

## 四川盆地东部石炭系黄龙组潮汐沟道发育特征 及对优质储层展布的控制作用

王坤<sup>1</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 王东坤<sup>2</sup>

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油大学(华东))

**摘要** 根据陆源碎屑沉积发育特点与具有一定磨圆度砾石的发育位置,推断四川盆地东部石炭系黄龙组发育了云阳东南部与达州西北部两个海侵通道,并形成了重庆—万州与达州东南部两个潮坪沉积体系。该区发育了一套由低水位体系域—海进体系域—高水位体系域组成的较完整的I型层序。黄龙组潮坪沉积体系的不同沉积微相控制了储层的纵向分布特征,粒屑滩相储层物性最好。利用储层微量元素及碳氧同位素分析对黄龙组表生岩溶期受剥蚀程度进行定性分析表明,黄龙组没有遭受严重风化剥蚀,现今的地层残余厚度能够反映原始地层相对厚薄,利用黄龙组残余厚度可以预测潮汐沟道平面展布。通过钻井、地震资料对潮汐沟道的预测,认为潮汐沟道对优质储层的空间展布有明显的控制作用。

**关键词** 四川盆地东部; 黄龙组; 碳酸盐岩; 沉积相; 沉积体系; 潮汐沟道

**中图分类号**: TE122.2<sup>\*1</sup>

**文献标识码**: A

四川盆地东部石炭系的勘探始于20世纪70年代,主要以构造圈闭为勘探对象<sup>[1]</sup>。近十多年来,由于高陡构造带复杂,构造圈闭的落实越来越困难<sup>[2]</sup>,而岩性、构造-岩性圈闭勘探逐步成为构造气藏勘探的重要接替类型<sup>[3-5]</sup>。石炭系作为四川盆地东部重要的油气勘探层系,前人对石炭系的沉积环境和储层发育类型有较多研究,多认为该区域石炭系黄龙组以古岩溶地貌为主,强调表生期的岩溶作用对储层发育的主控作用,后期的构造裂缝改造了储层物性,形成了现今的孔隙-裂缝型储层<sup>[6-7]</sup>。但前人对石炭系古岩溶作用程度尚无系统的分析,难以厘定岩溶作用对储层发育的贡献,且对于沉积体系与储层物性之间的关系也缺乏深入研究,因而制约了地层岩性圈闭的勘探工作。

本次研究以沉积体系为基础,在准确还原四川盆地东部石炭系古沉积环境的基础上,利用钻井岩心储层物性以及同位素分析,研究了沉积微相类型对储层孔隙度的控制作用,并定性分析石炭系表生

期岩溶作用的程度。据此提出:潮汐沟道作为一种特殊的沉积相带,对优质储层的发育有明显的控制作用,利用钻井及地震资料可以对潮汐沟道进行有效预测。

### 1 区域地质概况

四川盆地东部(简称川东)西起华蓥山,东至七跃山,北达城口一线,南到涪陵—石柱以南,面积约 $5.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。区内自西向东发育有NE—NNE向隔档式褶皱构造,由于其地貌反差大,地层倾角陡,被形象地称之为高陡构造或高陡背斜(图1)。加里东运动后,川东地区整体隆升遭受剥蚀,致使泥盆系和石炭系下统整体缺失。早石炭世末,海水自鄂西向西侵入川东大部,石炭纪末的云南运动使石炭系发生抬升并再次遭受剥蚀。

现今残留的上石炭统是一套黄龙组碳酸盐岩沉积,残余厚度20~70 m,它与上覆的下二叠统梁山组铝土质泥岩以及下伏的中志留统韩家店组风化壳泥

收稿日期: 2012-10-16; 改回日期: 2013-09-16

基金项目: 本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”的子课题“四川、塔里木等盆地及邻区海相碳酸盐岩大油气田形成条件、关键技术及目标评价”(编号 2011ZX05004-001)资助

