

鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组1段层序结构与沉积演化及其控制因素

夏辉^{1,2}, 王龙^{1,2}, 张道锋^{1,2}, 王继平^{1,2}, 范倩倩^{1,2}, 冯敏^{1,2}, 王艳^{1,2}

(1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安710018)

摘要:庆阳气田是鄂尔多斯盆地天然气增储上产的潜力区,二叠系山西组1段(山1段)为其主力产层,然而其沉积演化及其控制因素等方面的认识依然不清,制约着气田的勘探开发。综合利用三维地震、测井、岩心及分析化验等资料,应用测井小波变换、INPEFA技术及Fischer图解等分析方法,对庆阳气田山1段沉积层序发育演化及其对古地貌、古水流流向和湖平面变化的响应关系开展了系统性研究。结果表明:山1段可划分为一个三级层序,由完整的水进—水退旋回构成,内部进一步划分出低位体系域、湖侵体系域及高位体系域,可识别出浅水三角洲以及湖泊等沉积体系。Fischer图解表明山1段的湖平面经历过“快速上升—缓慢下降”的变化过程,内部伴随着次级的湖平面振荡。“PA(进积—加积)—R(退积)—AP(加积—进积)”叠加序列的转变响应着沉积相的迁移演化及可容空间的变化。低位域时期,在沉积前微古地貌与沉积期古水流流向的耦合作用下,古地貌斜坡区三角洲砂岩储层广泛发育,是后期勘探开发的潜在有利区。

关键词:湖平面变化;层序结构;沉积演化;山西组;庆阳气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Sequence architecture, sedimentary evolution and controlling factors of the Permian Shan-1 Member, Qingyang gas field, southwestern Ordos Basin

Xia Hui^{1,2}, Wang Long^{1,2}, Zhang Daofeng^{1,2}, Wang Jiping^{1,2}, Fan Qianqian^{1,2}, Feng Min^{1,2}, Wang Yan^{1,2}

(1. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China;

2. National Engineering Laboratory of Low-permeability Oil & Gas Exploration and Development, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: The Qingyang gas field in the Ordos Basin is the most promising for reserve growth and production addition, with the first member of Permian Shanxi Formation (Shan-1) being the main pay zone. However, a lack of understanding to the sedimentary evolution and controlling factors of the member hinders further exploration and development of the field. A systematic study was then carried out on the development and evolution of sedimentary sequences of the member as well as its response to palaeogeomorphology, paleocurrent and lake level changes based on analyses of 3D seismic, logging, core and test data through logging wavelet transform, INPEFA and Fischer plots. The results show that the member contains a third-order sequence of a full transgressive-regressive cycle. The sequence can be further divided into the low stand, transgressive and high stand system tracts. Depositional systems are recognized to be shallow-water deltas and lacustrine systems. Fischer plots reveal that the lacustrine level change during deposition of the member experienced a rapid transgression to a slow regression, accompanied by the secondary lake-level fluctuation. The stacking succession recording PA (progradation to accretion) to R (retrogradation) then to AP (accretion to progradation) corresponds to the migration and evolution of sedimentary facies and the changes in accommodation space. The delta sandstone reservoirs, widely developed in ancient landform slope area during the low stand system tracts, are considered the potential targets for exploration and development of gas in the field.

Key words: lake level fluctuation; sequence architecture; sedimentary evolution; Shanxi Formation; Qingyang gas field; Ordos Basin

收稿日期:2022-04-10;修订日期:2022-09-22。

第一作者简介:夏辉(1991—),男,博士、工程师,沉积学与储层地质学。E-mail: xiahui_cq@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05050)。

引用格式:夏辉,王龙,张道锋,等.鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组1段层序结构与沉积演化及其控制因素[J].石油与天然气地质,2022,43(6):1397-1412. DOI:10.11743/ogg20220610.

Xia Hui, Wang Long, Zhang Daofeng, et al. Sequence architecture, sedimentary evolution and controlling factors of the Permian Shan-1 Member, Qingyang gas field, southwestern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6):1397-1412. DOI:10.11743/ogg20220610.

庆阳气田位于鄂尔多斯盆地西南部,天然气三级地质储量超 $2\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,勘探开发远景可观^[1-3],二叠系山西组1段(山1段)是其主力产层。为避免不同学术观点的分歧,近年来学者们倡导独立于模式的层序地层学标准化研究^[4-6]。将传统的井-震结合定性层序划分与基于测井的小波变换、INPEFA技术等定量划分相结合,可以很好地解决陆相湖盆层序划分中关键界面难以识别问题,目前已成为层序划分方法的发展趋势之一^[7-8]。在等时地层格架内揭示沉积充填演化过程,进行砂体分布预测是盆地分析及石油工业界研究的热点领域^[9-11]。此外,三角洲-河流过渡沉积环境中,不同可容空间下层序结构样式及其内部沉积充填特征也受到学者们的广泛关注^[12-14]。

前人在鄂尔多斯盆地南部研究区及邻区山西组的沉积特征^[15-18]、物源体系^[19-21]及构造演化^[22-23]等方面取得了丰硕的成果,但是大多是在岩性地层单元下以大尺度开展的,而在等时地层格架内针对山1段内部的层序结构及沉积演化研究仍然较为缺乏,其控制因素尚不明晰,这些关键地质问题制约着气田的勘探开发步伐。学者们应用不同的层序地层学理论,针对研究区及邻区山西组提出过多种层序地层划分方案,然而不同成果之间存在明显分歧。朱筱敏等(2002)最早将太原组-山西组划分为一个三级层序^[15],山西组相当于高位体系域,主要发育三角洲体系。陈洪德等(2011)在探讨盆地山西组沉积环境时,将本溪组-山西组划分为一个超长期旋回(对应二级层序),太原组-山西组相当于高位体系域,山1段发育浅水曲流河三角洲沉积^[24]。近年来,于兴河等(2017)在盆地南部及邻区山西组划分出1个二级层序,其中山1段作为1个三级层序,沉积期发育曲流河三角洲体系^[25]。

本文综合利用三维地震、钻井、测井、岩心及分析化验等资料,在前人研究基础上,通过井-震结合追踪对比,应用测井小波变化及INPEFA技术,建立庆阳气田研究区山1段层序地层格架,在等时格架内揭示山1段沉积演化规律,探讨古地貌、古水流流向及湖平面变化等因素的控制作用。该成果丰富了陆相湖盆浅水三角洲体系沉积演化及控制作用的基础地质认识,也为研究区后续的油气勘探开发提供了理论借鉴。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地可划分为伊盟隆起、西缘冲断带、天环坳陷、伊陕斜坡、渭北隆起及晋西挠曲带6个一级构造单元,庆阳气田位于鄂尔多斯盆地西南部,本次研究区主要包括天环坳陷东南部和伊陕斜坡西南部的部分地区(图1)。

受早古生代中央古隆起隆升作用的影响,研究区缺失下古生界奥陶系和上古生界石炭系,二叠系与下古生界呈不整合接触^[23]。研究区晚古生代整体为一套海-陆过渡相沉积建造^[24],二叠系自下而上依次发育下统太原组、山西组、中统下石盒子组、上石盒子组以及上统石千峰组。山西组自下而上划分为山2段和山1段,后者是本次研究的目的层段,自下而上划分出3个亚段,依次为山1³、山1²及山1¹亚段。山1³亚段和山1¹亚段岩性均以灰白色、灰绿色细-粗砂岩为主,前者砂岩广泛发育,局部发育含砾粗砂岩,山1²亚段由厚层泥岩与薄层砂岩间互发育构成。山1段主要发育浅水三角洲及滨浅湖沉积。

2 层序单元划分与结构特征

2.1 层序界面特征及单元划分

层序是指由不整合及其对应的整合界面所限定的一套具有成因联系的地层单元,是盆地分析的基本等时地层单元^[26]。通过井-震结合追踪对比、测井小波变换及INPEFA技术综合分析,在研究区二叠系中划分出3个二级层序及14个三级层序,二级层序分别相当于其下统太原组-山西组、中统下石盒子组-上石盒子组及上统石千峰组。山西组依据地震反射特征、沉积旋回、地层叠置样式、测井小波系数曲线及INPEFA曲线等划分出2个三级层序SQ1和SQ2(图2,图3),本次重点研究层段山1段与SQ2相当,内部依据初始湖泛面和最大湖泛面可进一步划分出低位体系域(LST)、湖侵体系域(TST)和高位体系域(HST)。

三级层序界面SB1是山西组的底界面,在三维地震剖面上表现为低频、连续性好、强振幅的波峰反射结

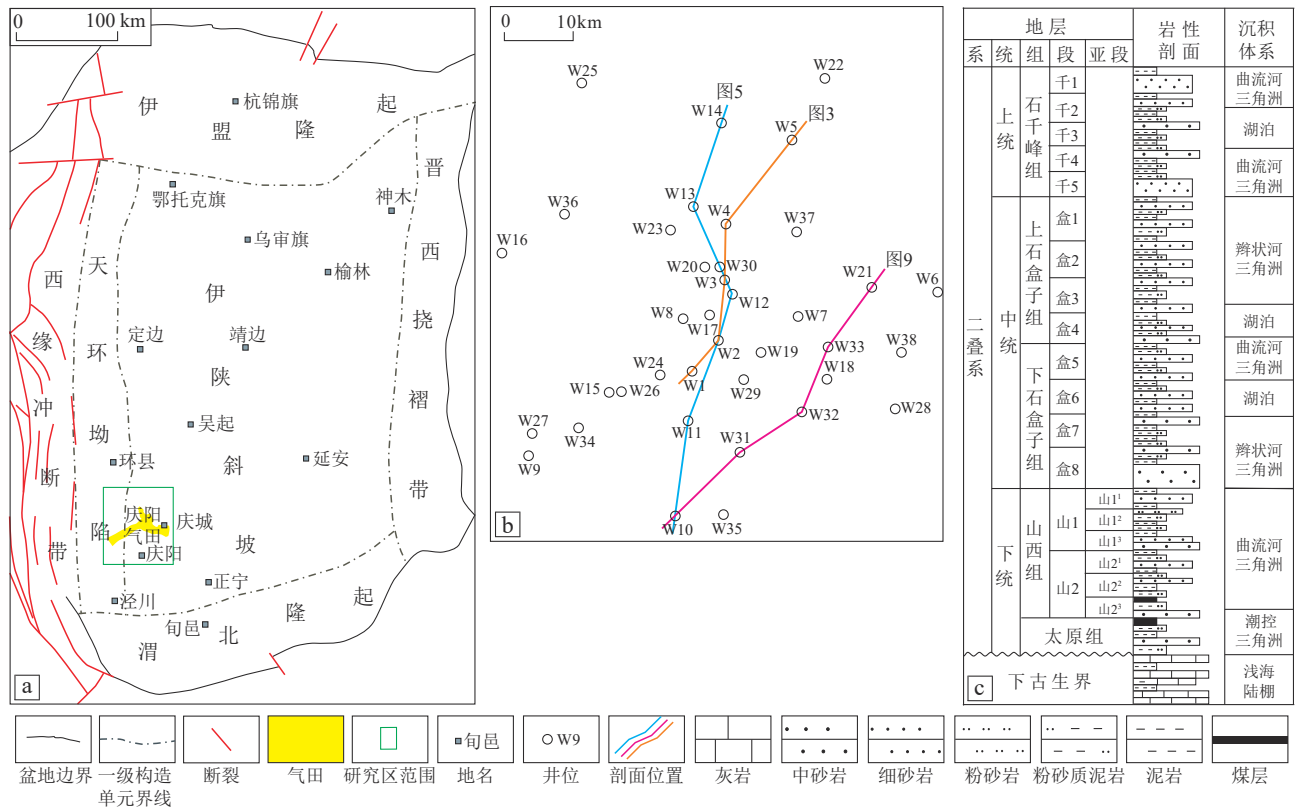


图1 鄂尔多斯盆地庆阳气田构造单元划分(a)、井位分布(b)及地层综合柱状图(c)

