



四川盆地东部地区中寒武统高台组沉积相及有利区预测

王纪煊, 胡忠贵, 李世临, 胡九珍, 黄宇飞, 王文静, 曹彭悦

引用本文:

王纪煊, 胡忠贵, 李世临, 等. 四川盆地东部地区中寒武统高台组沉积相及有利区预测[J]. 沉积学报, 2024, 42(5): 1670–1684.

WANG JiXuan, HU ZhongGui, LI ShiLin, et al. Sedimentary Facies and Favorable Areas Prediction of the Middle Cambrian Gaotai Formation in the Eastern Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(5): 1670–1684.

相似文章推荐（请使用火狐或IE浏览器查看文章）

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

陆相湖盆大型扇三角洲沉积特征与演化规律

Sedimentary Characteristics and Evolution Law of a Lacustrine Largescale Fan Delta: A case study from the Triassic Baikouquan Formation on the west slope of Mahu Sag

沉积学报. 2020, 38(5): 923–932 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.089>

辽宁兴城地区前寒武纪地层序列和不整合

The Precambrian Stratigraphic Sequence and Unconformities in Xingcheng Area of Liaoning Province, China, with Discussion of the Sedimentarypaleogeographic Evolution of the Southeastern Yanshan Taphrogenic Trough Basin

沉积学报. 2020, 38(4): 687–711 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.004>

湘中—湘南烟溪组沉积特征及页岩气勘探潜力

Sedimentary Characteristics and Exploration Potential for Shale Gas in Yanxi Formation, Central and Southern Hunan

沉积学报. 2020, 38(1): 218–230 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.026>

四川盆地下寒武统膏盐岩“多湖”沉积模式

“Multiple-lagoon” Sedimentary Model of the Lower Cambrian Gypsum-salt Rocks in the Sichuan Basin

沉积学报. 2019, 37(4): 834–846 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.188>

华北中南部博山地区上古生界沉积相与沉积演化特征

Sedimentary Facies and Their Evolution Characteristics of Upper Paleozoic in Zibo Boshan Area, Central and Southern Region of North China

沉积学报. 2018, 36(4): 731–742 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.052>

文章编号:1000-0550(2024)05-1670-15

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.155

四川盆地东部地区中寒武统高台组沉积相及有利区预测

王纪煊^{1,2},胡忠贵^{1,2},李世临³,胡九珍^{1,2},黄宇飞⁴,王文静¹,曹彭悦¹

1.长江大学地球科学学院,武汉 430100

2.长江大学沉积盆地研究中心,武汉 430100

3.中国石油西南油气田公司重庆气矿,重庆 402160

4.中国石化胜利油田分公司东辛采油厂,山东东营 257094

摘要 【目的】四川盆地油气资源丰富,震旦系灯影组和寒武系龙王庙组的突破,揭示了四川盆地深层油气资源的巨大勘探潜力。四川盆地东部地区寒武系高台组研究和勘探程度总体较低,开展高台组层序地层、沉积相特征及分布等基础地质研究可以为下一步油气勘探部署提供依据。【方法】综合利用钻井、测井、露头剖面、岩心和地震等资料,对川东地区寒武系高台组层序—岩相古地理开展综合研究。【结果】高台组自下而上划分为3个三级层序(SQ1~SQ3),6个四级层序(SSQ1~SSQ6),高台组沉积时期主要发育碳酸盐岩局限台地沉积环境,自西向东依次发育混积潮坪、潮坪、潟湖、台内滩等四种沉积亚相;高台组发育粉晶白云岩储集层,厚度较薄,储集层的非均质性较强,总体上呈“中一低孔低渗”的特征。【结论】受后期构造活动和热液影响,研究区有利储层位于背斜展布区域,川东西部的潮坪亚相(云坪微相)为有利的勘探区带。

关键词 四川盆地东部;寒武系高台组;层序地层;沉积特征;沉积演化

第一作者简介 王纪煊,男,1996年出生,硕士研究生,碳酸盐岩沉积学及储层地质学,E-mail: 1079299440@qq.com

通信作者 胡忠贵,男,教授,E-mail: hzg1978@yangtzeu.edu.cn

中图分类号 P512.2 文献标志码 A

0 引言

近年来,四川盆地乐山—龙女寺古隆起在上震旦统灯影组和下寒武统龙王庙组的油气勘探中相继取得了重大突破^[1-2],中上寒武统洗象池组也成为下古生界油气勘探的潜力层位^[3-4],而中寒武统高台组的勘探程度总体相对较低。据不完全统计,截至2021年底,四川盆地东部(川东)地区已有不少于15口探井钻遇高台组,在五探1井发现气测异常,说明川东地区高台组具有含气潜力,但在完井测试和测井解释中多为水层(如五探1井)。钻井测试结果一方面反映了川东地区高台组具备基本的油气成藏条件和一定程度的含气潜力,但由于储集层的沉积环境和分布复杂、预测难度大、勘探难度高,近年来高台组钻井勘探并未取得进展。已有研究表明,高台组紧邻下寒武统优质烃源岩或侧向接触志留系烃源岩,具有较大的油气资源潜力^[5-7]。

层序地层划分对于岩相古地理研究等时地层格架的建立具有重要意义^[8-11]。梅冥相等^[12]采用的“从岩相序列到米级旋回、从沉积相序列到三级层序划分”的方法,建立了上扬子地区中、上寒武统的层序地层格架,将高台组划分为2个三级层序;袁立等^[13]在研究四川盆地中—上寒武统层序地层划分时,通过对野外剖面进行详细的观察分析,将高台组划分为1个三级层序,发育海侵体系域和高位体系域;徐安娜等^[14]在研究四川盆地寒武系碳酸盐岩—膏盐岩共生体系时,通过开展层序地层格架和沉积相对比研究,将高台组划分为1个三级层序和2个四级层序;胡忠贵等^[15]在研究川东寒武系高台组白云岩—蒸发岩共生地层高频层序时,通过使用GR_{INPEFA}和小波变换技术,将高台组划分为3个三级层序和6个四级层序。由此看出,川东地区寒武系高台组层序划分方案并没有形成统一的认识。

众多学者针对四川盆地寒武系沉积特征和岩相

古地理,开展了一系列的研究。20世纪50年代,以黄汲清为代表的学者^[16-18]首先对中国南方寒武系岩相古地理展开研究,奠定了寒武纪海陆分布的基础。随着四川盆地寒武系岩相古地理研究的发展,20世纪90年代末期,四川盆地内部海陆分布、沉积相演化和构造背景等方面的研究取得了重要进展^[19-20]。21世纪至今,四川盆地寒武系层序、沉积、构造等领域取得了一系列高水平研究成果^[21-23]。近年来,部分学者将研究重点转移到高台组的沉积特征研究并取得了一定成果。如张满郎等^[24]认为四川盆地在高台组沉积期发育碎屑岩和碳酸盐岩的混合沉积,自西向东依次发育混积潮坪—云坪—灰云坪,颗粒滩多发育在混积潮坪,膏质潟湖多发育在云坪;杨威等^[25]认为四川盆地高台组沉积期继承了龙王庙组的沉积格局,主要发育局限台地相,自西向东依次发育混积潮坪—局限台地—开阔台地相,潟湖和颗粒滩均发育在局限台地云坪亚相;李伟等^[26]研究了川中南部高台组沉积相,认为高台期为碳酸盐岩台地沉积,自西向东发育局限台地相、蒸发坪—陆棚潟湖相,颗粒滩主要发育在蒸发坪—陆棚潟湖相。

综上所述,前人对于高台组沉积和岩相古地理总体观点较为相似,但对于层序格架内的沉积特征研究有待细化和深化。笔者根据GR曲线、岩性岩相变化,运用INPEFA曲线和小波变换对川东地区高台组开展了层序地层划分与对比;结合野外剖面、岩心、薄片和测井资料分析,总结沉积相标志,划分沉积相类型;基于已建立的层序地层格架控制,遵循“单因素分析综合作图法”的分析原则,系统编制了四级层序格架约束下的岩相古地理图,总结了高台组沉积分布规律;根据典型单井的测井孔隙度和渗透率分析,结合中国石油西南油气田公司重庆气矿现场采用的碳酸盐岩储层评价标准,对高台组优质储层进行分类;在考虑储集层控制因素的基础上,结合储层特征对有利储集区带进行了预测,旨在为川东地区高台组油气勘探提供地质参考。

1 地质概况

川东地区位于四川盆地东部,范围大致包括华蓥山以东,齐岳山以西,北抵大巴山,南达渝南,行政区划包括了四川省的达州、开江、大竹、邻水等县市和重庆市的大部分地区,面积约 $5.5\times10^4\text{ km}^2$,区域构

造属川东南中隆高陡构造区的东部。川东褶皱带由7~8排条带状的构造组成,属于典型的侏罗山式褶皱构造,其特征是背斜发育比较窄,向斜发育比较宽(图1)。受震旦纪末期—早寒武世构造运动控制^[27-28],四川盆地中部发育具“西北陡、东南缓”特征的乐山—龙女寺古隆起,大规模构造抬升使得盆地西部地层遭受大面积剥蚀而呈现“西薄东厚”的特征。川中古隆起西侧高台组地层厚度为0~200 m,向川东北地区地层增厚至300~400 m,在川东地区的太和1井—平桥1井和建深1井—楼探1井处,由于受到流动性蒸发岩的影响,地层厚度最厚超过500 m(图1)。

震旦纪—寒武纪,研究区经历了多次的构造运动,其中兴凯运动^[29-31]和桐湾运动^[32-34]对研究区沉积特征和古地貌的形成具有重要意义。早寒武世筇竹寺期,由于震旦纪末期桐湾运动的持续影响,四川盆地持续抬升,使得分布在盆地西部的峨眉、乐山、峨边、汉源和甘洛等地区的麦地坪段以及灯影组顶部遭受剥蚀,大部分地区筇竹寺组与震旦系灯影组为平行不整合接触,该时期盆地内大规模的海侵,导致研究区主要发育碎屑岩沉积。早寒武世沧浪铺期,四川盆地及邻区发生较大规模的海退,研究区主要发育混积台地相。震旦纪末期,桐湾运动仍在持续影响,导致盆地西侧古陆略有扩大,而且雅安地区逐渐发育小范围的隆起。早寒武世龙王庙期,受海侵作用和兴凯运动的双重影响,研究区主要发育局限台地相。中寒武世高台期,受兴凯运动的影响,发生了较大规模的海退,川中隆起开始缓慢发育,表现为高台组底部混积台地沉积与龙王庙组白云质潮坪沉积形成的不整合接触;随着持续的、较大规模的海退影响,古隆起面积扩大,沉积水体变浅,整个川东地区发育大面积的混积台地相和局限台地相,局部发育蒸发岩沉积^[35]。中晚寒武世洗象池期,在加里东运动、川北、川中古隆起加剧和规模性海侵的三重作用下,研究区主要发育局限台地沉积^[36-37]。

