

引用格式:吴静仪,王峰,井向辉,等. 2026. 鄂尔多斯盆地西北缘上古生界羊虎沟组—太原组沉积相及沉积演化[J]. 沉积学报, 44(4): 1471-1494.
WU JingYi, WANG Feng, JING XiangHui, et al. 2026. Sedimentary Facies and Sedimentary Evolution of the Upper Paleozoic Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the Northwestern Margin of the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(4): 1471-1494.
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.130 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.130

鄂尔多斯盆地西北缘上古生界羊虎沟组—太原组沉积相及沉积演化

吴静仪¹, 王峰^{1,2}, 井向辉^{1,3}, 王集¹, 肖云霄¹, 徐明慧¹, 张敏¹, 黎乾¹

1. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059
2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059
3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018

摘要 【目的】鄂尔多斯盆地西北缘上古生界羊虎沟组—太原组具有良好的油气勘探远景, 地层发育完整连续且厚度变化大, 沉积相类型多样。明确砂体展布特征、厘清沉积演化规律直接影响油气优选勘探区带的选择。【方法】以鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组为目的层位, 在前人研究基础上, 通过典型野外剖面实测、钻井岩心观察、古流向分析、测井资料及测试资料分析, 对研究区沉积环境及沉积相类型特征、沉积演化及沉积模式进行研究。【结果与结论】研究区整体发育19种岩相类型, 三种沉积体系, 包含4种沉积相类型, 进一步划分出14种沉积微相。研究区羊虎沟组—太原组主要由盆地西北阿拉善古陆以及东北阴山古陆两个物源体系共同供源。Dickinson三角投点图揭示物源区构造背景以再旋回造山带为主; 重矿物组合特征指示盆地西北缘与阿拉善群(Ar_3 - Pt_1)、太古代集宁群(Ar_3)、乌拉山群(Ar_{1-2})具有明显亲源性, ZTR指数体现出不稳定矿物由北向南逐渐减少; 古流向分析也反映出北西—南东以及北东—南西两个方向的物质来源。研究区羊虎沟组—太原组主体为海陆共存阶段, 羊虎沟组沉积期, 在贺兰拗拉槽复活以及南北构造挤压背景下, 海水快速进入, 研究区整体受控于三角洲—碎屑海岸沉积体系, 北部物源供给充足, 致使北部发育潮控三角洲沉积; 南部受潮汐、波浪作用影响, 发育潮坪—障壁岛—淡化潟湖—陆棚沉积。太原组沉积期, 地壳继续下沉, 发生海侵, 该时期盆地成为海域分布最广时期, 沉积环境与羊虎沟组基本相似, 总体表现为潮控三角洲、潮坪、淡化潟湖—障壁岛沉积环境共存, 且北部地区物源供给持续增加, 潮控三角洲范围向南延伸更广。

关键词 鄂尔多斯盆地; 羊虎沟组; 太原组; 沉积相; 物源分析; 沉积环境; 沉积演化

第一作者 吴静仪, 女, 1998年出生, 硕士研究生, 储层沉积学, E-mail: 874785949@qq.com

通信作者 王峰, 男, 副教授, 沉积学及储层地质学, E-mail: wangfeng07@cdut.cn

中图分类号: P618.13 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0550(2026)04-1471-24

0 引言

鄂尔多斯盆地是位于华北克拉通西部的次级构造单元, 属于多旋回叠合沉积盆地, 也是我国重要的能源基地(孙肇才, 1980; 陈洪德等, 2001; 田景春等, 2014; 杨华等, 2016)。研究区位于鄂尔多斯盆地西北部, 上古生界上石炭统—二叠统富含重要的油气储层, 地层发育完整连续, 分布广泛, 沉积环境复杂多样, 不仅是油气勘探潜力区域, 还蕴含巨大含煤地层。

众多专家和学者对于研究区沉积相类型划分以

及沉积环境演化已开展过相关研究, 但仍存在差异性观点, 对该区勘探潜力评价及有利勘探目标的选择造成了影响。晚石炭世羊虎沟组沉积期, 大多数学者认为盆地西北缘发育障壁海岸沉积体系, 自北向南由潮坪向低能淡化潟湖环境转变; 少部分学者认为近源端存在扇三角洲沉积环境(王玉环, 2006; 郭艳琴等, 2020; 朱淑玥等, 2023)。下二叠统太原组沉积期, 海水自东西两侧入侵, 中央古隆起没于水下, 东西海域相通, 盆地西北缘被认为是海侵过程中陆表海碎屑岩沉积, 主体发育障壁海岸沉积体系(卫

平生等,2005;陈全红等,2009;翟咏荷等,2024)。研究区基本认定受控于海陆过渡相沉积体系,但对其分布范围仍有不同看法。羊虎沟组沉积期,郭艳琴等(2020)认为碎屑海岸沉积体系由北部乌达—苏峪口区域延伸至南部中宁—校育川地区,而卫平生等(2005)认为北部乌达—呼鲁斯太地区范围内发育三角洲沉积环境;太原组沉积期,郭英海等(1998)认为研究区整体被潟湖环境所占据,王国茹(2011)则认为研究区存在潮控三角洲沉积体系由北至南延伸至石嘴山—鄂托克旗一带。

基于上述问题,以鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组 11 条露头剖面以及 66 口钻井资料为基础,开展沉积相类型及沉积演化规律方面的研究,深入探讨并精细划分沉积微相类型、明确各时期古沉积环境变化规律,结合古流向分析,进一步厘清砂体及沉积相展布规律,确定沉积环境分布范围,最终建立盆地西北缘羊虎沟组—太原组沉积演化模式,以期为鄂尔多斯盆地西缘油气勘探提供沉积地质依据。

1 区域地质概况

1.1 区域构造背景

鄂尔多斯盆地最早在太古宇—古元古界基底上发育起来。太古宙末期,盆地古陆核正式形成;随后经历吕梁运动(~ 1850 Ma)形成了稳定的结晶基底;直至新元古代中期,盆地构造运动明显,构造变形强烈,盆地周缘洋盆以及东西两侧的晋陕和贺兰两拗拉谷开始闭合,基底演化阶段结束,盆地雏形形成;新元古代—晚古生代,贺兰拗拉槽处于活动阶段,盆地南北两侧最终于寒武纪发育成稳定的被动大陆边缘,盆地内部具有北高南低的古地貌特征;奥陶世晚期起,受加里东运动影响,华北地块整体抬升遭受剥蚀,沉积间断大致持续 150~130 Ma(赵重远,1990;张福礼,2002;沈玉林,2009;陈洪德等,2014)。

自中石炭世起,在阴山造山带向南俯冲、秦岭造山带向北俯冲的作用下,地块北缘及南缘相对仰冲而隆起,盆地进入发展演化的新阶段,西缘贺兰拗拉槽再度拉伸,自晚石炭世前黑山时期起部分地区开始接受沉积,形成了与古特提斯联通的南北向海湾;而东缘形成较晚,于上石炭统本溪组沉积期开始接受沉积(何自新等,2002;Sun *et al.*, 2024)。

晚石炭世羊虎沟期,盆地缓慢沉降,以近南北向“哑铃状”中央古隆起为中心,分割祁连海与华北海,

分区性明显,盆地西部裂陷下沉形成西南开口并与古特提斯洋联通的南北向海湾,东部则与华北克拉通拗陷相连。羊虎沟晚期,兴蒙海槽向南俯冲,古地貌由南隆北倾向北隆南倾转变,东西两侧祁连海与华北海在中央古隆起北部局部连通。早二叠世太原期,海水自东西侵进,致使中央古隆起没于水下,东西联通,沉积范围扩大,形成了统一的广阔海域,但南北向水下古隆起仍然对盆地沉积发挥一定作用(何登发等,2020)。

1.2 研究区位置

鄂尔多斯盆地是我国第二大沉积盆地,隶属于华北板块,地跨陕、甘、宁、内蒙古四省区(刘池洋等,2006)。其西缘处于阿拉善地块、鄂尔多斯地块及北祁连褶皱带结合部位(党犇,2003;Chen *et al.*, 2020;图 1a)。本文研究层位为上石炭统羊虎沟组(自下而上划分为羊三段、羊二段、羊一段)至下二叠统太原组(自下而上划分为太二段、太一段)(图 1b),研究范围北起千里山,南抵校育川—太阳山—卢参 1 井一带,西始内蒙古阿拉善左旗—中宁中卫一线,东抵陕西定边,海拔高程 1 300~1 500 m。构造活动复杂,所涉及构造单元包括天环拗陷中北段、西缘逆冲带北段、银川地堑西北部以及伊盟隆起、陕北斜坡的部分地区(图 1c)。

2 样品采集与数据分析方法

选取 11 条露头剖面以及 66 口钻井资料,以鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组典型钻井(忠 6 井、鄂 33 井、任 14 井、鄂 101 井、韦参 1 井)及重点剖面(呼鲁斯太、乌达、千里山、大石头井沟、沙巴台、下河沿、校育川、苏峪口)碎屑岩作为主要研究对象并涵盖了整个研究区域。

2.1 沉积学分析

为了明确研究区羊虎沟组—太原组沉积相及沉积演化特征,首先进行野外露头剖面实测及岩心观察,并结合镜下薄片微观手段,识别沉积学标志,分析沉积相特征及各时期沉积相分布规律。

选取研究区内典型剖面层理特征明显且倾角较小的砂岩层进行古流向实测,共测量 16 组古水流数据,在室内工作中利用赤平投影方法校正($>10^\circ$),通过 PC99 软件数据处理,最终投点至研究区整体位置图,完成古流向玫瑰花图绘制(刘志飞和 Stewart, 2002),以明确研究区物源方向。

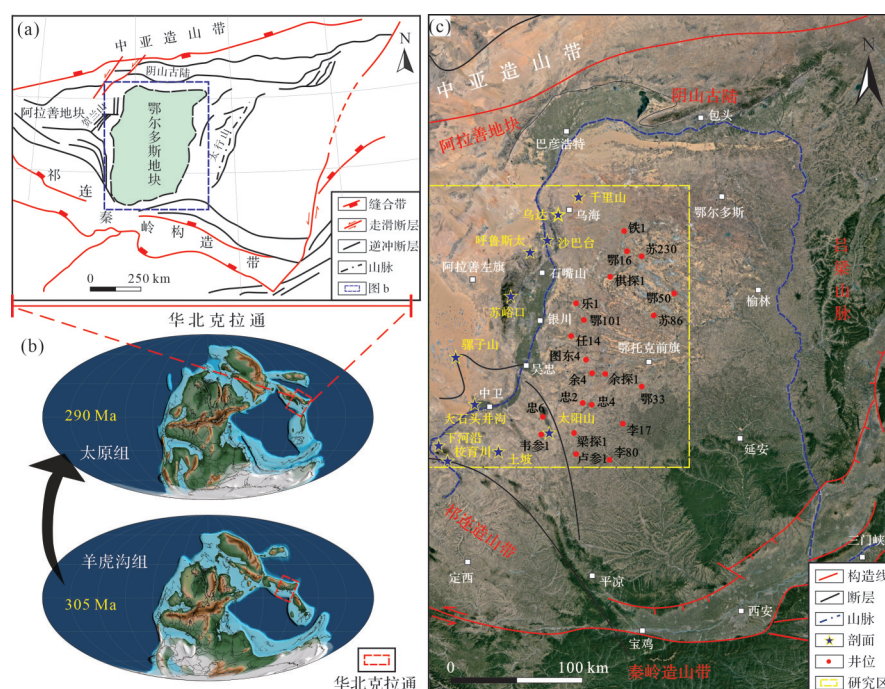


图1 研究区构造位置图

(a) 鄂尔多斯地块及周缘构造格架(上古生界)(据 Chen *et al.*, 2020 修改); (b) 华北克拉通羊虎沟组—太原组位置图(修改自 Scotese, <https://jan.ucc.nau.edu/rcb7/>); (c) 研究区位置图

Fig.1 Structural location map of the study area

(a) tectonic framework of the Ordos Block and its surrounding areas (Upper Paleozoic) (modified from Chen *et al.*, 2020); (b) location map of the Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the North China Craton (modified from Scotese, <https://jan.ucc.nau.edu/rcb7/>); (c) location map of the study area

2.2 重矿物及多碎屑组分

选取研究区羊虎沟组—太原组不同层段 19 块砂岩及 254 块样品分别用于重矿物及碎屑组分分析,挑选工作在油气藏地质及开发工程全国重点实验室完成,将 19 块样品破碎后筛分,利用过氧化氢和稀盐酸处理,按规定含量淘洗后烘干进行重液(CHBr_3)分离,在岩相偏光显微镜下提取重矿物,分析重矿物含量,探讨重矿物组合追踪溯源的可行性。将 254 块样品制作成普通薄片进行镜下鉴定,统计石英、长石和岩屑含量,随后利用 TriPlot 2.0 软件在 Dickinson 碎屑骨架三角投点图(Q-F-L、Qm-F-Lt、Qp-Lv-Ls 以及 Qm-P-K)投值(Dickinson and Gehrels, 2009),最终得出研究区羊虎沟组—太原组物源构造活动信息。

2.3 微量元素、孢粉化石及 TOC

使用近 96 件泥岩样品,采取两种方法获得微量元素数据,一部分来自长城钻探工程有限公司录井公司运用 X 射线元素录井仪(EDX4500H),采用钻时录井方法对忠 6 井进行测试;一部分来自手持元素仪(Niton XL3tXRF)对呼鲁斯太剖面进行的测定,仪器测试口紧贴目标位置保持不动,持续时间 40 s 左右,直至数据出现。

选取典型钻井忠 6 井 14 件孢粉样品,送至中国科学院南京地质古生物研究所,采用实验室孢粉标准分析方法(SY/T 5915—2018),统计样品中主要孢粉种属及含量(%),判别研究区羊虎沟组—太原组沉积期古气候特征。

研究样品采自呼鲁斯太剖面,共采集羊虎沟组样品 18 件,总有机碳(TOC)含量分析在成都谱谱检测技术有限公司完成。流程如下:(1)将样品研碎过 200 目筛,加酸去除碳酸盐等无机碳成分;(2)在 50 °C 的环境下烘干 24 h 后称重;(3)将处理后的样品用美国 LECO 碳/硫分析仪 CS-230 进行总有机碳分析。实验数据最终用于古氧化还原判别。

3 沉积相类型及特征

3.1 岩相类型

岩相类型是组成沉积序列最基本单元,是沉积相的重要组成部分(陈彬滔等, 2013)。对鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组沉积物的颜色、岩性、沉积构造等沉积学标志进行仔细观察,共识别出以下 19 种岩相类型(表 1、图 2)。

表1 鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组岩相类型划分及解释

Table 1 Division and interpretation of lithofacies types from the Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the northwestern margin of the Ordos Basin