王坤: 1985年生,博士研究生。主要从事油气地质综合研究工作。通讯地址: 100083 北京市海淀区学院路 910 信箱

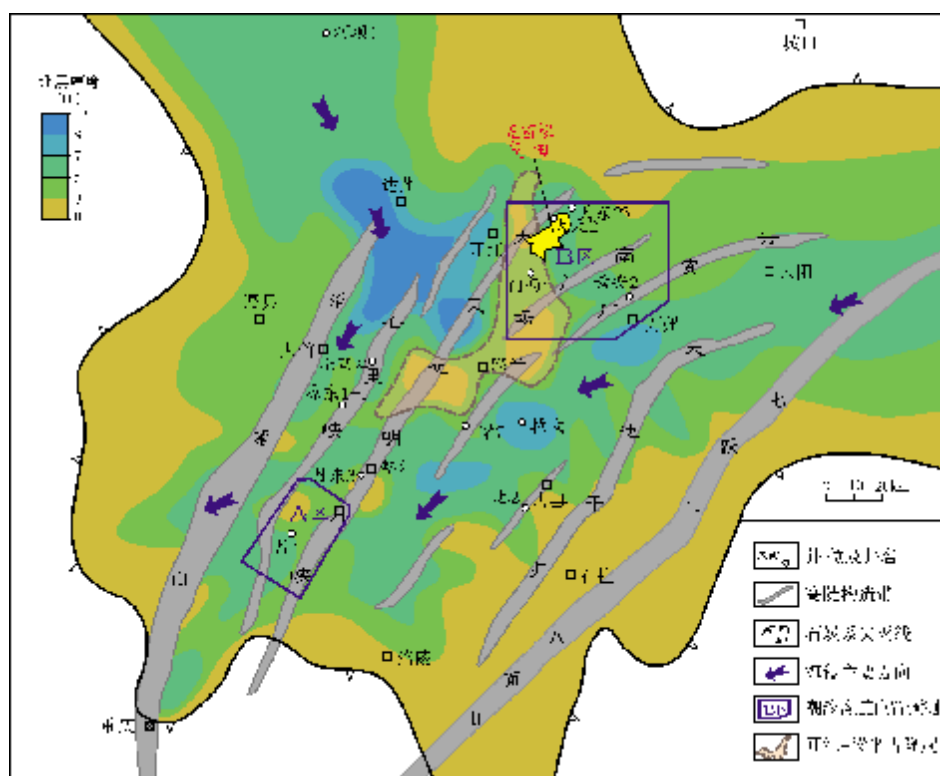


图 1 四川盆地东部石炭系黄龙组高陡构造与潮坪沉积体系发育位置图(据文献[8]修改)

岩均呈不整合接触关系<sup>[9-10]</sup>(图2)。根据岩性及电性特征,可将黄龙组自下而上分为三段:一段以去石膏化、去白云石化次生灰岩及粉晶白云岩为主,局部含石膏;二段以粒屑白云岩、泥粉晶白云岩、角砾白云岩为主,溶蚀孔洞十分发育;三段以粒屑灰岩、泥晶灰岩、角砾灰岩为主,夹杂粒屑结构白云岩<sup>[8,11]</sup>(图2)。

## 2 沉积体系发育特征

### 2.1 潮坪沉积体系平面分布特征

前人研究认为川东石炭系黄龙组主要为潮坪沉积体系<sup>[10,12]</sup>,也有人认为是潟湖—海湾沉积体系<sup>[13]</sup>或浅海陆棚沉积体系<sup>[14]</sup>。本文认为,石炭系黄龙组以潮坪沉积体系更为可信,且晚石炭世黄龙沉积期存在两个海侵方向与两个潮坪沉积体系(图1)。

利用地层中陆源碎屑与具有一定磨圆度的砾级碎屑的含量可推断海侵方向并较准确地描述潮坪沉积体系的平面展布<sup>[8]</sup>。其基本原理是:陆源碎屑如泥质岩主要发育于潮汐沟道内部,并且其含量向海退方向逐渐减少;潮汐沟道底部可见含量较高的具有磨圆

特点的砾屑。另外,川东地区石炭纪存在两个海侵入口,石炭系沉积在西北方向与川西北石炭系相连<sup>[11]</sup>。依据上述方法,可识别出晚石炭世川东地区存在重庆—万州与达州东南部等两个潮坪沉积体系(图1)。

黄龙组沉积早期为一填平补齐的过程,其底部黄龙组一段的沉积厚度变化可以反映潮汐通道的主要位置。达州东南部潮坪体系位于渠县—大竹—达州地区,规模较小。位于该区西北方向的河坝1井钻揭33m的黄龙组地层,其上部为26.5m的陆棚相白云质泥岩沉积;向渠县、大竹一带泥质碳酸盐岩及陆源碎屑含量明显减少,说明达州西北向东南存在海侵通道。重庆—万州潮坪沉积体系主要分布于开江—梁平古隆起东部的五百梯—万州—垫江—华蓥山东南的石炭系发育区。反映陆源碎屑供给特征的泥质碳酸盐岩的厚度,自重庆—垫江向东北方向逐渐减薄为0m;自梁平地区的0.7~3.4m向其东部的云安厂地区减薄为0~0.3m,这证明万州—云阳及其以东地区是远离陆源区的<sup>[14]</sup>。黄龙组一段厚度大于5m的地区主要位于重庆北部到万州—云阳一线,展示出早期的海侵通道。

