

柴达木盆地台南地区滩坝砂体粒度特征及水动力

易定红¹, 刘应如¹, 李积永², 刘俊丰², 奎明清², 陈汾君², 吴颜雄², 李红哲¹, 张婷静¹

1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 兰州 730020

2. 中国石油青海油田公司, 甘肃敦煌 736202

摘要 【目的】深入研究柴达木盆地东部台南地区第四系七个泉组滨浅湖滩坝砂体, 可为研究区天然气勘探前景以及预测有利勘探区带和勘探目标提供依据。【方法】在岩心观察和钻(测)井资料综合分析的基础上, 结合岩石薄片、粒级—标准偏差、粒度累积概率曲线、环境敏感粒度组分等参数分析, 对该地区七个泉组滨浅湖滩坝砂体粒度变化特征及其水动力学规律进行了详细研究。【结果】(1) 台南地区七个泉组沉积时期为滨浅湖沉积环境, 滩坝砂体发育, 岩石疏松, 胶结差, 易破碎, 粒度细, 岩性主要为岩屑长石细砂岩—粉砂岩, 成分成熟度中等—较差、分选磨圆度中等—较差; (2) 七个泉组沉积时期, 研究区滩坝砂体粒度累积概率曲线呈6种样式, 主要为一跳一悬式(占64.4%), 其次为多段式(占11.9%), 第三为二跳一悬式(占7.5%); (3) 七个泉组沉积时期, 研究区滩坝砂体粒级—标准偏差图呈4种样式, 主要为多峰型(占50.0%), 其次为双峰型(占33.4%), 单峰型和三峰型最少(均占8.3%)。结合粒度概率累积曲线和古地貌分析, 确定了4种环境敏感粒度组分, 粒径由细至粗, 依次对应悬浮搬运作用、波浪作用、沿岸流作用和风暴浪作用, 其中, 最主要的水动力是波浪作用, 其环境敏感粒度组分平均值占粒度总体的27.9%, 其次是悬浮作用(平均值占15.3%)和沿岸流(平均值占11.4%), 风暴浪作用最弱(平均值占2.3%); (4) 悬浮作用对滩坝砂体发育的影响程度由台南背斜的核部向翼部增强, 而波浪作用刚好相反, 沿岸流作用对滩坝砂体的影响集中在背斜的东西两翼。【结论】指出了台南地区优质滩坝砂体的平面分布范围, 为该地区天然气勘探开发提供了技术支撑。

关键词 滩坝砂体; 粒度累积概率曲线; 环境敏感粒度组分; 七个泉组; 台南地区; 柴达木盆地

第一作者简介 易定红, 男, 1975年出生, 硕士, 高级工程师, 储层沉积学, E-mail: dingyh2007@126.com

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

0 引言

陆源碎屑沉积岩粒度组成是衡量岩石沉积时所处环境特征的一项重要指标, 也是沉积岩本身的重要特性^[1], 通常, 沉积岩的不同粒度组分含量(砂、粉砂和黏土)和粒度参数(平均粒径、偏态、峰态和分选系数)被用作揭示沉积环境变化的手段和方法^[1-2]。粒度分布状况受到搬运介质性质、能量和搬运方式等流体动力学条件的共同控制, 是判别水动力条件和划分沉积环境(沉积相)的重要依据, 应用粒度概率累积曲线建立沉积环境的典型模式已成

收稿日期: 2023-08-09; 收修改稿日期: 2023-11-04

基金项目: 中国石油重大科技项目(2021DJ08, 2021DJ1705, 2016E-01); 国家重大科技专项(2016ZX05003-006) [Foundation: China Petroleum Science and Technology Major Project, No. 2021DJ08, 2021DJ1705, 2016E-01; National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05003-006]

为环境和沉积相分析的重要方法和手段^[1-2], 并在水动力学研究及沉积相(微相)的判别中发挥重要的作用^[2]。但是, 沉积岩往往是由多个物源或多个水动力综合作用形成, 全样的粒度数据只能近似地作为沉积环境的代用指标^[3-4]。水动力能量不同, 所能搬运沉积物的粒度范围也有差异, 不同能量的水动力具有不同的环境敏感粒度组分^[5], 环境敏感粒度组分是指那些对沉积环境中水体能量变化敏感, 能够指示沉积环境中不同能量水动力的粒度组分^[5]。环境敏感粒度组分分析是一种从多峰态的频率分布曲线中分离出单一粒度组分进行沉积水动力研究的方法^[5-7], 已经广泛应用到滨浅湖滩坝砂体^[3,5-6]、边缘海沉积物^[8-9]、深海沉积物^[10-11]和黄土^[12-13]沉积, 并取得了很好的效果。

滩坝砂体的发育演化是风(风浪)—源(物源)—盆(盆地演化)作用的结果^[14-19], 滩坝砂体发育在滨浅湖地区, 由不同粒径范围的碎屑颗粒组成, 物源主要来自邻近地区三角洲或其他沿岸地区的砂体, 在沿岸流作用和波浪作用下反复淘洗、搬运沉积而成^[14-15]。滨浅湖地区波浪作用的强弱在一定程度上控制了滩坝砂体的平面形态和规模^[15-17], 滩坝砂体粒度分布特征是滨浅湖环境中水动力能量强弱的响应^[16], 沿岸流作用和波浪作用控制的滩坝砂体粒度特征不同, 即存在不同的环境敏感粒度组分, 因此, 可以根据环境敏感粒度组分分析, 结合古构造和古地貌来确定滩坝砂体形成发育时期的水动力类型^[5,16]。用粒度—标准偏差方法计算环境敏感粒度组分的个数和分布范围, 并分析其沉积学意义在柴达木盆地滩坝砂体中的应用目前尚未见报道。

本文以柴达木盆地东部台南地区第四系七个泉组滩坝砂体为研究对象, 在岩心观察描述的基础上, 对研究区 12 口重点取心井进行取样, 共计取样 296 块, (需要说明的是这 12 口取样井分布均匀, 296 块样品涵盖全部的开发层系, 样品的代表性可靠。)并对每个样品进行粒度分析(粒度分析由中国石油青海油田公司分析测试中心完成), 绘制了全部样品的粒度概率累计曲线图件, 利用环境敏感粒度组分分析方法, 采用“粒度—标准偏差”计算方法, 提取了 12 口井滩坝砂体的环境敏感粒度组分, 结合区域地质认识和研究区古地貌研究, 首次探讨了台南地区七个泉组滩坝砂体沉积的水动力类型和特征及其对滩坝砂体发育演化的影响, 以期为其他类似地区远源滩坝砂体沉积水动力定量分析提供可行的方法。

1 区域地质背景

上新世末期, 青藏高原在喜山运动的影响下剧烈隆升, 导致位于其东北缘的柴达木盆地中西部地区基底整体被抬升, 盆地内部古近系—新近系被大幅度隆起, 新近系部分被剥蚀, 第四系大部分地区缺失, 盆地沉积中心向东迁移至三湖坳陷^[20-21]。三湖坳陷分为中央凹陷、

南斜坡和北斜坡 3 个二级构造单元^[22] (图 1a)。第四纪柴达木湖盆经历了早更新世湖盆形成期、中更新世湖盆扩张至鼎盛期、晚更新世湖盆萎缩期 3 个演化阶段, 从盆地边缘山前带的冲积扇沉积, 经河流三角洲沉积至盆地中心的湖泊相沉积^[22-23] (图 1a)。