2 层序地层精细划分

综合岩性、电性等研究结果,利用测井旋回分析技术、小波变换技术可识别不整合面和岩性突变面,进而确定层序地层界面,对高台组进行了层序地层划分。首先通过自然伽马(GR)曲线、岩性突变面确定高台组的顶、底界面,即在高台组和洗象池组接触

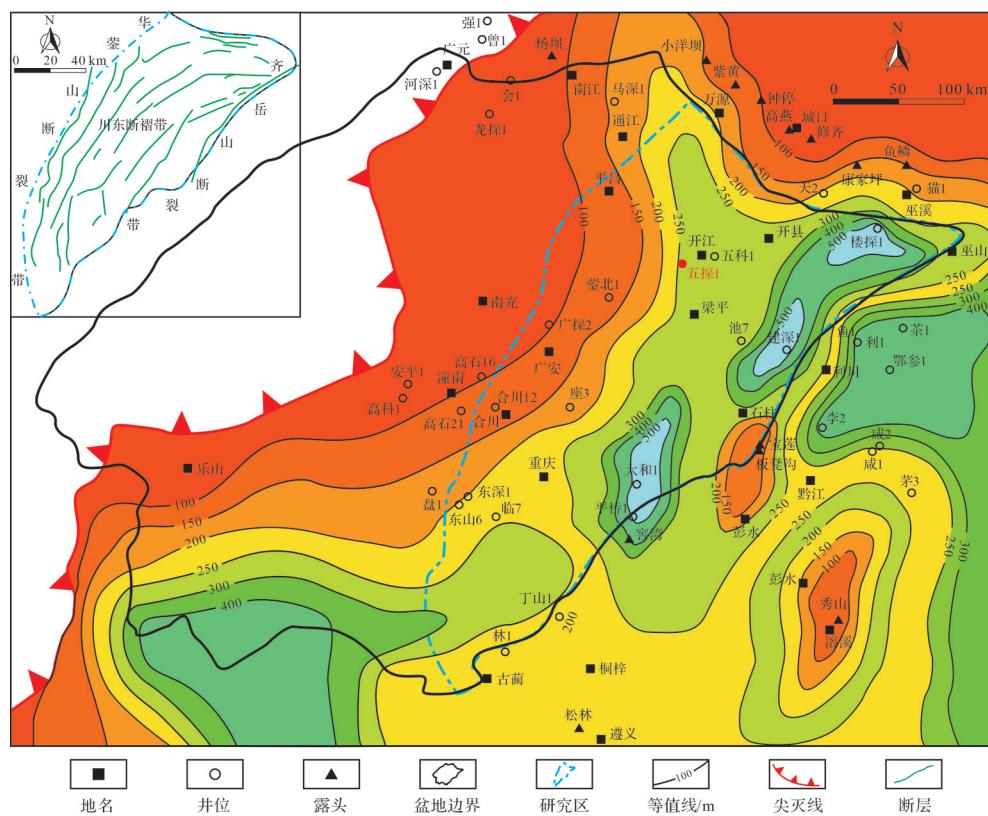


图1 四川盆地中寒武统高台组残余地层厚度等值线图

Fig.1 Residual thickness map of the middle Cambrian Gaotai Formation in the Sichuan Basin

界面,GR曲线表现为锯齿状向低值箱型突变,存在高异常值,岩性表现为石膏岩向白云岩的转换,小波变换表现为强能量团;在龙王庙组和高台组的接触界面,GR曲线表现为低值箱型向锯齿状突变,存在高异常值,岩性表现为白云岩向灰岩的突变,属于典型的岩性岩相突变界面。其次,根据测井资料多元分析方法和岩相变化特征,在高台组内部识别出若干个海进—海退旋回,据此将高台组划分为3个三级层序(SQ1~SQ3)和6个四级层序(SSQ1~SSQ6)(图2)。受乐山—龙女寺古隆起影响,隆起区普遍缺失顶部四级层序SSQ6,仅发育下部5个四级层序(SSQ1~SSQ5);古隆起以东的台地区地层保存相对完整,SSQ1~SSQ6层序均有发育。

三级层序SQ1包含2个四级层序SSQ1和SSQ2。SQ1底界面是高台组灰岩和龙王庙组白云岩的岩性转换界面,地震合成记录上处于波谷,SQ1层序在地震上表现为强振幅、高频率、高连续性和平行的反射特征。四级层序SSQ1和SSQ2间存在白云岩转变为灰岩的岩性转换界面,INPEFA曲线上具有拐点特征,小波变换上表现为强能量团,小波系数曲线振幅

强烈,GR表现为低值向高值突变。四级层序SSQ1主要发育膏质白云岩、云质膏岩和灰质白云岩,受陆源碎屑影响还发育粉砂质灰岩、灰质粉砂岩和砂质白云岩,沉积混积潮坪、潮坪和潟湖亚相,GR曲线表现为低值齿化箱型,INPEFA曲线整体表现为正趋势,小波变换能量团较弱,说明在高台组SSQ1沉积时期长时间的海退;四级层序SSQ2主要发育白云岩和白云质灰岩,陆源供给少,沉积潮坪亚相,GR曲线表现为低值齿化箱型,INPEFA曲线整体表现为正趋势,小波变换能量团较弱,表明在高台组SSQ2沉积时期持续的海退。

三级层序SQ2包含2个四级层序SSQ3和SSQ4。SQ2底界面是灰岩和白云岩的岩性转换界面,INPEFA曲线上具有拐点特征,小波变换上表现为强能量团,小波系数曲线振幅强烈,GR表现为低值向高值突变,地震上表现为地震合成记录的波谷,SQ2层序在地震上表现为弱振幅、低频率和弱连续性的反射特征。四级层序SSQ3和SSQ4间存在泥岩转变为白云岩的岩性转换界面,INPEFA曲线上具有拐点特征,GR异常波动。四级层序SSQ3发育灰质白云

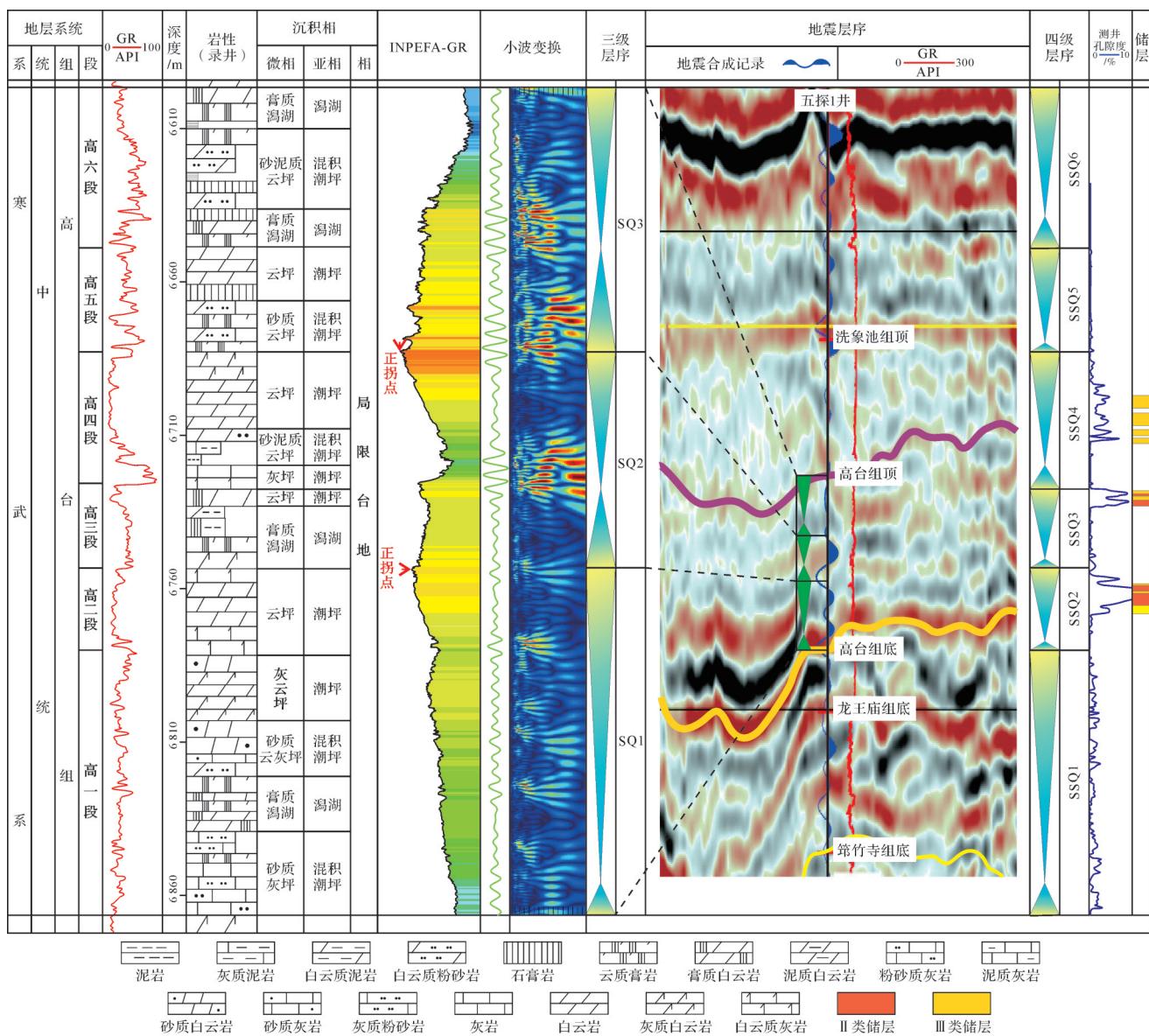


图2 川东地区中寒武统高台组五探1井层序地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive sequence stratigraphy in well Wutan 1 of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin

岩、云质膏岩、膏质泥岩、灰质泥岩和膏质白云岩,陆源供给少,沉积潟湖亚相,GR曲线表现为漏斗型,小波变换能量团较弱,指示在高台组SSQ3沉积时期的海退;四级层序SSQ4发育灰岩、泥岩、灰质泥岩、粉砂质白云岩、灰质白云岩和白云岩,受部分陆源物质影响,沉积潮坪和混积潮坪,GR曲线表现为低值齿化箱型,INPEFA曲线整体表现为一个负趋势和一个正趋势,小波变换能量团由强变弱,指示在高台组SSQ4沉积时期短暂海进后持续的海退。

