

四川盆地中二叠统沉积相模式及有利储集体分布

黎荣^{1,2,3}, 胡明毅^{1,2,3}, 杨威⁴, 刘满仓⁴

(1. 长江大学 沉积盆地研究中心, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100;
3. 非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430100; 4. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:近年来四川盆地中二叠统栖霞组和茅口组勘探取得一些突破,显示该区中二叠统巨大的天然气勘探前景。前人对该区中二叠统沉积相和储层等做了大量研究,但对中二叠统栖霞组和茅口组沉积相类型和沉积相模式存在较大分歧,进而制约了有利储集体分布预测研究。文章结合近期一些新钻井和地震资料综合分析基础上,通过岩石学特征、沉积构造和生物化石等相标志分析,认为四川盆地中二叠统栖霞组和茅口组主要发育台地边缘相、开阔台地相和台洼相,其中中二叠统栖霞组早期以碳酸盐岩台地模式为主,栖霞组中晚期和茅口组演变为镶边台地和孤立台凹模式。该区主要发育有台缘滩和台内滩两类主要的储集体,且主要集中在层序高位体系域,台缘滩储集体主要分布在Sq1-HST期雅安-绵竹和剑阁-广元等区带,以及Sq2-HST时期雅安-绵竹-广元区带;台内滩储集体主要分布在Sq1-HST和Sq2-HST期川中高石梯-磨溪区块,以及Sq2-HST时期的威远-自贡区带,Sq2-HST时期高石梯-磨溪区块台内滩储集体受古岩溶和构造热液叠加影响呈条带状展布。四川盆地中二叠统台缘滩和台内滩分布范围较广,具有良好的勘探前景。

关键词:高位体系域;台缘滩;台内滩;沉积相模式;中二叠统;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sedimentary facies model and favorable reservoir distribution of the Middle Permian in Sichuan Basin

Li Rong^{1,2,3}, Hu Mingyi^{1,2,3}, Yang Wei⁴, Liu Mancang⁴

[1. Research Center of Sedimentary Basins, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technology (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430100, China; 3. Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China]

Abstract: Some breakthroughs have been made in the exploration of the Middle Permian Qixia and Maokou Formations in the Sichuan Basin in recent years, indicating great prospects for gas exploration in the Middle Permian of this area. Previous studies focused on sedimentary facies and reservoirs of the Middle Permian in this area, but there are many differences in terms of the types and model of sedimentary facies of the Middle Permian Qixia and Maokou Formations. This has restricted the prediction of favorable reservoir distribution. Therefore, we carried out facies marker analysis including petrologic feature, sedimentary structure and biological fossil, based on the comprehensive study of some latest drilling and seismic data. The results show that the major sedimentary facies of the Middle Permian Qixia and Maokou Formations include platform margin, open-platform and intra-platform sag, among which the carbonate platform is dominant in the lower Qixia Formation of the Middle Permian, while rimmed platform and isolated intra-platform sag dominate the middle and upper Qixia Formation as well as in the Maokou Formation. The reservoirs of the study area are mainly marginal-platform and intra-platform shoals, concentrating in highstand system tracts. The marginal-platform shoal reservoirs mainly occur in areas including Ya'an-Mianzhu and Jiange-Guangyuan during the Sq1-HST period, and Ya'an-Mianzhu-Guangyuan area during

收稿日期:2018-06-25; 修订日期:2018-11-29。

第一作者简介:黎荣(1989—),女,博士研究生,沉积学和层序地层学。E-mail:526357227@qq.com。

通讯作者简介:胡明毅(1965—),男,教授,博士生导师,沉积学和层序地层学。E-mail:humingyi65@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41772103);国家科技重大专项(2016ZX05007-002);湖北省创新群体基金项目(2015CFA024);湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目(D20171302)。

the Sq2-HST period; the intra-platform shoal reservoirs are mainly distributed in the Gaoshiti-Moxi block in the central Sichuan Basin during the Sq1-HST and Sq2-HST periods, and Weiyuan-Zigong area during the Sq2-HST period. The intra-platform shoal reservoirs in Gaoshiti-Moxi block during the Sq2-HST period are distributed in the form of strips due to the joint influences of paleokarst and tectonic hydrothermal fluids. The marginal-platform and intra-platform shoals are widely distributed in the Middle Permian of Sichuan Basin, and have bright prospects for hydrocarbon exploration.

