

doi:10.3799/dqkx.2014.038

岱海湖盆沿坡流与顺坡流相互作用的沉积响应

陈彬滔¹, 于兴河², 王天奇¹, 杨丽莎¹, 潘树新¹, 李顺利²

1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃兰州 730020
2. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

摘要: 为了探讨陆相湖盆中沿坡流的作用强度及其对三角洲前缘沉积的影响, 对内蒙古岱海断陷湖盆的现代沉积进行了调查. 通过卫星图像分析、现场波浪观察与浮球实测、探槽挖掘与详细沉积特征描述、取样与样品分析、以及骨架剖面砂体对比, 证明岱海湖盆陡坡带以顺坡流作用为主, 分流河道和河口坝发育, 砂体垂向连通性好, 常形成大套块状砂体; 缓坡带的三角洲前缘存在强烈的沿坡流与顺坡流相互作用, 浪成因的岩相最为发育, 沙质沉积物席状化严重, 垂向序列呈不明显的反韵律, 河口砂体不对称分布, 沿坡漂流的上游方向砂体连片、多层叠置、侧向连通性好; 下游方向泥质夹层发育、砂体孤立、储层非均质性强.

关键词: 沿坡流; 顺坡流; 三角洲; 沉积响应; 沉积物; 油气藏; 岱海湖盆.
中图分类号: P588.2 **文章编号:** 1000-2383(2014)04-0399-12 **收稿日期:** 2013-07-10

Sedimentary Response to Interaction between Alongslope and Downslope Currents in Daihai Lake, North China

Chen Bintao¹, Yu Xinghe², Wang Tianqi¹, Yang Lisha¹, Pan Shuxin¹, Li Shunli²

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest (NWGI), PetroChina, Lanzhou 730020, China
2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: In order to confirm the intensity of alongslope current in lacustrine basin and its effect on the sedimentation of delta front, the modern sedimentation of fault-depression lacustrine basin (Daihai Lake) in Inner Mongolia, North China has been explored in this study. Based on analysis of satellite images, on-site wave observation and floating ball measurement, trench excavation, sedimentary characteristics description, sample analysis, and sandbodies comparison at the framework section, it can be concluded that the steep side of Daihai lacustrine basin was dominated by the process of downslope current, where distributary channels and river mouth bar were developed with good connectivity of sandbodies in vertical, forming large set of massive sandbodies; the interaction between downslope and alongslope currents can be found in the delta front of the gentle side, where the wave-genetic lithofacies was well-developed with sandy sediments sheeted seriously, coarsening upward rhythm was not obvious in vertical sequence, sandbodies in the river mouth were distributed asymmetrically. Sandbodies in the upstream direction of alongslope drifting were distributed continuously and superposed of multi-layers, with good connectivity in lateral; in the downstream direction, muddy intercalations were well-developed, sandbodies were distributed isolatedly with strong heterogeneity.

Key words: alongslope current; downslope current; delta; sedimentary response; sediments; petroleum reservoirs; Daihai lacustrine basin.

三角洲沉积地层中蕴藏着大量油气资源, 是当前油气滚动勘探开发的有利增长带(于兴河, 2012). 位于沉积盆地斜坡带的三角洲前缘河口区域属于各种沉积作用或沉积物搬运方式汇聚的区域(Miall, 1990). 就沉积物搬运的方向而言, 三角洲前缘河口区通常存在两种作用力或搬运方式, 即顺坡流(或搬运)和沿坡流(或搬运)(Bhattacharya and Giosan, 2003), 其储层非均质性、平面形态及砂体类型和规模常因主控水动力状态不同而发生变化(邹才能等, 2008; Ainsworth *et al.*, 2011; 朱筱敏等, 2012; 王家

豪等,2012a,2012b).目前,国内外已有众多学者开展相关研究,通过室内实验(Boyer *et al.*,2009)、现代沉积观察(Laberg *et al.*,2005;Yu *et al.*,2012)、野外露头及地下岩心分析(Cunningham *et al.*,2005;Gabriele,2006;Schwehr *et al.*,2007),证明沿坡流与顺坡流相互作用的强弱控制着三角洲前缘河口区域的砂体类型和分布规律(Ainsworth *et al.*,2011),但是上述研究多侧重于海相三角洲.涉及陆相湖盆斜坡带是否存在沿坡流,以及沿坡流与顺坡流相互作用对三角洲前缘河口区的砂体类型和分布规律影响的研究很少.然而,三角洲储层作为陆相盆地碎屑岩地层中重要的油气勘探目标,其砂体类型与分布特征、储层非均质性问题又成为亟需解决的关键问题(于兴河,2012).

岱海现代湖盆与中国东部新生代陆相含油气盆地具有相似的构造和沉积格局,且长期处于水文封闭状态,保存了良好的湖泊—三角洲沉积序列,是研究陆相湖盆沉积特征的理想场所.为了探寻陆相湖盆斜坡带沿坡流作用的证据,分析沿坡流与顺坡流相互作用对河口沉积的影响,深化对陆相湖盆三角洲河口区储层沉积特征的认识,厘定了现场调查与室内分析相结合的研究方法.在现场调查前,根据卫

星图像分析结果,优选了岱海湖盆中受人为因素影响较小的天成河三角洲(南岸、缓坡)和半滩子三角洲(北岸、陡坡)进行探槽挖掘、取样、浮球漂流实测及详细沉积特征描述.在现场调查过程中,探槽挖掘深度以见到黑色含水泥质层为止,并对探槽的观测面进行光滑处理,以便于观察沉积现象;垂向取样间隔为 0.5 m,取样量为 30 g;单次浮球漂流实测的持续时间为 10 min,并在同一水域开展 3 次测试,以减小误差;详细沉积特征描述以厘米为单位,重点描述颜色、粒度、沉积构造、界面类型与接触关系,并拍摄照片.室内分析主要包括样品粒度分析与数据综合分析,样品粒度分析选用 Mastersizer 2000 激光粒度仪,数据综合分析遵循点(各探槽的沉积柱状图岩相划分)一线(骨架剖面对比)一面(河口砂体分布规律)的研究思路.以上述研究方法为指导,本次研究共挖掘探槽 38 个,取样 642 个,现场绘制柱状图 38 幅(累积深度 70.3 m),开展浮球漂流实测 6 次(南、北两岸各 3 次).

