

文章编号: 1000-0550(2016)04-0634-11

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2016.04.003

四川盆地磨溪—高石梯地区加里东—海西期龙王庙组构造古地貌恢复及地质意义

金民东^{1,2} 谭秀成^{1,2} 曾伟^{1,2} 李凌^{1,2} 李宗银³ 罗冰⁴
张静蕾^{1,2} 洪海涛⁴

(1.四川省天然气地质重点实验室 西南石油大学 成都 610500;

2.中石油碳酸盐岩储层重点实验室沉积与成藏分室 西南石油大学 成都 610500;

3.中石油西南油气田分公司勘探事业部 成都 610501;4.中石油西南油气田分公司勘探开发研究院 成都 610501)

摘要 本文基于磨溪—高石梯地区三维地震和钻孔资料,选择地震层位易于追踪的二叠底—龙王庙底厚度变化趋势来表征龙王庙组底界构造古地貌。分析发现高台组沉积是对龙王庙末期的填平补齐,而二叠底—龙王庙底厚度与高台组地层厚度具明显的正相关关系,因而恢复的龙王庙组底界构造古地貌可以近似代表高台组沉积前的龙王庙组沉积古地貌;同时,该古地貌高地南缘的相对低地是龙王庙组颗粒滩最发育的地区,表明龙王庙沉积期古地貌特征具有类似特征。进一步分析发现认为:在加里东—海西期,经侵蚀窗补给的岩溶水顺层流动的活动规律受控于该古地貌,古地貌对岩溶储层的差异发育和质量变化具有明显的控制作用,即在古地貌斜坡带和岩溶水汇聚的沟谷地带,岩溶改造作用最强,所形成的储层质量最好;在孤立古地貌高地,岩溶改造作用相对较弱,所形成的岩溶型储层质量相对变差。结果表明该古地貌是龙王庙期沉积古地貌长期继承性发展的结果,其对沉积、储层的控制作用也为后期新钻井和开发井所验证。该研究方法和思路可供相似地质背景的同类工作对比参考。

关键词 构造古地貌 沉积古地貌 龙王庙组 磨溪—高石梯 四川盆地

第一作者简介 金民东 男 1989年出生 博士研究生 储层地质学 E-mail: ktdong1@163.com

通讯作者 谭秀成 男 教授 E-mail: tanxiucheng70@163.com

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

四川盆地磨溪—高石梯地区下寒武统龙王庙组是当前国内天然气勘探的热点,2014年,在该区龙王庙组中发现并探明了国内迄今最大的单体海相碳酸盐岩整装气田,提交天然气探明储量 $4\ 403.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1]。研究表明,龙王庙组大面积发育的颗粒滩为该区优质储层发育的物质基础,而在加里东—海西期,由龙王庙组侵蚀窗补给的岩溶水进行的顺层流动并溶蚀改造早期的滩相储层为优质储层形成的关键^[2]。钻探表明,龙王庙组滩控岩溶型储层非均质性较强,储层质量横向变化大^[2],为了提高下一步勘探和开发井优质储层的钻遇率,弄清顺层岩溶时地下水的活动和变化规律对于岩溶型储层的预测至关重要,而地下水的顺层流动受控于该层状孔渗层的构造古地貌起伏^[3-5]。鉴于此,本文以易于追踪的龙王庙

组底—二叠纪底间地震厚度变化趋势来表征龙王庙组底界构造古地貌,并讨论该构造古地貌与高台组沉积前龙王庙组古地貌及龙王庙组沉积期古地貌的关系,进而讨论其对龙王庙组岩溶储层和颗粒滩发育分布的控制,研究结果将为古地貌的研究提供新的思路和方法。

1 区域地质背景

研究区位于四川省遂宁市、资阳市安岳县、重庆市潼南县境内,区域构造位置隶属于川中古隆中斜平缓带中西部的乐山—龙女寺古隆起区,总面积约 $2\ 330 \text{ km}^2$ 。研究区内针对龙王庙组的钻井分布不均,主要集中在磨溪构造和高石梯构造,且井位密度相对较大,但取芯资料丰富,取芯井共计15口,全取芯井3口,总芯长为814.3 m,这为古地貌恢复研究提供了坚实的资料基础(图1)。

四川盆地龙王庙组位于下寒武统顶部,与下伏沧

收稿日期: 2015-03-07; 收修改稿日期: 2015-07-01

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05004-005-03); 国家自然科学基金项目(41402126) [Foundation: China National Science and Technology Major Project, No. 2011ZX05004-005-03; National Natural Science Foundation of China, No. 41402126]

浪铺组和上覆中寒武统高台组均为整合接触^[6]。测录井和取芯资料表明,研究区内沧浪铺组为陆棚碎屑沉积物,岩性主要为云质泥岩、砂岩、粉砂岩及泥岩,其GR曲线与龙王庙组相比在界面处具有明显陡增的趋势,且呈现出齿化箱型的特征(图2);高台组则为混积潮坪沉积物,岩性主要为云质泥岩,云质粉砂岩,粉砂岩与泥—粉晶云岩的不等厚互层,与下伏龙王庙组相比,在界面处,岩芯上主要体现出明显的颜色加深,泥质含量增多,GR曲线也呈现出明显增高

的趋势,具山峰状—齿化箱型的特征(图2);龙王庙组则主要由海相碳酸盐岩为主,岩性较为单一,钻厚80~110 m,总体上表现为西北薄东南厚的变化趋势。根据岩性、电性与沉积旋回可将研究区龙王庙组自下向上划分为龙一段和龙二段两个亚段(图2),每一亚段的下部主要为泥晶云岩、泥质云岩等相对低能碳酸盐岩,而中上部则以相对高能的砂屑云岩和鲕粒云岩为主(图1)。龙王庙组储集层主要发育在龙一段上部和龙二段中上部的颗粒岩中^[2]。

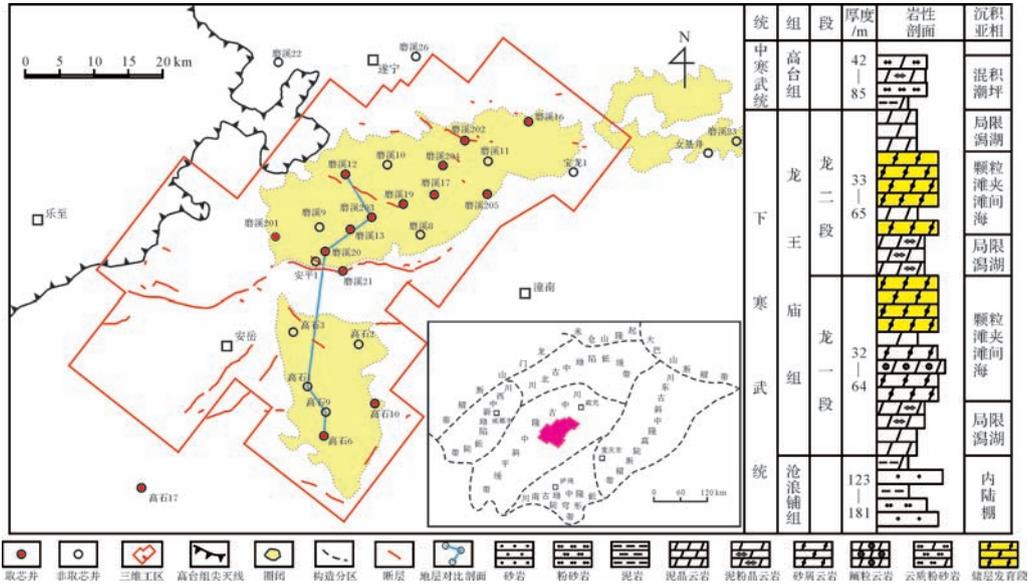


图1 研究区位置、构造、井位及地层特征示意图

Fig.1 The sketch of the location, structure, well position and stratigraphic characteristics of the study area