三级层序SQ3包含2个四级层序SSQ5和SSQ6。SQ3底界面是石膏岩和白云岩的岩性转换界面,具有

INPEFA曲线拐点、小波变换强能量团和GR异常的特征,地震合成记录上处于波谷,SQ3层序在地震上表现为中—弱振幅、中—低频率、中连续性和平行—亚平行的反射特征。四级层序SSQ5和SSQ6间存在石膏岩转变为白云岩的岩性转换界面,INPEFA曲线上具有拐点特征,小波变换具有强能量团特征。SQ3顶界面为高台组石膏质白云岩和洗象池组白云岩的岩性转换界面,属于SSQ6的顶界面,GR值表现为突变值,在INPEFA曲线上具有拐点特征。四级层序SSQ5发育白云质石膏岩、石膏岩、白云质粉砂岩和白云岩,受陆源供给影响,发育混积潮坪和潮坪亚相,

GR 表现为低值锯齿型, INPEFA 曲线整体上表现为负趋势, 小波变换能量由强变弱, 指示在高台组 SSQ5 沉积时期短暂的海进后持续的海退。四级层序 SSQ6 主要发育白云质石膏岩、石膏岩、白云质粉砂岩和页岩, 受陆源供给影响, 发育混积潮坪和潟湖亚相, GR 表现为锯齿型, INPEFA 曲线整体上表现为负趋势, 小波变换能量由强变弱, 指示在高台组 SSQ6 沉积时期短暂的海进后持续的海退。

3 沉积相与沉积演化

3.1 沉积相类型与特征

基于前人研究成果, 通过对区内钻测井资料、地震资料、岩心和野外剖面资料分析, 从岩石学、古生物、测井相等方面开展研究, 对川东地区中寒武统高台组进行了沉积相类型划分, 认为研究区高台组发育碎屑质碳酸盐岩台地沉积, 研究区主要发育局限台地相。

局限台地相是四川盆地寒武系碳酸盐岩地层重要的油气勘探相带^[14-16]。由于古地貌、古环境和古气候的影响, 海水的水体循环受到一定程度的局限, 水体盐度的浓度较高。可进一步划分出混积潮坪、潮坪、潟湖和台内滩4个亚相。

混积潮坪亚相多位于海平面附近, 在研究区高台组表现为一套陆源碎屑岩与碳酸盐岩的交互沉积。在研究区岩性为条带状粉砂质白云岩(图3a)或白云质粉砂岩(图3b)、粉砂质灰岩(图3c)。垂向上混积潮坪在高台组6个四级层序均较发育, 其中 SSQ1、SSQ2 和 SSQ3 最为发育。混积潮坪受潮汐作用影响, 间歇性暴露, 具有干(泥)裂等暴露标志, 也发育平行层理、交错层理。GR 曲线表现为高值高振幅锯齿型, 声波时差(AC)曲线表现为齿化箱型, 电阻率(RT)曲线表现为低幅锯齿型(图4)。根据岩性组合特征和其他沉积相标志, 可进一步划分出砂质云灰坪、砂质云坪、砂质灰坪等微相, 靠近物源区的太和1井发育局部的膏质砂坪微相, 在垂向上叠置发育, 显示水体频繁变化的特点。

潮坪亚相在研究区内分布最为广泛, 沉积物颜色从浅色到深色变化范围较大。高台组潮坪亚相主要岩性为石膏质泥晶白云岩(图3d)、粉晶白云岩(图3e)与泥质白云岩, 局部为泥晶灰岩。泥质白云岩中发育水平层理(图3f), 泥晶灰岩具有中—厚层状、块状构造(图3g,h)。GR 曲线上表现为齿化箱型, AC

曲线表现为对称齿化、齿化箱型和齿化漏斗型, RT 曲线表现为高幅锯齿型(图4)。在准同生阶段, 由于高台组沉积时期炎热干燥的古气候, 原生孔隙容易被少量的石膏矿物充填。在深埋藏阶段, 构造运动导致深部构造热液沿断裂和裂缝对高台组白云岩溶蚀形成大量溶洞, 是高台组有利的储层发育相带。部分溶洞沉淀热液矿物, 如黄铁矿、石英晶体(图3e), 裂缝较发育。可进一步划分出云坪、云灰坪、灰云坪和膏质潮坪4个微相。

潟湖亚相多发育在局限台地的地貌低部位, 水体能量较弱, 水体盐度最高, 水体循环较为封闭, 高台组以沉积蒸发岩为主。岩性包括石膏岩(图3i)、白云质石膏岩(图3j)和盐岩(图3k)。进一步可以细分为膏云质潟湖和泥质潟湖微相。测井 GR 曲线上表现为短指—微短指形, AC 曲线表现为箱型, RT 曲线表现为高值锯齿型(图4)。

台内滩亚相多发育在局限台地的地形较高部位, 水体能量较强, 多受到波浪和潮汐作用改造。沉积物颜色较浅, 颗粒体积分数为 50%~70%, 颗粒类型包括鲕粒和砂屑, 以泥晶胶结为主, 滩体厚度相对较薄。岩性主要为砂屑白云岩(图3l)、鲕粒白云岩(图3m)、砂砾屑灰岩(图3n,o)和鲕粒灰岩(图3p)。GR 曲线上表现为齿化箱型, AC 曲线表现为对称箱型, RT 曲线表现为高值钟型(图4)。主要细分为砂屑滩微相。

3.2 层序格架内沉积演化及模式

结合前人对四川盆地及其周缘的研究成果^[17-18,38], 统计研究区重点井位岩性、厚度数据(表1), 基于岩石类型、岩相组合、测井标志, 综合地震资料, 精细刻画了四级层序格架内沉积相平面展布。

以近西—东向的“高科1井—高石16井—广探2井—蓥北1井—五探1井”和南西—北东向的“林1井—丁山1井—太和1井—建深1井—楼探1井”两条连井剖面为例(图5,6)。近西—东向剖面位于研究区中部, 从西向东地层厚度逐渐增加, 近陆源碎屑物源方向的高科1井和高石16井主要发育砂质灰坪和云坪微相, 广探2井发育泥质潟湖、灰坪和云坪微相, 近北部陆源碎屑物源方向的蓥北1井主要发育砂质灰坪、灰云坪、泥质潟湖和云坪微相, 五探1井主要发育砂质灰坪、灰云坪、云坪、潟湖和砂质云坪微相, 远物源的楼探1井主要发育膏质潮坪、云坪和膏质潟湖, 潟湖具有多期叠加的特点。南西—北东向剖面

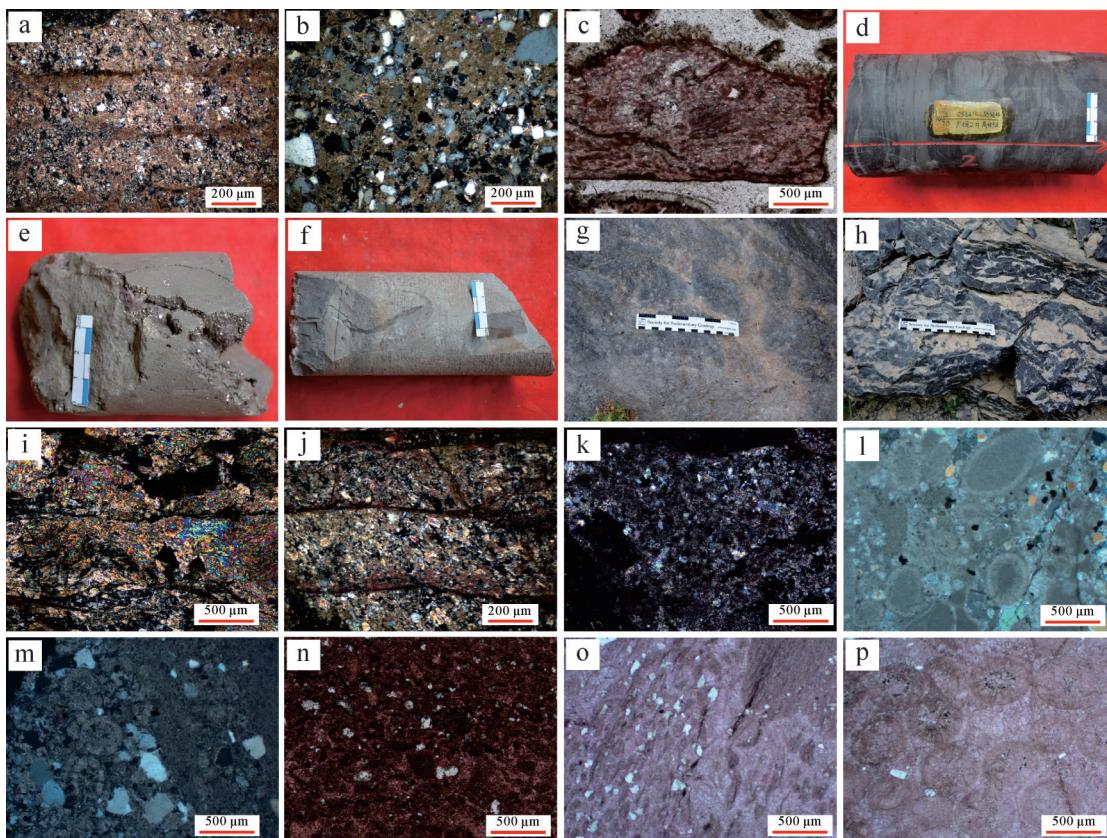


图3 川东地区中寒武统高台组岩心及显微照片

(a)粉砂质白云岩,楼探1井,6 550 m,10×5(+);(b)白云质胶结石英砂岩,蓥北1井,2 726 m,10×5(+);(c)粉砂质灰岩,五探1井,6 858 m,10×5(-);(d)纹层状石膏质灰色泥晶—细粉晶云岩,水平开启状裂隙发育,裂缝中有白色石膏渗出,水平层理发育,发育泥质条带,广探2井,5 534 m;(e)浅灰色粉晶白云岩,溶孔洞隙发育,溶洞部分充填,见大量黄铁矿晶体,储层段,五科1井,6 052 m;(f)浅灰色泥质白云岩,局部与细粉晶白云岩互层,可见水平层理,五科1井,6 055 m;(g)浅灰色块状泥晶灰岩,石柱宝莲剖面;(h)深灰色中层状泥晶灰岩夹泥质条带,表面风化后呈页理状,石柱宝莲剖面;(i)石膏岩,楼探1井,5 595 m,10×5(+);(j)含白云石膏岩,楼探1井,6 558 m,10×10(+);(k)白云质石膏岩,楼探1井,5 325 m,10×5(+);(l)含石膏砂屑白云岩,主要由泥晶白云岩砂屑构成,局部见鲕粒,座3井,5 708 m,10×5(+);(m)粉砂质鲕粒白云岩,含少量石膏,太1井,4 918 m,10×10(+);(n)含石膏泥晶砂屑灰岩,偶见海百合茎,楼探1井,6 491 m,10×5(-);(o)砂砾屑灰岩,砾屑间石英零星分布,座3井,5 868 m,10×5(-);(p)鲕粒灰岩,座3井,5 802 m,10×5(-)