1 区域地理与地质概况

岱海位于内蒙古自治区乌兰察布市凉城县境内

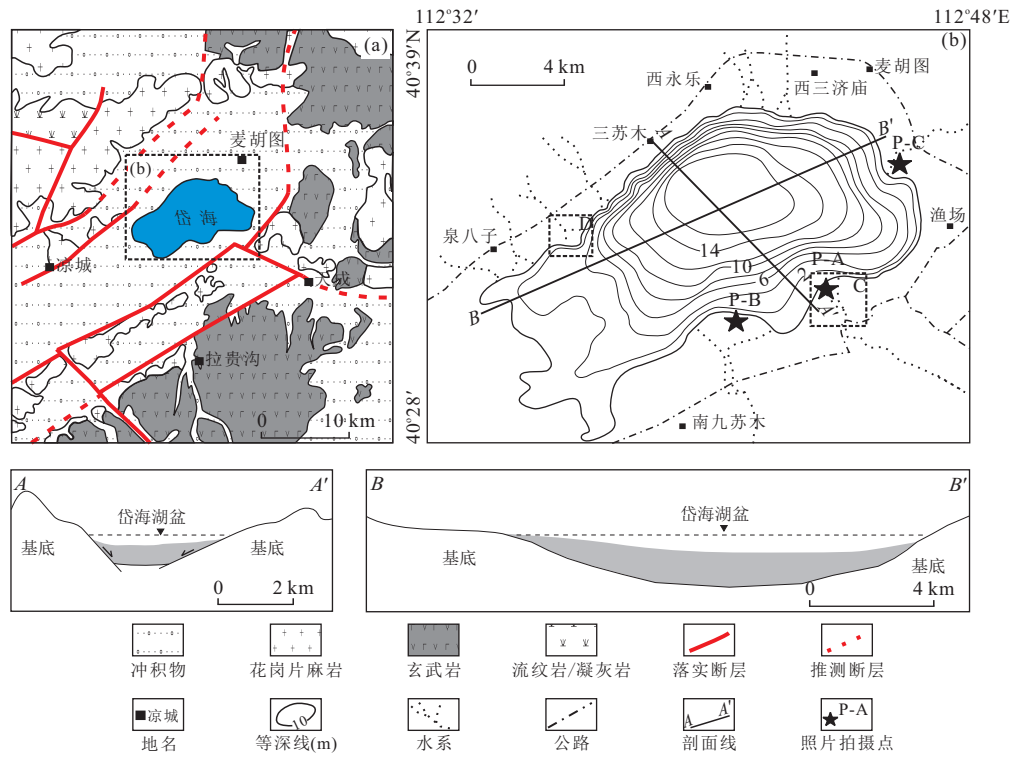


图 1 岱海湖盆区域地质与地理图

Fig.1 Regional geological and geographical maps of Daihai Lake

a.区域地质图(据李华章(1979)修改);b.水深与水系图(据 Yu *et al.*(2012)修改)

(112°32′31″~112°48′40″E, 40°28′7″~40°39′6″N), 是一个形成于古近纪的断陷盆地(李华章, 1979; 于兴河等, 1994; Yu *et al.*, 2012). 湖盆水体现有面积约 133 km², 最大水深约 16 m, 平均水深为 7.4 m, 湖岸线全长 61.56 km, 流域面积为 2 289 km²(曹建廷等, 2000; 王红娟等, 2006)(图 1b), 共有 22 条河流汇入. 岱海湖盆位于东亚季风边缘的气候敏感区, 盛行西北风, 平均风速约 2.5 m/s, 最大浪高可达 0.62 m(王苏民和冯敏, 1991; Xiao *et al.*, 2008).

岱海湖盆整体呈 NE-SW 走向, 湖盆北侧和南侧分别发育一组近似平行于长轴方向的燕山期控盆边界断裂(李华章, 1979)(图 1a), 其中北部断裂的倾角大于南部断裂, 造就了盆地北陡南缓的总体构造格局(图 1). 岱海湖盆四周环山, 受燕山期和喜山期构造抬升的影响, 盆地北部主要出露太古界花岗片麻岩, 山体外形呈圆坦状, 河流大多为 NW-SE 流向, 入湖形成陡坡小型三角洲; 盆地南部大部分区域出露玄武岩, 河流一般为 SE-NW 流向、源远流长, 入湖形成大型三角洲(图 1b).

2 岱海湖盆水动力状态分析

陆相湖盆不同于海相盆地, 基本不受潮汐作用的影响. 因此, 陆相湖盆三角洲沉积通常仅受河流作用和波浪作用的影响. 河流一般沿最大坡降面发育, 垂直于湖岸线, 属于顺坡流; 而波浪作用如果以一定的角度与湖岸线相交, 其分量形成离岸浪(顺坡流)和沿岸浪(沿坡流)(Greatbatch and Li, 2000; Boyer *et al.*, 2009). 顺坡流通常携带大量沉积物进入湖盆, 对三角洲起建设性作用; 沿坡流对河口砂体进行再搬运, 主要作用体现在对河流携带沉积物的改造.

岱海湖盆四周的数十条河流近似垂直于湖岸线、携带大量泥沙汇入湖盆, 其中, 本次研究中所重点涉及的天成河和半滩子河的流量分别达到 $4.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $7.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (Yu *et al.*, 2012). 岱海湖盆顺坡流现象十分明显, 尤其是湖盆北岸陡坡带, 河流坡降面大, 下切冲刷现象明显, 河流携带大量粗碎屑入湖后形成小型三角洲. 因此, 关于岱海湖盆水动力状态的分析重点在于是否存在沿坡流.

2.1 湖浪方向

气象资料表明, 岱海湖盆区域盛行西北风, 受此影响, 冲浪的总体方向为 NW-SN, 因此, 在湖盆南岸, 冲浪抵岸后形成的沿坡漂流方向应为 SW-NE. 实际的观察结果(图 2a)也印证了上述推断, 即湖盆南岸具有明显的 SW-NE 向沿坡漂流现象. 为了进一步验证沿坡漂流现象, 在湖盆南岸(缓坡)开展了 3 次现场浮球漂流实测(单次实测的持续时间为 10 min), 为了尽量减小风的影响, 浮球中装了适量的水, 以增大其自身重量. 实测结果表明, 浮球的漂流方向近似为 SW-NE, 3 次浮球的漂流距离分别为 3.1 m、2.7 m、3.5 m. 实测结果与现场观察结果一致, 并且沿坡漂流的平均速度达到 0.31 m/min. 但是, 在湖盆北岸(陡坡)并未观察到明显的沿坡漂流现象, 现场浮球实验也因为浮球被垂直于岸线冲入湖中而未能成功.

2.2 河口沙嘴

沙嘴属于一种由沿坡流改造、再搬运河口的沙质沉积物, 在海岬尖端、河口或海岸转折处沉积形成的沙洲(王永红等, 2000; 春喜等, 2009), 其延伸方向与沿坡流方向一致(Komar, 1973; Ainsworth *et al.*, 2011). 尤其是在河口地区, 受入湖河流水柱效应的影响(Bhattacharya and Giosan, 2003), 位于

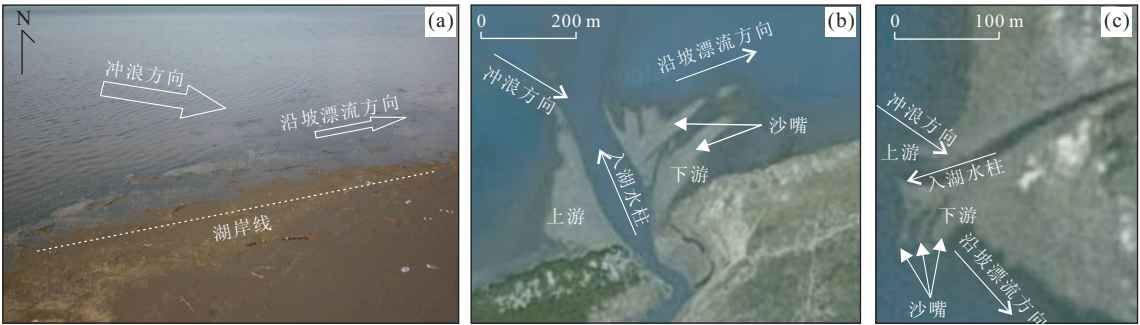


图 2 岱海湖盆沿坡流作用的证据

Fig.2 Evidences of alongslope flow process in Daihai Lake

a. 岱海湖盆南岸(缓坡)冲浪分析图; b. 岱海湖盆南岸沙嘴现象(底图据 google 地图); c. 岱海湖盆东岸沙嘴现象(底图据 google 地图). 照片位置分别为图 1b 中的 P-A、P-B、P-C

沿坡漂流上游方向的河口区域,入湖水柱阻碍了沿坡漂流作用,沙质沉积物连续堆积,形成沙脊平原(图 2b);在位于沿岸漂流下游方向的河口区域,受沿坡漂流作用的影响,河口沙质沉积物被改造、再搬运,形成多期沙嘴.各期沙嘴之间形成类似于泻湖的静水区,并最终堆积泥质沉积物,形成隔夹层(图 2b).