岩相类型	代码	岩性和组成	沉积构造	成因解释
含砾砂岩相	Gm	灰白色、灰色 含砾砂岩	块状层理	高能水流条件下形成
槽状交错层理砂岩相	St	灰白色、灰色 粗—细砂岩	槽状交错层理	高能水流条件下形成
板状交错层理砂岩相	Sp	灰白色、灰色 粗—细砂岩	板状交错层理	高能水流条件下形成
平行层理砂岩相	Sh	灰白色、灰色 中—细砂岩	平行层理	高能水流条件下形成
楔状交错层理砂岩相	Sws	灰白色、灰色 中—细砂岩	楔状交错层理	高能水流条件下形成
丘状交错层理砂岩相	Shc	灰白色、灰色 细砂岩	丘状交错层理	高能水流条件下形成
冲洗层理砂岩相	Sl	灰白色、灰色 中—细砂岩	冲洗层理	双向水流下形成
羽状交错层理砂岩相	Sf	灰白色、灰色 中—细砂岩	羽状交错层理	双向水流下形成
浪成砂纹层理砂岩相	Swr	灰白色、灰色 细砂岩	浪成砂纹层理	低流态水流缓慢迁徙形成
脉状层理粉—细砂岩相	Fcf	深灰色 粉—细砂岩	脉状层理	高流速潮汐作用下形成
波状层理泥质粉砂岩相	Fcw	深灰色 泥质粉砂岩	波状复合层理	中等流速潮汐作用下形成
透镜状层理泥岩相	Fcl	灰黑色 泥岩	透镜状层理	低流速潮汐作用下形成
砂纹层理砂岩相	Fr	灰白色、灰色 粉—细砂岩	砂纹层理	低流态水流缓慢迁徙形成
块状层理粉砂质泥岩相	Mfm	深灰色、灰绿色 泥岩—粉砂岩	块状层理	低能环境下形成
碳质泥岩相	Mc	黑色、碳质泥岩	无明显层理	沼泽环境沉积
泥岩相	M	紫红色、黑色、灰黑色泥岩	无明显层理	低能环境下悬浮沉积
水平层理泥岩相	Mh	黑色 灰黑色泥岩	水平层理	低能环境下形成
煤层	C	黑色 煤	无明显层理	植被发育的沼泽地区
灰岩相	Lm	灰黄色 泥灰岩、生屑灰岩	无明显层理	陆棚或碳酸盐岩局部台地

3.2 沉积相类型

对盆地西北缘 11 条野外露头剖面以及 66 口钻井岩心颜色、岩性结构特征、沉积构造以及岩相等沉积学标志进行分析,识别出研究区存在三角洲、碎屑海岸以及浅海 3 种沉积体系,4 种沉积相类型,进一步划分出 14 种沉积微相(表 2)。

3.3 沉积相特征

3.3.1 潮控三角洲

潮控三角洲同时受潮汐、河流和波浪三重作用影响,由于离岸距离远近不同,三种作用影响此消彼长,在不同沉积过程,沉积特征变化明显(曾允孚和夏文杰,1986)。研究区内,可识别出潮控三角洲平原及前缘沉积相。

1) 三角洲平原

潮控三角洲平原分流河道,主要受到河流作用影响,同时存在微弱的潮汐作用(刘英辉等,2022)。岩性以灰白色中砂岩为主,厚度较厚,底部冲刷作用明显,含大量砾石,垂向上具有粒度向上变细、层理规模向上变小的典型正韵律特征,潮汐层理发育微弱,典型岩相类型为含砾砂岩相(Gm,图 3d)、板状交错层理砂岩相(Sp,图 3a)、槽状交错层理砂岩相(St,图 3b)以及平行层理砂岩相(Sh,图 3c),偶见二元结构,向上出现无明显层理泥岩、粉砂岩等细粒沉积物(图 3)。

2) 三角洲前缘

(1) 水下分流河道

潮控三角洲前缘水下分流河道砂体的展布受控于潮汐和河流的相互作用(彭旸等,2023)。岩性以灰白色中—细砂岩为主,厚度相对较薄,具有强水动力条件,通常砂岩底部含冲刷面,自下而上粒度逐渐变细,呈正韵律,碎屑组分以石英、石英岩岩屑为主,分选中等,磨圆为次棱角—次圆(图 2q)。砂岩发育槽状交错层理砂岩相(St,图 4a)以及平行层理砂岩相(Sh,图 4c),受潮汐作用改造明显,同时发育脉状层理砂岩相(Fcf,图 4b)。概率累积曲线中跳跃组分粒度区间大,分选差,粒度较粗,悬浮组分次之,体现出水动力较强的特点(图 2s)。

(2) 水下分流间湾

水下分流间湾微相其岩性主要为灰黑色泥岩、泥质粉砂岩,整体粒度较细;水动力强度较弱,常见水平层理、波状层理,生物扰动构造(图 4b)。自然伽马(GR)曲线主要呈平直—微锯齿状直线型。

(3) 河口坝

河口坝位于水下分流河道的河口处,具有水动力强、沉积速率高的特点,河流入湖时,河水与湖水相互对冲,致使河流携带的部分细粒沉积物被保留下来,形成河口坝砂体(彭旸等,2023)。该沉积物岩

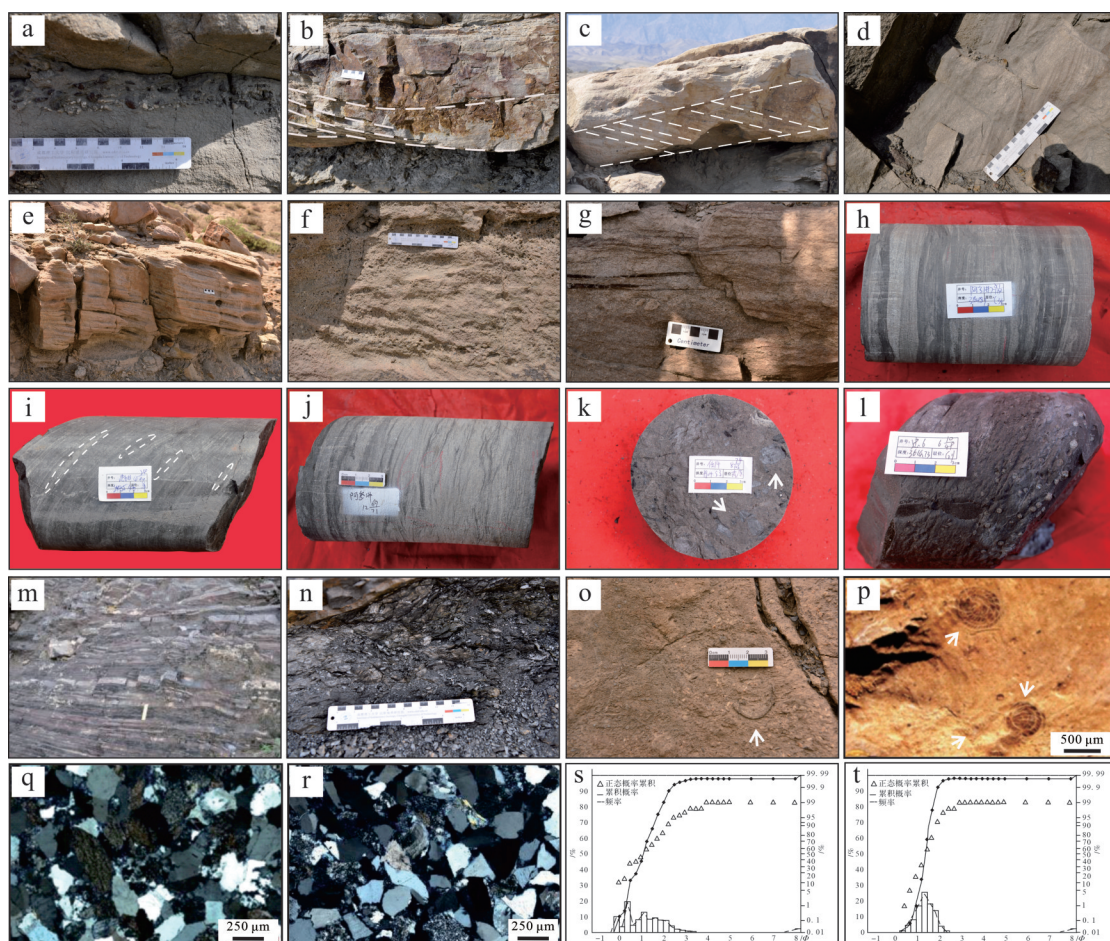


图2 鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组沉积学标志

(a)含砾砂岩相,乌达剖面,羊虎沟组;(b)槽状交错层理砂岩相,沙巴台剖面,羊虎沟组;(c)板状交错层理砂岩相,呼鲁斯太剖面,羊虎沟组;(d)楔状交错层理砂岩相,乌达剖面,羊虎沟组;(e)冲洗层理砂岩相,乌达剖面,羊虎沟组;(f)鱼骨状交错层理砂岩相,呼鲁斯太剖面,羊虎沟组;(g)脉状层理砂岩相,乌达剖面,羊虎沟组;(h)波状层理泥质粉砂岩相,太原组,阿参1井,3 184.87 m;(i)透镜状层理砂岩相,羊虎沟组,忠6井,3 455.46 m;(j)沙纹层理粉砂岩相,太原组,阿参1井,3 347.73 m;(k)碳质泥岩相,太原组,任14井,1 904.53 m;(l)泥岩相,含虫孔,羊虎沟组,忠6井,3 614.73 m;(m)水平层理泥岩相,土坡剖面,太原组;(n)煤层,呼鲁斯太剖面,太原组;(o)块状层理灰岩相,腕足类,呼鲁斯太剖面,太原组;(p)块状层理灰岩相,蜓类,下河延剖面,太原组;(q)中砂岩,沙巴台剖面,羊虎沟组,正交光;(r)中—细砂岩,苏峪口剖面,太原组,正交光;(s)潮控三角洲前缘,呼鲁斯太剖面,羊虎沟组;(t)砂坪,沙巴台剖面,羊虎沟组

Fig.2 Sedimentology marks of the Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the northwestern margin of the Ordos Basin

(a) pebbly sandstone facies, Yanghugou Formation, Wuda outcrop; (b) trough cross-bedded sandstone facies, Yanghugou Formation, Shabatai outcrop; (c) planar cross-bedded sandstone facies, Yanghugou Formation, Hulusitai outcrop; (d) wedge-shaped cross-bedded sandstone facies, Yanghugou Formation, Wuda outcrop; (e) swash-bedded sandstone facies, Yanghugou Formation, Wuda outcrop; (f) herringbone cross-bedded sandstone facies, Yanghugou Formation, Hulusitai outcrop; (g) flaser-bedded sandstone facies, Yanghugou Formation, Wuda outcrop; (h) wavy-bedded argillaceous siltstone facies, Taiyuan Formation, well Acan 1, 3 184.87 m; (i) lenticular-bedded sandstone facies, Yanghugou Formation, well Zhong 6, 3 455.46 m; (j) ripple cross-laminated siltstone facies, Taiyuan Formation, well Acan 1, 3 347.73 m; (k) carbonaceous mudstone facies, Taiyuan Formation, well Ren 14, 1 904.53 m; (l) mudstone facies with burrows, Yanghugou Formation, well Zhong 6, 3 614.73 m; (m) horizontally laminated mudstone facies, Taiyuan Formation, Tupo outcrop; (n) coal seam, Taiyuan Formation, Hulusitai outcrop; (o) massive-bedded limestone facies with brachiopods, Taiyuan Formation, Hulusitai outcrop; (p) massive-bedded limestone facies with fusulinids, Taiyuan Formation, Xiaheyan outcrop; (q) medium sandstone, Yanghugou Formation, Shabatai outcrop, cross-polarized light; (r) medium to fine sandstone, Taiyuan Formation, Suyukou outcrop, cross-polarized light; (s) tide-dominated delta front, Yanghugou Formation, Hulusitai outcrop; (t) sand flat, Yanghugou Formation, Shabatai outcrop

性主要为细—粉砂岩、泥质粉砂岩,质纯,纵向上呈现为下细上粗的逆粒序韵律层,底部为远岸细粒沉积物,上部逐渐转变为近岸粗粒沉积物,发育交错层理、砂纹层理、潮汐层理等沉积构造(图4e)。

3.3.2 潮坪

潮坪环境主体受控于潮汐作用影响,波浪改造

作用次之,发育于平缓倾斜海岸地区(贾进华, 2019)。水动力条件差异大,致使潮坪环境,岩相特征变化频繁,可划分为潮上带、潮间带和潮下带。研究区内,可识别出潮道、潮汐砂坝、砂坪、混合坪以及泥坪微相。该沉积相类型在研究区羊虎沟组以及太原组南部广泛发育。

表2 鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组沉积相划分方案

Table 2 Sedimentary facies division scheme of the Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the northwestern margin of the Ordos Basin

沉积体系	沉积相	亚相	微相	岩相组合	水动力条件	主要分布地区及层位
三角洲	潮控三角洲	三角洲平原	分流河道	Gm-Sp-St-Sh-Fcf	河流作用为主 潮汐影响	研究区北部 羊虎沟组、太原组
			分流间湾	Mfm-M		
		三角洲前缘	水下分流河道	Gm-St-Sh-Fcf		
			水下分流间湾	Fcl-M		
碎屑海岸	潮坪	潮上带	河口坝	Fr-Fcf-St	潮汐作用为主	研究区中部、南部 及北部局部区域 羊虎沟组、太原组
			泥坪 沼泽	Mc-C-Fcl		
		潮间带	混合坪	Fcw-Fcl		
			砂坪	St-Sh-Fcf		
	障壁岛 潟湖	障壁岛	潮汐砂坝	Fcf-Sf-Gm	海洋波浪为主 潮汐作用为主	
			潮道	Gm-Sp-Fcf		
		潟湖	障壁砂坝	Sl-Sh-St-Gm		
			淡化潟湖	Mh-Lm-C		
浅海	陆棚	内陆棚	砂质陆棚	Gm-Sh-She-Swr	海洋作用为主 风暴影响	研究区羊虎沟组 中宁—中卫一带
			泥质陆棚	Mh-Mfm-Lm		

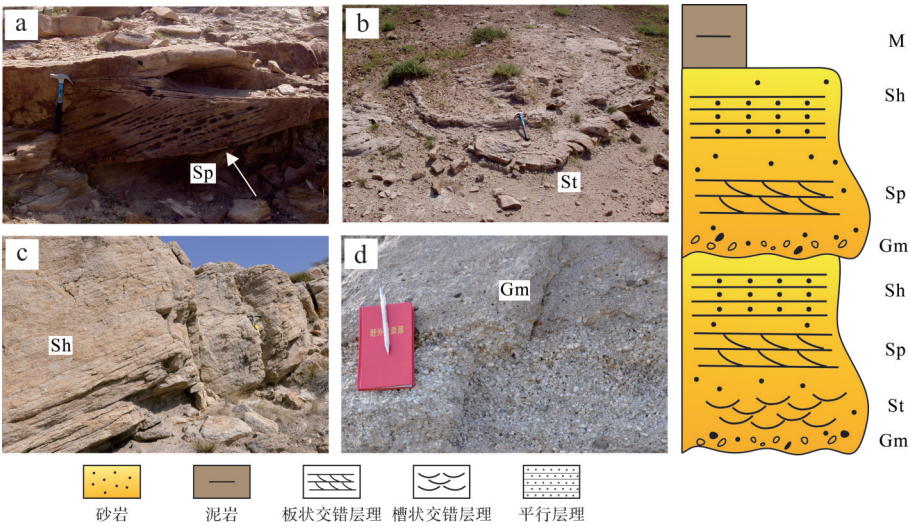


图3 鄂尔多斯盆地西北缘潮控三角洲平原沉积特征

(a)Sp, 千里山剖面, 太二段; (b)St, 千里山剖面, 羊二段; (c)Sh, 沙巴台剖面, 羊二段; (d)Gm, 沙巴台剖面, 太二段

Fig.3 Sedimentary characteristics of tidal-dominated delta plain in the northwestern margin of the Ordos Basin