Fig. 1 Sketch map showing the subdivision of tectonic units in the Qingyang gas field of Ordos Basin (a) with the distribution of well locations (b) and comprehensive stratigraphic column (c) of the study area

构特征,对应 TP_{10} 反射界面(图3)。在测井曲线上,界面上下具有显著突变特征,钻井岩性上可观察到太原组煤层向山西组砂泥岩明显转变的特征(图4a)。二级层序界面SB3为山西组与下石盒子组的分界面,也是山1段的顶界面,与地震剖面上 TP_8 反射界面对应。在地震剖面上显示出低频、连续性好、中强振幅反射特征,该界面上下振幅强弱存在明显差异(图3)。在W8井中该界面测井曲线发生突变,表现为明显的砂泥岩突变界面(图4c)。三级层序界面SB2是山西组内部的层序界面,为山1段的底界面。该界面在地震剖面上可观察到明显的底超反射特征(图3),界面处往往显示出岩性与电性的突变特征,地层叠置样式由进积式转变为退积式(图4b)。

山1段内部可依据初始湖泛面和最大湖泛面划分出各体系域单元。依据地层叠置样式的转变界面可在研究区中南部大部分井区识别出初始湖泛面,而北部滨浅湖砂泥岩间互发育的局部井区,由于旋回特征不明显,界面较难识别。该界面处表现为界面之下多呈加积或进积样式,界面之上则转变为退积叠置样式。此外,该界面也常表现为沉积相突变界面,由界面之下的(水下)分流河道沉积转变为界面之上的河

道间或滨浅湖滩坝沉积。最大湖泛面分布较为稳定,可以区域追踪对比,表现出退积叠加样向加积或进积样式转变的特征,该界面处以自然伽马高值为特征,广泛发育泛滥平原、分流间湾或滨浅湖等泥质沉积(图4d)。

小波变化和INPEFA技术是基于测井曲线定量划分层序的重要方法和手段^[8,27-29]。小波分析划分层序的理论基础,是对原始测井信号进行小波变换后,可以通过重构的多尺度小波系数曲线识别不同频率、周期的沉积旋回。低频和高频系数曲线分别反映出长周期与短周期的沉积旋回特征^[27]。利用W3井自然伽马曲线进行demy小波一维离散变换分析,在获得的d10小波系数曲线上,层序界面显示出小波系数曲线“高值-低值-高值”的转换特征。在d8小波系数曲线上最大湖泛面具有由低值到高值再变为低值的特征(图3)。对自然伽马曲线进行预测误差分析,综合取得的INPEFA(预测误差趋势)曲线形态、趋势和拐点划分不同级次的层序,利用整体、分段和局部的INPEFA可分别识别出长周期、中周期和短周期的沉积旋回^[29]。在该技术分析中,层序界面主要位于负趋势向正趋势转变的正向拐点位置(图4),代表了砂质含量高于预测

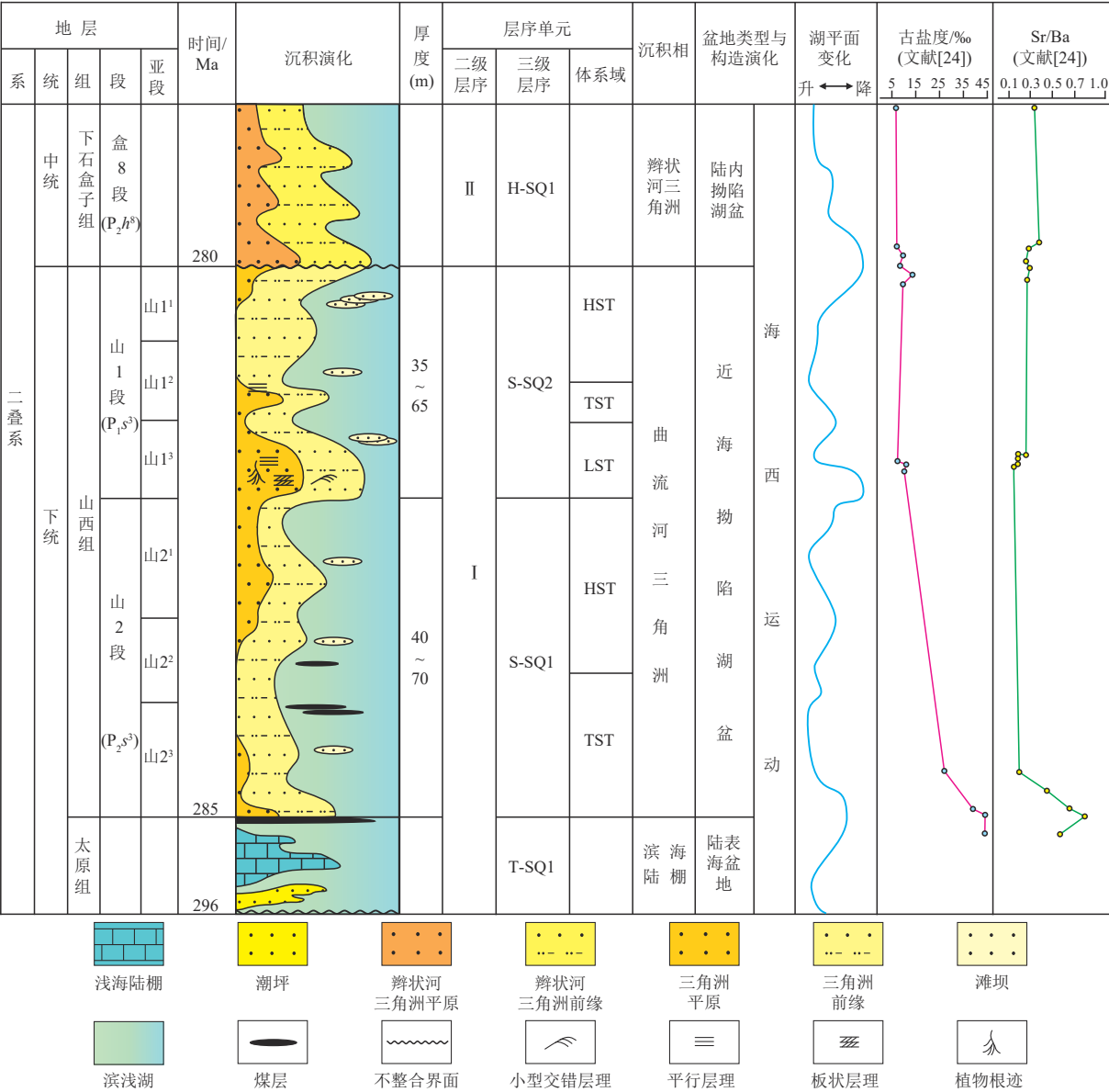


图2 鄂尔多斯盆地庆阳气田山西组层序地层划分

Fig. 2 Sequence stratigraphic division for the Shanxi Formation, Qingyang gas field, Ordos Basin

值向泥质含量高于预测值转变的趋势,表明该时期应属水退向水进转换的阶段^[29],最大湖泛面则对应着分段的负向拐点,初始湖泛面表现为局部的负向拐点(图4)。值得指出的是,把以上两种定量层序划分方法与传统定性划分方法结合时,一方面应该在基于井-震追踪对比建立的高级别(一级至三级)层序格架约束下开展;另一方面,其重构或预测的水退界面仅代表目的层段在某一时期自然伽马值发生转变的位置,在进行界面厘定时,应结合具有地质意义的、代表水退事件开始发生的底突变界面综合分析,尽量避免陷入“定量”的教条化和绝对化。

2.2 沉积层序结构

研究区山1段显示出完整的从水进到水退的沉积结构,其层序分布总体呈现出自东南向西北逐渐增厚的变化趋势(图5)。东南部的W10井沉积厚度仅为39 m,中部各井沉积厚度相当,西北部W14井则增厚至54 m。低位体系域主要由中厚层中-粗砂岩构成,表现为明显的加积叠加样式;湖侵体系域以泥质沉积为主,总体显示出退积叠加样式,局部井位呈现出加积-退积复合样式;高位体系域发育多期砂体,具有明显的进积样式(图5)。南部井区以富砂的

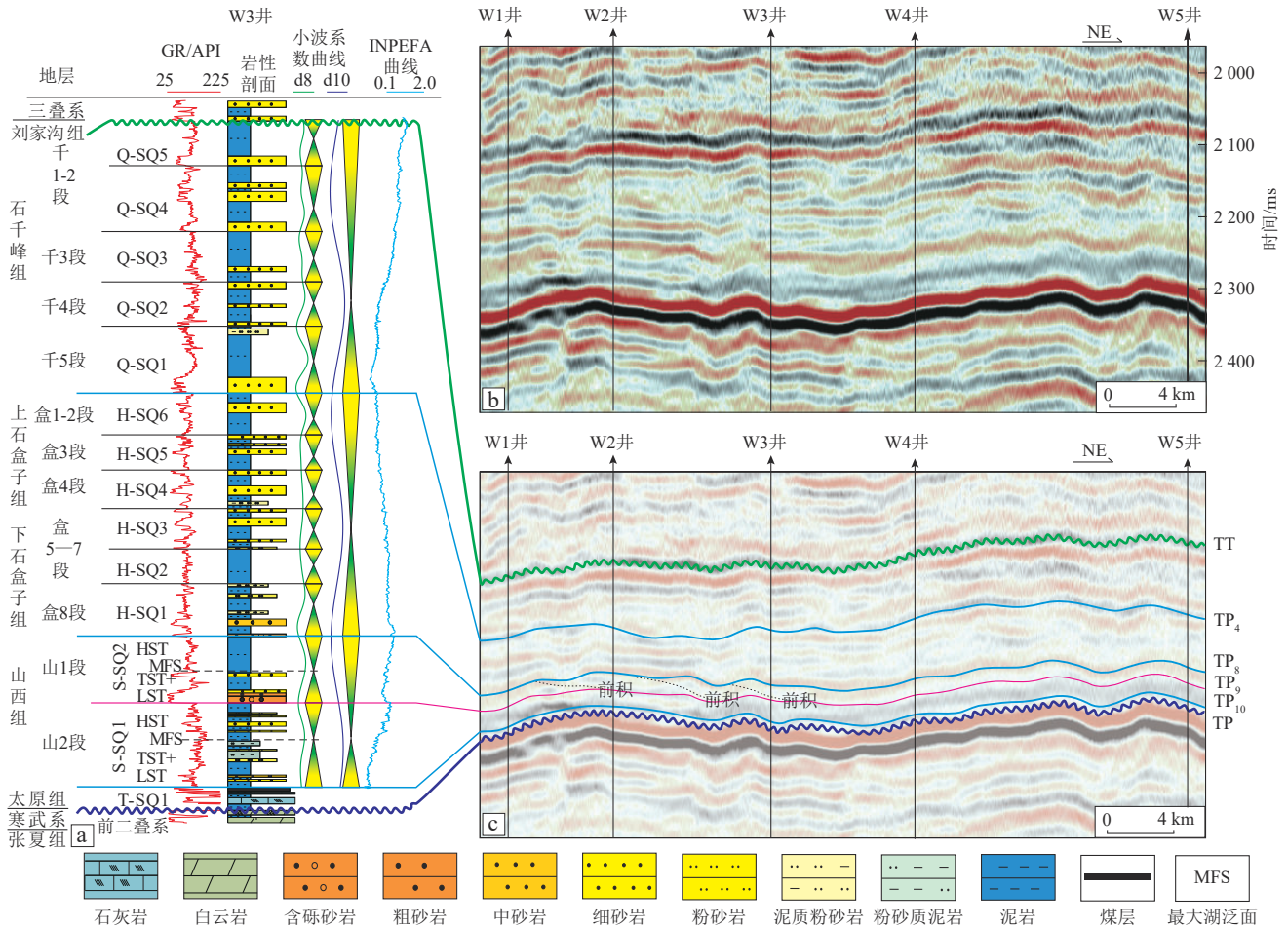


图3 鄂尔多斯盆地庆阳气田上古生界井-震结合建立的层序地层格架(剖面位置见图1)