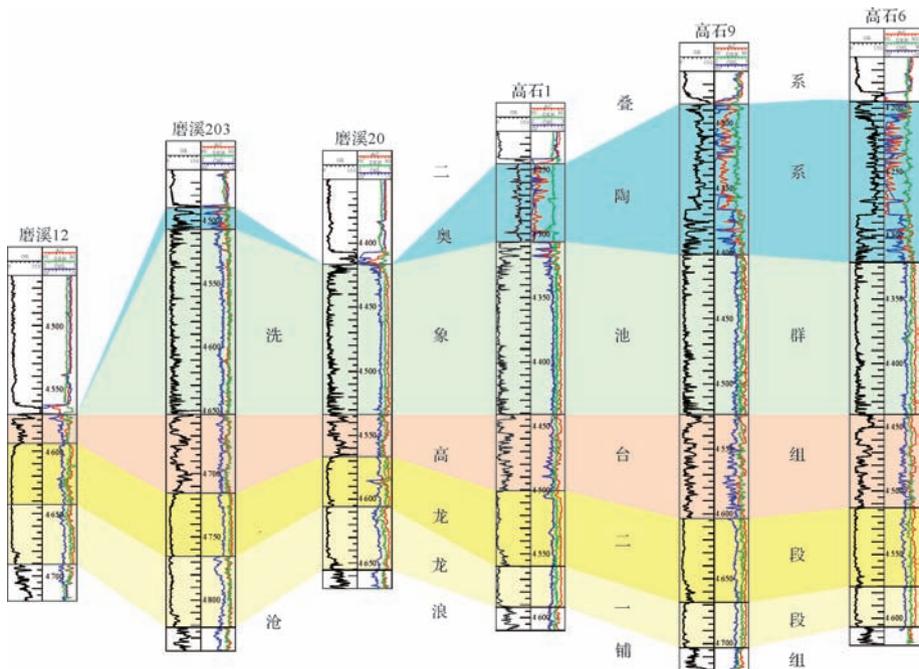


图2 磨溪12井—磨溪203井—磨溪20井—高石1井—高石9井—高石6井龙王庙组—奥陶系地层对比图

Fig.2 The stratigraphic correlation diagram of Longwangmiao Formation-Ordovician from Well Moxi 12 to Well Gaoshi 6

构造演化研究表明^[7-10],处于张应力背景下的乐山—龙女寺古隆起是受基底和断裂控制的具有一定继承性的隆起,其在震旦系灯影期经受同沉积隆起兼剥蚀隆起形成雏形,为低隆起时期;而在早寒武世后期,基底断裂活动强度最大,是古隆起的一个快速发展期,为高隆起时期;志留纪末的加里东运动使四川盆地大幅抬升,川中地区志留系—奥陶系地层大量剥蚀,局部地区使龙王庙组出露或接近于地表,加里东期基本奠定了乐山—龙女寺古隆起的范围,并形成了古隆起的宏观构造面貌,为后期构造变动中的继承性发展奠定基础。在此之后的地质历史期中,古隆起进入了发展、演化阶段,并先后经历了海西、印支、燕山及喜山期演化阶段,在印支、燕山、喜山历次构造运动中,古隆起形态继承性发育,但也经历了调整、改造与破坏。

2 龙王庙组底界构造古地貌的恢复及特征

磨溪—高石梯地区龙王庙组勘探时间较短,资料、沉积相及层序地层研究程度对本区龙王庙组古地貌恢复的限制较大,且相对于2 330 km²的工区而言,研究区内钻孔分布极为不均,特别是工区西部,几乎没有钻井控制,因而基于钻井的常规地层厚度恢复方法难以满足研究区龙王庙组微地貌的精细刻画。考虑到研究区实现了高品质地震资料的三维连片覆盖,且龙王庙组岩溶改造作用为加里东—海西期由龙王庙组侵蚀窗补给的岩溶水进行的顺层流动溶蚀改造,再加之从前人的研究成果来看:加里东—海西期,四川盆地在龙王庙组沉积后虽然经历了三次构造事件:郁南事件、都匀事件和广西事件^[11],但这三次构造事件并未导致磨溪—高石梯地区龙王庙组底—二叠底出现沉积间断;寒武纪末期的郁南事件主要影响

盆地西部,对盆地中部影响较小,因而研究区寒武系和奥陶系整合接触^[6];中奥陶世末期的都匀事件则让研究区整体缺失志留系沉积^[12];加里东晚幕的广西事件则让四川盆地自中志留世开始抬升剥蚀,一直到二叠纪才开始沉降接受沉积^[13],因而可认为研究区自龙王庙底到二叠底(即奥陶顶)是连续沉积。综上所述,我们可以选择地震层位易于追踪的二叠底(波峰)—龙王庙底(波谷)地震厚度变化趋势来表征龙王庙组底界构造古地貌(图3)。

基于上述分析,利用区内三维地震工区的层位解释成果,把龙王庙组底界与二叠底界地震波反射时间相减,得出了二叠底—龙王庙底时间厚度图(图4),并据此做了三维显示,以此表征龙王庙组底界构造古地貌(图5),由于研究区龙王庙组地层厚度分布较为稳定(图2),该古地貌也可近似代表龙王庙组构造古地貌。该古地貌具有如下特征:①受乐山—龙女寺古隆起雏形的控制,该古地貌总体呈现出西北高东南低的趋势,地貌高地主要呈西南—东北方向展布。②存在多个潜沟谷系统,如高石梯西部的南北向、过安平1井的东西向、过磨溪203井和磨溪204井的北西—南东向及磨溪202井北部的东西向潜沟谷系统,其中前三者可能为同沉积断层活动形成的断洼。③沿高石梯的南北向上,存在高石梯地貌高地,其北部和西部以断洼与古隆起分割,而在磨溪202—磨溪16井一线则存在沉积成因的继承性高地。

