

吴冬, 朱筱敏, 马爱钰, 等. 鄂尔多斯盆地合水—塔尔湾地区长 6~长 10 油层组沉积相研究[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1822-1836.
Wu Dong, Zhu Xiaomin, Ma Aiyu, et al. Sedimentary facies of the Chang6-Chang10 intervals in Heshui-Ta'erwan area, Ordos Basin[J]. Geology in China, 2015, 42(6):1822-1836 (in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地合水—塔尔湾地区长 6~长 10 油层组 沉积相研究

吴 冬^{1,2} 朱筱敏^{1,2} 马爱钰³ 李雨彤^{1,2} 刘自亮⁴ 廖纪佳⁵

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;
3. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059;
5. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要: 沉积砂体成因类型影响了鄂尔多斯盆地合水—塔尔湾地区油气资源勘探, 本文通过野外露头和岩心沉积特征分析, 结合测井、录井资料, 在合水—塔尔湾地区延长组长 6~长 10 油层组识别出曲流河三角洲、辫状河三角洲、湖泊和滑塌扇等沉积类型, 详细分析了不同沉积类型的亚微相特征, 指出重力流沉积体系主要为经典浊积岩和砂质碎屑流。合水—塔尔湾地区长 6~长 10 主要物源来自于西南方向, 为辫状河三角洲沉积体系, 次要物源来自于东北, 发育曲流河三角洲前缘, 中部发育湖泊沉积以及滑塌扇。研究区从长 10 到长 6 经历了湖侵到湖退的过程, 西南物源持续退积, 由辫状河三角洲平原逐渐演化为前缘, 并在前端沉积深水滑塌扇, 东南物源在长 6 及长 8 发育曲流河三角洲前缘。研究表明, 合水—塔尔湾地区长 7 湖相泥岩生烃, 长 8 和长 6 三角洲前缘水道、长 7 和长 6 滑塌扇砂体构成有利勘探目标。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 合水—塔尔湾地区; 延长组; 沉积学; 沉积模式; 重力流沉积

中图分类号: P588.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2015)06-1822-15

Sedimentary facies of the Chang6-Chang10 intervals in Heshui-Ta'erwan area, Ordos Basin

WU Dong^{1,2}, ZHU Xiao-min^{1,2}, MA Ai-yu³, LI Yu-tong^{1,2}, LIU Zi-liang⁴, LIAO Ji-jia⁵

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, Xinjiang, China; 4. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 5. School of Geoscience and Technology, Southwest University of Petroleum, Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: Genetic types of sedimentary sand bodies affect oil and gas exploration in the Heshui-Ta'erwan area of Ordos Basin.

收稿日期: 2014-09-14; 改回日期: 2015-08-18

基金项目: 国家重大油气专项“岩性地层油气藏沉积、储层特征与成藏机理研究”(2008ZX05001-002)资助。

作者简介: 吴冬, 男, 1987年生, 博士生, 地质学专业, 主要从事沉积学和层序地层学等方面的研究; E-mail: lisandpw@163.com。

通讯作者: 朱筱敏, 男, 1960年生, 博士, 教授, 沉积学与储层地质学; E-mail: xmzhu@cup.edu.cn。

Based on outcrop and core characteristics analysis, combined with well logging data, the authors recognized various types of sedimentary facies of the Chang6–Chang10 intervals in the study area, i.e., normal delta, braided delta, lacustrine system and slump fan, and made a detailed discussion on the subfacies. The turbidite and sandy debris flow sediments are the major gravity flow deposition systems. The primary braided delta deposits came from the southwest, the minor normal delta deposits came from the northeast, and the slump fan developed in the middle. The study area experienced transgression and regression during the deposition of Chang6–Chang10 intervals. The southwestern braided delta kept retrograding and slump fan developed in the front in deep water ultimately. The northeastern normal delta deposits are found mainly in the Chang6 and Chang8 intervals. It is revealed that source rocks developed in the Chang7 interval, and both underwater distributary channels in the Chang6 and Chang8 interval and gravity flow sediments in the Chang7 and Chang6 interval are potential exploration targets.

Key words: Ordos Basin; Heshui–Ta'erwan area; Yangchang Formation; sedimentology; depositional model; gravity flow sedimentation

About the first author: WU Dong, male, born in 1987, doctor candidate, mainly engages in the study of sedimentology and sequence stratigraphy; E-mail: lisandpw@163.com.

About the corresponding author: ZHU Xiao-min, male, born in 1960, doctor, professor, engages in the study of sedimentology and reservoir geology; E-mail: xmzhu@cup.edu.cn.

鄂尔多斯盆地位于中国中西部地区,是中国第二大沉积盆地,盆地面积约25万km²。从1907年中国大陆上第一口油井——“延1井”顺利完钻以来,鄂尔多斯盆地的油气勘探工作已走过了107个年头,成为中国最重要的油气勘探开发基地之一。前人对鄂尔多斯盆地开展了系统全面的沉积学研究,尤其在古水流与物源方向、沉积相类型识别和沉积体系时空展布、砂体规模与形成机制及空间分布特征等方面取得了一系列的成果和认识。三叠系延长组沉积期鄂尔多斯盆地主要发育西南和东北2个方向物源,携带大量碎屑物质涌入盆内,形成广泛分布的三角洲砂体,延长组自下而上分为10个油层组,其中下部的长10~长7沉积于湖盆形成阶段,长6~长3沉积于湖盆萎缩阶段,至长1湖盆彻底衰亡。本文研究目的层段为长6~长10油层组,总体为湖泊持续扩张阶段,其中长7油层组沉积时湖水面积最大,湖平面相对最高^[1-5]。

合水—塔尔湾地区位于鄂尔多斯盆地西南部陇东地区(图1),面积约1万km²,构造上位于伊陕斜坡西南部,其西侧为天环坳陷,南侧为渭北隆起,构造格局较为稳定平缓^[6-7]。多年来不同学者开展了鄂尔多斯盆地(含本区)沉积相研究^[8-9],但相关研究成果尚不能满足研究区尺度勘探开发实践需要,近年来,随着鄂尔多斯盆地西峰、华池、姬塬地区相继发现了亿吨级大油田,合水—塔尔湾地区引起了人们的高度重视。与鄂尔多斯盆地其他地区相比,

合水—塔尔湾地区延长组烃源岩厚度较大^[10],是近期油气评价优选的有利区块,对其进行重点区和重点层段沉积学研究,将有利于提升对合水—塔尔湾地区的地质认识,丰富鄂尔多斯盆地石油勘探理论与成果,为石油勘探实践提供理论指导和支持。本文通过对延河野外露头观察以及21口单井累计1020 m岩心观察和描述,根据测井曲线形态特征,建立较为完善的岩电关系,实现全井段沉积相划分之目的,结合前人大区研究基础,精细刻画合水—塔尔湾地区沉积微相,完成长6~长9油层组沉积微相分布图,最终建立研究区沉积微相分布模式,总结砂体发育和分布规律。

1 沉积物源分析

通过碎屑组分特征、重矿物特征和野外露头剖面古流向等判别古物源是比较常见的方法^[11-14]。吴小斌等^[12]通过陇东地区长3油层组碎屑成分中碳酸盐岩岩屑含量的规律性变化确定了陇东地区存在来自西南方向的物源;罗静兰等^[13]通过地球化学手段研究了西峰地区长6和长8油层组的古水流方向和物源,认为鄂尔多斯盆地西南部长8和长6主要接受来自西南方向的物源供给,南部和东南部也有贡献,长6油层组沉积期东北方向还存在次级物源供给,在合水—塔尔湾地区,应存在多物源混合现象;刘锦等^[14]在分析黄陵地区长6浊积岩物源时根据重矿物组合特征指出泾川—合水地区发育西南