Fig. 3 Sequence stratigraphic framework revealed by well-tied seismic section of the Upper Paleozoic, Qingyang gas field, Ordos Basin

(See Fig. 1 for the location)

a. 上古生界测井层序地层划分方案; b. 上古生界地震剖面; c. 上古生界地震剖面层序地层划分

水进序列和富泥的水退序列为主,向中部水进—水退序列砂体广泛发育,旋回呈典型的对称性,北部局部井区由砂泥岩互层沉积构成,旋回特征不甚明显。总体上,区内山1段不同地区层序结构特征的差异反映了其沉积相带的迁移及可容空间的变化。

3 沉积体系类型及其演化

3.1 沉积体系类型及特征

通过岩心、测井及三维地震等资料综合分析,在研究区山1段识别出了浅水河流三角洲体系及湖泊体系。

3.1.1 岩相组合及粒度特征

岩相或岩石相是指由单一沉积事件形成的岩石单元,通过分析其组合类型可解释不同沉积环境中形成

的具有成因差异的沉积相或亚相^[26]。通过对研究区30余口取心井的系统描述、分析,山1段可识别出15种岩相类型,并归结出8种主要的岩相组合类型(表1;图6)。

岩相组合FA1由厚层含砾粗砂岩及中—粗砂岩组成(图6a,b,d,f,g),发育类型丰富的交错层理,解释为三角洲平原分流河道沉积。分流河道沉积(FA1)通常与泛滥平原(FA2)或分流间湾(FA4)泥质沉积在垂向上共生,碳质泥岩相代表了三角洲平原泛滥平原沼泽弱还原环境中形成的特有沉积物(图6n)。岩相组合FA3—FA5应属三角洲前缘沉积,块状含砾砂岩相、块状层理砂岩相及平行层理粉砂岩相反映出快速堆积的特点(图6c,e,h),暗色泥砾的发育反映出水下沉积环境的存在(图6c)。FA6—FA8解释为滨浅湖沉积,沙纹层理粉砂岩、波状层理粉砂岩、脉状层理粉砂岩以及含植物根迹的泥岩相反映了典型的水动力频繁动荡

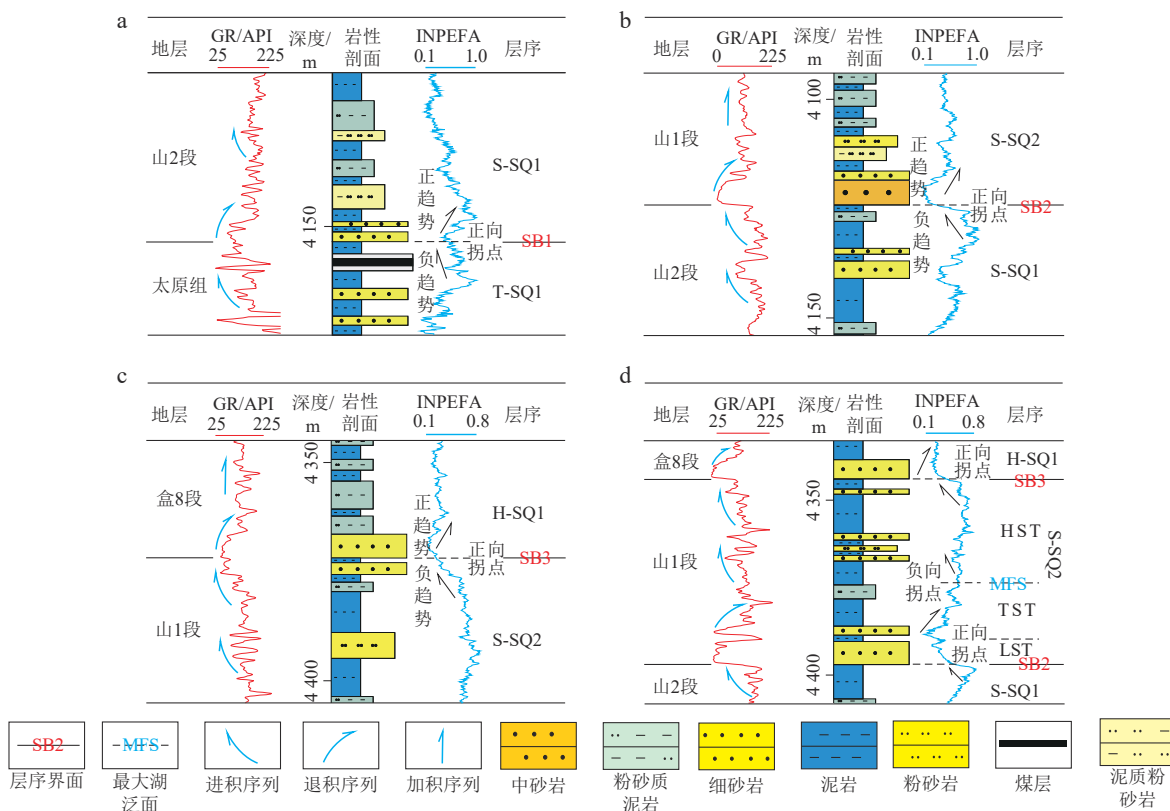


图4 鄂尔多斯盆地庆阳气田山西组层序界面特征

Fig. 4 Sequence boundary characteristics of the Shanxi Formation, Qingyang gas field, Ordos Basin

a. 三级层序界面SB1特征(W6井); b. 三级层序界面SB2特征(W7井); c. 二级层序界面SB3特征(W8井); d. 三级层序SQ2界面特征(W9井)

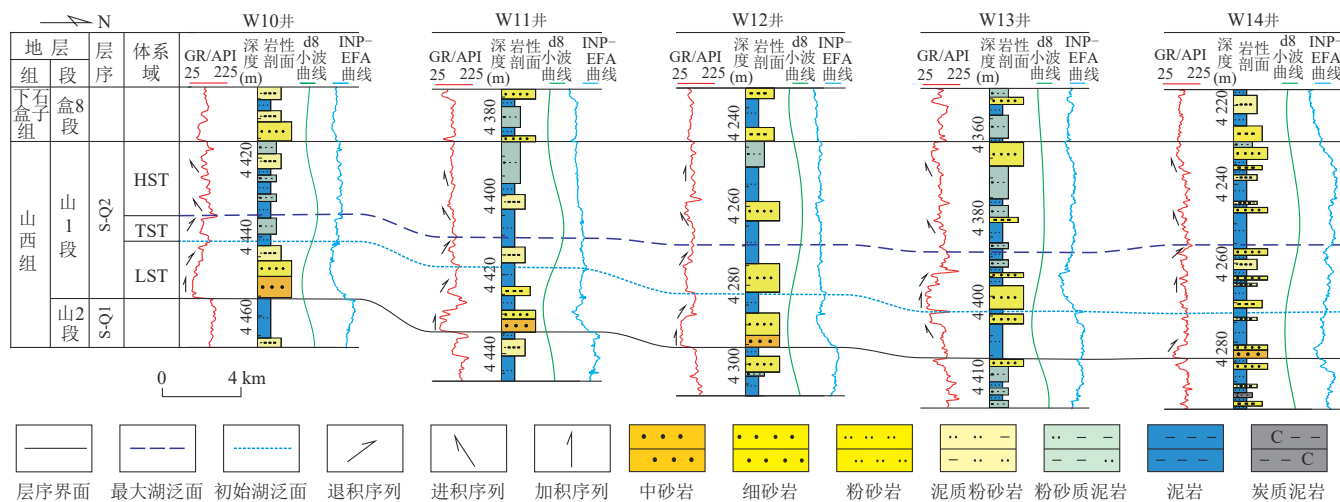


图5 鄂尔多斯盆地庆阳气田山1段层序对比格架(剖面位置见图1)

Fig. 5 Sequence correlation framework of Shan-1 Member in Qingyang gas field, Ordos Basin (See Fig. 1 for the location)

的滨岸环境(图6i,j,k,m)。

粒度概率曲线能够很好地反映出沉积水动力条件的变化,是沉积相分析的基础工作^[30]。山1段低位体系域的岩石类型主要为细粒、细-粗粒岩屑砂岩、长石岩屑砂岩及少量岩屑石英砂岩。粒度概率曲线以两段式和三段式为主,具有跳跃总体含量高、斜率较大、包

含2个次总体、悬浮总体含量低等特征,反映出牵引流的沉积特点(图7)。例如,研究区西南部的W26井和W27井样品的粒度概率曲线呈一跳一悬两段式,整体缺乏滚动总体,跳跃总体含量在60%~80%,粒径 Φ 值在0.5~2.5,斜率较大,约65°,而悬浮总体含量低(图7a),较高的跳跃总体含量说明其形成于强水动

表1 鄂尔多斯盆地庆阳气田山1段岩相组合类型

Table1 The classification of lithofacies associations of Shan-1 Member, Qingyang gas field, Ordos Basin

岩相组合	沉积特征	沉积相解释
FA1	厚层块状层理、板状交错层理及平行层理粗砂岩:底部见明显冲刷面,含石英砾岩,大套厚层块状粗砂岩向上粒度变细,板状交错层理、平行层理较发育,顶部为块状中砂岩	分流河道
FA2	中-薄层块状灰色泥岩:块状层理、水平层理泥岩或炭质泥岩,偶见泥裂构造	泛滥平原
FA3	厚层块状层理、平行层理、交错层理中-细砂岩:底部多见明显的冲刷面,含暗色泥砾,发育块状层理、槽状交错层理、板状交错层理、楔状交错层理、平行层理,底部为中-细砂岩,向上岩性变为细砂岩或粉砂岩	水下分流河道
FA4	中-薄层灰色块状层理泥岩或粉砂质泥岩:夹在大套的块状层理、平行层理、楔状交错层理及板状交错层理砂岩中间	分流间湾
FA5	中层平行层理、波状层理及楔状交错层理细-粗砂岩:呈反粒序,底部细粒泥质粉砂岩或粉砂岩向上粒度变粗,上部为粗砂岩	河口坝
FA6	中-薄层平行层理、脉状层理、沙纹层理及平行层理粉砂岩:反粒序,由粉砂岩向上变为粗砂岩,发育平行层理、脉状层理及沙纹层理	坝砂
FA7	薄层块状层理、平行层理细砂岩:薄层细砂岩,发育平行层理及块状层理	滩砂
FA8	厚层块状灰色或灰黑色泥岩:泥岩或粉砂质泥岩,以块状层理为主	浅湖泥