(a) Sp, Qianlishan outcrop, 2nd member of Taiyuan Formation; (b) St, Qianlishan outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (c) Sh, Shabatai outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (d) Gm, Shabatai outcrop, 2nd member of Taiyuan Formation

1) 潮下带

(1) 潮道

潮道是受潮汐作用和河流作用共同影响的水道沉积。岩性以中—粗砂岩为主,呈正粒序,分选差,磨圆度为次圆—次棱角状;底部具明显冲刷面及定向排列冲刷泥砾(Gm),指示水流方向。发育交错层理中—粗砂岩相(St、Sp)及脉状层理砂岩相(Fcf)。粒度概率累积曲线中跳跃组分占比大,粒度粗,斜率较高,体现出潮道水动力强的特点,垂向上呈向上变细的沉积序列,厚度通常小于2 m。

(2) 潮汐砂坝

潮汐砂坝位于潮下带相互规避的水道之间,岩性以灰白色细砂岩为主,粒度整体向上逐渐变粗,呈逆粒序,砂泥比例逐渐增加。潮汐砂坝特殊的地理位置导致两侧的水道系统分别以涨潮流和退潮流为主,因此在其中上部位置形成双向层理,并且顶部含砾石,出现冲刷面,典型的岩相类型为脉状层理砂岩相(Fcf)羽状交错层理砂岩相(Sf,图5b)以及含砾砂岩相(Gm,图5c)。

(3) 砂坪微相

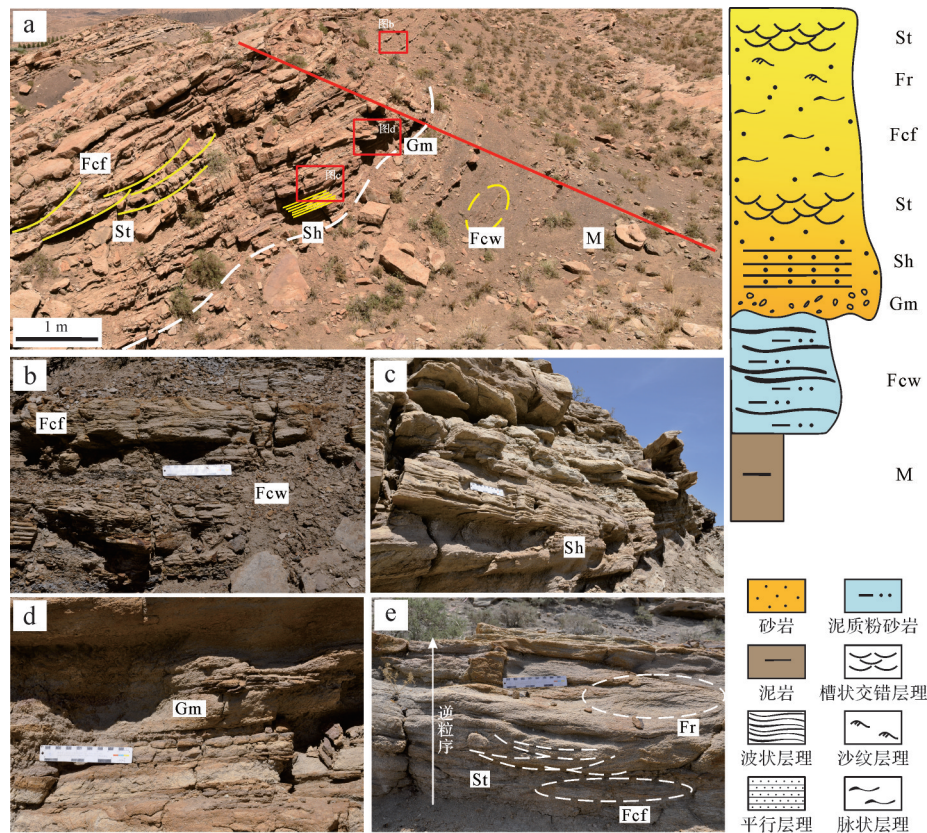


图4 鄂尔多斯盆地西北缘潮控三角洲前缘沉积特征

(a)潮控三角洲前缘沉积,呼鲁斯太剖面,羊三段;(b)Fcf、Fcw,水下分流河道,呼鲁斯太剖面,羊三段;(c)Sh,水下分流河道,呼鲁斯太剖面,羊三段;(d)Gm,水下分流河道,呼鲁斯太剖面,羊三段;(e)Fr、St、脉状层理砂岩相,见逆粒序构造,河口坝,呼鲁斯太剖面,羊三段

Fig.4 Sedimentary characteristics of tidal-dominated delta front in the northwestern margin of the Ordos Basin

(a) tide-dominated delta front deposits, Hulusitai outcrop, 3rd member of Yanghugou Formation; (b) Fcf, Fcw, subaqueous distributary channel, Hulusitai outcrop, 3rd member of Yanghugou Formation; (c) Sh, subaqueous distributary channel, Hulusitai outcrop, 3rd member of Yanghugou Formation; (d) Gm, subaqueous distributary channel, Hulusitai outcrop, 3rd member of Yanghugou Formation; (e) Fr, St, flaser-bedded sandstone facies with inverse grading structure, mouth bar, Hulusitai outcrop, 3rd member of Yanghugou Formation

砂坪常形成于强水动力条件下,整体以深灰色中—细砂岩为主,粒度较粗,分选中等,磨圆为次棱角状(图2r),整体为不明显正韵律构造,脉状层理砂岩相(Fcf)在砂坪沉积中广泛发育,未见生物遗迹,典型岩相类型为交错层理砂岩相(St、Sp;图6a,b)—沙纹层理粉砂岩相(Fr)—脉状层理砂岩相(Fcf;图6c)。粒度概率累积曲线显示跳跃组分占比大,斜率中等,粒度较粗,水动力中等(图2t)。

2) 潮间带

混合坪沉积是在潮汐活动阶段的砂质沉积与平潮阶段形成的泥质沉积交替出现形成(宋慧波等, 2020)。岩性以灰色粉—细砂岩为主、灰黑色泥岩为主,水动力向上逐渐变弱,粒度变细,由于砂泥供给量的不同,出现不同类型潮汐层理,常发育波状层理砂岩相(Fcw;图6c)以及透镜状层理泥岩相(Fcl;图

6d)岩相类型。

3) 潮上带泥坪微相

泥坪沉积位于平均高潮线以上,水动力条件弱。细粒沉积物占比大,含碳质泥岩、薄煤层,受到潮汐不断涨落的影响,部分地区可见植物化石。整体包括碳质泥岩(Mc)、煤层(C,图6f)、透镜状层理泥岩相(Fcl)三种岩相。

3.3.3 障壁岛—淡化潟湖

障壁—淡化潟湖沉积体系对其靠海一侧的海水起着遮挡和阻拦作用,障壁岛为波浪作用改造水下砂坝和沙嘴所形成的平行海岸分布的长条形砂坝;淡化潟湖位于大陆与障壁岛之间的浅水盆地,并且障壁岛对海水有一定的阻隔作用,致使淡化潟湖间歇性接收海水供给,受潮汐作用影响明显(朱筱敏, 2008)。研究区内,可识别出障壁岛以及淡化潟湖两

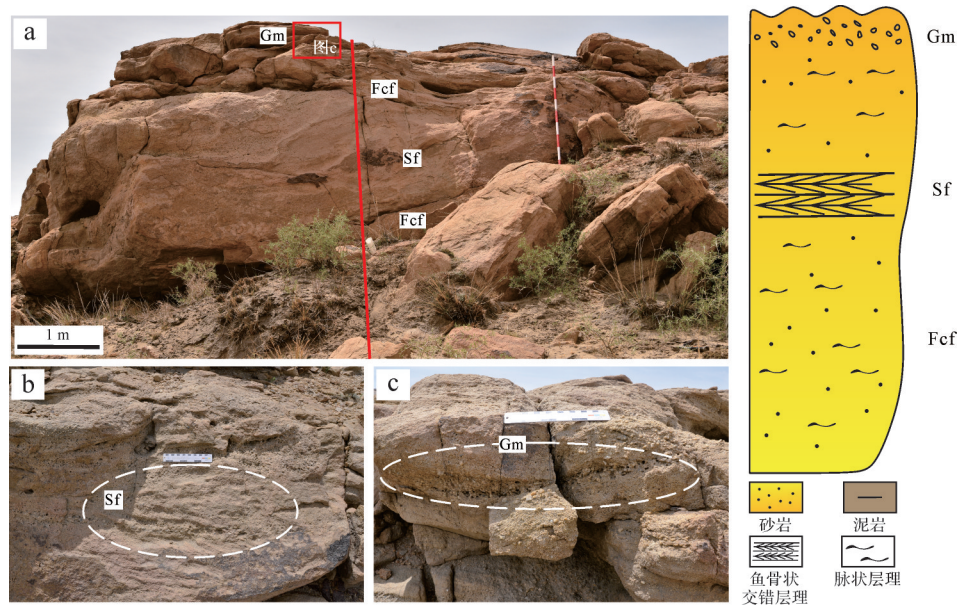


图5 鄂尔多斯盆地西北缘潮汐砂坝沉积特征

(a)潮汐砂坝沉积,呼鲁斯太剖面羊二段;(b)Sf,潮汐砂坝,呼鲁斯太剖面,羊二段;(c)Gm,潮汐砂坝,呼鲁斯太剖面,羊二段

Fig.5 Sedimentary characteristics of tidal sand bar in the northwestern margin of the Ordos Basin

(a) tidal sand bar deposits, Hulusitai outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (b) Sf, tidal sand bar, Hulusitai outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation;

(c) Gm, tidal sand bar, Hulusitai outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation

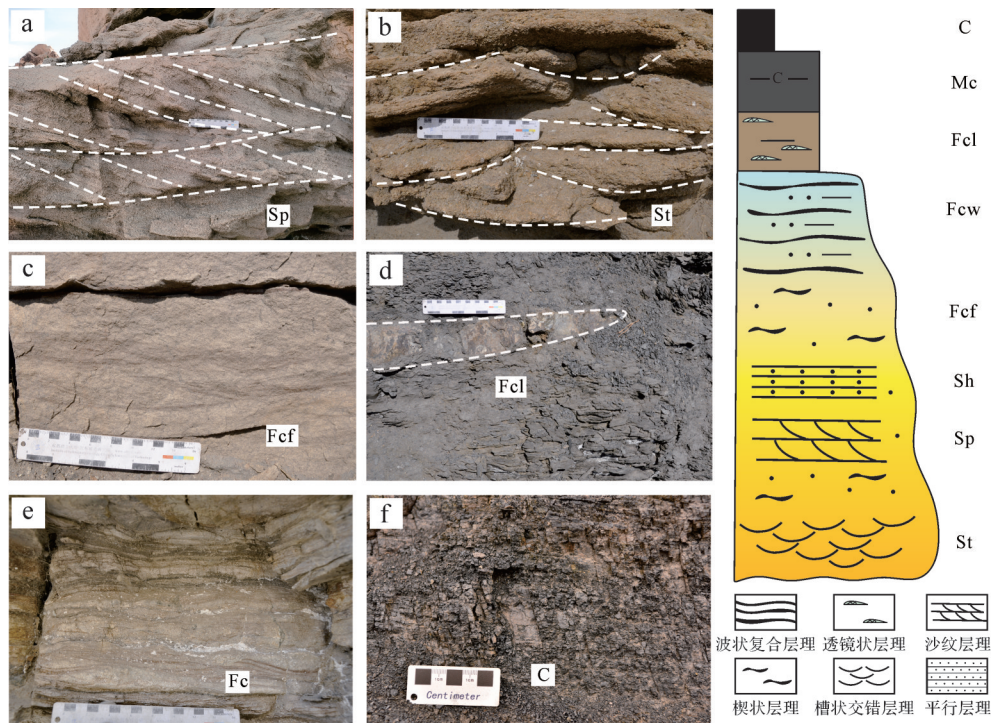


图6 鄂尔多斯盆地西北缘砂坪、泥坪及混合坪沉积特征

(a)Sp,乌达剖面,羊二段;(b)St,乌达剖面,羊二段;(c)Fcf,乌达剖面,羊二段;(d)Fcl,乌达剖面,羊二段;(e)Fcw,土坡剖面,羊一段;(f)C,呼鲁斯太剖面,太二段

Fig.6 Sedimentary characteristics of sand, mud, and mixed flats in the northwestern margin of the Ordos Basin

(a) Sp, Wuda outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (b) St, Wuda outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (c) Fcf, Wuda outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (d) Fcl, Wuda outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (e) Fcw, Tupo outcrop, 1st member of Yanghugou Formation; (f) C, Hulusitai outcrop, 2nd member of Taiyuan Formation

种类型。该沉积相类型在研究区羊虎沟组在南部土坡—韦参1井—吴忠一带、鄂托克前旗—定边一带发育,而太原组则在大石头井沟—吴忠地区广泛发育。

1) 障壁岛

障壁岛是平行于海岸线的狭长砂体,整体高出水面,以较纯净的灰白色石英砂岩为主,具有厚度大、粒度粗的特征,颗粒分选性以及磨圆度好,整体呈逆粒序,岩相以冲洗层理砂岩相(SI,图7c)、沙纹层理砂岩相(Fr,图7b)、平行层理砂岩相(Sh,图7b)以及板状交错层理砂岩相(Sp,图7a)为主。

2) 淡化潟湖

潟湖环境以暗色泥岩、灰岩为主,偶夹薄煤层,普遍发育植物碎屑以及自生矿物菱铁矿结核,被障壁岛阻隔,水体环境稳定,水流作用弱,因此泥岩整体发育水平层理,并含有碳质泥岩以及煤层,常见岩相类型为水平层理泥岩相(Mh,图7e)。太原组沉积期由于受到水体入侵的影响,水体与外海交替良好,

整体盐度有所下降,含盐度正常,出现腕足类、蜓类等化石(图2o,p)。

3.3.4 浅水陆棚

陆棚相位于水动力复杂多样的滨岸与坡折带之间的连接带上(Folk,1980)。研究区内,可识别出陆棚内陆棚亚相沉积,进一步划分出泥质陆棚以及砂质陆棚两种沉积微相,该沉积相类型见于羊虎沟组,在研究区卫大石头井沟附近以及西南部钻井剖面局部层段小范围发育。

1) 砂质陆棚

该微相发育于靠陆的正常浅海环境中,砂质陆棚岩性以深灰色粉—细砂岩交替互层为主,通常砂体呈板状构造,水平层理比较发育,延伸范围广;部分受风暴影响强烈,发育丘状交错层理以及变形构造,底部含杂乱分布砾石,随着水深逐渐增大,发育规模较小的浪成沙纹层理。垂向上出现岩相类型为含砾砂岩相(Gm)、丘状交错层理砂岩相(Shc)、