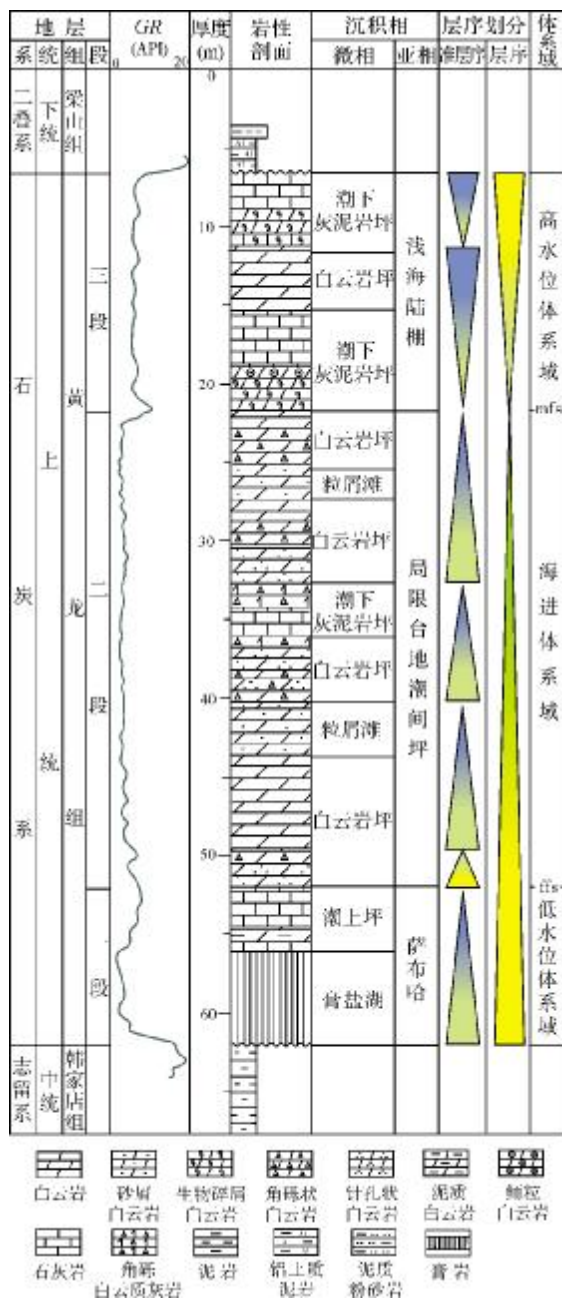


图2 四川盆地东部石炭系层序与沉积相划分综合柱状图  
(据文献[8]修改)

ffs 初次海泛面; mfs 最大海泛面

## 2.2 潮坪沉积体系演化特征

前已述及,石炭系的顶界、底界均为不整合侵蚀面,这两个界面共同限定了石炭系的I型三级层序。

黄龙组二段底部为初次海泛面(ffs),该界面主

要识别标志有:(1)界面上、下岩相发生突变,其下为萨布哈环境下的次生灰岩沉积,其上为白云岩沉积;(2)界面上普遍发育厚0.1~0.3m的生物碎屑微晶白云岩,生物碎屑以有孔虫为主,含少量海百合、腕足、和笔石等,属快速海侵初期沉积的产物<sup>[13]</sup>。最大海泛面(mfs)为黄龙组二段与三段的分界面,自然伽马(GR)曲线表现为一高值层段的底。该高自然伽马层为该三级层序的凝缩层,岩性以深灰、暗灰色薄层至纹层状泥晶灰岩为主,含少量生物碎屑,该界面是海进体系域与高水位体系域的分界面。低水位体系域、海进体系域、高水位体系域分别相当于黄龙组一段、二段和三段(图2)。

黄龙组一段 主要发育深灰—灰黑色次生灰岩,夹白云岩、角砾白云岩及石膏岩,可见少量泥质次生灰岩、砂质次生灰岩、灰质砂岩、含砂质白云岩等;碎屑颗粒以岩屑为主,次为石英。可见膏模、叠层石、鸟眼构造、示顶底构造等沉积构造<sup>[8,11,15-17]</sup>。由于陆源碎屑的输入,底部常有志留系风化壳残积物<sup>[18-19]</sup>,生物罕见。以上特征反映出黄龙组一段潮上坪—膏盐湖的沉积特点<sup>[8,15-16]</sup>。

黄龙组二段 发育了潮间带局限潟湖和浅滩沉积。潮间浅滩相岩性为白云岩、角砾状白云岩夹灰岩、角砾状灰岩,局部地区发育泥质白云岩、砂质白云岩、灰岩、灰质白云岩及角砾灰岩等,生物种类增多;粒屑含量高,主要由砂屑和生物碎屑组成,具有亮晶胶结,常见蓝绿藻、有孔虫、棘皮类、腕足类、腹足类、双壳类等生物化石<sup>[10,18]</sup>。可见干裂、纹理、叠层石、鸟眼、生物钻孔、交错层理、冲刷面等沉积构造<sup>[10,17-18]</sup>,这一时期局部地区水动力条件较强,已沉积地层受风暴潮的作用而破碎成砾,并在往复流的作用下形成磨圆度较好且呈悬浮状分布的角砾白云岩。

黄龙组三段 以浅灰—深灰色灰岩、生物碎屑灰岩为主,夹白云岩、角砾白云岩及生物碎屑白云岩。该段生物门类增多,且单个门类的数量也增多,除黄龙组二段所见化石外,还可见三叶虫及海绵骨针,显示水体较深的陆棚—盆地边缘沉积特征<sup>[14]</sup>。池2井黄龙组三段泥粉晶灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-1.12\text{‰} \sim -0.80\text{‰}$ ,基本属接近于零的小负值,平均为 $-0.92\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-9.46\text{‰} \sim -8.23\text{‰}$ ,平均 $-9.12\text{‰}$ <sup>[18]</sup>,属正常的海相沉积<sup>[7]</sup>。粒屑滩微相发育程度较二段明显变弱,且以潮下灰泥坪为主。

2.3 沉积微相对储层物性的影响

石炭系黄龙组气藏的储层主要集中在二段白云岩中,为孔隙裂缝型储层,作为油气主要储集空间的孔隙的发育程度直接影响了天然气的富集规模及资源量。虽然整个川东地区白云石化作用较普遍,但储层特别是孔隙度大于 6% 的 I、II 类储层分布具有明显的非均质性<sup>[8]</sup>。不同气藏以及同一气藏不同井之间储层发育程度差别较大,优质储层的横向可对比性差,导致单井产能也差别悬殊。

黄龙组以潮坪环境为主的沉积体系控制了原始沉积物的岩性组合与颗粒结构,不同沉积相带内形成的原始沉积物具有不同的初始孔隙度和渗透率。虽然在后期的埋藏成岩过程中,压实、胶结、压溶等成岩作用对沉积物的原始储集物性存在破坏和改