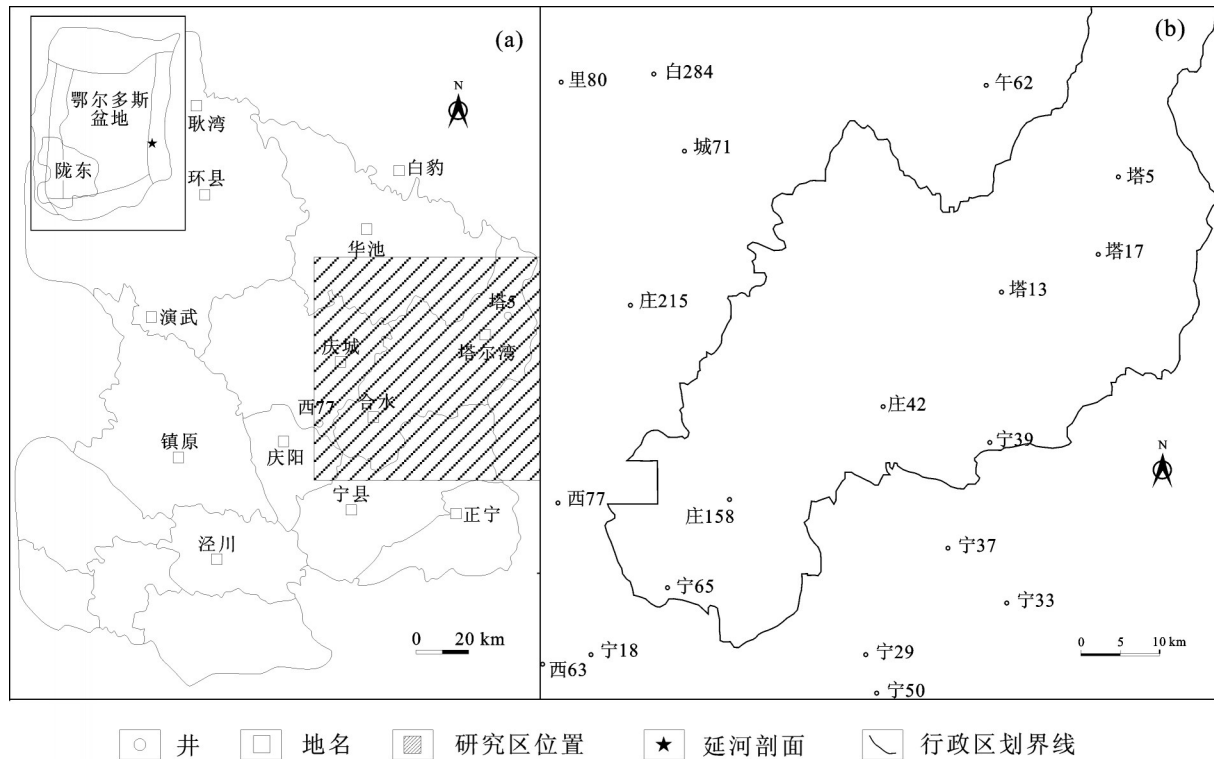


图1 研究区位置与关键井位分布

a—陇东和研究区位置;b—研究区关键井分布

Fig.1 Location of the study area, showing distribution of key wells

a—Location of the Longdong area and the study area; b—Key wells in the study area

—东北向物源,环县地区发育自西往东物源,宁县—正宁地区发育南部物源。

对于陆相盆地,其碎屑岩沉积物源分析主要包含2个方面:物源区位置和物源方向,以及物源区母岩的岩性和岩相组合。不同的母岩形成不同的供源,主要在沉积碎屑岩性和岩相组合上反映出来。本文通过研究延长组岩屑类型和分布特征,认为鄂尔多斯盆地合水—塔尔湾地区主力含油层系延长组砂体物源主要来自西南和东北部2个方向,西部和南部也存在少量物源,但对研究区影响不是很大,其中塔尔湾大部分地区位于混合物源区,表现为各井岩屑类型和含量差别较大的混源特点。另外,东北部地区长石含量较高、沉积岩岩屑含量相对较少,云母含量明显比其他地方高,而从西南物源较高的石英含量和高变质岩岩屑含量来看,两大主物源区母岩性质是有本质差别的。虽然西部地区物源不是主要物源,但其具有岩屑含量高、白云岩组分所占比重较大等特点,因此可以认定西部地区

也存在次要物源。南部地区和西南部地区的物源稍有差别,表现为火成岩中的隐晶岩含量较高(次级物源,图2-a)。由于盆地继承性发育,研究区现今的物源依然来自于西部、西南部和南部,是对古物源分析的良好印证(图2-b)。

2 古沉积环境分析

沉积构造是古环境最为敏感的沉积标志。研究区常见的沉积构造有流动成因的波痕和层理,也有同生变形形成的雨痕和包卷层理以及生物成因的痕迹。“峰尖谷圆”的对称波痕往往发育于湖泊浅水区,指示动荡水动力条件(图3-a);包卷层理是一种变形构造,多见于软薄层粗粉砂或细粉砂中,指示着沉积物的液化作用,常出现在浊流之中,也可形成于波浪震荡环境^[5](图3-b);铁质结核可能与生物有关,菱铁矿结核多形成于湖泊下部封闭还原环境,褐铁矿结核则形成于湖泊上部氧化环境中^[6](图3-c);河流环境中常发育板状交错层理和槽状

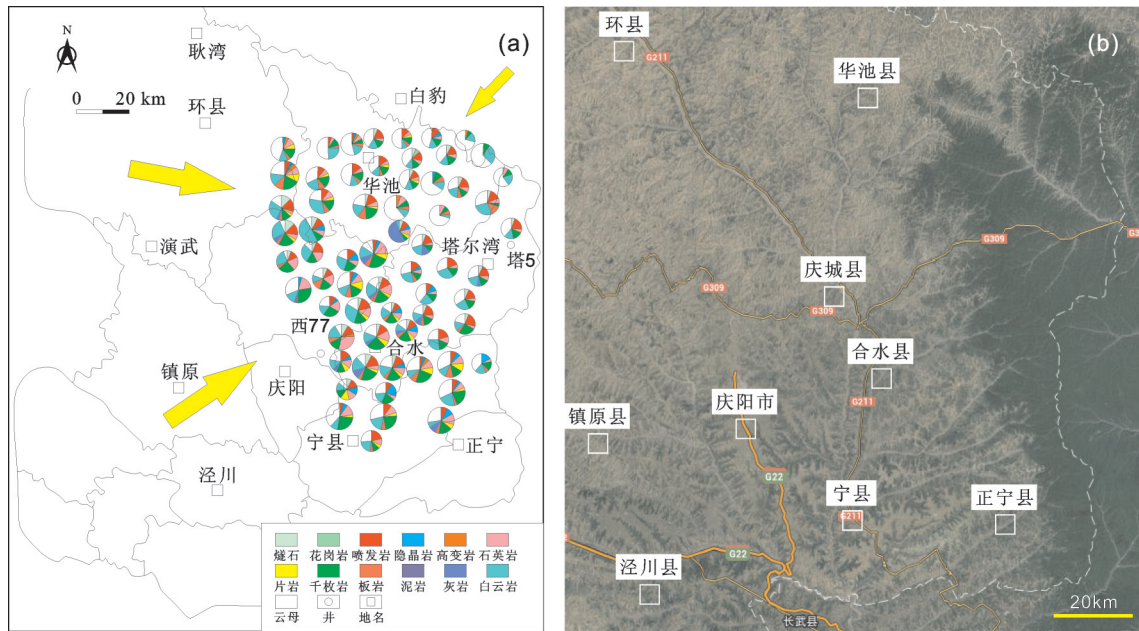


图2 鄂尔多斯盆地合水—塔尔湾地区物源分布

a—长6油层组岩屑和物源特征;b—研究区现今沉积面貌(据 Google Earth, 2014)

Fig. 2 Source direction analysis of Heshui-Ta'erwan area in Ordos Basin

a—Characteristics of rock debris and provenances of the Chang6 interval; b—Present geomorphology in the study area(after Google Earth, 2014)

交错层理(图3-g、h),指示了较强的水体能量,后者还和间歇性复合水流有关^[17];平行层理反映的水动力较强,一般出现在河流或湖岸环境中(图3-d),爬升波纹交错层理通常出现在河流边滩上部及堤岸(图3-e)。

几乎所有古生物的生存和分布都受到古环境的影响或控制,如水深、水温或者水体矿化度等,安静的沉积环境还有利于古生物遗迹和实体化石的保存,因而化石常作为判别古沉积环境的标志。长6~长9油层组沉积时,湖盆内部和周缘动植物极其繁盛,形成化石在沉积岩中保存下来。在湖盆四周的三角洲沉积中,多可见植物化石,平原沼泽相安静还原环境有利于植物枝叶保存,而前缘相中由于水流和波浪的淘洗,化石大多破碎,分布杂乱;滨浅湖中多见底栖生物螺化石和浮游生物介形虫,植物碎片较多,虫孔呈垂直状;在长6和长7油层组沉积时合水—塔尔湾地区发育半深湖,岩层中可见浮游生物化石,虫孔多水平;长6和长7浊流沉积中化石种类复杂,常见生物碎屑(表1)。

