0.18 km^2 (图9, 图10)。

Ⅱ-4—Ⅱ-1层组坝体面积变化幅度较小, 迁移摆动性明显。这表明, 台试4井区Ⅱ层系坝体的迁移演化既受控于中-长期基准面旋回多期次频繁升降引起的湖平面波动, 也与研究区复杂的水动力条件相关。

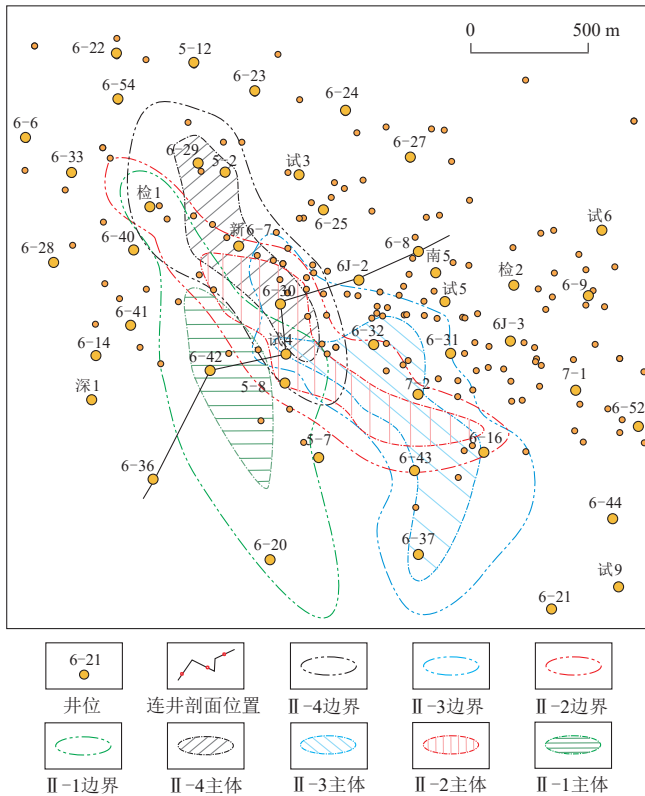


图9 柴达木盆地台南地区台试4井区七个泉组Ⅱ层系坝体平面分布叠合图(位置见图13)

Fig. 9 Superimposed map showing the distribution of bars in the Taishi 4 well block in sequence II of the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin (see Fig. 13 for the well block location)

3 沉积环境

3.1 古气候特征

上新世末期,青藏高原在喜马拉雅运动作用下开始隆升,在一定程度上阻挡了来自南方的印度洋和孟加拉湾的水汽,导致柴达木盆地第四纪气候由温暖-潮湿向寒冷-干旱方向波动发展。气候冷-暖波动频繁是柴达木盆地乃至全球第四纪气候变化的基本特征^[25-26]。孢粉研究表明,从更新世早期到晚期,三湖地区温暖水生生物孢粉含量逐步减少,而耐旱耐盐生物孢粉含量则逐步增加乃至占据绝对优势^[17]。这一变化反映了三湖地区更新世时期气候温暖-潮湿程度逐步减弱而寒冷-干燥程度逐步增强。

作为母岩的风化产物,黏土矿物对古气候的变化非常敏感^[27]。不同的古气候条件对不同的黏土矿物保存有利,如温暖潮湿气候环境常常有利于高岭石的形成和保存,而寒冷干旱的气候环境则有利于伊利石的形成和保存^[28]。因此,黏土矿物的含量变化及其组合是古气候恢复重建的重要手段^[29]。