岱海湖盆现场调查结果表明,湖盆缓坡带的河口处存在沙嘴现象,其中以湖盆南岸(缓坡)的步量河河口(图 2b)和东岸的目花河河口(图 2c)最为典型.步量河河口的沙嘴共分为两期,单期沙嘴长约 200 m、宽约 50 m,呈 SW-NE 走向,近似平行于湖岸线;目花河河口的沙嘴共分为三期,单期沙嘴长约 80 m、宽约 10 m,近 N-S 走向.两处典型沙嘴的走向均与前文推断和实测的沿坡流方向一致.湖盆北岸

(陡坡)虽然拥有多达 8 个入湖河口,但是未能观察到沙嘴现象,间接说明湖盆北侧以顺坡流为主,沿坡流对河口的改造作用十分微弱.

2.3 沉积构造

不同的流态下可以形成不同的床砂底形,而不同的床砂底形则形成不同的层理类型(Schwartz, 1982).因此,沉积构造的细致观察与描述可以为水动力条件分析提供间接证据.通过对缓坡天成河三角洲和陡坡半滩子三角洲共计 38 个探槽的观察,发现岱海湖盆南北两侧的三角洲具有截然不同的沉积构造特征.

南岸缓坡带以发育各种浪成沉积构造为特征,浪成波纹(图 3a、3b)、透镜状层理(图 3b)和复合层理(3c)尤为发育,多数探槽在垂向上均表现为沙泥薄互层,沙质沉积中均可见沿坡流(波浪)作用的痕

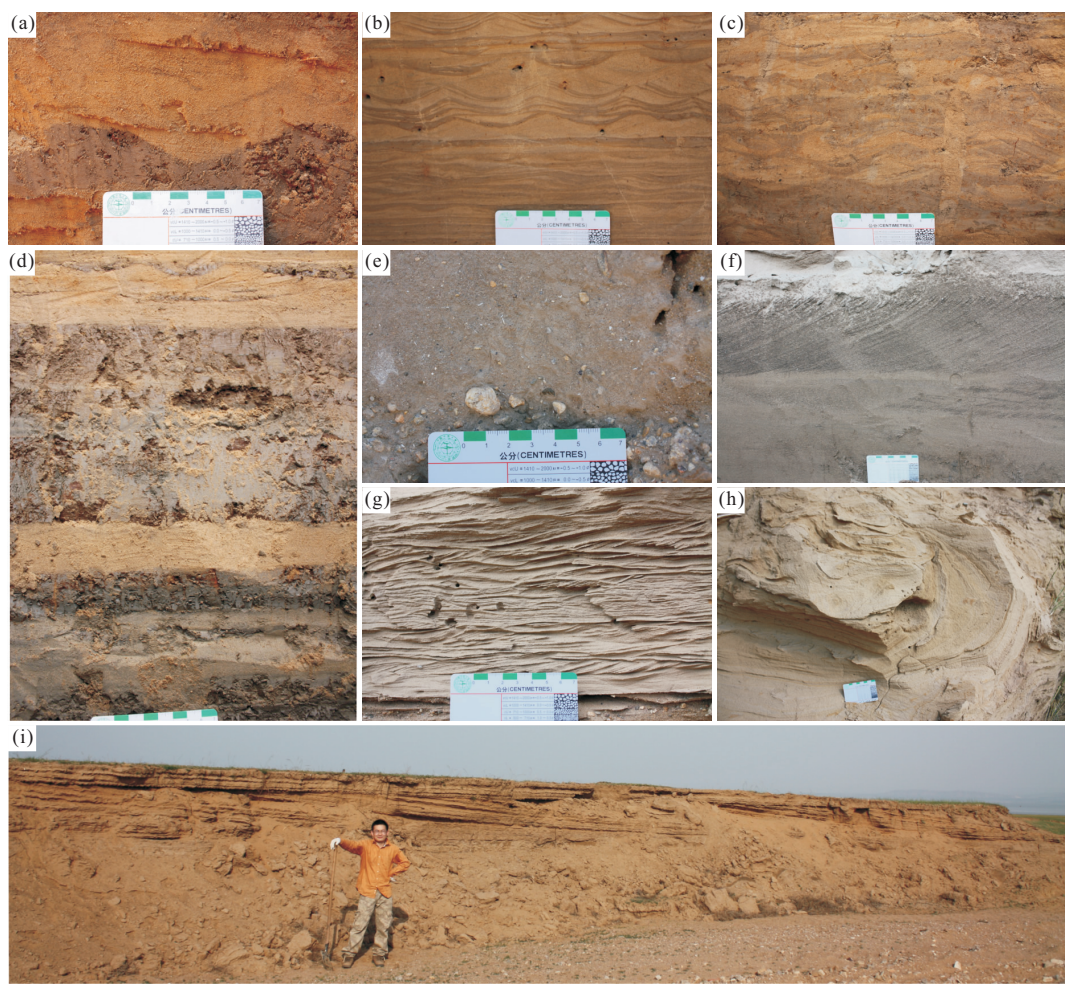


图 3 岱海湖盆现代沉积的典型沉积构造照片

Fig.3 Photos of typical sedimentary structures in Daihai Lake

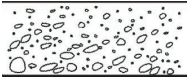
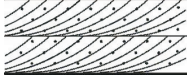
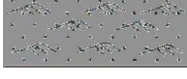
a.浪成波纹层理;b.浪成波纹层理(上部)、透镜状层理(下部);c.复合层理;d.沙泥薄互层、浪成波纹层理(顶部);e.冲刷面上滞留砾石;f.板状交错层理;g.流水沙纹层理;h.变形构造;i.前积结构.a~d 拍摄于南岸(缓坡)天成河三角洲的探槽;e~i 拍摄于北岸(陡坡)半滩子三角洲的探槽

表 1 岱海湖盆南北两岸沿坡流与顺坡流相互作用强弱的控制因素对比

岸线	地形坡度(°)	河流坡降面	河流流量(m ³ /a)	风向	平均粒径(Φ)	主控水动力状态
南岸	2.5(相对缓)	小	4.6×10 ⁶	迎风侧	2.5(相对细)	沿坡流
北岸	8(相对陡)	大	7.8×10 ⁶	背风侧	1.5(相对粗)	顺坡流

表 2 岱海湖盆天成河三角洲和半滩子三角洲的岩相类型划分及成因解释

Table 2 Division of lithofacies types and its genetic interpretation for Tianchenghe delta and Bantanzi delta in Daihai Lake