3 龙王庙组构造古地貌对储层发育的控制

3.1 龙王庙组储集岩类型及平面分布特征

受加里东—海西期岩溶作用的差异改造,磨溪—高石梯地区龙王庙组发育独具特色的岩溶型储层,其岩溶系统以花斑状或海绵状为主要标志,这与国内外

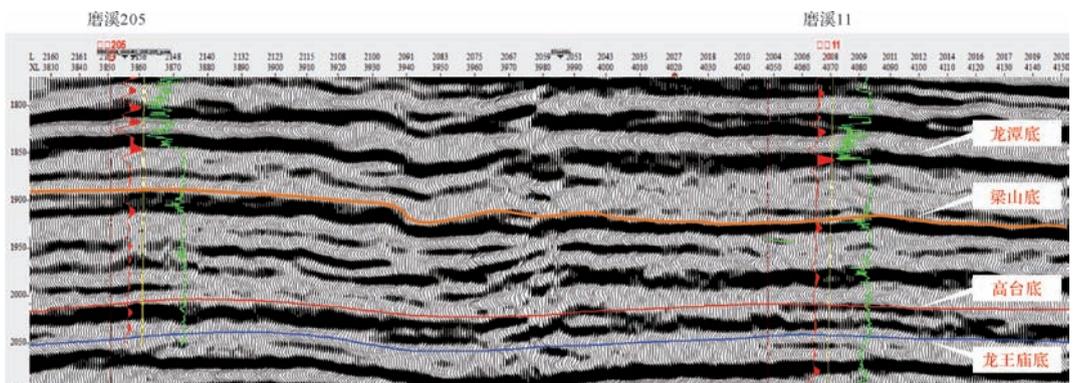


图3 磨溪—高石梯地区磨溪205井—磨溪11井连井地震剖面

Fig.3 The seismic section across Well Moxi 205 to Well Moxi 11 in Moxi-Gaoshiti area

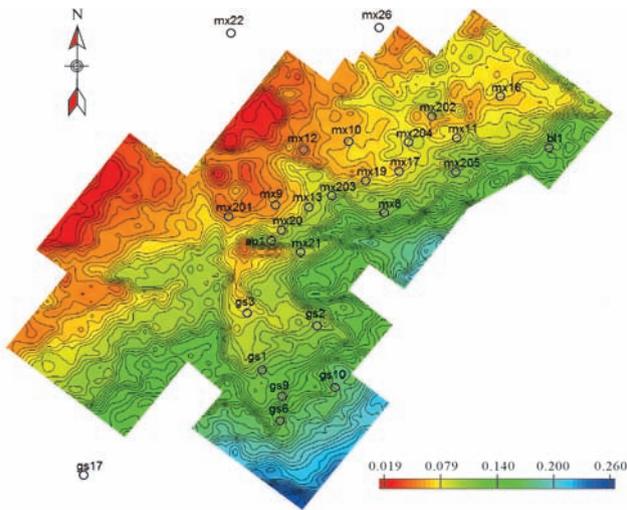


图4 磨溪—高石梯地区二叠底—龙王庙底时间厚度图
Fig.4 The time thickness from the bottom of Permian to the bottom of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area

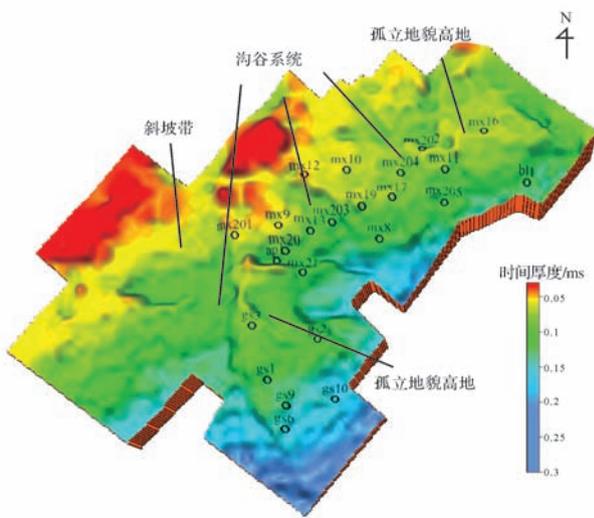


图5 磨溪—高石梯地区龙王庙组底界构造古地貌
Fig.5 The tectonic palaeogeomorphology of the lower boundary of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area

报道的诸多典型岩溶系统具有相似的特征^[14-16]。笔者前期的研究表明^[2],根据岩芯上宏观储集空间类型的差异(针孔或溶洞)和其与花斑状岩溶系统的发育组合特征,可将龙王庙组储集岩分为四类:“花斑”溶洞型储层(图6a,b,c)、溶洞型储层(图6d,e)、“花斑”针孔型储层(图6f,g)和针孔型储层(图6h,i)。其中,“花斑”溶洞型储集层是岩溶作用改造最为强烈的储集层,其储渗性能和测试产能均相对最优,溶洞型和“花斑”针孔型储层层次之,而针孔型储层则几乎未受岩溶改造,其储集质量也相对最差(表1)。

根据研究区单井储集岩类型取芯统计资料(表1)和成像测井(图7),结合龙王庙组顶界地震相干切片(图8),绘制了龙王庙组储集岩类型平面分布图(图9)。分析发现,花斑溶洞型储集层集中分布于研究区西北部,呈西南—东北向带状展布,在这些区域,岩芯和镜下照片均显示其经历了强烈的岩溶改造,孔径多以大于2 mm 为主(图6a,b,c),成像测井上则主要表现为大小不一的暗色斑块较为密集的杂乱分布,以大斑块为主,暗色斑块纵横向连续性均较好(图7a),而在相干切片上,由于这些区域经历了强烈岩溶改造作用,因而其地层反射的连续性破坏较为严重,颜色呈灰黑色—黑色(图8);溶洞型储集层分布于颗粒滩相对欠发育的磨溪203井区和研究区西南部的高石6井区,这些井区,岩芯和镜下几乎未见花斑状岩溶系统,孔径也以大于2 mm 为主(图6d,e),成像测井上主要以大斑块为主,小斑点较少,且排列较为疏散(图7b),相干切片上其地层连续性破坏程度相对减弱,颜色呈浅灰色(图8);花斑针孔型储集层主要发散分布于研究区东部和东南部,与花斑溶洞型相似,岩芯和镜下可见明显的花斑状岩溶系统,所不同是其孔径多小于2 mm(图6f,g),成像测井上则主要以连通性相对较好的暗色小斑点为主,微裂缝相

表1 研究区取芯井单井储层厚度、储渗性能、测试产能统计表

Table 1 The thickness of reservoir rocks, physical property and tested productivity in a single coring well in the study area

井位	单井厚度/m				全直径(平均值)			小样(平均值)			测试产能 /10 ⁴ m ³ /d
	花斑溶洞	溶洞	花斑针孔	针孔	孔隙度/%	渗透率/10 ⁻³ μm ²	样品数	孔隙度/%	渗透率/10 ⁻³ μm ²	样品数	
磨溪12井	25.99	6.25	4.97	0.25	5.55	2.18	25	3.48	4.4	145	116.77
磨溪13井	17.03	2.53	14.74		4.93	19.3	24	3.78	6.59	95	128.84
磨溪16井	4.14	2.85	9.58	4.83	2.54	1.55	11	2.15	0.2	56	11.47
磨溪17井	9.43	6.76	19.45	2.34				4.55	2.72	117	53.2
磨溪19井		7.14	9.21	7.36	5.49	4.5	18	4.12	1.11	77	11.45
磨溪202井	4.58	4.16	17.83	2.53	2.97	0.33	6	3.41	0.55	113	30.32
磨溪203井	5.99	19.55		5.93	5.73	9	6	4.38	6.86	75	产水
磨溪204井	19.29	14.12	0.25		6.04	7.9	10	4.93	14.5	91	115.62
高石10井	12.07	0.26	18.6		4.36	0.23	12	4.3	0.97	29	未测试

