

引用格式:刘桂珍,高伟,尉加盛,等.混积层系沉积、层序特征——以鄂尔多斯盆地高桥地区本溪组为例[J].天然气地球科学,2021,32(3):382-392.

LIU Guizhen, GAO Wei, WEI Jiasheng, et al. Sedimentary characteristics and sequence stratigraphy in a mixed silicilastic-carbonate depositional system: Case study of Benxi Formation in Gaoqiao area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(3): 382-392.

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2020.11.002

## 混积层系沉积、层序特征

——以鄂尔多斯盆地高桥地区本溪组为例

刘桂珍<sup>1,2</sup>, 高伟<sup>3</sup>, 尉加盛<sup>4</sup>, 唐文<sup>1,2</sup>

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065;

2. 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065;

3. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西 西安 710018;

4. 中国石油长庆油田分公司第六采气厂, 陕西 榆林 718500)

**摘要:**鄂尔多斯盆地高桥地区本溪组发育陆源碎屑岩和碳酸盐岩混合沉积。综合前人研究成果,根据野外露头、岩心、录井和测井等资料,分析了混积层系沉积、层序充填特征。结果表明:本溪组发育陆源碎屑岩和碳酸盐岩相互叠加的混积层系,发育碎屑岩潮坪、混积潮坪和混积潟湖等沉积体系。根据层序地层原理,识别出1个区域不整合面、1个构造沉降转换面和1个岩性、岩相转换面,将本溪组划分为SQ1、SQ2共2个三级层序,其中每个层序主要由海进体系域(TST)和高位体系域(HST)组成。本溪组沉积是以陆源碎屑岩沉积为主的混积层系,混积层系主要发育在SQ2海进体系域(TST)。不同沉积区域自下而上混合沉积岩性岩相组合有差异。混积潮坪区由潮道相砂岩上覆叠置潮间带砂泥岩再到灰岩;混积潟湖区由灰岩上覆叠置潟湖泥岩;混积潮坪和混积潟湖过渡区由灰岩叠置潮下带砂岩和潮间带砂泥岩。

**关键词:**本溪组;混积层系;沉积相;层序地层;鄂尔多斯盆地

**中图分类号:**TE121.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-1926(2021)03-0382-11

### 0 引言

混合沉积是陆源碎屑和碳酸盐岩在同一沉积背景下混合堆积的现象,二者可以在垂向上叠置,平面上相变,包括混积岩和混积层系<sup>[1-2]</sup>。混合沉积是一种特殊沉积机理下的产物,代表了碎屑岩和碳酸盐岩两者之间相互作用的过程,主要受区域构造运动、海(湖)平面变化、气候条件、物源及水动力条件等综合条件影响和控制<sup>[3-7]</sup>。随着混合沉积层系取得油气勘探突破<sup>[8]</sup>,混合沉积受到国内外学者的重视,主要研究集中在混积岩<sup>[9-10]</sup>和混积层系沉积特

征及沉积模式上<sup>[11-14]</sup>。混合沉积是以碳酸盐沉积背景下或以陆源碎屑沉积背景下发育的产物<sup>[15-17]</sup>,是一种特殊又普遍的沉积现象,在不同的沉积背景下,混合沉积模式有差异。DEVIES<sup>[18]</sup>提出碳酸盐台地相混合沉积模式。冯进来等<sup>[19]</sup>通过统计分析,混合沉积多发育在海陆过渡带或海岸带、陆相湖泊、斜坡—盆地等沉积环境,并基于前人研究提出湖相和海相混合沉积综合模式。目前有关混合沉积成因与沉积环境的研究最多,而与层序、沉积充填相关的混合沉积作用研究较少。通过对基准面旋回中混合沉积—层序充填特征的深入研究,将有

收稿日期:2020-07-09;修回日期:2020-10-27.

基金项目:国家自然科学基金项目“湖盆深水砂岩中碳酸盐胶结物成因及分布规律——以鄂尔多斯盆地延长组为例”(编号:41602156);陕西省自然科学基金基础研究计划项目“基于高光谱图像的碳酸盐岩岩溶识别及其表征研究”(编号:2019JM-381);陕西省教育厅科研计划项目“古岩溶风化壳储层模型及三维正演模型研究”(编号:18JS091)联合资助.

作者简介:刘桂珍(1976-),女,甘肃天水人,副教授,博士,主要从事沉积学及储层地质学研究. E-mail: liuguizhen509@xsyu.edu.cn.

重要的理论意义和实际应用价值。

鄂尔多斯盆地是华北克拉通的一部分,具有多期构造旋回演化和多样沉积充填。在晚石炭世—早二叠世,鄂尔多斯盆地本溪组是陆表海控制下陆源碎屑岩—碳酸盐岩混合沉积充填<sup>[20]</sup>。近年来本溪组天然气勘探取得了重大突破,其气藏具有小而肥特点。由于储层成因复杂,具有纵、横向上变化比较快,非均质性强等特点,给气藏勘探带来困难,为有效预测储层“甜点区”的分布,有必要综合利用野外露头、岩心观察、钻井及测井等资料对鄂尔多斯盆地高桥地区沉积及层序特征进行研究,其成果有助于理解混合沉积层序、沉积特征,为鄂尔多斯盆地上古生界天然气勘探提供地质依据。

### 1 地质背景

鄂尔多斯盆地在晚古生代位于华北克拉通盆地西部,在晚奥陶世抬升后,经历了长达140 Ma的风化剥蚀,至晚石炭世早期近准平原化<sup>[20]</sup>。晚古生代沉积总体继承了晚奥陶世“一隆二凹”沉积格局<sup>[21]</sup>,此时,华北克拉通盆地经历了多期幕式海侵,具有快速海侵和慢速海退的特点,因此鄂尔多斯盆地南部本溪组—太原期沉积了一套碎屑岩和碳酸盐岩的混合沉积层系,也是海陆过渡相沉积。本文

研究区位于鄂尔多斯盆地南部高桥地区,靖边气田南部,构造上位于伊陕斜坡中部[图1(a)]。

研究区高桥地区位于鄂尔多斯盆地中央古隆起东边,本溪组叠置在奥陶系古风化壳上,起到填平补齐的作用,厚度约为10~70 m,呈东西向超覆式分布。通过与太原地区西山上古生界标准剖面的对比分析[图1(b)],研究区本溪组的划分对应于太原地区本溪组和太原组晋祠段,其沉积地层序列基本一致,厚度有所变化。本溪组底部为铁铝岩段,上部沉积灰黑色—灰色泥岩、粉砂岩和细砂岩夹不稳定薄煤层,局部夹1~4层薄层灰岩。本溪组灰岩厚度为0~11 m,具有厚度和层数分布不均特征。东部灰岩层数多,为3~4层,西部层数为1~2层,且灰岩主要发育在研究区东北部。本溪组顶部为8#、9#煤层,全区稳定分布,根据沉积序列及岩性组合,本溪组自上而下分为本1段、本2段。

### 2 沉积相类型及特征

#### 2.1 区域沉积背景

华北克拉通在经历了早古生代隆起剥蚀后,晚石炭世开始整体下降接受沉积。鄂尔多斯盆地被中央古隆起分割成东西2个海域,东边的华北海海水自东向西侵入,沉积作用向西超覆,形成东厚西