Key words: highstand system tract, marginal-platform shoal, intra-platform shoal, sedimentary facies model, Middle Permian, Sichuan Basin

中二叠统栖霞组和茅口组是四川盆地重要的天然气产气层,经过60多年的勘探研究,迄今已发现多个气藏,奠定了西南地区天然气勘探建设的基础^[1-3]。近几年来随着勘探的不断深入,在川西北和川中地区中二叠统栖霞组和茅口组白云岩中获得高产气流,如双探1井、双探3井、磨溪108井、磨溪39井、磨溪42井和高石18井等,展示了中二叠统海相碳酸盐岩天然气的巨大勘探前景。前人对中二叠统沉积相和储层做过大量的研究工作,并取得了丰硕的成果^[1-17]。但是前人对四川盆地中二叠统栖霞组和茅口组的沉积相模式存在较大分歧,归纳起来有以下三种观点:①四川盆地中二叠统为缓坡沉积;②四川盆地中二叠统为台地沉积,有学者认为是开阔台地沉积,也有学者认为是镶边台地沉积;③四川盆地中二叠统为兼具台地边缘的缓坡型碳酸盐岩台地。此外,前人对中二叠统储集体纵向和平面分布规律的研究也过于宏观。为了解决上述问题,笔者根据露头、岩心和测录井资料综合分析以及岩石学特征、沉积构造和生物化石等相标志分析,系统地研究了四川盆地中二叠统的沉积相模式展布和演化规律,认为四川盆地中二叠统以碳酸盐岩镶边台地为主,但内部存在分异,局部发育浅水开阔台地、较深水开阔台地以及台洼沉积。在沉积相模式演化的基础上,预测了中二叠统天然气勘探有利储集体的分布,为四川盆地中二叠统下一步天然气的勘探指明方向。

1 区域地质概况

四川盆地位于四川省龙门山断裂以东及重庆市境内,四周由高山围绕,北为米仓山、大巴山,南为大凉山、娄山,西为龙门山、邛崃山,东以齐岳山为界^[15]。二叠系沉积前,四川盆地晚加里东期的构造主要以纵向隆升为主,形成了大隆大坳的格局,依次为川西南古隆起、川北-蜀南低隆起和川东低洼,沉积总体表现为西南高北东低的特点。海西早期即东吴运动早期,四川盆地大规模抬升古隆起遭“削平”,形成“准平原化”。在此基础上广泛的海侵沉积了梁山组、栖霞组

和茅口组,分别超覆在石炭系、泥盆系、志留系、奥陶系、寒武系或者更老的地层之上,寒武系残余地层主要分布于川西北,石炭系残余地层主要分布于四川盆地东部(图1a)。东吴运动中期即峨眉地幔柱活动时期,“准平原化”的构造格局受到影响,发生了差异隆升,导致二叠系沉积具有“高能浅水”和“低能深水”的沉积分区^[17-21](图1b)。东吴构造运动晚期即海西晚期,基底整体抬升,茅口组遭受不同程度剥蚀,之后沉积了上二叠统吴家坪组煤系地层^[3,15]。

中二叠统自下而上为梁山组、栖霞组和茅口组。四川盆地中二叠统总体为一套碳酸盐岩夹少量硅质岩和泥页岩的海相沉积。自下而上,其中梁山组沉积厚度较薄,为一套煤系地层;栖霞组分为栖霞一段和栖霞二段;茅口组可分为茅一段、茅二段、茅三段和茅四段^[21]。中二叠统底部梁山组煤系地层与下伏界面(东吴运动早期抬升剥蚀程度不同,接触界面不同)呈不整合接触,为I型层序界面;栖霞组与梁山组之间为连续沉积;栖霞组和茅口组之间为岩性岩相转化界面,属II型层序界面,茅三段和茅四段之间也是岩性-岩相转换界面,属II型层序界面。茅口组与上覆地层吴家坪组呈不整合接触,为I型层序界面。综合层序界面识别标志,以及典型地震反射剖面与测井曲线的识别标志,将研究区中二叠统梁山组和栖霞组划分为一个完整的三级层序Sq1;茅口组分为两个完整的三级层序,其中茅一段、茅二段和茅三段为一个完整的三级层序Sq2,茅四段为一个完整的三级层序Sq3(图1c)。由于东吴运动抬升剥蚀,研究区大部分遭受剥蚀,中二叠世梁山期开始海侵接受沉积,因此梁山组构成Sq1低位体系域(LST),栖霞初期相对海平面进一步上升,发育海侵体系域沉积(TST),栖霞中晚期相对海平面下降,发育高位体系域沉积(HST)。四川盆地茅口组整体处于碳酸盐岩台地内部,同时海平面下降幅度较小,因此在茅口组不发育低位体系域(LST),Sq2, Sq3主要由海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)组成。据此建立了四川盆地中二叠统三级层序地层格架(图1c)。Sq1时期,川西海侵域薄高位域厚,川中和川东北海侵域厚

