

川北仪陇—平昌地区雷口坡组顶部 古岩溶的识别及其与储层的关系

李浩¹, 王兴志², 胡杨³, 朱童⁴, 李顺⁵, 杨雪飞²

(1 中海石油(中国)有限公司天津分公司勘探开发研究院; 2 西南石油大学资源与环境学院)
(3 川庆钻探工程公司地质勘探开发研究院; 4 成都理工大学能源学院; 5 中国石油西南油气田分公司)

摘要 研究区雷口坡组是一套中三叠统的海相碳酸盐岩,发育一至五段共五个地层段,雷五段已被全部剥蚀,顶部以雷四³亚段与上覆的须家河组接触。雷口坡组残厚 800~950 m,雷四³亚段顶部十几米至一百来米的范围内经历了广泛的溶蚀作用,主要受到表生期岩溶作用,形成了岩溶角砾岩、溶沟、硅化、膏模孔、溶孔、溶洞以及溶缝等,产生大量的溶蚀空间,但也有较多溶蚀空间被上覆一段下落的泥质物充填或半充填。在成像测井上,岩溶角砾岩表现为明暗相间、大小混杂的棱角状斑块,未充填溶洞呈暗色高导特征,裂缝则呈连续的暗色条带。发育垂直渗流、水平潜流以及深部缓流这样三个岩溶带,垂直渗流带的储层发育总体好于水平潜流带,深部缓流带相对较差,古地貌地势较高之处溶蚀作用更强,储层更为发育。给出了研究区雷四³亚段储能系数分布图,A21—A19 井区、A22—A23 井区以及 A160 井区的储能系数都大于 0.6,是比较有利的储集区带。

关键词 四川盆地北部;雷口坡组;岩溶储层;储层特征
中图分类号:TE112.23 **文献标识码**:A

川北仪陇—平昌地区雷口坡组是一套中三叠统的海相碳酸盐岩,厚度大、分布稳定、岩石类型多样,它经历了多旋回和多期次重大构造作用和成岩作用的改造,尤其是古岩溶作用比较发育。截至 2012 年 9 月底,该区钻揭雷口坡组的井共 57 口,其中 25 口在雷口坡组顶部(雷四段)的风化壳储层有油气显示,且以气测异常和气侵为主。在测试的 30 口井中,有 10 口井获天然气,已投产 3 口,累计产天然气 $2.53 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中特别是 A22 井,在雷口坡组四段测试获日产天然气 $15.22 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产,展示了该区雷四段具有良好的勘探前景。但是,目前针对雷口坡组顶部风化壳岩溶型储层的勘探程度还较低,对古岩溶的识别特征尚存分歧,古岩溶与储层的关系也不清楚,导致储层展布情况不明,油气勘探面临一定困难。

本文旨在通过岩心观察、薄片鉴定以及成像测井等资料的综合分析,系统地总结研究区雷口坡组顶部古岩溶的识别特征,揭示出古岩溶与储层的关

系,为进一步探明雷口坡组顶部储层展布情况提供理论依据。

1 概 况

川北仪陇—平昌地区位于四川盆地北部川北古中拗陷低缓带的东部偏南位置,落在仪陇—平昌平缓构造带上^[1],雷口坡组表现为东南部最浅、基本上从南向北倾伏的单斜构造,断层较为发育(图 1)。研究区雷口坡组残厚 800~950 m,主要由一套浅灰、灰、深灰色的石灰岩、白云岩、膏岩和岩溶角砾岩,以及灰质白云岩、白云质灰岩、膏质白云岩等过渡岩类的不等厚互层组成。根据岩性特征,雷口坡组自下而上可划分为一段至四段共 4 个地层段^[2-3](五段已全部被剥蚀),顶部雷四段又可细分为三个亚段,自下而上为雷四¹、雷四²和雷四³亚段(图 2)。研究区在 A30—A271 井一线的西北广大地区均残留雷四³亚段,且以一套深灰色、灰色的泥-粉晶白云岩、泥晶石灰岩、灰质白云岩夹岩溶角砾岩与上覆须家河组

收稿日期:2012-09-17; 改回日期:2013-04-01

李浩:1987 生。2010 年毕业于西南石油大学;2013 年硕士毕业于西南石油大学矿产普查与勘探专业,主要从事沉积与储层研究。
通讯地址:300452 天津市塘沽区;电话:(022)25804574