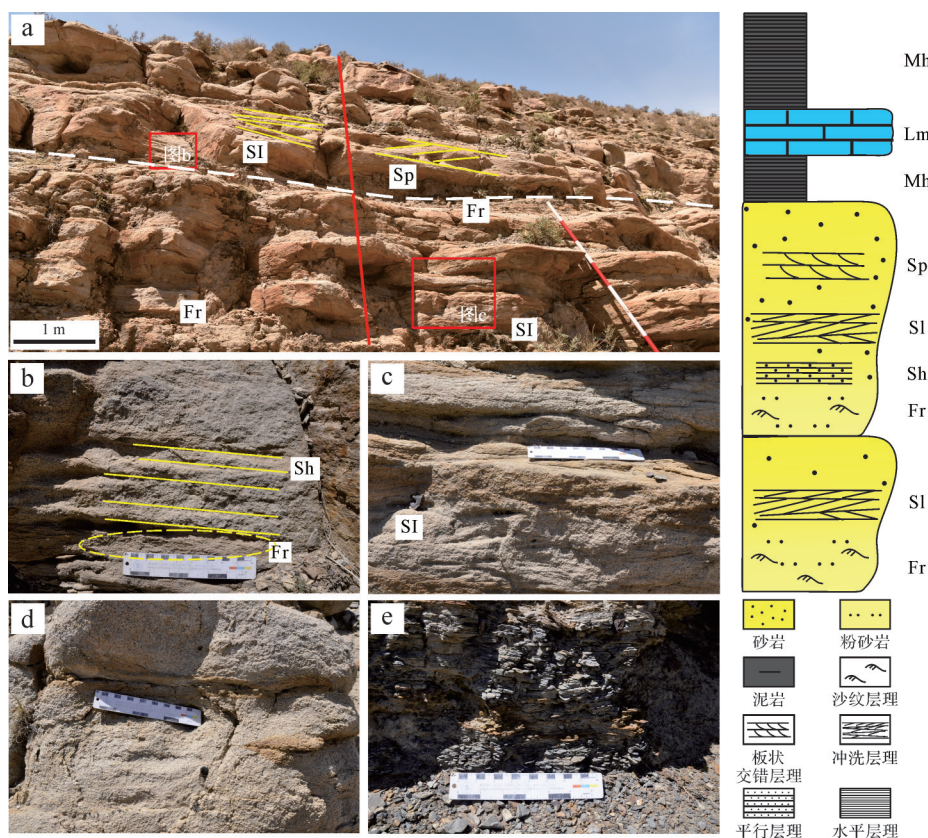


图7 鄂尔多斯盆地西北缘障壁岛—淡化潟湖沉积特征

(a)障壁岛—淡化潟湖,呼鲁斯太剖面羊二段;(b)Sh、Fr,障壁岛,呼鲁斯太剖面羊二段;(c)SI,障壁岛,呼鲁斯太剖面羊二段;(d)Gm,障壁岛,呼鲁斯太剖面羊二段;(e)Mh,淡化潟湖,呼鲁斯太剖面羊二段

Fig.7 Sedimentary characteristics of barrier island and brackish-water lagoon in the northwestern margin of the Ordos Basin
(a) Barrier island - desalinated lagoon, Hulusitai outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (b) Sh, Fr, barrier island, Hulusitai outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (c) SI, barrier island, Hulusitai outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (d) Gm, barrier island, Hulusitai outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (e) Mh, desalinated lagoon, Hulusitai outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation

平行层理砂岩相(Sh)、浪成砂纹层理砂岩相(Swr,图8)。

2) 泥质陆棚

泥质陆棚水动力条件复杂多样,岩性以黑色泥岩为主,夹粉砂岩、粉砂质泥岩以及灰岩薄层,出现变形构造,泥岩和粉砂质泥岩中见黄铁矿颗粒以及菱铁矿等自生矿物,产出虫孔、腕足类化石等生物,典型岩相类型为水平层理泥岩相(M)、块状层理泥质粉砂岩相(Mfm)以及泥灰岩相(Lm,图8)。

4 物源分析

4.1 多碎屑组分

Dickinson and Gehrels(2009)建立通用定量标准以及三角模式图,用来判断物源区以及沉积盆地构造环境,此方法得到了广泛应用。Dickinson的Q-F-L三角图解显示(图9),研究区羊虎沟组—太原组中碎

屑矿物成分以石英类以及岩屑为主,长石含量极少,且碎屑物源成分主体分布在旋回造山带物源区,少部分样品点落在混合区内,个别样品分布于岩浆弧物源区; Q_m -F- L_1 三角图解表明,大部分样品落在石英再旋回区域,少部分样品分布于混合区、切割岛弧以及过渡型岛弧区域; Q_p - L_1 - L_2 图示,样品点大量分布于混合造山带物源区,少量落在岩浆弧以及混合造山带物源区。综合上述碎屑三角图解,研究区羊虎沟组—太原组物源背景属于再旋回造山带。古生代时期,鄂尔多斯盆地北缘为活动大陆边缘;至寒武纪末期兴蒙大洋板块向南俯冲所形成的物源区与Dickinson图解判断出的构造背景基本一致,因此,研究区陆源碎屑物质来源为兴蒙大洋板块碰撞造山带以及前陆隆起造山带物源区(刘锐娥等,2003);从图解中还可以看出,研究区羊虎沟组—太原组,部分样品点落在岩浆弧以及火山弧物源区,表明研究区物源区岩性以及构造较为复杂。

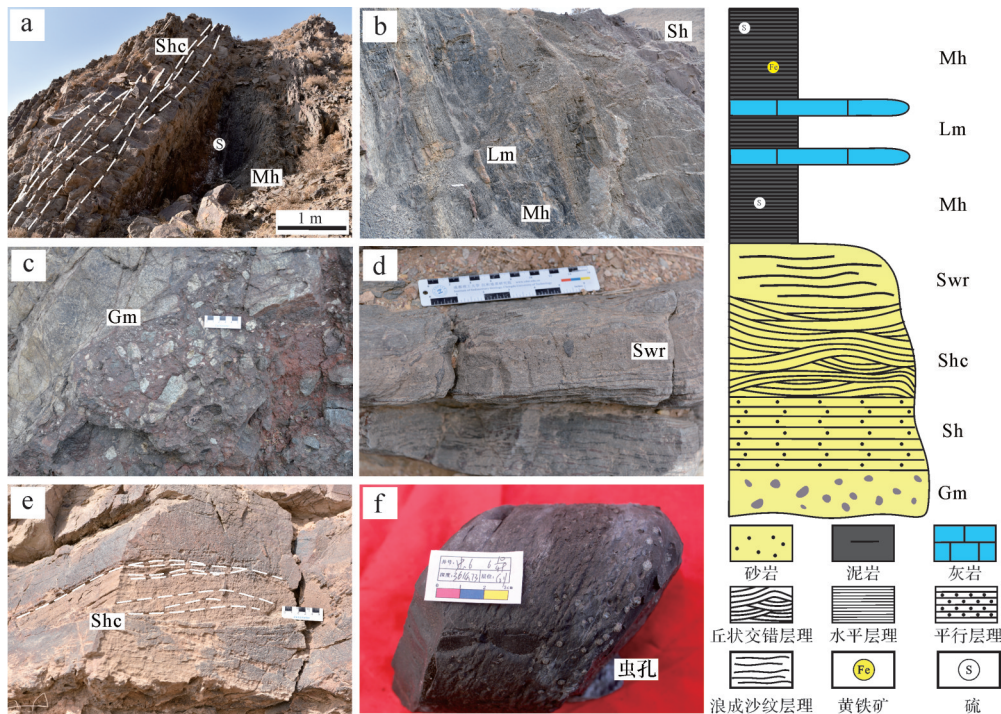


图8 鄂尔多斯盆地西北缘泥质陆棚、砂质陆棚沉积特征

(a)陆棚沉积剖面,Sh、Shc、Mh含硫,大石头井沟剖面羊虎沟组羊二段;(b)泥质陆棚,Lm、Mfm、M,含硫,大石头井沟剖面羊虎沟组羊二段;(c)砂质陆棚,Gm,发育变形构造,大石头井沟剖面羊三段;(d)砂质陆棚,Swr,大石头井沟剖面羊三段;(e)砂质陆棚,Shc,大石头井沟剖面羊三段;(f)泥质陆棚,M,发育变形构造,含虫孔,羊虎沟组,忠6井,3 614.73 m

Fig.8 Sedimentary characteristics of muddy and sandy shelves in the northwestern margin of the Ordos Basin

(a) shelf deposit, Sh, Shc, Mh containing sulfur, Dashitoujingou outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (b) argillaceous shelf, Lm, Mfm, M, containing sulfur, Dashitoujingou outcrop, 2nd member of Yanghugou Formation; (c) sandy shelf, Gm, with deformed structures, Dashitoujingou outcrop, 3rd member of Yanghugou Formation; (d) sandy shelf, Swr, Dashitoujingou outcrop, 3rd member of Yanghugou Formation; (e) sandy shelf, Shc, Dashitoujingou outcrop, 3rd member of Yanghugou Formation; (f) argillaceous shelf, M, with deformed structures and burrows, Yanghugou Formation, well Zhong 6, 3 614.73 m

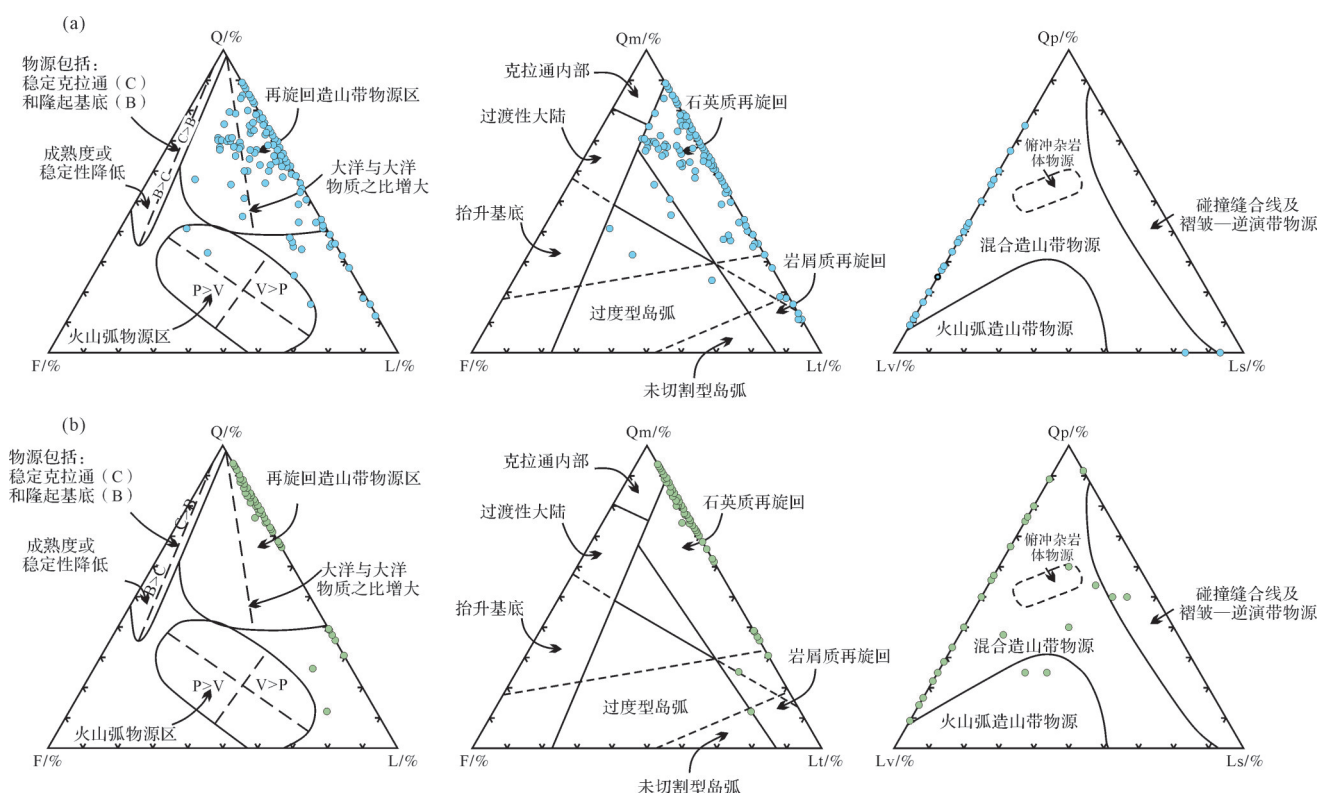


图9 鄂尔多斯盆地西北缘晚石炭世—早二叠世 Dickinson 三角图解

(a) 羊虎沟组; (b) 太原组

Fig.9 Dickinson triangle diagram of Late Carboniferous-Early Permian in the northwest margin of the Ordos Basin

(a) Yanghugou Formation; (b) Taiyuan Formation

4.2 重矿物组合

在追溯物源的过程中,通常对砂岩中重矿物组合类型进行分析,利用碎屑重矿物组合(HMA),判断稳定重矿物在重矿物组合中比重的差异、明确物源搬运距离远近,追踪溯源(和钟铎等,2001)。实验数据分析结果显示:羊虎沟组重矿物主要为锆石(54.18%)—白钛矿(24.36%)—石榴石(13.76%)—电气石(2.60%)—金红石(2.47%)—磁钛铁矿(2.23%);太原组重矿物主要为锆石(53.08%)—磁钛铁矿(20.26%)—电气石(11.99%)—白钛矿(10.14%)—金红石(3.51%)(图10)。研究区羊虎沟组重矿物组合特征体现出源区以变质岩和沉积岩为主,太原组沉积期重矿物依旧以锆石为主,次要重矿物随着石榴石的含量减弱,沉积岩比例降低,太原组源区主体以变质岩为主。研究区羊虎沟组—太原组与阿拉善古陆(阿拉善群(Ar_3 - Pt_1))以及阴山地区太古代的集宁群(Ar_3)、乌拉山群(Ar_{1-2})具有亲源性。

稳定重矿物的比值能够更好地反映物源特征,被称作重矿物的特征指数(ZTR),ZTR为锆石、电气石以及金红石稳定矿物组合在透明重矿物中的含量

百分比,可指示成熟度和再循环程度(Morton and Johnsson, 1993)。通过对研究区ZTR值进行计算,由图可以看出,羊虎沟组—太原组,呼鲁斯太—乌达一带矿物成熟度与研究区内部相比较低,鄂50井附近也出现同样情况,指示物源可能主要由北至南向盆内进行供给(图10)。

4.3 古流向分析

通过野外露头观测到的层理、波痕、定向冲刷构造等沉积构造中提取出的古水流信息是判定物源区方向的重要方法之一(Bhattacharya *et al.*, 2016)。除研究区可测层位外,其他区域通过收集前人的古流向资料以及经过矫正的成像录井数据所得(Chen *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2024)。呼鲁斯太剖面、千里山剖面在羊虎沟组—太原组沉积期以及苏峪口剖面太原组沉积期均表现出北西—南东的古流向,不同层位角度有所差别,但整体基本相似;沙巴台羊虎沟组以及大石头井沟、太阳山地区羊虎沟组古水流方向主要为北东至南西向,古流向与北部其他剖面相比发生变化;成像录井数据鄂102井古流向与北部呼鲁斯太剖面相似,表现出北西至南东方向(图11)。推