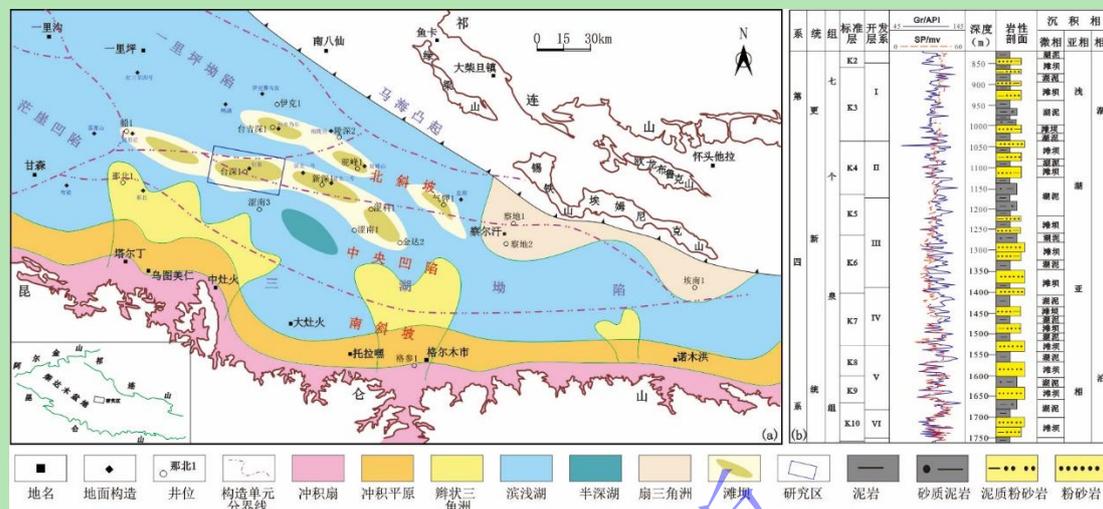


图 1 柴达木盆地台南地区第四系七个泉组沉积时期古地理图 (a) 和综合柱状图 (b)

Fig.1 Quaternary Qigequan Formation in the Tainan area, Qaidam Basin: (a) paleogeographic map; (b) comprehensive histogram

台南地区位于柴达木盆地东部三湖凹陷北斜坡, 是一个自早更新世就开始持续发育的低幅度同沉积背斜构造^[24], 构造近东西方向展布、形态完整, 东西两翼平缓, 南北两翼较陡, 其中, 南陡北缓, 断层不发育, 面积约 40 km²。第四系七个泉组地层厚度平均为 2 100 m, 受南面昆仑山乌图美仁物源的影响, 发育滨浅湖沉积环境^[22], 滩坝砂体发育; 天然气主要产于七个泉组的中上部地层, 大致对应于电测标准层 K2~K10, 分为 6 个开发层系, 自上而下依次为 I~VI 层系 (图 1b)。

2 滩坝砂体沉积特征

2.1 岩石学特征

台南地区第四系七个泉组滩坝砂体结构疏松、胶结程度差, 易破碎^[22], 主要由浅灰色、灰色、深灰色薄层、中层细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩组成 (图 2), 对应测井曲线形态以指形为主 (图 1b), 粒度数据统计表明: 滩坝砂体以细粉砂组分为主 (体积百分含量介于 8.76%~49.14%, 平均为 34.73%), 其次为黏土组分 (体积百分含量介于 15.57%~42.98%, 平均为 30.09%), 第三为粗粉砂组分 (体积百分含量介于 9.16%~36.41%, 平均为 20.69%); 粒度分布区间为细砂至黏土级, 粒度平均值 (Mz) 介于 2.47 ϕ ~9.17 ϕ , 平均为 6.29 ϕ ; 颗粒分选中等至差, 标准偏差 (σ) 介于 0.95 ϕ ~3.75 ϕ , 平均为 2.46 ϕ ; 偏度 (Sk) 分布从很负偏

态至很正偏态, 数值介于-0.59~3.04, 平均为 0.42; 峰度 (K_g) 分布从平坦至非常尖锐, 数值介于 0.04~14.43, 平均为 1.87, 表明了台南地区滩坝砂体经历了复杂的水动力演化过程。

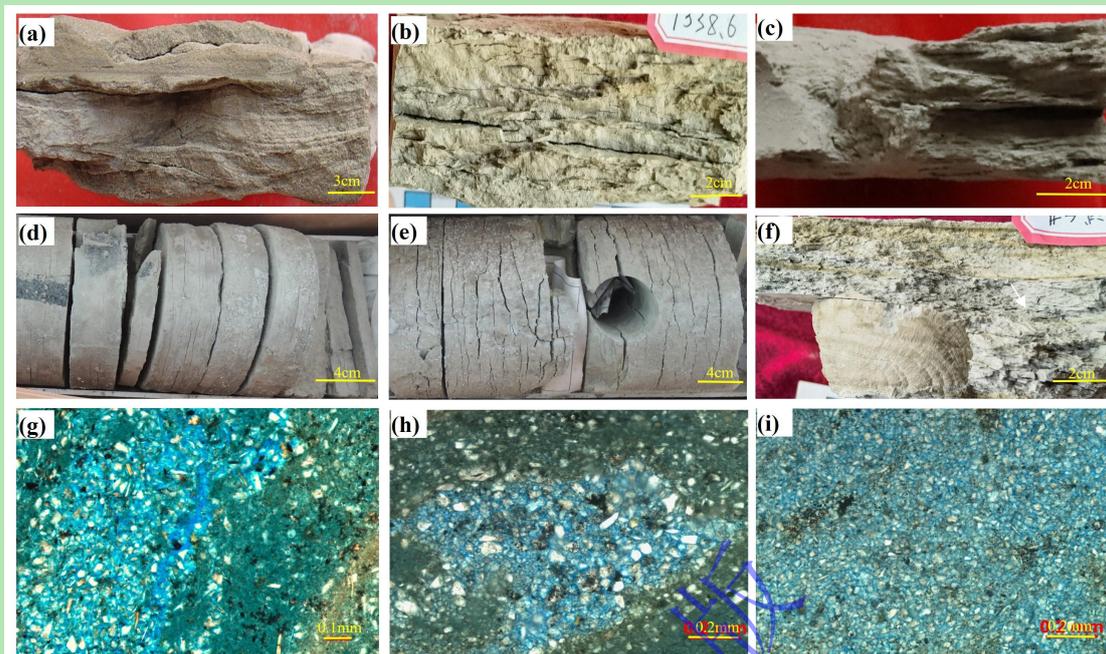


图2 柴达木盆地台南地区七个泉组典型岩心照片及薄片

(a) 浅黄灰色粉砂岩, 浪成沙纹层理, 台南 8 井, 1 430.45~1 430.56 m; (b) 灰白色粉砂质泥岩, 小型波状层理, 台试 5 井, 1 338.58~1 338.62 m; (c) 灰白色泥质粉砂岩, 小型交错层理, 台 1-4 井, 1 863.48~1 863.52 m; (d) 灰色泥岩, 水平层理, 台 4-31 井, 1 150.58~1 150.82 m; (e) 灰色泥岩, 水平层理, 微裂缝发育, 台 4-31 井, 1 151.34~1 151.66 m; (f) 灰白色粉砂质泥岩, 水平层理, 见螺化石, 台试 5 井, 1 045.27~1 045.33 m; (g) 砂质泥岩, 粒间孔发育, 磨圆度中等, 以次棱、次圆一次棱为主, 台浅 2 井, 619.30 m, (-) 100X, 铸体薄片; (h) 砂质泥岩, 粒间孔发育, 磨圆度中等, 以次圆一次棱为主, 台 4-31 井, 1 543.70 m, (-) 100X, 铸体薄片; (i) 砂质泥岩, 粒间孔发育, 磨圆度中等, 以次圆一次棱为主, 台 4-31 井, 1 543.40 m, (-) 100X, 铸体薄片

Fig.2 Photographs of typical cores and thin sections from the Qigequan Formation in Tainan area, Qaidam Basin

台南地区七个泉组滩坝砂体岩石类型主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩, 少量长石岩屑砂岩, 偶见岩屑砂岩 (表 1、图 3), 石英体积分数平均为 33.4% (介于 22.7%~42.5%); 长石体积分数平均为 29.1% (14.4%~39.0%); 岩屑体积分数平均为 13.1% (2.0%~33.4%), 主要为变质岩岩屑 (体积分数平均为 6.3%), 其次为火成岩岩屑 (体积分数平均为 3.8%), 沉积岩岩屑体积分数普遍小于 5%, 泥质杂基体积分数平均为 10.9% (0~26.5%)。成分成熟度指数 (石英/(长石+岩屑)) 介于 0.3~1.7, 平均为 0.9, 岩石颗粒分选变化大 (差、中等至好均有), 呈次圆—次棱角状, 磨圆中等—差, 以点接触为主 (图 2), 结构成熟度中等—较高, 成分成熟度较低但是结构成熟度中等—较高, 说明砂体近物源并经过波浪反复淘洗。