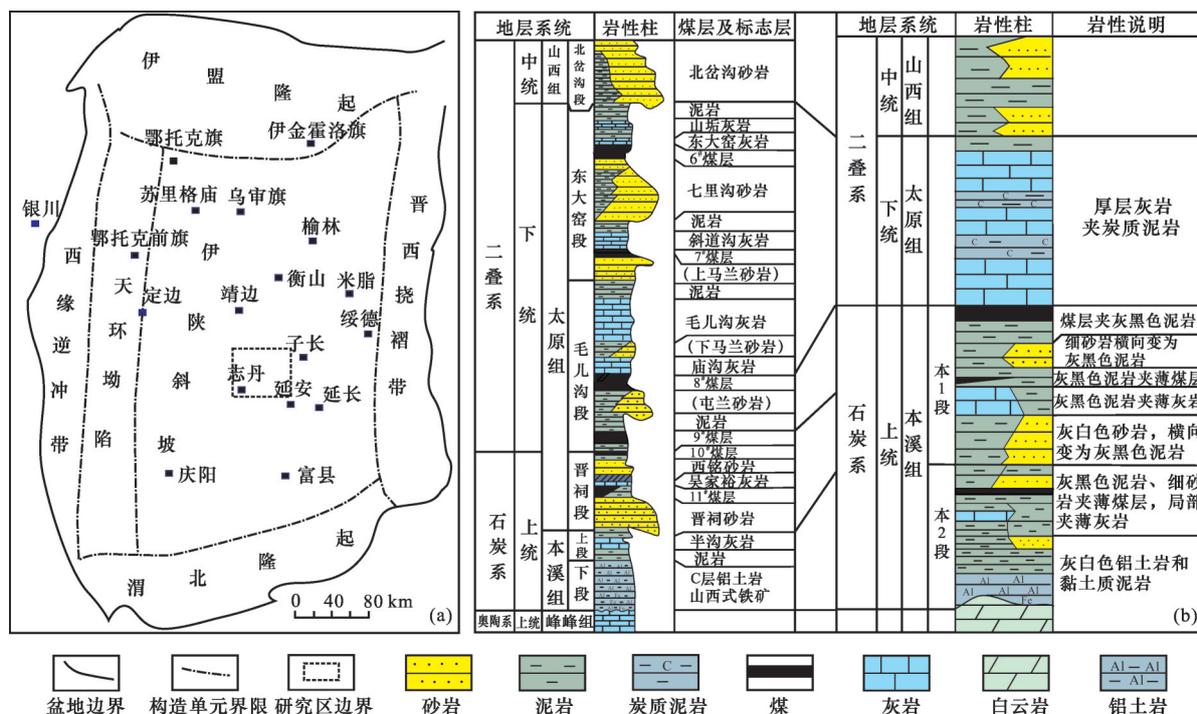


图1 鄂尔多斯盆地高桥地区位置和本溪组地层划分对比

Fig.1 The location of Gaoqiao area and correlation on division of Benxi Formation in Ordos Basin

(a)高桥地区构造位置;(b)高桥地区与太原西山地区地层划分对比(据文献[20],有修改)

薄的楔状体<sup>[21-22]</sup>,为以陆源碎屑夹煤层与碳酸盐岩相互叠置的混合沉积。该混积层系的形成与古构造背景、海平面变化及气候条件相关。一方面,晚石炭世鄂尔多斯盆地在华北地台拉张背景下整体缓慢下沉,开始接受沉积,该时期陆源碎屑物供给较少,沉积作用处于缓慢补偿阶段,此时东部北海处于陆表海沉积环境,北部物源发育的三角洲向南延伸有限且规模不大。另一方面,由于陆表海具有海床坡度极缓、水体浅,导致该区具有海侵快速突发、短时间内波及范围广的事件性或突发性特征。海平面频繁升降变化使陆源碎屑与碳酸盐岩沉积体系相邻区因沉积相带横向迁移而造成混合沉积<sup>[10]</sup>。此外,鄂尔多斯盆地地处北纬10°附近,气候湿热多雨<sup>[23]</sup>,上述气候条件有利于生物生长,生物化学作用占据主导地位,从而提高了碳酸盐岩的生产速率。

鄂尔多斯盆地本溪组沉积时期南北双向供源<sup>[24-25]</sup>,盆地周缘元古代以来长期处于剥蚀隆起地区而形成的盆地北部阴山—阿拉善古陆、南部的祁连—北秦岭古陆和西南部的六盘山古陆为鄂尔多斯盆地本溪组提供沉积物源<sup>[26]</sup>。南部物源可以分为西南物源和东南物源,西南物源推测来自北秦岭西段和北祁连东段,东南物源推测来自北秦岭东段<sup>[26]</sup>,研究区属于西南物源体系。

## 2.2 混合沉积相类型及特征

通过岩心观察、沉积构造和测井、录井等资料及区域沉积背景的综合研究,认为高桥地区本溪组发育陆源碎屑岩和碳酸盐岩相互叠置的混合沉积层系,主要发育碎屑岩潮坪、混积潮坪和混积潟湖沉积。

### 2.2.1 混积潮坪相沉积

混积潮坪分为潮上带混合沉积、潮间带混合沉积和潮下带混合沉积。

潮上带混合沉积:位于平均高潮线以上的大潮和风暴潮所能淹没的地带。由于此相带长期暴露于水面之上,以海水蒸发量大、盐度高及水循环受限为特征。岩性主要由薄层泥灰岩与灰黑色、灰色泥岩组成。泥岩中发育脉状层理、透镜状层理[图2(a)],研究区潮上带混积层系相对不发育。

潮间带混合沉积:位于平均高潮线和平均低潮线之间。该相带受潮汐作用的影响而间歇性暴露频繁,岩性主要由浅灰色细粒石英砂岩、灰黑色中—厚层泥晶灰岩、含泥质微晶灰岩所组成,发育平行

层理、低角度斜层理和双向交错层理[图2(a)]。

潮下带混合沉积:位于平均低潮线和浪基面之间。岩性主要由灰黑色薄层、中厚层状微晶灰岩和中粒石英砂岩组成,局部发育由潮道沉积的灰白色中粗粒石英砂岩,底部发育不规则的冲刷面,下部含砾石,砂岩厚度可达5 m以上[图2(a)],测井曲线表现为箱形和钟形特征,是该区主要的储集层之一。

### 2.2.2 混积潟湖沉积

混积潟湖:沉积物主要由黑色、灰黑色泥岩、粉—细砂岩、粉砂质泥岩、泥灰岩层组成,灰岩分布较连续。发育水平层理、透镜状层理,泥岩中偶见黄铁矿[图2(a)]、菱铁矿结核。混积潟湖主要发育在研究区东北部。

根据岩性组合、沉积相序组合及分布,研究区本溪组以陆源碎屑岩沉积为主,其间伴有陆源碎屑与碳酸盐岩层相互叠置的混积层系,研究区整个沉积环境自西向东为碎屑岩潮坪—混积潮坪—混积潟湖沉积[图2(b)],混积潟湖发育在研究区东北部,混积潮坪以环带状分布于潟湖周边。

## 3 层序地层格架

前人对鄂尔多斯盆地中生代地层开展过层序地层划分,将本溪组划分为2个三级层序<sup>[27-30]</sup>,郑荣才等<sup>[31]</sup>划分为2个中期旋回。由于本溪组平面分布广,厚度变化大,前人研究只是对本溪组局部地层的划分,部分体系域的划分有差异。由于本溪组混合沉积区处于盆地中部,受研究区范围限制,未针对混合沉积区进行层序地层划分及沉积充填进行探讨。本文在前人研究的基础上,通过碎屑岩层序地层界面的追踪,逐步拓展到混合沉积地区,建立层序地层格架。