露头 and 岩心观察的沉积构造类型,以及古生物特征均指示了研究区长6~长10的沉积环境,即水道

沉积作用较为强烈、同时湖泊相对发育。河流或三角洲水道十分发育是本区重要沉积特点。

3 沉积相类型及特征

鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组沉积期,湖盆底形呈西陡东缓的箕状特点,在东北和西南发育两大三角洲沉积体系,湖盆中央发育浊积扇^[5-9]。通过对研究区21口井合计1020 m的岩心观察与描述,结合120余口井的测井和录井数据,以及分析化验、野外剖面等资料,对合水—塔尔湾地区延长组长6~长10沉积特征进行深入剖析,识别出4大沉积相类型(辫状河三角洲、曲流河三角洲、湖泊和滑塌扇)以及8种沉积亚相(辫状河三角洲平原和前缘、曲流河三角洲前缘、滨浅湖、半深湖—深湖以及滑塌扇内扇、中扇和外扇)和十余种沉积微相。三叠系延长组沉积时,合水—塔尔湾地区位于整个盆地的西南部,主要受益盆地西南部的辫状河控制,因此,研究区西南大部分地区以辫状河三角洲沉积为主,中部地区位于湖盆中央,主要以深湖—半深湖沉积为主,滑塌扇发育,东北部受远源的曲流河影响,发育曲流河三角洲沉积(图4)。

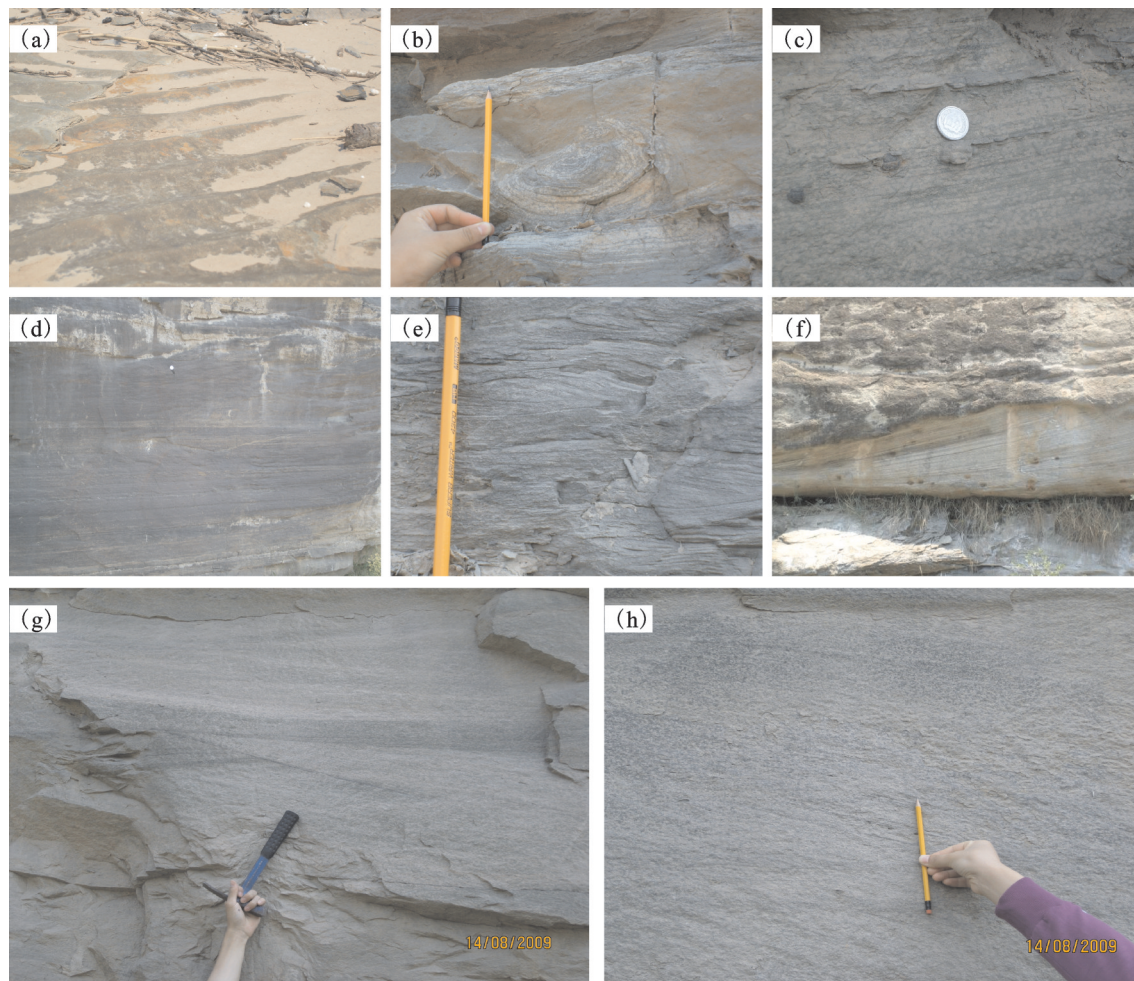


图3 鄂尔多斯盆地延河剖面露头沉积构造特征

a—延长组长7张家滩页岩上浪成对称波痕;b—延长组长7~长6₃包卷层理;c—延长组长8₁平行层理内准同生期铁质结核;
d—延长组长8₂河道砂体,平行层理;e—延长组长8₂下部天然堤沉积,小型爬升层理;f—延长组长6河道砂岩,交错层理;
g—长8₁槽状交错层理;h—延长组长8₁大型板状交错层理

Fig. 3 Sedimentary structures along Yanghe outcrop section in Ordos Basin

a—Symmetrical wave ripple on the Zhangjiatan shale of the Chang 7 interval; b—Convolute bedding in the Chang7—Chang6₃ intervals;
c—Penecontemporaneous iron nodules in the parallel bedding of the Chang8₁ interval; d—Channel sand body and parallel bedding in the Chang8₂
interval; e—Natural levee deposit and miniature climbing bedding in the lower Chang8₂ interval; f—Channel sand body and cross bedding in the
Chang6 interval; g—Trough cross bedding in the Chang8₁ interval; h—Large-scale tabular cross bedding in the Chang8₁ interval

表1 合水—塔儿湾地区常见化石特征及其对应的沉积环境

Table 1 Fossil characteristics and relevant depositional environment in Heshui—Ta'erwan area

实体化石	遗迹化石	沉积相	分布层位
多种植物化石, 以破碎的植物枝干最为常见		三角洲前缘	长6、长8
底栖生物螺化石, 浮游生物介形虫及植物碎片常见	垂直虫孔	滨浅湖	长8
浮游生物为主, 多见介形虫和藻类	水平虫孔	深湖-半深湖	长7
多种动植物化石碎片混杂分布		浊流沉积	长6、长7

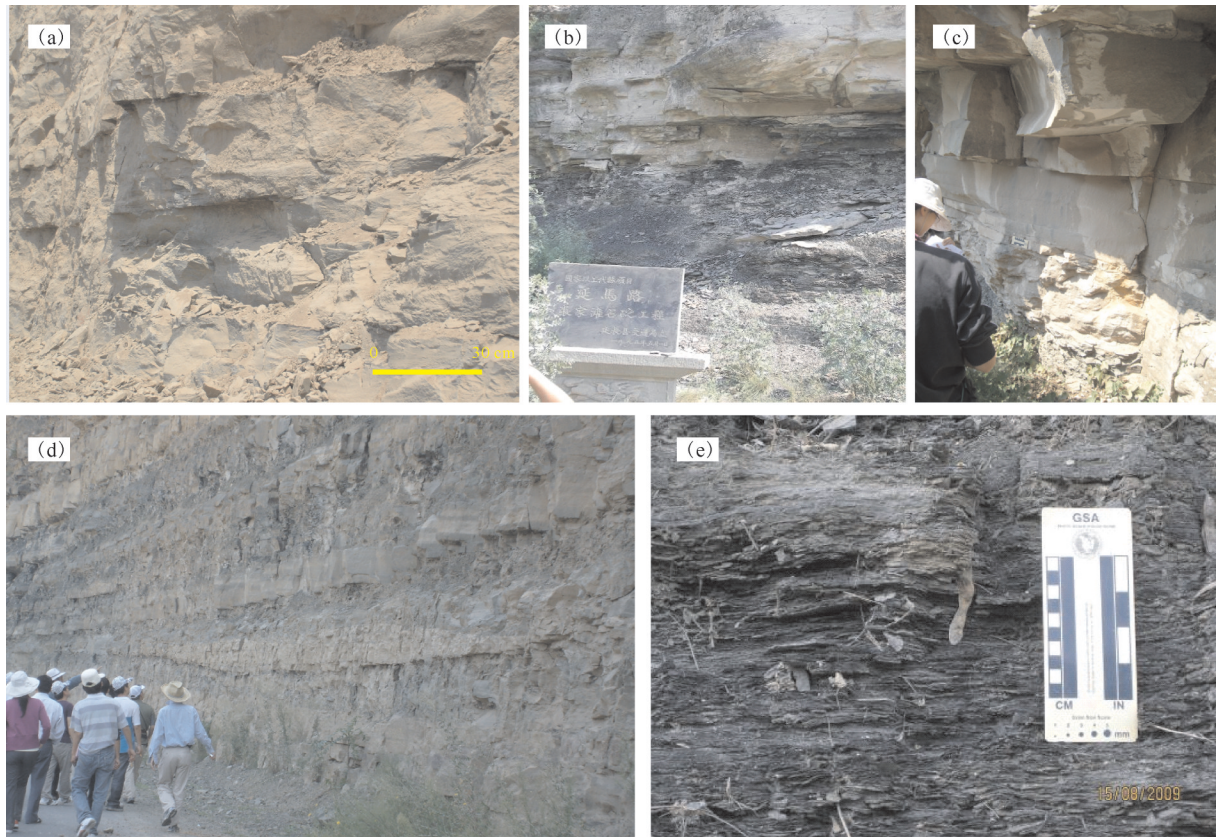


图4 鄂尔多斯盆地延河剖面沉积相特征

a—延长组长6中上部进积型三角洲平原分流河道砂,夹炭质泥岩;b—延长组长7张家滩页岩(深色)和上覆河口坝砂岩(浅色);c—延长组长7河口坝沉积,下细上粗反韵律;d—延长组长8,三角洲平原分流河道砂岩透镜体;e—延长组长7张家滩湖相黑色页岩