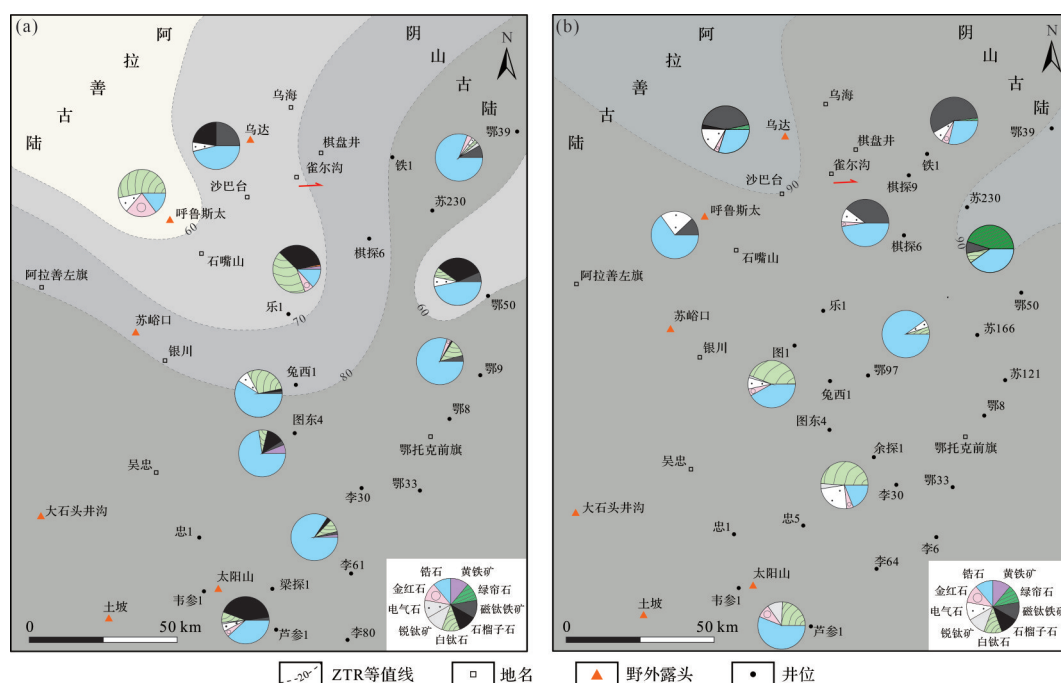


图10 鄂尔多斯盆地西北缘上石炭统一下二叠统重矿物平面分布图

(a)羊虎沟组;(b)太原组

Fig.10 Plane distribution of heavy minerals in the Upper Carboniferous-Lower Permian in the northwest margin of the Ordos Basin

(a) Yanghugou Formation; (b) Taiyuan Formation

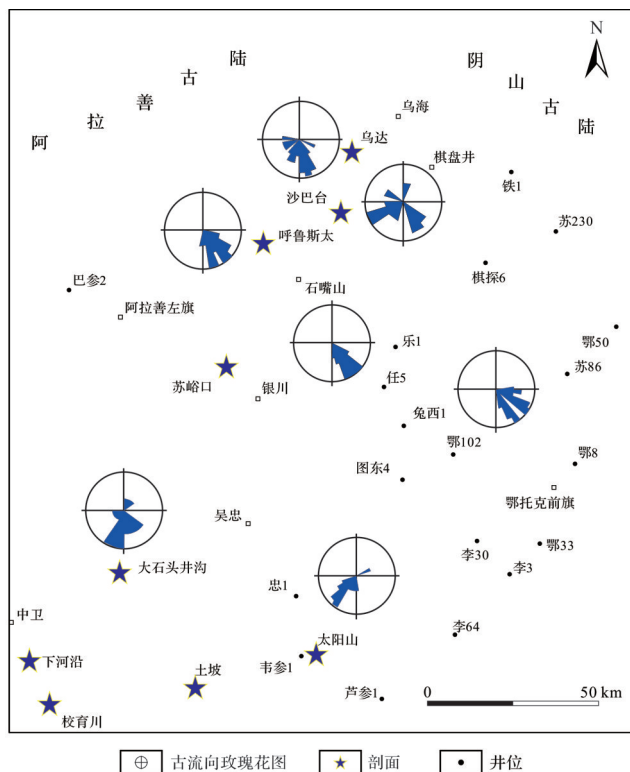


图11 鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组古流向平面分布图

Fig.11 Plane distribution map of the paleocurrent direction in the Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the northwest margin of the Ordos Basin

测研究区北部整体古流向的方向主要由北向南,可细分为西北部的阿拉善古陆以及东北部阴山古陆两个方向,研究区重矿物ZTR指数的变化特征,由北至南ZTR指数逐渐增大,稳定重矿物含量逐渐增多,不稳定重矿物区域主要集中在西北、东北两个区域内,与古水流所判别出的沉积物由北西至南东以及北东至南西两个方向具有吻合性。

5 典型钻井剖面沉积相及古沉积环境分析

研究区羊虎沟组—太原组经历了强烈的化学风化作用,致使物源信息并未完好保存,对研究区无机指标影响明显降低(张靖芪等,2025),为了更好地恢复该时期古沉积环境,选取南部忠6井、北部呼鲁斯太剖面样品中Cu、Sr、U、Th、V、Ni、Mn、Ti、Zr、Al微量元素指标以及TOC含量,多指标综合判别古沉积环境,具有较高的准确性,采用表3中不同分析方式,结合孢粉数据,对研究区羊虎沟组—太原组沉积期古沉积环境特征进行研究(表3),分析印证沉积相判别结果。

5.1 忠6井

忠6井位于研究区南部西缘冲断带中部的构造

表3 古沉积环境微量元素判别指标

Table 3 Identification index of trace elements in the paleosedimentary environment

微量元素	判别方法
Sr/Cu	1-10(温暖潮湿)>10(干燥炎热)(付金华等,2018;李浩等,2023)
Th/U	>7(淡水)2~7(微咸水—半咸水)Th/U<2(咸水)(Jones and Manning, 1994; Wang <i>et al.</i> , 2022)
V/(V+Ni)	<0.46(氧化环境)0.46~0.57(弱氧化环境)0.57~0.83(缺氧极贫氧)(Jones and Manning, 1994)
δU	<1(氧化环境)>1(还原环境)(常华进等,2009)
Mn/Ti	数值越高、水体深度更深(胡春华,2017;黄上华,2020)
Zr/Al	数值越高、水体深度更浅(刘新宇等,2021)
TOC	数值越大,还原性更强,水体更深(Algeo and Li, 2020)

转换带上,沉积环境复杂多样。羊虎沟组地层厚度为550.3 m(3 231.6~3 781.9 m)。其中,羊三段厚度为151.9 m(3 630~3 781.9 m),以中—细砂岩、粉砂岩及粉砂质泥岩为主,砂岩具有厚度大粒度粗的特点,反映出砂坪—泥坪沉积微相;羊二段厚度为280 m(3 350~3 630 m),岩性以粉砂岩以及粉砂质泥岩为主,夹有巨厚层状灰岩,存在黄铁矿颗粒等自生矿物,显示出泥质陆棚微相发育;羊一段厚118.4 m(3 231.6~3 350.0 m),岩性以泥质粉砂岩、碳质泥岩为主,富含煤层,沉积环境为混合坪与泥坪交互沉积。图12b中沉积环境指标变化趋势揭示,Sr/Cu值主要介于1~10,平均值为6.84,结合孢粉化石证据,表明当时整体气候属于温暖潮湿的热带—亚热带气候(图13a)。古盐度指标Th/U介于2~3,平均值为2.90,最小值均大于2,指示了水体盐度呈现半咸水—咸水—半咸水盐度变化趋势。古氧化还原环境指标V/(V+Ni)介于0.46~1.00,平均值为0.64,反映了沉积环境由弱氧化还原状态转变为缺氧还原环境,达到峰值后又逐渐恢复至弱氧化的还原环境;δU介于0.92~1.18,平均值为1.02,表明古氧化还原环境为弱氧化—弱还原的沉积背景。综合Mn/Ti以及Zr/Al,羊虎沟组古水深自下而上由浅变深,在羊二段中下部达到最深,随后迅速变浅(吴静仪等,2025;图12b)。

忠6井太原组整体地层厚度为219.6 m(3 012.0~3 231.6 m),粒度较细,岩性以灰黑色、深灰色泥岩,中—细砂岩为主,发育潮坪沉积环境。太二段厚度为109.6 m(3 122.0~3 231.6 m)泥岩中可见水平—波状纹层,并发育碳质泥岩,对应潮坪中泥坪微相;常见泥质粉砂岩与泥岩互层现象,特征对应混合坪沉积微相,砂岩以细砂岩为主,可见脉状层理,为砂坪微相的典型标志。太一段厚度为110 m(3 012~3 122 m),该段地层中泥岩含量占据主导地位,且煤层分布广泛,发育泥坪微相;中部砂岩厚度相对较大,粒度较粗,

无明显粒序结构,整体发育脉状层理,与潮间带砂坪特征符合。该时期,古气候依旧为温暖潮湿的热带—亚热带气候,但相较于羊虎沟组,孢粉多样性有所下降(图13b)。古盐度指标Th/U介于2~4,平均值为2.99,古盐度处于咸水—半咸水沉积环境;氧化还原指标V/(V+Ni)介于0.46~0.96,平均值为0.66,指示沉积环境为弱氧化—缺氧的还原状态,且缺氧程度相较于羊虎沟组有所增加;δU值介于0.89~1.05,平均值为1.00,为弱氧化—弱还原沉积环境。综合Mn/Ti与Zr/Al的分析,太原组古水深变化较小,无明显差异性(图12b)。

5.2 呼鲁斯太剖面

呼鲁斯太剖面为研究区北部沉积环境典型剖面,露头出露清晰,羊虎沟组整体厚度为663.96 m。羊三段厚度为161.13 m,岩性以灰白色中—细砂岩、灰黑色泥岩为主,潮汐层理均有分布,部分砂岩底部含冲刷面,发育槽状、板状交错层理,对应潮控三角洲水下分流河道沉积;泥岩整体发育透镜状层理,为潮控三角洲水下分流间湾沉积的典型标志。羊虎沟组羊二段(252.35 m)—羊一段(250.48 m),泥岩分布最广,通过有无发育透镜状层理泥岩相、灰岩以及菱铁矿结核,可对泥坪及淡化潟湖进行区分;砂岩主要为灰白色中砂岩,发育潮汐层理,部分砂岩顶部含砾,向下为逐渐变细的逆粒序层理,并发育鱼骨状、羽状等双向层理,对应潮汐砂坝;部分砂岩砂质较纯,发育冲洗层理、低角度层理以及逆粒序构造,对应障壁砂坝微相,羊二段主体呈潮坪—障壁岛—淡化潟湖沉积特征。羊一段顶部发育8#煤层,是羊虎沟组与顶部太原组分界的重要标志。古沉积环境判别中,Sr/Cu平均值为5.51,温湿度较高;古盐度Th/U介于1.52~2.76,平均值为2.23,多数值均大于2,较南部相比均值稍低,主要是由于北部沉积环境中羊二段咸水环境所占比例较多,可能与前人研究有所差

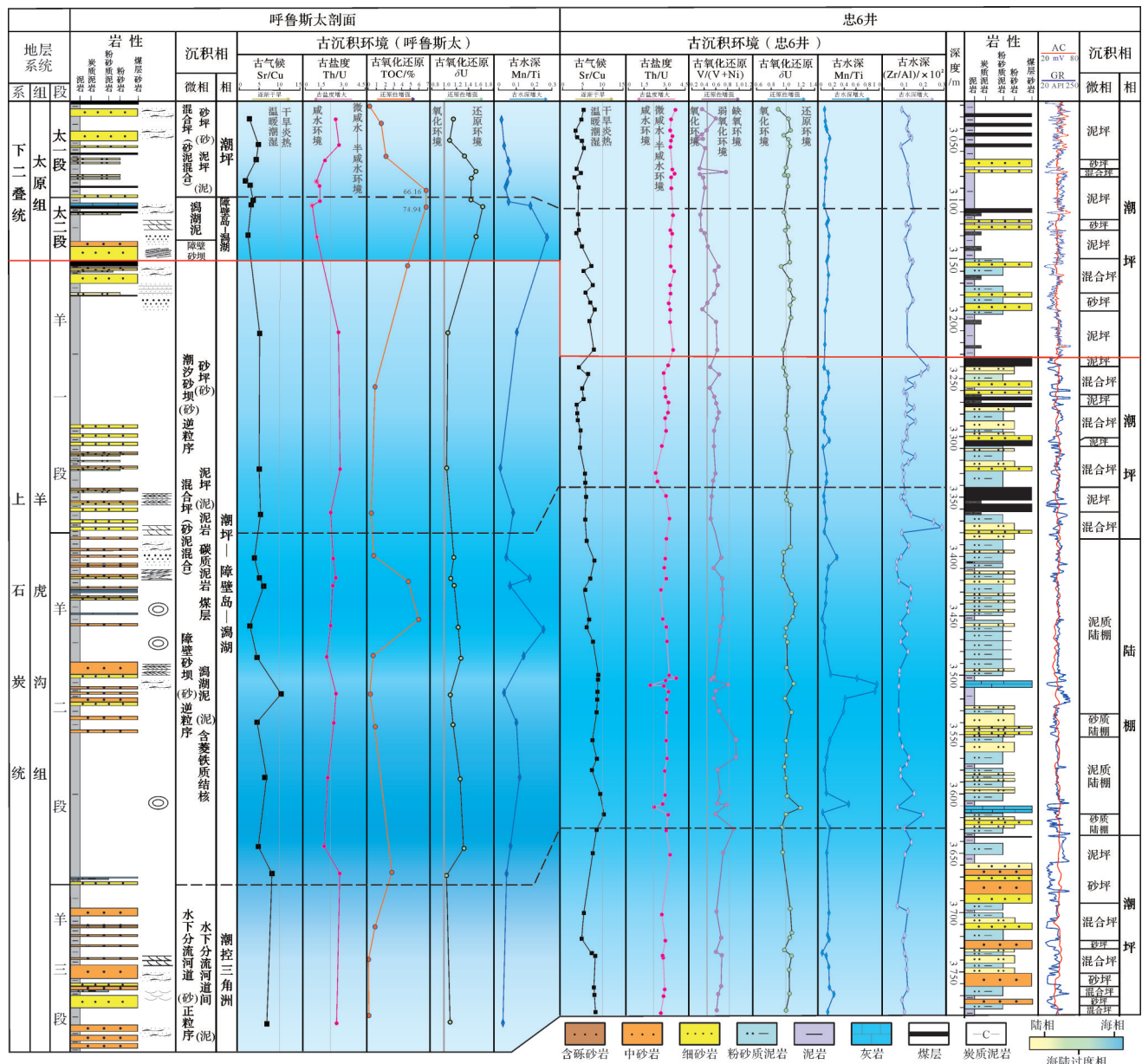


图12 鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组典型剖面、钻井沉积相及古沉积环境纵向演化特征

(a)呼鲁斯太剖面,羊虎沟组—太原组;(b)忠6井,羊虎沟组—太原组(据吴静仪等,2025修改)

Fig.12 Typical profiles, well sedimentary facies, and longitudinal evolution of paleosedimentary environment of the Yanghugou Formation and Taiyuan Formation in the northwest margin of the Ordos Basin

(a) Hulusitai outcrop, Yanghugou Formation-Taiyuan Formation; (b) well Zhong 6, Yanghugou Formation-Taiyuan Formation (modified from Wu *et al.*, 2025)

异,但野外露头可观测到典型咸水环境的岩相特征,变化趋势自下而上为先升高后迅速降低,羊二段为古盐度最大处;古氧化还原环境指标 δU 介于1.04~1.26,平均值为1.15,属于弱还原沉积环境,结合TOC分析整体呈现出还原性增强随后降低的变化趋势; Mn/Ti 所反映出的古水深变化趋势与沉积环境基本对应(图13a)。

太原组整体厚度为72.6 m,可分为太一段以及太

二段。太二段地层厚度为57.5 m,岩性以灰白色中—细砂岩、灰黑色泥岩为主,砂岩发育逆序层构造、冲洗层理以及潮汐层理,对应沉积环境为障壁砂坝微相,泥岩颜色深且厚度占比最大,发育水平层理,内部含有大量菱铁矿结核出现,偶夹生屑灰岩及煤层,部分泥岩含硫,反映水体较深且环境相对稳定,对应水动力较弱的淡化潟湖沉积微相,太一段地层厚度为15.1 m(57.5~72.6 m),沉积环境以潮坪沉积中砂