表 1 柴达木盆地台南地区七个泉组碎屑矿物含量

Table 1 Detrital mineral content of the Qigequan Formation in Tainan area, eastern Qaidam Basin

地区	井号	陆源碎屑/%			填隙物/%						Q/(F+R)
		石英	长石	岩屑	岩屑			杂基	胶结物		
					火成岩	变质岩	沉积岩	泥质	方解石	白云石	
台	台 1-4	32.7	35.0	6.3	0.0	3.0	3.3	2.7	2.0	0.0	0.8
	台检 1	26.0	39.0	3.0	0.0	0.0	3.0	4.0	3.0	0.0	0.6
	台南 6	42.5	14.4	10.5	2.0	6.5	2.0	0.0	9.7	0.5	1.7
	台南 7	33.5	22.5	7.5	0.0	5.5	2.0	26.5	3.0	1.5	1.1
南	台 5-13	30.8	36.0	9.9	9.9	0.0	0.0	15.5	7.5	0.0	0.7
	台 6-28	38.2	28.2	2.0	2.0	0.0	0.0	8.5	11.1	0.0	1.3
	台试 5	40.4	22.0	33.4	7.4	17.4	8.6	13.9	4.6	0.0	0.7
	台 5-7	22.7	35.0	32.3	5.0	20.3	7.0	16.0	0.0	0.0	0.3

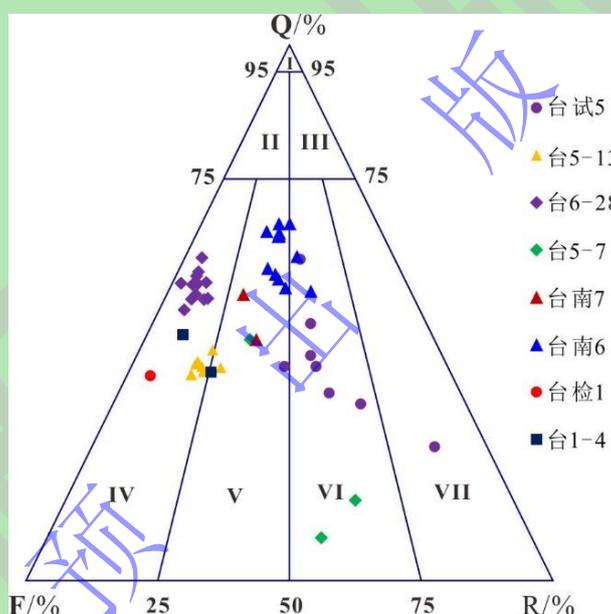


图 3 柴达木盆地台南地区第四系七个泉组滩坝砂岩岩石组分三角图

I.石英砂岩；II.长石质石英砂岩；III.岩屑质石英砂岩；IV.长石砂岩；V.岩屑质长石砂岩；VI.长石质岩屑砂岩；VII.岩屑砂岩

Fig.3 Ternary plot of rock compositions for beach-bar sandstones of the Quaternary Qigequan Formation in Tainan area, Qaidam Basin

2.2 粒度概率累积曲线特征

陆源碎屑沉积岩碎屑颗粒的分布特征能够反映碎屑颗粒的搬运方式、水动力类型及沉积环境，是水动力条件的重要指标^[25-27]。粒度分析结果表明台南地区七个泉组滩坝砂体的粒度概率累积曲线呈 6 种样式（图 4），总体特征是跳跃总体和悬浮总体较发育，滚动总体发育较差，跳跃总体斜率变化较大，常发育两个、三个或多个次总体，表明湖水水动力条件复杂。

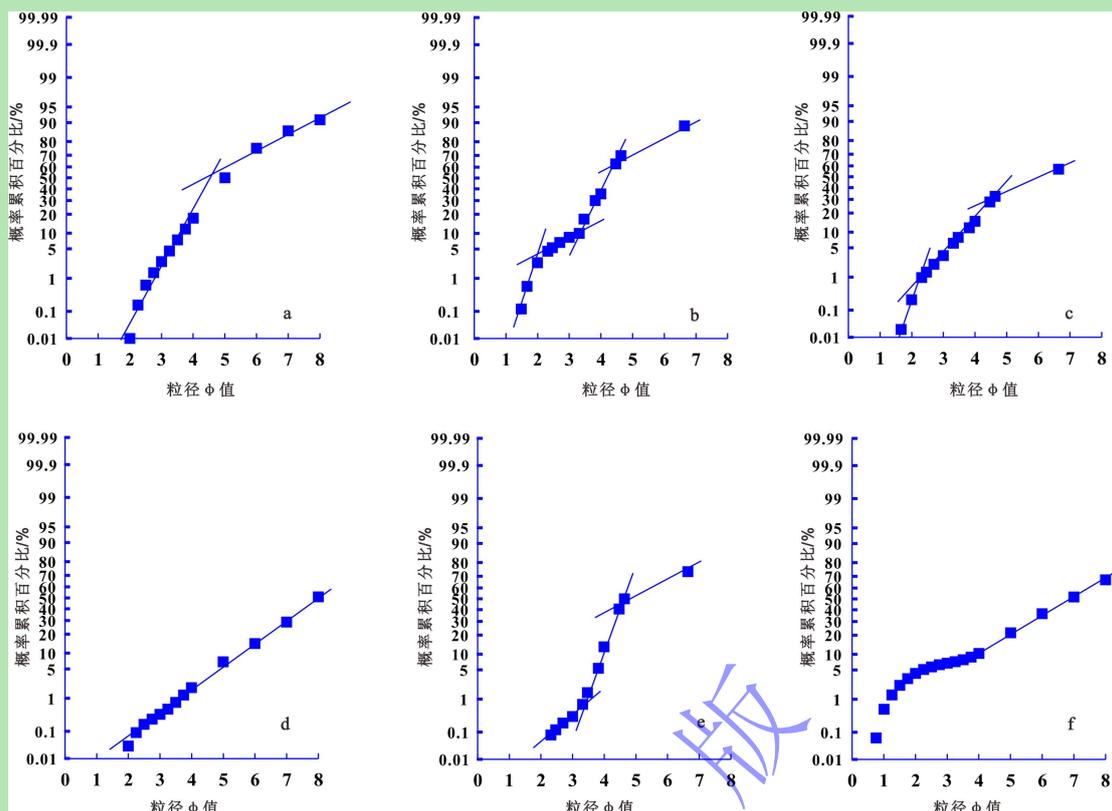


图4 柴达木盆地台南地区七个泉组滩坝砂体粒度累积概率曲线图类型

(a) 一跳一悬二段式, 台 5-13 井, 1 099.09 m; (b) 多段式, 台南 8 井, 1 431.81 m; (c) 二跳一悬二段式, 台南 5 井, 1 699.45 m; (d) 一段式, 台 6-28 井, 1 508.12 m; (e) 滚动—跳跃—悬浮三段式, 台南 6 井, 1 423.25 m; (f) 弧形—直线复合式, 台 5-7 井, 1 027.07 m

Fig4. Grain-size probability curves of beach-bar sandbodies of the Qigequan Formation in the Tainan area, Qaidam Basin

(1) 一跳一悬二段式, 该样式是台南地区滩坝砂体最主要的粒度概率累积曲线样式, 占 73.2%, 主要特点是跳跃总体含量变化大, 介于 4.5%~89%, 跳跃总体斜率介于 42° ~ 72° , 悬浮总体含量变化大, 介于 11%~95.5%, 跳跃次总体与悬浮次总体截点一般为 1.5ϕ ~ 4.5ϕ , 滚动总体发育差, 说明水动力强弱变化大, 砂体分选中等—较差, 主要见于坝砂, 少量见于滩砂 (图 4a); (2) 多跳一悬多段式, 该样式占 11.9%, 主要见于台南 8 井, 其他井较少见, 主要特点是跳跃总体由 3 个次总体组成, 跳跃总体含量普遍较高, 一般介于 42%~70%, 高值可达 80%, 跳跃总体斜率变化大 (介于 41° ~ 66°), 悬浮总体含量变化大 (介于 30%~58%), 滚动总体发育差, 反映水动力条件相对较强, 砂体分选较好, 坝砂和滩砂均可见 (图 4b); (3) 两跳一悬式, 该样式占 7.5%, 主要见于台南 8 井和台南 5 井, 主要特点是跳跃总体含量变化大 (介于 38%~59%), 由 2 个次总体组成, 粗跳跃总体斜率一般大于 45° (介于 41° ~ 65°), 细跳跃总体斜率普遍较大 (介于 51° ~ 68°), 悬浮总体含量高 (介于 41%~62%), 滚动总体不发育, 说明湖水动力强弱变化大, 砂体分选性变化大, 主要见于坝砂 (图 4c);