造,但沉积体系对储层物性仍具有明显的控制作用。

石炭系黄龙组在潮坪沉积体系控制下,主要发育粒屑滩、白云岩坪、潮下灰泥坪、膏盐湖等四类沉积微相<sup>[10-14]</sup>。不同沉积相带发育不同的岩性组合,具有不同的物性特征。

本文对不同沉积微相储层的孔隙度和渗透率进行了统计分析(表 1,图 3),结果表明,各微相类型的孔隙度由高到低依次为:粒屑滩>白云岩坪>潮下灰泥岩坪>膏盐湖;渗透率由高到低依次为:粒屑滩>白云岩坪>膏盐湖>潮下灰泥岩坪。由图表可见,粒屑滩微相的孔隙度和渗透率明显高于其它微相类型,为有利储层发育的微相类型,而白云岩坪、潮下灰泥岩坪和膏盐湖等微相的储层孔隙度和渗透率普遍较低,一般不利于储层孔隙发育,难以形成优质储层。

表 1 四川盆地东部石炭系黄龙组沉积微相储集岩孔隙度( $\phi$ )、渗透率( $K$ )统计表

沉积微相类型	$\phi$ (%)		$\phi > 3\%$ 的样品比例 (%)	$K(\times 10^{-3} \mu\text{m}^2)$		$K > 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品比例 (%)
	分布范围	平均值		分布范围	平均值	
白云岩坪	0.8~10.2	3.32	56.0	0.01~12.5	0.87	19.4
膏盐湖	0.3~12.5	2.73	31.7	0.01~21	1.61	18.2
粒屑滩	1.1~19.6	6.17	63.2	0.1~23	3.78	37.3
潮下灰泥岩坪	0.1~8.4	2.86	39.5	0.01~21.4	0.86	15.8

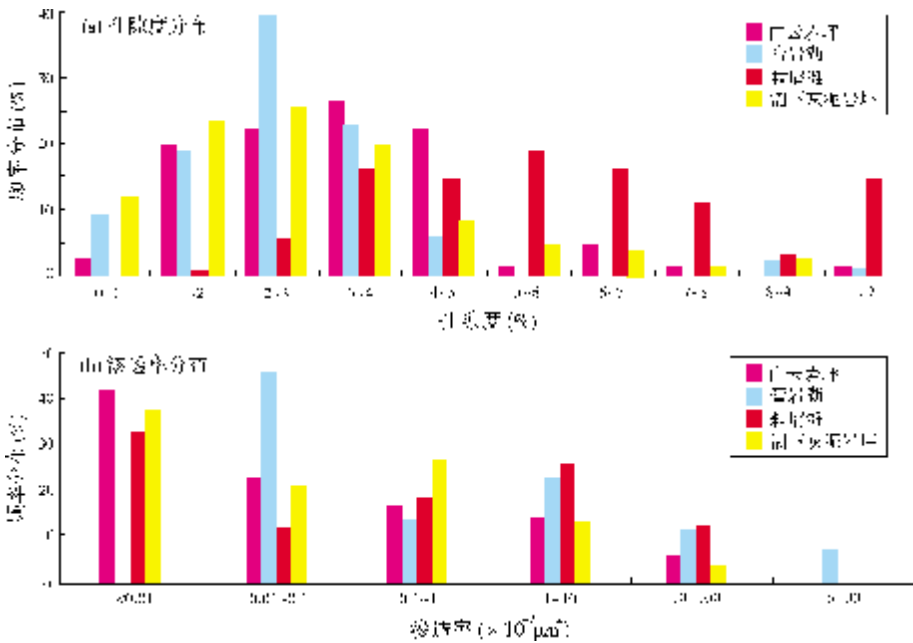


图 3 四川盆地东部石炭系黄龙组不同沉积微相储集岩物性分布直方图



通过以上沉积相带与物性的对比可知,粒屑滩微相白云岩的物性整体较好。其原因在于这种环境中波浪和潮汐的簸选和改造作用较强,细粒的灰泥及白云泥被波浪带走,从而沉积了粒度较为均一的粗粒碎屑,其原始孔隙度、渗透率较高,加之潮汐作用造成的反复剥蚀使得白云岩暴露地表,发生干裂、角砾化等风化作用,使渗透性不断提高,因此粒屑(砂屑、砾屑)浅滩是本区储层发育的有利沉积环境。白云岩坪微相,在埋藏期经历过白云石化作用,有利于次生孔隙的形成,也为较有利的储集相带。膏盐湖微相与潮下灰泥岩坪微相,水动力低,以沉积泥粉晶结构的灰岩为主,原生孔隙不发育,难以形成有效储层。

### 3 潮汐沟道与储层

潮汐沟道是潮坪环境中特殊的亚环境,由于潮汐沟道的水动力特征明显有别于周围环境,因此它们对潮坪沉积体系的岩性特征以及储集物性有一定的控制作用。川东石炭系黄龙组沉积在志留系不整合面之上,志留系遭受长期风化剥蚀作用形成的古地貌以及晚石炭世大规模的海侵作用共同控制了较为广泛的潮汐沟道发育区。本文将在对黄龙组潮汐沟道进行有效识别及预测的基础上,论证其对储层发育的控制作用。