台南地区7口井七个泉组黏土矿物分析表明(表3),黏土矿物以伊利石为主(质量分数平均值为44.2%),其次为伊/蒙混层(平均值为22.9%)和绿泥石

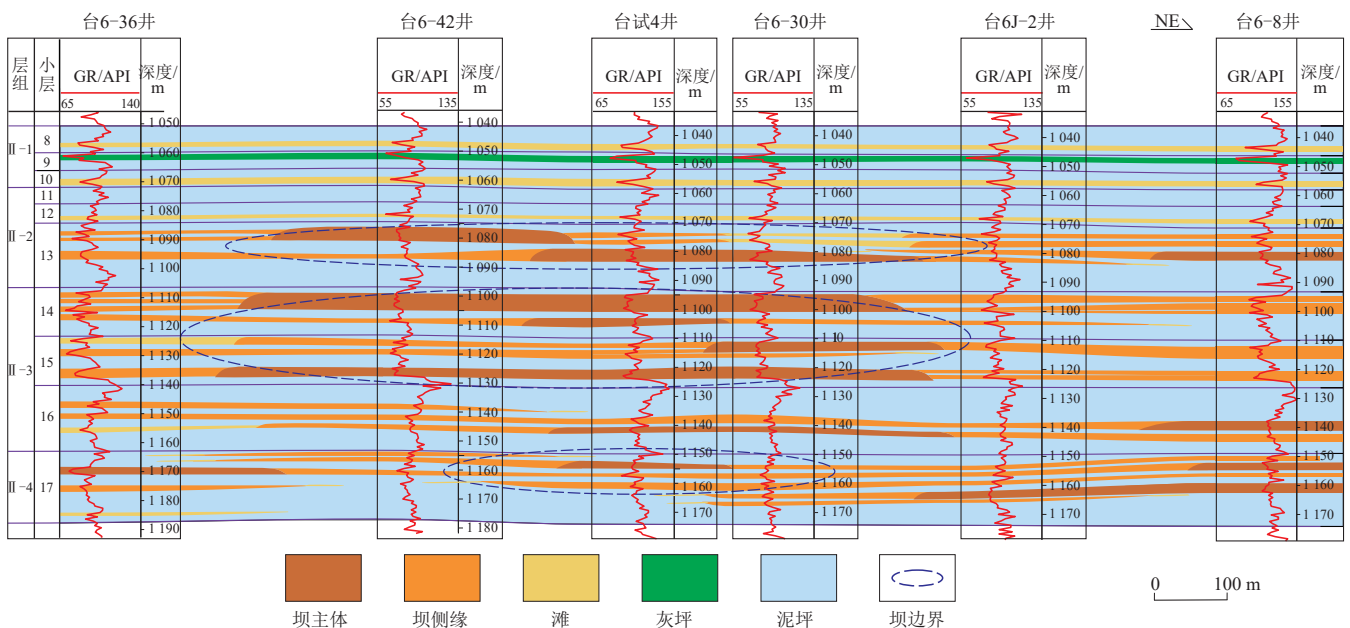


图10 柴达木盆地台南地区台6-36井—台6-42井—台试4井—台6-30井—台6J-2井—台6-8井七个泉组Ⅱ层系沉积相连井剖面(剖面位置见图9)

Fig. 10 Well-tied sedimentary facies section crossing wells Tai 6-36, Tai 6-42, Taishi 4, Tai 6-30, Tai 6J-2 and Tai 6-8 of the sequence II of the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin (see Fig. 9 for the section location)

表3 柴达木盆地台南地区七个泉组黏土矿物平均含量统计

Table 3 Statistics of average clay mineral contents in the Quaternary Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

层系	伊利石含量/%	伊/蒙混层含量/%	绿泥石含量/%	高岭石含量/%	蒙脱石含量/%	高岭石/伊利石
O	61.0	18.8	13.2	7.0	0	0.11
I	50.6	29.8	11.9	7.8	0	0.15
II	46.0	26.2	18.8	8.1	0	0.18
III	36.6	32.5	16.9	8.9	5.1	0.24
IV	41.5	14.8	25.3	11.3	7.2	0.27
V	41.3	13.4	25.5	10.7	9.2	0.26
VI	43.4	30.2	15.5	9.0	1.9	0.21
平均值	44.2	22.9	19.6	9.2	3.7	0.21

(平均值为19.6%),高岭石(平均值为9.2%)和蒙脱石(平均值为3.7%)含量较低且不稳定。

从Ⅵ层系—O层系,上述5种黏土矿物平均含量经历了不同的演化过程。伊利石含量从Ⅵ—Ⅲ层系逐渐递减,Ⅲ—O层系转为逐渐递增;伊/蒙混层在Ⅵ—Ⅳ层系逐渐递减(与伊利石同步),但在Ⅲ—O层系持续减少(与伊利石反向);绿泥石、高岭石及高岭石/伊利石比值在Ⅵ—Ⅳ层系逐渐增加(与伊利石和伊/蒙混层反向),Ⅳ—O层系转为逐渐减少(与伊/蒙混层同步)。

高含量的原生矿物伊利石和较高含量的绿泥石组合指示干旱寒冷的气候环境。同时,该时期较高含量的伊/蒙混层、低含量的高岭石和蒙脱石组合指示气候环境具有一定的温暖-潮湿。该黏土矿物组合反映了七个泉组沉积时期台南地区处于寒冷-干旱的气候