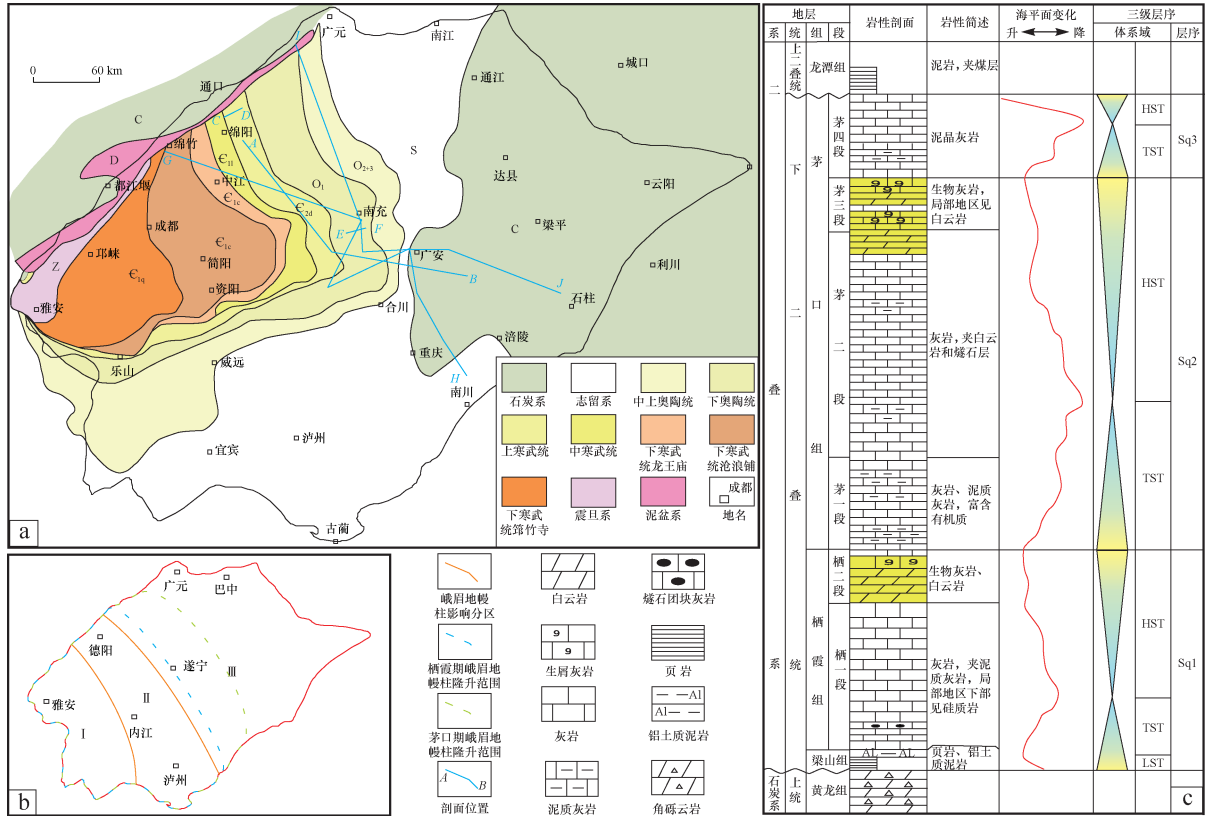


图1 四川盆地中二叠统地质概况

Fig. 1 Geological overview of the Middle Permian in Sichuan Basin

a. 四川盆地二叠系沉积前古地貌; b. 四川盆地中二叠世峨眉山幔柱影响下古地貌(据文献[17], 修改); c. 四川盆地中二叠统综合柱状图

高位域薄; Sq2 时期, 川西海侵域薄高位域厚, 川中和川东北海侵域厚高位域薄; Sq3 时期, 由于地层整体抬升, Sq3 局部发育。

2 沉积相展布及演化

2.1 沉积相类型及其特征

本文以露头剖面和岩心精细观察为基础, 通过岩石学特征、沉积构造和生物化石等相标志分析, 认为四川盆地中二叠统总体为镶边碳酸盐岩台地沉积体系, 但其内部存在分异, 根据其水动力条件及沉积特征, 可分为 3 个相带。