#### 3.1 潮汐沟道的识别

潮汐的反复冲刷,会造成潮汐沟道内部地层的沉积厚度大于周边地区。黄龙组原始沉积地层的相对厚薄可有效地反映潮汐沟道的发育位置。但是川东地区黄龙组曾经遭受过抬升剥蚀,因此现今黄龙组的地层残余厚度能否反映原始地层的相对厚薄,需要进一步论证。

利用碳氧同位素和微量元素特征可定性地分析黄龙组遭受风化剥蚀的程度,其基本依据如下:

(1)  $Mn/Sr$  值。受大气淡水的影响,沉积期后碳酸盐岩中的  $Sr$  和  $Na$  含量降低,而  $Fe$  和  $Mn$  含量相对增加<sup>[20-24]</sup>,因此  $Mn/Sr$  值可作为判断海相碳酸盐岩成岩作用和剥蚀程度的一个灵敏指标。一般  $Mn/Sr < 10$  的碳酸盐岩未遭受强烈的溶蚀作用<sup>[25-30]</sup>,而  $Mn/Sr < (2 \sim 3)$  表示样品很好地保持了原始海水的同位素组成<sup>[26]</sup>,基本未受后期溶蚀改造。

(2) 氧同位素组成特征。一般地,碳酸盐岩的

$\delta^{18}O_{PDB}(\text{‰})$  值会因后期风化剥蚀过程中的水—岩交换作用而明显降低,但定量的研究目前暂无定论。一般情况下,当碳酸盐岩的  $\delta^{18}O < -5\text{‰}$  时,表示已受风化剥蚀作用影响,当  $\delta^{18}O < -10\text{‰}$  时,岩石已遭受强烈的剥蚀作用<sup>[31-33]</sup>。

(3)  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{18}O$  的相关性。主要表现在  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{18}O$  值的离散性以及  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{18}O$  值曲线的正相关性。一般认为,如果  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{18}O$  数值不具有明显的相关性,则反映海相碳酸盐岩基本保存了原始的碳、氧同位素组成<sup>[25-29]</sup>,后期剥蚀作用不明显。

笔者对川东黄龙组42块岩心样品进行了微量元素及碳、氧同位素分析<sup>[33]</sup>,如图4所示。

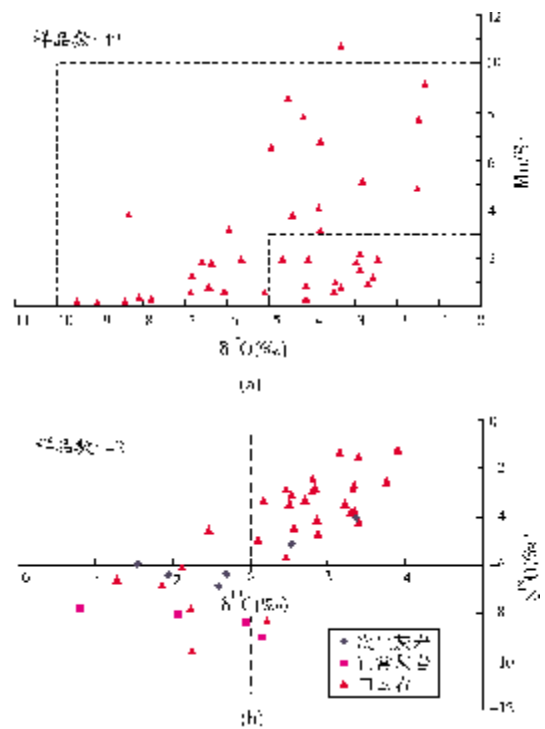


图4 四川盆地东部石炭系黄龙组氧同位素—微量元素关系图(a)及不同岩性碳氧同位素分布图(b)

从图4a可以看出,42块样品的  $Mn/Sr$  值除1块样品 ( $Mn/Sr = 10.71$ ) 外均小于10,有27块样品的  $Mn/Sr$  值小于3。共有26块样品的氧同位素值大于  $-5\text{‰}$ ,其余样品的氧同位素值小于  $-5\text{‰}$ ,但均大于  $-10\text{‰}$ 。图4b显示出碳、氧同位素值虽呈现出一定的相关性,但碳同位素值小于0的样品其碳、氧同位素相关性相对较差。

以上分析表明,石炭系表生期虽受到风化剥蚀,但并不强烈,岩溶作用程度有限,间接地反映出剥蚀

作用对石炭系古地貌的改造有限, 现今石炭系的厚度可以代表原始地层的相对厚薄关系, 因此利用现今黄龙组的地层残余厚度可以预测潮汐沟道的平面分布。本文对明月峡构造带和南门场—云安厂构造带(图1)198条、4 520 km二维测线进行了地震解释,