Fig. 4 Characteristics of sedimentary facies along Yanghe outcrop section in Ordos Basin

a—Distributary channel sand body and carbonaceous mudstone of the progradation delta plain in the upper Chang6 interval; b—Zhangjiatan shale (dark color) and overlying mouth bar sand body (light color) in the Chang7 interval; c—Mouth bar deposit with reverse rhythm in the Chang7 interval; d—Distributary channel sand lens on the delta plain in the Chang8 interval; e—Zhangjiatan shale in the lacustrine Chang7 interval

3.1 辫状河三角洲相

受印支运动影响,三叠纪盆地西南缘构造活动较强,地形坡降大,加之距物源区近,物源供给充足,研究区延长组西南部以辫状河三角洲沉积体系为主体。早期为辫状河沉积,长9沉积期开始,逐步转为水下环境。辫状河沉积物粒度相对较粗,具有河道宽深比大、河道砂体呈带状、砂岩结构成熟度和矿物成熟度较低等特征^[18]。

3.1.1 辫状河三角洲前缘

合水—塔尔湾地区延长组辫状河三角洲以前缘沉积为主,辫状河三角洲前缘主要由水下分流河道、水下分流河道间、河口坝、远砂坝等微相组成。其具有沉积水动力强,水下分流河道发育的特点,水下分流河道分叉、迁移,冲刷侵蚀远端河口坝,造

成河口砂坝不太发育。

(1) 前缘水下分流河道微相

水下分流河道是三角洲平原分流河道入湖后在水下的延伸部分,为辫状河三角洲前缘骨架。水道充填粒度较粗,以砾岩—细砂岩为主,在垂向上表现为正韵律或复合正韵律,底部见冲刷面。由于水动力较强,水下分流河道多见平行层理(图5-a)、楔状交错层理(图5-b)、板状交错层理和槽状交错层理。在测井曲线上,该微相的自然伽马和自然电位曲线呈箱形或钟形,有时齿化,箱形多代表水道砂体持续发育,钟形反映岩性往上变细,指示水道的迁移和废弃,水下分类河道以及上覆水道间构成了一个完整向上由粗变细的正韵律,韵律厚度可达5 m,有时水道间泥岩被冲刷殆尽,残存正韵律厚度约

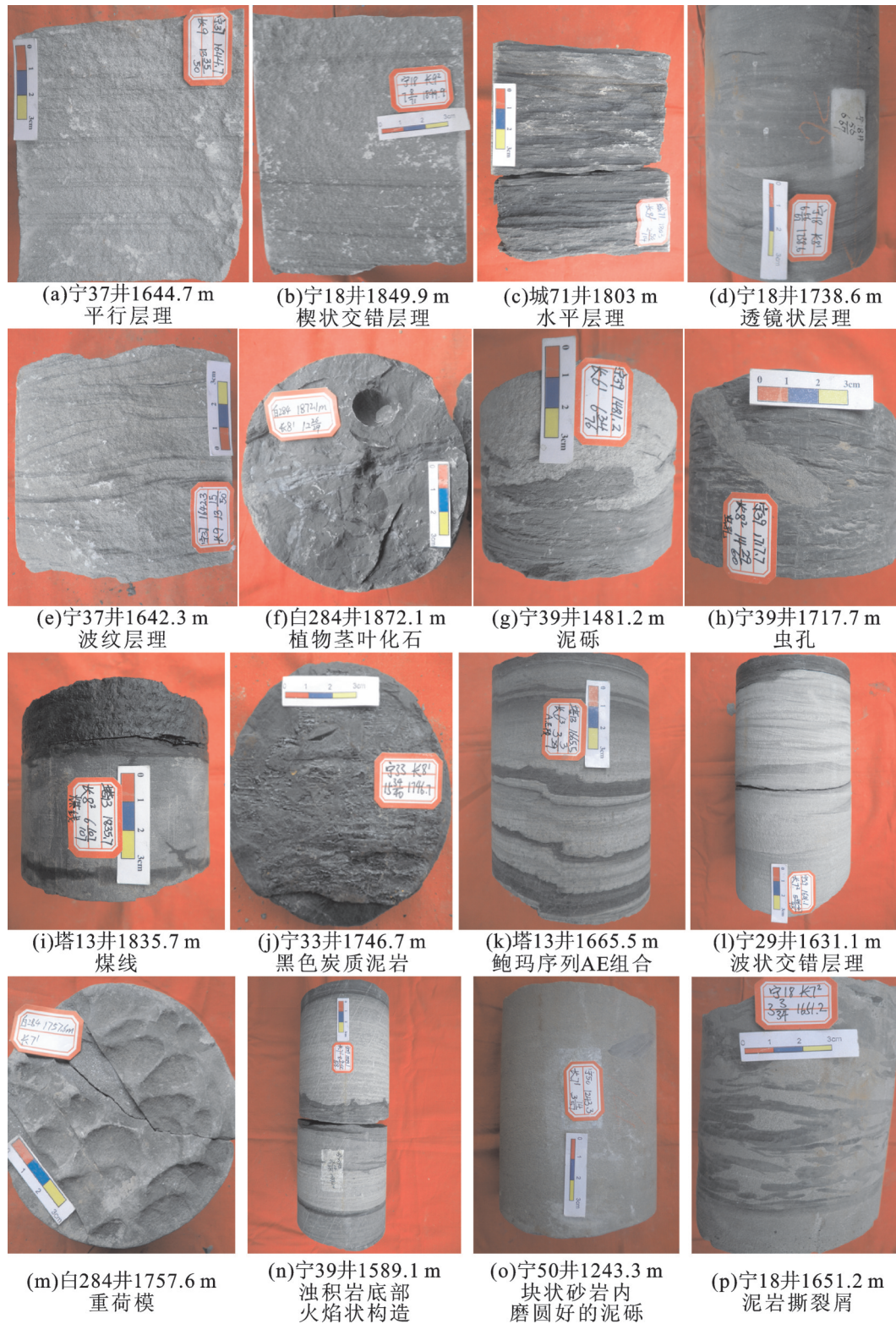


图5 鄂尔多斯盆地合水—塔尔湾地区延长组岩心沉积构造特征
 Fig.5 Sedimentary structures on cores in Heshui-Ta'erwan area, Ordos Basin