### 3.1 层序界面类型及识别

运用经典层序地层学原理,在区域沉积背景和构造分析基础上,根据野外露头剖面、岩心观察、测井响应特征等资料,在本溪组识别出1个区域不整合界面、1个构造沉降转换面和1个岩相、岩性分界面。

#### 3.1.1 区域不整合面

该界面是上古生界与下古生界分界面,也是本溪组和马家沟组分界面,其形成主要受加里东构造期影响,于中奥陶世抬升,经过长期暴露并遭受风化剥蚀形成的不整合面<sup>[21]</sup>,该界面上发育风化壳

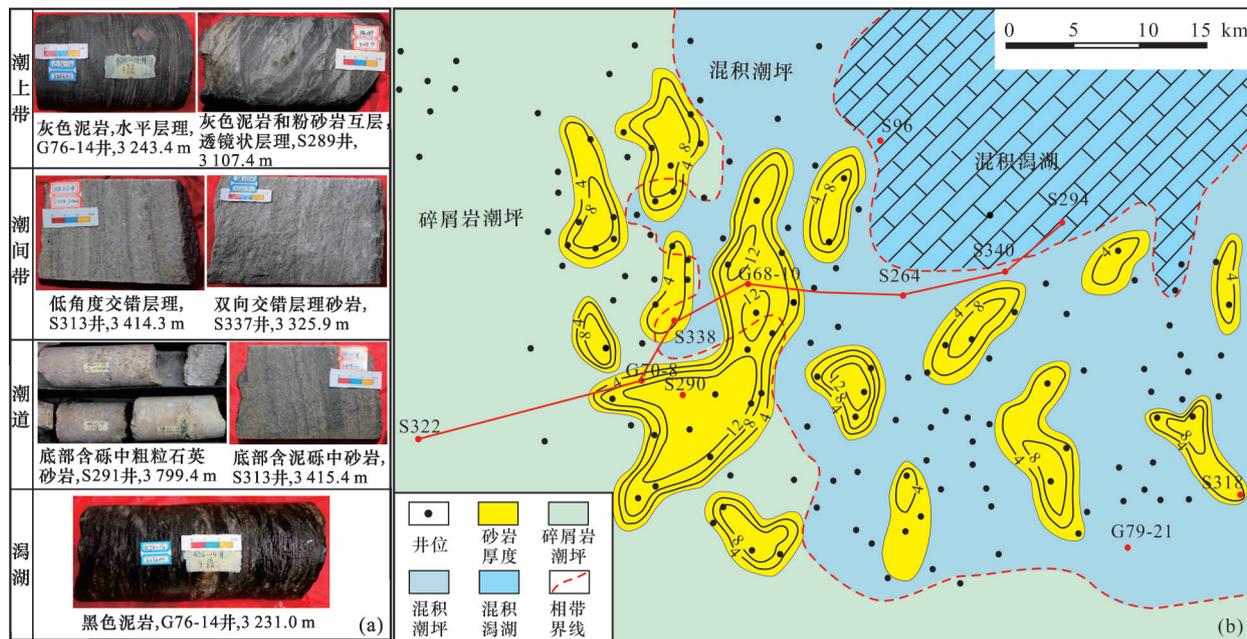


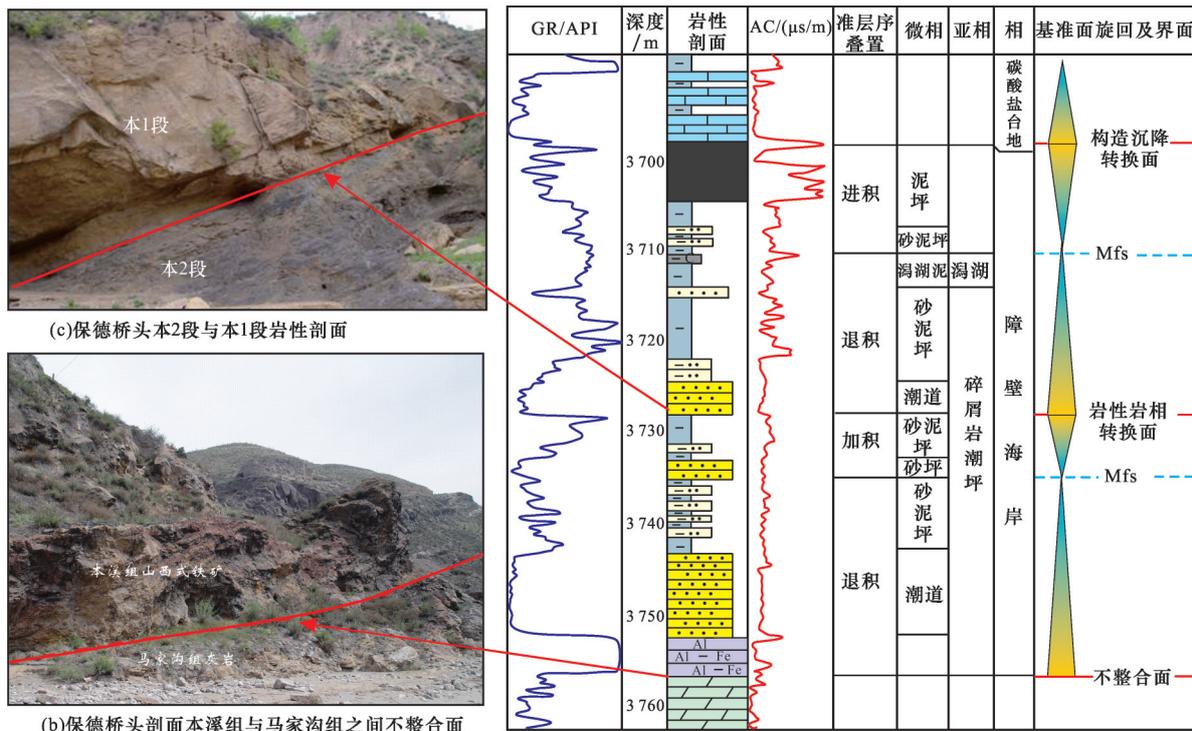
图2 鄂尔多斯盆地高桥地区本溪组岩心照片(a)和沉积相图(b)

Fig.2 Core photographs of representative facies (a) and sedimentary facies map (b) of Benxi Formation in Gaoqiao area, Ordos Basin

层铁铝岩,界面之下为奥陶系马家沟组白云岩[图3(a), 图3(b)],在测井曲线上具有明显的台阶式变化。

3.1.2 构造沉降面转换面

该界面是本溪组和太原组的分界面,其形成主



(b)保德桥头剖面本溪组与马家沟组之间不整合面

(a)S290井本溪组岩电特征

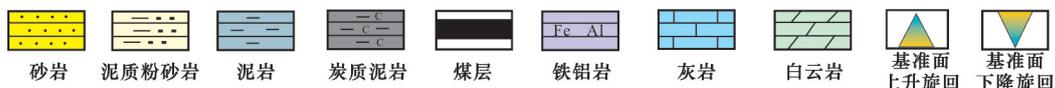


图3 碎屑岩沉积区本溪组层序界面特征

Fig.3 Characteristics of sequence boundaries of the Benxi Formation in siliciclastic sedimentary systems