Fig.3 Core and microscopic images of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin

(a) silty dolomite, well Loutan 1, 6 550 m, 10×5 (+); (b) dolomitic consolidated quartz sandstone, well Yingbei 1, 2 726 m, 10×5 (+); (c) silty limestone, well Wutanyi 1, 6 858 m, 10×5 (-); (d) laminate gypsum gray micritic and fine powdery dolomite, horizontal open fractures developed, white gypsum oozing from the fractures, horizontal bedding developed, argillaceous bands developed, well Guangtan 2, 5 534 m; (e) light gray silty dolomite, dissolved pore and cave developed, cave partially filled, found a large number of pyrite crystals, reservoir section, well Wuke 1, 6 052 m; (f) light gray argillaceous dolomite, locally interbedded with fine silty dolomite, visible horizontal bedding, well Wuke 1, 6 055 m; (g) light gray massive micritic limestone, Shizhu Baolin section; (h) dark gray mesoform micritic limestone with argillaceous bands, the surface is foliated after weathering, and the Baolian section of stone pillar; (i) gypsum rock, well Loutan 1, 5 595 m, 10×5 (+); (j) dolomite-bearing gypsum rock, well Loutan 1, 6 558 m, 10×10 (+); (k) dolomitic gypsum rock, well Loutan 1, 5 325 m, 10×5 (+); (l) gypsum sand-containing dolomite, mainly composed of micritic dolomite sand-fragments, local oolitic, well Zuo 3, 5 708 m, 10×5 (+); (m) silty oolitic dolomite with a small amount of gypsum, well Taihe 1, 4 918 m, 10×10 (+); (n) gypsum micritic sand clastic limestone, occasionally seen crinoid stem, well Loutan 1, 6 491 m, 10×5 (-); (o) sand-gravel limestone, scattered intergravel quartz, well Zuo 3, 5 868 m, 10×5 (-); (p) oolitic limestone, well Zuo 3, 5 802 m, 10×5 (-)

位于研究区东部边缘,从南西向北东方向地层厚度逐渐增加,远物源的林1井和丁山1井主要发育云坪、泥质潟湖、膏质潮坪和砂屑滩微相,丁山1井砂屑滩具有多期发育的特点,近陆源碎屑物源方向的太和1井主要发育膏质砂坪、砂质云坪、膏质潮坪和云坪微相,远物源的建深1井和楼探1井主要发育膏质潮坪、云坪和多期的膏质潟湖。

川东地区高台组沉积时期,在兴凯运动和大规

模海退的背景下,研究区西部地层厚度较薄,向东地层厚度逐渐增加,研究区主要发育局限台地相沉积,可进一步划分出混积潮坪、潮坪、潟湖和台内滩4个亚相,主要发育砂质灰云坪、膏质砂坪、砂屑滩、泥质潟湖、膏质潟湖、膏质潮坪、云坪、灰云坪和灰坪等9个微相。

SSQ1时期,研究区由西向东依次发育砂质灰云坪、灰坪、云坪、膏质砂坪、膏质潮坪和膏质潟湖微

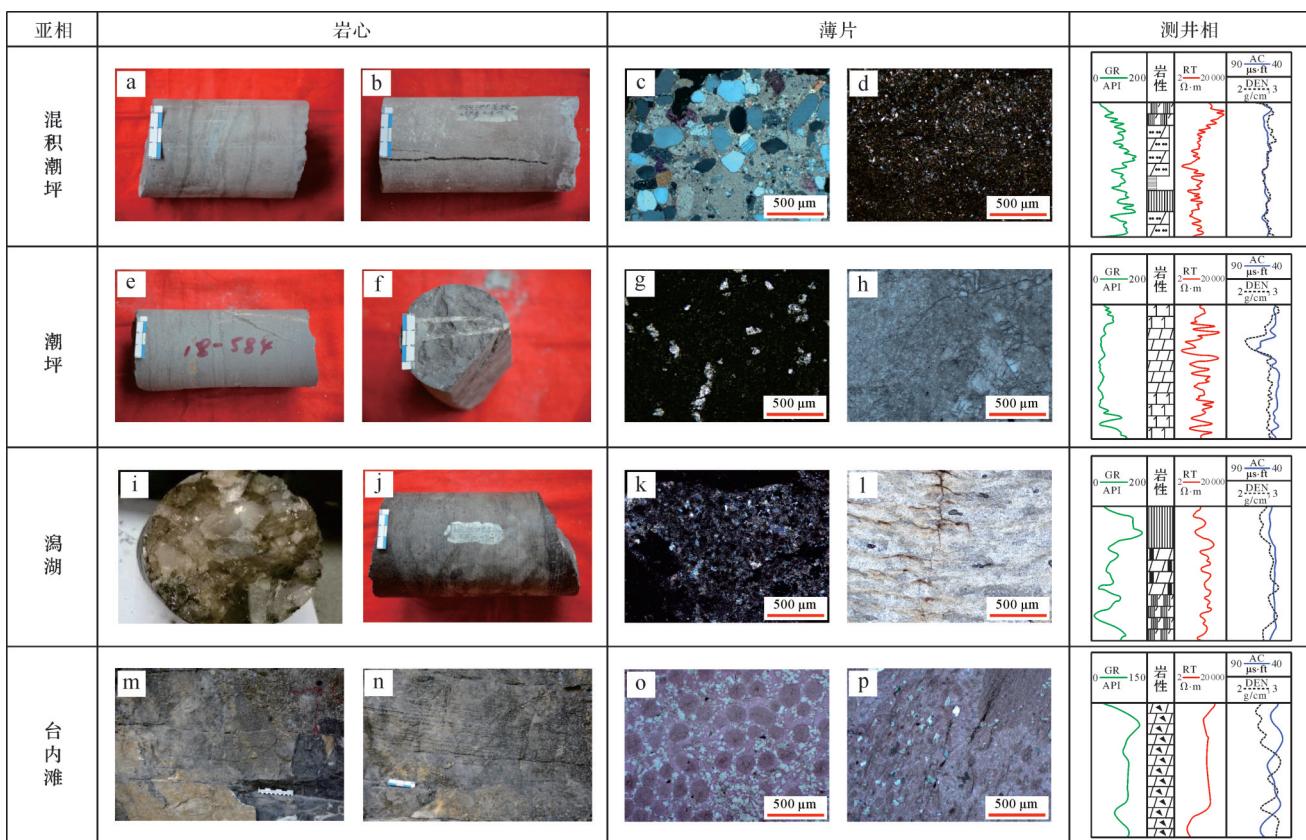


图4 川东地区中寒武统高台组测井相特征

(a)灰绿色泥质云质粉砂岩夹泥质条带,五科1井,6 050 m;(b)浅灰色云质粉—细砂岩,含膏岩夹层,见开启裂缝,五科1井,6 054 m;(c)白云质粉砂岩,座3井,5 717 m,10×5(−);(d)粉砂质白云岩,蓥北1井,2 730 m,10×5(−);(e,f)灰色泥—细粉晶云岩,高角度裂缝发育,大部被白色石英充填,五科1井,5 964 m;(g)石膏质泥晶白云岩,见大量构造微裂缝,石柱宝莲剖面,10×5(−);(h)粉晶白云岩,见少量溶孔发育,石英及白云石充填,太和1井,4 755 m,10×10(−);(i)盐岩(钾盐),楼探1井,6 050 m;(j)灰白色粉晶膏云岩,广探2井,5 553 m;(k)石膏岩,楼探1井,5 325 m,10×5(+);(l)石膏岩,楼探1井,5 520 m,10×5(−);(m,n)深灰色厚层一块状夹薄层状砂屑灰岩,平行层理发育,石柱宝莲剖面;(o)鲕粒灰岩,鲕粒间石英晶体大量发育,座3井,5 857 m,10×5(−);(p)砂砾屑灰岩,砾屑间石英零星分布,座3井,5 868 m,10×5(−)

Fig.4 Characteristics of typical logging facies of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin

(a) gray-green muddy cloudy siltstone with muddy bands, well Wuoke 1, 6 050 m; (b) light gray cloudy silt-fine sandstone with plasterstone interbeds, open fractures, well Wuoke 1, 6 054 m; (c) dolomitic siltstone, well Zuo 3, 5 717 m, 10×5 (−); (d) silt dolomite, well Yingbei 1, 2 730 m, 10×5 (−); (e, f) gray mud-fine silt crystal dolomite, high-angle fracture development, mostly filled with white quartz, well Wuoke 1, 5 964 m; (g) gypsumiferous mud crystal dolomite, a large number of tectonic microfractures, Shizhu Baolian section, 10×5 (−); (h) silt crystal dolomite, a small amount of solution hole development, quartz and dolomite filled, well Taihe 1, 4 755 m, 10×10 (−); (i) salt rock (potash), well Loutan 1, 6 050 m; (j) grayish white powder crystal plaster dolomite, well Guangtan 2, 5 553 m; (k) gypsum rock, well Loutan 1, 5 325 m, 10×5 (+); (l) gypsum rock, well Loutan 1, 5 520 m, 10×5 (−); (m, n) dark gray thick layer (n) dark gray thickly laminated-blocky interbedded thinly laminated sandy-chip tuff with parallel laminae development, Shizhu Baolian section; (o) oolitic tuff with massive development of quartz crystals between oolites, well Zuo 3, 5 857 m, 10×5(−); (p) sandy-chip tuff with sporadic distribution of quartz between gravels, well Zuo 3, 5 868 m, 10×5(−)

相,砂屑滩微相主要分布在研究区东南部。该期砂质灰云坪分布范围较大,主要在五科1井—蓥北1井和座3井—太和1井一带,发育砂质灰岩、白云质粉砂岩和砂质白云岩,局部如太和1井发育膏质砂坪;向东发育云坪;研究区东部边界发育膏质潮坪微相;在楼探1井、建深1井和五探1井分别发育3个膏质潟湖微相,西部潟湖规模较小,以东部潟湖为主;小规模砂屑滩发育,集中在研究区东南部和中东部(图7a)。