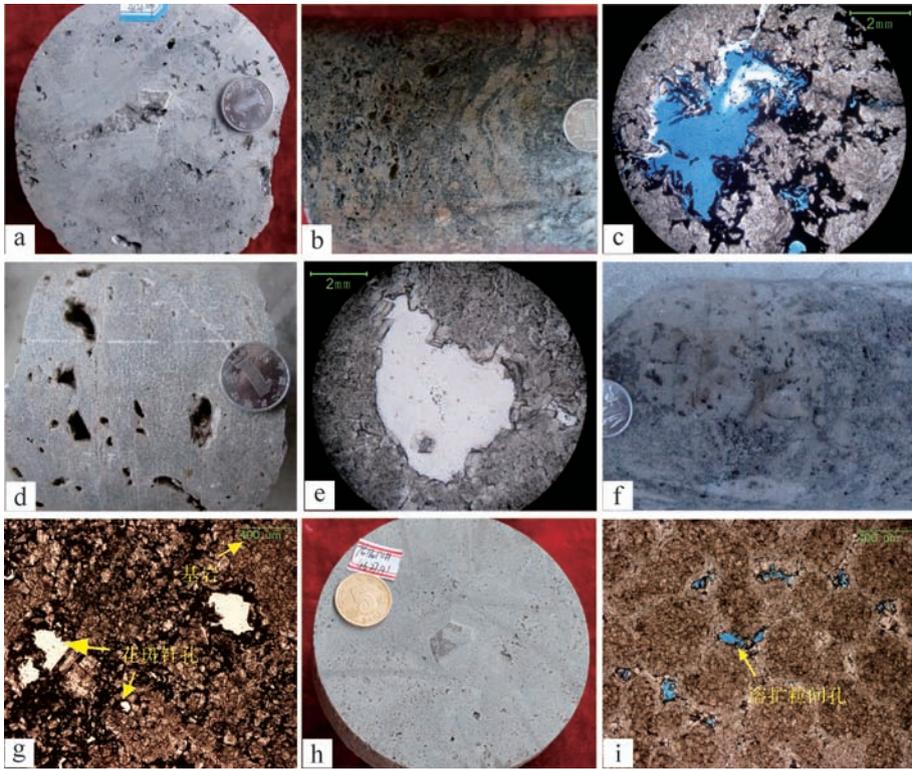


图6 磨溪—高石梯地区龙王庙组储集岩类型

a.花斑溶洞型砂屑云岩,磨溪12井,4 621.04 m;b.花斑溶洞型砂屑云岩,磨溪204井,4 613.75 m;c.花斑溶洞型砂屑云岩,磨溪12井,4 620 m,(-);d.溶洞型砂屑云岩,磨溪203井,4 778.58 m;e.溶洞型残余砂屑晶云岩,磨溪203井,4 778.8 m,(-);f.花斑针孔型砂屑云岩,磨溪202井,4 655.15 m;g.花斑针孔型砂屑云岩,磨溪17井,4 613.2 m,(-);h.针孔型砂屑云岩,高石10井,4 627.91 m;i.针孔型鲕粒云岩,溶扩粒间孔,高石6井,4 546.94 m,(-)。

Fig.6 The types of reservoir rocks of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area

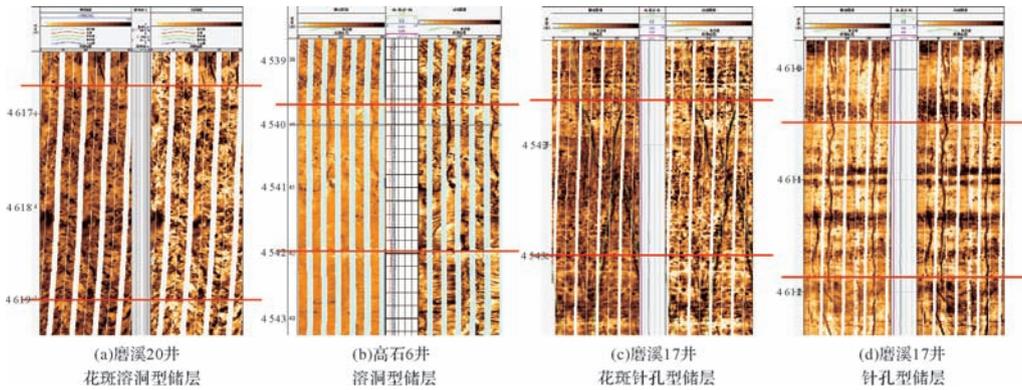


图7 磨溪—高石梯地区龙王庙组不同储集岩类型成像测井响应特征

a.磨溪20井,花斑溶洞型储层;b.高石6井,溶洞型储层;c.磨溪17井,花斑针孔型储层;d.磨溪17井,针孔型储层

Fig.7 Imaging logging responses of different reservoir rock types of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area

对较发育(图7c),而从相干切片来看其地层连续性破坏程度相对较强,颜色呈浅灰黑色(图8);针孔型储集层则零散分布于研究区内,由于几乎未受岩溶改造,岩芯上主要呈现为浅灰色(图6h),镜下以(溶扩)残余粒间孔为主(图6i),成像测井上,针孔型储

集层主要以分布较孤立的暗色小斑点为主(图7d),而相干切片则体现为浅灰白色的特征(图8)。

3.2 龙王庙组构造古地貌对储层的控制

前人的研究表明,顺层岩溶时地下水的活动和变化规律对于岩溶型储层发育好坏起到了决定性作用,

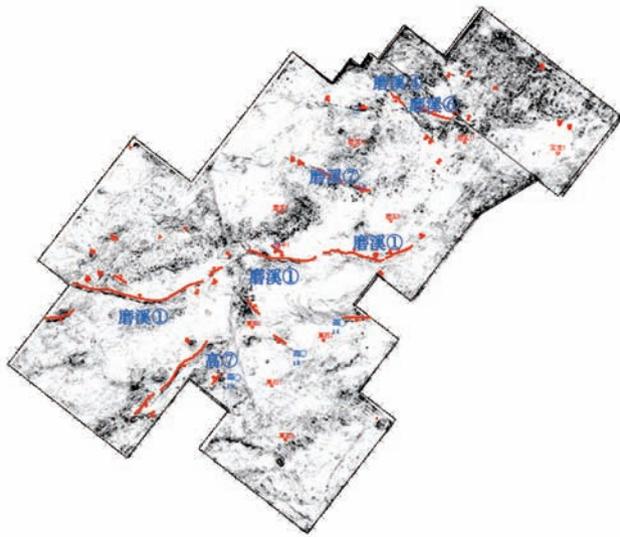


图8 磨溪—高石梯地区下龙王庙顶界地震相干切片
(据中石油西南油气田分公司,2014)

Fig.8 The seismic coherence slices of the top boundary of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area