岩相代码	岩相描述	岩相名称	厚度范围(cm)	成因解释
Gm		块状层理砂砾岩相	5~10	冲刷面之上的滞留沉积
St		槽状交错层理中砂岩相	5~20	分流河道下切、迁移并充填
Sp		板状交错层理中砂岩相	12~30	垂向加积或侧向加积
Sh		平行层理中细砂岩相	5~15	高流态床砂底形迁移、水浅流急
Sw		浪成波纹层理细砂岩	10~30	沿坡流(波浪)淘洗、改造而形成的席状砂或滨浅湖滩沙
Sr		流水沙纹细砂岩相	3~10	小型沙纹迁移,漫溢沉积
Fl		水平层理粉砂岩相	5~25	湖湾相对静水环境沉积
M		块状泥岩相	8~45	湖相泥质沉积

迹(图 3d)。

北岸陡坡带以发育各种顺坡流(河流)作用的沉积构造为典型特征,河道冲刷、滞留沉积现象明显(图 3e),板状交错层理(图 3f)、流水沙纹层理(图 3g)极为发育,还可见典型的变形沉积构造(图 3h)及前积结构(图 3i)。

通过现场湖浪观察与实测、沙嘴沉积现象、探槽沉积构造观察与分布频率统计,综合分析认为岱海湖盆南岸缓坡带沿坡流作用强,存在明显的沿坡流与顺坡流相互作用;北岸陡坡带则主要受顺坡流控制,沿坡流作用微弱。

2.4 沿坡流与顺坡流相互作用强弱的控制因素

岱海湖盆具有统一的水体,但是南北两岸却具有截然不同的主控水动力状态,北岸陡坡带以顺坡流作用为主,南岸缓坡带沿坡流作用强烈。分析认

为,上述差异可能主要受地形坡度、河流坡降面、河流流量、风向、沉积物粒度等因素的综合影响(表 1)。

湖盆南岸地形坡度为 2.5°(GPS 现场实测数据)、相对较缓,河流坡降面小(沿河流方向的海拔降幅约为 10 m/km),天成河の入湖流量为 4.6 × 10⁶ m³/a。河道冲刷现象及河道滞留沉积少见,而浪成成因的沉积构造与岩相类型分布频率高达 76.8% (表 2),反应出河口床底对顺坡流的摩擦作用大,顺坡流能量严重损失;此外,南岸宽广低缓的三角洲区域处于迎风岸、受风浪作用明显,并且沉积物粒度(平均粒径为 2.5Φ)相对较细,易于被改造,因此,南岸缓坡带沿坡流发育,沿坡流与顺坡流相互作用强烈。

湖盆北岸地形坡度为 8°、相对较陡,河流坡降面大(沿河流方向的海拔降幅为 50 m/km),顺坡流

汇入湖盆的惯性力大,半滩子河的入湖流量为 $7.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,发育河道冲刷现象及河道滞留沉积,顺坡流成因的岩相类型分布频率接近 85.9%(表 2);此外,北岸位于背风岸,所受风浪小,沿坡流作用微弱,加之沉积物粒度相对较粗(平均粒径 1.5Φ),不易被改造,因此,北岸陡坡带基本保持了顺坡流作用的产物。

总之,在地形坡度相对较缓、河流坡降面较小、原始沉积物粒度较细、风浪作用较大(迎风侧)的三角洲河口区,沿坡流与顺坡流之间的相互作用相对较强,对沉积构造、岩相类型、砂体展布等产生影响。

3 沿坡流与顺坡流相互作用的沉积响应

以现场探槽挖掘与详细沉积特征描述资料为基础,对天成河三角洲(缓坡、沿坡流与顺坡流相互作用强烈)和半滩子三角洲(陡坡、以顺坡流作用为主)的岩相类型、砂体发育特征等进行探讨。

3.1 岩相及岩相组合

根据详细的探槽沉积特征观察,在岱海湖盆天成河三角洲和半滩子三角洲共识别出 8 种典型的岩相类型(表 2)。

缓坡天成河三角洲前缘以浪成波纹层理细砂岩相(Sw)(图 3a~3c)为主,并与块状层理泥岩(M)互层产出,其他类型的岩相少见;而在陡坡半滩子三角洲,块状层理砂砾岩(Gm)(图 3e)、板状交错层理中砂岩(Sp)(图 3f)等顺坡流作用的岩相最为发育,统计结果表明,南岸缓坡天成河三角洲共计挖掘探槽 27 个,累积厚度为 55.4 m,其中浪成波纹层理细砂岩相(Sw)发育层段的累积厚度为 42.5 m,分布频率高达 76.8%;北岸陡坡带半滩子三角洲共计挖掘探槽 11 个,累积厚度为 14.9 m,其中沿坡流作用典型岩相的发育层段累积厚度为 2.1 m,分布频率仅为 14.1%。

根据 38 个探槽的岩相组合特征,总结出天成河三角洲和半滩子三角洲的典型岩相组合垂向序列,两者存在明显差异(图 4)。天成河三角洲的岩相组合垂向序列呈不明显的反韵律,以浪成成因的岩相为主,成因砂体多为席状砂与湖相泥互层(图 4a);半滩子三角洲的岩相组合垂向序列以反韵律的河口坝为主,底部前三角洲泥质沉积中多发育变形构造,顶部常见多期叠置的河道沉积,整个序列具有明显的

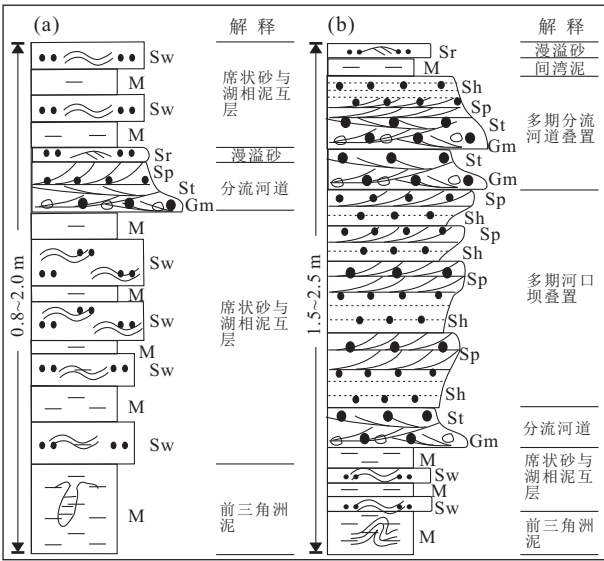


图 4 岱海湖盆缓坡与陡坡的典型岩相组合垂向序列(图释同图 5)

Fig.4 The typical vertical sequence of lithofacies associations for gentle slope and steep slope in Daihai Lake a.缓坡天成河三角洲(沿坡流与顺坡流相互作用强);b.陡坡半滩子三角洲(以顺坡流作用为主)

反韵律(向上变粗)特征。

3.2 砂体发育特征

以探槽柱状图为基础,分别建立了天成河三角洲和半滩子三角洲在顺坡方向和沿坡方向的砂体对比骨架剖面,以便进一步探讨沿坡流与顺坡流相互作用对三角洲砂体分布的影响。

缓坡天成河三角洲的砂体多受强烈沿坡流作用的改造而席状化。天成河三角洲的顺坡方向骨架剖面表明,靠近物源方向,仍保留了部分顺坡流作用的产物,分流河道(CH)和河口坝(MB)沉积相互叠置,但是向湖盆方向沿坡流与顺坡流相互作用增强,分流河道(CH)和河口坝(MB)沉积迅速消失,转而以发育席状砂为主(图 5a)。平一剖面综合分析认为,分流河道(CH)发育区近似对应于三角洲平原亚相,而三角洲前缘区域因遭受强烈沿坡流作用,大多数顺坡流作用所特有的沉积砂体(如分流河道和河口坝)已被改造、搬运、再沉积形成席状砂(SS)。沿坡方向的剖面同样表现出砂体席状化的特征(图 5b),席状砂虽然薄,但是其横向连续性极好。统计结果表明,天成河三角洲共计测得各类成因砂体 36 个,其中席状砂 23 个,分布频率高达 63.9%(表 3)。