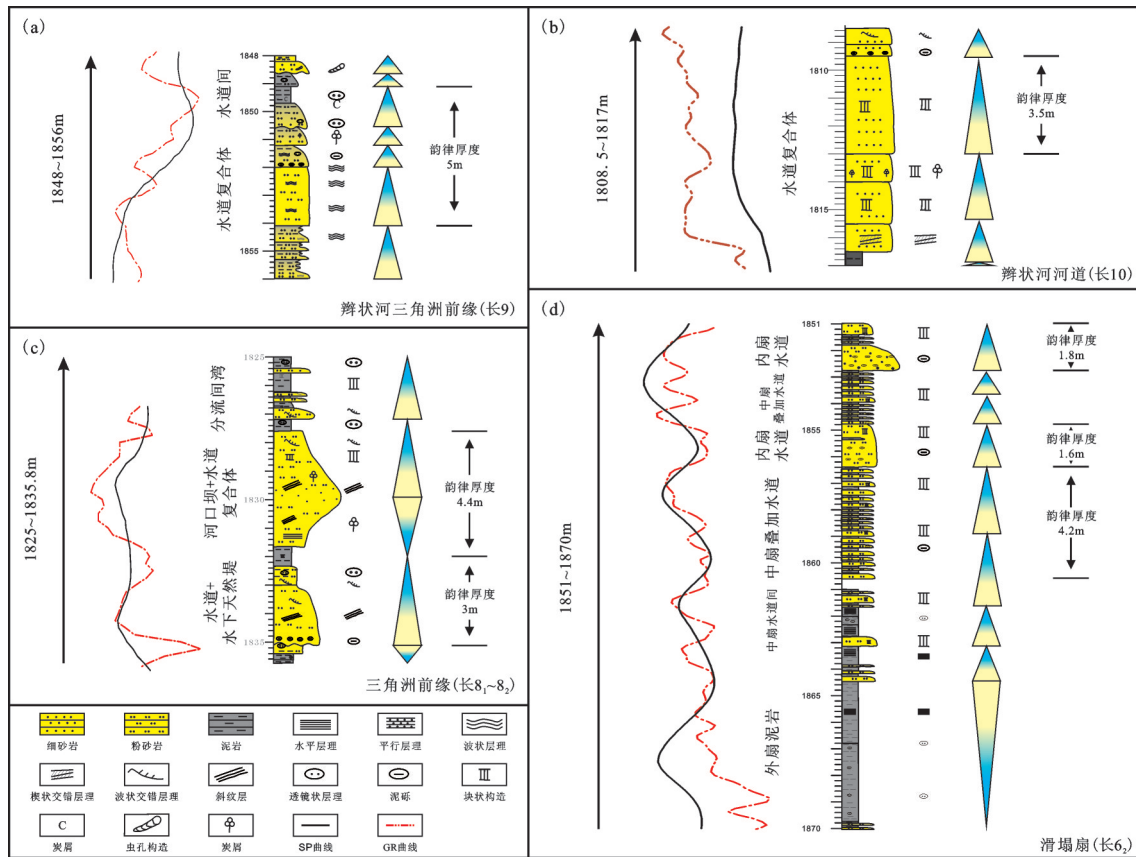


图6 鄂尔多斯盆地合水—塔尔湾地区典型沉积微相序列和组合特征

a—宁65井,长10油层组,辫状河;b—庄215井,长6₂油层组,滑塌扇;c—塔13井,长8₁₋₈油层组,三角洲前缘

Fig.6 Typical sedimentary microfacies characteristics in Heshui-Ta'erwan area, Ordos Basin

a—Braided river deposit in the Chang10 interval on Well Ning 65; b—Slump fan deposit in the Chang6₂ interval on Well Zhuang 215; c—Delta front deposit in the Chang8₁₋₈ intervals on Well Ta 13

为0.3 m,不同正韵律厚度变化较大,反映了研究区辫状河三角洲前缘水下分流河道改道频繁,沉积环境相对复杂(图6-a)。

(2)前缘水下分流河道间微相

水下分流河道间分布于水道之间,沉积水动力较弱,岩性为厚层状灰色或深灰色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和泥岩,形成于较安静的水体,发育水平层理(图5-c)、透镜状层理(图5-d)、波状层理(图5-e)等。泥岩之上多发育波痕和生物成因构造(图5-f),粉砂岩多含黑色纹层,见生物扰动构造。水下分流河道间的自然伽马值较高,齿化,电阻率为低值(图7)。

(3)前缘河口坝微相

河口坝发育于水下分流河道的末端,受多种水流作用形成了上粗下细的反韵律砂体。河口坝岩性以粉砂岩—细砂岩为主,分选较好,泥质含量较

低。多发育平行层理和交错层理,层理规模较小。测井曲线多为漏斗形,也可与上覆水道叠加,形成钟形—漏斗形组合。由于合水—塔尔湾地区辫状河三角洲水下分流河道十分发育,迁移改道会破坏河口坝砂体,甚至冲蚀殆尽。

(4)前缘远砂坝微相

远砂坝或席状砂分布于辫状河三角洲前缘最远端,临近前三角洲泥岩,因为距离物源区较远,远砂坝或席状砂粒度较细,主要为粉砂岩或泥质粉砂岩,厚度较薄,为0.5~2 m,对应频繁互层、低自然伽马和高电阻的指形测井曲线特征,与高自然伽马和低电阻前三角洲泥岩特征完全相反。

3.1.2 辫状河三角洲平原

钻遇长10油层组的井数量有限,揭示了辫状河三角洲平原辫状河河道沉积,以叠加正韵律水道复合体为特征,单一韵律厚度60 cm~3.5 m不等,河道

充填细砂岩,多见泥砾、块状或不明显的楔状层理(图6-b),彼时沉积物搬运至合水—塔尔湾地区已经过一段距离,河道充填规模小,岩石颗粒粒度小。

3.2 曲流河三角洲相

与辫状河三角洲相比,曲流河三角洲相对远离物源,水流搬运砂泥距离较远,沉积物粒度较细,分选、磨圆较好。研究区曲流河三角洲具有“远源流长”的特点,物源来自盆地东北部大青山地区^[19],主要为曲流河三角洲前缘沉积。

(1) 水下分流河道微相

三角洲水下分流河道携带的沉积物粒度较细,主要为浅灰色、灰色细砂岩和中砂岩。单个水下分流河道砂体厚度数米至10 m,下粗上细正韵律特征明显,多个水道叠置使得砂体增厚,泥岩厚度较薄,顶部多被冲刷,可见泥砾(图5-g)。常发育交错层理(图3-f),在垂直剖面上呈透镜状,向两侧变细。测井曲线上,水下分流河道为钟形或箱形,有时齿化严重(图6-c,图7)。曲流河三角洲前缘水下分流河道往往保存完整,呈正韵律或与河口坝组成复合韵律,厚度3~5 m(图6-c)。

(2) 水下分流河道间微相

水下分流河道间水动力较弱,以黏土沉积为主,含少量粉砂和细砂,呈透镜状分布。泥岩可见水平层理,也发育浪成波痕和生物扰动构造(图5-h),向上变为富含有机质的沼泽沉积(图5-i)。

(3) 河口坝微相

合水—塔尔湾东北部地区离母岩区较远,在三角洲前缘远端可见河口坝沉积。河口坝岩性为粉砂岩—中砂岩,下细上粗(图4-c),分选较好,具斜层理和平行层理,亦可见浪成波痕。测井曲线上,河口坝多为漏斗形(图6-c)。

(4) 远砂坝和席状砂微相

远砂坝位于河口坝前方较远部位,粉砂为主,可见炭质纹层,席状砂是远砂坝和河口坝遭受波浪淘洗侧向迁移形成的产物,质纯,粒细,较薄(图7)。

3.3 湖泊相

延长组沉积时,鄂尔多斯盆地为一大型坳陷湖盆,其具有面积大、水域广、地形平坦、水体浅的特征^[5],湖盆从发育开始到延长组长7油层组沉积时达到鼎盛,面积超过 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,至白垩纪盆地沉积范围明显减小。合水—塔尔湾地区湖泊相可分为滨

浅湖亚相和半深湖—深湖亚相。滨浅湖亚相位于浪基面和洪水面之间,半深湖—深湖亚相则位于浪基面之下,受波浪影响较小,为安静、缺氧环境。

滨浅湖亚相沉积物受波浪和湖流作用影响,岩性以泥岩、粉砂岩为主,灰色或灰绿色,指示弱氧化—弱还原环境。常见水平、波状层理,可见生物化石。滩坝微相以粉砂岩为主,下细上粗反韵律。测井响应多为指形,自然伽马值较高,电阻率值较低(图7)。

半深湖—深湖主要沉积灰黑色或深灰色泥岩,富含有机质(图5-j),水平层理为主,可见黄铁矿。测井曲线多为弱起伏平直状,齿化特征较弱,反映岩性较纯。

3.4 重力流

鄂尔多斯盆地发育多种类型的重力流沉积^[4,9,20],合水—塔尔湾地区以经典浊积岩和砂质碎屑流沉积物为主。重力流开始大规模发育是在长7油层组沉积阶段,由于湖平面快速上升,给重力流沉积提供了空间。长6油层组沉积期湖平面开始下降,三角洲延伸较远,重力流发育空间减小。

经典浊积岩是由浊流形成的沉积岩,作为牛顿流体,浊流一旦受力便可运动,外力停止,沉积物便会在自身重力影响下,按大颗粒先沉积在下,小颗粒后沉积在上的顺序形成递变层理^[21]。经典浊积岩粒度较细,发育鲍马序列。研究区长7和长6发育的浊积岩岩性以浅灰色粉砂岩—细砂岩为主,可见波状交错层理、平行层理和水平层理,大多数浊积岩鲍马序列发育不完整,以AB、AE(图5-k)、ABC、CDE(图5-l)等组合最为常见。浊流流态为紊流,常形成各类层面构造(图5-m),火焰状构造亦常见(图5-n,图7)。

砂质碎屑流沉积物包括了厚度大于0.5 m,不显层理的块状砂岩。与经典浊流不同,砂质碎屑流是一种塑性流变、层流态的沉积物流,以整体冻结的方式发生沉积^[22-23]。研究区砂质碎屑流主要为细砂岩或粉砂岩,泥质含量较低,但可富含泥砾。所谓泥砾,是沉积物搬运过程中侵蚀下伏泥岩层,对泥岩破碎再搬运形成的沉积物,磨圆较好的泥砾呈球状(图5-o),磨圆较差的泥砾则呈毛刺状,也可称为泥岩撕裂屑(图5-p,图7),砂质碎屑流的泥岩碎屑粒度远大于围岩粒度,且距底沉积面有一段距离^[23]。另外块状砂岩