要受海西运动第三幕的影响,晚石炭世末,古构造格局由南隆北倾转为北隆南倾<sup>[21]</sup>;该界面是一个区域沉积环境的转换面、海侵方向转换面。界面之下晚石炭世海水自东及东北方向入侵,界面之上即早二叠世早期海水转为自南及东南方向侵入<sup>[21]</sup>。此界面上发育太原组厚层块状灰岩,界面之下为本溪组顶部为8<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>煤层[图3(a)]。

### 3.1.3 岩性、岩相突变面

本溪组内部层序界面特征比较复杂,岩性岩相

变化多样,在不同的沉积相带区,层序界面有区别,常见以下几种类型:①碎屑岩潮坪区,层序界面之下为潮间带、潮上带泥岩或煤层,界面之上为潮道沉积砂岩、向上组成一个或多个向上变细的退积准层序[表1,图3(c)]。②混积潮坪区,层序界面之下为潮间带泥岩,界面之上为混积沉积灰岩[表1,图4(a)]。③混积潟湖区,层序界面之下为潟湖泥岩,界面之上为混积潟湖沉积的灰岩[表1,图4(b)]。

表1 本溪组内部层序界面特征

Table 1 Characters of sequence boundaries in the Benxi Formation

相区	碎屑岩潮坪	混积潮坪	混积潟湖
层序界面上	砂岩(潮下带砂坪、潮道)	灰岩(混积灰坪)	灰岩(混积潟湖)
层序界面下	泥岩、煤层(潮间带、潮上带)	泥岩(潮间带)	泥岩(潟湖)

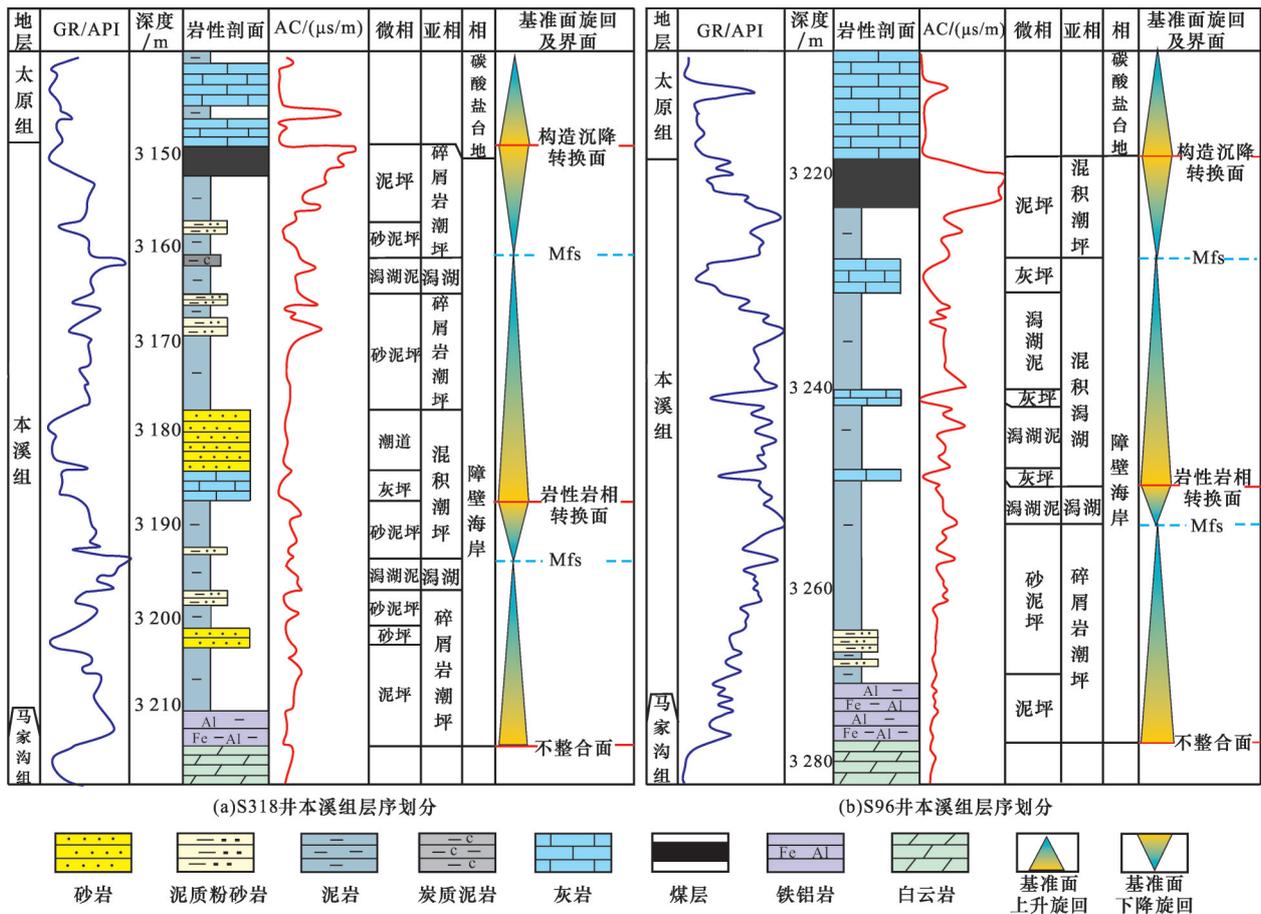


图4 本溪组混合沉积区层序界面特征

Fig.4 Characteristics of sequence boundaries of the Benxi Formation in mixed sedimentary sections

### 3.2 海泛面特征

海泛面是指基准面上升达最高点位置时由海水泛滥作用形成的弱补偿或欠补偿沉积界面<sup>[29]</sup>。该界面也是沉积序列的转换面,由退积准层序组向

加积或进积的转换。该界面由深水环境下形成的暗色泥岩类或泥晶灰岩组成,常位于大套泥岩的中上部或顶部。根据沉积特征,本溪组中潟湖沉积的泥岩覆盖在潮坪沉积砂泥岩上,同时局部地区发育

1~4层泥晶灰岩,代表了多次的海进,而最大海泛面是潟湖沉积的泥岩和泥晶灰岩,也是沉积序列的转换面(图3,图4)。

### 3.3 层序与体系域特征

#### 3.3.1 层序划分

鄂尔多斯盆地本溪组为陆表海沉积背景下的潮坪—潟湖—障壁岛沉积环境。通过对区域构造变动、岩性组合、沉积相构成、测井曲线等综合分析,本溪组识别出1个二级层序界面及2个三级层序界面:共划分出SQ1和SQ2共2个三级层序。相对应于3个层序界面分别为SB1、SB2和SB3。层序SQ1相当于本溪组本2段,层序SQ2相当于本溪组本1段(图5)。

SQ1层序底界为区域不整合面,岩性为铁铝岩层,厚度为2~5 m,之上发育碎屑岩潮坪沉积;SQ2

层序底部为一套砂岩或灰岩,代表海进旋回的开始,顶部发育一套分布广泛的煤层(图5)。

#### 3.3.2 体系域特征

体系域是有成因联系的沉积体系集合体,是构成三级层序的基本单元。依据海泛面特征、岩相类型及准层序组的叠置样式,研究区体系域划分为海进体系域(TST)和高位体系域(HST),不发育低位体系域(图5)。SQ1和SQ2都是由海进体系域(TST)和高位体系域(HST)组成。