环境,气候波动性明显,温暖-潮湿程度较低,从早更新世早期至晚期,气候的干旱程度和寒冷程度在波动变化中呈逐渐增加趋势。

3.2 水体盐度特征

湖盆水体古盐度恢复方法主要包括锶/钡比值法、硼元素法、钾/钠比值法、沉积磷酸盐法、碳-氧同位素法和氯盐含量法^[30-31]。其中,氯盐含量恢复湖盆水体古盐度方法因其指示范围广(覆盖了从淡水到盐水的完整盐度区间)和灵敏度高的优点,在国内得到了广泛运用^[32-33]。

通过分析台南地区12口井七个泉组O—Ⅶ层系泥岩岩屑氯离子含量([Cl⁻]),发现其数值分布范围较大,介于(594~204 750)×10⁻⁶,平均值为9 504×10⁻⁶,普遍高于2 000×10⁻⁶(表4)。根据柴达木盆地

表4 柴达木盆地台南地区七个泉组各层系泥岩岩屑氯离子含量平均值统计

Table 4 Statistics of average chloride ion contents in mudstone cuttings in the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

序号	井号	各层系氯离子含量/10 ⁻⁶							
		O	I	II	III	IV	V	VI	VII
1	台南1	60 074	47 249	48 699	68 064	—	—	—	—
2	台南2	12 806	12 855	7 597	10 717	8 043	6 461	—	—
3	台南3	11 969	7 981	7 138	5 231	5 308	4 496	—	—
4	台南4	22 595	22 149	16 602	7 922	8 464	8 526	6 601	6 788
5	台南5	9 867	9 374	8 554	5 435	4 557	6 350	8 781	8 853
6	台南6	—	11 226	10 067	6 307	8 213	6 330	5 181	6 204
7	台南7	—	12 917	6 450	6 440	4 529	4 822	4 649	5 551
8	台南8	—	5 703	4 125	5 231	4 303	3 044	3 191	3 012
9	台南11	8 716	8 022	7 148	7 279	4 566	3 902	3 227	2 620
10	台南18	4 160	4 325	3 878	3 250	2 528	2 401	2 322	2 646
11	台试1	75 006	5 518	3 319	4 939	3 596	3 980	5 080	3 542
12	台试2	10 004	9 858	3 671	4 527	4 144	4 236	4 586	5 490
13	台试5	—	—	9 464	5 824	6 692	2 146	—	—

注:“—”为无数据。

泥岩氯离子含量与湖水类型对应关系^[17,34-35],可将研究区水体盐度划分为5个等级:淡水($[\text{Cl}^-] < 500 \times 10^{-6}$,占比0)、微咸水($[\text{Cl}^-] (500 \sim 2\,000) \times 10^{-6}$,占比3.49%)、半咸水($[\text{Cl}^-] (2\,000 \sim 10\,000) \times 10^{-6}$,占比71.11%)、咸水($[\text{Cl}^-] (10\,000 \sim 20\,000) \times 10^{-6}$,占比12.75%)和盐水($[\text{Cl}^-] > 20\,000 \times 10^{-6}$,占比12.63%)。这一分布特征表明,七个泉组O—Ⅶ层系主要为半咸水环境,其次为咸水-盐水环境,偶尔出现微咸水环境,缺失淡水环境。进一步分析发现,该区水体具有以下3个特点:①氯离子含量数据变化大,分布呈高、低间互的特征;②O层系氯离子含量明显高于其他层系;③位于台南背斜核部井的氯离子含量普遍高于背斜翼部(表4;图11)。这些特征反映了七个泉组沉积时期台南地区总体上水体盐度较大,淡水补给条件较差,水体盐度在波动中增大。这一发现与研究区气候在干湿波动中逐步向干旱化发展的认识相吻合。利用泥岩岩屑氯离子研究台南地区水体盐度的变化所反应的古气候变化特征与黏土矿物组合特征分析和孢粉组合分析结果相一致。

4 滩-坝砂体沉积模式及其控制因素

4.1 滩-坝砂体沉积模式

在综合分析柴达木盆地台南地区第四系七个泉组沉积环境、水动力条件、滩-坝砂体平面分布规律和发育演化特征的基础上,建立了台南地区干旱咸水环境

远岸砂质滩-坝沉积演化模式(图12)。台南背斜为第四纪低幅度同沉积背斜构造,属于祁连山前斜坡带的第二排构造带——台南-涩北构造带的一部分,距离湖岸线较远。七个泉组Ⅱ层系沉积时期,台南地区气候干旱寒冷,湖水以半咸水-咸水为主,粗粒陆源碎屑组分供应量偏少,滩-坝砂体岩性偏细,单个坝体规模较小,数量多,平面上叠加、连片分布,总体规模较大。湖平面升降频繁,在长期基准面旋回下降的背景下,滩-坝砂体整体上向湖盆中心方向迁移,呈进积叠加样式,同时受多级次基准面旋回和多个方向物源供给的影响,台南地区滩-坝砂体具有复杂的平面展布形态和演化特征,其中,Ⅱ-4—Ⅱ-3层组,基准面旋回下降,滩-坝砂体向湖盆方向进积,Ⅱ-3—Ⅱ-2层组,基准面旋回小幅度上升,滩-坝砂体向盆地边缘方向小幅度退积,Ⅱ-2—Ⅱ-1层组,基准面旋回下降,滩-坝砂体向湖盆方向进积幅度较大(图12)。