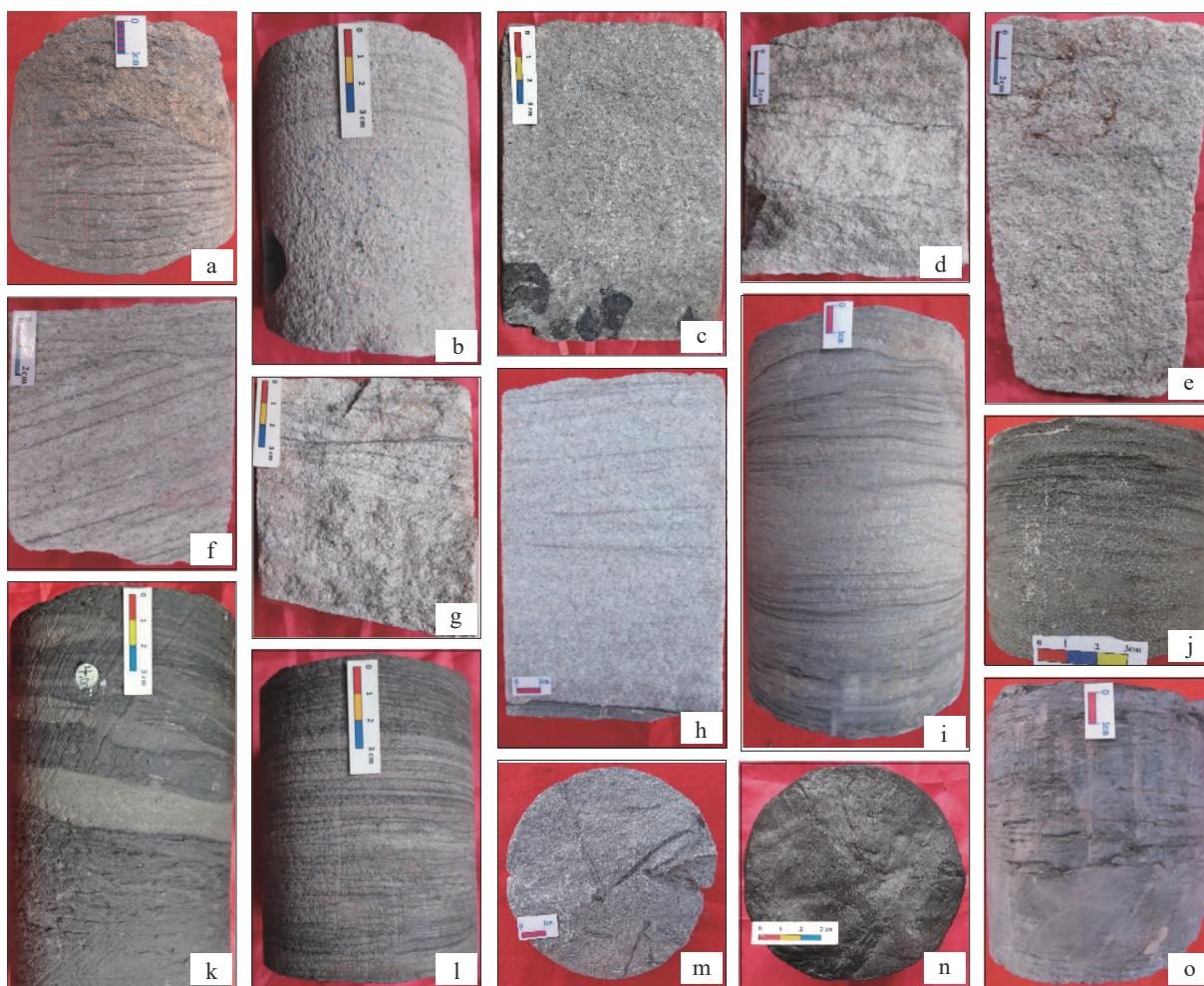


图6 鄂尔多斯盆地庆阳气田山1段典型岩相类型岩心照片

Fig. 6 Typical lithofacies types of Shan-1 Member, Qingyang gas field, Ordos Basin

a. 具冲刷面的含砾粗砂岩相, W15井, 埋深4 246.10 m; b. 平行层理砂岩相, W8井, 埋深4 422.95 m; c. 块状层理含砾砂岩相, W16井, 埋深4 747.86 m; d. 槽状交错层理砂岩相, W17井, 埋深4 336.08 m; e. 块状层理砂岩相, W18井, 埋深4 165.76 m; f. 板状交错层理砂岩相, W19井, 埋深4 230.20 m; g. 楔状交错层理砂岩相, W20井, 埋深4 724.20 m; h. 平行层理粉砂岩相, W3井, 埋深4 271.93 m; i. 沙纹层理粉砂岩相, W21井, 埋深4 034.81 m; j. 波状层理粉砂岩相, W22井, 埋深4 080.40 m; k. 脉状层理粉砂岩相, W16井, 埋深4 751.89 m; l. 水平层理粉砂质泥岩相, W23井, 埋深4 307.54 m; m. 含植物根迹块状泥岩相, W21井, 埋深4 033.04 m; n. 块状层理炭质泥岩相, W24井, 埋深4 370.16 m; o. 块状层理杂色泥岩相, W25井, 埋深4 327.40 m

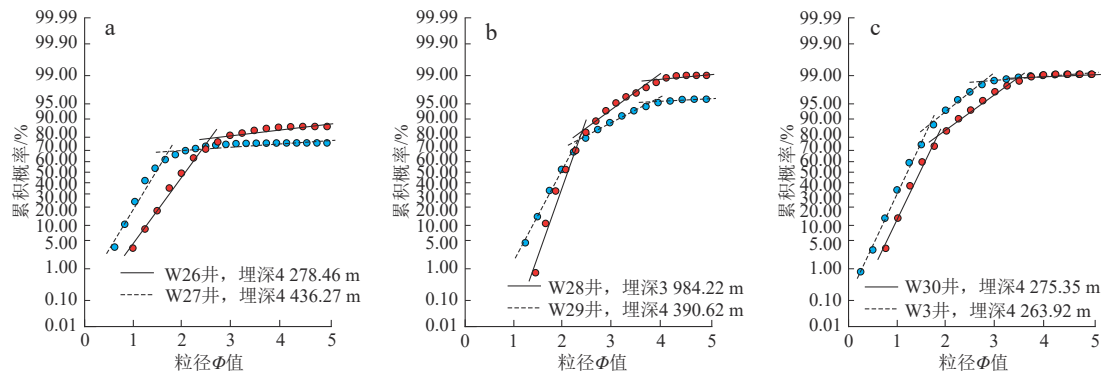


图7 鄂尔多斯盆地庆阳气田山1段粒度累积概率曲线

Fig. 7 Probability accumulation curves of grain size of the Shan-1 Member, Qingyang gas field, Ordos Basin

力条件下,推测应属三角洲平原环境。向湖盆方向的中部和东北部成因砂体的粒度曲线表现为三段式(图7b,c),且跳跃总体含量高,均包含两个次总体。W28井悬浮总体含量明显增高,说明水动力能量减弱,两个次总体反映出三角洲前缘或滨岸环境双向水流回流冲刷的水动力特征。总体上,区内不同位置钻井的粒度特征,揭示出沉积环境沿沉积倾向由强水动力的三角洲平原过渡到前缘,而后演变为水体频繁动荡的滨岸环境。

3.1.2 浅水三角洲体系

浅水河流三角洲是由曲流河汇入蓄水盆地时在滨岸带形成的沉积体系,其三角洲前缘通常位于浪基面之上^[31]。单位体积内钴元素的含量与沉积速率相关,含量越低,沉积速率越慢,往往反映浅水环境,前人在研究区利用多口钻井的钴元素含量经由古水深公式计算^[32],认为山1段古水深范围为0.20~16.03 m,平均古水深8.46 m^①。

研究区山1段浅水三角洲体系发育平原和前缘沉积。前三角洲和滨浅湖泥质沉积往往不易区分,本文不作重点讨论。浅水三角洲平原主要发育分流河道和泛滥平原沉积,岩相组合为FA1—FA2,W15井的沉积序列表现为多期分流河道相互叠置,复合河道的厚度与上覆泛滥平原沉积厚度相当,具典型的河流“二元结构”,测井曲线以钟形—箱形复合形为特征(图8a)。泛滥平原沉积发育典型的泥炭沼泽环境形成的暗色炭质泥岩(图6n)。

三角洲前缘发育水下分流河道、河口坝和分流间湾等微相。在沿着沉积倾向的地震剖面上,可观察到明显的叠瓦状前积反射现象(图3)。水下分流河道以灰白色、灰绿色细—中砂岩为主,垂向序列表现

为典型的间断正韵律,多期水下分流河道往往相互切割叠置。以研究区W7井为例,取心井段显示出4期水下分流河道相互叠置,各期沉积厚度在1.4~2.6 m,由多个正粒序叠加构成正旋回,其垂向岩相组合为FA3(表1),测井曲线形态为钟形(图8b)。这种沉积序列形成于浅水湖盆背景下,由于可容空间有限,后期发育的水下分流河道往往会冲刷前期的粉砂和泥质沉积,所以表现为多期水下分流河道砂体的相互切割叠置,而各期之间往往缺乏细粒沉积物。

研究区的河口坝沉积垂向序列表现为多个反粒序复合构成的反旋回,其岩相组合为FA5,以漏斗形测井相为特征。如W29井取心段可观察到多期河口坝叠加(图8c),各期之间有泥质间隔,单期坝体平均厚度为1.5 m,岩性由泥质粉砂岩向上变为中砂岩,发育波状层理和沙纹层理(图8c)。由于水体较浅,水下分流河道迁移频繁,河口坝常遭受冲蚀改造,而保存下来的多是残余坝体^[33],在研究区最薄的坝体仅0.5 m,垂向上与水下分流河道沉积共生(图8d)。

3.1.3 湖泊体系

研究区山1段发育的湖泊体系包括滩坝沉积和滨浅湖沉积。滩坝是形成于滨浅湖区受湖浪、潮流和沿岸流共同作用的一种沉积砂体^[34],又可分为砂质坝和砂质滩沉积,在研究区可识别出坝主体、坝侧缘、坝间及砂质滩4种微相。

坝主体微相是砂质坝沉积的主体部分,形成于强水动力环境中,受湖浪和沿岸流的选积作用,岩性以细—中砂岩为主,偶尔可见到粗砂岩,岩相组合为FA6,多发育低角度交错层理和浪成沙纹层理,以齿化漏斗形测井相为特征(图8b)。W14井的坝砂厚度为1~4 m,常常与滨浅湖灰色泥质沉积间互发育,其

①长庆油田分公司. 鄂尔多斯盆地陇东地区上古生界储层展布规律与勘探目标评价[R]. 陕西 西安:中国石油长庆油田分公司,2020.