陡坡半滩子三角洲主要受顺坡流作用的控制,其顺坡和沿坡方向的骨架剖面均以发育分流河道(CH)和河口坝(MB)为特征。在顺坡方向,可以观察

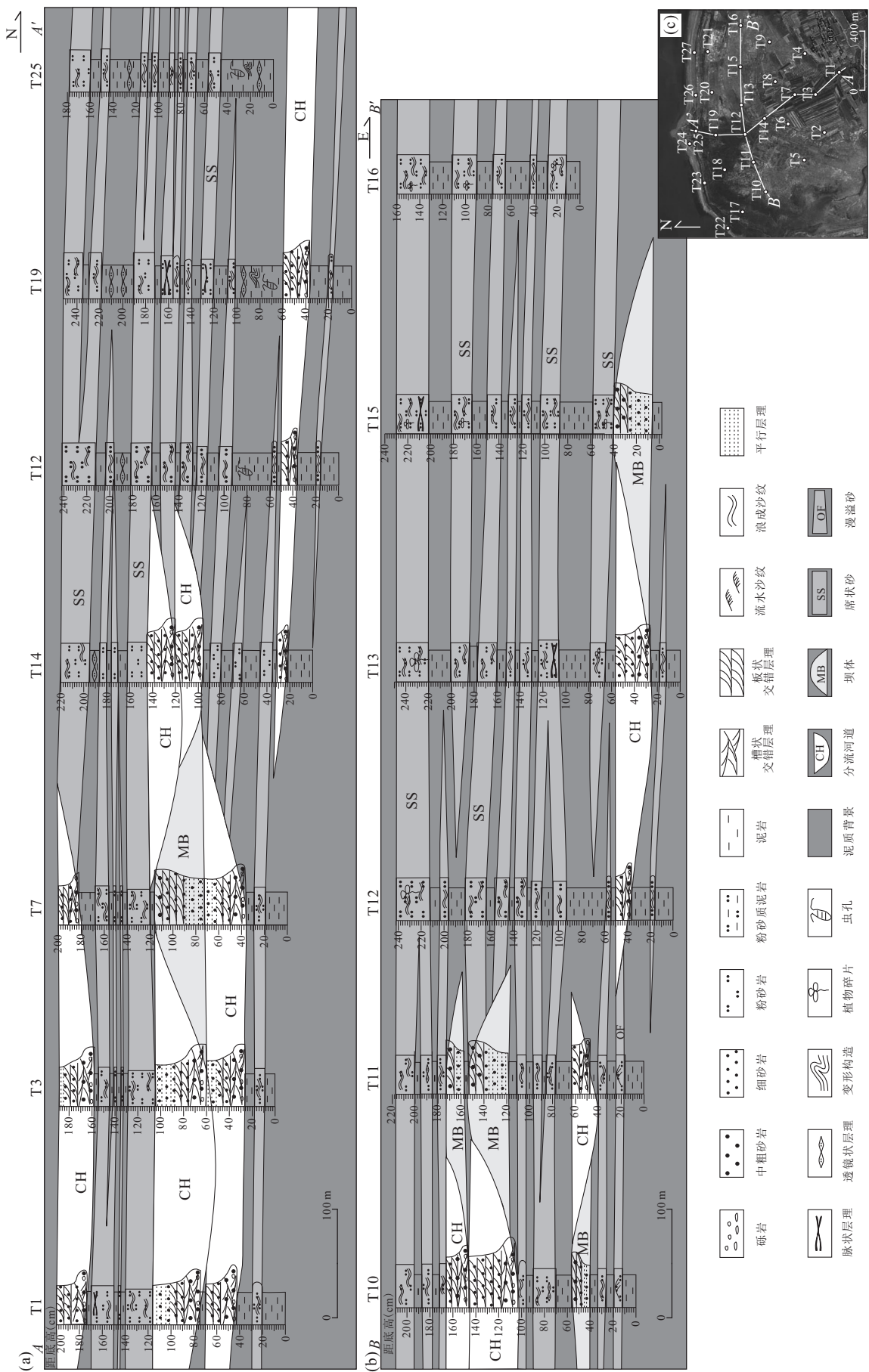


图5 天成河三角洲砂体对比骨架剖面

Fig.5 Skeleton profile of sandbody correlation in Tiansheng delta

a.顺坡方向砂体对比剖面; b.沿坡方向砂体对比剖面; c.天成河三角洲平面形态及探槽分布.底图据google地图,位置见图1b中的C框

表 3 天成河三角洲与半滩子三角洲的沉积特征统计

Table 3 Statistics of sedimentary features in Tianchenghe delta and Bantanzi delta

名称	主要岩相类型	沿坡流作用标志 岩相所占厚度比(%)	主要砂体类型					
			分流河道(CH)		河口坝(MB)		席状砂(SS)	
			个数	分布频率(%)	个数	分布频率(%)	个数	分布频率(%)
天成河三角洲	Sw	76.8	10	27.8	3	8.3	23	63.9
半滩子三角洲	Gm,St,Sp	14.1	16	41.0	14	35.9	8	20.5

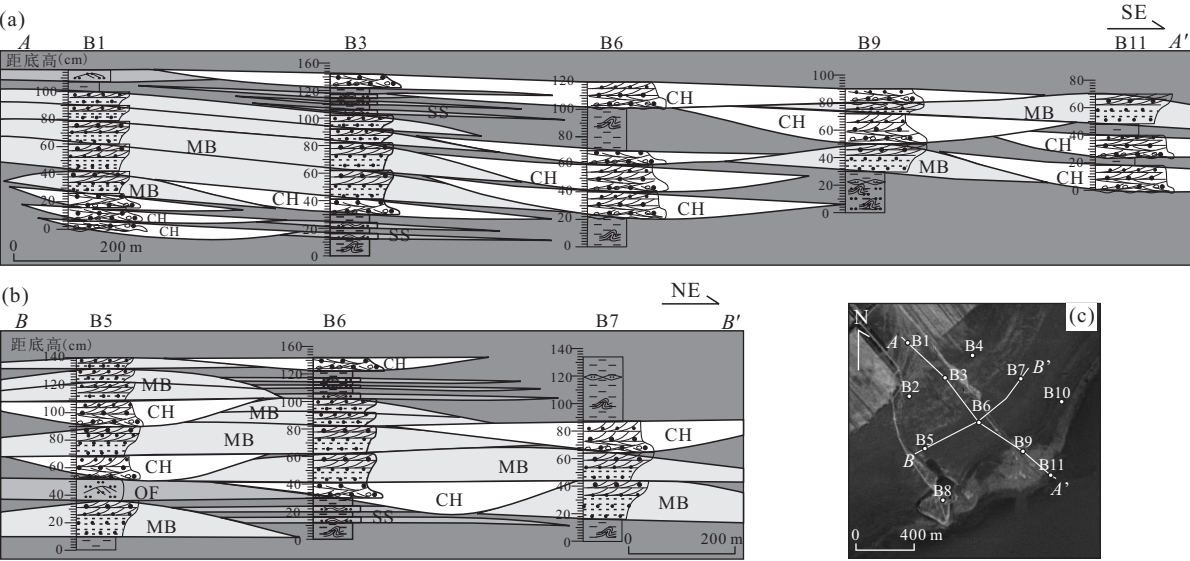


图 6 半滩子三角洲砂体对比骨架剖面(图释同图 5)