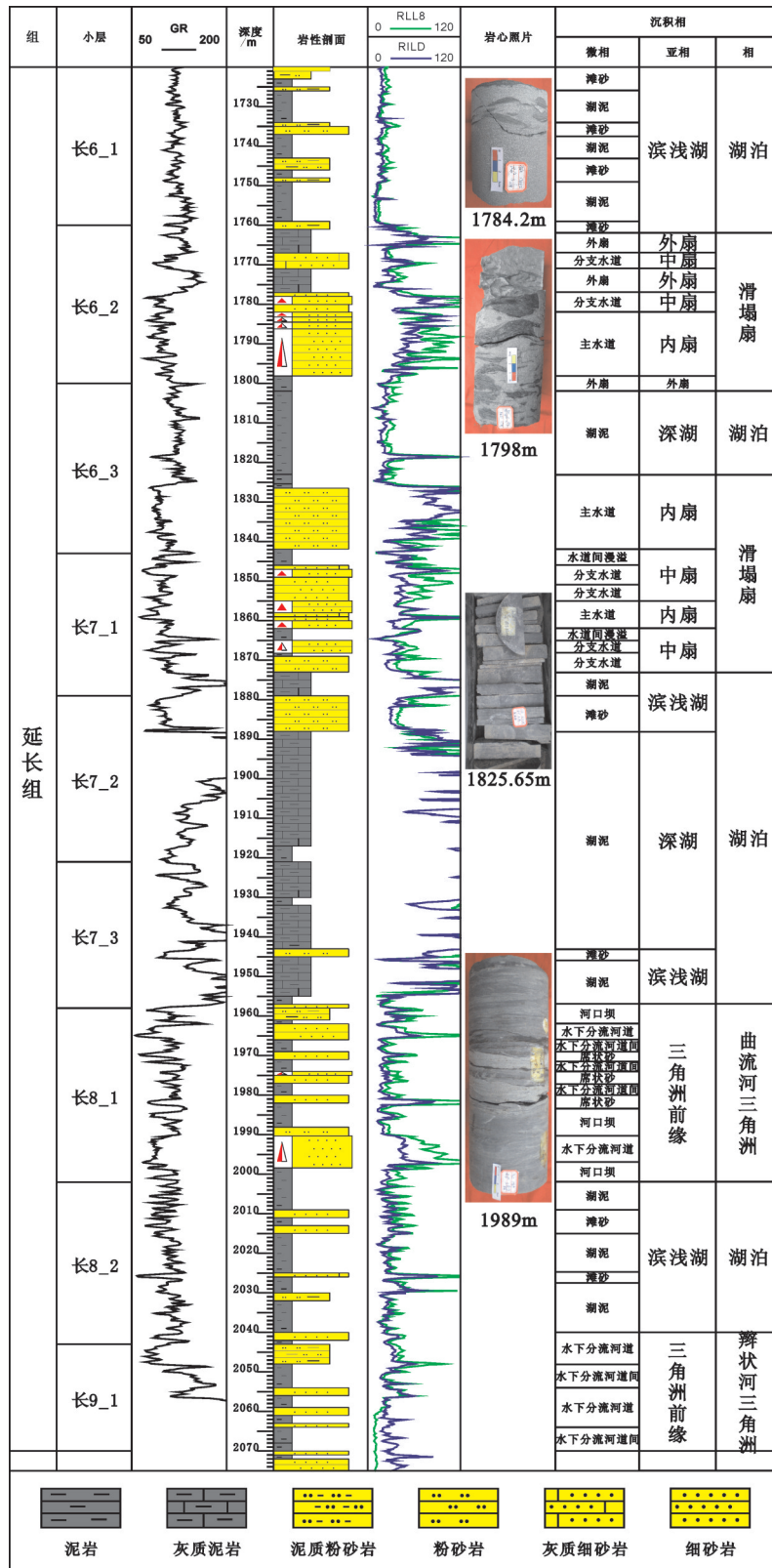


图7 合水—塔尔湾地区延长组午62井沉积相综合分析图
Fig.7 Columnar section of sedimentary facies of target strata in Well Wu 62

是砂质碎屑流岩最主要的岩相^[23]。

上述两类重力流主要为三角洲前缘沉积物大规模滑塌所致,统称为滑塌扇,根据岩相组合和沉积构造特征,进一步分为内扇、中扇和外扇(图6-d,图7)。内扇水道充填物多为大段砂岩,单个正韵律厚度可为1~2 m,中扇发育规模小的分支水道,单个砂泥旋回厚度为0.1~0.3 m,泥上砂下,形成鲍马序列AE组合,十数个和数十个AE组合纵向上叠加可达5 m。外扇主要沉积深水泥页岩,透镜状层理和水平纹层发育(图6-d)。

4 沉积演化和沉积模式

4.1 沉积演化

综上所述,合水—塔尔湾地区延长组长6~长10油层组发育湖相、辫状河三角洲、曲流河三角洲和重力流沉积。辫状河三角洲前缘和曲流河三角洲前缘水下分流河道较为发育,河口坝相对较少,与重力流沉积构成了研究区主要砂体成因类型。研究区构造活动较弱,砂体的发育和分布主要受控于沉积相的演化。

鄂尔多斯盆地延长组自下而上划分为10个油层组,下部长10油层组形成于湖盆初始形成阶段,湖平面较低,至长9沉积期,湖平面快速扩张,可容空间迅速增长,长8沉积期湖平面出现小幅度的下降,砂体粒度和规模均略有增大,长7油层组沉积于鄂尔多斯盆地晚三叠世最大湖泛期,形成了一套烃源岩层,长7沉积期之后,湖平面持续稳步下降,至长1油层组沉积时期,湖盆消亡。

本次研究的目的是长6~长10油层组。整个鄂尔多斯盆地长10油层组沉积期湖区主要分布于定边—华池—富县—安塞—靖边所圈定的范围内,面积约 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (约为长7湖泊面积的1/5),湖中心沉积暗色泥岩,厚度100~120 m,周缘发育辫状河三角洲,以平原为主,辫状水道较为发育,岩性以砾岩—中砂岩为主,合水地区西63井、宁18井和宁65井均钻遇大套砂砾岩(50~60 m)。

进入长9沉积期,盆地快速沉降,发育初始湖泛,研究区全部被湖水淹没,长10时期沉积的辫状河三角洲平原后退至研究区以外,在合水—塔尔湾地区主要发育辫状河三角洲前缘亚相,水下分流河道自西南往东北延伸(图8-a),厚度分布相对稳定,

大多为10~20 m。

长8时期,湖平面短期小幅度下降,研究区西南部的辫状河三角洲前缘砂体发育,延伸较远,至城35—塔13—宁36—宁29一线,覆盖了近1/2个研究区。同时在研究区东北部可见小范围的曲流河三角洲前缘沉积,主要集中在塔15—宁39一带以及午61和午62井区。长8早期长 8_2 沉积时辫状河三角洲前缘发育,水体较长8晚期长 8_1 略浅。长 8_1 时期,东北部的曲流河三角洲较长 8_2 时期更加发育,在研究区东部延伸范围更广(图8-b)。

长7时期湖盆再次急剧下沉,形成了延长组最大湖泛沉积。该时期湖盆范围明显扩大,水体加深,以半深湖—深湖亚相为主,暗色泥岩较为发育,塔13和塔15井区最厚处可达40~70 m,具有较好的生烃条件。该时期各类型三角洲均已退出研究区,区内砂岩多为重力流成因,滑塌扇叠加连片分布,约占研究区总面积的1/2(图8-c)。

长6沉积期,湖盆面积较长7期有所萎缩,西南辫状河三角洲和东北曲流河三角洲进积进入合水—塔尔湾地区,发育前缘亚相。与长8湖平面下降,三角洲进积相比,长6三角洲进积范围较小,尤其是西南部辫状河三角洲前缘分布面积较长8有了大幅度减小,只在宁65和宁48井区发育,面积不到研究区总面积的15%。研究区中部充足的可容空间给重力流搬运和堆积提供了条件,滑塌扇发育面积约占研究区总面积的30%~40%,这是长6与不发育重力流的长8在沉积面貌上最大的不同(图8-d)。长 6_3 、长 6_2 和长 6_1 三个小层中,长 6_3 砂体厚度最大,三角洲和滑塌扇分布范围最广,往上砂体厚度减薄,湖泊面积增大。

合水—塔尔湾地区长10~长6沉积体系的演化,在纵向上形成了一套有利的生、储组合,即长7半深湖—深湖优质烃源岩生烃,长8辫状河三角洲前缘水下分流河道砂体和长6重力流滑塌扇砂体构成储层。