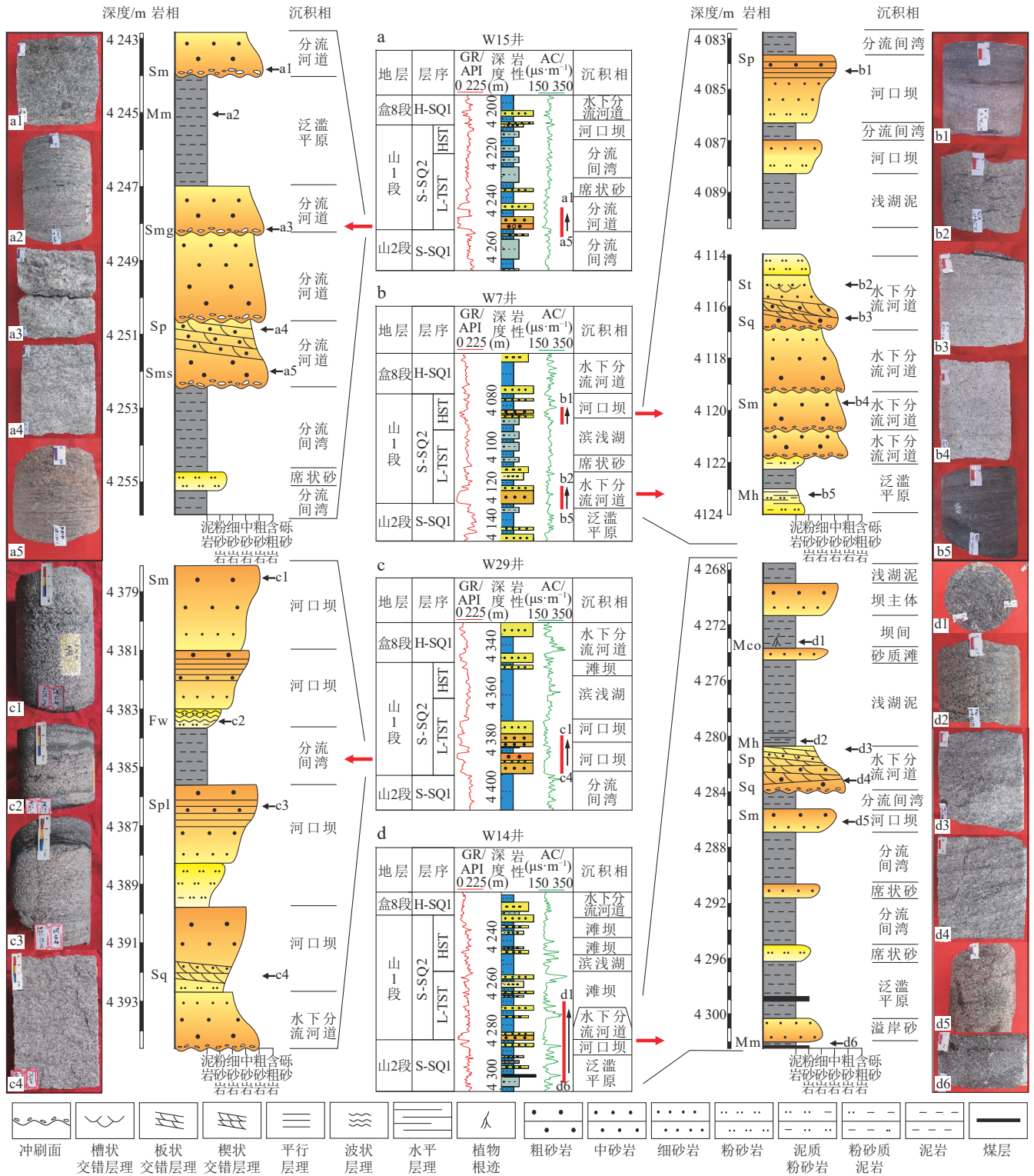


图8 鄂尔多斯盆地庆阳气田山1段典型沉积序列

Fig. 8 Typical sedimentary sequence of the Shan-1 Member, Qingyang gas field, Ordos Basin

Sms. 具冲刷面的含砾粗砂岩相; Smg. 块状层理含砾砂岩相; Sm. 块状层理砂岩相; Sp. 板状交错层理砂岩相; Sq. 楔状交错层理砂岩相; St. 槽状交错层理砂岩相; Spl. 平行层理砂岩相; Fw. 波状层理粉砂岩相; Mm. 块状层理泥岩相; Mh. 水平层理粉砂质泥岩相; Mco. 含植物根迹块状泥岩相

上发育坝侧缘微相, 沉积物粒度变细, 以粉砂岩和细砂岩为主, 发育平行层理。坝间微相以低能沉积环境中形成的块状层理粉砂质泥岩或泥岩为主。砂质

滩形成于相对较弱的水动力环境中, 相较于砂质而言, 其沉积物粒度细、厚度薄, 以细砂岩为主, 沉积厚度在 0.5 ~ 2.0 m, 岩相组合为 FA7, 测井曲线呈指

状,通常与坝砂共生,二者中间发育坝间微相(图8d)。整体上,砂质滩与砂质坝垂向序列表现为多个反粒序相互叠置构成的复合反旋回,各期砂体之间为浅湖泥沉积。

3.2 沉积体系分布与演化

山1段沉积期,研究区的物源主要来源于西南部的碎屑沉积物^[20-21]。山1段由低位、湖侵及高位体系域构成(图9)。低位域沉积期,靠近物源方向的W10井与W31井主要发育三角洲平原沉积,底砂砾岩与泛滥平原构成典型的“二元结构”沉积单元,表现为明显的正旋回。中部的W32井与W33井以三角洲前缘水下分流河道沉积为主,至靠近湖盆中心的W21井,则主要发育多期滩坝砂体。湖侵期,中部井区发育水下分流河道砂体,东北部的W21井发育单期薄层滩坝沉积,砂体规模变小。高位域时期,沉积砂体较为发育,以分流河道、水下分流河道和河口坝沉积为主,往往垂向上多期砂体相互叠置。W21井也发育两期水下分流河道,研究区发育的沉积体系顺物源方向分带性明显,垂向演化反映出山1段沉积期经历了一次完整的水进—水退的演化过程。

综合分析沉积序列、测井相、沉积相对比剖面及沉积砂体分布特征,在研究区可划分出三角洲平原、三角洲前缘以及前三角洲—滨浅湖3个相带区。低位—湖侵体系域沉积期,碎屑沉积体系自西南向东北湖盆内分散、堆积,研究区西南部三角洲平原区发育4支主干古水系,向东北部过渡为三角洲前缘亚相,在W29井区一带水下分流河道发生汇流,三角洲砂体呈朵状广泛

分布。在三角洲前缘侧翼及其前方靠近湖盆区,发育受沿岸流和湖浪选积作用形成的滩坝砂体(图10a)。高位体系域沉积期,随着湖平面逐渐下降,三角洲体系不断发生向湖盆方向的进积,沿着沉积倾向,水下分流河道呈条带状向湖盆内长距离分流推进,而沉积走向上,河道带变窄,较前期沉积砂体的横向延展规模变小(图10b)。

4 控制因素

山西组沉积期,盆地西南部研究区构造活动趋于稳定,为填平补齐阶段,发育近海湖盆背景下的浅水曲流河三角洲^[18,24]。

4.1 古地貌

早二叠世山西期,鄂尔多斯盆地西南部研究区受深部地幔热冷却作用,区内发生缓慢沉降^[22],构造活动整体趋于稳定^[24]。山1段在继承前期古构造格局的基础上,整体接受沉积,处于填平补齐充填演化阶段^[23]。因此,山1段沉积时期,构造作用在研究区主要体现在其对早期沉积前的微古地貌的塑造和构造均衡缓慢沉降引起的可容空间变化的影响。

盆地内宏观构造古地貌对于沉积体系的发育和分布具有重要控制作用^[35-36]。对于不同的微观古地貌单元,由于水动力能量存在差异,进而影响着局部砂体的分布^[36-37]。在层序格架内,选取在研究区发育稳定、广泛分布的最大湖泛面作为古沉积水平面^[35],采用印模法^[38],恢复了山1段(低位—湖侵体系域)沉

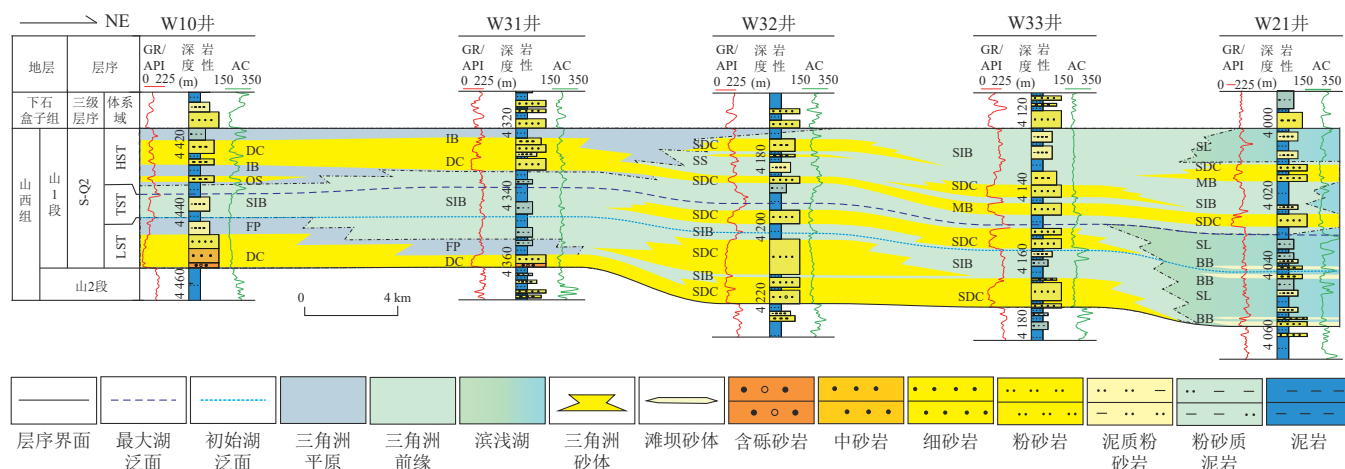


图9 鄂尔多斯盆地庆阳气田山1段连井沉积相剖面(剖面位置见图1)

Fig. 9 Cross-well sedimentary facies correlation of the Shan-1 Member, Qingyang gas field, Ordos Basin (See Fig. 1 for the section location)
DC. 分流河道沉积;FP. 泛滥平原沉积;OS. 溢岸沉积;IB. 分流河道间沉积;SDC. 水下分流河道沉积;SIB. 水下分流河道间沉积;MB. 河口坝沉积;
SS. 席状砂沉积;BB. 滩坝沉积;SL. 滨浅湖沉积