4.2 滩-坝砂体发育主控因素

滩-坝砂体的发育是多重因素综合作用的结果,主要包括构造、古地貌、水动力条件和物源等^[1,7,15],台南地区滩-坝砂体发育的主控因素为干旱气候环境和低幅度同沉积背斜古地貌背景,陆源碎屑供给和水动力条件则是滩-坝砂体发育演化的次要控制因素。

4.2.1 古地貌控制滩-坝砂体富集区域

台南地区属于台南背斜构造,台南背斜是一个从早更新世早期就开始发育、呈近东西方向展布的低幅

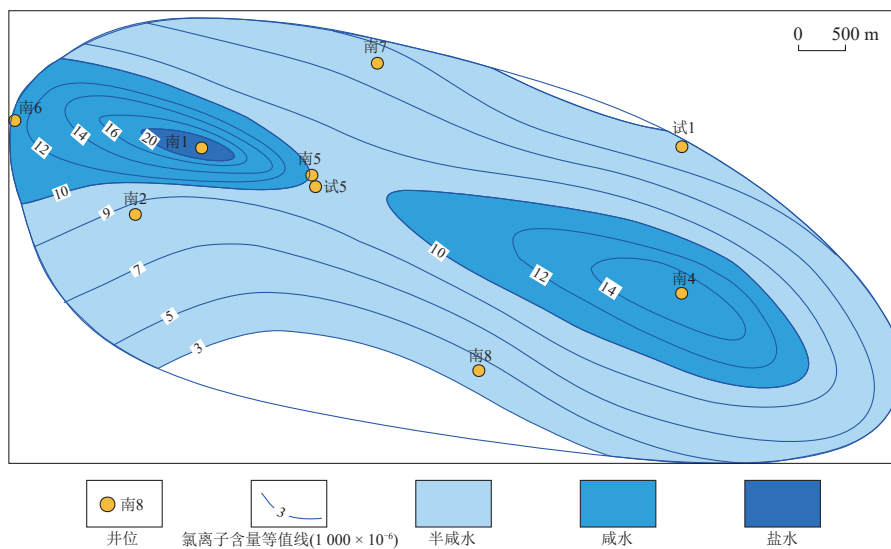


图11 柴达木盆地台南地区七个泉组Ⅱ层系泥岩岩屑氯离子含量等值线图

Fig11 Contour map showing the chloride ion contents in mudstone cuttings in sequence II of the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

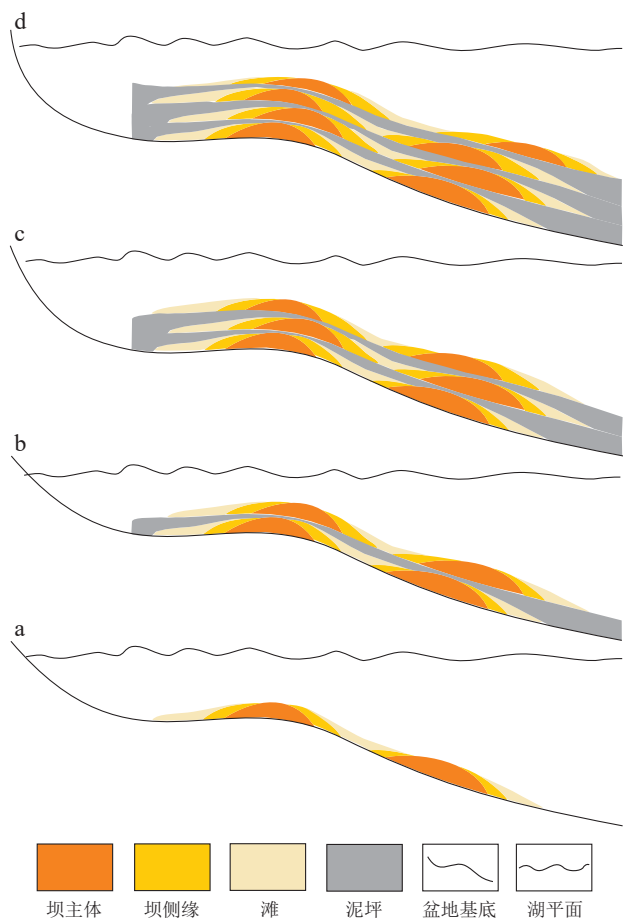


图12 柴达木盆地台南地区七个泉组滩-坝砂体沉积演化模式示意图

Fig. 12 Diagrams showing the sedimentary evolution models of beach-bar sand bodies in the Quaternary Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