(4) 一段式, 该样式占 5.5%, 主要见于台南 5 井, 其他井较少见, 主要特点是滚动总体和跳跃总体均不发育, 全部由悬浮总体组成, 直线斜率介于 $40^{\circ}\sim 55^{\circ}$, 表明悬浮组分具有一定的分选性, 主要见于坝砂 (图 4d); (5) 滚动—跳跃—悬浮三段式, 该样式很少见, 仅见于台 1-4 井和台南 6 井, 主要特点是滚动总体含量低, 一般小于 5%, 斜率小于 40° , 分选差, 跳跃总体含量较高 (介于 $45\%\sim 65\%$), 跳跃总体斜率较大 (介于 $55^{\circ}\sim 69^{\circ}$), 悬浮总体含量较高 (介于 $35\%\sim 55\%$), 说明水动力条件相对较强, 砂体分选性较好, 主要见于坝砂 (图 4e); (6) 弧形—直线复合式, 该样式很少见, 仅见于台 5-7 井和台浅 2 井, 主要特点是曲线整体上表现为一条弧线段与一条直线段组成的复合样式, 粗粒部分表现为弧线段, 细粒部分为直线段, 斜率约 50° , 反映碎屑颗粒分选变好, 是重力流逐渐向牵引流转换的典型曲线特征, 见于坝砂的底部 (图 4f)。

2.3 粒级—标准偏差特征

标准偏差是一种衡量数据集中分布离散程度的统计指标, 它表示数据点与数据集的平均值之间的平均偏差, 标准偏差越大, 数据点分布越分散, 反之, 则越集中^[27]。粒级-标准偏差法是一种从沉积物粒度数据中进行粒度成因组分分离的重要算法^[7,27]。利用岩石样品粒度测试分析获得样品各粒级的体积百分含量值, 然后计算其标准偏差并以对数粒级为横坐标, 以标准偏差为纵坐标作粒级—标准偏差图^[7,8], 该图反映了各粒级所对应的体积百分含量离散程度的大小, 某一粒级所对应的标准偏差越大, 表示该粒级对环境的变化也就越敏感, 便可获得不同水动力条件下的环境敏感粒度组分的个数及分布范围^[10]。

本文采用粒级—标准偏差算法来计算柴达木盆地台南地区第四系七个泉组滩坝砂体的环境敏感粒度组分。首先是利用研究区 12 口重点取心井 296 个样品的激光粒度测试结果完成每一口井不同粒级的标准偏差的计算, 在此基础上绘制了相应的粒级—标准偏差图, 然后, 分析每一口井的粒级—标准偏差图的形态及特征数值的分布范围并进行归类, 认为研究区存在四种样式的粒级—标准偏差图: 单峰型 (I 型, 占 8.3%)、双峰型 (II 型, 占 33.4%)、三峰型 (III 型, 占 8.3%) 和多峰型 (IV 型, 占 50.0%), 而且双峰型 (II 型) 和多峰型 (IV 型) 均具有两个亚类 (表 2、图 5)。

单峰型 (I 型) 粒级—标准偏差图仅见于台浅 2 井, 存在 1 个标准偏差高峰值, 峰点对应的粒级为 $15.6\ \mu\text{m}$, 最大敏感粒度为 $176.8\ \mu\text{m}$ (图 5I); 双峰型 (II 型) 粒级—标准偏差图存在 2 个标准偏差高峰值, 分为两类, 第一类 (II-1 型) 见于台 4-31 井、台 5-13 井和台 6-28 井, 两个峰点对应的粒级分别为 $3.9\ \mu\text{m}$ 和 $31.2\ \mu\text{m}$, 分界点为 $7.8\ \mu\text{m}$ 或 $15.6\ \mu\text{m}$, 最大敏感粒度变化大, 介于 $176.8\sim 297.3\ \mu\text{m}$ (表 2, 图 5II-1); 第二类 (II-2 型) 仅见于台深 1

井, 第一个峰点对应的粒级为 31.2 μm , 第二个峰点对应的粒级为 353.6 μm , 谷点粒径为 88.4 μm ; 最大敏感粒径为 594.6 μm (图 5II-2); 三峰型 (III 型) 粒级—标准偏差图仅见于台 5-7 井, 存在 3 个标准偏差高数值, 峰点对应的粒级分别为 3.9 μm 、31.2 μm 和 353.6 μm , 分界点为 15.6 μm 和 176.8 μm , 最大敏感粒度为 594.6 μm (图 5III); 多峰型 (IV 型) 粒级—标准偏差图在研究区广泛分布, 存在多个标准偏差高数值, 不同井的高数值的个数存在差别, 分为两类, 第一类 (IV-1 型) 为台 1-4 井, 存在 4 个峰点, 峰点对应的粒级分别为 3.9 μm 、31.2 μm 、74.3 μm 和 250.0 μm , 分界点为 7.8 μm 、62.5 μm 和 176.8 μm , 最大敏感粒度为 707.1 μm (图 5IV-1); 第二类 (IV-2 型) 见于台南 5 井、台南 6 井、台南 7 井、台南 8 井和台 5-6 井, 一般为 4—6 个峰点, 第一至第三个峰值依次为 10 μm 、45 μm 和 71 μm , 第四个峰点 125 μm 或 100 μm , 第五峰点为 154 μm , 只有台南 5 井存在, 第六个峰点 200 μm 或 250 μm , 只有台南 5 井、台南 6 井和台 5-6 井存在; 第一个峰值点至第三个峰值点的分界点依次为 40 μm 和 62.5 μm , 第三个峰值点和第四个峰值点的分界点为 90 μm 或 100 μm , 第四个峰值点和第五个峰值点的分界点为 125 μm , 第五个峰值点和第六个峰值点的分界点为 176.8 μm 或 154 μm , 最大敏感粒度主要为 315 μm , 偶见 355 μm 和 176.8 μm (表 2, 图 5IV-2)。

表 2 柴达木盆地台南地区第四系七个泉组滩坝砂岩粒级—标准偏差图特征数值

Table 2 Characteristic factors of grain size vs. standard deviation curves of beach-bar sandbodies in the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

序号	井号	样品数	类型	峰点对应的粒级/ μm						谷点对应的粒级/ μm					最大敏感粒度/ μm
				第一个	第二个	第三个	第四个	第五个	第六个	第一个	第二个	第三个	第四个	第五个	
1	台浅 2	13	I	/	15.6	/	/	/	/	3.9	/	/	/	/	176.8
2	台 4-31	20	II-1	3.9	31.2	/	/	/	/	15.6	/	/	/	/	297.3
3	台 5-13	22	II-1	3.9	31.2	/	/	/	/	7.8	/	/	/	/	250
4	台 6-28	79	II-1	3.9	31.2	/	/	/	/	7.8	/	/	/	/	176.8
5	台深 1	8	II-2	/	31.2	/	353.6	/	/	3.9	88.4	/	/	/	594.6
6	台 5-7	6	III	3.9	31.2	/	353.6	/	/	15.6	/	176.8	/	/	594.6
7	台 1-4	18	IV-1	3.9	31.2	74.3	250	/	/	7.8	62.5	176.8	/	/	707.1
8	台 5-6	6	IV-2	10	45	71	125	/	250	40	62.5	100	154	355	355
9	台南 5	49	IV-2	10	45	71	100	154	200	40	62.5	90	125	176.8	315
10	台南 6	22	IV-2	10	45	71	125	/	200	40	62.5	90	180	/	315
11	台南 7	6	IV-2	10	45	71	100	/	/	40	62.5	90	/	/	176.8
12	台南 8	46	IV-2	10	45	71	125	/	/	40	62.5	100	/	/	176.8