4.2 沉积模式

研究表明,合水—塔尔湾地区近源粗粒的辫状河三角洲沉积体系主要发育于坡度较陡的西南方向,而远源细粒的曲流河三角洲沉积体系则主要发育于东北方向,两大沉积体系在研究区中部交汇,随着湖平面的升降发生退积—进积过程,重力流形成于湖盆剧烈拗陷的长7期以及初始萎缩的长6期(表2,图9)。

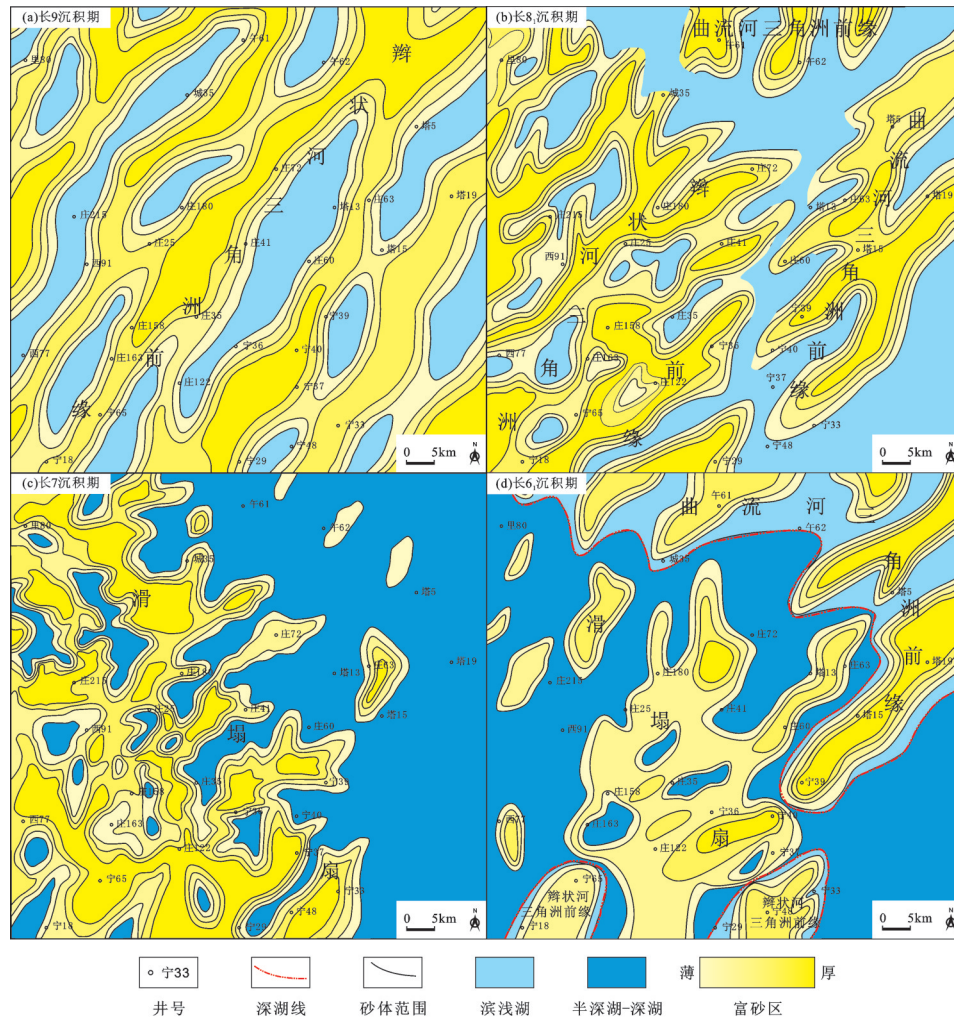


图8 鄂尔多斯盆地合水—塔尔湾地区沉积体系时空分布
Fig.8 Distribution of sedimentary system of Heshui—Ta'erwan area in Ordos Basin

合水—塔尔湾地区长10油层组发育陆上辫状河三角洲平原,水下部分较少发育;长9油层组发育水下辫状河三角洲前缘,不发育重力流;长8油层组发育辫状河三角洲前缘和曲流河三角洲前缘,不发育重力流;长7油层组发育重力流,三角洲不太发育;长6油层组发育曲流河三角洲前缘和重力流,辫状河三角洲前缘较少发育(表2)。总体来看研究区目的层段内湖平面逐步上升,后期略有下降,从滨浅湖过渡到半深湖—深湖沉积,辫状河三角洲发育最早,其次是重力流沉积,曲流河三角洲发育时间最晚,研究区砂体成因类型有由西南往东北迁移的趋势。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地合水—塔尔湾地区砂体物源

主要来自西南和东北部,西部和南部也存在少量物源,但影响范围不大。西南方向物源更靠近母岩区,东北方向物源则相对远离母岩区,沉积物搬运距离较长。

(2)合水—塔尔湾地区延长组长6~长10油层组沉积体系类型主要有湖泊、辫状河三角洲和曲流河三角洲沉积体系。辫状河三角洲前缘多出现在研究区西南部,曲流河三角洲前缘多出现在东北部,重力流多出现在研究区中央。

(3)合水—塔尔湾地区长10油层组以辫状河三角洲平原沉积为主;长9油层组以辫状河三角洲前缘沉积为主;长8油层组西南发育辫状河三角洲前缘,东北发育曲流河三角洲前缘,重力流砂体不发育;长7油层组主要发育重力流沉积和湖相烃源岩;

表2 合水—塔尔湾地区不同层位沉积亚相发育情况
Table 2 Sedimentary subfacies in different intervals of Heshui—Ta'erwan area

	辫状河三角洲平原	辫状河三角洲前缘	重力流	曲流河三角洲前缘	滨浅湖	半深湖—深湖
长6	—	√	○	○	√	○
长7	—	—	○	—	—	○
长8	—	○	—	√	√	—
长9	—	○	—	—	√	—
长10	○	—	—	—	√	—

注：“○”代表十分发育；“√”代表较少发育；“—”代表不发育。

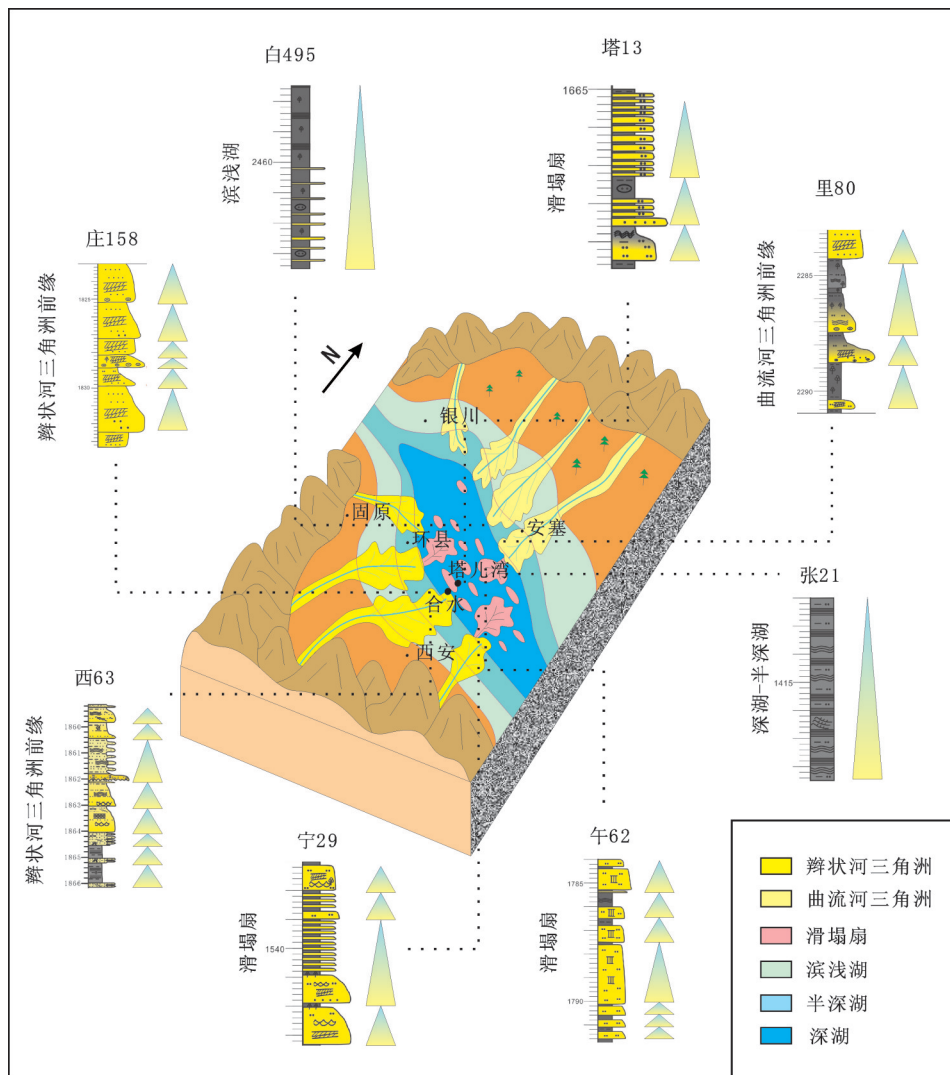


图9 鄂尔多斯盆地及合水—塔尔湾地区延长组沉积模式
Fig. 9 Depositional model for Yanchang Formation of Heshui-Ta'erwan area, Ordos Basin