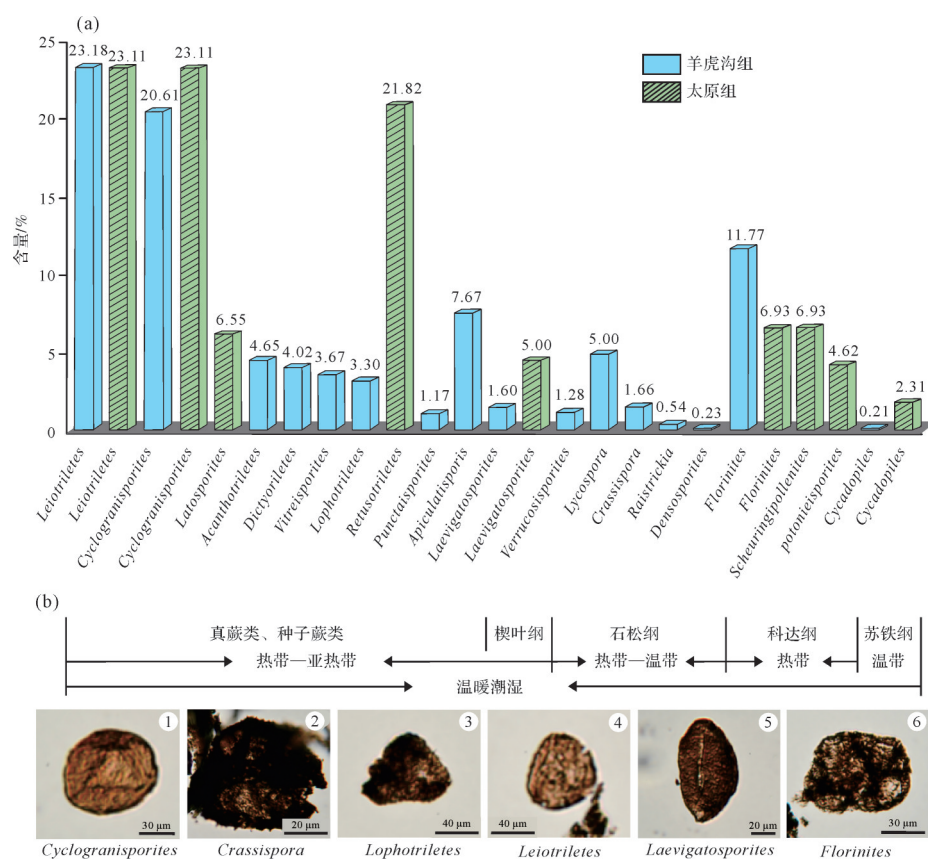


图13 鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组孢粉含量及部分孢粉图版
(据阎存凤等, 2006; 王峰等, 2010; 吴静仪等, 2025 修改)

(a) 羊虎沟组—太原组孢粉含量; (b) 羊虎沟组—太原组部分孢粉图版(孢粉名称见图)

Fig.13 Sporopollen content and plates from the Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the northwestern margin of the Ordos Basin (modified from Yan *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2025)

(a) palynomorph content of the Yanghugou Formation-Taiyuan Formation; (b) partial palynomorph plate of the Yanghugou Formation-Taiyuan Formation(see figure for palynomorph names)

坪、泥坪、混合坪为主,发育脉状层理、透镜状层理以及小型板状交错层理,粒度较太二段细,未见生物痕迹,顶部发育6#煤,是太原组与顶部山西组分界的重要标志。该时期Sr/Cu平均值为2.44,指示古气候温暖潮湿。古盐度Th/U介于0.63~2.44,平均值为1.39,多数值均大于2,太二段以咸水环境为主,向上直至太一段古盐度降低,转至微咸水—半咸水;古氧化还原环境指标 δU 介于1.1~1.64,平均值为1.15,结合TOC分析,整体呈现由缺氧向弱还原性逐渐转变的趋势;Mn/Ti所反映出古水深自下而上呈由深变浅趋势(图12a、表4)。

综合上述分析,就沉积相而言,从羊虎沟组—太原组,研究区北部经历了潮控三角洲、淡化潟湖、潮坪(羊虎沟组)—淡化潟湖、潮坪(太原组);研究区南部经历了潮坪、陆棚(羊虎沟组)—潮坪(太原组)。就古沉积环境而言,从羊虎沟组—太原组,研究区北

部与南部均为热带—亚热带温暖潮湿气候;古盐度呈逐渐升高趋势,呈现微咸水—半咸水沉积环境;古水深总体呈现升高的变化趋势;古氧化还原环境为弱氧化—缺氧的还原环境,古沉积环境与各时期沉积相基本吻合。

6 沉积相带展布及演化

6.1 沉积相横向对比

选取研究区内沉积环境、地层特征以及分布位置具有典型代表性的剖面及井位,南北向对比图自北向南选取了乌达剖面、呼鲁斯太剖面、鄂101井、余探1井、忠6井;东西向对比图自西向东选取了下河沿剖面、大石头井沟剖面、忠6井、余探1井、鄂33井进行沉积相、地层及砂体综合对比解释,进一步揭示研究区内沉积相发育特征及主要分布规律(图14)。

表4 鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组古沉积环境判别数据表

Table 4 Ancient sedimentary environment discriminant data of the Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the northwestern margin of the Ordos Basin

层位	Sr/Cu	Th/U	V/(V+Ni)	δU	Mn/Ti	TOC/%
羊虎沟组	3.58~10.73	2.59~3.30	0.46~0.99	0.92~1.18	0.017~0.96	—
(忠6井)	6.84(42)	2.90(47)	0.64(47)	1.02(47)	0.15(47)	—
羊虎沟组	2.60~10.29	1.52~2.76	—	0.04~1.26	0.01~0.25	0.06~6.09
(呼鲁斯太剖面)	5.51(14)	2.23(14)	—	1.15(13)	0.09(14)	2.81(13)
太原组	4.03~9.30	2.48~3.71	0.46~0.97	0.89~1.05	0.05~0.17	—
(忠6井)	5.98(27)	2.99(27)	0.66(27)	1.00(27)	0.10(22)	—
太原组	1.36~3.72	0.95~2.45	—	1.10~1.64	0.03~0.26	0.39~74.94
(呼鲁斯太剖面)	2.44(8)	1.39(8)	—	1.15(8)	0.09(8)	29.01(5)

注:表中数值分子为最小值、最大值,分母为平均值,括号内数值为样品数,\表示无数据点。

6.1.1 南北向

羊虎沟组沉积期,主体厚度呈现南北厚、中部薄的特征,中部缺失羊三段—羊二段。北部乌达—呼鲁斯太一带以潮控三角洲—碎屑海岸为主要沉积特征,羊三段—羊一段砂体厚度呈先减小后增大趋势变化;中部鄂101井—余探1井一带受中央古隆起影响,未沉积羊三段,发育潮坪沉积环境;向南忠6井一带,以潮坪—陆棚沉积为主,沉积物粒度相对较细,砂体连通性差。

太原组沉积期,厚度介于50~100 m,局部地区厚度为200 m以上,北部整体发育潮控三角洲—碎屑海岸沉积环境,泥岩中泥质含量纯,偶夹薄煤层,且含菱铁矿结核;中部鄂101井,出现潮控三角洲前缘沉积,泥质含量占比大;余探1井出现厚层灰岩,对应淡化潟湖沉积;南部忠6井附近,沉积环境以潮坪沉积为主,砂岩层较薄,夹大量煤层。

6.1.2 东西向

羊虎沟组沉积期,研究区东西地层厚度差异大,西部主体为500~800 m,向东近中央古隆起附近厚度急剧变薄,部分地区缺失羊三段及羊二段,主体厚度为20~50 m。研究区西部下河沿剖面—忠6井区域发育陆棚—潮坪过渡沉积,大石头井沟剖面为研究区沉降中心,水体深度最大,以陆棚沉积为主。受中央古隆起影响,东部余探1井—鄂33井附近只存在羊一段,以潮坪—淡化潟湖沉积为主,砂体厚度小,连通性差。

太原组沉积期,受水下古隆起影响,厚度主体呈现西厚东薄的特征,西部大石头井沟附近,太原组遭受剥蚀,未出露地层。主体发育淡化潟湖—障壁岛—潮坪沉积,西部下河沿附近,部分砂岩呈逆粒序,粒度较粗;忠6井—鄂33井一带,泥质含量较高,

砂岩厚度薄,整体连通性差,部分地区出现灰岩以及煤层出露,厚度介于3~10 m。

6.2 砂体及沉积相展布

6.2.1 羊虎沟组

上石炭统羊虎沟组,研究区自北向南发育潮控三角洲—碎屑海岸沉积体系,根据砂体厚度、砂体展布特征以及沉积相类型可分为北部、西南部以及东南部三个区域。

北部主要发育潮控三角洲沉积环境,存在两套砂带延伸至研究区中部一线,主砂带自乌达—沙巴台直至银川—任14井,铁1井至苏135井方向存在第二套三角洲砂体,两套砂体虽物源供给不同,但整体沉积物均以中—细砂岩为主,根据砂体等值线可以看出厚度较大,近物源区域砂体厚度最大;西南部主要以大石头井沟为沉降中心,发育陆棚沉积,沉积物以灰黑色泥岩、粉—细砂岩为主,砂体厚度以及规模与北部相比明显变小,下河延—土坡—吴忠地区部分地区,发育障壁岛—淡化潟湖沉积,存在平行海岸方向障壁砂坝,以中—细砂岩为主,砂质纯,逆粒序,厚度较大;东南部主体以潮坪沉积为主,分布数量多范围小的潮汐砂坝,砂体以细砂岩为主,逆粒序,且厚度较薄。持续向东,受中央古隆起影响,潮汐砂脊被逐渐改造,大量平行岸线障壁砂坝出现,且羊三段中央古隆起逐渐没于水下,对研究区控制作用减弱,研究区内开始沉积砂体(图15a)。

6.2.2 太原组

下二叠统太原组,研究区自北向南发育潮控三角洲—碎屑海岸沉积体系,根据砂体厚度、砂体展布特征以及沉积相类型可分为西北部、东部以及西南部三个区域。

西北部潮控三角洲具有继承性,受物源供给影

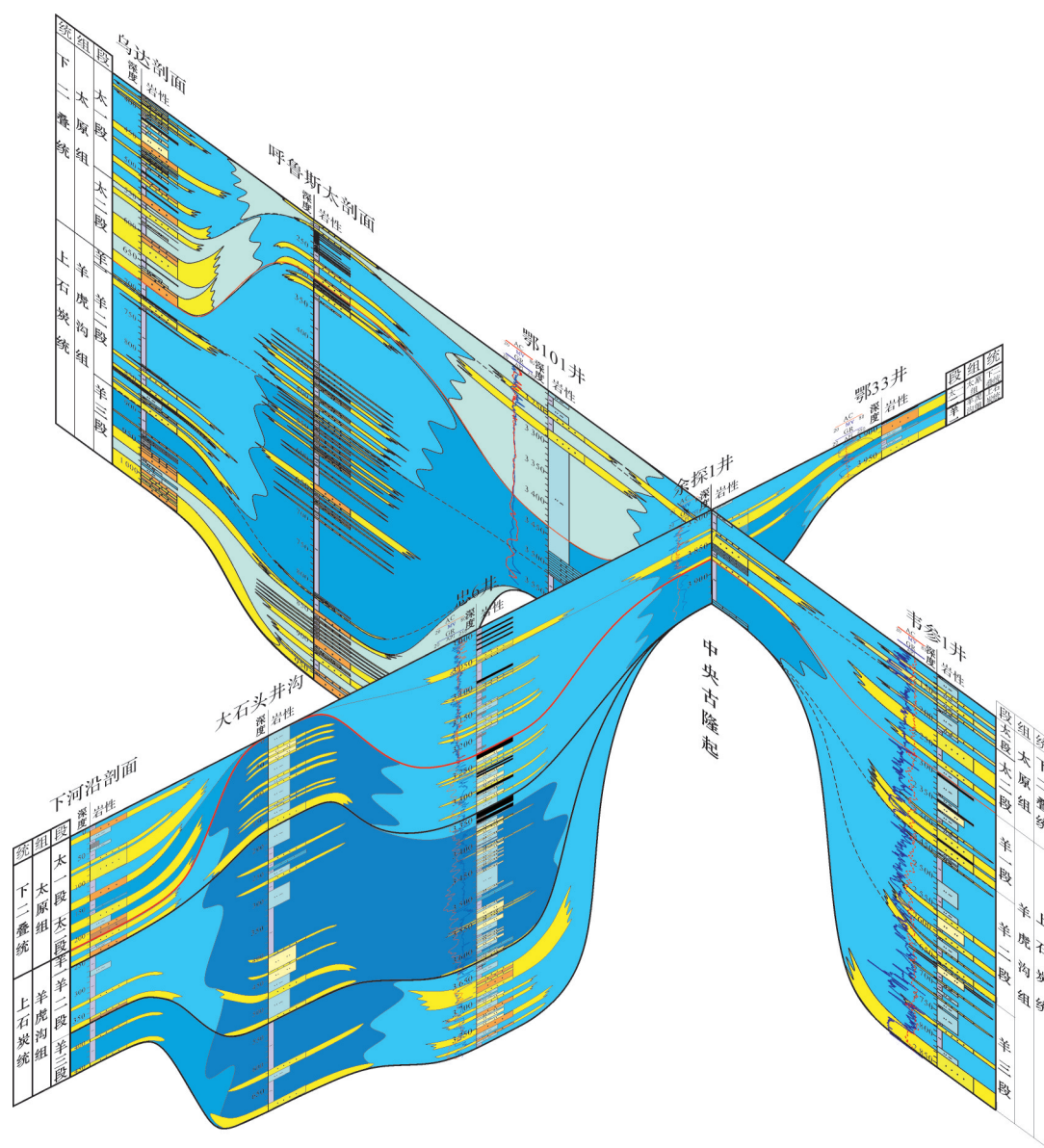


图14 鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组沉积相柱状对比图

Fig.14 Columnar correlation of sedimentary facies from the Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the northwestern margin of the Ordos Basin

响砂体展布面积增大,延伸范围更广,依旧以中—细砂岩为主;东部沉积环境变化明显,研究区东部受控于持续稳定的物源供给以及中央古隆起对盆内控制作用减弱的影响,潮控三角洲砂体由铁1井延伸至研究区最南处,厚度逐渐变薄,规模逐渐变小,东南角发育规模较小的潮坪沉积,存在被打散厚度薄垂直岸线分布的潮汐砂坝;西南部海水自西向东侵入范围扩大,以淡化潟湖沉积为主,研究区内土豆状障壁砂坝砂体较羊虎沟组表现为数量变少厚度变薄的特点,向东至忠6井—韦参1井附近,发育潮坪沉积环境(图15b)。

6.3 沉积演化及沉积模式

6.3.1 羊虎沟组

晚石炭世早期,鄂尔多斯盆地受亚洲洋与北秦岭洋关闭,构造挤压作用的影响,南部与北部皆为盆地提供了碎屑物质来源,盆地快速沉降,并且具有明显差异,地形北高南低,在海侵背景下,形成海陆过渡相含煤地层,整体表现出由海侵向盆地中央古隆起逐渐超覆的特点。研究区西北方向阿拉善古陆与东北方向阴山古陆物源共同为研究区供源。在热带—亚热带温暖潮湿古气候背景下,表现为微咸水—半咸水、弱氧化—缺氧的还原环境。