而顺层地下岩溶水的活动规律又受到该层构造古地貌起伏的控制^[3,5]:在古地貌斜坡带,岩溶水流速最快,饱和度最小,势能最强,对先期孔渗层的改造程度最大,岩溶储层最为发育;在古地貌高地,岩溶水优先向流体势更低的高地侧缘流动,而在高地流动较少且流速缓慢,导致岩溶高地不是岩溶储层发育的有利部位;在古地貌沟谷地带,岩溶水汇聚,但不积水,其汇集的地下水又向势能更低的区域流动,水流量大,溶蚀作用强,有利于岩溶储层发育^[17-19]。据此,结合前

述的龙王庙组构造古地貌特征,编制了研究区加里东—海西期地下水活动趋势图(图10),从图上可以看出:受加里东晚幕广西事件的影响,研究区西北部龙王庙组直接出露地表,其余地区皆处于埋藏状态^[2],地表水可由龙王庙组先期孔渗层直接下渗并向低势区流动,形成直接补给区;在磨溪201—磨溪9—磨溪12井一线以北(斜坡带中上部),高台组出露剥蚀,地表水可向下渗滤,间接补充至龙王庙组孔渗层,形成间接补给区;紧邻间接补给区的斜坡带下部—边缘(磨溪201—磨溪9—磨溪12井一带),岩溶水流势最强,形成最活跃区,而分析对比龙王庙组储集岩类型平面分布图可以发现,这些区域主要形成储渗性能最佳的花斑溶洞型储层(图9);在离补给区较近的孤立地貌高地(磨溪202井—磨溪16井区和磨溪17井—磨溪19井区),岩溶水影响较弱,为较活跃区,主要发育花斑针孔型储层,而离补给区较远的高地(高石3井—高石1井区),岩溶作用最弱,为不活跃区,发育针孔型储层;在岩溶水汇聚的沟谷地带(磨溪204井区、磨溪203井区和高石6井区),岩溶水改造能力较强,形成花斑溶洞型或溶洞型储层;部分张断裂可以直接沟通地表,岩溶水可沿断裂面快速向下补给,若张断裂贯穿龙王庙组,则岩溶水只能在经过龙王庙组时,向两侧孔渗层少量补充,形成较活跃区(磨溪①号断层东段),发育花斑针孔型储层;若未贯穿,则可形成间接补给区(磨溪①号断层中段),发育溶洞型或花斑溶洞型储层(表2)。

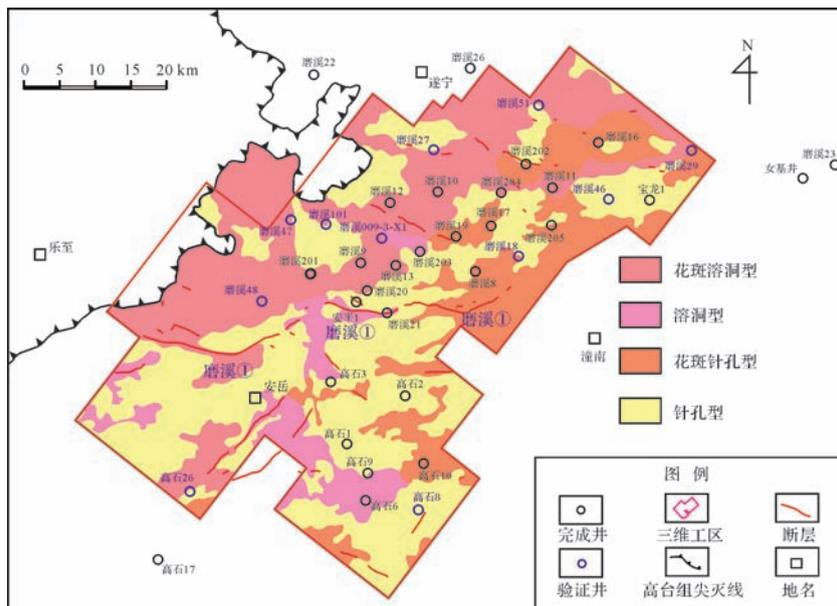


图9 磨溪—高石梯地区龙王庙组储集岩类型平面分布图

Fig.9 The distribution map of the reservoir rock of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area

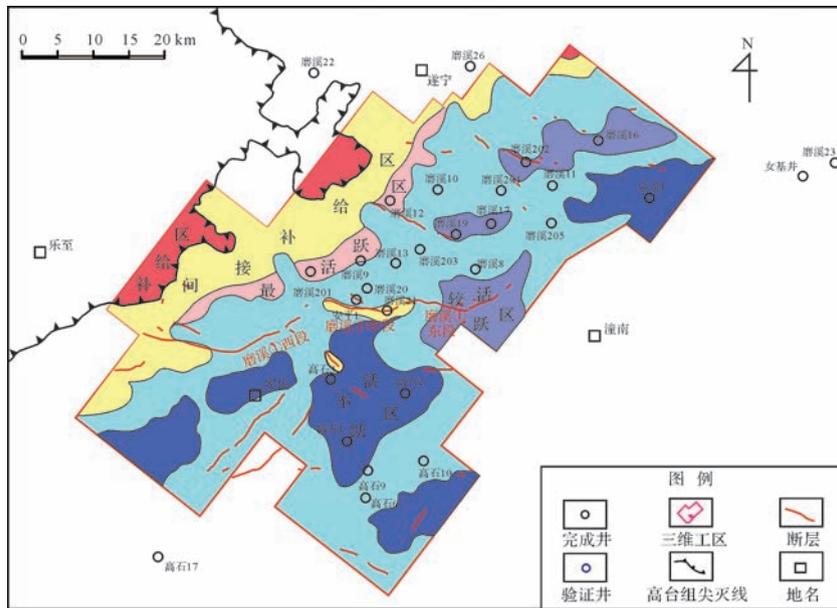


图 10 磨溪—高石梯地区加里东—海西期龙王庙组地下水活动分区图

Fig.10 The active zoning map of ground water of Longwangmiao Formation during the Caledonian-Hercynian period in Moxi-Gaoshiti area

表 2 磨溪—高石梯地区龙王庙组地下水活动分区、储集岩类型与古地貌关系

Table 2 Relationship of palaeogeomorphology, reservoir rock types, and the active partition map of groundwater of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area

古地貌区带	地下水活动分区	储集岩类型
斜坡带中上部	间接补给区	花斑溶洞型
斜坡带下部-边缘	最活跃区	花斑溶洞型
沟谷地带	活跃区	花斑溶洞型/溶洞型
离补给区最近的孤立地貌高地	较活跃区	花斑针孔型
离补给区较远的孤立地貌高地	不活跃区	针孔型
断层沟通地带	间接补给区/较活跃区	溶洞型/花斑针孔型

4 讨论

4.1 龙王庙组底界构造古地貌与高台组沉积前龙王庙组沉积古地貌关系

在四川盆地,龙王庙组上覆的中寒武统高台组发生了区域潮坪化^[20]。而前人的研究表明:在磨溪—高石梯地区,高台组与龙王庙组为整合接触^[21],而研究区实钻资料也证实高台组与龙王庙组之间无沉积间断(图 11),同时,从龙王庙组颗粒岩岩性组构特征来看,也很少见到因滩顶暴露而引起的颗粒选择性溶蚀^[22]。故可认为区域潮坪化的高台组是对龙王庙的填平补齐,高台组印模地层厚度能够真实反映龙王庙末期的沉积地貌特征。而我们根据后期地层对比和厚度统计资料发现,除靠近同沉积断层的安平 1 井和高石 3 井外,磨溪—高石梯地区二叠底—龙王庙组底残余地层厚度与高台组的残余厚度具有良好的正相