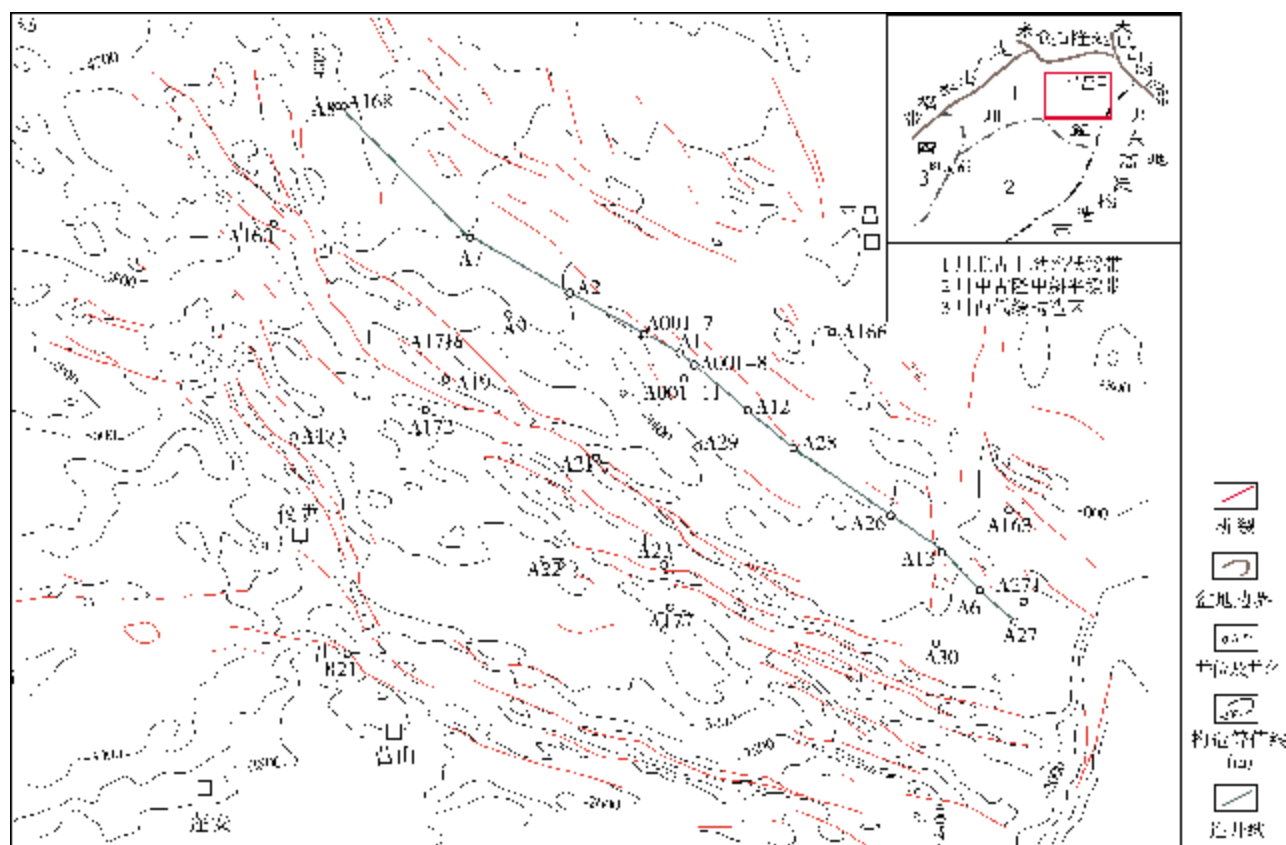


图1 川北仪陇—平昌地区雷口坡组顶部构造等值线图

一段底部的灰黑色泥页岩接触,而在该线的东南局部地区,雷四³亚段已被全部剥蚀。受大气淡水淋滤和表生期岩溶作用的改造,雷四段风化壳岩溶型储层主要分布在顶部的雷四³亚段,储层厚度范围在5~26 m之间。该亚段受风化壳岩溶的影响显著,溶沟、溶缝及溶蚀孔洞发育,可形成溶塌角砾岩夹层。

2 古岩溶特征

2.1 雷口坡组顶部的剥蚀特征

川北仪陇—平昌地区在中三叠世先后沉积了雷口坡组一段至五段共五个地层段。在印支运动晚期(中三叠世末),四川盆地整体抬升,研究区雷口坡组出露地表并遭受剥蚀^[4-5],雷五段被全部剥蚀干净,雷四段也被部分剥蚀,且以研究区东南部剥蚀最为剧烈,局部缺失了雷四³亚段。在经受剥蚀的同时,雷口坡组顶部的雷四³亚段发生大气淡水的溶蚀淋滤,溶蚀作用一直延续至晚三叠世,并在雷口坡组顶部与须家河组底部之间形成一区域性的不整合面。总

体而言,雷口坡组顶部雷四³亚段主体沿北西—南东向展布,厚度普遍在40~80 m,在A1、A19、A23、A170等井附近的厚度达80 m以上,而在A30—A271井一线东南,雷四³亚段已全被剥蚀(图3)。

2.2 岩心溶蚀特征

川北仪陇—平昌地区雷口坡组顶部岩溶作用主要发生在须一段沉积之前的表生作用阶段,在地下水和地表水的作用下,雷口坡组顶部地层发生强烈变化,形成岩溶角砾岩及岩溶缝洞^[6-7],同时伴随有去白云石化、去膏化以及硅化等岩溶作用,亦有充填作用发生。按照张美良等^[8]对全国大地构造发育时序关系划分的5个岩溶建造期,研究区雷口坡组处于中生代印支岩溶期和燕山岩溶期。雷四³亚段台内点滩环境中,颗粒白云岩经过表生期岩溶作用之后形成大量溶蚀孔隙,极大地增强了储集性能,从而有利于储层的发育。