Fig.6 Skeleton profile of sandbody correlation in Bantanzi delta

a.顺坡方向砂体对比剖面;b.沿坡方向砂体对比剖面;c.半滩子三角洲平面形态及探槽分布.底图据 google 地图,位置见图 1b 中的 D 框

到近似于以垂向加积式叠置的大型河口坝(MB)沉积,以及多期叠置或孤立分布的分流河道(CH)沉积(图 6a),仅局部地区发育薄层席状砂,但是其侧向连续性明显低于天成河三角洲席状砂的连续性.在沿坡方向,分流河道多与河口坝侧向拼接,形成连通性很好的大套块状砂体(图 6b).统计结果表明,半滩子三角洲共计测得各类构型的砂体 39 个,其中分流河道(CH)16 个、分布频率为 41.0%,河口坝 14 个、分布频率为 35.9%,席状砂仅 8 个(表 3),局部还发育漫溢砂体.

总体而言,沿坡流与顺坡流相互作用强烈的天成河三角洲主要发育典型的沿坡流成因岩相类型—浪成波纹层理中砂岩相(Sw),主要砂体类型为席状砂,分流河道砂体次之,河口坝极少,砂体的横向连续性极好,但是泥质夹层发育;顺坡流作用为主的半滩子三角洲以发育典型的河流成因岩相类型(Gm、St、Sp)为特征,主要砂体类型为分流河道和河口坝,两者的合计分布频率高达 76.9%,其中河口坝的发育程度显著增大,席状砂不发育,砂体的侧向延伸距离不大,但垂向连通性好,可形成大套块状砂体.

4 讨论

4.1 三角洲前缘河口砂体的不对称分布

沿坡流影响下三角洲前缘河口砂体的不对称分布问题已成为近期三角洲研究的热点(Bhattacharya and Giosan,2003),但是,目前的研究多集中于沿坡流作用极为强烈的海相三角洲,涉及陆相三角洲河口区域沿坡流作用及河口砂体不对称分布的研究或证据极少.

岱海湖盆的现代三角洲调查结果显示,湖盆南岸和东岸的三角洲受沿坡流影响强烈,三角洲平面形态呈不对称尖嘴状(图 5c),河口砂体因沿坡流改造而在沿坡漂流的下游方向形成沙嘴(图 2b、2c、7b),沙嘴之间形成相对静水区;而在沿坡漂流上游方向,因河流入湖水柱作用力与沿坡流作用力相互抵消,形成沙脊平原.岱海湖盆北岸的三角洲以顺坡流作用为主,三角洲平面形态呈朵叶状(图 6c),三角洲前缘河口砂体近似对称分布(图 7a),前积现象明显(图 3i).

由此说明,陆相湖盆的三角洲前缘河口砂体也

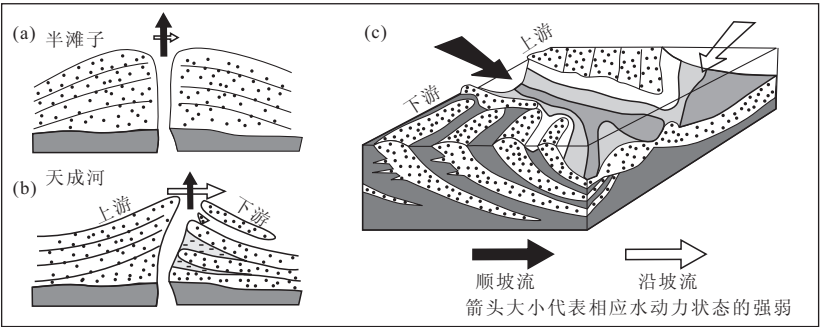


图 7 沿坡流与顺坡流作用强弱对河口砂体分布的影响

Fig.7 The effects of interaction strength between alongslope- and downslope-flow on the estuarine sandbody distribution
a.河口砂体对称分布(以顺坡流作用为主,半滩子三角洲);b.河口砂体不对称分布(沿坡流与顺坡流相互作用强,天成河三角洲);c.河口砂体不对称分布立体模式(据 Bhattacharya and Giosan,2003 修改)

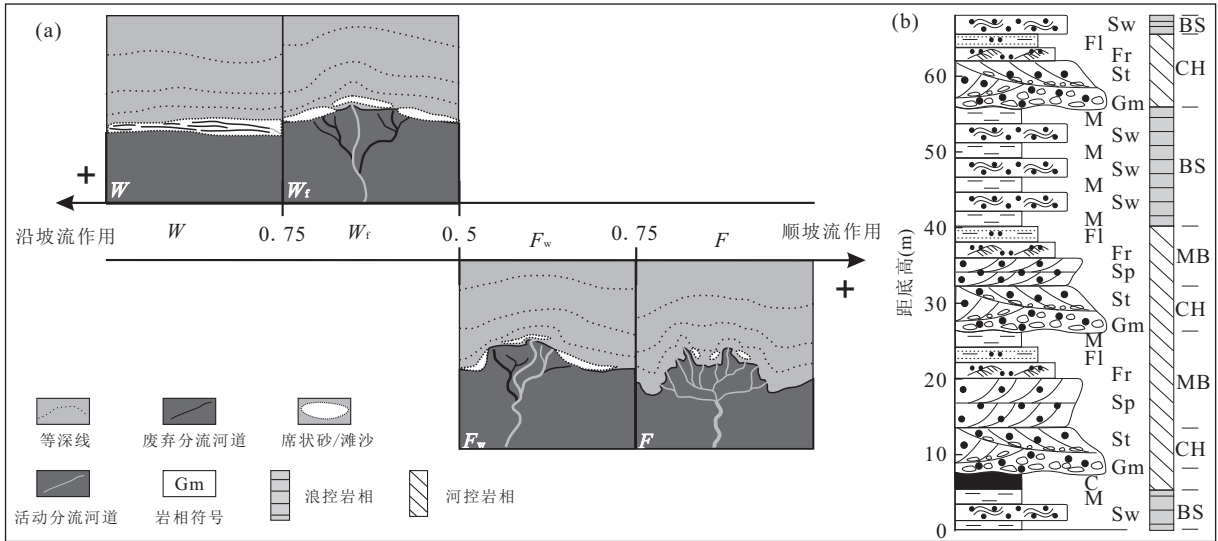


图 8 三角洲前缘主控水动力状态分析方法(图释同图 5)

Fig.8 Analytical procedure for the main hydrodynamic condition of delta front

a.基于水动力条件的陆相湖盆三角洲分类;b.准噶尔盆地西山窑组露头实测岩心柱状图; W ,浪控; W_t ,河流影响型浪控; F_w ,波浪影响型河控; F ,河控; CH ,水下分流河道; BS ,席状砂/滩砂与湖相泥互层; MB ,河口坝,河控岩相分布频率为 45 m/69 m= 0.71

存在不对称分布,并且河口两侧的砂体分布形式也存在差异(图 7c).沿坡漂流上游方向砂体连片分布,呈多层叠置块状,侧向连通性好,可以作为优质的油气储层;而沿坡漂流下游方向因沙嘴之间的静水区后期充填湖相泥质沉积物而形成泥质夹层,砂体多孤立分布,侧向连通性变差,储层非均质性强.因此,在实际油气勘探开发过程中,应重视三角洲前缘的主控水动力状态分析,不同主控水动力条件决定着不同的河口砂体叠置形式,切忌认为任何水动力条件下三角洲前缘的河口砂体均对称分布,以免影响勘探开发策略.