关关系(图 2,12),因而,二叠底—龙王庙底的厚度能表征高台组印模厚度,由其恢复的龙王庙组底界构造



图 11 磨溪—高石梯地区高台组与龙王庙组界线(高石 10 井,4 611.08~4 611.25 m)

Fig.11 The correlation diagram between the residual thickness of Gaotai Formation and the thickness from the bottom of Permian to the top of Gaotai Formation

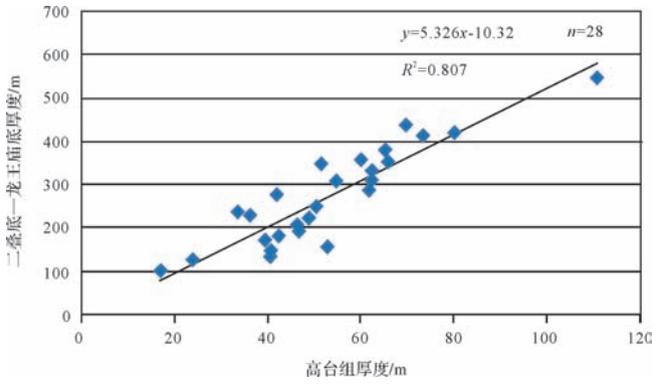


图 12 磨溪—高石梯地区高台组与二叠底—龙王庙组底残余地层厚度相关关系图

Fig.12 The correlation diagram between the residual thickness of Gaotai Formation and the thickness from the bottom of Permian to the bottom of Longwangmiao Formation

古地貌也可近似代表高台组沉积前的龙王庙组沉积古地貌。

4.2 龙王庙组底界构造古地貌与龙王庙组沉积期古地貌关系

前已述及,磨溪—高石梯地区龙王庙组构造古地貌对其岩溶储层的发育具有明显的控制作用,而我们在分析龙王庙组颗粒滩分布规律时发现其展布特征也与该古地貌具有相似性(图 13):研究区颗地比值具有由西北向东南逐渐增厚的趋势,颗粒滩最发育处主要集中在环绕龙王庙组古地貌高地的相对低地(地貌次高地),如:高石 6 井区、磨溪 8 井—磨溪 205

井区。而在地貌高地和次高地内部的沉积期深水洼地(微地貌低地),则主要以局限潟湖亚相的泥粉晶云岩发育为特征,如磨溪 203 井区。对于此,我们认为龙王庙组底界构造古地貌能近似代表龙王庙组沉积期古地貌,进而控制了研究区颗粒滩地发育分布:由于乐山—龙女寺古隆起龙王庙组颗粒滩主要为海退背景早期的非暴露浅滩沉积,颗粒滩处于浪基面附近^[20],浪基面扰动深度较大,因而在较深水区(地貌次高地)颗粒滩开始发育并快速堆积,并对内侧高地形成一定程度的遮挡和封隔限制作用,导致地貌高地的颗粒滩发育相对较差,并且可伴生石膏沉积^[22]。

4.3 龙王庙组古地貌长期继承性发育

综上所述可知,磨溪—高石梯地区龙王庙组底界构造古地貌不仅可以近似代表高台组沉积前龙王庙组古地貌,还可以近似代表龙王庙组沉积期古地貌。对于此,我们认为这是龙王庙组古地貌具有长期继承性发育的结果。究其原因:从四川盆地地质历史时期应力特征来看,在中三叠以前,整个四川盆地以张应力影响为主^[23-24],这种受力特征往往使不同断块整体沉降^[25],而整体沉降的地质背景又可使断块内部的古地貌长期继承性发育^[26-29]。对于磨溪—高石梯地区,其位于四川盆地基底断裂分割的断块内部,而作为其控制发育基础的乐山—龙女寺古隆起本身也具有继承性发育的特征,因而研究区龙王庙组古地貌具有长期继承性发育的趋势。

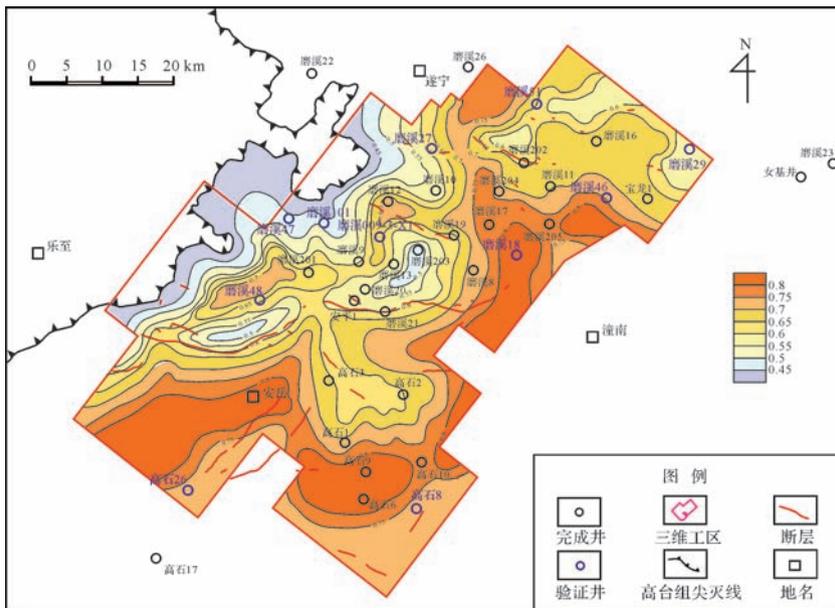


图 13 磨溪—高石梯地区龙王庙组颗地比等值线图

Fig.13 The contour map of the ratio of Gt and St of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area (Gt represents the thickness of grain beach, St represents the thickness of the strata)

5 成果验证

鉴于研究区内钻井较少,且地震资料难以直接运用的事实,本文所提出的方法是在基础资料品质相对较差的情况下的一种讨论和尝试。而结合新钻井和开发井的验证成果来看(表3),在所预测的花斑溶洞型储集岩区域,新钻井的测试产能均较高(高产气或高产水),如磨溪47井、磨溪101井和生产井磨溪009-3-X1井;花斑针孔型区域的新钻井测试产能则

相对较低,主要以低产气为主($10 \sim 30 \text{ } 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),如磨溪29井和磨溪18井;针孔型储集层则以低产水或干层为主,如磨溪27井和磨溪46井(图9),实际测试产能与预测趋势较为符合。而从由新钻井测井解释所得的颧地比值来看,仅磨溪46井有一定的出入(误差大于0.05),而磨溪101井、磨溪18井和磨溪29井误差小于0.05,其余井则完全符合,综合符合率大于85%(图13)。综上所述,运用该方法所恢复出的古地貌能较好的指导研究区储集岩类型预测和颧

表3 磨溪—高石梯地区龙王庙组新钻井及开发井验证成果表

Table 3 Verifying results table of newly drilled wells and development wells of Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area