2.1.1 台地边缘相

台地边缘相主要发育在川西北地区的栖二段、茅二 a 亚段和茅三段, 也就是 Sq1 和 Sq2 的高位域。该相带是被波浪和潮汐作用强烈改造的高能地带。由于水体能量大, 海水通畅, 有充足的阳光和养分, 大量生物生长繁盛, 可见绿藻、棘皮、有孔虫与介壳等生屑, 沉积物主要由颗粒灰岩与具残余颗粒结构晶粒白云岩等组成。台地边缘相可分为台缘滩和滩间海亚相。台缘

滩亚相位于浪基面之上的浅水高能地带, 以亮晶生屑/砂屑灰岩和晶粒白云岩为主(图 2a, b, f, k, l)。主要分布于栖霞组和茅口组的高位域; 台缘滩亚相在测井曲线上表现为 GR 为中低值齿化漏斗形特征, 电阻率中高值(图 3)。而滩间海亚相以泥晶灰岩为主, 含少量生屑灰岩, 岩性颜色总体较深(图 2d); 滩间海亚相在测井曲线上表现为 GR 为中高值指状特征(图 3)。在地震剖面上台地边缘相带呈弱振幅、断续、杂乱反射和地层加厚特征(图 4)。

2.1.2 开阔台地相

开阔台地相主要发育在四川盆地龙门山以东的大部分区域。该相带位于台地边缘滩相带之后, 水体较浅, 由于它与广海连通性较好, 海水循环畅通, 所以其盐度正常, 生物繁盛, 研究区可见较浅水的富生屑开阔台地和较深水的富泥开阔台地。该相带可分为台内滩亚相和滩间海亚相。台内滩亚相与广海连通性好, 盐度正常, 也适合于多种生物的生长, 该亚相主要由浅灰色中厚层状生屑/砂屑灰岩和颗粒白云岩组成(图 2e), 主要见于栖二段和茅三段, 集中在 Sq1 和 Sq2 高位域中上部; 台内滩亚相在测井曲线上表现