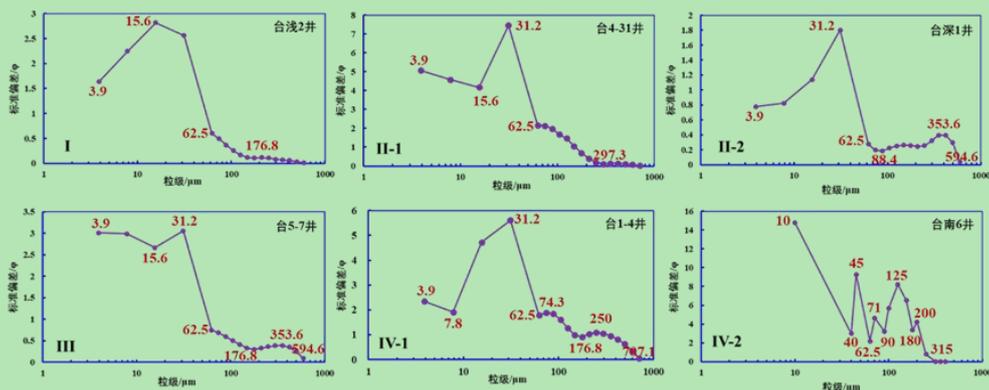


图5 柴达木盆地台南地区七个泉组滩坝砂体粒度—标准偏差图类型

I.单峰型；II.双峰型；III.三峰型；IV.多峰型

Fig.5 Grain-size standard deviation curves for beach-bar sandbodies of the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

3 滩坝砂体沉积的水动力分析

3.1 滩坝砂体环境敏感粒度组分

台南地区不同类型的粒度—标准偏差图所反映的环境敏感粒度组分数量及其粒度数值差别较大，将粒度概率累积曲线图和粒度—标准偏差图相结合，综合分析台南地区第四系七个泉组滩坝砂体的环境敏感粒度组分（表2、图6）。

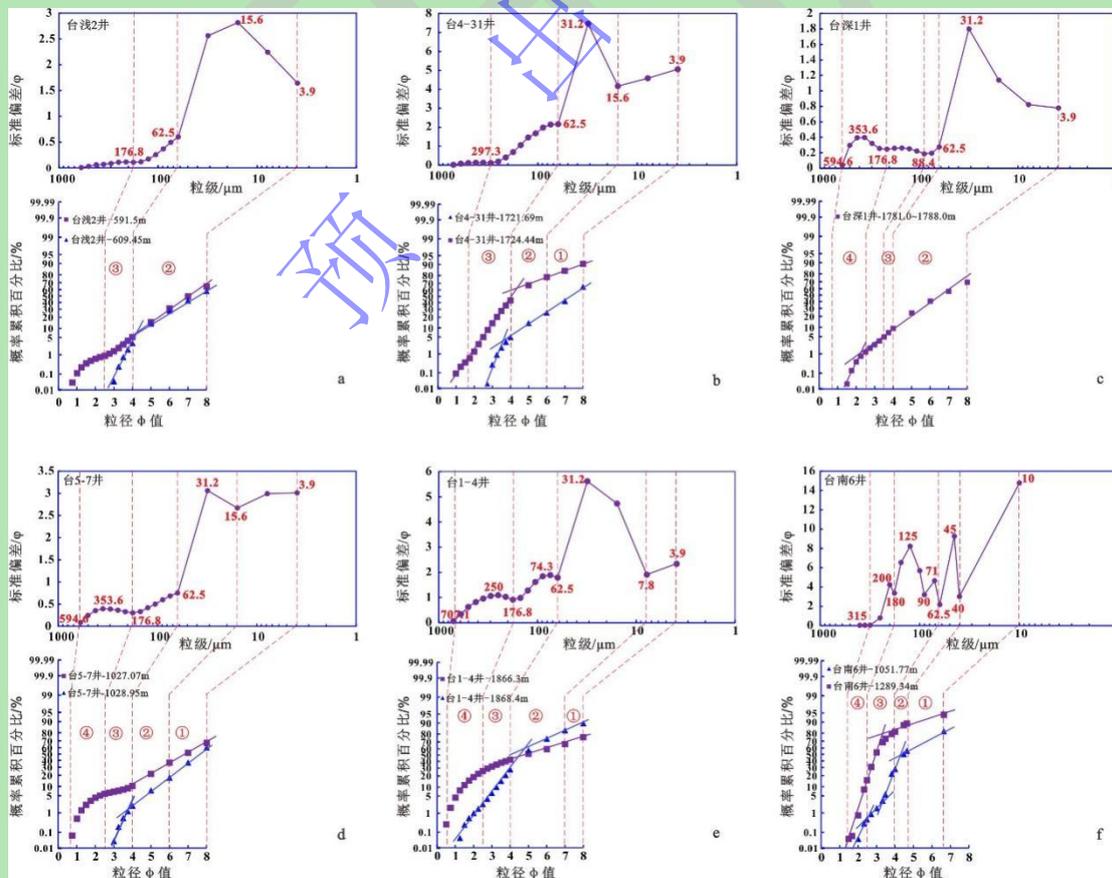


图6 柴达木盆地台南地区七个泉组滩坝砂体沉积时期环境敏感粒度组分特征

(a) I型(台浅2井); (b) II-1型(台4-31井); (c) II-2型(台深1井); (d) III型(台5-7井); (e) IV-1型(台1-4井); (f) IV-2型(台南6井); 图中上图为粒级—标准偏差图, 下图为粒度累计概率图

Fig.6 Characteristics of environmentally sensitive grain-size components of beach-bar sandbodies in the Qigequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

单峰型(I型)粒级—标准偏差图存在一组环境敏感粒度组分, 粒度介于 $3.9\sim 176.8\ \mu\text{m}$, 需要说明的是粒级介于 $15.6\sim 62.5\ \mu\text{m}$ 的标准偏差值迅速减小, 粒级大于 $62.5\ \mu\text{m}$ 的标准偏差值减小的速度明显变缓, 说明大于 $62.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量应该是次一级的环境变化敏感组分, 以 $62.5\ \mu\text{m}$ 为界, 粒级介于 $3.9\sim 62.5\ \mu\text{m}$ 为主要敏感粒度组分, 粒级介于 $62.5\sim 176.8\ \mu\text{m}$ 为次要敏感粒度组分。台浅2井粒度概率累积曲线主要为一跳一悬二段式, 偶见弧形—直线复合式, 主要敏感粒度组分对应悬浮次总体, 次要敏感粒度组分则对应跳跃次总体的细粒部分或弧线段的细粒部分(图6a)。

双峰型(II型)粒级—标准偏差图存在两组环境敏感粒度组分(图6b, c), II-1型的台5-13井和台6-28井的第一组环境敏感粒度组分粒度介于 $3.9\sim 7.8\ \mu\text{m}$, 对应于一跳一悬二段式的悬浮组分的细粒部分, 第二组主要环境敏感粒度组分粒度介于 $7.8\sim 62.5\ \mu\text{m}$, 对应于悬浮组分的粗粒部分以及跳跃组分的细粒部分, 第二组次要环境敏感粒度组分粒度分别介于 $62.5\sim 250.0\ \mu\text{m}$ 和 $62.5\sim 176.8\ \mu\text{m}$, 则对应于跳跃组分的粗粒部分; II-1型的台4-31井的第一组环境敏感粒度组分粒度介于 $3.9\sim 15.6\ \mu\text{m}$, 对应于悬浮组分的细粒部分, 第二组主要环境敏感粒度组分粒度介于 $15.6\sim 62.5\ \mu\text{m}$, 对应于悬浮组分的粗粒部分以及跳跃组分的细粒部分, 第二组次要环境敏感粒度组分粒度介于 $62.5\sim 297.3\ \mu\text{m}$, 则对应于跳跃组分的粗粒部分(图6b); II-2型的台深1井的第一组主要环境敏感粒度组分粒度介于 $3.9\sim 62.5\ \mu\text{m}$, 对应于悬浮组分的细粒部分, 第一组次要环境敏感粒度组分粒度介于 $62.5\sim 88.4\ \mu\text{m}$, 对应于悬浮组分的粗粒部分; 第二组环境敏感粒度组分粒度介于 $176.8\sim 594.6\ \mu\text{m}$, 对应于跳跃组分(图6c)。