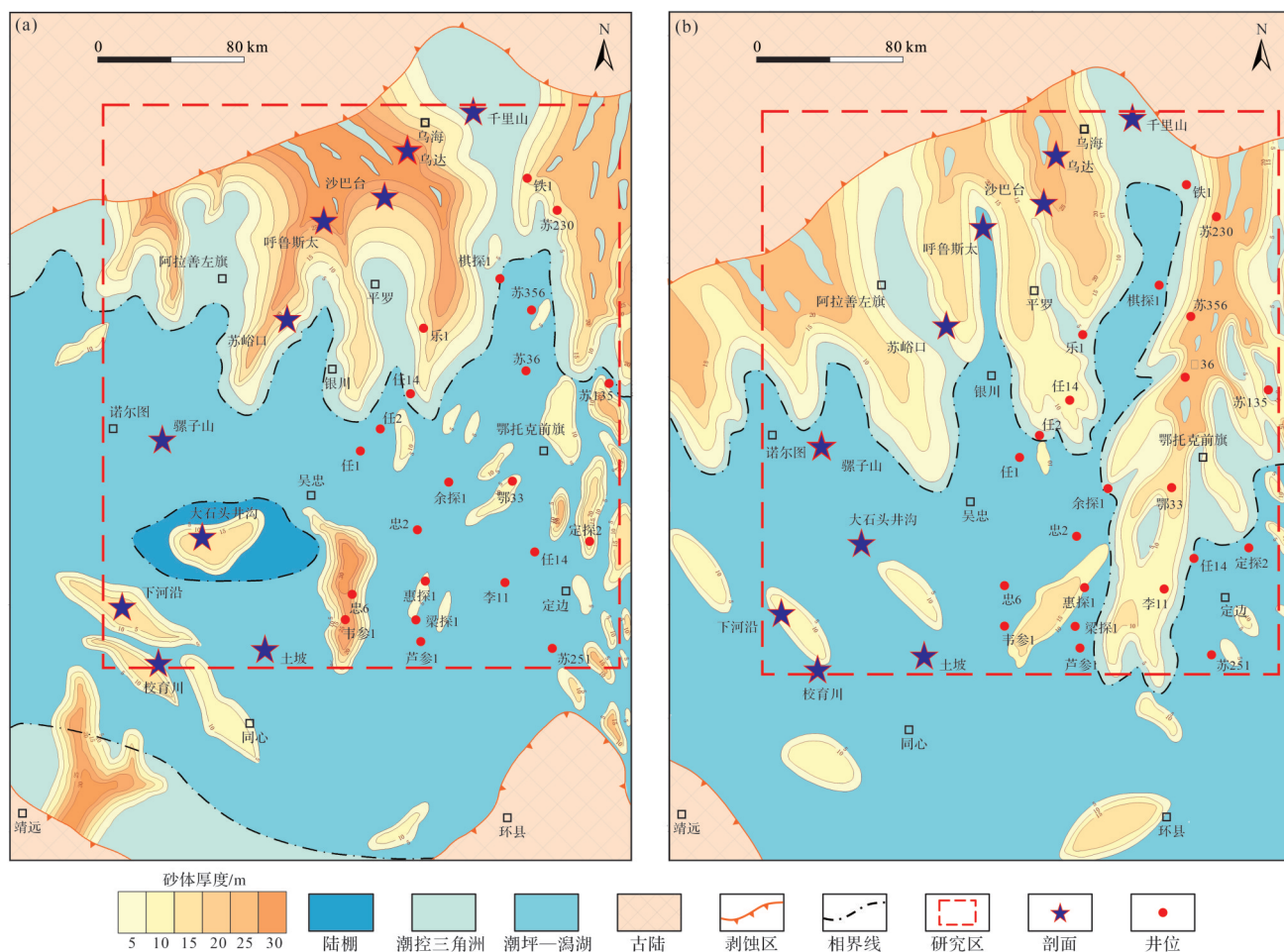


图15 鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组—太原组砂体及沉积相平面图

(a)羊虎沟组;(b)太原组

Fig.15 Plan of sand body and sedimentary facies from the Yanghugou Formation–Taiyuan Formation in the northwestern margin of the Ordos Basin

(a) Yanghugou Formation; (b) Taiyuan Formation

在贺兰拗拉槽复活以及南北构造积压背景下,海水快速进入鄂西克拉通边缘裂陷区,沉积厚层石炭纪地层,研究区整体沉降幅度极不平衡且地层厚度变化显著。研究区整体发育潮控三角洲—潮坪—障壁岛—淡化潟湖—陆棚沉积环境,北部物源较强,致使北部粗粒碎屑物较南部更多,主体受控于潮控三角洲沉积体系,由千里山、乌达一带向南推进至银川—任14井一线,研究区东北侧经过铁1井—苏230井延伸至鄂托克前旗方向,展布方向与判别出古水流方向一致;随后受到潮汐作用影响,砂体被打散改造明显,致使余探4井—忠2井附近发育垂直海岸线方向的条带状潮汐砂坝;并且研究区南部土坡—下河延一带,由于水体较深,广泛发育细粒沉积物为主的碎屑海岸沉积体系,大量土豆状障壁岛砂体平行岸线分布,有效分隔广海与沿岸海域,沉积厚度较大

(大于500 m),中卫大石头井沟周围水体深度明显加深,发育局部的拗陷沉积为沉降中心,主要为陆棚沉积环境;东南部梁探1井—李17井附近,受中央古隆起影响,部分地层明显缺失,地层厚度小而稳定,分布数量多范围小的潮汐砂坝,整体以潮坪为主,向东鄂托克前旗—一定边一带,潮汐砂脊被逐渐改造,沉积一系列大小不一的障壁砂坝,沉积序列表现为与淡化潟湖沉积环境互层出现(图16)。

6.3.2 太原组

太原组时期,华北板块经过晚石炭世填平补齐,陆表海进一步发展,盆地海域分布最广,整体水深与羊虎沟组相比较浅。由于华北板块主体发生了由北东转向南东倾斜的跷跷板运动,地势北高南低更为明显,地壳继续下沉,中央古隆起没于水下,但对沉积仍具有控制作用,呈缓慢消失趋势。

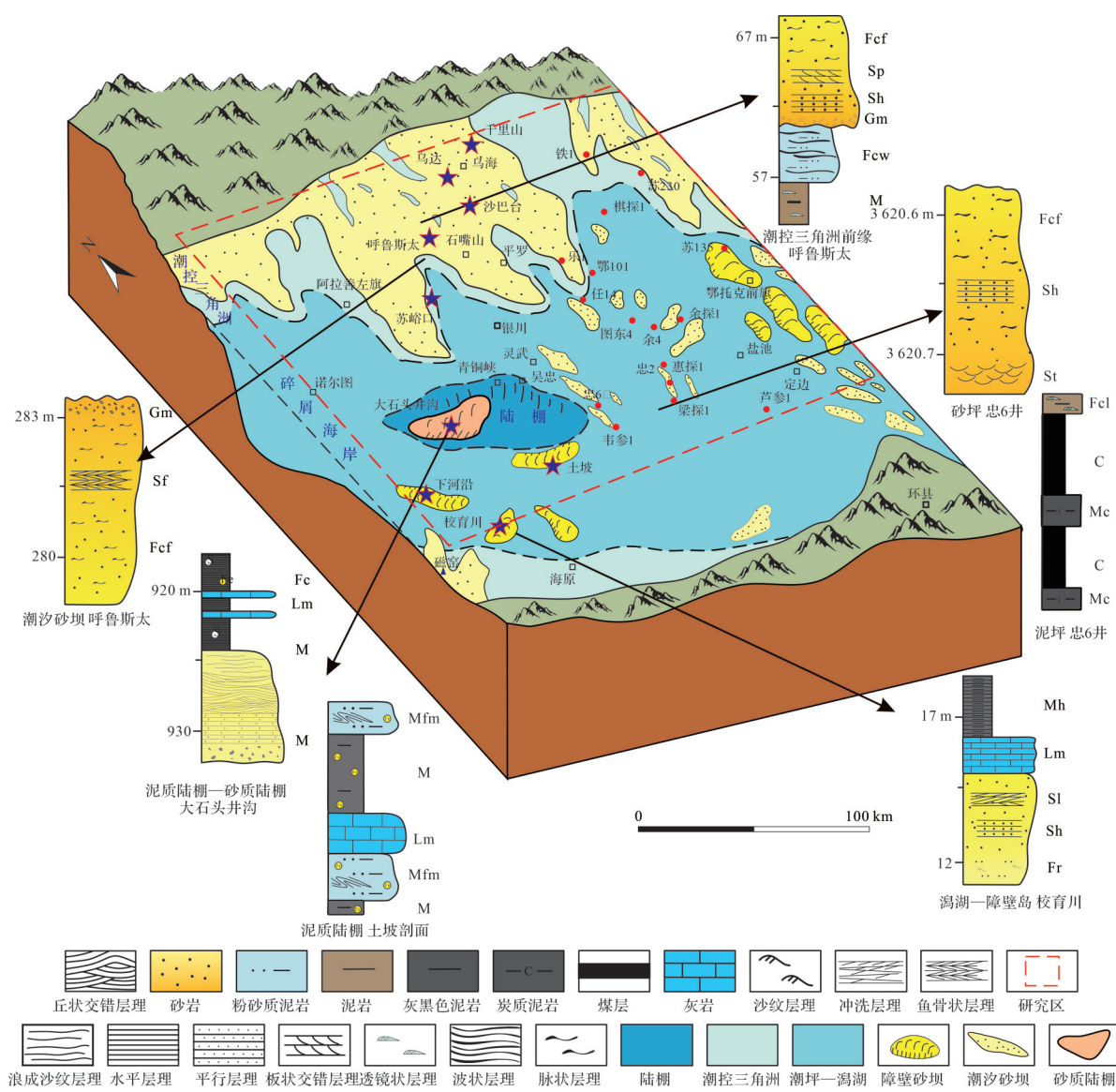


图 16 鄂尔多斯盆地西北缘羊虎沟组沉积模式

Fig.16 Sedimentary model of the Yanghugou Formation in northwestern margin of the Ordos Basin

研究区主要物质来源依旧为阿拉善古陆及阴山古陆,北部地区的剥蚀范围相对减小,物源供给持续增强。古气候为热带—亚热带温暖潮湿气候,古盐度变化较小,以微咸水—半咸水为主,咸水环境升高,还原性较羊虎沟组有所提升。

在贺兰拗拉槽以及克拉通边缘裂陷消亡的背景下,盆地西缘转变为克拉通内坳陷,地层厚度以及沉积环境具有继承性,该期古地理格局总体表现为三角洲、潮坪、障壁海岸等沉积体系共存。研究区北部千里山—乌达—沙巴台一带以三角洲沉积为主,呼鲁斯太等地仍旧存在局部海相沉积。中部延伸至银川—任14井附近,东部从铁1井逐渐延伸至最南部芦参1井一带,物源供给持续增加,三角洲沉积规模较羊虎

沟组沉积时期明显扩大,砂体厚度大,砂体展布方向分别由北东以及北西汇聚至研究区中部方向,与判断出的古水流方向基本吻合。由于晚石炭世沉积作用填平补齐导致盆地地形趋于平坦,沉积中心仍旧在吴忠地区,但沉降趋于减缓,水体仍为研究区最深处,但水体深度相较于羊虎沟组明显变浅,沉积环境以潮坪、淡化潟湖为主,水体连通性好,水动力条件具有变化大的特点,整体以细粒沉积物为主,泥质含量占比大;东南部分地区仍受水下中古隆起的影响,地层厚度较小,约为15 m,发育规模较小的潮坪沉积,存在被打散厚度薄垂直岸线分布的潮汐砂坝。太原组晚期,发生区域性海退,为后续山西组时期沉积环境转变为陆相的发展提供了基础(图17)。

参考文献(References)

- 常华进,储雪蕾,冯连君,等. 2009. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质论评, 55(1): 91-99. [Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, et al. 2009. Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies[J]. Geological Review, 55(1): 91-99.]
- 陈彬滔,于兴河,潘树新,等. 2013. 准噶尔盆地南缘头屯河组曲流河沉积特征与成因砂体对比方法[J]. 天然气地球科学, 24(6): 1132-1139. [Chen Bintao, Yu Xinghe, Pan Shuxin, et al. 2013. Sedimentary characteristics and sedimentogenic-based sandbodies correlation methods of meandering river in Toutunhe Formation, southern margin of Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 24(6): 1132-1139.]
- 陈洪德,侯中健,田景春,等. 2001. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积层序地层学与盆地构造演化研究[J]. 矿物岩石, 21(3): 16-22. [Chen Hongde, Hou Zhongjian, Tian Jingchun, et al. 2001. Study on sequence stratigraphy of deposits and tectono-sedimentary evolution in Ordos Basin during Late Palaeozoic[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 21(3): 16-22.]
- 陈洪德,钟怡江,许效松,等. 2014. 中国西部三大盆地海相碳酸盐岩台地边缘类型及特征[J]. 岩石学报, 30(3): 609-621. [Chen Hongde, Zhong Yijiang, Xu Xiaosong, et al. 2014. Types and characteristics of carbonate platform margins of marine carbonate rock in three major basins in western China[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(3): 609-621.]
- 陈全红,李文厚,刘昊伟,等. 2009. 鄂尔多斯盆地上石炭统—中二叠统砂岩物源分析[J]. 古地理学报, 11(6): 629-640. [Chen Quanhong, Li Wenhou, Liu Haowei, et al. 2009. Provenance analysis of sandstone of the Upper Carboniferous to Middle Permian in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 11(6): 629-640.]
- 党蓓. 2003. 鄂尔多斯盆地构造沉积演化与下古生界天然气聚集关系研究[D]. 西安:西北大学. [Dang Ben. 2003. The tectonic and sedimentary evolution and its relationship to gas accumulation of Lower Paleozoic in Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University.]
- 付金华,李士祥,徐黎明,等. 2018. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义[J]. 石油勘探与开发, 45(6): 936-946. [Fu Jinhua, Li Shixiang, Xu Liming, et al. 2018. Paleosedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 45(6): 936-946.]
- 郭艳琴,王美霞,郭彬程,等. 2020. 鄂尔多斯盆地西缘北部上古生界沉积体系特征及古地理演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 50(1): 93-104. [Guo Yanqin, Wang Meixia, Guo Bincheng, et al. 2020. Sedimentary system characteristics and paleogeographic evolution of Upper Paleozoic of northern west margin, Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 50(1): 93-104.]
- 郭英海,刘焕杰,权彪,等. 1998. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化[J]. 沉积学报, 16(3): 44-51. [Guo Yinghai, Liu Huanjie, Quan Biao, et al. 1998. Late Paleozoic sedimentary system and paleogeographic evolution of Ordos area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 16(3): 44-51.]
- 何登发,包洪平,孙方源,等. 2020. 鄂尔多斯盆地中央古隆起的地质结构与成因机制[J]. 地质科学, 55(3): 627-656. [He Dengfa, Bao Hongping, Sun Fangyuan, et al. 2020. Geologic structure and genetic mechanism for the central uplift in the Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 55(3): 627-656.]
- 何自新,付金华,孙六一. 2002. 鄂尔多斯盆地西北部地区天然气藏地质特征与勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 7(1): 56-66. [He Zixin, Fu Jinhua, Sun Liuyi. 2002. Geological characteristics and exploration potential of natural gas accumulation in northwest region of Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 7(1): 56-66.]
- 和钟铎,刘招君,张峰. 2001. 重矿物在盆地分析中的应用研究进展[J]. 地质科技情报, 20(4): 29-32. [He Zhonghua, Liu Zhaojun, Zhang Feng. 2001. Latest progress of heavy mineral research in the basin analysis[J]. Geological Science and Technology Information, 20(4): 29-32.]
- 胡春华. 2017. 酒泉盆地沉积物元素记录的新生代以来古气候演化[D]. 兰州:兰州大学. [Hu Chunhua. 2017. Cenozoic palaeoclimate evolution based on the records of sediment elements in the Jiuquan Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 黄上华. 2020. 鄂尔多斯盆地冯75井长7段页岩地球化学特征与古环境分析[D]. 北京:中国地质大学(北京). [Huang Shanghua. 2020. Geochemical characteristics and paleoenvironmental analysis of the Chang 7 shale in Feng 75 well Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).]
- 贾进华. 2019. 古海岸带碎屑潮汐环境沉积微相与砂体分布:以塔中地区志留系为例[J]. 中国矿业大学学报, 48(1): 110-123. [Jia Jinhua. 2019. Sedimentary microfacies and sandbody distribution in the elastic tidal environment of the ancient coastal zone: A case study of Silurian in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 48(1): 110-123.]
- 李浩,徐怀民,王千军,等. 2023. 准东地区平地泉组微量元素地球化学特征及油气地质意义[J]. 断块油气田, 30(2): 277-285. [Li Hao, Xu Huaimin, Wang Qianjun, et al. 2023. Geochemical characteristics and petroleum geological significance of trace elements of Pingdiquan Formation in eastern Junggar Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 30(2): 277-285.]
- 刘池洋,赵红格,桂小军,等. 2006. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 80(5): 617-638. [Liu Chi-yang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, et al. 2006. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 80(5): 617-638.]
- 刘锐娥,黄月明,卫孝锋,等. 2003. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代物源区分析及其地质意义[J]. 矿物岩石, 23(3): 82-86. [Liu Rui'e, Huang Yueming, Wei Xiaofeng, et al. 2003. Analysis of pro-