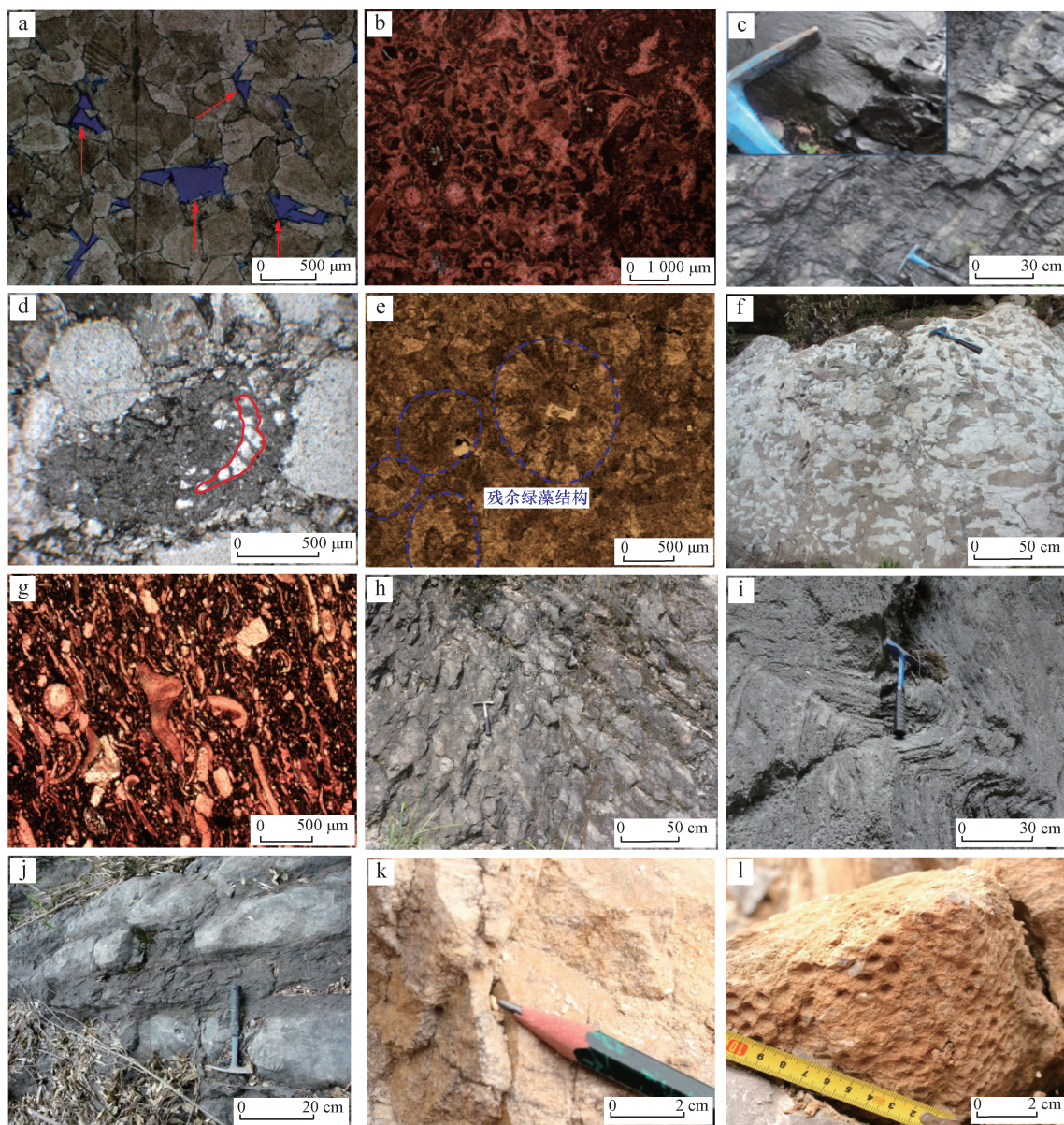


图2 四川盆地中二叠统典型沉积相

Fig. 2 Typical sedimentary facies of the Middle Permian in Sichuan Basin

a. 灰色中-细晶白云岩,晶间溶孔,双探3井,栖霞组,埋深7 457.5 m,铸体薄片(-),台地边缘台缘滩;b. 亮晶砂屑生屑灰岩,双探3井,栖霞组,埋深7 448.9 m,(-),球粒和绿藻发育,台地边缘台缘滩;c. 硅质岩与灰岩互层,华蓥山阎王沟剖面,栖霞一段;d. 泥晶含泥生物屑灰岩,有孔虫,河12井,茅二b亚段,埋深3 500 m,染色普通薄片(-),台地边缘滩间海;e. 颗粒白云岩,磨溪42井,栖霞组,埋深4 651.8 m,(-),开阔台地台内滩;f. 豹斑状灰岩,川西北金针村剖面,栖霞二段;g. 泥晶生屑灰岩,双壳,腕足,磨溪108井,栖霞组,埋深4 677.3 m,(-),开阔台地潮下;h. 眼球眼皮状灰岩,彭水万足剖面,台洼;i. 玄武岩,流纹状构造,枕状构造,卧龙耿达剖面;j. 眼球眼皮状灰岩,广元关口剖面,茅一段;k. 砂屑灰岩,都江堰高桥剖面,茅二段上部;l. 珊瑚,川西龙门山永庆剖面,茅二段上部

为GR为中低值指状特征(图3)。滩间海亚相是开阔台地相环境中相对深水的低能区域,面积较大。沉积物泥质含量较高,以灰色-深灰色薄-中层状泥晶灰岩为主,发育少量的泥质泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩和含泥泥晶灰岩等(图2g),在茅一段到茅三段均较为发育,其中以层序海侵体系域分布广泛;滩间海亚相在测井曲线上表现为GR为中高值指状特征(图3)。在地震剖面上开阔台地相带呈低连续中-弱振幅反射特征(图4)。

2.1.3 台洼相

该相带水体较深,相对较安静,不受潮汐和波浪的影响,岩性颜色较深,主要由灰黑或深灰黑色泥页岩、硅质岩\硅质结核灰岩以及眼球眼皮状灰岩组成(图2c,h,j),在研究区局部区域可见。台洼相在测井曲线上表现为GR总体为高值宽幅齿化箱型特征,电阻率低值(图3)。在地震剖面上台洼相带呈连续强振