#### 3.4 层序充填特征

鄂尔多斯盆地本溪组是陆表海沉积,整体构造沉降幅度不大,决定层序差异特征主要是相对海平面的升降变化。鄂尔多斯盆地在本溪期经历了3次自东向西海侵<sup>[21]</sup>,陆表海具有海床坡度极缓,海侵具有突发性及短时间可波及数千公里的特征,因此

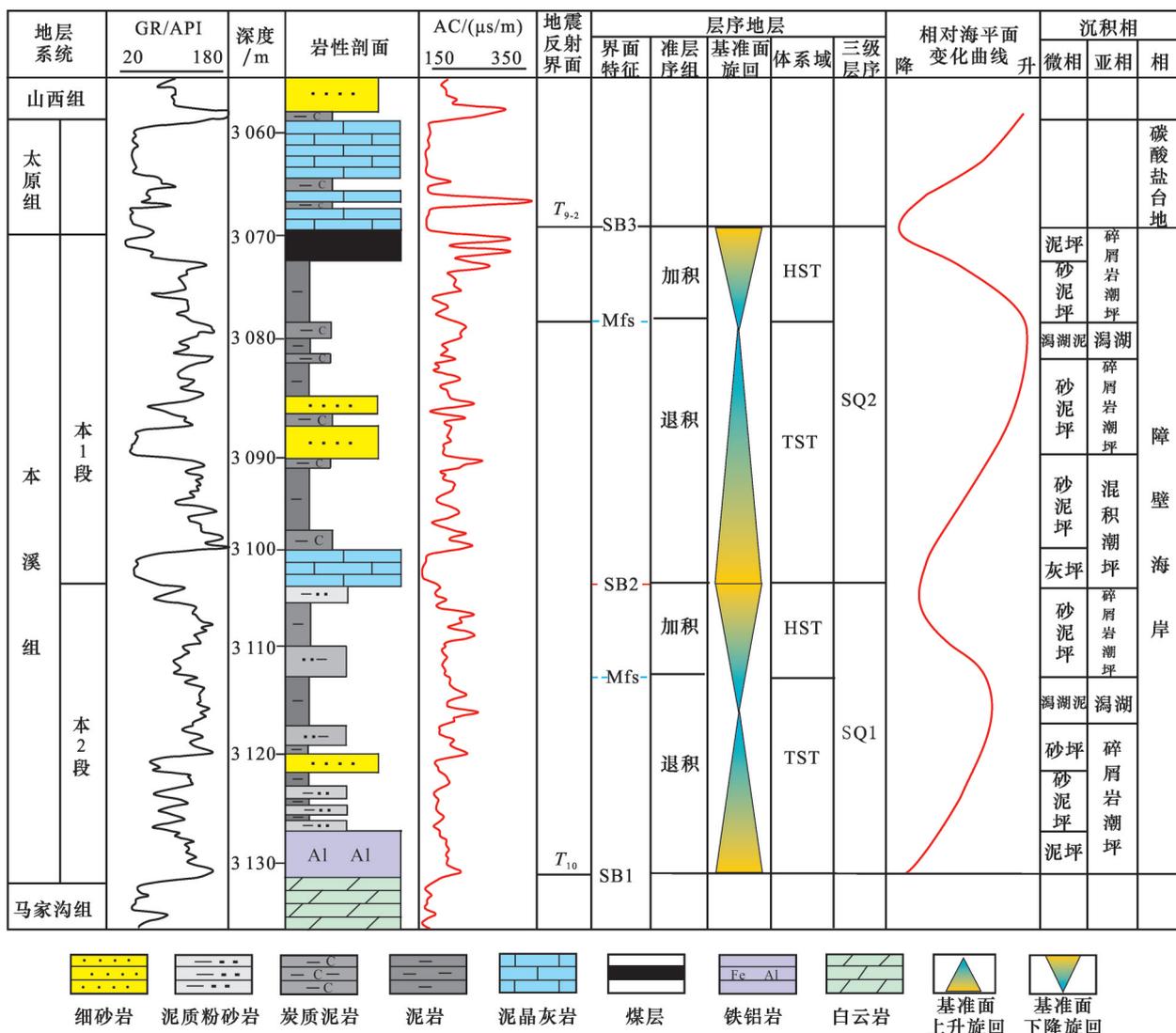


图5 高桥地区G79-21井本溪组层序地层综合柱状图

Fig.5 Sequence stratigraphy comprehensive histogram of Benxi Formation of Well G79-21 in Gaoqiao area

沉积相序具有明显的不连续性,海相灰岩可以大面积直接覆盖于浅水或暴露沉积物上,多期次海侵造成海平面升降频繁,垂向上形成碳酸盐岩和碎屑岩垂向叠加的旋回性<sup>[13]</sup>。随着海平面的升降,沉积能量发生变化,潮坪—潟湖沉积相带发生相应的迁移,沉积充填显示出不同的特征。

本溪组层序划分为2个三级层序。SQ1层序相当于本溪组本2段,其充填沉积形成于下古生界准平原化风化壳基底之上,具有填平补齐作用,沉积物的厚度变化比较大。SQ1底界为奥陶系风化壳(区域不整合面)。该层序由海进体系域(TST)和高位体系域(HST)构成,海进体系域(TST)底部由铁铝质岩组成,上部由泥岩或砂泥岩互层组成,主要为潮上带和潮间带沉积,组成一个向上变细的退积型准层序组。

高位体系域(HST)由潮坪沉积的砂泥岩组成(图6),准层序组呈现出加积特征,而进积作用不明显,体现出缓慢海侵,局部水退的特点,SQ1层序不发育混积层系。

SQ2层序相当于本溪组本1段,底界为砂岩或

灰岩,顶界为本溪组普遍发育的8<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>煤层。层序结构包括海进体系域(TST)和高位体系域(HST)。海进体系域(TST)有4种结构模式:①海侵体系域由中粗粒厚层潮道相的砂岩,向上变为砂泥岩和泥岩互层,组成一个或多个变细的退积型准层序;该叠置模式代表了碎屑岩潮坪沉积;②海侵体系域由潮坪相细砂岩—粉砂岩向上变为泥岩和灰岩,组成退积序列的准层序,代表了混积的潮坪沉积;③海侵体系域由灰岩向上变为潮坪相细砂岩—粉砂岩再相变为泥岩和灰岩,代表了混积潟湖和混积潮坪过渡区沉积;④海侵体系域由多套灰岩与泥岩的互层叠置,灰岩代表了多次的海侵,泥岩为潟湖沉积,总体呈现出退积型的准层序组叠置,代表了混积潟湖沉积。

平面上,自西向东向(由陆向海)依次发育碎屑岩潮坪、混积潮坪、混积潟湖(图6)。高位体系域(HST)由泥岩和分布比较稳定的煤层组成。整体上SQ2层序海进体系域(TST)所占厚度较大,而高位体系域(HST)厚度较小,呈现出多期次连续海侵特征。