SSQ2时期,研究区由西向东依次发育砂质灰云

坪、膏质砂坪、泥质潟湖、灰云坪、膏质潮坪和膏质潟湖微相,少量砂屑滩微相分布在研究区东南部。北部的砂质灰云坪微相略有萎缩,南部的砂质灰云坪微相向东略有发育,太和1井仍发育膏质砂坪微相;云坪微相在研究区大规模发育。该期五探1井的膏质潟湖逐渐消失,灰云坪开始发育;膏质潮坪的范围也逐渐减小,主要集中在研究区东北部,部分发育在东南部;广探2井开始发育泥质潟湖;研究区边缘的砂屑滩逐渐萎缩,石柱宝莲剖面的砂屑滩消失(图7b)。

表1 川东地区中寒武统高台组重点井位岩石类型、厚度统计表

Table 1 Rock types and thickness of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin

井名	楼探1井(高台组下盘)	五探1井	蓥北1井	座3井	马深1井	太和1井	林1井	丁山1井	东深1井	曾1井	高科1井	五科1井	广探2井	高石16井	建深1井
灰岩厚度/m	49.55	67.0	129.48	28.0	0	28.5	0	4.0	0	18.5	0	0	0	0	91.0
灰岩/地层	3.30	24.1	49.60	16.4	0	4.3	0	2.4	0	18.7	0	0	0	0	10.1
白云岩厚度/m	79.29	93.0	37.84	40.0	29.0	208.5	114.5	129.0	92	30.0	52	60.0	57.0	30.5	636.0
白云岩/地层	53.60	33.4	14.40	23.5	19.4	32.2	82.3	80.1	92	30.4	0	54.5	55.3	35.4	71.1
颗粒白云岩厚度/m	25.55	0	0	0	7	0	8.5	42.0	0	8.0	0	0	4.0	0	0
颗粒白云岩/地层	1.70	0	0	0	4.6	0	6.1%	26.0	0	8.1	0	0	3.8	0	0
膏岩厚度/m	59.03	54.0	14.32	15.0	15.0	32.5	0	16.0	0	0	0	10.0	0	0	144.0
膏岩/地层	39.90	19.4	5.40	8.8	10.0	5%	0	9.9	0	0	0	9.0	0	0	16.1
碎屑岩厚度/m	44.65	64.0	79.36	87.0	105.0	377.0	6.5	12.0	8	50.0	0	40.0	46.0	55.5	23.0
碎屑岩/地层	3.00	23.0	30.40	51.1	70.4	58.3	4.6	7.4	8	50.7	0	36.3	44.6	64.5	2.5
地层厚度/m	147.75	278.0	261.00	170.0	149.0	646.0	139.0	161.0	100	98.5	52	110.0	103.0	86.0	894.0

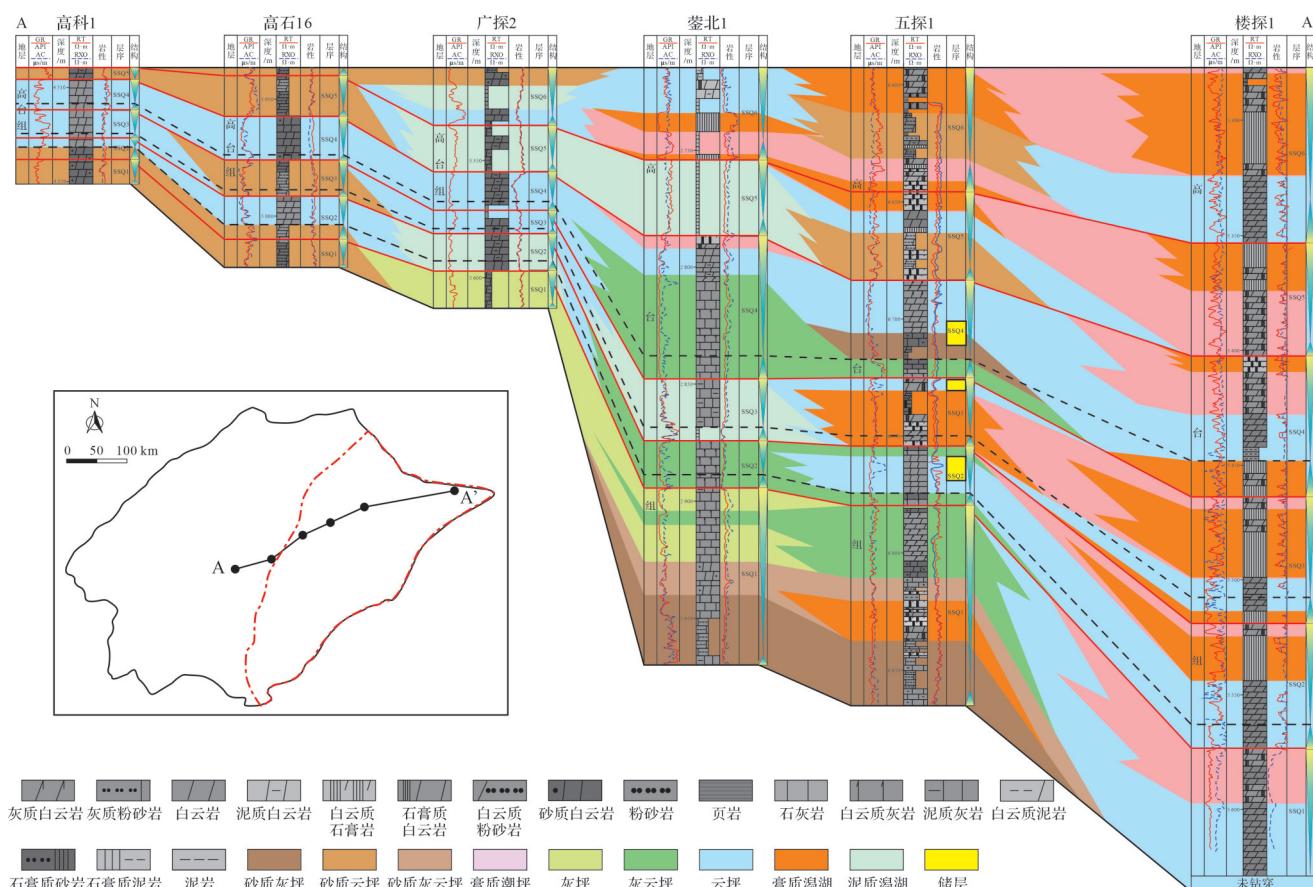


图5 川东地区中寒武统高台组东—西向沉积相连井剖面

Fig.5 Stratigraphic and facies section of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin from east to west

SSQ3时期,研究区由西向东依次发育砂质灰云坪、膏质砂坪、泥质潟湖、云坪、膏质潮坪、膏质潟湖和砂屑滩微相。北部的砂质灰云坪微相完全消失,南部砂质灰云坪的规模略有发育;云坪微相在研究区仍大规模发育,膏质潮坪的规模略有扩大,北部发

育面积大于南部;砂屑滩在研究区中部发育,座3井和石柱宝莲的砂屑滩持续发育;该期广探2井的泥质潟湖向东迁移到了蓥北1井(图7c)。

SSQ4时期,研究区由西向东依次发育砂质灰云坪、云坪、灰云坪、膏质潮坪、膏质潟湖和砂屑滩微

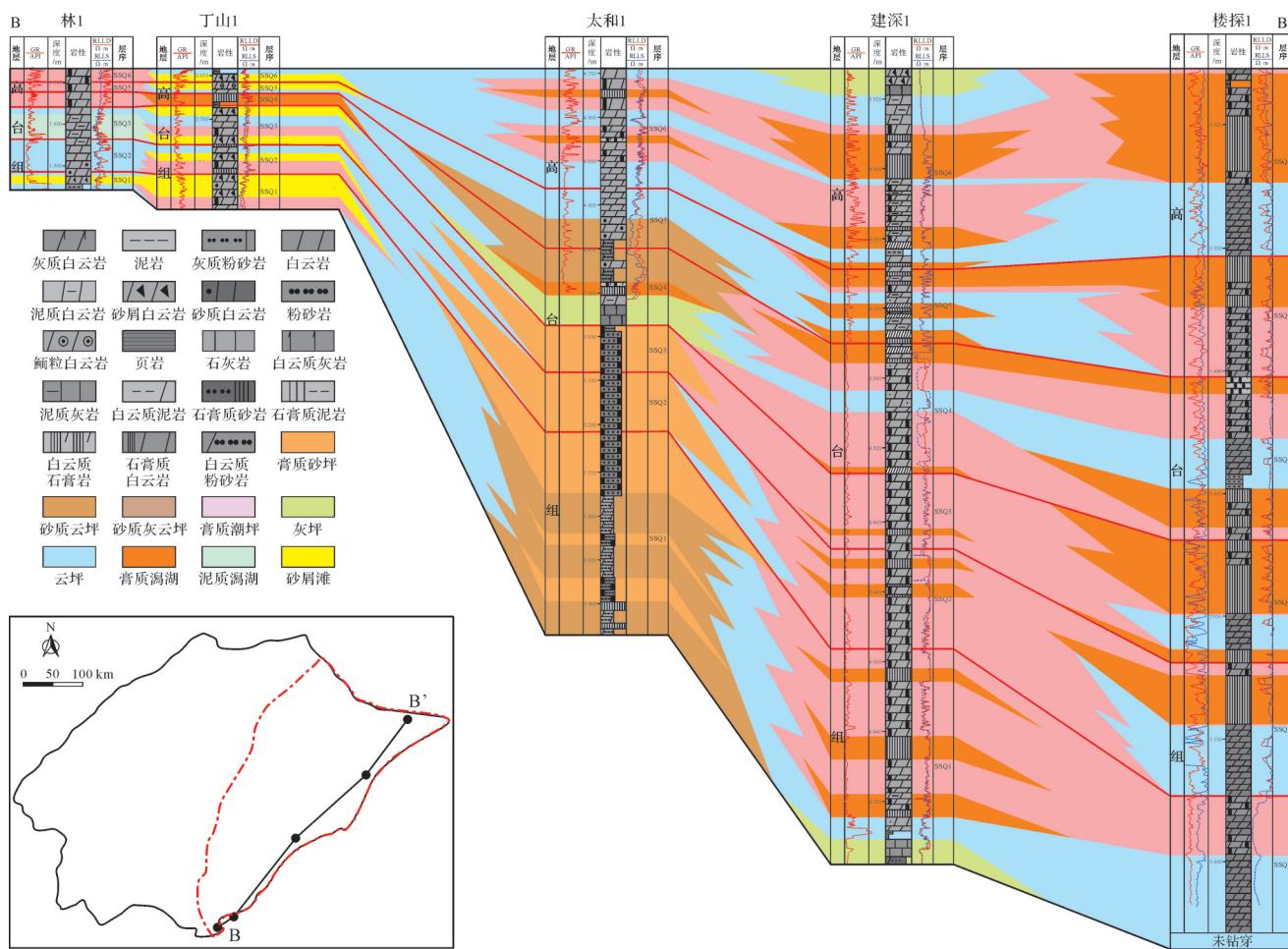


图6 川东地区中寒武统高台组南—北向沉积相连井剖面

Fig.6 Stratigraphic and facies section of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin from north to south