4.2 三角洲前缘主控水动力状态分析

岱海湖盆现代沉积调查及前人的相关研究已表

明,三角洲前缘的储层非均质性、平面形态及砂体类型和规模常因主控水动力条件不同而发生变化(宋春晖等,2001;陈彬滔等,2011;Ainsworth *et al.*, 2011).虽然目前已通过现代沉积观察认识到主控水动力条件对三角洲前缘的影响,但是如何将其推广至实际勘探开发过程中的三角洲储层预测,仍然存在一定难点,其中最大的问题在于如何确定三角洲前缘的主控水动力状态.

对于陆相三角洲地层而言,主要受控于沿坡流(波浪)和顺坡流(河流)作用.沿坡流作用通常对河口砂体起着改造、破坏、再分布的作用(Bhattacharya and Giosan,2003).为了便于表征三角洲前缘的水动力条件,首先将陆相三角洲按相对水动力

强弱简单划分为 4 类(假定 1 代表完全受顺坡流作用和沿坡流作用控制)(图 8a),分别为河控(顺坡流作用介于 0.75~1.00)、波浪影响型河控(顺坡流作用介于 0.50~0.75)、河流影响型浪控(沿坡流作用介于 0.50~0.75)、浪控(沿坡流作用介于 0.75~1.00)(陈彬滔等,2012)。

由于地层沉积时期,不同的主控水动力条件通常会产生特有的岩相(Ainsworth *et al.*, 2011),通过对研究层段露头 and 取心井岩心的详细观察,统计地层中代表特定水动力条件的岩相(例如发育冲洗交错层理、浪成波纹层理或波痕等典型沿坡流作用沉积构造的岩相)的分布频率(图 8b),参考图 8a 所示的分类标准,即可表征其沉积时期的主控水动力条件。例如图 8b 所示的准噶尔盆地西山窑组三角洲前缘研究层段露头岩心柱状图,其中河控岩相的分布频率为 0.71,即判断其为波浪影响型河控三角洲前缘。除了上述基于露头和岩心的方法以外,主控水动力状态分析过程中还应充分考虑沉积时期的构造、古气候(尤其是古风向)、三角洲主水流方向等。

目前,研究人员已采用上述方法,以露头岩心观察资料为基础,定量表征了准噶尔盆地三工河组和西山窑组三角洲前缘地层的主控水动力状态(陈彬滔等,2012),分析结果表明,三工河组为河流影响型浪控辫状河三角洲前缘沉积,而西山窑组为波浪影响型河控辫状河三角洲前缘沉积,两者在砂体类型与分布规模上均存在明显差异,为相应层位下步油气勘探开发过程中寻找优质储层和储层非均质性研究提供了参考。

5 结论

(1)基于湖浪分析、现场湖浪方向观察与浮球实测结果、河口沙嘴沉积现象及浪成沉积构造发育等证据证明,岱海陆相断陷湖盆缓坡带的三角洲前缘存在强烈的沿坡流与顺坡流相互作用。

(2)岱海湖盆南岸缓坡带沿坡流与顺坡流相互作用强,沙质沉积物席状化严重,垂向序列呈不明显的反韵律,主要砂体类型为席状砂,分布频率达到 63.9%,砂体横向延伸距离大,但泥质夹层发育;北岸陡坡带以顺坡河流作用为主,垂向序列具有明显的反韵律特征,主要砂体类型为分流河道,河口坝次之,砂体侧向延伸距离不大,但垂向连通性好,常形成大套块状砂体。

(3)陆相湖盆三角洲前缘河口区域的砂体存在

不对称分布的特点,在沿坡流作用较强的河口区,沙质沉积物因沿坡流改造而在漂流的下游方向形成沙嘴,沙嘴之间的相对静水区因后期充填泥质沉积物而形成泥质夹层,砂体孤立分布、侧向连通性差、储层非均质性强;沿坡漂流上游方向,因河流入湖水柱作用力与沿坡流作用力相互抵消而形成沙脊平原,砂体连片分布、呈多层叠置块状、侧向连通性好,可以作为优质的油气储层。

致谢:感谢中国地质大学(北京)能源学院李胜利副教授、谭程鹏、高峰、谢京、许磊、王楠、曾小明等研究生在现场调查与论文撰写过程中给予的大量帮助,感谢匿名审稿专家及编委会提出的宝贵修改意见。

References

- Ainsworth, R. B., Vakarelov, B. K., Nanson, R. A., 2011. Dynamic Spatial and Temporal Prediction of Changes in Depositional Processes on Clastic Shorelines: Toward Improved Subsurface Uncertainty Reduction and Management. *AAPG Bulletin*, 95 (2): 267 – 297. doi: 10.1306/06301010036
- Bhattacharya, J. P., Giosan, L., 2003. Wave-Influenced Deltas: Geomorphological Implications for Facies Reconstruction. *Sedimentology*, 50 (1): 187 – 210. doi: 10.1046/i.1365-3091.2003.00545.x
- Boyer, D. L., Sous, D., Sommeria, J., 2009. Laboratory Experiments on Along-Slope Flows in Homogeneous and Stratified Rotating Fluids. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 46(1-4): 19-35.
- Cao, J. T., Wang, S. M., Shen, J., et al., 2000. The Paleoclimate Changes during the Past Millennium Inferred from the Lacustrine Core in Daihai Lake, Inner Mongolia. *Scientia Geographica Sinica*, 20 (5): 391 – 396 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B. T., Yang, L. S., Yu, X. H., et al., 2012. Quantitative Analysis on Hydrodynamic Conditions and Sand Body Distribution Dimensions of the Braided River Delta in Sangonghe Formation and Xishanyao Formation on the South Margin of Junggar Basin. *Geology in China*, 39 (5): 1290 – 1298 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B. T., Yu, X. H., Yang, L. S., et al., 2011. Research of Sedimentary Micro-facies at the Early Stage of Exploration Evaluation: Taking South Qianliyu Area in Dongpu Depression for Example. *Journal of Oil and Gas Technology*, 33 (8): 21 – 25 (in Chinese with English abstract).
- Chun, X., Chen, F. H., Fan, Y. X., et al., 2009. Evidence of