并获得了这两个构造带的上石炭统黄龙组地层厚度图(图5a和图6a)。图中均较为清晰地反映了潮汐沟道的平面展布。

另外, 对于气田区的潮汐沟道而言, 可以辅以丰富的岩心资料来提高潮汐沟道的预测精度。以大天

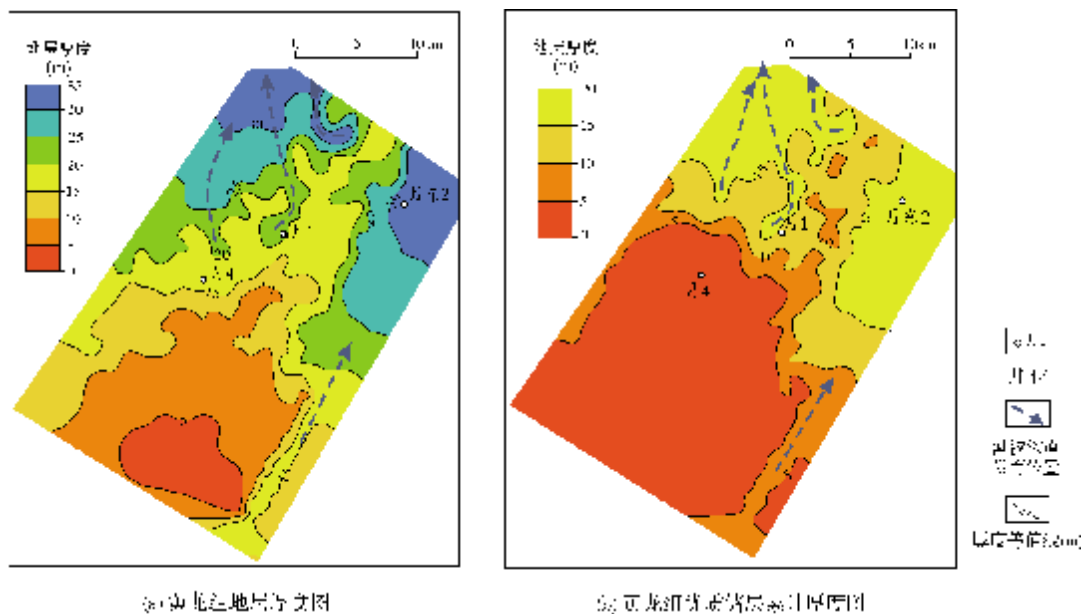


图5 四川盆地东部明月峡地区石炭系黄龙组地层厚度(a)与优质储层累计厚度(b)预测图  
图形位置对应图1中的A区。累计厚度据中子测井孔隙度  $\phi \geq 10\%$  的储层计算

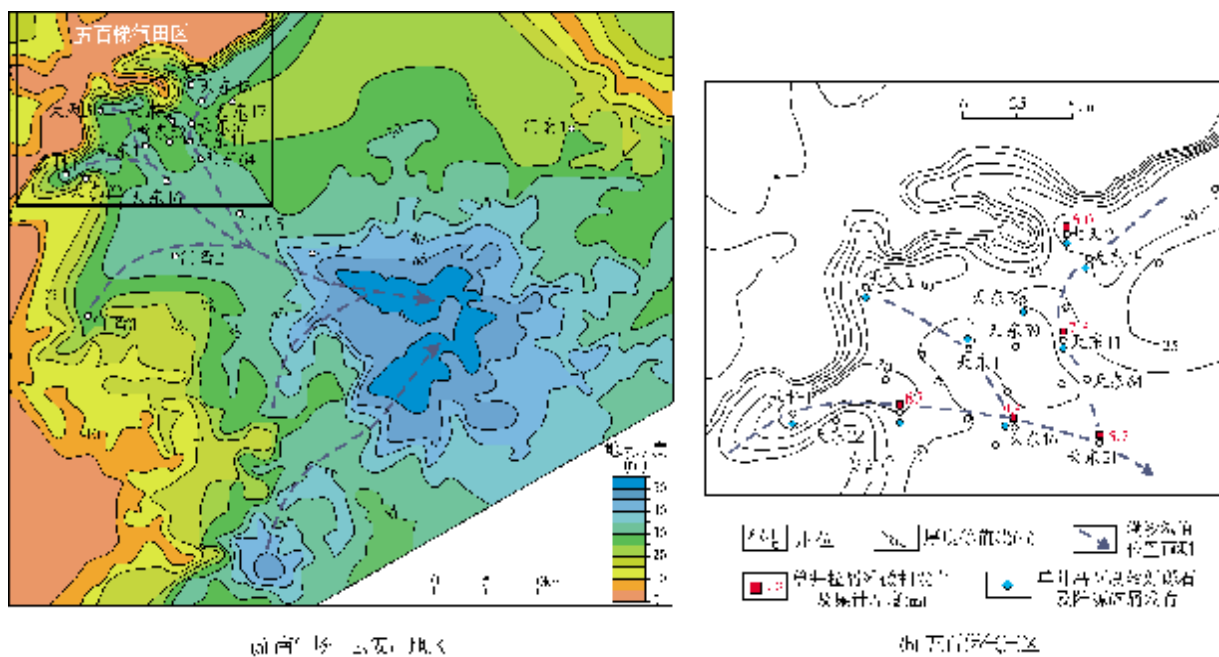


图6 四川盆地东部五百梯气田区与南门场—云安厂地区石炭系黄龙组潮汐沟道预测图  
图(a)的位置对应图1中的B区

池高陡构造带北倾末端的五百梯气田为例,据对该气田14口井进行的岩心分析,天东1、天东2、天东11、天东15、天东16、大天2、大天3、五科1等井的黄龙组底部发育有陆源石英及(或)磨圆度较好的砾石。有9口井的单井相分析表明,井间同一沉积相累计厚度差别较大,其中天东1井和天东11井的潮下灰泥岩坪微相不发育;代表水动力较强的粒屑滩相累计厚度在天东16井和天东11井分别达到9.3m和7.3m。利用残余地层厚度与利用岩性发育特征对五百梯气田潮汐沟道的预测结果十分吻合(图6b)。