三峰型(III型)粒级—标准偏差图存在三组环境敏感粒度组分(台5-7井)(图6d), 台5-7井粒度概率累积曲线图主要为一跳一悬二段式, 偶见弧形—直线复合式。第一组环境敏感粒度组分粒度介于 $3.9\sim 15.6\ \mu\text{m}$, 对应于悬浮组分的细粒部分, 第二组主要环境敏感粒度组分粒度介于 $15.6\sim 62.5\ \mu\text{m}$, 对应于悬浮组分的粗粒部分, 第二组次要环境敏感粒度组分粒度介于 $62.5\sim 176.8\ \mu\text{m}$, 则对应于跳跃组分或弧形段的细粒部分, 第三组环境敏感粒度组分粒度介于 $176.8\sim 594.6\ \mu\text{m}$, 对应于弧形段的粗粒部分。

四峰型(IV型)粒级—标准偏差图存在多组环境敏感粒度组分, 一般4~6组(图6e, f)。IV-1型(台1-4井)存在四组环境敏感粒度组分, 台1-4井粒度概率累积曲线图主要为一跳

一悬二段式，偶见滚动—跳跃—悬浮三段式，第一组环境敏感粒度组分粒度介于 $3.9\sim 7.8\ \mu\text{m}$ ，对应于悬浮组分的细粒部分，第二组环境敏感粒度组分粒度介于 $7.8\sim 62.5\ \mu\text{m}$ ，对应于悬浮组分的粗粒部分，第三组环境敏感粒度组分粒度介于 $62.5\sim 176.8\ \mu\text{m}$ ，则对应于跳跃组分的细粒部分，第四组环境敏感粒度组分粒度介于 $176.8\sim 707.1\ \mu\text{m}$ ，对应于跳跃组分的粗粒部分或滚动组分（图 6e）。IV-2 型存在四组至六组环境敏感粒度组分，台南 5 井、台南 6 井、台南 7 井和台 5-6 井对应粒度概率累积曲线图主要为一跳—一悬二段式，偶见滚动—跳跃—悬浮三段式和一段式，而台南 8 井的粒度概率累积曲线图主要为多段式。第一组环境敏感粒度组分粒度介于 $10.0\sim 40.0\ \mu\text{m}$ ，对应于悬浮组分的细粒部分，第二组环境敏感粒度组分粒度介于 $40.0\sim 62.5\ \mu\text{m}$ ，对应于悬浮组分的粗粒部分加跳跃组分的细粒部分，第三组环境敏感粒度组分粒度主要介于 $62.5\sim 90.0\ \mu\text{m}$ ，仅台 5-6 井和台南 8 井粒度介于 $62.5\sim 100.0\ \mu\text{m}$ ，则对应于跳跃组分的中粒部分，第四组环境敏感粒度组分粒度介于 $90.0\sim 180.0\ \mu\text{m}$ ，而台 5-6 井粒度介于 $100.0\sim 154.0\ \mu\text{m}$ 、台南 8 井粒度介于 $100.0\sim 180.0\ \mu\text{m}$ ，对应于跳跃组分的粗粒部分或滚动组分，第五组环境敏感粒度组分在台南 5 井和台南 6 井的粒度介于 $180\sim 315.0\ \mu\text{m}$ ，而台 5-6 井粒度介于 $154.0\sim 355.0\ \mu\text{m}$ ，对应于跳跃组分的粗粒部分或滚动组分，台南 8 井和台南 7 井无此敏感粒度组分；第六组环境敏感粒度组分的粒度介于 $355.0\sim 400.0\ \mu\text{m}$ ，只存在于台 5-6 井，对应于跳跃组分的粗粒部分（图 6f）。

综合对比上述 I 型、II-1 型、II-2 型、III 型、IV-1 型和 IV-2 型粒度—标准偏差图发现以下特点：（1）II-1 型第一组环境敏感粒度组分的粒度范围与 III 型和 IV-1 型第一组的粒度范围相近，介于 $3.9\sim 15.6\ \mu\text{m}$ ，与 IV-2 型第一组粒度范围（ $10\sim 40\ \mu\text{m}$ ）相差较大，但是对应的粒度—标准偏差图与粒度概率累积曲线图对应特征基本相同，结合粒度—标准偏差图特征，认为粒度小于 $15.6\ \mu\text{m}$ （IV-2 型小于 $40\ \mu\text{m}$ ）的粒度组分为研究区七个泉组滩坝砂体的第①组环境敏感粒度组分，代表悬浮搬运的敏感粒度组分；（2）IV-1 型第二组环境敏感粒度组分的粒度范围与 III 型第二组、II-2 型第一组、II-1 型第一组和 I 型的主要敏感粒度组分粒度范围相近，介于 $15.6\sim 62.5\ \mu\text{m}$ ，与 IV-2 型第二组粒度范围（ $40\sim 62.5\ \mu\text{m}$ ）的起点粒度相差较大，但是对应的粒度—标准偏差图与粒度概率累积曲线图对应特征基本相同，结合粒度—标准偏差图特征，认为粒度介于 $15.6\sim 62.5\ \mu\text{m}$ （IV-2 型 $40\sim 62.5\ \mu\text{m}$ ）的粒度组分为研究区七个泉组滩坝砂体的第②组环境敏感粒度组分，代表跳跃组分的细粒部分和悬浮组分的粗粒部分的敏感粒度组分。该敏感粒度组分在研究区普遍存在，因此，该敏感组分代表的水动力是控制滩坝砂体发育演化的主要水动力；（3）IV-1 型第三组环境敏感粒度组分的粒度范围与 III 型第二组和 I 型的次要敏感粒度组分以及 IV-2 型的第三组和第四组合并后的粒度分布范围接近，

介于 62.5~176.8 μm , 对应的粒级—标准偏差图与粒度概率累积曲线图对应特征基本相同, 认为粒级介于 62.5~176.8 μm 的粒度组分为研究区七个泉组滩坝砂体的第③组环境敏感粒度组分, 是跳跃组分和弧形段细粒部分的环境敏感粒度组分。该敏感粒度组分在研究区也普遍存在, 较第②组稍微差一些, 因此, 该敏感组分代表的水动力也是控制滩坝砂体发育演化的主要水动力之一; (4) IV-1 型第四组环境敏感粒度组分的粒度范围与 III 型第三组、II-2 型第二组以及 IV-2 型第五组和第六组合并后的粒度分布范围相近, 介于 176.8~707.1 μm , 对应的粒级—标准偏差图与粒度概率累积曲线图对应特征基本相同, 认为粒级介于 176.8~707.1 μm 的粒度组分为研究区七个泉组滩坝砂体的第④组环境敏感粒度组分, 是跳跃组分的粗粒部分或者弧形段的粗粒部分的环境敏感粒度组分, 该敏感粒度组分在研究区发育较差, 仅局部发育。

3.2 滩坝砂体水动力条件分析

滩坝砂体的发育演化主要受波浪和沿岸流作用的共同影响, 通常, 波浪作用控制了滩坝砂体的粒度在垂直岸线方向的分布特征, 沿岸流则控制滩坝砂体在平行岸线方向的分布特征^[14-15]。台南地区第四系七个泉组沉积时期, 湖泊构造活动较强烈, 沉积中心逐渐向东南方向迁移, 随着气候向干旱化方向演化, 湖平面发生多级次扩张与收缩, 在广阔的滨浅湖地区有利于波浪和沿岸流的形成^[14]。由于构造活动的影响, 在台南地区形成低幅度同沉积背斜构造, 背斜构造往往是滩坝砂体堆积的有利场所, 滩坝砂体分布的轴向往往与背斜构造延伸方向一致, 大致呈近东西方向展布 (图 1a)。盆地内部背斜构造的形态及湖岸线的形态共同影响波浪和沿岸流的能量变化, 并在一定程度上影响古水流的方向^[15]。台南地区距离南面的乌图美仁三角洲和格尔木三角洲均很远, 两大三角洲前缘的惯性流所形成的沿岸流对台南地区滩坝砂体的影响相对较小, 而台南地区岩心中反映浅水波浪作用形成的沉积构造发育以及生物化石丰富 (图 2), 说明了波浪作用对台南地区滩坝砂体的影响较大, 因此, 台南地区七个泉组滩坝砂体沉积时期波浪作用要强于沿岸流作用。