对区内16口取心井(图3)的岩心进行系统观察,并对600余个薄片进行详细鉴定,证实雷口坡期存在

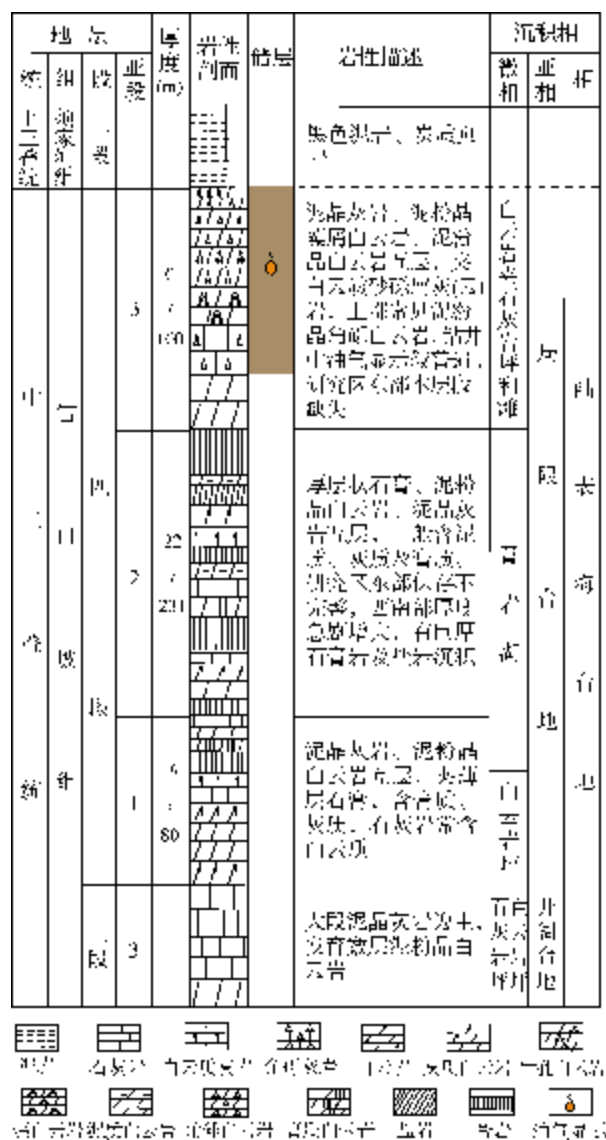


图2 川北仪陇—平昌地区雷口坡组四段地层综合柱状图

表生期岩溶作用,形成了岩溶角砾岩(图4a)、溶沟(图4b)、硅化(图4c)、膏模孔(图4d)、溶孔和溶洞(图4e)以及溶缝(图4f),溶蚀孔洞缝多被方解石半充填—全充填,在充填物中还可见黄铁矿(图4g)及渗流带产物渗流鲕豆(图4h)。

2.3 成像测井

对于古岩溶的识别,成像测井是除直接观察岩心之外最可靠、最准确的方法,它可以分为井壁声波成像、方位侧向测井、阵列感应测井以及地层微电阻率扫描成像测井(FMI)等。其中的FMI通过探测记录井壁四周电阻率的细微变化,并经校正处理后,能形成精确反映地层电阻率变化的图象。高精度的

FMI不仅可以反映地层的岩性或物性变化,而且还用于识别岩层中不同尺度的裂缝、孔洞等^[9]。本文利用研究区各井成像测井资料,结合岩心标定和常规测井等资料,来有效地识别碳酸盐岩地层中的古岩溶,并判断其充填与否以及充填物的性质等^[8]。

2.3.1 未充填溶洞、裂缝的识别

未充填溶洞是指由古岩溶作用形成的未被充填的洞穴或其未被充填的某一部分。由于溶洞在钻后被泥浆所充填,其电阻率较低,在静态成像测井图上一般呈暗色高导特征^[10-11],与邻近的碳酸盐岩有鲜明的反差,后者电阻率较大,在成像测井图上颜色较浅,多呈浅棕色—亮黄色(图5)。此外,由于溶孔空间大小比溶洞小得多,因而在成像测井图上显示为星点状密集分布的暗色斑点。而裂缝在成像图上则呈连续的暗色条带,特别是斜交缝(张开缝),在成像测井上显示为较暗的正弦曲线条带特征,有的连续性较高,有的成半封闭状态(图6)。

研究区雷口坡组顶部岩溶层位与上覆须家河组底部的泥岩呈不整合接触,故须家河组一段底部往往通过孔隙空间向雷口坡组顶部落入泥质物(图5b)。由于在成像测井图上,泥质团块、泥砾、黄铁矿团块以及块状泥岩等层段亦呈暗色高导特征,因而与未充填溶洞不易区别。因此,要准确区分图像上暗色高导斑点、斑块是否代表未充填的空间,还需要结合钻井、常规测井或岩心等资料加以综合分析。一般地,在钻遇溶洞发育带时,会出现钻时加快、钻具放空、井漏、井径扩大、侧向电阻率降低、中子孔隙度急剧增大、岩石密度显著降低等特征^[7]。例如,位于研究区西南部的B21井,在其2657.72~2665.25 m井段的雷四段发现溶洞和裂缝,溶洞大小10×30 mm~60×80 mm,出现井漏,漏失泥浆体积约为158.32 m³。同时在2652.8~2665.25 m井段测井综合解释为含气水层,在2657.72~2665.25 m井漏段测试,折算日产水283 m³,估计产气150 m³/d。这些特征均说明B21井在2657.72~2665.25 m井段存在溶洞。

2.3.2 角砾岩和角砾间充填物的识别

研究区雷口坡组顶部岩溶空间中所充填的物质主要由岩溶角砾构成,角砾成分一般为碳酸盐岩。该区岩溶作用强烈,角砾广泛分布于溶洞之中,其成因多样,大致可分为三种情形:

(1)雷口坡组顶部由于物质被溶解,由上覆地层

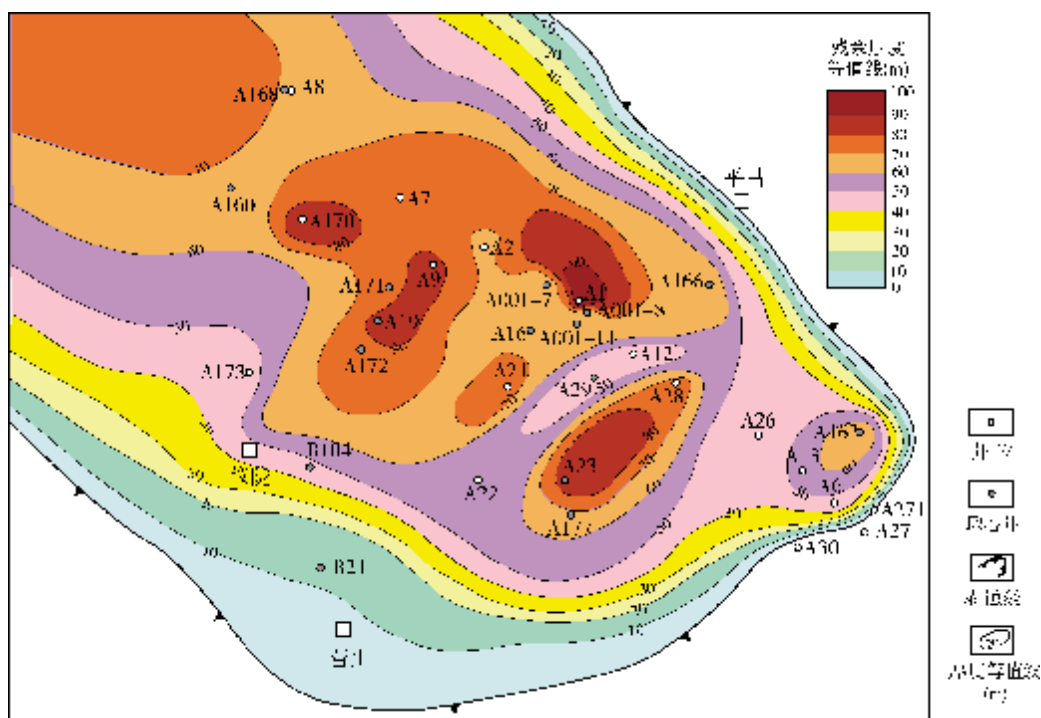


图3 川北仪陇—平昌地区雷四³亚段残余厚度图

的坍塌而形成网缝镶嵌状岩溶角砾;

(2)风化壳顶部岩石受到物理风化,形成大小不等的角砾,在原地(残积)或异地(坡积)堆积而形成残积角砾;

(3)大气淡水的下渗,发生溶蚀,使得地下洞穴或地下暗河进一步扩大,在洞穴内部由于溶洞自身的垮塌而形成充填于洞穴内部的角砾支撑岩溶角砾和基质支撑岩溶角砾。

在成像测井图上,角砾岩的颜色与灰度不均一,表现为明暗相间大小混杂的棱角状斑块(图7),大致由深色和浅色两部分组成。其中,浅色部分呈斑块状分布,其颜色与上下围岩一致,一般呈黄色—白色,为碳酸盐岩角砾,如图7a中的白云岩角砾和图7b中的石灰岩角砾;深色部分呈黑色、棕色或深黄色,可解释为角砾间充填物,如图7a和7b中两处箭头所指之处。

此外,研究区雷口坡组顶部古岩溶在地震资料上也有明显反映。在溶洞及其周围,地震波比较凌乱,呈杂乱反射和弱反射,能量衰减,造成振幅和频率减小。

总起来讲,川北仪陇—平昌地区雷口坡组受表生期岩溶作用明显,表现在其顶部地层的缺失,并且与上覆须家河组一段底部呈不整合接触,形成了各

类大小不一且在成像测井上很容易识别的溶蚀孔洞缝及岩溶角砾岩等,此外,溶蚀空间的存在必然导致该处在钻进过程中会出现泥浆漏失等现象。研究区雷四³亚段顶部十几米至一百来米的范围内广泛遭受溶蚀作用,形成大量的溶蚀空间及岩溶角砾岩,但有较多溶蚀空间被上覆须家河组一段下落的泥质物充填—半充填,对储层发育有一定的不利影响。

3 岩溶与储层

川北仪陇—平昌地区雷口坡组沉积之后受印支运动的影响,遭受不同程度的抬升、风化剥蚀,发生风化壳溶蚀作用。风化壳溶蚀作用不仅改善了原有地层的孔隙,提高了储集性能,同时也为油气运移提供了更多的有效通道。

下面从岩溶分带及岩溶古地貌这两者分别与储层发育的关系予以分析探讨。

3.1 岩溶分带与储层

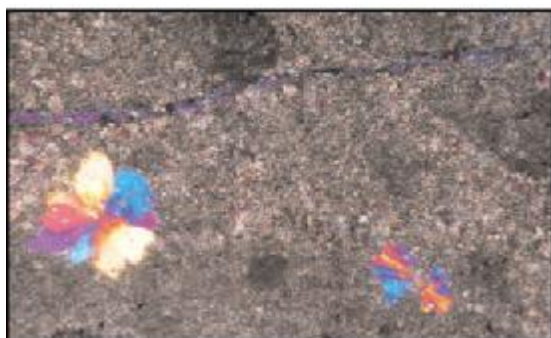
一般而言,根据水动力条件可在垂向上将岩溶剖面划分为地表岩溶带、垂直渗流带、水平潜流带以及深部缓流带共四种岩溶分带。根据岩心及录井资料,本区可识别出垂直渗流、水平潜流以及深部缓流这三个岩溶分带。