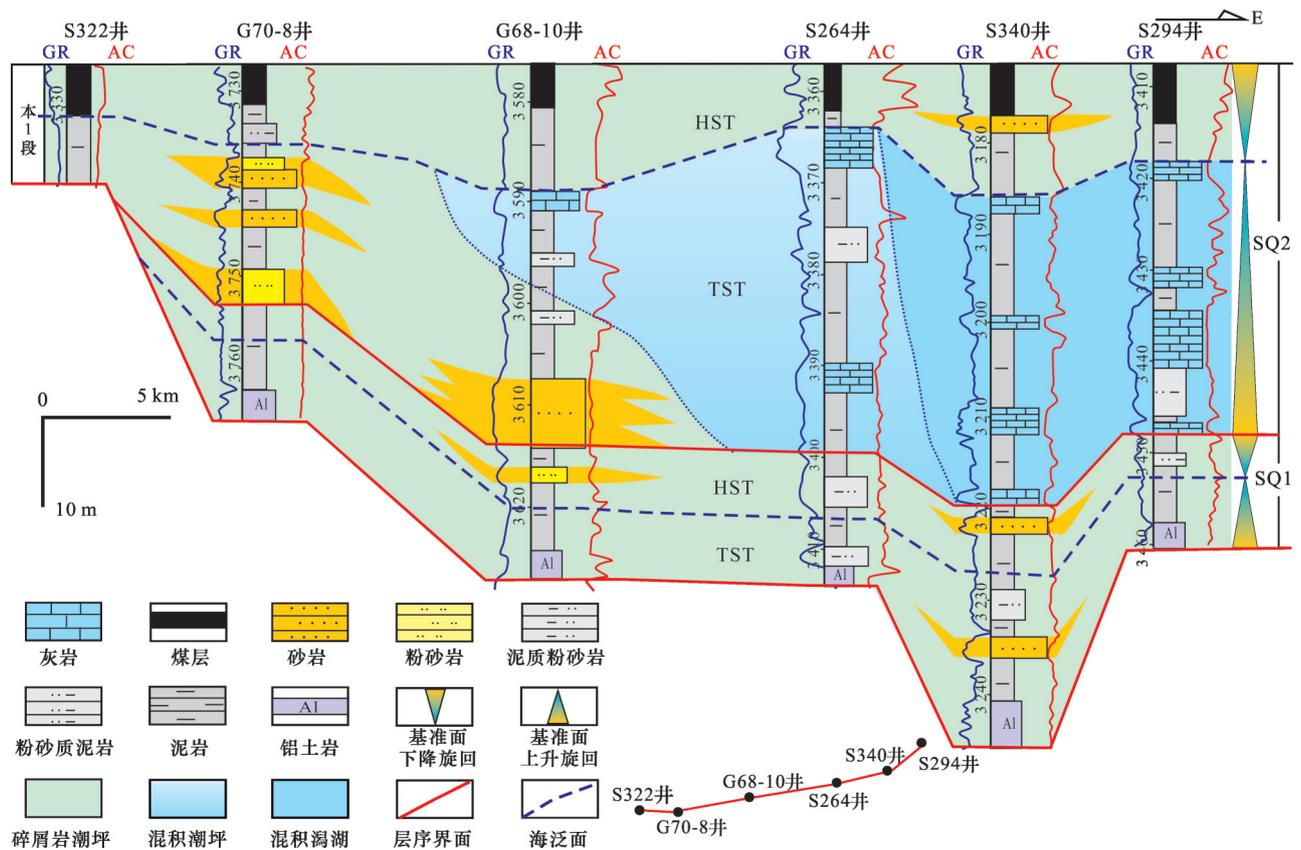


图6 鄂尔多斯盆地南部本溪组层序地层格架(东西向)

Fig.6 Sequence stratigraphic framework of the Benxi Formation (east-west)

### 4 层序地层演化模式

通过对鄂尔多斯盆地高桥地区本溪组混积层系沉积、层序特征研究,结合区域沉积背景和构造特征分析,建立了本溪组混合沉积层序演化模式(图7)。鄂尔多斯盆地高桥地区在本溪组沉积期间处于中央古隆起东边的华北海沉积区,是障壁海岸沉积区。研究区西南部岩性组合为砂岩,砂泥岩互层,砂体呈条带状和块状分布,研究区东北部岩性组合为碳酸盐岩与泥岩互层,整体自西南向东北方向由碎屑岩变为碳酸盐岩。沉积相带从西到东依次发育碎屑岩潮坪、混积潮坪和混积潟湖沉积。

本溪组沉积层序充填是陆表海沉积环境,具有地形坡度平缓,不发育明显的滨岸坡折带,以II型层序为主,层序地层结构由海进体系域和高位体系域组成,由于海水频繁进退,呈现以大范围潟湖、潮坪环境。SQ1主要以陆源碎屑潮坪和潟湖沉积为主,层序充填具有填平补齐的作用,因此厚度变化比较大。SQ2发生多级多期次快速海侵,海进体系域主

要发育大面积混积潟湖和较小面积混积潮坪,岩性主要为砂泥岩和灰岩的互层;高位体系域则发育碎屑岩潮坪沉积,岩性主要以砂质泥岩、煤层为主。

本溪组混合沉积是以陆源碎屑沉积为主的沉积层序,纵向上混积层系发育在SQ2层序海进体系域(TST)。在海进体系域(TST)早期,海平面快速上升,陆源碎屑的沉积速率逐步小于可容纳空间增长速率,可容纳空间增大,小范围内呈现出混合沉积特点。在潮坪区主要岩性组合为砂泥岩和灰岩的叠置;在潟湖区主要为泥岩夹灰岩。在海进体系域(TST)中晚期,随着海平面的升高,可容纳空间增长的速率明显高于陆源碎屑沉积速率,陆源碎屑沉积受到限制,此时混合沉积范围明显扩大,主要岩性组合为潟湖沉积泥岩和灰岩的交互叠置。不同沉积相带混积层系岩性组合和叠置样式有差异(图7),混积潮坪区主要由砂岩向上变为灰岩组成,混积潟湖区由灰岩向上变为潟湖泥岩,混积潮坪和混积潟湖过渡区由灰岩向上变为砂泥岩再相变为灰岩(图7)。