环境敏感粒度组分分析表明, 柴达木盆地台南地区第四系七个泉组滩坝砂体沉积时期至少发育四种不同类型的水动力环境。第①组敏感粒度组分的粒径细, 并且主要对应于粒度概率累积曲线的悬浮组分的细粒部分, 反映了细粒沉积物的悬浮搬运特征。从第①组至第④组环境敏感粒度组分对应的粒级增大, 表明水动力增强, 而且, 第①组、第②组和第③组环境敏感粒度组分在研究区分布广泛, 该三组敏感粒度组分所代表的水动力类型是研究区滩坝砂体沉积发育的主要水动力类型, 根据各组环境敏感粒度组分特征以及对应典型粒度曲线特征结合台南背斜所处的地理位置以及岩心中广泛发育的波浪作用形成沉积构造, 认为第②组环

境敏感粒度组分是波浪作用的结果，第③组环境敏感粒度组分是沿岸流作用的结果，第④组环境敏感粒度组为风暴浪作用或沿岸流作用的体现。

通过对研究区四种环境敏感粒度组分所占的百分含量进行统计表明（图7）：第①组环境敏感粒度组分百分含量介于0~30.9%，平均为15.3%，呈环带状展布，主要分布在台南背斜的翼部，核部减少，表明台南构造的翼部是悬浮搬运的敏感粒度组分的主要富集区（图7a）；第②组环境敏感粒度组分百分含量介于15.0%~43.2%，平均为27.9%，呈环带状展布，平面分布特征与第①组刚好相反，主要分布在台南背斜的核部，翼部减少，表明台南构造的核部是波浪搬运的敏感粒度组分的主要富集区（图7b）；第③组环境敏感粒度组分百分含量介于2.6%~29.9%，平均为12.7%，呈环带状展布，主要分布在台南背斜的西翼台南6井区以及东翼台1-4井—台5-6井区之间，在这两个分布区域之间变少，同时也向背斜翼部减少，表明台南地区受到至少两个方向的沿岸流作用，而沿岸流主要影响台南背斜的东西两翼地区，核部地区影响微弱（图7c）；第④组环境敏感粒度组分百分含量介于0~8.9%，平均为2.3%，鉴于该组环境敏感粒度组分的含量太低且有多口井不存在该敏感组分，表明该组敏感粒度组分对研究区滩坝砂体的发育演化的影响程度很小，其平面分布状况不再讨论。综合上述分析，认为影响台南地区第四系七个泉组滩坝砂体的发育演化的水动力主要为波浪作用，敏感粒度组分含量最高且分布广泛；其次为沿岸流作用和悬浮作用。

台南地区第四系七个泉组滩坝砂体由于埋藏浅（普遍小于2500m），压实程度低，结构疏松，颗粒多为点式接触，原生孔隙发育，一般都有高孔（平均孔隙度20%~40%）高渗（平均渗透率 $10 \times 10^{-3} \sim 1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ）的特点^[19]，台南地区第四系七个泉组沉积时期滩坝砂体所受的四种不同的水动力类型及其在平面的分布特征表明了台南地区优质滩坝砂体的平面分布范围是位于背斜核部区域以及台南6井区和台1-4井—台5-6井区之间，这一成果认识为台南气田勘探开发提供了技术支撑。

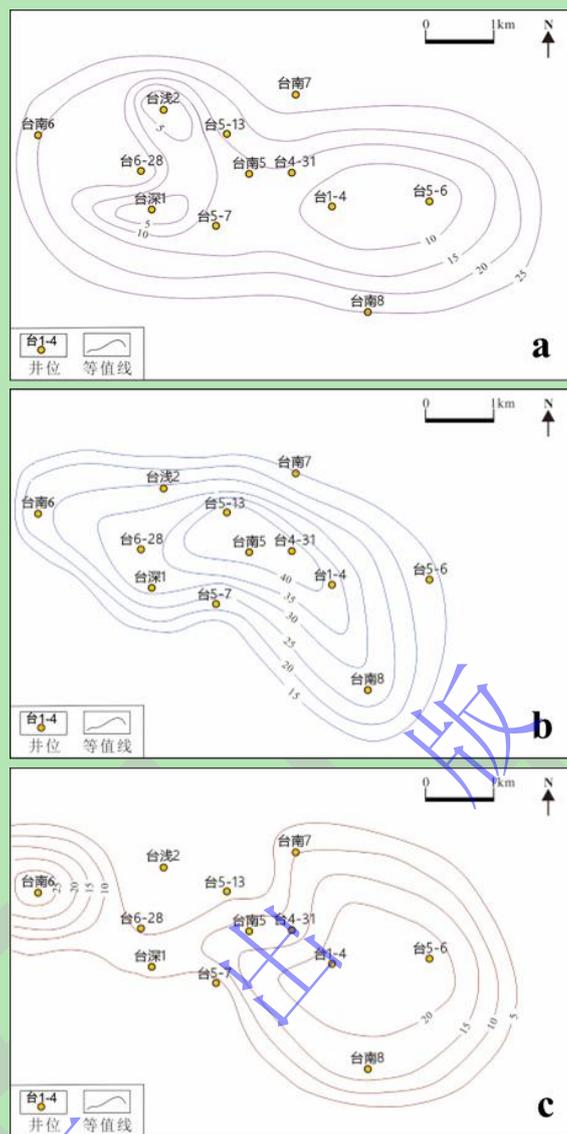


图7 柴达木盆地台南地区七个泉组滩坝砂体沉积时期环境敏感粒度组分平面分布特征
 (a) 敏感组分①; (b) 敏感组分②; (c) 敏感组分③

Fig.7 Plane distributions of environmentally sensitive grain-size components of beach-bar sandbodies in the Qiqequan Formation, Tainan area, Qaidam Basin

4 结论

(1) 柴达木盆地台南地区第四系七个泉组滩坝砂体岩石类型主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩, 岩性偏细, 主要由粉砂岩和泥质粉砂岩组成, 结构疏松、胶结程度差, 易破碎, 分选性以中等—较差为主, 具有中等—较低的成分成熟度和中等—较高的结构成熟度。

(2) 台南地区七个泉组滩坝砂体粒度概率累积曲线呈6种样式, 主要为一跳一悬二段式, 滩坝砂体的粒级—标准偏差图存在单峰型、双峰型、三峰型和多峰型4种样式, 发育4组环境敏感粒度组分, 分别代表了悬浮搬运、波浪、沿岸流和风暴浪四种不同的水动力类型。

(3) 波浪作用是影响台南地区第四系七个泉组滩坝砂体发育演化的主要水动力类型,

其次是沿岸流作用和悬浮作用,不同类型的水动力对台南背斜不同部位滩坝砂体的发育演化的影响程度差异较大。台南地区优质滩坝砂体主要分布在背斜核部区域以及翼部的台南6井区和台1-4井—台5-6井区之间。

参考文献 (References)