(a) 岩溶角砾岩。见溶沟, 充填机械碎屑物。A166井4053.3~4053.43m, 岩心



(b) 岩溶角砾岩。见溶沟, 被泥质半充填、全充填。A19井3754.92~3755.32m, 岩心



(c) 粉晶、残余砂屑白云岩。见硅化现象, 具溶孔溶缝, 可见溶缝+去溶化-硅化上蚀。A160井3707.81m, 薄片(+), $\times 10$



(d) 岩溶角砾岩。具有模孔。A23井3666.63m, 薄片(-), $\times 100$



(e) 泥质泥晶白云岩。见溶孔溶洞, 被石英半充填。A172井3706.58~3706.68m, 岩心



(f) 泥晶白云岩。见溶缝, 被方解石全充填。A001-11井4102.10m, 薄片(-), $\times 100$



(g) 岩溶角砾岩, 黄铁矿充填于裂缝。A19井3753.16~3753.24m, 岩心



(h) 岩溶角砾岩, 多种机械碎屑物与渗流通道充填溶沟。A166井4062.70~4062.95m, 岩心

图4 川北仪陇—平昌地区雷四³亚段岩石类型及其岩溶特征

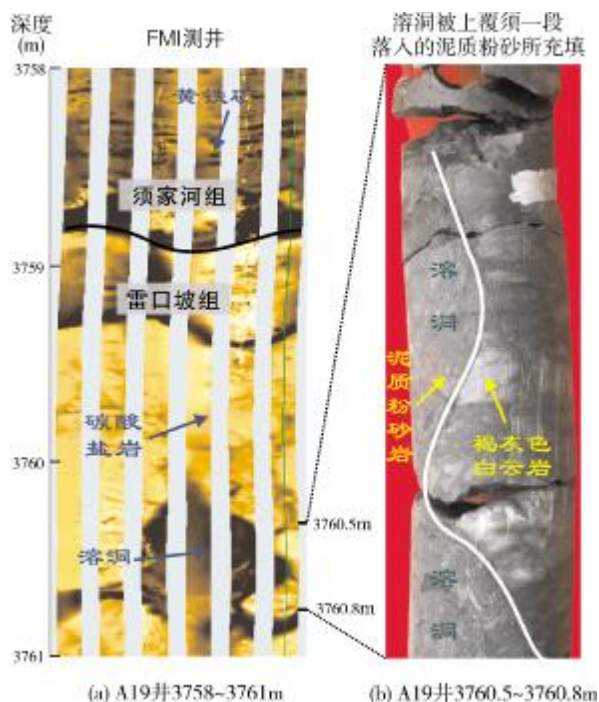


图5 川北仪陇—平昌地区雷四³亚段溶洞的成像测井识别

垂直渗流带 主要可以形成两类储集岩：一是岩溶角砾岩，储集空间可以是粒间孔，也可以是角砾间溶孔，但是这些孔隙空间多被来自上覆须家河组的机械充填物所破坏；二是渗流带的颗粒白云岩，大气淡水的垂直渗流可使先期存在的颗粒白云岩形成大量溶蚀孔洞、溶缝，呈半充填—未充填，能有效改

善储层的储集空间。

水平潜流带 岩性以角砾灰岩为主，角砾可见一定的分选磨圆，定向排列，角砾本身致密，砾间孔隙多被充填，储集性较差。

深部缓流带 处于水平潜流带之下，遭受岩溶作用微弱，对储层的改造不具有建设性意义。

从A8井—A27井雷四段储层对比图(图8)可以看出，研究区的有利储层主要分布在垂直渗流带，水平潜流带次之，而深部缓流带几乎无储层发育。

研究区内如A001-7井(图9)，垂直渗流带发育在4 123.44~4 139.45 m，厚度约为16 m，颗粒白云岩较为发育；水平潜流带发育在4 139.45~4 175.00 m的范围内，厚度约为36 m，角砾灰岩发育。从储层发育来看，该井在垂直渗流带和水平潜流带各有一段储层发育，孔隙度平均值分别为3.43%和4.58%。但是垂直渗流带储层测井解释为13m，且为纯气层；而水平潜流带测井解释出的储层厚度仅为3m，且只是含气层。因此该井垂直渗流带储层总体好于水平潜流带，而在深部缓流带则未见储层发育。

可见，对研究区雷口坡组顶部风化壳而言，垂直渗流带储层发育优于水平潜流带。渗流带分布有颗粒白云岩，其原生孔隙较为发育，这些孔隙经过大气淡水的淋滤发生溶蚀，形成溶蚀孔洞缝。而在水平潜流带内，虽然溶蚀作用也很强，但角砾灰岩自身储集性能差，粒间孔多被后期充填物所充填，所以没能对