相。砂质灰云坪的规模持续减小,在研究区北部和南部略有分布;研究区主要发育云坪亚相,膏质潮坪沿研究区东部边界开始呈现带状分布,由于广泛的蒸发环境导致大规模的膏质潮坪沉积,促进了膏质潟湖的发育,使其具有沿研究区东部边界分布的特点;石柱宝莲剖面的台内滩持续发育(图7d)。

SSQ5时期,研究区由西向东依次发育砂质灰云坪、泥质潟湖、云坪、膏质潮坪、膏质潟湖和砂屑滩微相。南部的砂质灰云坪略有萎缩,北部的砂质灰云坪缓慢发育;在蓥北1井发育泥质潟湖;在东部膏质潮坪呈带状展布,南部发育的膏质潟湖逐渐萎缩消失,北部的膏质潟湖持续发育;石柱宝莲剖面和丁山1井发育砂屑滩(图7e)。

SSQ6时期,由于兴凯运动的加剧、持续性的海退和川北、川中古隆起的影响,研究区部分地层被剥蚀。研究区由西向东依次发育砂质灰云坪、泥质潟湖、云坪、膏质潮坪、膏质潟湖和砂屑滩微相。鳌北1

井的泥质潟湖出现萎缩,膏质潮坪的规模扩大;楼探1井、建深1井和五探1井—蓥北1井分别发育3个膏质潟湖;石柱宝莲和丁山1井砂屑滩持续发育(图7f)。

对比发现,此次高台组沉积相类型划分与前人研究成果^[13,17-18]整体一致,但微相类型划分、层序格架内沉积微相展布研究相对更为细化。总体而言,川东地区在高台组沉积时期,继承了龙王庙组的沉积格局,主要发育碳酸盐岩和陆源碎屑岩混合沉积的局限台地相沉积,研究区西部受到古陆陆源物质的影响,自西向东依次发育混积潮坪、潮坪、潟湖和台内滩亚相。局限台地内部以膏质白云岩为代表的膏质潮坪微相分布在研究区东部,膏质潟湖微相沉积的膏盐岩规模较大,少量的台内滩零星分布在研究区的东部边缘。根据已有资料推测,高台组沉积时期研究区周缘地区依次发育开阔台地、台地边缘滩和斜坡—盆地相(图8)。

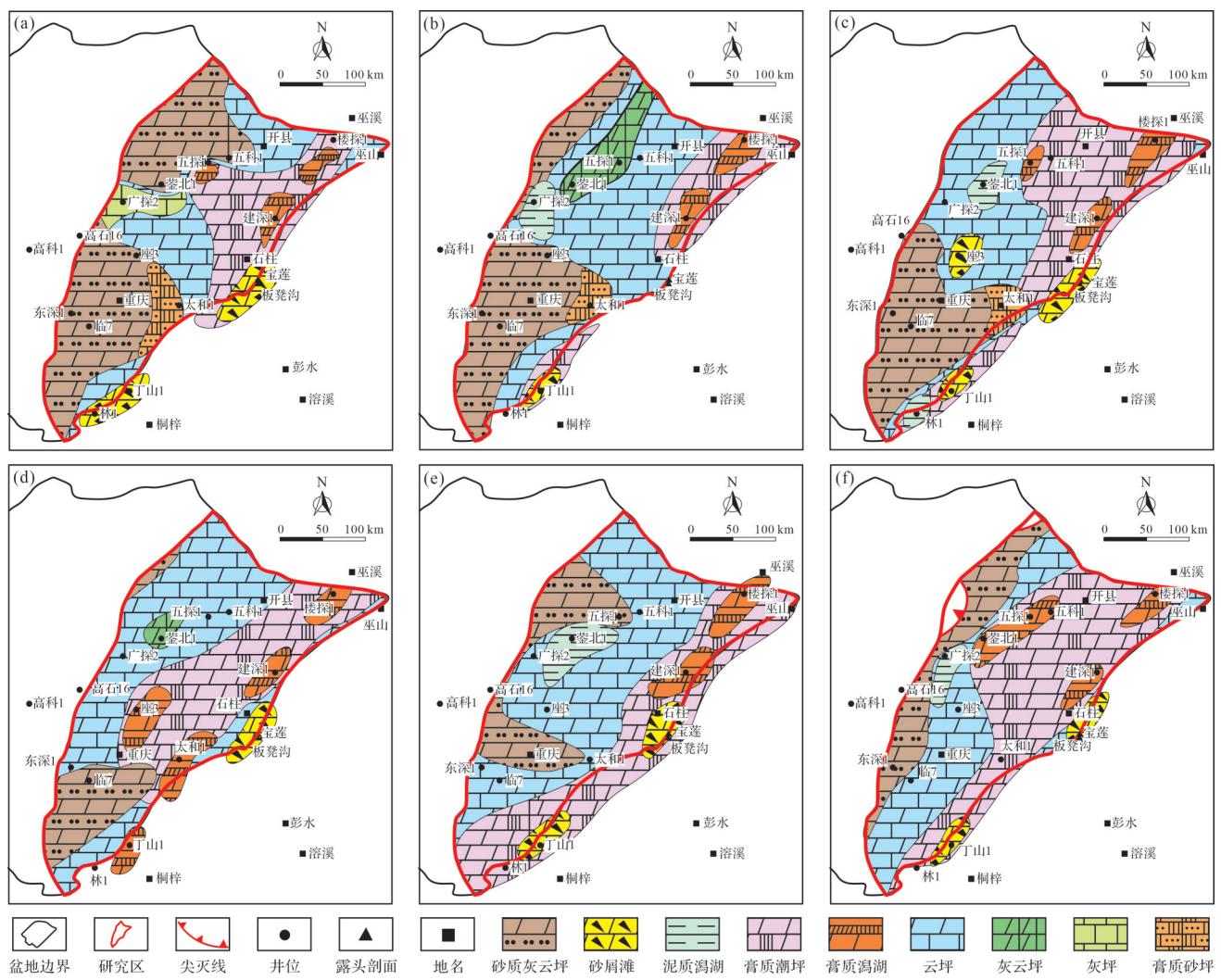


图7 川东地区中寒武统高台组岩相古地理图

(a)SSQ1沉积期; (b)SSQ2沉积期; (c)SSQ3沉积期; (d)SSQ4沉积期; (e)SSQ5沉积期; (f)SSQ6沉积期

Fig.7 Lithofacies palaeogeography of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin

(a) SSQ1; (b) SSQ2; (c) SSQ3; (d) SSQ4; (e) SSQ5; (f) SSQ6

4 有利储集区带分布及预测

川东地区寒武系高台组白云岩储层较为发育,是在寒武系龙王庙组、洗象池组之后又一重要的白云岩储层发育层系。高台组有利储层岩性主要为粉晶白云岩。储集空间包括溶孔、微裂缝、溶洞(图9a~c)等类型,其中以溶蚀孔洞为主,见开启状微裂缝。

根据高台组五探1井取心段的物性资料(表2),结合中国石油西南油气田公司重庆气矿现场使用碳酸盐岩储层评价标准(表3),将高台组储集层分为两类:Ⅱ类储层岩性为粉晶白云岩,储层孔隙度介于7%~10.4%,渗透率大于或等于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔喉组

合为中、小孔—细喉,孔隙类型为溶蚀孔洞、晶间孔和裂缝,综合评价为较好储层;Ⅲ类储层岩性为粉晶白云岩,储层孔隙度介于2.8%~5.8%,渗透率介于 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔喉组合为小孔—细喉,孔隙类型为溶孔、晶间孔和裂缝,综合评价为中等储层。高台组储层的累计厚度介于0.1~7.5 m。储集层的非均质性较强,厚度较薄,总体上呈“中—低孔低渗”的特征。同时,研究发现随着埋藏深度的增加(表2),储层的孔隙度和渗透率也增加。

通过上述高台组单井、连井沉积相(图2,5)和储层物性分析,高台组储集层主要发育在潮坪亚相—云坪微相,垂向上优质储层集中在SSQ2、SSQ3和SSQ4层序的海退时期(图2)。将高台组6个四级层

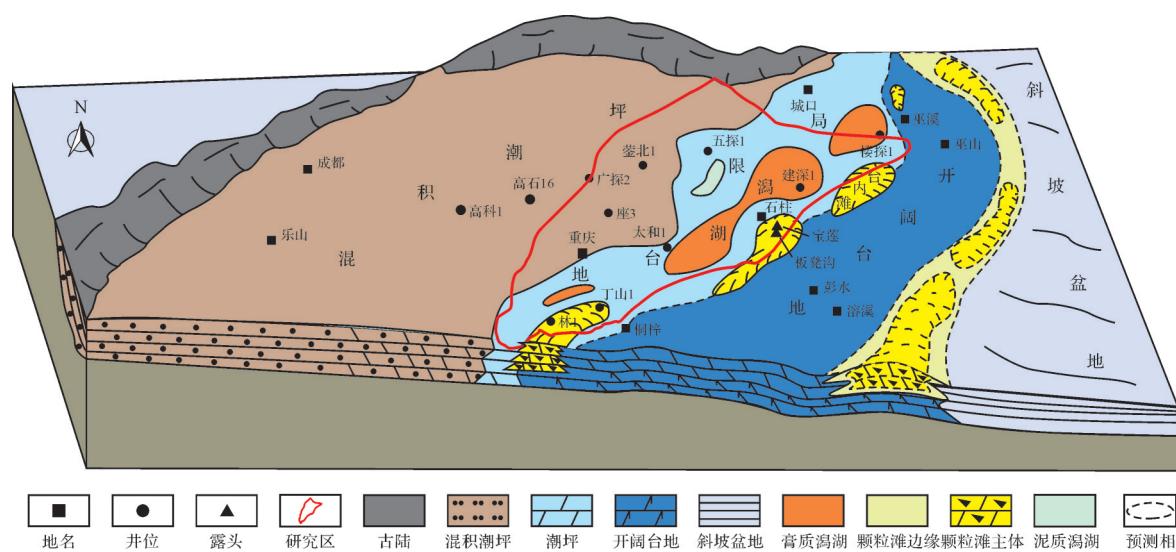


图8 川东地区中寒武统高台组沉积相模式

Fig.8 Sedimentary facies model of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin



图9 川东地区中寒武统高台组储层显微及岩心照片

(a)粉晶白云岩,溶蚀孔洞,五探1井,6 762 m(+);(b)深灰色粉晶云岩,少量开启状微裂缝,水平为主(少量高角度),发育水平状层理,广探2井,5 563 m;(c)浅灰色粉晶云岩,溶孔溶洞发育,溶洞部分充填,见大量黄铁矿晶体,部分溶洞中充填有石英晶体,五科1井,6 050 m

Fig.9 Reservoir microscope and core photograph of the middle Cambrian Gaotai Formation in eastern Sichuan

(a) silty dolomite, dissolution cavity, well Wutan 1, 6 762 m (+); (b) dark gray silty dolomite, few open microfractures, mainly horizontal (few high angle), horizontal bedding, well Guangtan 2, 5 563 m; (c) light gray silty dolomite, dissolved pores and caves developed, partially filled karst caves, found a large number of pyrite crystals, some of the caves filled with quartz crystals, well Wuoke 1, 6 050 m

表2 川东地区中寒武统高台组五探1井储集物性表

Table 2 Reservoir physical properties of well Wutan 1 of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin

井名	顶层/m	底层/m	储厚/m	孔隙度/%	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	厚度/m	孔隙度/%	厚度/m	孔隙度/%	厚度/m	孔隙度/%
五探1井	6 695.1	6 712.0	16.9	4.3	0.069	0.1	7.0	7.5	5.1	4.6	2.8
	6 727.5	6 732.6	5.1	6.3	1.300	2.1	8.0	2.0	6.0	1.0	3.3
	6 758.4	6 768.8	10.4	8.3	29.317	6.1	10.4	3.5	5.8	0.8	3.6
	平均值		10.8	6.3	10.228	2.7	6.1	4.3	5.6	2.1	3.2

表3 中国石油西南油气田公司重庆气矿现场使用碳酸盐岩储层评价标准

Table 3 Evaluation standard of carbonate reservoir used in Chongqing Gas Mine of the PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company

类别参数	I类储层	II类储层	III类储层	IV类储层
主要岩性	白云岩	白云岩	白云岩	白云岩
孔隙度/%	≥12	6~12	2.5~6.0	<2.5
渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	≥10	0.1~10	0.001~0.1	<0.001

序沉积时期的沉积相平面图综合研究,同时结合地震资料发现:平面上,高台组有利储层整体分布在研究区西部界线一带,地震剖面上表现为较强的振幅,横向连续性较差(图10a)。整体而言,高台组储层单层厚度普遍较薄,储层的形成受后期构造热液作用影响较大,具体表现为溶洞充填黄铁矿和石英(图9b,c)。

川东地区高台组储集层发育受潮坪亚相和后期构造热液改造的双重影响。因此,在综合考虑川东地区高台组岩相古地理特征、断层分布等因素的基础上,结合天然气成藏地质条件分析,预测了川东地区高台组有利勘探区带。研究发现,构造活动的区域易受后期构造热液改造的影响,高台组储集层比较发育区主要为川东地区的西部(图10b)。高台组储层形成由于受到构造热液改造影响,所以在构造发育位置储层的质量较好,发育Ⅱ类储层;越远离构造,受到后期构造热液改造的影响越小,发育Ⅲ类储层。

5 结论

(1) 将川东地区中寒武统高台组自下而上可划分为3个三级层序(SQ1~SQ3)、6个四级层序(SSQ1~SSQ6),四级层序对应高台组6个段(高一段一高六段),各段岩性、岩相和测井曲线特征存在差异。

(2) 川东地区中寒武统高台组主要为碳酸盐岩局限台地沉积环境,自西向东依次发育混积潮坪、潮坪、潟湖、台内滩4个沉积亚相。在SSQ1~SSQ6沉积时期,随着海平面的下降,混积潮坪的范围持续减小,膏质潮坪的范围持续增大,潟湖持续发育,台内滩多围绕在膏质潮坪分布。

(3) 高台组发育粉晶白云岩储集层,厚度较薄,储层非均质性较强,总体具有“中—低孔低渗”的特征,可划分为较好和中等两类储层。受后期构造活动和热液影响,研究区有利储层位于背斜展布区域,川东西部的潮坪亚相(云坪微相)为有利的勘探区带。

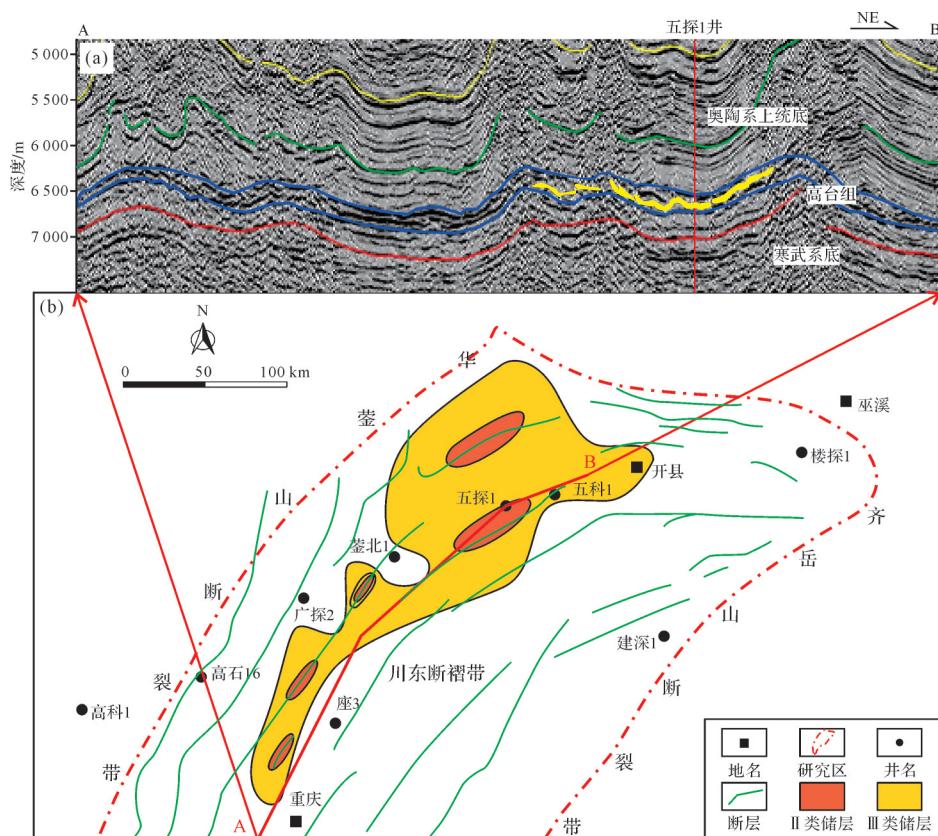


图10 川东地区中寒武统高台组地震剖面(a)及有利勘探区带预测(b)

Fig.10 (a) Seismic stratigraphic section and (b) prediction of favorable exploration zones of the middle Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin

致谢 感谢胡忠贵老师的 support 与指导, 感谢中国石油西南油气田公司重庆气矿李世临老师提供的帮助, 感谢胡九珍老师在薄片鉴定工作中的帮助。审稿专家和编辑在论文内容、结构和讨论部分提供的宝贵建议和意见, 使本文得以完善, 在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 268-277. [Du Jinhua, Zou Caineng, Xu Chunchun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 268-277.]
- [2] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278-293. [Zou Caineng, Du Jinhua, Xu Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278-293.]
- [3] 冯增昭. 从定量岩相古地理学谈华南地区海相地层油气勘探[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 1-11. [Feng Zengzhao. Discussion on petroleum exploration of marine strata in South China from quantitative lithofacies palaeogeography[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 1-11.]
- [4] 马永生, 陈洪德, 工国力, 等. 中国南方层序地层与古地理[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 50-100. [Ma Yongsheng, Chen Hongde, Gong Guoli, et al. Sequence stratigraphy and paleogeography in southern China[M]. Beijing: Science Press, 2009: 50-100.]
- [5] 谷志东, 殷积峰, 袁苗, 等. 四川盆地东部深层盐下震旦系—寒武系天然气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 137-149. [Gu Zhidong, Yin Jifeng, Yuan Miao, et al. Accumulation conditions and exploration directions of natural gas in deep subsalt Sinian-Cambrian System in the eastern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 137-149.]
- [6] 杨光, 朱华, 黄东, 等. 四川超级富气盆地特征及油气勘探潜力[J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(3): 1-7. [Yang Guang, Zhu Hua, Huang Dong, et al. Characteristics and exploration potential of the super gas-rich Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43(3): 1-7.]
- [7] 江青春, 李建忠, 汪泽成, 等. 四川盆地东部地区寒武系膏盐岩厚度定量预测及其油气地质意义[J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 34-46. [Jiang Qingchun, Li Jianzhong, Wang Zecheng, et al. Quantitative thickness prediction of Cambrian gypsum-salt rocks in eastern Sichuan Basin and its petroleum significance[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 34-46.]
- [8] 徐强, 姜烨, 董伟良, 等. 中国层序地层研究现状和发展方向[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 155-167. [Xu Qiang, Jiang Ye, Dong Weiliang, et al. Research status and development direction of sequence stratigraphy in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 155-167.]
- [9] 刘春慧, 金振奎, 张鑫, 等. 高分辨率层序地层学理论在准噶尔盆地勘探中的应用[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 249-256. [Liu Chunhui, Jin Zhenkui, Zhang Xin, et al. Application of the theory of high-resolution sequence stratigraphy to Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 249-256.]
- [10] 李绍虎, 李树鹏, 胡言烨, 等. 层序地层学: 问题与讨论[J]. 地球科学, 2017, 42(12): 2312-2326. [Li Shaohu, Li Shupeng, Hu Yanye, et al. Sequence stratigraphy: Problems and discussion [J]. Earth Science, 2017, 42(12): 2312-2326.]
- [11] 吴和源. 朝向层序地层学标准化: 层序地层学研究的一个重要科学命题[J]. 沉积学报, 2017, 35(3): 425-435. [Wu Heyuan. Towards the standardization of sequence stratigraphy: An important scientific proposition of sequence stratigraphy[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(3): 425-435.]
- [12] 梅冥相, 刘智荣, 孟晓庆, 等. 上扬子区中、上寒武统的层序地层划分和层序地层格架的建立[J]. 沉积学报, 2006, 24(5): 617-626. [Mei Mingxiang, Liu Zhirong, Meng Xiaoqing, et al. From sequence-stratigraphic division to the establishment of sequence-stratigraphic framework, the middle to upper Cambrian in the Upper-Yangtze region[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(5): 617-626.]
- [13] 袁立, 姚君波, 李国蓉, 等. 四川盆地中—上寒武统层序地层划分与沉积模式[J]. 海相油气地质, 2013, 18(3): 19-28. [Yuan Li, Yao Junbo, Li Guorong, et al. Division and sedimentary model of middle-upper Cambrian sequence strata in Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013, 18(3): 19-28.]
- [14] 徐安娜, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地寒武系碳酸盐岩—膏盐岩共生体系沉积模式及储层分布[J]. 天然气工业, 2016, 36(6): 11-20. [Xu Anna, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Sedimentary mode and reservoir distribution of the Cambrian carbonate & evaporite paragenesis system in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(6): 11-20.]
- [15] 胡忠贵, 王纪煊, 李世临, 等. 川东地区寒武系高台组白云岩—蒸发岩共生地层高频层序划分及地质意义[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(2): 113-124. [Hu Zhonggui, Wang Jixuan, Li Shilin, et al. High-frequency sequence division and geological significance of dolomite-evaporite paragenetic strata of Cambrian Gao tai Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(2): 113-124.]
- [16] 黄汲清. 中国主要地质构造单位[M]. 北京: 地质出版社, 1945: 1-162. [Huang Jiqing. Major geological structural units of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1945: 1-162.]
- [17] 刘鸿允. 中国古地理图[M]. 北京: 科学出版社, 1955: 1-50. [Liu Hongyun. Atlas palaeogeography of China[M]. Beijing: Sci-