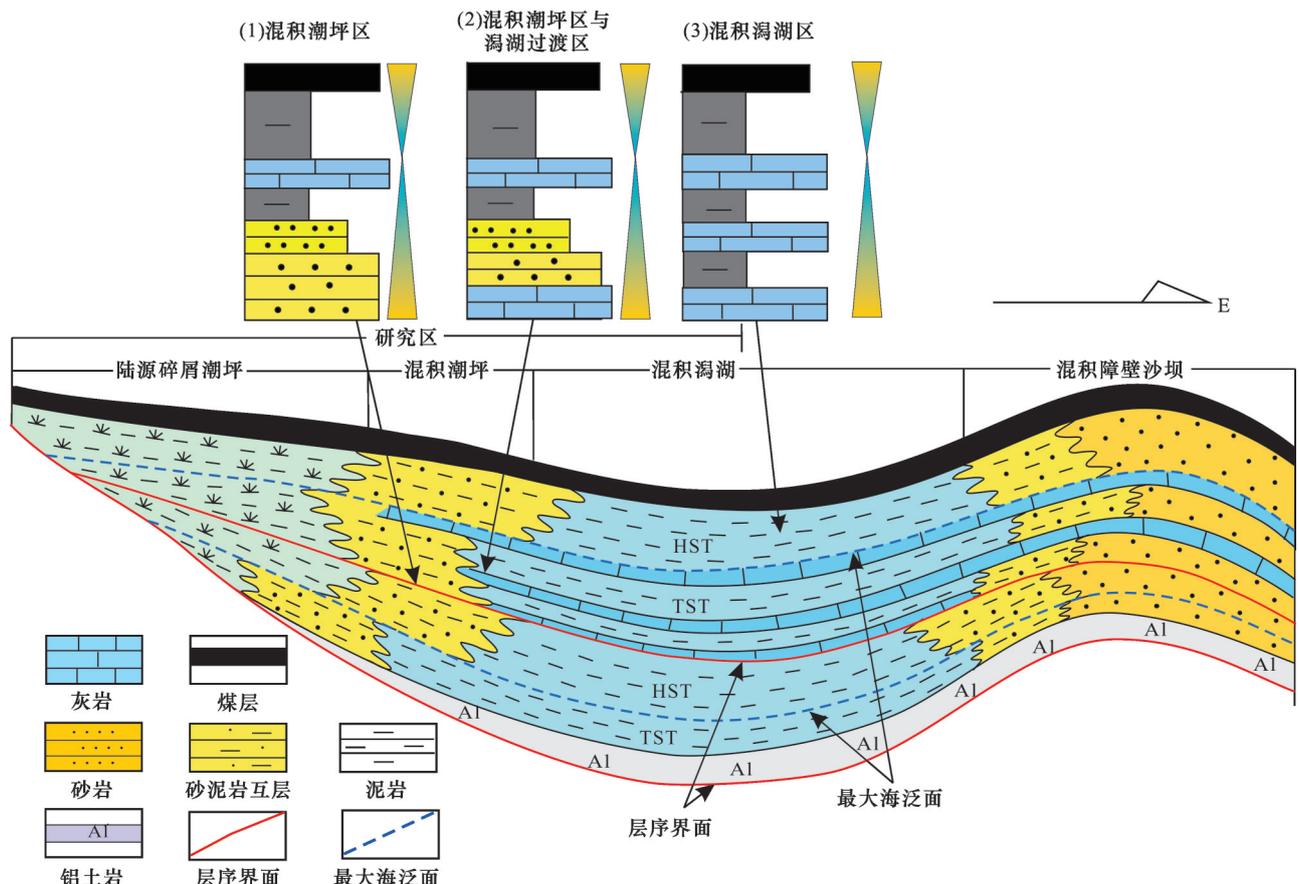


图7 鄂尔多盆地高桥地区本溪组层序地层格架及岩相分布模式

Fig.7 Model of sequence stratigraphy framework and lithofacies of Benxi Formation in Gaoqiao area of Ordos Basin

## 5 结论

(1)鄂尔多斯盆地高桥地区本溪组广泛发育陆源碎屑岩和碳酸盐岩的混合沉积层系,主要发育混积潮坪和混积潟湖沉积,平面上,自西向东,依次发育碎屑岩潮坪、混积潮坪和混积潟湖沉积。

(2)运用层序地层原理,在本溪组识别出一个区域不整合面、一个区域构造沉降转换面、一个岩性、岩相转换面等层序界面,将鄂尔多斯盆地本溪组划分为2个三级层序,且以Ⅱ型层序为主,本溪组每个层序结构主要由海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)组成。

(3)本溪组混积层系是以碎屑岩沉积为背景的沉积,垂向上,混积层系发育在SQ2海进体系域。不同混合沉积相带,岩性岩相组合有差异,混积潮坪区以砂岩之上叠置灰岩为主,混积潟湖区以灰岩和潟湖泥岩垂向叠置,混积潮坪和混积潟湖过渡区以灰岩之上叠置砂泥岩互层为主。

### 参考文献(References)

- [1] 沙庆安.混合沉积和混积岩的讨论[J].古地学报,2001,3(3):63-66.  
SHA Q A. Discussion on mixing deposit and hunji rock[J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(3): 63-66.
- [2] 郭福生,严兆彬,杜杨松.混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J].地学前缘,2003,10(3):312-314.  
GUO F S, YAN Z B, DU Y S. Discussion on mixing deposit, hunji rock and hunji sequence[J]. Earth Science Frontier, 2003, 10(3): 312-314.
- [3] 董桂玉,陈洪德,何幼斌,等.陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考[J].地球科学进展,2007,22(9):931-939.  
DONG G Y, CHEN H D, HE Y B, et al. Some problems on the study of the mixed siliciclastic carbonate sediments[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(9): 931-939.
- [4] 高岗,杨尚儒,屈童.混合沉积研究现状及其与油气富集的关系[J].地质科技情报,2018,37(6):82-88.  
GAO G, YANG S R, QU T. Research status of mixing sediments and their relationship with petroleum enrichment[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(6): 82-88.
- [5] 徐伟,杜晓峰,黄晓波,等.混合沉积研究进展与关键问题[J].沉积学报,2019,37(2):225-238.  
XU W, DU X F, HUANG X B, et al. Research advances and critical issues of "mixed" siliciclastic and carbonate sediments[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(2): 225-238.
- [6] 郭福生.浙江江山藕塘底组陆源碎屑与碳酸盐混合沉积特征及其构造意义[J].沉积学报,2004,22(1):136-141.  
GUO F S. Characteristics and tectonic significance of mixing sediments of siliciclastics and carbonate of Outangdi Formation in Jiangshan, Zhejiang Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 136-141.
- [7] 高远,付修根,万友利,等.北美塘盆地雀莫错组三段混合沉积层系发育特征及控制因素[J].东北石油大学学报,2020,44(3):36-45,106,7.  
GAO Y, FU X G, WAN Y L, et al. Development features and controlling factors of mixed siliciclastic-carbonate sediments in the member 3 of the Quemocuo Formation, northern Qiangtang Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2020, 44(3): 36-45, 106, 7.
- [8] 梁卫,李小平.珠江口盆地东部碎屑岩—碳酸盐混合沉积区岩性油气藏形成地质条件与潜力[J].地球科学,2020,45(10):3870-3884.  
LIANG W, LI X P. Lithological exploration and potential in mixed siliciclastic-carbonate depositional area of eastern Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3870-3884.
- [9] 陈登钱,沈晓双,崔俊,等.柴达木盆地英西地区深部混积岩储层特征及控制因素[J].岩性油气藏,2015,27(5):211-217.  
CHEN D Q, SHEN X S, CUI J, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of deep diamictite in Yingxi area, Qaidam Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(5): 211-217.
- [10] 江茂生,沙庆安.碳酸盐与陆源碎屑岩混合沉积体系研究进展[J].地球科学进展,1995,10(6):551-554.  
JIANG M S, SHA Q A. Research advances in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentary systems[J]. Advances in Earth Science, 1995, 10(6): 551-554.
- [11] 董桂玉,陈洪德,李君文,等.环渤海湾盆地寒武系混合沉积研究[J].地质学报,2009,83(6):800-811.  
DONG G Y, CHEN H D, LI J W, et al. The Cambrian mixed sedimentation around Bohai Sea Bay Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6): 800-811.
- [12] 孙娇鹏,陈世悦,胡忠亚,等.柴东北缘古生代碎屑岩—碳酸盐岩混积相发育特征及组合模式研究[J].天然气地球科学,2014,25(10):1586-1593.  
SUN J P, CHEN S Y, HU Z Y, et al. Research on the mixed model and developmental characteristic of the clastic-carbonate diamictite facies in the northern Qaidam[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1586-1593.
- [13] 刘桂珍,张丹丹,李盼.鄂尔多斯东南部上古生界混积层沉积特征[J].西南石油大学学报:自然科学版,2018,40(2):25-33.  
LIU G Z, ZHANG D D, LI P. sedimentary characteristics of Upper Paleozoic mixed deposits in southeastern Ordos[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2018, 40(2): 25-33.
- [14] 白莹,徐安娜,刘伟,等.塔里木盆地西北部中下寒武统混积岩沉积特征[J].天然气工业,2019,39(12):46-57.  
BAI Y, XU A N, LIU W, et al. Sedimentary characteristics