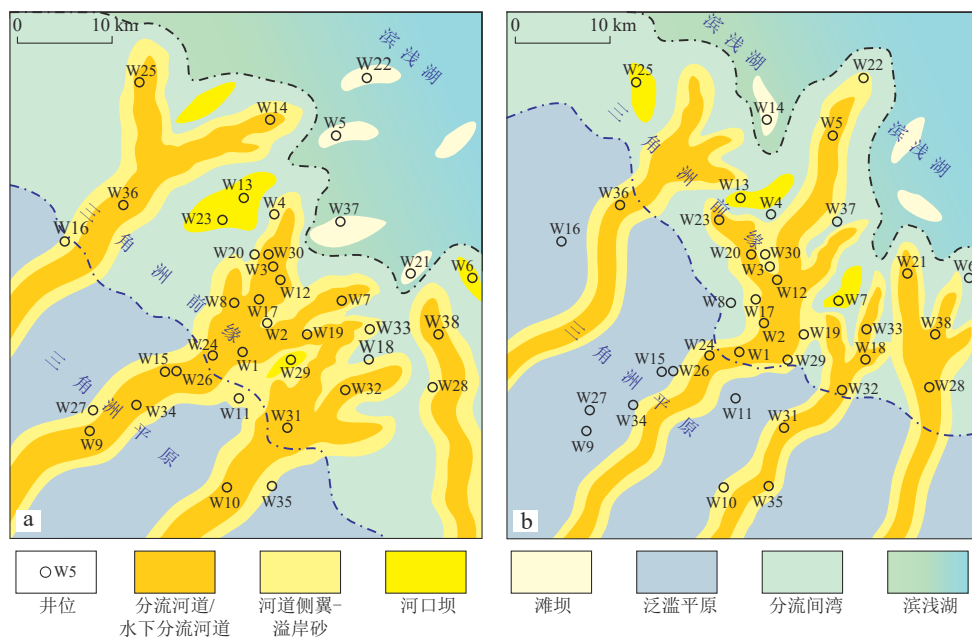


图10 鄂尔多斯盆地庆阳气田山1段各体系域沉积期沉积体系平面分布

Fig. 10 Maps showing depositional systems of each system tract during deposition of the Shan-1 Member, Qingyang gas field, Ordos Basin

a. 低位-湖侵体系域; b. 高位体系域

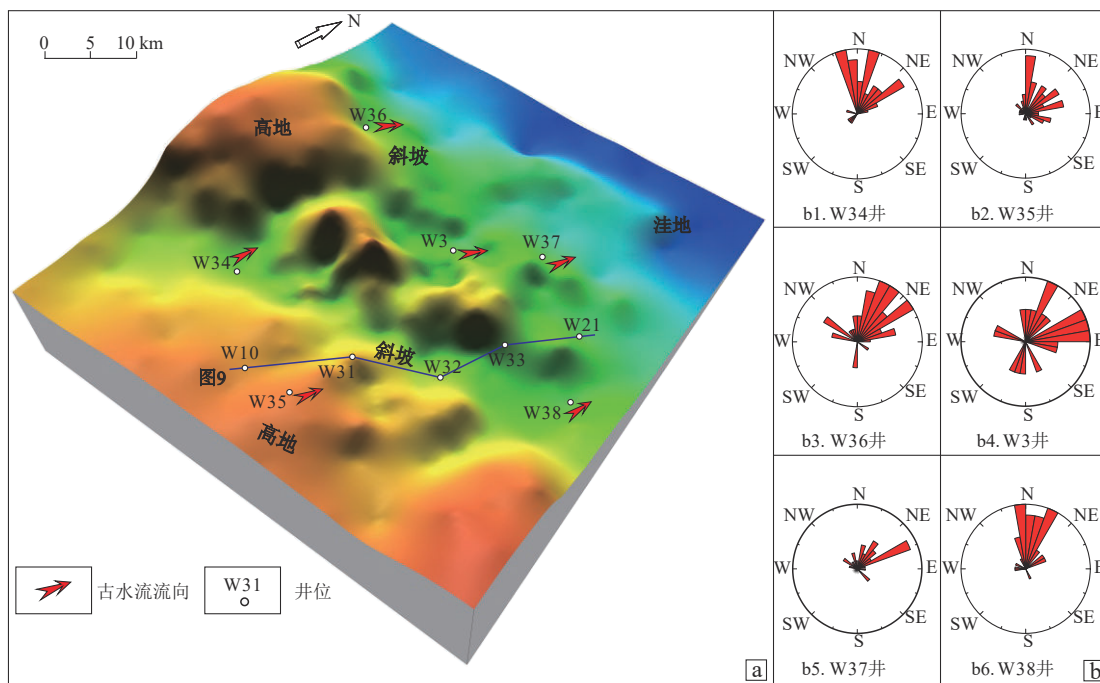


图11 鄂尔多斯盆地庆阳气田山1段沉积前古地貌(a)与沉积期古水流流向(b)

Fig. 11 Palaeogeomorphology before deposition (a) and palaeoflow directions during deposition (b) of the Shan-1 Member, Qingyang gas field, Ordos Basin

积前的微古地貌,划分出高地、斜坡、洼地等不同的微古地貌单元(图11a)。研究区南部和西部为相对高地,沿着SW-NE方向,向东北部盆地内古地形变缓,逐渐演变为斜坡-洼地,最深陷的沉降中心则位于研究区东北部。低位域时期,湖平面整体较低,微古地

貌格局影响着可容空间大小,进而控制着层序内部的结构样式。靠近物源的西南部及中部发育厚层多期叠加的(水下)分流河道砂体,旋回特征清晰,而东北部则由滨浅湖泥岩或薄层滩坝砂构成,旋回特征不明显(图9)。

4.2 古水流流向

前人通过重矿物特征、碎屑岩矿特征、稀土元素特征及碎屑锆石 U-Pb 定年等方面的研究,认为研究区山1段物源来自于西南方向的祁连古陆与西秦岭古陆中北部,主要为元古宙的稳定陆壳基底物质再旋回和大陆造山带物质^[19-21]。

古水流流向为揭示沉积体系沿特定物源方向的分散路径提供了直接证据^[39]。通过研究区6口钻井的地层倾角测井资料,应用极射赤平投影原理绘制的山1段低位域时期古水流流向玫瑰花图上显示,该时期的古水流流向总体呈 SW-NE 方向,局部井区为近 N-S (图 11b),这与前人在该区利用野外露头资料揭示的古水流流向具有较好的可对比性^[21],在研究区西南部的平凉二道沟剖面上,山1段的古水流流向为自西南向东北方向。

综合研究区微古地貌与古水流流向特征,结合过不同地貌单元的连井剖面砂体发育特征(图9),认为山1段低位域时期,沉积砂体的发育分布受微古地貌与古水流流向的耦合作用控制。来自西南物源的碎屑沉积物沿着西南部斜坡-沟槽向盆地内分散、堆积充填。具体表现为:三角洲平原分流河道砂体是由沉积物沿沉积倾向顺地貌高地搬运堆积而成,在三角洲前缘斜坡处砂体沉积厚度明显增大,为砂体富集区;而向东北部盆地的沉积中心,由于水体加深,沉积物受潮流顶托和湖浪冲刷作用,则主要发育薄层滩坝砂体。

4.3 湖平面变化

山西组粘土矿物中高岭石含量明显高于伊利石,而且其 Sr/Cu 比值平均为 4.03 (比值 < 5 代表温湿的古气候),均反映出沉积期温暖湿润的古气候条件^[40]。研究区岩心观察显示,山1段发育的泥岩颜色以灰色、深灰色、灰黑色等为主,植物根迹化石碎片也较为发育(图6),这也反映了沉积期古气候的温暖湿润。山西组山2段至下石盒子组盒8段沉积期盆地古气候逐渐由湿热向干冷转变^[24,41]。气候的变化会造成湖平面的频繁波动,进而控制着三级层序内部结构样式的差异^[12]。

Fischer 图解起源于前人通过研究碳酸盐岩露头沉积旋回表征海平面变化时提出的,后经过修正^[42],目前已作为陆相湖盆研究相对湖平面变化的一种有效方法,其代表了沉积物堆积时引发的新增可容空间的变化^[28,43-44]。山1段沉积期在研究区西南稳定物源供给下^[17-19],若可容空间持续增长,则垂向上地层的沉积厚度会逐渐增大,Fischer 曲线呈正偏移;反之,则表现

为负偏移。一阶差分法是利用对岩性响应敏感的自然伽马测井数据计算目的层段沉积旋回个数和厚度的一种方法^[45]。本次研究选取了研究区南部的 W34 井及北部的 W13 井,对山西组原始自然伽马数据采用线性回归、一阶差分、极值判别等方法各划分出 55 和 69 个超短期旋回(图12),并进一步进行了 Fischer 图解分析。建立了研究区不同区域的相对湖平面变化曲线。

Fischer 图解研究结果表明,山西组整体呈一个完整的升降旋回,内部可识别出 2 期较为明显的次级湖侵,山1段(SQ2)对应第2期。山1段时期图解曲线的旋回厚度累积偏差发生了明显的由正向偏移向负向偏移的转变,反映出可容空间发生过由增大至减小的变化过程。研究区南部 W34 井和北部 W13 井的 Fischer 图解曲线均反映出山1期经历了明显的“湖侵—湖退”演化过程。南部 W34 井山1段相对湖平面上升与下降过程持续的时间大体相当,而北部 W13 井则显示出湖平面快速上升—缓慢下降的变化过程(图12)。从区域上来看,山西组自下而上的古盐度及 Sr/Ba 比值变化特征揭示出山1段整体为区域性水退序列^[24](图2),前人在盆地南部邻区建立的山1段基准面变化曲线也反映出,山1段总体呈现水进—水退序列,其内部发生过次级的湖平面升降变化^[25](图13),这些成果均与本次研究成果具有很好的可对比性。

Fischer 图解所反映的山1段湖平面升降变化在沉积层序结构和沉积微相的演化上具有很好的响应特征(图13)。随着经典层序地层学的发展,人们提出了独立于模式的层序地层学分析方法,一个完整的三级层序内发育 APD 序列的演变,即从地层叠置样式的特定组合序列 PA(前积—加积)、R(退积)及 APD(加积—前积—降积)的演变分析沉积层序^[5-6]。山1段自上而下发育“PA—R—AP”叠置样式,在 LST 时期,主要发育 PA 序列,以前缘河口坝和下水分流河道沉积为主;TST 以滨浅湖或分流间湾泥质沉积构成的 R 序列为主;HST 时期发育 AP 序列,早期以决口扇或席状砂形成的砂泥岩薄互层沉积为主,晚期南部发育多期溢岸砂,北部主要发育河口坝。

综合微古地貌、古水流流向、湖平面变化及沉积相展布规律,建立了山1段沉积模式(图14)。山1段早期(LST 沉积期),沉积体系的发育明显受微古地貌与古水流流向的耦合作用控制,该时湖平面位置较低,可容空间有限,物源供给充足,来自西南部的古水系携带大量沉积物向湖盆内充填、分散,特别是在微地貌斜坡区,下水分流河道砂体广泛发育,平面上呈朵状,垂向