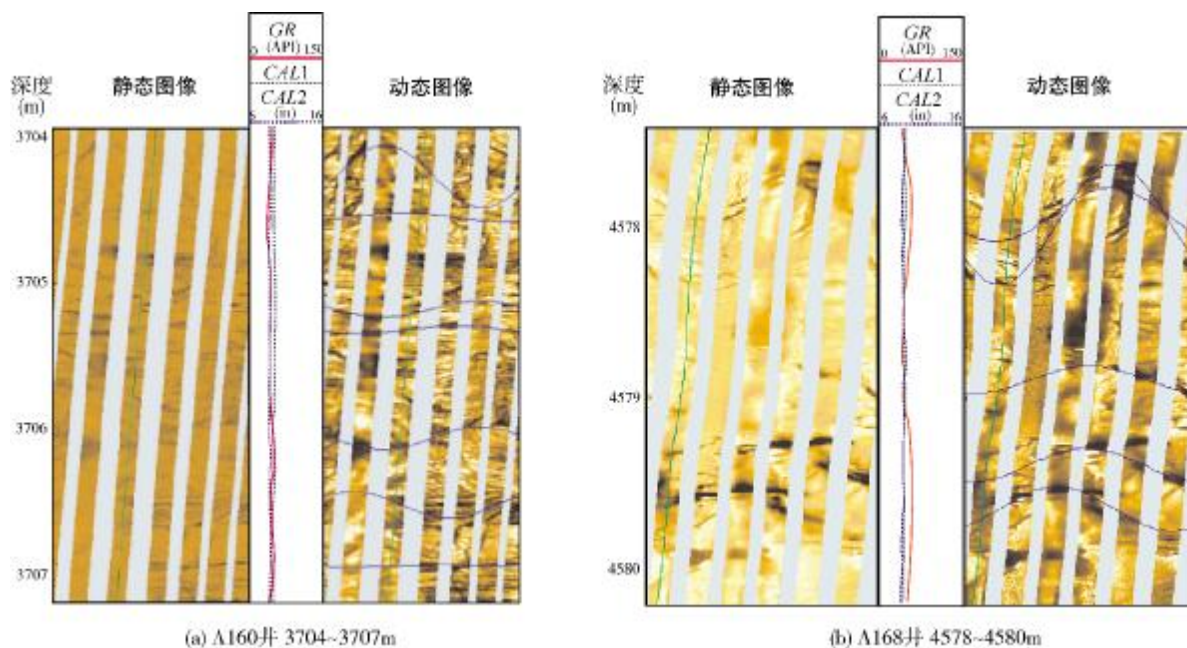


图6 川北仪陇—平昌地区雷四³亚段裂缝的成像测井识别

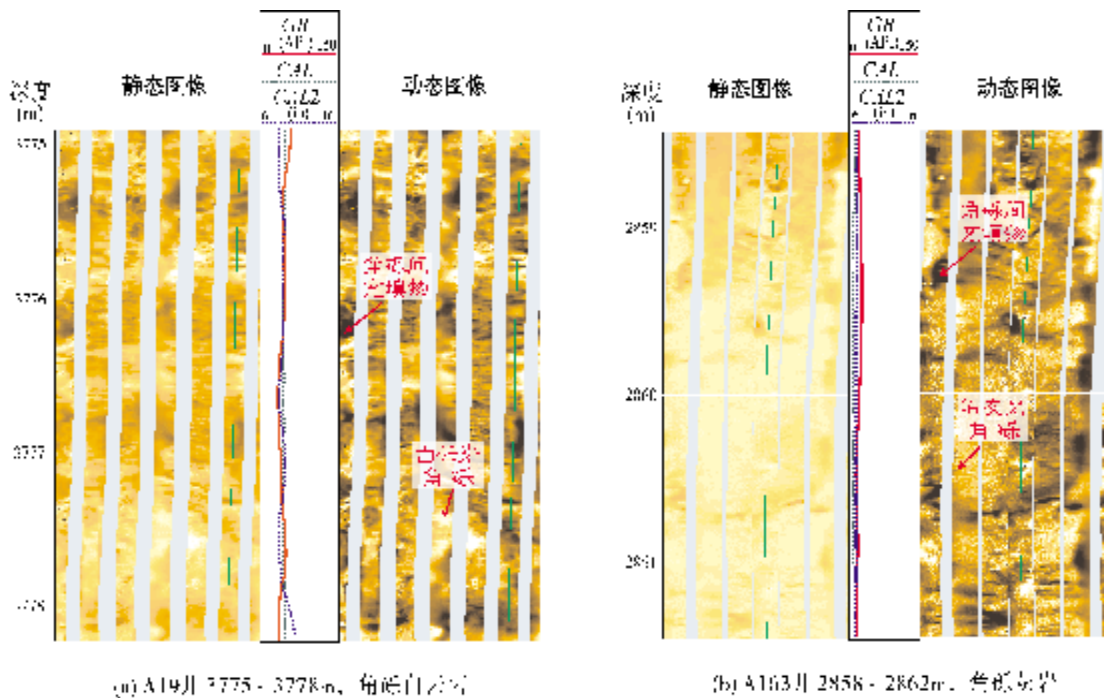


图7 川北仪陇—平昌地区雷四³亚段充填溶洞角砾岩的成像测井识别

储集性有较大的建设性影响。这说明,在川北仪陇—平昌地区,岩性影响了风化壳岩溶型储层的分布。

3.2 岩溶古地貌与储层

岩溶古地貌对储层也有极重要的影响^[12-14],结合区域构造和古地理背景,对整个四川盆地雷口坡组顶部古地貌进行恢复,可将其划分为岩溶高地、岩溶斜坡、岩溶盆地三种地貌单元,而川北仪陇—平昌地区落在岩溶斜坡带内,处于岩溶高地与岩溶盆地的中间地带,岩溶带厚度较大。平面上,在潜水面以上的地带地形较陡,有利于上覆及周边流体发生快速下渗和侧向运移,形成较厚的渗流带和较薄的活跃潜流带,并且在垂直渗流带和水平潜流带的叠合过渡地带溶蚀作用最为强烈,是最有利于储层发育的部位。潜水面以下的地带地形平缓,地下水矿化度低,以水平径流为主,水力梯度小,因而地下水水体相对集中,岩溶方式以慢速扩散溶蚀为主,主要发育水平潜流带(水体不活跃)及较薄的深部岩溶带,在有利岩性区易形成良好的溶蚀孔洞,为气藏提供有利储集空间。

川北仪陇—平昌地区雷口坡组顶部局部比较凸起的地带,如A22井区、A19—A172井区,地势较高,

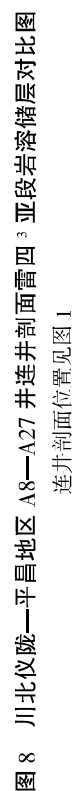
易于接受大气淡水的淋滤而发生较强的溶蚀作用,并以水体快速下渗和侧向运移的方式进行溶蚀为主。雷四³亚段沉积的颗粒白云岩经过岩溶作用后形成大量溶蚀空间,从而明显增加了储集性。

4 岩溶储层分布特征

以上研究表明,川北仪陇—平昌地区雷口坡组顶部古岩溶作用广泛发生,岩溶斜坡环境中颗粒白云岩发育且地势比较凸起的地带尤为剧烈;垂向上,由于受到岩性等因素的影响,区内垂直渗流带的储层发育优于水平潜流带。

根据研究区雷四³亚段储能系数($H\Phi$)^{*}平面分布图(图10)可以对有利储层分布进行预测。结合研究区具体情况,我们一般将 $H\Phi \geq 0.6$ 的区带评价为较有利储集区带; $H\Phi$ 值为 0.2-0.6 的区带为一般有利储集区带; $H\Phi \leq 0.2$ 的区带为非有利储集区带。从图10可以看出,研究区内 A21—A19 井区、A22—A23 井区以及 A160 井区的储能系数都大于 0.6,它们遭受的岩溶作用强烈,垂直渗流带厚度较大,孔渗性较好,属于研究区比较有利的储集区带,特别是在 A22 井周围,储能系数在 1.2 以上,为本区最大值。