- a. II-1层组台南地区滩-坝砂体分布示意图; b. II-2层组台南地区滩-坝砂体分布示意图; c. II-3层组台南地区滩-坝砂体分布示意图; d. II-4层组台南地区滩-坝砂体分布示意图

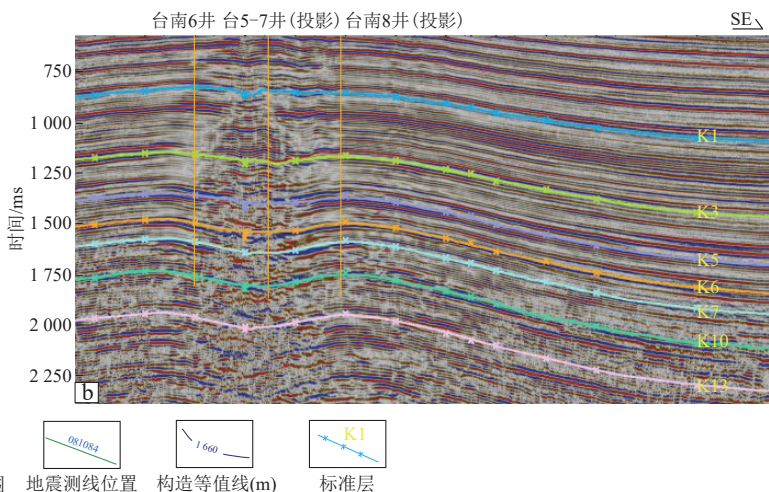
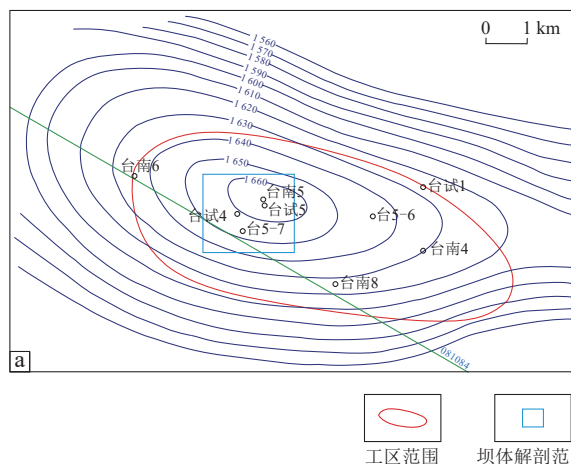


图13 柴达木盆地台南背斜K3标准层构造图(构造位置见图1)(a)和081084地震测线剖面(剖面位置见图1)(b)

Fig. 13 Structural contour map of the K3 marker bed of the Tainan anticline in the Qaidam Basin (see Fig. 1 for the marker bed location) (a) and profile of the seismic line 081084 (see Fig. 13a for the section location) (b)

度同沉积背斜^[20],构造形态完整,断层不发育,东西两翼平缓,南北两翼稍陡,构造高点位于台试5井区附近,继承性发育(图13)。属于三湖北斜坡背景上台南-涩北构造带的一部分,滩-坝砂体主要发育在背斜的核部区域,背斜构造是滩-坝砂体的主要富集区(图5,图8)。

4.2.2 陆源碎屑供给控制滩-坝砂体发育程度

物源是滩-坝砂体发育的物质基础,七个泉组沉积时期,昆仑山前乌图美仁物源和格尔木物源所形成的辫状三角洲为台南地区碎屑岩滩-坝砂体的发育提供了物质保障^[21](图1)。台南地区距离盆缘物源区较远,发育的碎屑岩滩-坝砂体岩性偏细,以粉砂岩为主,随着气候向干旱化方向发展,陆源碎屑供给强度减弱,直接导致台南地区碎屑岩滩-坝砂体发育程度减弱,在陆源碎屑缺乏时期,在背斜核部区域及翼部的局部区域发育大面积的碳酸盐岩滩-坝(图5)。