- of Lower and Middle Cambrian diamict in the northwestern Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(12):46-57.
- [15] MARTIN C J. Sequence stratigraphy of mixed carbonate-siliciclastic platforms developed in a tectonically active setting, Upper Cretaceous, Betic continental margin(Spain)[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, 65B(2):235-254.
- [16] GARCIA G F, SORIA J M, VISERAS C, et al. High-frequency rhythmicity in a mixed siliciclastic-carbonate shelf (Late Miocene, Guadix Basin, Spain): A model of interplay between climatic oscillations, subsidence, and sediment dispersal [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(5):302-315.
- [17] TCHEREPANOV E N, DROXLER A W, LAPOINTE P, et al. Neogene evolution of the mixed carbonate-siliciclastic system in the Gulf of Papua, Papua New Guinea[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113(F1):F01S21
- [18] DEVIES H R. Shelf sandstones in the Mowry Shale: Evidence for deposition during Cretaceous sea level falls[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1989, 59(4):548-560.
- [19] 冯进来, 胡凯, 曹剑, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混积岩及其油气地质意义[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(2):297-307.  
FENG J L, HU K, CAO J, et al. A review on mixed rocks of terrigenous clastics and carbonates and their petroleum-gas geological significance [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(2):297-307.
- [20] 郭书元, 张广权, 陈舒薇. 陆表海碎屑岩—碳酸盐岩混积层系沉积相研究——以鄂尔多斯东北部大牛地气田为例[J]. *古地理学报*, 2009, 11(6):611-627.  
GUO S Y, ZHANG G Q, CHEN S W. Study on sedimentary facies of mixed clastic-carbonate sediments strata system in epicontinental sea: A case of Daniudi Gasfield in northeastern Ordos[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(6):611-627.
- [21] 郭英海, 刘焕杰, 权彪, 等. 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*, 1998, 16(3):44-51.  
GUO Y H, LIU H J, QUAN B, et al. Late Paleozoic sedimentary system and paleogeographic evolution of Ordos area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3):44-51.
- [22] 沈玉林, 郭英海, 李壮福, 等. 鄂尔多斯盆地东缘本溪组—太原组层序地层特征[J]. *地球学报*, 2009, 30(2):187-193.  
SHEN Y L, GUO Y H, LI Z F, et al. Sequence stratigraphy of Benxi-Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(2):187-193.
- [23] 何志平, 邵龙义, 刘永福, 等. 河北南部石炭—二叠纪古气候演化特征[J]. *沉积学报*, 2005, 23(3):454-460.  
HE Z P, SHAO L Y, LIU Y F, et al. Evolution of the paleoclimates during Permo-Carboniferous in the southern Hebei[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3):454-460.
- [24] 侯云东, 陈安清, 赵伟波, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组潮汐—三角洲复合砂体沉积环境[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2018, 45(4):393-401.  
HOU Y D, CHEN A Q, ZHAO W B, et al. Analysis on the depositional environment of carboniferous Benxi Formation tidal-delta sand body complex, Ordos Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2018, 45(4):393-401.
- [25] 李树霞, 向芳, 张瑶, 等. 鄂尔多斯盆地南缘晚古生代沉积物源及其对秦岭造山带北部演化的指示[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2017, 44(5):589-601.  
LI S X, XIANG F, ZHANG Y, et al. Provenance analysis of the Late Paleozoic sediments in south margin of the Ordos Basin and its indication to evolution of the north of Qinling orogenic belt in China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2017, 44(5):589-601.
- [26] 贾浪波, 钟大康, 孙海涛, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组沉积物源探讨及其构造意义[J]. *沉积学报*, 2019, 37(5):1087-1103.  
JIA L B, ZHONG D K, SUN H T, et al. Sediment provenance analysis and tectonic implication of the Benxi Formation, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5):1087-1103.
- [27] 陈洪德, 侯中健, 田景春, 等. 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*, 2011, 21(3):16-22.  
CHEN H D, HOU Z J, TIAN J C, et al. Study on sequence stratigraphy of deposits and tectonic-sedimentary evolution in Ordos Basin during Late Paleozoic [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2011, 21(3):16-22.
- [28] 李文厚, 屈红军, 魏红红, 等. 内蒙古苏里格庙地区晚古生代层序地层学研究[J]. *地层学杂志*, 2003, 27(1):41-44.  
LI W H, QU H J, WEI H H, et al. Sequence stratigraphy of Late Paleozoic deposits in Suligemiao area Inner Mongolia [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2003, 27(1):41-44.
- [29] 于波. 鄂尔多斯东南部上古生界层序地层特征[J]. *西北地质*, 2016, 49(1):92-100.  
YU B. Characteristic of Upper Paleozoic sequence stratigraphy in east-southern Ordos Basin [J]. *Northwestern Geology*, 2016, 49(1):92-100.
- [30] 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 X H, WANG X Z, WANG N X, 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.
- [31] 郑荣才, 文华国, 梁西文. 鄂尔多斯盆地上古生界高分辨率层序地层分析[J]. *矿物岩石*, 2002, 22(4):66-74.  
ZHENG R C, WEN H G, LIANG X W. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy for Upper Paleozoic in Ordos Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2002, 22(4):66-74.

## Sedimentary characteristics and sequence stratigraphy in a mixed siliclastic-carbonate depositional system : Case study of Benxi Formation in Gaoqiao area, Ordos Basin

LIU Gui-zhen<sup>1,2</sup>, GAO Wei<sup>3</sup>, WEI Jia-sheng<sup>4</sup>, TANG Wen<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

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

4. No. 6 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Yulin 718500, China)

**Abstract:** A mixed siliclastic-carbonate succession is developed in Benxi Formation in the Gaoqiao area of Ordos Basin. On the basis of previous researches, sedimentary characteristics and sequence stratigraphy in a mixed siliclastic-carbonate depositional system of Benxi Formation were studied based on outcrop, core data, logging and well logs data in Gaoqiao area of Ordos Basin. It shows that the Benxi Formation is mainly composed of tidal flat depositional system which is subdivided into the siliclastic tidal flat facies, the mixed tidal flat facies and mixed lagoon facies. According to the principle of sequence stratigraphy, one regional unconformity surface, one tectonic subsidence transition surface and one lithology and lithofacies transition surfaces are identified. The Benxi Formation is divided into SQ1-SQ2 of the 3<sup>rd</sup>-order sequences. Each sequence is mainly composed of transgressive system tract (TST) and highstand system tract (HST). The mixed siliclastic-carbonate succession of Benxi Formation is developed under the circumstance of dominated siliclastic sediments. Mixed sedimentation mainly occurred at the stage of TST of SQ2. The lithologic and lithofacies assemblages of mixed siliclastic-carbonate succession are different in different sedimentary areas. The intertidal sandstone and mudstone are superimposed on the tidal channel facies sandstone and then to the limestone in the mixed tidal flat area. The lagoon mudstone is superimposed on the limestone in the mixed lagoon area. The limestone is superimposed on the subtidal sandstone and intertidal sandstone in the transitional area of the mixed tidal flat and the mixed lagoon.

**Key words:** Benxi Formation; Mixed siliclastic-carbonate system; Sedimentary facies; Sequence stratigraphy; Ordos Basin

**Foundation items:** The National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41602156); the Natural Science Research Program of Shaanxi Province (Grant No.2019JM-381); The Scientific Research Project of the Education Department of Shaanxi Province (Grant No.18JS091).