* 储能系数($H\Phi$)是某一储层厚度(H,单位“m”)与该储层平均孔隙度(Φ ,无量纲数值)的乘积,它反映该储层所能储集流体量的多少(包括油、气、水),储能系数越高,说明储层发育越好



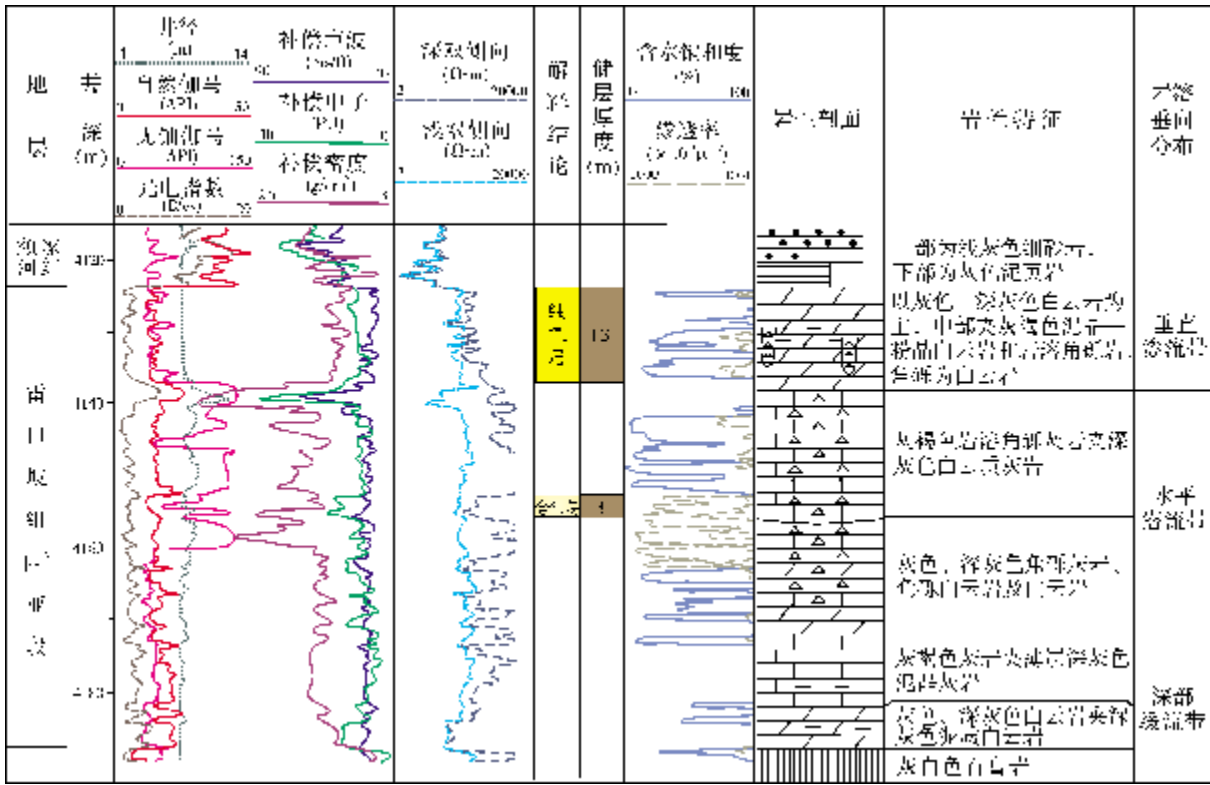


图9 川北仪陇—平昌地区A001-7井雷四³亚段测井解释成果及岩溶分带

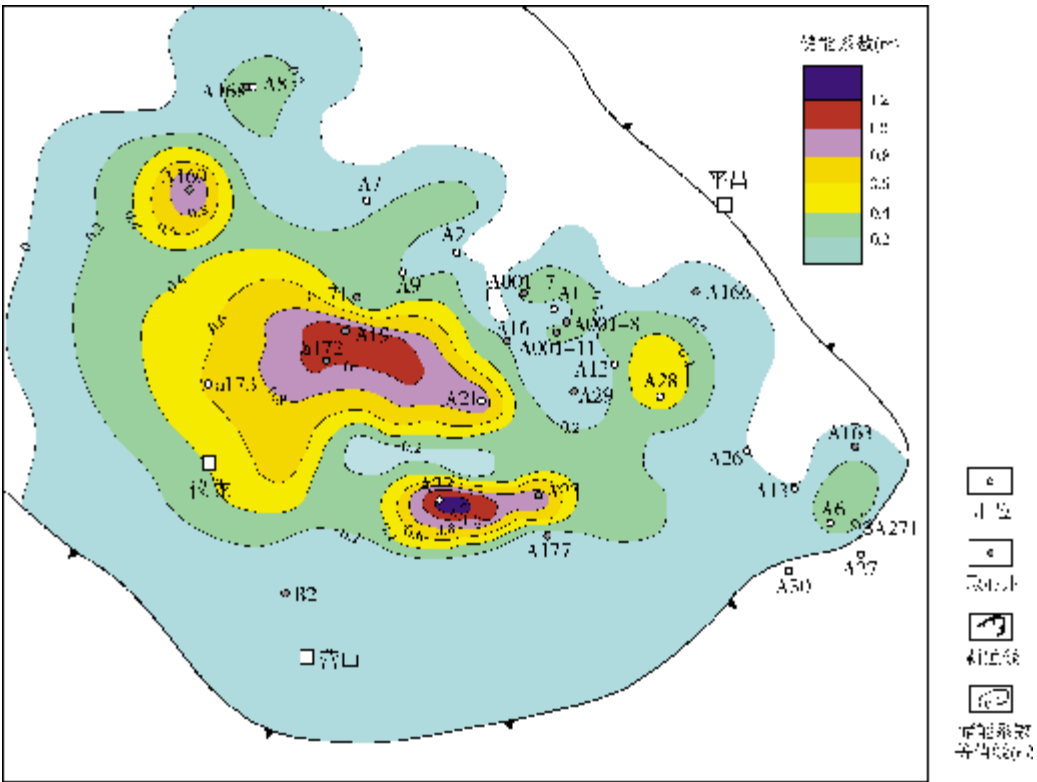


图10 川北仪陇—平昌地区雷四³亚段储能系数分布图
储能系数等于储层的厚度 H(m)和平均孔隙度 ϕ (无量纲)的乘积

5 结 论

(1)研究区雷口坡组雷四³亚段顶部十几米至一百来米的范围内经历了广泛的溶蚀作用,极大地增强了储集性能。

(2)研究区发育垂直渗流、水平潜流以及深部缓流三个岩溶带,垂直渗流带储层发育总体好于水平潜流带,深部缓流带相对较差。局部比较凸起的地带,地势较高,溶蚀作用更强,储层更为发育。

(3)A21—A19 井区、A22—A23 井区以及 A160 井区的储能系数大于 0.6,是比较有利的储集区带,特别是在 A22 井周围,储能系数在 1.2 以上,为本区最大值。

参 考 文 献

- [1] 童崇光. 四川盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京:地质出版社, 1992.
- [2] 胡杨,王兴志,曾德铭,等. 四川盆地北部雷口坡组四段储集层研究[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(5):547-549.
- [3] 曾德铭,王兴志,张帆,等. 四川盆地西北部中三叠统雷口坡组储层研究[J]. 古地理学报, 2007, 9(3):253-266.
- [4] 汪华,刘树根,王国芝,等. 川中南部地区中三叠统雷口坡组顶部古岩溶储层研究[J]. 2009, 31(3):264-270.
- [5] 辛勇光,谷明峰,周进高,等. 四川盆地雷口坡末期古岩溶特征及其对储层的影响——以龙岗地区雷口坡组 3 段为例[J]. 海相油气地质, 2012, 17(1):73-78.
- [6] 桑琴,黄静,程超,等. 蜀南地区茅口组古岩溶识别标志及储层预测[J]. 大庆石油学院学报, 2012, 36(2):53-57.
- [7] 王振宇,李凌,谭秀成,等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型识别[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2008, 30(5):11-16.
- [8] 张美良,林玉石,邓自强. 岩溶沉积-堆积建造类型及其特征[J]. 中国岩溶, 1998, 17(2):168-178.
- [9] 陈福焯,燕军. 油气田测井原理及解释[M]. 成都:西南石油大学出版社, 2008.
- [10] 钟广法,刘瑞林,柳建华,等. 塔北隆起奥陶系古岩溶的电成像测井识别[J]. 天然气工业, 2004, 24(6):57-60.
- [11] 陈芳,李淑荣,袁卫国,等. 利用 FMI 成像测井资料综合评价川东北多相带碳酸盐岩储层. 测井技术, 2010, 34(4): 343-347.
- [12] 刘小平,孙冬胜,吴欣松,等. 古岩溶地貌及其对岩溶储层的控制——以塔里木盆地轮古西地区奥陶系为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3):265-268.
- [13] 许效松,杜佰伟. 碳酸盐岩地区古风化壳岩溶储层[J]. 沉积与特提斯地质, 2005, 25(3):1-7.
- [14] 陈学时,易万霞,卢文忠. 中国油气田古岩溶与油气储层[J]. 沉积学报, 2004, 22(2):244-253.

编辑:吴厚松

Recognition and Potential Zones of Paleokarst at the Top of Middle Triassic Leikoupo Reservoir in Yilong-Pingchang Area, Northern Sichuan Basin