井名	颧地比	颧地比预测值	预测储集岩类型	测试产能		钻井完成时间
				气/ $(10^4 \text{ m}^3/\text{d})$	水/ (m^3/d)	
磨溪47井	0.48	0.45~0.5	花斑溶洞型	38.75	170.4	2014年2月
磨溪101井	0.52	0.45~0.5	花斑溶洞型	85.9		
磨溪27井	0.61	0.6~0.65	针孔型		18.7	2013年10月
磨溪51井	0.61	0.6~0.65	针孔型		20.46	2014年5月
磨溪18井	0.77	0.8~0.85	花斑针孔型	27.08		2013年10月
磨溪46井	0.64	0.7~0.75	针孔型	干层		2013年12月
磨溪29井	0.63	0.55~0.6	花斑针孔型	10.45		2013年12月
高石26井	0.71	0.7~0.75	针孔型		23.7	2013年11月
高石8井	无测井数据体	针孔型		31	2014年1月	
磨溪009-3-X1井			花斑溶洞型	213.5		2014年4月

粒滩分布,该方法具有较好的适用性。

6 结论

(1) 基于磨溪—高石梯地区三维地震和钻孔资料,本文最终选择二叠底—龙王庙底的时间地震厚度恢复出磨溪—高石梯地区龙王庙组底界构造古地貌,该古地貌总体上北高南低,具有多个孤立潜高和沟谷系统。

(2) 磨溪—高石梯地区龙王庙组构造古地貌控制了顺层岩溶水的活动规律,进而控制了龙王庙组储层发育差异和质量变化:在岩溶斜坡和沟谷地带,岩溶水流势较强,主要发育花斑溶洞型储层或溶洞型储层,而在孤立岩溶高地,岩溶水流势较弱,主要发育花斑针孔型储层。

(3) 由于磨溪—高石梯地区龙庙组古地貌具有长期继承性,龙王庙组底界构造古地貌可以近似代表高台组沉积前龙王庙组古地貌,也可近似代表龙王庙组沉积期古地貌,并控制了研究区颗粒滩发育分布。

参考文献 (References)

1 刘川. 四川发现国内最大单体海相整装气藏,储量4403亿立方米

[EB/OL]. (2014-02-11) [2014-04-25]. http://news.youth.cn/gn/201402/t20140211_4641152.htm. [Liu Chuan. The biggest single marine facies bulk gas reservoir of China was discovered in Sichuan province, reserve is $4403 \times 10^8 \text{ m}^3$ [EB/OL]. (2014-02-11) [2014-04-25]. http://news.youth.cn/gn/201402/t20140211_4641152.htm.]

- 金民东,曾伟,谭秀成,等. 四川磨溪—高石梯地区龙王庙组滩控岩溶型储集层特征及控制因素[J]. 石油勘探与开发,2014,41(6): 650-660. [Jin Mindong, Zengwei, Tan Xiucheng, et al. Characteristics and controlling factors of beach-controlled karst reservoirs in Cambrian Longwangmiao Formation, Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 650-660.]
- 任美镠,刘振中. 岩溶学概论[M]. 北京:商务印书馆,1983. [Ren Mei'e, Liu Zhenzhong. An Introduction of Karstology [M]. Beijing: The Commercial Press, 1983.]
- 赵文智,沈安江,胡素云,等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石油勘探与开发,2012,39(1): 1-12. [Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Suyun, et al. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 1-12.]
- 赵天石,高瑞袖. 辽宁省下辽河平原东部隐伏岩溶发育规律及水文地质意义[J]. 中国岩溶,1985(3): 59-68. [Zhao Tianshi, Gao Ruixiu. Concealed karst development in eastern part of lower Liaohe river plain, Liaoning province, and its hydrogeological significance [J]. Carologica Sinica, 1985(3): 59-68.]

- 6 张满郎,谢增业,李熙喆,等. 四川盆地寒武纪岩相古地理特征[J]. 沉积学报,2010,28(1):128-139. [Zhang Manlang, Xie Zengye, Li Xizhe, et al. Characteristics of lithofacies paleogeography of Cambrian in Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(1): 128-139.]
- 7 邢翔,胡望水,汤济广. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起构造演化与油气成藏的关系[J]. 煤炭技术,2013,32(3):152-154. [Xing Xiang, Hu Wangshui, Tang Jiguang. Sichuan Leshan-Longnvshi Basin tectonic evolution of ancient uplift and hydrocarbon accumulation of relationship[J]. Coal Technology, 2013, 32(3): 152-154.]
- 8 许海龙,魏国齐,贾承造,等. 乐山—龙女寺古隆起构造演化及对震旦系成藏的控制[J]. 石油勘探与开发,2012,39(4):406-416. [Xu Hailong, Wei Guoqi, Jia Chengzao, et al. Tectonic evolution of the Leshan-Longnusi paleo-uplift and its control on gas accumulation in the Sinian strata, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 406-416.]
- 9 徐世琦,熊荣国. 加里东古隆起形成演化特征及形成机制[J]. 天然气勘探与开发,1999,22(2):1-6. [Xu Shiqi, Xiong Rongguo. The formation and evolution of the Caledonian paleouplift and its formation mechanism[J]. Natural Gas Exploration and Development, 1999, 22(2): 1-6.]
- 10 姚建军,陈孟晋,华爱刚,等. 川中乐山—龙女寺古隆起震旦系天然气成藏条件分析[J]. 石油勘探与开发,2003,30(4):7-9. [Yao Jianjun, Chen Mengjin, Hua Aigang, et al. Formation of the gas reservoirs of the Leshan-Longnusi Sinian palaeo-uplift in central Sichuan[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(4): 7-9.]
- 11 邢凤存,侯明才,林良彪,等. 四川盆地晚震旦世—早寒武世构造运动记录及动力学成因讨论[J]. 地学前缘,2015,22(1):115-125. [Xing Fengcun, Hou Mingcai, Lin Liangbiao, et al. The records and its dynamic genesis discussion of tectonic movement during the Late Sinian and the Early Cambrian of Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 115-125.]
- 12 刘树根,马文辛,Luba J,等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报,2011,27(8):2239-2252. [Liu Shugen, Ma Wenxin, Luba J, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan Basin, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2239-2252.]
- 13 袁玉松,孙冬胜,李双建,等. 四川盆地加里东期剥蚀量恢复[J]. 地质科学,2013,48(3):581-591. [Yuan Yusong, Sun Dongsheng, Li Shuangjian, et al. Caledonian erosion thickness reconstruction in the Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(3): 581-591.]
- 14 Baceta J I, Wright V P, Beavington-Penney S J, et al. Palaeohydrogeological control of palaeokarst macro-porosity genesis during a major sea-level lowstand: Danian of the Urbasa-Andia plateau, Navarra, North Spain[J]. Sedimentary Geology, 2007, 199(3/4): 141-169.
- 15 Sadooni F N. The nature and origin of Upper Cretaceous basin-margin rudist buildups of the Mesopotamian Basin, southern Iraq, with consideration of possible hydrocarbon stratigraphic entrapment[J]. Cretaceous Research, 2005, 26(2): 213-224.
- 16 Aqrabi A A M, Horbury A D. Predicting the Mishrif Reservoir quality in the Mesopotamian Basin, southern Iraq[J]. GeoArabia Manama, 2008, 13(1): 127-128.
- 17 金振奎,邹元荣,蒋春雷,等. 大港探区奥陶系岩溶储层发育分布控制因素[J]. 沉积学报,2001,19(4):530-535. [Jin Zhenkui, Zou Yuanrong, Jiang Chunlei, et al. Distribution and controlling factors of Ordovician karst reservoirs in Dagang region[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 530-535.]
- 18 戴传瑞,邹伟宏,杨海军,等. 轮古西潜山岩溶储层发育特征与评价[J]. 东北石油大学学报,2012,36(4):24-29. [Dai Chuanrui, Zou Weihong, Yang Haijun, et al. The characteristics and evaluation of karst reservoir in Lungu oil fields[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2012, 36(4): 24-29.]
- 19 周宁,刘波. 鄂西南岩溶地区表层岩溶带发育强度变化规律研究[J]. 中国岩溶,2009,28(1):1-6. [Zhou Ning, Liu Bo. Varying regulation of epikarst developing intensity in southwest Hubei karst area[J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(1): 1-6.]
- 20 李凌,谭秀成,夏吉文,等. 海平面升降对威远寒武系准相储层的影响[J]. 天然气工业,2008,28(4):19-21. [Li Ling, Tan Xiucheng, Xia Jiwen, et al. Influences of eustatic movement on the Cambrian reservoirs of bank facies in Weiyuan gas field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(4): 19-21.]
- 21 李亚林,巫芙蓉,刘定锦,等. 乐山—龙女寺古隆起龙王庙组储层分布规律及勘探前景[J]. 天然气工业,2014,34(3):61-66. [Li Yalin, Wu Furong, Liu Dingjin, et al. Distribution rule and exploration prospect of the Longwangmiao Fm reservoirs in the Leshan-Longnusi Paleouplift, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 61-66.]
- 22 金民东,谭秀成,李凌,等. 四川盆地磨溪—高石梯地区下寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律[J]. 古地理学报,2015,17(3):347-357. [Jin Mindong, Tan Xiucheng, Li Ling, et al. Characteristics and distribution of grain bank of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(3): 347-357.]
- 23 李忠权,潘懋,萧德铭,等. 四川盆地拉张—挤压构造环境探讨[J]. 北京大学学报:自然科学版,2001,37(1):87-93. [Li Zhongquan, Pan Mao, Xiao Deming, et al. Studies of extension-compression tectonic dynamic setting in Sichuan Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(1): 87-93.]
- 24 罗志立. 龙门山造山带的崛起和四川盆地的形成与演化[M]. 成都:成都科技大学出版社,1994:108-200. [Luo Zhili. Uplift of Longmen Mountain Orogenic Belt and the Formation and Evolution of Sichuan Basin[M]. Chengdu: Chengdu Science & Technology Press, 1994: 108-200.]
- 25 李虎,叶玉娟,廖冲,等. 十屋油田营城组储层裂缝预测[J]. 石油地质与工程,2010,24(5):28-32. [Li Hu, Ye Yujuan, Liao Chong, et al. Fracture prediction in Yingcheng Formation of Shiwu oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2010, 24(5): 28-32.]
- 26 姜正龙,邓宏文,林会喜,等. 古地貌恢复方法及应用——以济阳拗陷桂西地区沙二段为例[J]. 现代地质,2009,23(5):865-871. [Jiang Zhenglong, Deng Hongwen, Lin Huixi, et al. Methods and ap-