长6西南辫状河三角洲规模较小,以中央重力流和东北曲流河三角洲前缘沉积为主要。辫状河三角洲发育较早、滑塌扇其次,曲流河三角洲发育最晚,

研究区砂体成因类型有由西南往东北迁移的趋势。

致谢:感谢审稿专家和编辑部李亚萍老师提出的宝贵修改意见。

参考文献(References):

- [1] 倪新峰, 陈洪德, 韦东晓. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组层序地层格架与油气勘探[J]. 中国地质, 2007, 34(1): 73-80.
Ni Xinfeng, Chen Hongde, Wei Dongxiao. Sequence stratigraphic framework of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos basin and petroleum exploration[J]. Geology in China, 2007, 34(1): 73-80 (in Chinese with English abstract).
- [2] 付金华, 李士祥, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长9油层组沉积相及其演化[J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 269-284.
Fu Jinhua, Li Shixiang, Liu Xianyang, et al. Sedimentary facies and its evolution of the Chang 9 interval of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3): 269-284 (in Chinese with English abstract).
- [3] 杨华, 刘自亮, 朱筱敏, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘上三叠统延长组物源与沉积体系特征[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 10-18.
Yang Hua, Liu Ziliang, Zhu Xiaomin, et al. Provenance and depositional systems of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin, China[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 10-18 (in Chinese with English abstract).
- [4] 付金华, 邓秀芹, 张晓磊, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组深水砂岩与致密油的关系[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 624-634.
Fu Jinhua, Deng Xiuqin, Zhang Xiaolei, et al. Relationship between deepwater sandstone and tight oil of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 624-634 (in Chinese with English abstract).
- [5] 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等. 大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 19-28.
Zhu Xiaomin, Deng Xiuqin, Liu Ziliang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: An example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 19-28 (in Chinese with English abstract).
- [6] 陈朝兵, 朱玉双, 张杰, 等. 合水—塔尔湾地区长6沉积相研究[J]. 地下水, 2012, 34(6): 163-165.
Chen Zhaobing, Zhu Yushuang, Zhang Jie, et al. Research on sedimentary facies of Chang 6 oil-bearing formation in Heshui-Taerwan Region[J]. Ground Water, 2012, 34(6): 163-165 (in Chinese with English abstract).
- [7] 高伟, 焦创赞, 屈亚龙, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区合水—塔尔湾长7储层特征及成岩作用研究[J]. 天然气勘探与开发, 2012, 35(4): 22-27.
Gao Wei, Jiao Chuangyan, Qu Yalong, et al. Reservoir characteristics and diagenesis of Yanchang 7 Member in Heshui-Taerwan, east Gansu Province in Erdos Basin[J]. Nature Gas Exploration and Development, 2012, 35(4): 22-27 (in Chinese with English abstract).
- [8] 付金华, 高振中, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地环县地区上三叠统延长组长6砂层组沉积微相特征及新认识[J]. 古地理学报, 2012, 14(6): 695-706.
Fu Jinhua, Gao Zhenzhong, Niu Xiaobing, et al. Sedimentary microfacies characteristics and new understandings of the Upper Triassic Yanchang Formation Chang 6_s interval in Huanxian area in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(6): 695-706 (in Chinese with English abstract).
- [9] 廖纪佳, 朱筱敏, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组重力流沉积特征及其模式[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 30-39.
Liao Jijia, Zhu Xiaomin, Deng Xiuqing, et al. Sedimentary characteristics and model of gravity flow in Triassic Yanchang Formation of Longdong area in Ordos basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 30-39 (in Chinese with English abstract).
- [10] 白云来, 马龙, 吴武军, 等. 鄂尔多斯盆地油页岩的主要地质特征及资源潜力[J]. 中国地质, 2009, 36(5): 1123-1137.
Bai Yunlai, Ma Long, Wu Wujun, et al. Geological characteristics and resource potential of oil shale in Ordos basin[J]. Geology in China, 2009, 36(5): 1123-1137 (in Chinese with English abstract).
- [11] 林进, 李云, 何剑. 鄂尔多斯延长探区本溪组物源及沉积体系分析[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1542-1551.
Lin Jin, Li Yun, He Jian. An analysis of the source and the sedimentary system of the Carboniferous Benxi Formation in Yanchang area of Ordos Basin[J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1542-1551 (in Chinese with English abstract).
- [12] 吴小斌, 孙卫, 王进军. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组的物源分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2008, 28(4): 57-61.
Wu Xiaobin, Sun Wei, Wang Jinjun. Provenance analysis of the Yanchang Formation in eastern Gansu, Ordos Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2008, 28(4): 57-61 (in Chinese with English abstract).
- [13] 罗静兰, 史成恩, 李博, 等. 鄂尔多斯盆地周缘及西峰地区延长组长8、长6沉积物源——来自岩石地球化学的证据[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(增刊): 62-67.
Luo Jinglan, Shi Chengen, Li Bo, et al. Sediment source of Chang 6 and Chang 8 section of Yanchang Formation in the Ordos basin and Xifeng region: Evidence of petrological and geochemical[J]. Science in China(series D), 2007, 37(supp.): 62-72 (in Chinese).
- [14] 刘锦, 冯娟萍, 李文厚, 等. 鄂尔多斯盆地黄陵地区三叠系延长组长6浊积岩物源分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1464-1471.
Liu Jin, Feng Juanping, Li Wenhui, et al. Provenance of Triassic

- Yanchang Formation Chang 6 turbidite of Huangling area, Ordos basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(4): 1464–1471 (in Chinese with English abstract).
- [15] 钟建华, 侯启军, 钟延秋. 黄河三角洲(泄水)包卷层理的成因研究[J]. *地质论评*, 1999, 4(3): 306–313.
Zhong Jianhua, Hou Qijun, Zhong Yanqiu. Genesis of the (sluicing) convolute bedding in the Yellow River Delta[J]. *Geological Review*, 1999, 4(3): 306–313(in Chinese with English abstract).
- [16] 黄志诚, 刘冠邦. 太湖现代沉积物中铁质结核特征: 对太湖形成机制的探讨[J]. *沉积学报*, 2014, 32(3): 503–509.
Huang Zhicheng, Liu Guanbang. Characteristics of ferruginous concretions in modern sediments of the Taihu Lake: Implications for the origin of Lake Taihu[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(3): 503–509 (in Chinese with English abstract).
- [17] 马锋, 钟建华, 顾家裕, 等. 槽状交错层理几何学特征及其古流指示意义——以柴达木盆地西部阿尔金山前侏罗系为例[J]. *地质学报*, 2009, 83(1): 115–122.
Ma Feng, Zhong Jianhua, Gu Jiayu, et al. Geometric characters and paleocurrent implications of the trough cross stratification: An example of the Altyn Mountain in the Western Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(1): 115–122 (in Chinese with English abstract).
- [18] 付金华, 郭正权, 邓秀芹. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义[J]. *古地理学报*, 2005, 7(1): 34–44.
Fu Jinhua, Guo Zhengquan, Deng Xiuqin. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(1): 34–44 (in Chinese with English abstract).
- [19] 魏斌, 魏红红, 陈全红, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组物源分析[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(4): 447–450.
Wei Bin, Wei Honghong, Chen Quanhong, et al. Sediment provenance analysis of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2003, 33(4): 447–450 (in Chinese with English abstract).
- [20] 杨华, 邓秀芹. 构造事件对鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩沉积的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 513–520.
Yang Hua, Deng Xiuqin. Deposition of Yanchang Formation deep-water sandstone under the control of tectonic events, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 513–520 (in Chinese with English abstract).
- [21] Shanmugam G. Deep-water processes and facies model: A critical perspective[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 285–342.
- [22] Shanmugam G. Ten turbidite myths[J]. *Earth Science Reviews*, 2002, 58(3/4): 311–341.
- [23] Shanmugam G. 深水砂岩新论: 成因、识别、触发机制与储层性质[M]. 张志杰, 杨帆, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2013: 1–352.
Shanmugam G. *New Perspectives on Deep-water Sandstones: Origin, Recognition, Initiation and Reservoir Quality*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012.