Li Hao, Wang Xingzhi, Hu Yang, Zhu Tong, Li Shun. Yang Xuefei

Abstract: The Middle Triassic Leikoupo carbonate rock is divided in five members (from T_2I_1 to T_2I_5) in Yilong-Pingchang Area, Northern Sichuan Basin. The Leikoupo 5th Member has been denudated up and at the top of Leikoupo 4th Member (T_2I_4) is directly unconformably overlaid by Xujiahe Formation (T_3x). The residual thickness of leikoupo Fm. is from 800m to 950m. Extensive dissolution had been undergone in a range of over then to a hundred meters at the top of T_2I_4 Member, which resulted in epidiagenetic karstification and formed karst breccia, silicification and dissolved ditches, holes, caves and fractures. Contributed to the karstification, a large amounts of dissolution space was produced, in which parts of dissolution space were filled all or locally with argillaceous material that had fallen from the overlying T_3x . According to the analysis of imaging logging and well cores, it is shown that three karst zones develop, including vertical seepage flow, horizontal underflow and deep slow flowage zones. Overall, the development of the reservoir with the vertical seepage flow zone is better than that with the horizontal underflow zone and the development of the reservoir with slow flowage zone is poor. Besides, the karstification is more extensive and reservoir property is better in higher location. Based on the map of the drawing energy storage coefficient(ESC) distribution of T_2I_4 , it is suggested that the areas of Well A21-Well A19, Well A22-Well A23 and Well A160, in which the ESC are all great than 0.6, are the potential reservoir areas.

Key words: Sichuan Basin; Middle Triassic; Leikoupo Fm.; Karst reservoir; Reservoir characteristics

Li Hao; male, Master. Add: Institute of CNOOC Tianjin Branch Company, Tang-gu, Tianjin, 300452, China