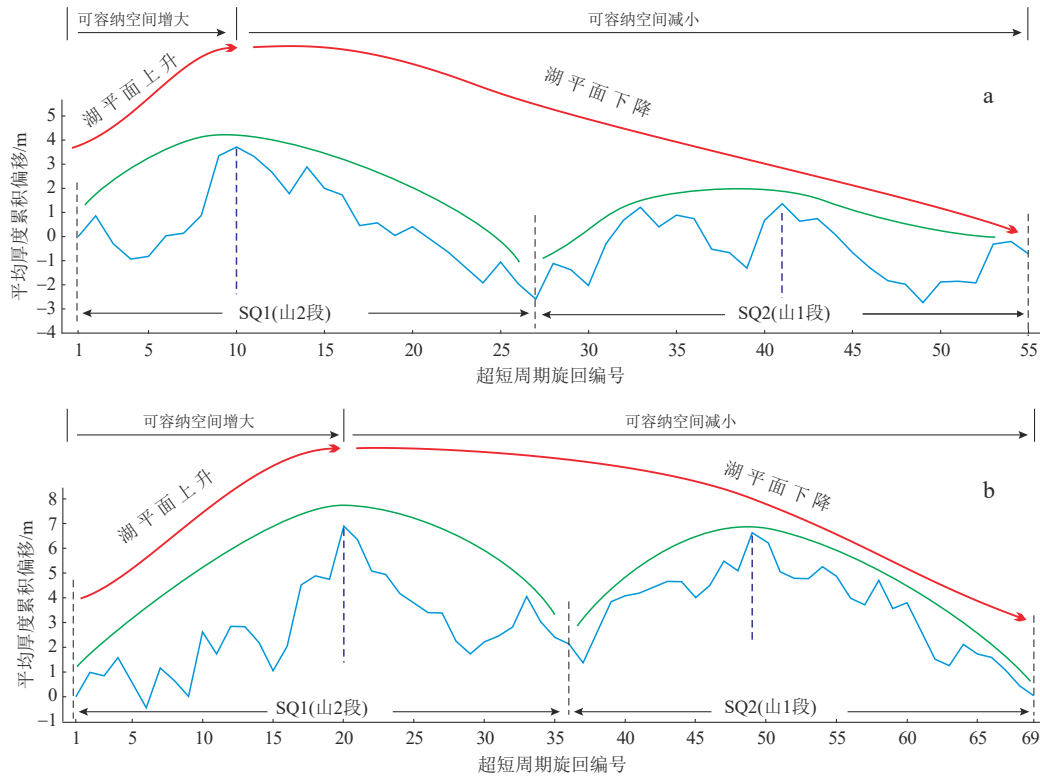


图12 鄂尔多斯盆地庆阳气田山西组 Fischer图

Fig. 12 Fischer plots of the Shan-1 Member, Qingyang gas field, Ordos Basin

a. W34井; b. W13井

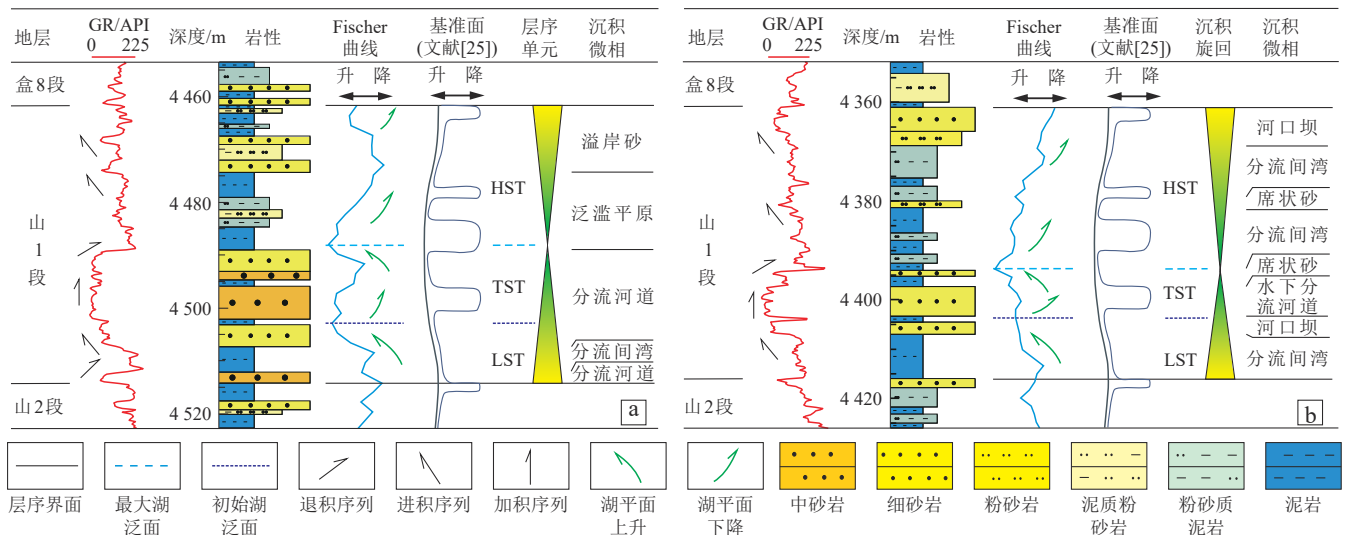


图13 鄂尔多斯盆地庆阳气田山1段湖平面变化控制的沉积层序特征

Fig. 13 Characteristics of depositional sequences controlled by the lacustrine level changes of Shan-1 Member, Qingyang gas

field, Ordos Basin

a. W34井; b. W13井

以PA序列为特征,是最为有利的砂体富集区。山1段中期(TST沉积期)随着湖平面上升至最高位置,沉积体系整体发生向西南陆地方向的明显退积,主要发育R序列。山1段晚期(HST沉积期),可容空间逐渐减

小,物源供给相对增强,水下分流河道不断向湖盆方向进积,平面呈枝状,早期废弃的三角洲砂体受沿岸流和湖浪的二次改造,形成滩坝沉积,该时期垂向以AP序列为主。总体上,沉积相带随着湖平面的整体变化发

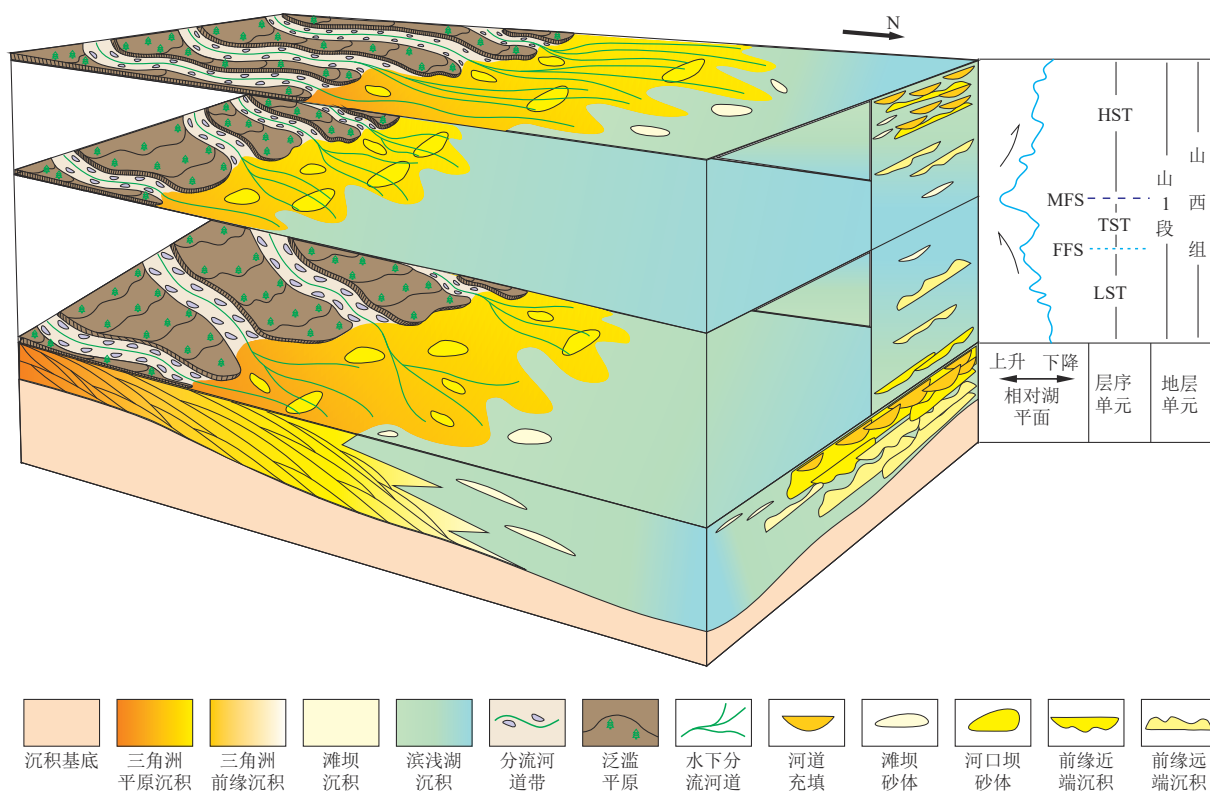


图14 鄂尔多斯盆地庆阳气田山1段沉积演化模式

Fig. 14 Depositional evolution model of the Shan-1 Member, Qingyang gas field, Ordos Basin

生向陆地或湖盆方向的迁移,而次一级小规模的水进—水退,则控制了层序内部可容空间序列发生“PA—R—AP”的演变。

5 结论

1) 庆阳气田研究区二叠系山1段为由一个完整的水进—水退旋回构成的三级层序,其内部低位、湖侵及高位体系域的可容空间序列分别以PA序列、R序列和AP序列为主。总体上山1段的层序厚度表现出由西南向东北方向增厚的变化趋势。

2) 山1段发育浅水三角洲和湖泊沉积体系,低位—湖侵体系域沉积期砂体横向切叠,发育规模大,形成朵状水下分流河道带,高位体系域时期形成枝状水下分流河道带,向湖盆内长距离进积。在三角洲侧翼及前方滨浅湖区发育滩坝砂体。

3) 山1段低位域沉积期,微古地貌与古水流流向的耦合作用控制着砂体的发育与分布。该时期,湖平面处于初始上升期,可容空间有限,来自西南方向的碎屑沉积物在研究区中部微地貌斜坡区大规模堆积,形成了多期叠置的水下分流河道沉积,为研究区最有利的砂体富集区。

4) 山1段湖平面变化表现为完整的上升—下降旋回。湖平面的整体变化影响着沉积相带的平面迁移演化,而其内部发生的多次次级振荡则控制了沉积层序内部可容空间“PA(进积—加积)—R(退积)—AP(加积—进积)”叠置样式的转变。

参 考 文 献

- [1] 付金华,魏新善,罗顺社,等. 庆阳深层煤成气大气田发现与地质认识[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1047-1061.
Fu Jinhua, Wei Xinshan, Luo Shunshi, et al. Discovery and geological knowledge of the large deep coal-formed Qingyang Gas Field, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1047-1061.
- [2] 何江川,余浩杰,何光怀,等. 鄂尔多斯盆地长庆气区天然气开发前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 23-33.
He Jiangchuan, Yu Haojie, He Guanghuai, et al. Natural gas development prospect in Changqing gas province of the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 23-33.
- [3] 刘池洋,王建强,张东东,等. 鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存—成藏特点[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1011-1029.
Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Zhang Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1011-1029.