### 3.2 潮汐沟道对储层的控制作用

结合典型气田解剖和潮汐沟道预测,本文认为潮汐沟道对储层空间展布具有较明显的控制作用,其主要体现在以下几个方面:

(1)潮汐沟道内部长期处于高能环境,为粒屑滩沉积微相的发育创造了有利条件,如五百梯气田潮汐沟道内部粒屑滩相十分发育。另外,以达州东南部潮坪体系为例,据开江—梁平古隆起以西潮汐沟道发育区内的七里24井及凉东1-1井岩心统计,黄龙组底部泥质碳酸盐岩累计厚度达到1.8m和1.5m,同时这两口井的黄龙组二段发育有厚层较高磨圆度的角砾白云岩和石灰岩,为典型的粒屑滩相沉积<sup>[4-5]</sup>。

(2)潮汐沟道的平面展布控制了优质储层的平面发育特征。已知明月峡构造带石炭系的声波测井响应与中子密度测井响应有很好的对应关系,利用这一特点进行中子孔隙度的拟声波反演计算,得到了明月峡地区优质储层累计厚度的平面分布(图5b)。从图中可以看出,优质储层累计厚度等值线的平面展布形态与地层等厚度图十分类似,潮汐沟道发育区优质储层累计厚度大,两者等值线特征具有较好的一致性。如潮汐沟道内月1井黄龙组厚度为20m,其中的优质储层累计厚度达到15m,而月4井潮汐沟道不发育,黄龙组厚度为17m,其中的优质储层累计厚度不足5m。

(3)潮汐沟道内部优质储层十分发育,向两侧翼部储层物性变差。从五百梯气田潮汐沟道预测图(图6b)中可以看出,该区存在两条主要的潮汐沟道,分别位于天东16井—天东1井与天东64井—天东2井一线。潮汐沟道内的单井有效储层厚度大、物性好,如天东1井及天东67井以孔隙度大于6%的Ⅱ类储层为主,天东1井还发育较厚的孔隙度大于12%的Ⅰ类储

层,这两口井的单井产能分别达到 $111.81 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $14.81 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。而位于潮汐沟道之间的天东59井,地层残厚薄、储层物性差,测试后仅产微气。天东22井和天东17井同样因远离潮道而储层物性变差,单井产能很低。因此,潮汐沟道内部具有较好的储层物性,非潮汐沟道发育区储层物性明显变差,造成平面上储层较强的非均质性。

## 4 结 论

石炭系黄龙组为一套残余碳酸盐岩,由黄龙组底部的泥质含量以及磨圆度较好的砾石含量等反映潮汐沟道的特征表明,黄龙组沉积期存在两个海侵方向以及两个潮坪沉积体系。

黄龙组沉积微相控制了储层发育特征。黄龙组主要发育粒屑滩、白云岩坪、潮下灰泥岩坪、膏盐湖等四种沉积微相。粒屑滩沉积微相的储层孔隙度与渗透率明显高于其他微相类型,为最有利储层发育的微相类型。

储层微量元素及碳氧同位素特征分析认为,黄龙组在表生期受剥蚀的程度以及对古地貌的影响有限,现今黄龙组的地层残余厚度能够反映原始地层的相对厚薄。利用黄龙组地层厚度,结合岩性特征可以对潮汐沟道进行有效的预测。

潮汐沟道对储层发育的控制作用主要体现在:(1)潮汐沟道有利于粒屑滩相的发育,而粒屑滩相中优质储层最为发育;(2)潮汐沟道内部优质储层物性好,向两侧翼部储层物性明显变差;(3)潮汐沟道与优质储层在平面上的展布具有高度的一致性。因此预测潮汐沟道的平面展布对于寻找优质储层具有指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] 冉隆辉.论四川盆地天然气勘探前景[J].天然气工业,2006,26(12):42-44.
- [2] 党录瑞,李瑜,郑超,等.云安厂构造带地质特征及下一步勘探目标[J].天然气工业,2009,29(10):17-20.
- [3] 邹才能,徐春春,李伟,等.川东石炭系大型岩性地层气藏形成条件与勘探方向[J].石油学报,2010,31(1):18-24.
- [4] 沈平,徐人芬,党录瑞,等.四川盆地五百梯气田的勘探与发现[J].海相油气地质,2009,14(2):71-78.
- [5] 汪泽成,赵文智,张林,等.四川盆地构造层序与天然气勘探[M].北京:地质出版社,2002.
- [6] 文华国,郑荣才,沈忠民,等.四川盆地东部黄龙组古岩溶地貌研究[J].地质论评,2009,55(6):816-827.
- [7] 郑荣才,胡忠贵,郑超,等.渝北—川东地区黄龙组古岩溶储层稳定同位素地球化学特征[J].地学前缘,2008,15(6):303-310.