- plication of paleo-geomorphologies rebuilding: An example of the second Member of Shahejie Formation, Zhuangxi area, Jiyang depression [J]. *Geoscience*, 2009, 23(5): 865-871.]
- 27 梅志超. 沉积相与古地理重建[M]. 西安:西北大学出版社, 1994. [Mei Zhichao. *The Rebuilding of Sedimentary Facies and Paleogeography*[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1994.]
- 28 吴丽艳,陈春强,江春明,等. 浅谈我国油气勘探中的古地貌恢复技术[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2005, 27(4): 559-560, 586. [Wu Liyan, Chen Chunqian, Jiang Chunming, et al. Paleogeomorphic restoring techniques in China's hydrocarbon exploration

- tion[J]. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute)*, 2005, 27(4): 559-560, 586.]
- 29 李凌,谭秀成,赵璐子,等. 碳酸盐台地内部滩相薄储集层预测——以四川盆地威远地区寒武系洗象池群为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 334-340. [Li Ling, Tan Xiucheng, Zhao Luzi, et al. Prediction of thin shoal-facies reservoirs in the carbonate platform interior: A case from the Cambrian Xixiangchi Group of the Weiyuan area, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 334-340.]

Reconstruction of the Tectonic Palaeogeomorphology of Longwangmiao Formation during the Caledonian-Hercynian Period in Moxi-Gaoshiti Area, Sichuan Basin and Its Geological Significance

JIN MinDong^{1,2} TAN XiuCheng^{1,2} ZENG Wei^{1,2} LI Ling^{1,2} LI ZongYin³
LUO Bing⁴ ZHANG JingLei^{1,2} HONG HaiTao⁴

(1. Key Laboratory of Natural Gas Geology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. The Sedimentary and Accumulation Department of Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, PetroChina, South west Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. Exploration Division of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610501, China;

4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Southwest Oil and Gas Field Company PetroChina, Chengdu 610501, China)

Abstract: Based on 3-D seismic material and drill-hole data in Moxi-Gaoshiti area, the variation trend of the thickness from the bottom of Longwangmiao to the bottom of Permian was chosen to represent the tectonic palaeogeomorphology of the lower bottom of Longwangmiao Formation. Since the analysis found that the deposition of the overlying Gaotai Formation could fill and level up the Longwangmiao Formation at the end of Longwangmiao sedimentation, and there is a positive correlation between the thickness from the bottom of Longwangmiao to the bottom of Permian and the thickness of Gaotai Formation, the tectonic palaeogeomorphology of the lower bottom of Longwangmiao Formation could represent the Longwangmiao sedimentary palaeogeomorphology before the deposition of Gaotai Formation approximately. Meanwhile, the relatively low position at the southern margin of the palaeogeomorphology highland was the area where the grain beach of Longwangmiao Formation was most developed, it suggested that the palaeogeomorphology during the Longwangmiao sedimentation was similar to this palaeogeomorphology. After further analysis, we believe that palaeogeomorphology controlled the activity routines of the bedding flowing karst water which was supplied by the erosion window during the Caledonian-Hercynian period, and then determined the differences in development and quality change of the karst reservoirs; in the slope belt and the ravine area where the karst water converge, the karst reformation is the strongest, the reservoirs formed here are the best; in the isolated highlands, the reformation is relatively weak, and the reservoir quality is poor. The results show that this palaeogeomorphology was the result of inheritance developing of sedimentary palaeogeomorphology during Longwangmiao deposition, and the newly drilled wells and development wells have proven its controlling action on sedimentation and reservoirs. This method and thought is helpful and referential for the same genre in similar geological background.

Key words: tectonic palaeogeomorphology; sedimentary palaeogeomorphology; Longwangmiao Formation; Sichuan Basin; Moxi-Gaoshiti area