- [4] Catuneanu O. Model-independent sequence stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 188: 312–388.
- [5] Neal J, Abreu V. Sequence stratigraphy hierarchy and the accommodation succession method [J]. *Geology*, 2009, 37(9): 779–782.
- [6] 龚承林, Steel Ronald J, 彭畅, 等. 深海碎屑岩层序地层学50年(1970—2020)重要进展[J]. *沉积学报*, 2022, 40(2): 292–318.
Gong ChengLin, Steel Ronald J, Peng Yang, et al. Major advances in deep-marine siliciclastic sequence stratigraphy, 1970 to 2020 [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 292–318.
- [7] 朱红涛, 黄众, 刘浩冉, 等. 利用测井资料识别层序地层单元技术与方法进展及趋势[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(4): 29–36.
Zhu Hongtao, Huang Zhong, Liu Haoran, et al. Progress and developing tendency of technologies and methods used to recognize sequence stratigraphic units based on the well-log data [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(4): 29–36.
- [8] 李峰峰, 郭睿, 余义常. 层序地层划分方法进展及展望[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(4): 215–224.
Li Fengfeng, Guo Rui, Yu Yichang. Progress and prospect of the division of sequence stratigraphy [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(4): 215–224.
- [9] 林畅松. 沉积盆地的层序和沉积充填结构及过程响应[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 849–862.
Lin Changsong. Sequence and depositional architecture of sedimentary basin and process responses [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 849–862.
- [10] 姜在兴. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(5): 535–541.
Jiang Zaixing. Studies of depositional systems and sequence stratigraphy: the present and the future [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(5): 535–541.
- [11] 林畅松. 盆地沉积动力学: 研究现状与未来发展趋势[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 685–700.
Lin Changsong. Sedimentary dynamics of basin: Status and trend [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 685–700.
- [12] 纪友亮, 张善文, 冯建辉. 陆相湖盆古地形、可容空间的体积变化率与层序结构的关系[J]. *沉积学报*, 2005, 23(4): 631–638.
Ji Youliang, Zhang Shanwen, Feng Jianhui. Relationship between paleotopography and volumetric change rate of lacustrine basin to the sequence structure [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4): 631–638.
- [13] Van Cappelle M, Ravnås R, Hampson G J, et al. Depositional evolution of a progradational to aggradational, mixed-influenced deltaic succession: Jurassic Tofte and Ile formations, southern Halten Terrace, offshore Norway [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 80: 1–22.
- [14] Feng Youliang, Jiang Shu, Wang Chunfang. Sequence stratigraphy, sedimentary systems and petroleum plays in a low-accommodation basin: Middle to upper members of the Lower Jurassic Sangonghe Formation, Central Junggar Basin, Northwestern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 105: 85–103.
- [15] 朱筱敏, 康安, 王贵文, 等. 鄂尔多斯盆地西南部上古生界层序地层和沉积体系特征[J]. *石油实验地质*, 2002, 24(4): 327–333.
Zhu Xiaomin, Kang An, Wang Guiwen, et al. The upper Paleozoic sequence stratigraphic and sedimentary system characteristics of the southwest Ordos basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2002, 24(4): 327–333.
- [16] 张雷, 余威, 陈江萌, 等. 鄂尔多斯盆地庆探1井区山1段储层砂体构型发育特征及模式[J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(6): 70–81.
Zhang Lei, Yu Wei, Chen Jiangmeng, et al. Development characteristics and model of sandbody configuration of the Shan1 Member in the Qingtan1 well area, Ordos Basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(6): 70–81.
- [17] 李进步, 王继平, 王龙, 等. 古地貌恢复及其对三角洲前缘沉积砂体的控制作用——以鄂尔多斯盆地庆阳气田二叠系山西组1³亚段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1136–1145.
Li Jinbu, Wang Jiping, Wang Long, et al. Paleogeomorphologic restoration and its controlling effect on deposition of delta-front sand bodies: A case study of Shan1³ sub-member of the Permian Shanxi Formation, Qingyang gas field, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1136–1145.
- [18] 朱世发, 崔航, 陈嘉豪, 等. 浅水三角洲沉积体系与储层岩石学特征——以鄂尔多斯盆地西部地区山1—盒8段为例[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 126–139.
Zhu Shifa, Cui Hang, Chen Jiahao, et al. Sedimentary system and sandstone reservoir petrology of a shallow water delta: Case study of the Shan-1 and He-8 members in the western Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 126–139.
- [19] 肖建新, 孙粉锦, 何乃祥, 等. 鄂尔多斯盆地二叠系山西组及下石盒子组盒8段南北物源沉积汇水区与古地理[J]. *古地理学报*, 2008, 10(4): 341–354.
Xiao Jianxin, Sun Fenjin, He Naixiang, et al. Permian Shanxi Formation and Member 8 of Xiashihezi Formation in Ordos Basin: Palaeogeography and catchment area for sediments derived from north and south provenances [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(4): 341–354.
- [20] 贺敬聪, 朱筱敏, 李明瑞, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区二叠系山西组—石盒子组母岩类型和构造背景[J]. *古地理学报*, 2017, 19(2): 285–298.
He Jingcong, Zhu Xiaomin, Li Mingrui, et al. Parent rock types and tectonic setting of the Permian Shanxi and Shihezi formations in Longdong area, Ordos basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(2): 285–298.
- [21] 梁飞, 黄文辉, 牛君. 鄂尔多斯盆地西南缘二叠系山西组山1段—下石盒子组盒8段物源分析[J]. *沉积学报*, 2018, 36(1): 142–153.
Liang Fei, Huang Wenhui, Niu Jun. Provenance analysis of Permian Shan1 and He 8 Formation in Permian in Southwest Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(1): 142–153.
- [22] 开百泽, 何登发, 马静辉, 等. 鄂尔多斯盆地构造沉降特征及对盆地成因的启示[J]. *地质科学*, 2020, 55(3): 657–671.
Kai Baize, He Dengfa, Ma Jinghui, et al. Tectonic subsidence characteristics of Ordos Basin and its enlightenment to basin

- genesis[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(3): 657-671.
- [23] 张宇航,赵靖舟,王永伟,等. 鄂尔多斯盆地西南部上古生界山西组一段古构造特征及其对油气的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(1): 54-65.
- Zhang Yuhang, Zhao Jingzhou, Wang Yongwei, et al. Paleostucture features in the 1st member of the Upper Paleozoic Shanxi Formation and its influences on gas accumulation in southwestern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(1): 54-65.
- [24] 陈洪德,李洁,张成弓,等. 鄂尔多斯盆地山西组沉积环境讨论及其地质启示[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2213-2229.
- Chen Hongde, Li Jie, Zhang Chenggong, et al. Discussion of sedimentary environment and its geological enlightenment of Shanxi Formation in Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2213-2229.
- [25] 于兴河,王香增,王念喜,等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界层序地层格架及含气砂体沉积演化特征[J]. 古地理学报, 2017, 19(6): 935-954.
- Yu Xinghe, Wang Xiangzeng, Wang Nianxi, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary evolution characteristics of gas-bearing sandbody in the upper Paleozoic in southeastern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(6): 935-954.
- [26] 林畅松. 沉积盆地分析原理与应用[M]. 北京:石油工业出版社, 2016.
- Lin Changsong. Principles and application of sedimentary basin analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [27] 赵伟,姜在兴,邱隆伟,等. 小波分析划分层序单元的地质学理论基础、方法与应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 436-441.
- Zhao Wei, Jiang Zaixing, Qiu Longwei, et al. Geological concept, method and application of sequence unit identification through wavelet analysis[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 436-441.
- [28] 林孝先,侯中健. 高分辨率层序基准面变化(半)定量分析方法及其在松辽盆地泉四段的应用[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2014, 41(2): 157-170.
- Lin Xiaoxian, Hou Zhongjian. A semiquantitative analytical method for base level changes of high resolution sequence and its application to study of member 4 of Lower Cretaceous Quantou Formation in Songliao Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2014, 41(2): 157-170.
- [29] 路顺行,张红贞,孟恩,等. 运用INPEFA技术开展层序地层研究[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 703-708.
- Lu Shunxing, Zhang Hongzhen, Meng En, et al. Application of INPEFA technique to carry out sequence-stratigraphic study[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(6): 703-708.
- [30] 袁静. 东营凹陷盐22块沙四上亚段砂砾岩粒度概率累积曲线特征[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 815-824.
- Yuan Jing. Probability cumulative grain size curves in sandy conglomerate of the Upper Es⁴ in Yan 22 Block, Dongying Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(5): 815-824.
- [31] 吴胜和,徐振华,刘钊. 河控浅水三角洲沉积构型[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 202-215.
- Wu Shenghe, Xu Zhenhua, Liu Zhao. Depositional architecture of fluvial-dominated shoal water delta[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(2): 202-215.
- [32] 周瑶琪,陆永潮,李思田,等. 间断面缺失时间的计算问题——以贵州紫云上二叠统台地边缘礁剖面为例[J]. 地质学报, 1997, 71(1): 7-17.
- Zhou Yaoqi, Lu Yongchao, Li Sitian, et al. The missing time calculation of the hiatus surface: a case study of the Upper Permian reefs section at the platform margin, Ziyun, Guizhou[J]. Acta Geologica Sinica, 1997, 71(1): 7-17.
- [33] 张莉,鲍志东,林艳波,等. 浅水三角洲砂体类型及沉积模式:以松辽盆地南部乾安地区白垩系姚家组一段为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 727-736.
- Zhang Li, Bao Zhidong, Lin Yanbo, et al. Genetic types and sedimentary model of sandbodies in a shallow-water delta: A case study of the first member of Cretaceous Yaojia Formation in Qian'an area, south of Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 727-736.
- [34] 姜在兴,王俊辉,张元福. 滩坝沉积研究进展综述[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 427-440.
- Jiang Zaixing, Wang Junhui, Zhang Yuanfu. Advances in beach-bar research: a review[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 427-440.
- [35] Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Paleostuctural geomorphology of the Paleozoic central uplift belt and its constraint on the development of depositional facies in the Tarim Basin [J]. Science in China Series D: Earth Science, 2009, 52(6): 823-834.
- [36] 姜在兴,王雯雯,王俊辉,等. 风动力场对沉积体系的作用[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 863-876.
- Jiang ZaiXing, Wang WenWen, Wang JunHui, et al. The influence of wind field on depositional systems [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 863-876.
- [37] 王延章,宋国奇,王新征,等. 古地貌对不同类型滩坝沉积的控制作用——以东营凹陷东部南坡地区为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(4): 13-16.
- Wang Yanzhang, Song Guoqi, Wang Xinzheng, et al. Controlling effect of paleogeomorphology on deposition of beach and bar sand reservoir-case study of south slope, east Dongying depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4): 13-16.
- [38] 庞军刚,杨友运,李文厚,等. 陆相含油气盆地古地貌恢复研究进展[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(4): 424-430.
- Pang Jungang, Yang Youyun, Li Wenhui, et al. Study development of palaeogeomorphology reconstructions in continental facies hydrocarbon basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(4): 424-430.
- [39] 尹海生. 古流向分析及储层评价技术在砂岩型铀矿床勘探中的应用[J]. 四川地质学报, 2005, 25(3): 131-135.
- Yi Haisheng. The application of paleocurrent analysis and