4.2.3 古气候控制滩-坝砂体岩石组分

古气候对滩-坝砂体岩石组分的控制是通过控制物源的发育状况来实现的,潮湿气候背景下,陆源碎屑供应丰富,湖泊一般是淡水环境,滩-坝砂体中的盐类组分(含碳酸盐和硫酸盐)含量很少甚至不含;在干旱的气候背景下,物源供给强度减弱,导致陆源碎屑供应量减少,湖泊水体往往是半咸水-咸水,滩-坝砂体中的盐类组分含量就会增加^[1]。七个泉组沉积时期距离湖岸线较远,主要处于浅湖沉积环境,气候干旱寒冷,半咸水-咸水水体介质导致滩-坝砂体的碳酸盐组分含量较高(表1)。

4.2.4 水动力条件控制碎屑岩滩-坝砂体展布与演化

七个泉组碎屑岩滩-坝砂体平面展布与演化的复杂性主要受控于复杂的水动力条件,其次是湖平面频繁的升降。台试4井区滩-坝砂体向南迁移摆动,同时坝体延伸方向还发生了扭动,表明该坝体不但是受湖平面升降变化影响,更主要的是受多个方向水动力的影响^[23]。同样,台南背斜两翼滩-坝砂体延伸方向不一致,造成这种分布格局主要是因为台南背斜两翼的水动力条件不一致。其中,背斜东翼主要受到研究区东南方向格尔木物源的影响,该物源水系的主要流向为近NW向^[21],东翼滩-坝砂体的延伸方向大致与主流向垂直;背斜西翼主要受到研究区西南方向的乌图美仁物源的影响,该物源水系的主要流向为近NE向^[21],西翼滩-坝砂体的延伸方向大致与主流向垂直。

5 结论

1) 台南地区第四系七个泉组主要发育碎屑岩滩-坝,偶见碳酸盐岩滩-坝,其中,碎屑岩滩-坝砂体岩性主要为含岩屑长石质细砂岩-粉砂岩,碳酸盐岩滩-坝岩性为具有粉-泥晶结构的含泥、含粉砂泥晶灰岩,均形成于干旱寒冷的古气候环境和半咸水-咸水水体介质环境。

2) 七个泉组Ⅱ层系沉积时期,台南地区滩-坝砂体发育,主要分布在背斜的核部区域。其中,碎屑岩滩-坝呈条带状分布,单坝砂体面积平均值为0.52 km²、单层厚度平均值为2.13 m,砂/地比值为0.34,滩、坝共生,以滩为主,背斜构造两翼坝砂体展布方向不一致,东翼主要为NE-SW向,而西翼则为NW-SE向;而碳酸盐岩滩-坝主要呈环形分布,平均单层厚度为2.08 m,平均灰/地比为0.37。

3) 七个泉组Ⅱ层系沉积时期,台南地区碎屑岩滩-坝砂体迁移摆动明显,台南背斜两翼滩-坝砂体经历不同的发育演化过程。

4) 台南地区七个泉组沉积时期滩-坝砂体发育演化受低幅度同沉积背斜古地貌背景、物源供给、干旱气候环境和复杂的水动力条件控制,其中干旱气候环境和低幅度同沉积背斜是台南地区滩-坝发育的主控因素。

参 考 文 献

- [1] 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 (Chinese Edition), 2015, 17(4): 427-440.
- [2] 冯增昭. 沉积岩石学[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 1994: 102-110.
FENG Zengzhao. Sedimentary petrology [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 102-110.
- [3] 杜晓峰, 庞小军, 黄晓波, 等. 辽西凹陷北部古近系沙河街组二段源-汇系统及其对滩-坝砂体的控制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 662-674.
DU Xiaofeng, PANG Xiaojun, HUANG Xiaobo, et al. Characteristics of the source-to-sink system for the Paleogene Sha 2 Member of northern Liaoxi Sag, offshore Bohai Bay Basin and its control on beach bar sands [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 662-674.
- [4] 张自力, 李琦, 朱筱敏, 等. 陆相断陷湖盆滩-坝沉积特征与地震沉积学响应——以渤海湾盆地霸县凹陷古近系沙河街一段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 970-989.
ZHANG Zili, LI Qi, ZHU Xiaomin, et al. Sedimentary characteristics and seismic sedimentologic responses of beach-bar deposits in a downfaulted lacustrine basin: A case study of Es¹ in the Palaeogene Baxian Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 970-989.
- [5] 王旭影, 姜在兴. 苏北盆地海安凹陷古近系阜三段滩-坝沉积特征[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(5): 57-64.
WANG Xuying, JIANG Zaixing. Sedimentary characteristics of beach-bar in the 3rd member of Paleogene Funing Formation in Hai'an Sag, north Jiangsu Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(5): 57-64.
- [6] 刘国勇, 薛建勤, 吴松涛, 等. 柴达木盆地柴西坳陷古近系-新近系石油地质特征与油气环带状分布模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1007-1017.
LIU Guoyong, XUE Jianqin, WU Songtao, et al. Petroleum geology and ring-shaped distribution of the Paleogene-Neogene hydrocarbon resources in western Qaidam Depression, Qaidam Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1007-1017.
- [7] 易定红, 石亚军, 李翔, 等. 柴达木盆地西部扎哈泉地区新近系上干柴沟组滩-坝砂体沉积演化及其控制因素[J]. 古地理学报, 2022, 24(4): 713-727.
YI Dinghong, SHI Yajun, LI Xiang, et al. Sedimentary evolution and controlling factors of beach bar sand bodies of the Upper Ganchaigou Formation of Neogene in Zhahaquan area, western Qaidam Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition),