- venance of Late Paleozoic in the northern Ordos Basin and its geological significance[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 23(3): 82-86.]
- 刘新宇,邵磊,史德锋,等. 2021. 西沙西科1井元素地球化学特征与海平面升降的关系[J]. *海洋地质前沿*, 37(6): 8-17. [Liu Xinyu, Shao Lei, Shi Defeng, et al. 2021. Element geochemistry of well Xike 1 on the Xisha Islands and its bearing on sea level fluctuation [J]. *Marine Geology Frontiers*, 37(6): 8-17.]
- 刘英辉,蔡华,段冬平,等. 2022. 西湖凹陷平湖地区平湖组海侵体系域潮控三角洲—潮坪沉积特征及模式[J]. *海洋地质前沿*, 38(1): 33-40. [Liu Yinghui, Cai Hua, Duan Dongping, et al. 2022. The sedimentary characteristics of tidal delta and tidal flat in transgressive system tract of Pinghu Formation in Pinghu area, Xihu Sag[J]. *Marine Geology Frontiers*, 38(1): 33-40.]
- 刘志飞, Stewart L K. 2002. 图形显示和比较古水流数据的一种软件(PC99):以青藏高原北部可可西里盆地新生代古水流数据为例[J]. *沉积学报*, 20(2): 354-358. [Liu Zhifei, Stewart L K. 2002. A software tool for graphically displaying and comparing paleocurrent data (PC99): An example utilizing paleocurrent data of the Cenozoic Hoh Xil Basin, northern Tibet[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(2): 354-358.]
- 彭畅, Steel R J, 龚承林, 等. 2023. 潮汐沉积过程及沉积特征研究综述[J]. *古地理学报*, 25(5): 1069-1089. [Peng Yang, Steel R J, Gong Chenglin, et al. 2023. A review on tidal depositional processes and characteristics[J]. *Journal of Palaeogeography*, 25(5): 1069-1089.]
- 沈玉林. 2009. 鄂尔多斯中东部晚古生代古地理及高效储层控制因素研究[D]. 徐州:中国矿业大学. [Shen Yulin. 2009. Study on palaeogeography and control factor analysis of efficient reservoir development in Late Paleozoic in middle-eastern Ordos[D]. Xu-zhou: China University of Mining and Technology.]
- 宋慧波, 黄志伟, 胡斌, 等. 2020. 豫西禹州地区太原组旋回沉积与海平面变化特征[J]. *地质学报*, 94(12): 3790-3802. [Song Huibo, Huang Zhiwei, Hu Bin, et al. 2020. Characteristics of cyclic deposition and sea level changes of the Taiyuan Formation in Yuzhou city of western Henan province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(12): 3790-3802.]
- 孙肇才. 1980. 鄂尔多斯盆地北部地质构造格局及前中生界的油气远景[J]. *石油学报*, 1(3): 7-17. [Sun Zhaocai. 1980. The tectonic framework and petroleum prospectivity of Pre-Mesozoic in the northern part of the Eerduos (Ordos) Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1(3): 7-17.]
- 田景春, 刘伟伟, 王峰, 等. 2014. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界致密砂岩储层非均质性特征[J]. *石油与天然气地质*, 35(2): 183-189. [Tian Jingchun, Liu Weiwei, Wang Feng, et al. 2014. Heterogeneity of the Paleozoic tight sandstone reservoirs in Gaoqiao area of Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 35(2): 183-189.]
- 王峰, 田景春, 陈蓉, 等. 2010. 鄂尔多斯盆地北部下石盒子组盒8物源分析及沉积特征[J]. *物探化探计算技术*, 32(1): 41-47. [Wang Feng, Tian Jingchun, Chen Rong, et al. 2010. Sedimentary characteristics and provenance analysis of the 8th member of Xiashihezi Formation in the northern Ordos Basin[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 32(1): 41-47.]
- 王国茹. 2011. 鄂尔多斯盆地北部上古生界物源及层序岩相古地理研究[D]. 成都:成都理工大学. [Wang Guoru. 2011. The study of sources and senquence-lithofaces palaeogeography of Upper Palaeozoic, northern Ordos[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.]
- 王玉环. 2006. 鄂尔多斯盆地西部前陆区上古生界沉积—储层分析[D]. 西安:西北大学. [Wang Yuhuan. 2006. Analysis of sedimentary & reservoir characteristics on the Upper Paleozoic of western foreland area in Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University.]
- 卫平生, 李天顺, 李安春, 等. 2005. 巴彦浩特盆地石炭系沉积相及沉积演化[J]. *沉积学报*, 23(2): 240-247. [Wei Pingsheng, Li Tian-shun, Li Anchun, et al. 2005. Carboniferous sedimentary evolution and reservoir estimation in Bayanhot Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(2): 240-247.]
- 吴静仪, 王峰, 田景春, 等. 2025. 鄂尔多斯盆地西缘中部羊虎沟组沉积相及沉积演化:以忠6井区为例[J]. *断块油气田*, 32(1): 79-87. [Wu Jingyi, Wang Feng, Tian Jingchun, et al. 2025. Sedimentary facies and sedimentary evolution of Yanghugou Formation in middle western margin of Ordos Basin: Taking well area Zhong 6 as an example[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 32(1): 79-87.]
- 阎存凤, 袁剑英, 赵应成, 等. 2006. 蒙、甘、青地区侏罗纪孢粉组合序列及古气候[J]. *天然气地球科学*, 17(5): 634-639. [Yan Cun-feng, Yuan Jianying, Zhao Yingcheng, et al. 2006. Jurassic spora-pollen assemblages and paleoclimatic in Innermongolia, Gansu, Qinghai, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 17(5): 634-639.]
- 杨华, 傅强, 齐亚林, 等. 2016. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长期古湖盆生物相带划分及地质意义[J]. *沉积学报*, 34(4): 688-693. [Yang Hua, Fu Qiang, Qi Yalin, et al. 2016. The paleontology phase zones and its geological significance on the Late Triassic Yanchang stage palaeo-lacustrine Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(4): 688-693.]
- 曾允孚, 夏文杰. 1986. 沉积岩石学[M]. 北京:地质出版社. [Zeng Yunfu, Xia Wenjie. 1986. *Sedimentary petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House.]
- 翟咏荷, 何登发, 开百泽. 2024. 鄂尔多斯盆地及邻区中—晚二叠世构造—沉积环境与原型盆地演化[J]. *岩性油气藏*, 36(1): 32-44. [Zhai Yonghe, He Dengfa, Kai Baize. 2024. Tectonic-depositional environment and prototype basin evolution of Middle-Late Permian in Ordos Basin and adjacent areas[J]. *Lithologic Reservoirs*, 36(1): 32-44.]
- 张福礼. 2002. 鄂尔多斯盆地早古生代复合的古构造体系与天然气[J]. *地质力学学报*, 8(3): 193-200. [Zhang Fuli. 2002. Compound ancient tectonic system and natural gas of Early Paleozoic in Ordos Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 8(3): 193-200.]
- 张靖芪, 虎建玲, 谢远飞, 等. 2025. 鄂尔多斯盆地西北缘晚石炭世—中二叠世沉积背景特征与演化[J]. *沉积学报*, 43(1): 121-138.

- [Zhang Jingqi, Hu Jianling, Xie Yuanfei, et al. 2025. Depositional background and evolution of Late Carboniferous–Middle Permian, northwestern margin of the Ordos Basin, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(1): 121-138.]
- 赵重远. 1990. 华北克拉通盆地天然气赋存的地质背景[J]. *地球科学进展*, 5(2): 40-42. [Zhao Zhongyuan. 1990. Geological background of natural gas occurrence in North China Craton basin[J]. *Advances in Earth Science*, 5(2): 40-42.]
- 朱淑玥, 刘磊, 虎建玲, 等. 2023. 鄂尔多斯盆地西缘晚石炭世羊虎沟组源—汇系统特征及古地理格局[J]. *沉积学报*, 41(5): 1430-1450. [Zhu Shuyue, Liu Lei, Hu Jianling, et al. 2023. Characteristics of the source-to-sink system and paleogeographical pattern from the Upper Carboniferous Yanghugou Formation in western margin of the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(5): 1430-1450.]
- 朱筱敏. 2008. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京: 石油工业出版社: 484. [Zhu Xiaomin. 2008. *Sedimentary petrology*[M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press: 484.]
- Algeo T J, Li C. 2020. Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287: 8-26.
- Bhattacharya J P, Copeland P, Lawton T F, et al. 2016. Estimation of source area, river paleo-discharge, paleoslope, and sediment budgets of linked deep-time depositional systems and implications for hydrocarbon potential[J]. *Earth-Science Reviews*, 153: 77-110.
- Chen R, Wang F, Li Z, et al. 2020. Late Paleozoic provenance shift in the east-central Ordos Basin: Implications for the tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 215: 104799.
- Dickinson W R, Gehrels G E. 2009. U-Pb ages of detrital zircons in Jurassic eolian and associated sandstones of the Colorado Plateau: Evidence for transcontinental dispersal and intraregional recycling of sediment[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 121(3/4): 408-433.
- Folk R L. 1980. *Petrology of sedimentary rocks*[M]. Austin: Hemphill Publishing Company: 28-51.
- James B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 111(1/2/3/4): 111-129.
- Morton A C, Johnsson M J. 1993. Factors influencing the composition of detrital heavy mineral suites in Holocene sands of the Apure River drainage basin, Venezuela[M]//Johnsson M J, Basu A. Processes controlling the composition of clastic sediments. Boulder: Geological Society of America: 171-185.
- Sun J P, Dong Y P, Zhao J F, et al. 2024. Carboniferous to Triassic polyphase tectonic transition in the western North China Craton: A retroarc basin response to termination of the middle segment of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 136: 4149-4174.
- Wang L J, Lv D W, Hower J C, et al. 2022. Geochemical characteristics and paleoclimate implication of Middle Jurassic coal in the Ordos Basin, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 144: 104848.
- Wang Z W, Liu L, Hu J L, et al. 2024. Dispersion of sandy sediments during marine-continental transition: An integrated study from the Late Paleozoic western Ordos Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 160: 106620.

Sedimentary Facies and Sedimentary Evolution of the Upper Paleozoic Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the Northwestern Margin of the Ordos Basin

WU JingYi¹, WANG Feng^{1,2}, JING XiangHui^{1,3}, WANG Ji¹, XIAO YunXiao¹, XU MingHui¹, ZHANG Min¹, LI Qian¹

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

Abstract: [Objective] The Upper Paleozoic Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the northwestern margin of the Ordos Basin is a good prospect for oil and gas exploration. The strata are completely developed and continuous, with large thickness changes and various types of sedimentary facies. Defining the distribution characteristics of sand

Foundation: Major Scientific and Technological Special Project of PetroChina Changqing Oilfield Company. No. 2023DZZ02

Corresponding author: WANG Feng, E-mail: wangfeng07@cdut.cn

bodies and clarifying the law of sedimentary evolution directly affect the selection of preferred exploration zones for oil and gas. [Methods] This study takes the Yanghugou Formation to Taiyuan Formation in the northwestern margin of Ordos Basin as the target horizon. Based on previous studies, through typical field profile measurement, drilling core observation, paleocurrent direction analysis, logging data, and test data analysis, the sedimentary environment, facies type characteristics, evolution, and model of the study area were evaluated. [Results and Conclusions] There are 19 lithofacies types and three sedimentary systems in the study area, including four sedimentary facies types, and 13 sedimentary microfacies are further divided. The Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the study area is supplied by the two provenance systems of the Alxa ancient land in the northwest of the basin and the Yinshan ancient land in the northeast. The Dickinson triangle plot reveals that the tectonic background of the provenance area is dominated by the recycled orogenic belt. The characteristics of heavy mineral assemblages are clear. The northwestern margin of the basin has a clear affinity with the Alashan Group (Ar_3 - Pt_1), Archean Jining Group (Ar_3), and the Wulashan Group (Ar_{1-2}). The ZTR index shows that the unstable minerals gradually decrease from north to south; analysis of the paleocurrent direction also reflects the material sources from northwest to southeast and from northeast to southwest. Based on the above provenance analysis, paleo-sedimentary environment evolution and sedimentary facies type characteristics, it is clear that the main body of the Yanghugou Formation-Taiyuan Formation in the study area is the coexistence stage of sea and land. During the sedimentary deposition of the Yanghugou Formation, under the background of the revival of Helan aulacogen and the backlog of north-south tectonics, the sea water enters rapidly. The whole study area is controlled by the delta-clastic coastal sedimentary system. The northern source supply is sufficient, resulting in the development of tidal-controlled delta deposits in the north. Affected by tides and waves, tidal flat-barrier island-desalination of lagoons-shelf sedimentary microfacies are developed in the south. During the deposition of the Taiyuan Formation, the crust continued to sink and seawater invaded. During this period, the basin became the most widely distributed period of the sea area. The sedimentary environment was similar to that of the Yanghugou Formation. The overall performance was the coexistence of tidal-controlled delta, tidal flat, desalination of lagoons-barrier island sedimentary environment, and the erosion range in the northern region was relatively reduced, the source supply continued to increase, and the tidal-controlled delta range extended wider to the south.

Key words: Ordos Basin; Yanghugou Formation; Taiyuan Formation; sedimentary facies; provenance analysis; sedimentary environment; sedimentary evolution