- ence Press, 1955: 1-50.]
- [18] 卢衍豪,朱兆玲,钱义元. 中国寒武纪岩相古地理轮廓初探[J]. 地质学报,1965,45(4):349-357. [Lu Yanhao, Zhu Zhao-ling, Qian Yiyuan. Cambrian palaeogeography and litho-facies of China[J]. *Acta Geological Sinica*, 1965, 45(4): 349-357.]
- [19] 关士聪,演怀玉,陈显群,等. 中国海陆变迁海域沉积相与油气(晚元古代~三叠纪)[M]. 北京:科学出版社,1984:1-102. [Guan Shicong, Yan Huaiyu, Chen Xianqun, et al. Marine and continental changes, marine sedimentary facies and oil and gas in China[M]. Beijing: Science Press, 1984: 1-102.]
- [20] 田海芹. 中国南方寒武纪岩相古地理研究及编图[M]. 营口:石油大学出版社,1998:1-171. [Tian Haiqin. Study and mapping of Cambrian lithofacies and paleogeography in South China [M]. Dongying: Petroleum University Press, 1998: 1-171.]
- [21] 文华国,梁金同,周刚,等. 四川盆地及周缘寒武系洗象池组层序—岩相古地理演化与天然气有利勘探区带[J]. 岩性油气藏,2022, 34 (2) : 1-16. [Wen Huagu, Liang Jintong, Zhou Gang, et al. Sequence-based lithofacies paleogeography and favorable natural gas exploration areas of Cambrian Xixiangchi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(2): 1-16.]
- [22] 李双建,孙冬胜,郑孟林,等. 四川盆地寒武系盐相关构造及其控油气作用[J]. 石油与天然气地质,2014,35(5):622-631, 638. [Li Shuangjian, Sun Dongsheng, Zheng Menglin, et al. Salt-related structure and its control on hydrocarbon of the Cambrian in Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 622-631, 638.]
- [23] 胡忠贵,吴松,郭艳波,等. 川东地区下寒武统龙王庙组储层特征及主控因素研究[J]. 长江大学学报(自然科学版),2020, 17 (5) : 1-9. [Hu Zhonggui, Wu Song, Guo Yanbo, et al. The study on reservoir characteristics and main controlling factors of lower Cambrian Longwangmiao Formation in eastern Sichuan Basin[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2020, 17(5): 1-9.]
- [24] 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.]
- [25] 杨威,谢武仁,魏国齐,等. 四川盆地寒武—奥陶纪层序岩相古地理、有利储层分布与勘探区带[J]. 石油学报,2012,33 (增刊2):21-34. [Yang Wei, Xie Wuren, Wei Guoqi, et al. Sequence lithofacies paleogeography, favorable reservoir distribution and exploration zones of the Cambrian and Ordovician in Sichuan Basin, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(Suppl. 2): 21-34.]
- [26] 李伟,余华琪,邓鸿斌. 四川盆地中南部寒武系地层划分对比与沉积演化特征[J]. 石油勘探与开发,2012,39(6):681-690. [Li Wei, Yu Huaqi, Deng Hongbin. Stratigraphic division and correlation and sedimentary characteristics of the Cambrian in central-southern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 681-690.]
- [27] 梅庆华,何登发,文竹,等. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起地质结构及构造演化[J]. 石油学报,2014,35(1):11-25. [Mei Qinghua, He Dengfa, Wen Zhu, et al. Geologic structure and tectonic evolution of Leshan-Longnusi paleo-uplift in Sichuan Basin, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(1): 11-25.]
- [28] 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.]
- [29] 赵自强,丁启秀. 中南区区域地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1996:29-70. [Zhao Ziqiang, Ding Qixiu. Regional stratigraphy of central-south China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996: 29-70.]
- [30] 董卫平. 贵州省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997:48-142. [Dong Weiping. Stratigraphy (lithostratigraphic) of Gui-zhou province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 48-142.]
- [31] 张远志. 云南省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1996: 24-101. [Zhang Yuanzhi. Stratigraphy (lithostratigraphic) of Yunnan province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996: 24-101.]
- [32] 梅冥相,马永生,张海,等. 上扬子区寒武系的层序地层格架:寒武纪生物多样性事件形成背景的思考[J]. 地层学杂志,2007, 31 (1) : 68-78. [Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Zhang Hai, et al. Sequence-stratigraphic frameworks for the Cambrian of the Upper-Yangtze region: Ponder on the sequence stratigraphic background of the Cambrian biological diversity events[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(1): 68-78.]
- [33] 李伟,刘静江,邓胜徽,等. 四川盆地及邻区震旦纪末—寒武纪早期构造运动性质与作用[J]. 石油学报,2015,36(5):546-556, 563. [Li Wei, Liu Jingjiang, Deng Shenghui, et al. The nature and role of Late Sinian-early Cambrian tectonic movement in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(5): 546-556, 563.]
- [34] 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.]
- [35] 李英强,何登发,文竹. 四川盆地及邻区晚震旦世古地理与构造—沉积环境演化[J]. 古地理学报,2013,15(2):231-245. [Li Yingqiang, He Dengfa, Wen Zhu. Palaeogeography and tectonic-depositional environment evolution of the Late Sinian in Sichuan Basin and adjacent areas[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(2): 231-245.]

- [36] 李皎,何登发. 四川盆地及邻区寒武纪古地理与构造—沉积环境演化[J]. 古地理学报, 2014, 16(4): 441-460. [Li Jiao, He Dengfa. Palaeogeography and tectonic-depositional environment evolution of the Cambrian in Sichuan Basin and adjacent areas[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(4): 441-460.]
- [37] 冯增昭,彭勇民,金振奎,等. 中国南方寒武纪岩相古地理[J]. 古地理学报, 2001, 3(1) : 1-14. [Feng Zengzhao, Peng Yongmin, Jin Zhenkui, et al. Lithofacies palaeogeography of the Cambrian in South China[J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(1): 1-14.]
- [38] Wang J X, Hu Z G, Li S L, et al. Sedimentary characteristics and developmental models of the Cambrian dolostone-evaporite paragenesis system in the Sichuan Basin[J]. Geofluids, 2022, 2022: 5051804.

Sedimentary Facies and Favorable Areas Prediction of the Middle Cambrian Gaotai Formation in the Eastern Sichuan Basin

WANG JiXuan^{1,2}, HU ZhongGui^{1,2}, LI ShiLin³, HU JiuZhen^{1,2}, HUANG YuFei⁴, WANG WenJing¹, CAO PengYue¹

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Sedimentary Basin Research Center of Yangtze University, Wuhan 430100, China

3. Chongqing Gas Mine, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chongqing 402160, China

4. Dongxin Oil Production Plant, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257094, China

Abstract: [Objective] The Sichuan Basin has abundant oil and gas resources. The breakthrough of the Sinian Dengying and Cambrian Longwangmiao Formations reveals the huge exploration potential of deep oil and gas resources in the Sichuan Basin. However, the extent of research and exploration of the Cambrian Gaotai Formation in the eastern Sichuan Basin is typically low. Research between stratigraphy and sedimentary facies characteristics of the Gaotai Formation can provide a basis for the next step of oil and gas exploration and deployment. [Methods] The basic geological research on the sequence stratigraphy, sedimentary facies characteristics, and distribution of the Gaotai Formation can provide the basis for future oil and gas exploration and deployment. Based on drilling, logging, outcrop profile, core, and seismic data, a comprehensive study on the sequence lithofacies paleogeography of the Cambrian Gaotai Formation in eastern Sichuan has been conducted. [Results] The results show that Gaotai Formation can be divided into three third-order sequences (SQ1-SQ3) and six fourth-order sequences (SSQ1-SSQ6). During the sedimentary period of Gaotai Formation, the carbonate restricted platform sedimentary environment was developed. From west to east, four sedimentary subspecies developed successively: mixed tidal flat, tidal flat, lagoon and inner platform beach. The Gaotai Formation developed with a silty dolomite reservoir, which is characterized by thin thickness, strong heterogeneity, and "medium-low porosity and low permeability". [Conclusions] The favourable reservoirs in the study area are located in the dorsal spreading area influenced by tectonic activity and hydrothermal fluids. Tidal flat subspecies (dolomite tidal flat microfacies) is a favourable exploration zone in the western of eastern Sichuan Basin.

Key words: eastern Sichuan Basin; Cambrian Gaotai Formation; sequence stratigraphy; sedimentary characteristics; sedimentary evolution