- 2022, 24(4): 713-727.
- [8] 王艳清, 刘占国, 宋光永, 等. 咸化湖盆滩-坝砂岩发育特征、控砂机制及油气成藏特征——以柴达木盆地西南地区新近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 742-754.
- WANG Yanqing, LIU Zhanguo, SONG Guangyong, et al. Development, sand control mechanism and hydrocarbon accumulation of beach-bar sandstone in a saline lake basin: A case from the Neogene of southwestern Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 742-754.
- [9] 杨雨, 王一刚, 文应初, 等. 川东飞仙关组沉积相与鲕滩气藏的分布[J]. 天然气勘探与开发, 2001, 24(3): 18-21.
- YANG Yu, WANG Yigang, WEN Yingchu, et al. Distribution of sedimentary facies and oolitic beach gas reservoirs in Feixianguan Formation in eastern Sichuan Province [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2001, 24(3): 18-21.
- [10] THOMPSON W O. Original structures of beaches, bars, and dunes[J]. GSA Bulletin, 1937, 48(6): 723-752.
- [11] 邵长印, 宋璠, 张世奇, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷SC7区块古近系东营组二段下亚段滩-坝储集体构型特征[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 486-501.
- SHAO Changyin, SONG Fan, ZHANG Shiqi, et al. Architectural characteristics of beach-bar reservoirs in the lower submember of the 2nd member of the Paleogene Dongying Formation in Block SC7, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 486-501.
- [12] SCHWARTZ R K. Bedform, texture, and longshore bar development in response to combined storm wave and current dynamics in a nearshore helical flow system[J]. Journal of Coastal Research, 2012, 28(6): 1512-1535.
- [13] WRIGHT L D, SHORT A D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis[J]. Marine Geology, 1984, 56(1/4): 93-118.
- [14] HOUSER C, GREENWOOD B. Hydrodynamics and sediment transport within the inner surf zone of a lacustrine multiple-barred nearshore[J]. Marine Geology, 2005, 218(1/4): 37-63.
- [15] 王延章, 宋国奇, 王新征, 等. 古地貌对不同类型滩-坝沉积的控制作用——以东营凹陷东部南坡地区为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(4): 13-16.
- WANG Yanzhang, SONG Guoqi, WANG Xinzhang, et al. Controlling effect of paleogeomorphology on deposition of beach and bar sand reservoir-case study of south slope, east Dongying depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4): 13-16.
- [16] 刘成龙, 王艳忠, 杨怀宇, 等. 高精度层序约束下三角洲-滩-坝沉积体系精细刻画与岩性圈闭分布规律——以渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷南坡东段沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1121-1141.
- LIU Chenglong, WANG Yanzhong, YANG Huaiyu, et al. Fine characterization and lithologic trap distribution patterns of delta-beach bar sedimentary system under high-precision sequence constraints: A case study of the upper submember of the 4th member of the Shahejie Formation in the eastern segment of the southern gentle slope of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1121-1141.
- [17] 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 (Chinese Edition), 2004, 6(1): 110-118.
- [18] 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.
- [19] 杨玲, 鲍志东, 陈开远, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系沉积相研究[J]. 科技导报, 2010, 28(14): 59-66.
- YANG Ling, BAO Zhidong, CHEN Kaiyuan, et al. Study on sedimentary facies of the Quaternary in Sanhu area of Qaidam Basin[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(14): 59-66.
- [20] 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.
- [21] 易定红, 刘应如, 李积永, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系七个泉组物源研究[J]. 古地理学报, 2024, 26(3): 644-654.
- YI Dinghong, LIU Yingru, LI Jiyong, et al. Provenance features of the Quaternary Qigequan Formation in Sanhu area, Qaidam Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2024, 26(3): 644-654.
- [22] 付锁堂, 马达德, 郭召杰, 等. 柴达木走滑叠合盆地及其控油气作用[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 712-722.
- FU Suotang, MA Dade, GUO Zhaojie, et al. Strike-slip superimposed Qaidam Basin and its control on oil and gas accumulation, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 712-722.
- [23] 易定红, 刘应如, 李积永, 等. 柴达木盆地台南地区滩-坝砂体粒度特征及水动力[J/OL]. 沉积学报: 1-12 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.114>.
- YI Dinghong, LIU Yingru, LI Jiyong, et al. Grain size characteristics and hydrodynamic conditions of beach-bar sand bodies in Tainan area, Qaidam Basin [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1-12 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.114>.