- [8] 李伟, 张志杰, 党录瑞. 四川盆地东部上石炭统黄龙组沉积体系及其演化[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(4): 400-408.
- [9] 胡光灿, 谢姚祥. 中国四川东部高陡构造石炭系气田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 63-85.
- [10] 陈宗清. 扬子区石炭纪黄龙期沉积相[J]. 沉积学报, 1990, 8(2): 23-30.
- [11] 王芙蓉, 陈振林, 王雪莲, 等. 川东北地区石炭系成岩作用及储集性[J]. 海相油气地质, 2004, 9(1/2): 91-96.
- [12] 郭正吾, 邓康岭, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [13] 方少仙, 侯方浩, 李凌, 等. 四川华蓥山以西石炭系黄龙组沉积环境的再认识[J]. 海相油气地质, 2000, 5(1/2): 158-165.
- [14] 郑荣才, 李德敏, 张梢楠. 川东黄龙组天然气储层的层序地层学研究[J]. 沉积学报, 1995, 13(增): 1-9.
- [15] 刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [16] 郑荣才, 陈洪德, 张梢楠, 等. 川东黄龙组古岩溶储层的稳定同位素和流体性质[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1997, 22(4): 424-428.
- [17] 李忠, 雷雪, 晏礼. 川东石炭系黄龙组层序地层划分及储层特征分析[J]. 石油物探, 2005, 44(1): 39-43.
- [18] 彭军, 陈洪德, 田景春, 等. 川滇黔桂地区石炭系层序地层研究[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 190-197.
- [19] 钱崢, 黄先雄. 碳酸盐岩成岩作用及储层——以川东石炭系为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 19-41.
- [20] VEIZER J, ALA D, AZMY K, et al.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{13}\text{C}$  and  $^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical Geology, 1999, 161(1/3): 58-88.
- [21] 黄思静, 石和, 张萌, 等. 上扬子石炭—二叠纪海相碳酸盐的锶同位素演化与全球海平面变化[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 481-487.
- [22] MULLER D W, MCKENZIE J A, MUELLER P A. Abu Dhabi sabkha, Persian Gulf, revisited: Application of strontium isotopes to test an early dolomitization model[J]. Geology, 1990, 18(7): 618-621.
- [23] BRAND U, VEIZER J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system; 1, trace elements[J]. Journal of Sedimentary Research, 1980, 50(4): 1219-1236.
- [24] BRAND U, VEIZER J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system; 2, stable isotopes[J]. Journal of Sedimentary Research, 1981, 51(3): 987-997.
- [25] DERRY L A, KAUFMAN A J, JACOBSEN S B. Sedimentary cycling and environmental change in the Late Proterozoic: Evidence from stable and radiogenic isotopes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56: 1317-1329.
- [26] 张同钢, 储雪蕾, 张启锐, 等. 陡山沱期古海水的硫和碳同位素变化[J]. 科学通报, 2003, 48(8): 850-855.
- [27] KAUFMAN A J, JACOBSEN S B, KNOLL A H. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: Implications for tectonics and paleoclimate[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 120(3/4): 409-430.
- [28] 郭福生, 彭花明, 潘家永, 等. 浙江江山寒武纪碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古环境意义探讨[J]. 地层学杂志, 2003, 27(4): 289-297.
- [29] QING Hairuo, VEIZER J. Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods: Implications for coeval seawater[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(20): 4429-4442.
- [30] WILLIAMS D F. Isotope chronostratigraphy: Theory and methods[M]. California: Academic Press, 1988, 39-68.
- [31] 王大锐, 白志强. 广西中—上泥盆统界线附近的化学地层学特征[J]. 地层学杂志, 2002, 26(1): 50-54.
- [32] 严兆彬, 郭福生, 潘家永, 等. 碳酸盐岩 C、O、Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2005, 20(1): 54-55.
- [33] 王坤, 李伟, 陆进, 等. 川东地区石炭系碳酸盐岩碳、氧、锶同位素特征及其成因分析[J]. 地球化学, 2011, 40(4): 351-362.

编辑: 赵国宪

## Development and Control on Reservoir Distribution of Tidal Channels in Carboniferous Huanglong Formation in the East of Sichuan Basin

Wang Kun, Li Wei, Wang Dongkun

**Abstract:** Based on the development characteristics of Carboniferous Huanglong terrigenous clastic deposits and the development locations of gravels with some psephicity, two transgression channels can be deduced to be present on the southeast of Yunyang and the northwest of Dazhou, and two tidal-flat depositional systems form along Chongqing-Wanzhou and to the southeast of Dazhou in the east of Sichuan Basin, where a suit of relatively complete Type-I sequence that is composed of LST ( $\text{C}_2\text{hl}_1$ ), TST ( $\text{C}_2\text{hl}_2$ ) and HST ( $\text{C}_2\text{hl}_3$ ) developed. Different sedimentary microfacies of the Huanglong tidal-flat systems control the vertical distribution characteristics of the reservoirs, in which the grainy shoal facies is of the best reservoir properties. Through the qualitative analysis to the erosion degree of the Huanglong Formation during epidiagenetic karstification stage by using trace elements, carbon and oxygen isotope data, it is suggested that the Huanglong Formation did not suffer intensive weathering and its residual thickness is representative of the primary thickness in character. Hence, the tidal channels can be mapped by the residual thickness of the Huanglong Formation. Depending on the prediction of drilling and seismic data to tidal channels, it is indicated that the features of tidal channels have obvious control of the spacial distribution of high quality reservoirs.

**Key words:** Carboniferous; Huanglong Fm.; Carbonate rock; Sedimentary facies; Sedimentary system; Tidal channel; Sichuan Basin

Wang Kun: male, DSc. degree in progress at PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development. Add: Box 910, Xueyuan Rd., Beijing, 100083, China