- [1] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,2003:71-73. [Jiang Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 71-73.]
- [2] 郑浚茂,王德发,孙永传. 黄骅拗陷几种砂体的粒度分布特征及其水动力条件的初步分析[J]. 石油实验地质,1980,2(2):9-20,61. [Zheng Junmao, Wang Defa, Sun Yongchuan. Characteristics of grain size distribution and preliminary hydrodynamic analysis of several types of sandbodies in Huanghua Depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1980, 2(2): 9-20, 61.]
- [3] 操应长,王健,刘惠民. 利用环境敏感粒度组分分析滩坝砂体水动力学机制的初步探讨:以东营凹陷西部沙四上滩坝砂体沉积为例[J]. 沉积学报,2010,28(2):274-284. [Cao Yingchang, Wang Jian, Liu Huimin. Preliminary study on the hydrodynamic mechanism of beach-bar sandbodies with environmentally sensitive grain size components: A case study from beach-bar sandbody sediments of the Upper part of the Fourth member of the Shahejie Formation in the western Dongying Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 274-284.]
- [4] Kolmer J R. A wave tank analysis of the beach foreshore grain size distribution[J]. Journal of Sedimentary Research, 1973, 43(1): 200-204.
- [5] 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.]
- [6] 王健,操应长,弭连山,等. 山东高密峡山水库现代滨浅湖滩坝砂体的粒度特征及水动力学分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2009,24(增刊1):35-39. [Wang Jian, Cao Yingchang, Mi Lianshan, et al. Grain size characteristics and hydrodynamic analysis of sand bodies of modern shoreline shallow lake beach bar in Gaomi Xiashan Reservoir, Shandong province[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2009, 24(Suppl.1): 35-39.]
- [7] 陈桥,刘东艳,陈颖军,等. 粒级一标准偏差法和主成分因子分析法在粒度敏感因子提取中的对比[J]. 地球与环境,2013,41(3):319-325. [Chen Qiao, Liu Dongyan, Chen Yingjun, et al. Comparative analysis of grade-standard deviation method and factors analysis method for environmental sensitive factor analysis[J]. Earth and Environment, 2013, 41(3): 319-325.]
- [8] 孙有斌,高抒,李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. 科学通报,2003,48(1):83-86. [Sun Youbin, Gao Shu, Li Jun. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(1): 83-86.]
- [9] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. Sedimentary Geology, 2002, 152(3/4): 263-277.
- [10] 肖尚斌,李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分[J]. 沉积学报,2005,23(1):122-129. [Xiao Shangbin, Li Anchun. A study on environmentally sensitive grain-size population in inner shelf of the East China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(1): 122-129.]
- [11] 向荣,杨作升, Saito Y, 等. 济州岛西南泥质区近2300a来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2006,36(7):654-662. [Xiang Rong, Yang Zuosheng, Saito Y, et al. East Asia Winter Monsoon changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records during the last 2300 years in mud area southwest off Cheju Island, ECS[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2006, 36(7): 654-662.]
- [12] 徐树建,潘保田,高红山,等. 末次间冰期—冰期旋回黄土环境敏感粒度组分的提取及意义[J]. 土壤学报,2006,43(2):183-189. [Xu Shujian, Pan Baotian, Gao Hongshan, et al. Analysis of grain-size populations with environmentally sensitive components of loess during the last interglacial-glacial cycle and their implications[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(2): 183-189.]
- [13] 徐树建. 风成沉积物环境敏感粒度指标的提取及意义[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(3):95-98. [Xu Shujian. Analysis of grain-size populations with environmentally sensitive components in Aeolian deposits and their implications[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(3): 95-98.]
- [14] 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.]
- [15] 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, 2022, 24(4): 713-727.]
- [16] 姜在兴,王雯雯,王俊辉,等. 风动力场对沉积体系的作用[J]. 沉积学报,2017,35(5):863-876. [Jiang Zaixing, Wang Wenwen, Wang Junhui, et al. The influence of wind field on depositional systems[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 863-876.]
- [17] Jiang Z X, Wang J H, Fulthorpe C S, et al. A quantitative model of paleowind reconstruction using subsurface lacustrine longshore bar deposits - an attempt[J]. Sedimentary Geology, 2018, 371: 1-15.
- [18] Wang J H, Jiang Z X, Xian B Z, et al. A method to define the palaeowind strength from lacustrine parameters[J]. Sedimentology, 2018, 65(2): 461-491.
- [19] Isla M F, Coronel M D, Schwarz E, et al. Depositional architecture of a wave-dominated clastic shoreline (Pilmatué member, Argentina): Linking dynamics and stratigraphic record of bar-trough systems[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 118: 104417.
- [20] 朱敏敏,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.]
- [21] Yin A, Dang Y Q, Zhang M, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Qaidam Basin and its surrounding regions (Part 3): Structural geology, sedimentation, and regional tectonic reconstruction[J]. GSA Bulletin, 2008, 120(7/8): 847-876.
- [22] 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.]
- [23] 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.]
- [24] 吴光大. 柴达木盆地东部台南气田的发现[J]. 天然气工业, 1994, 14 (1): 18-23. [Wu Guangda. The discovery of Tainan gas field in the east part of Chaidamu Basin[J]. Natural Gas Industry, 1994, 14(1): 18-23.]
- [25] 朱锐, 张昌民, 龚福华, 等. 粒度资料的沉积动力学在沉积环境分析中的应用: 以江汉盆地西北缘上白垩统红花套组沉积为例[J]. 高校地质学报, 2010, 16 (3): 358-364. [Zhu Rui, Zhang Changmin, Gong Fuhua, et al. Use of sediment dynamic analysis in environment interpretation: A case study on Honghuatao Formation, Upper Cretaceous of western Jianghan Basin, Hubei province[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(3): 358-364.]
- [26] 袁静, 杜玉民, 李云南. 惠民凹陷古近系碎屑岩主要沉积环境粒度概率累积曲线特征[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30 (3): 103-106. [Yuan Jing, Du Yumin, Li Yunnan. Probability cumulative grain size curves in terrigenous depositional environments of the Paleogene in Huimin Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 103-106.]
- [27] 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用[J]. 自然科学进展, 2001, 11 (3): 269-276. [Sun Donghuai, An Zhisheng, Su Ruixia, et al. The mathematical method and its application of partitioning grain-size distribution from the sedimentary components in paleoenvironments[J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(3): 269-276.]

Grain-size Characteristics and Hydrodynamic Conditions of Beach-bar Sand Bodies in Tainan Area, Qaidam Basin

YI DingHong¹, LIU YingRu¹, LI JiYong², LIU JunFeng², KUI MingQing², CHEN FenJun²,
WU YanXiong², LI HongZhe¹, ZHANG TingJing¹

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest, Lanzhou, 730020, China

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

Abstract: [Objective] Beach-bar sand bodies have long been an important exploration and development target in the Tainan area of the Quaternary Qigequan Formation, and they are high-quality natural gas reservoirs. Natural gas in the Tainan area of the eastern Qaidam Basin has excellent source-reservoir-cap assemblage. [Methods] A full evaluation of the natural gas exploration prospects to predict the location of favorable exploration zones and targets in shore-shallow lake beach-bar sand bodies in the Tainan area involved comprehensive analyses of core observations and drill-log data combined with analyses of thin-sections, grain-size standard deviation, grain-size cumulative probability curves, environmental sensitive grain-size composition and other parameters. These grain-size variations and the hydrodynamic influence of the shore-shallow-lake beach-bar sand bodies in this area were studied in detail. [Results] The study showed that (1) the sedimentary environment during the Qigequan period in the Tainan area was a shore and shallow lake. Beach-bar sand bodies are well developed, with fine grains, and loose, poorly cemented rock which is readily broken. The lithology is mainly fine lithic feldspar sandstone/siltstone of medium-to-poor maturity and medium-to-poor roundness sorting. (2) During the overall deposition period of the Qigequan Formation, the cumulative probability curves of the grain size of the beach-bar sand bodies in the study area occurred in six patterns, mainly a one-hop one-suspension type (64.4%), a multi-segment type (11.9%), and a two-hop one-suspension type (7.5%). (3) During the deposition period, the grain-size standard deviation in the study area revealed four patterns, mainly multimodal (50.0%), followed by bimodal (33.4%), unimodal (8.3%) and trimodal (also 8.3%). Combined with the cumulative curves of grain-size probability and paleogeomorphological analysis, four environmentally sensitive grain-size components were found. The grain sizes from fine to coarse correspond to suspension transport, wave action, coastal current action and storm wave action. Of these, the most important hydrodynamic force was wave action, and the average proportion of the environmentally sensitive grain-size component accounts for 27.9% of the total size range. The suspension effect on grain size averages 15.3%; the coastal current effect averages 11.4%; and the storm wave effect is the weakest (average 2.3%). (4) The study of the plane distributions of the percentage of environmentally sensitive grain size components indicates that the influence of suspension on the development of beach-bar sand bodies is

enhanced from the core to the wing of the Tainan anticline, while the influence of wave action is exactly the converse. The influence of coastal flow on the beach-bar sand bodies is concentrated on the eastern and western wings of the anticline. **[Conclusion]** The study reveals the plane distribution range of high-quality beach-bar sand bodies in the Tainan area, and provides technical support for natural gas exploration and development in this area.

Key words: beach-bar sand body; cumulative probability of grain size; environmentally sensitive grain size components; Qigequan Formation; Tainan area; Qaidam Basin