- [24] 陈世悦, 杨剑萍, 操应长. 惠民凹陷西部下第三系沙河街组两种滩-坝沉积特征[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(3): 1-4.
CHEN Shiyue, YANG Jianping, CAO Yingchang. Sedimentary characteristics of two kinds of beach-bars of Oligocene Shahejie Formation in western Huimin Depression, China [J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(3): 1-4.
- [25] 康安, 朱筱敏, 韩德馨, 等. 柴达木盆地第四纪孢粉组合及古气候波动[J]. 地质通报, 2003, 22(1): 12-15.
KANG An, ZHU Xiaomin, HAN Dexin, et al. Quaternary sporopollen assemblages and paleoclimatic fluctuation in the Qaidam Basin [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(1): 12-15.
- [26] 朱筱敏, 康安, 韩德馨, 等. 柴达木盆地第四纪环境演变、构造变形与青藏高原隆升的关系[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 367-376.
ZHU Xiaomin, KANG An, HAN Dexin, et al. Relation among Quaternary environmental evolution, tectonic deformation in the Qaidam Basin and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(3): 367-376.
- [27] 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 粘土矿物的环境意义[J]. 地学前沿, 2002, 9(2): 337-344.
TANG Yanjie, JIA Jianye, XIE Xiande. Environment significance of clay minerals[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 337-344.
- [28] 陈涛, 王欢, 张祖青, 等. 粘土矿物对古气候指示作用浅析[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(4): 416-420.
CHEN Tao, WANG Huan, ZHANG Zuqing, et al. Clay minerals as indicators of paleoclimate[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2003, 22(4): 416-420.
- [29] 孙庆峰, 陈发虎, COLIN C, 等. 粘土矿物在气候环境变化研究中的应用进展[J]. 矿物学报, 2011, 31(1): 146-152.
SUN Qingfeng, CHEN Fahu, COLIN C, et al. Application progress of clay minerals in the researches of climate and environment[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(1): 146-152.
- [30] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 34-35.
DENG Hongwen, QIAN Kai. Sedimentary geochemistry and environmental analysis [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 34-35.
- [31] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 405-414.
XIONG Xiaohui, XIAO Jiafei. Geochemical indicators of sedimentary environments—A summary [J]. Earth and Environment, 2011, 39(3): 405-414.
- [32] 齐亚林, 郭正权, 楚美娟, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长期Cl-演化机制分析及意义[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(5): 18-23.
QI Yalin, GUO Zhengquan, CHU Meijuan, et al. Cl-evolution mechanism of Yanchang stage of Late Triassic in Ordos Basin and its significance[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(5): 18-23.
- [33] 贾艳艳, 邢学军, 孙国强, 等. 柴北缘西段古-新近纪古气候演化[J]. 地球科学, 2015, 40(12): 1955-1967.
JIA Yanyan, XING Xuejun, SUN Guoqiang, et al. The Paleogene-Neogene paleoclimate evolution in western sector of northern margin of Qaidam Basin [J]. Earth Science, 2015, 40(12): 1955-1967.
- [34] 易定红, 李翔, 石亚军, 等. 柴达木盆地英雄岭构造带渐新世湖水盐度对碳酸盐岩沉积发育的控制作用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(1): 10-18.
YI Dinghong, LI Xiang, SHI Yajun, et al. Controlling effect of Oligocene lake salinity on carbonate sedimentary development in Yingxiongling tectonic belt, Qaidam Basin [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2022, 45(1): 10-18.
- [35] 易定红, 刘应如, 李积永, 等. 柴达木盆地南八仙地区渐新世沉积环境及储层物性控制因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(3): 705-720.
YI Dinghong, LIU Yingru, LI Jiyong, et al. Oligocene sedimentary environment and controlling factors of reservoir physical properties in Nanbaxian area, northern Qaidam Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(3): 705-720.

(编辑 王迪)