- Palaeolake Existence in Ulan Buh Desert and Its Environmental Evolution. *Acta Geographica Sinica*, 64(3): 339—348 (in Chinese with English abstract).
- Cunningham, M. J., Hodgson, S., Masson, D. G., et al., 2005. An Evaluation of Along- and Down-Slope Sediment Transport Processes between Goban Spur and Brenot Spur on the Celtic Margin of the Bay of Biscay. *Sedimentary Geology*, 179 (1—2): 99—116. doi: 10.1016/j.sedgeo.2005.04.014
- Gabriele, U. N., 2006. Depositional Patterns at Drift 7, Antarctic Peninsula: Along-Slope versus Down-Slope Sediment Transport as Indicators for Oceanic Currents and Climatic Conditions. *Marine Geology*, 233 (1—4): 49—62.
- Greatbatch, R., Li, G., 2000. Alongslope Mean Flow and an Associated Upslope Bolus Flux of Tracer in a Parameterization of Mesoscale Turbulence. *Deep Sea Research I: Oceanographic Research Papers*, 47(4): 709—735. doi: 10.1016/s0967-0637(99)00078-3
- Komar, P. D., 1973. Computer Models of Delta Growth due to Sediment Input from Rivers and Longshore Transport. *Geological Society of America Bulletin*, 84(7): 2217—2226. doi: 10.1130/0016-7606(1973)84<2217:CMODGD>2.0.CO;2
- Laberg, J. S., Martyn, S., Stoker, K. I., et al., 2005. Cenozoic Alongslope Processes and Sedimentation on the NW European Atlantic Margin. *Marine and Petroleum Geology*, 22(9—10): 1069—1088. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2005.01.008
- Li, H. Z., 1979. Formation of Daihai Lake and Its Topographical Features. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 24(1): 98—110 (in Chinese).
- Miall, A. D., 1990. Principles of Sedimentary Basin Analysis. Springer-Verlag, New York, 155—170.
- Schwartz, R. K., 1982. Bedform and Stratification Characteristics of Some Modern Small-Scale Washover Sand Bodies. *Sedimentology*, 29(6): 835—849. doi: 10.1111/j.1365-3091.1982.tb00087.x
- Schwehr, K., Driscoll, N., Tauxe, L., 2007. Origin of Continental Margin Morphology: Submarine-Slide or Downslope Current-Controlled Bedforms, a Rock Magnetic Approach. *Marine Geology*, 240(1—4): 19—41. doi: 10.1016/j.margeo.2007.01.012
- Song, C. H., Fang, X. M., Shi, Y. M., et al., 2001. Sedimentary Characteristics of Modern Lacustrine Deltas in Qinghai Lake and Their Controlling Factors. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 37(3): 112—120 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. J., Jiang, J. H., Li, X. G., 2006. Study on Changes of Lake Shoreline Morphology in Daihai Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 15(5): 674—677 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. H., Chen, H. H., Jiang, T., et al., 2012a. Sandbodies Frameworks of Subaqueous Distributary Channel in Shallow-Water Delta, Xinli Area of Songliao Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(3): 556—564 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2012.062
- Wang, J. H., Chen, H. H., Yun, L., et al., 2012b. Tectonic Responses of Triassic Sequence Stratigraphy in the Large-Scale Compressional Down-Warped Lacustrine Basin of Inner Tarim Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(4): 735—742 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2012.082
- Wang, S. M., Feng, M., 1991. The Relationship between Environmental Change and the Southeast Monsoon Changes in Daihai Lake, Inner Mongolia. *Science in China (Ser. B)*, 21(7): 759—768 (in Chinese).
- Wang, Y. H., Zhuang, Z. Y., Li, X. L., 2000. The Calculation of Alongshore Silt Discharge Rates and Evolution Development of Sandspit in the Rongcheng Bay, Shandong Peninsula. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(4): 31—35 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, J. L., Si, B., Zhai, D. Y., et al., 2008. Hydrology of Dali Lake in Central-Eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian Monsoon Variability. *Journal of Paleolimnology*, 40(1): 519—528. doi: 10.1007/s10933-007-9179-x
- Yu, X. H., 2012. Existing Problems and Sedimentogenesis-Based Methods of Reservoir Characterization during the Middle and Later Periods of Oilfield Development. *Earth Science Frontiers*, 19(2): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X. H., Li, S. L., Chen, B. T., et al., 2012. Interaction between Downslope and Alongslope Processes on the Margins of Daihai Lake, North China; Implication for Deltaic Sedimentation Models of Lacustrine Rift Basin. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86(4): 932—948. doi: 10.1111/j.1755-6724.2012.00718.x
- Yu, X. H., Wang, D. F., Zheng, J. M., et al., 1994. 3-D Extension Models of Braided Deltaic Sandbody in Terrestrial Facies—An Observation on Deposition of Modern Deltas in Daihai Lake, Inner Mongolia. *Acta Petrolei Sinica*, 15(1): 26—37 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. M., Liu, Y., Fang, Q., et al., 2012. Formation and Sedimentary Model of Shallow Delta in Large-Scale Lake:

Example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin. *Earth Science Frontiers*, 19(1):89–99(in Chinese with English abstract).

Zou, C. N., Zhao, W. Z., Zhang, X. Y., et al., 2008. Formation and Distribution of Shallow-Water Deltas and Central-Basin Sandbodies in Large Open Depression Lake Basins. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 813–825 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹建廷, 王苏民, 沈吉, 等, 2000. 近千年来内蒙古岱海气候环境演变的湖泊沉积记录. *地理科学*, 20(5): 391–396.

陈彬滔, 杨丽莎, 于兴河, 等, 2012. 准噶尔盆地南缘三工河组 and 西山窑组辫状河三角洲水动力条件与砂体分布规模定量分析. *中国地质*, 39(5): 1290–1298.

陈彬滔, 于兴河, 杨丽莎, 等, 2011. 勘探评价早期阶段沉积微相研究方法探讨——以东濮凹陷前梨园南地区为例. *石油天然气学报*, 33(8): 21–25.

春喜, 陈发虎, 范育新, 等, 2009. 乌兰布和沙漠腹地古湖存在的沙嘴证据及环境意义. *地理学报*, 64(3): 339–348.

李华章, 1979. 岱海湖盆的形成及地貌发育特征. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 24(1): 98–110.

宋春晖, 方小敏, 师永民, 等, 2001. 青海湖现代三角洲沉积特征及形成控制因素. *兰州大学学报(自然科学版)*, 37

(3): 112–120.

王红娟, 姜加虎, 李新国, 2006. 岱海湖泊岸线形态变化研究. *长江流域资源与环境*, 15(5): 674–677.

王家豪, 陈红汉, 江涛, 等, 2012a. 松辽盆地新立地区浅水三角洲水下分流河道砂体结构解剖. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(3): 556–564.

王家豪, 陈红汉, 云露, 等, 2012b. 塔里木盆地台盆区三叠纪大型挤压拗陷湖盆层序地层及构造响应. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(4): 735–742.

王苏民, 冯敏, 1991. 内蒙古岱海湖泊环境变化与东南季风强弱变化的关系. *中国科学(B辑)*, 21(7): 759–768.

王永红, 庄振业, 李学伦, 2000. 山东荣成湾沿岸输沙率及沙嘴的演化动态. *海洋地质与第四纪地质*, 20(4): 31–35.

于兴河, 2012. 油田开发中后期储层面临的问题与基于沉积成因的地质表征方法. *地学前缘*, 19(2): 1–14.

于兴河, 王德发, 郑浚茂, 等, 1994. 辫状河三角洲砂体特征及砂体展布模型——内蒙古岱海湖现代三角洲沉积考察. *石油学报*, 1994, 15(1): 26–37.

朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等, 2012. 大型拗陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式: 以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例. *地学前缘*, 19(1): 89–99.

邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等, 2008. 大型敞流拗陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布. *地质学报*, 82(6): 813–825.