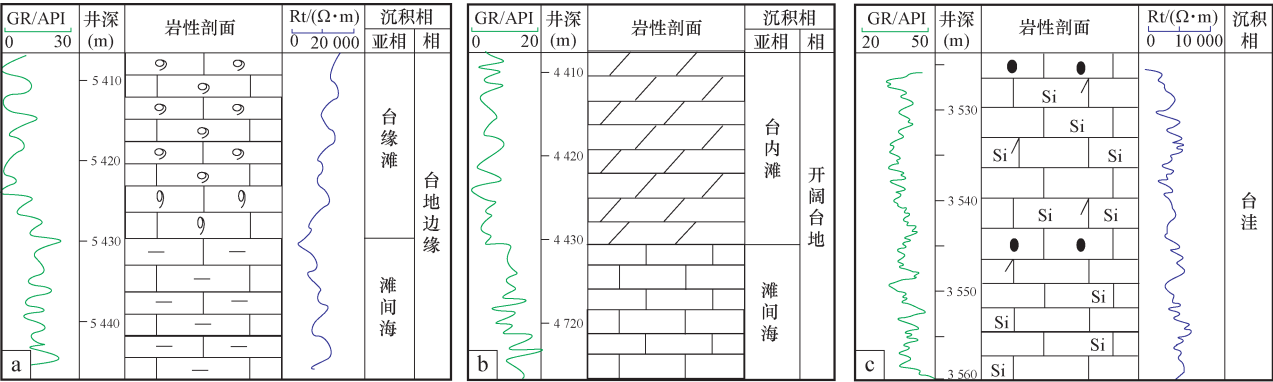


图3 四川盆地中二叠统不同沉积相测井识别标志

Fig.3 Logging identification markers of different sedimentary facies of the Middle Permian in Sichuan Basin

a. 双探2井;b. 磨溪39井;c. 大天1井

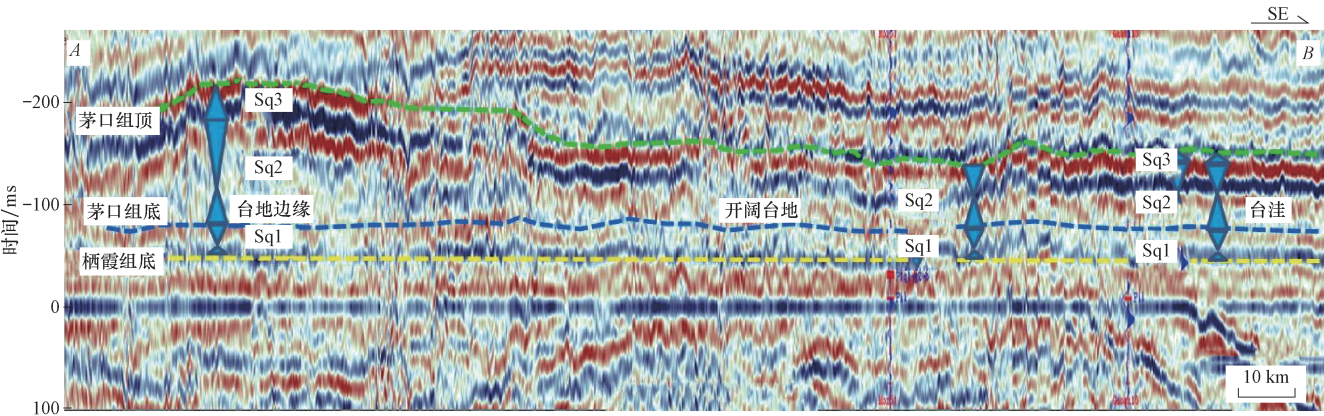


图4 四川盆地中二叠统栖霞组和茅口组层序单元划分及相带变化特征(剖面位置见图1)

Fig.4 Division of sequential units and features of facies zone variation of the Middle Permian Qixia and Maokou Formations, Sichuan Basin(see Fig.1 for the profile location)

幅反射特征(图4)。

2.2 沉积相展布及演化

在综合利用露头、岩心和测录井资料综合分析以及岩石学特征、沉积构造和生物化石等相标志,以体系域为单元分别开展栖霞组和茅口组沉积相展布和演化研究。

2.2.1 Sq1-TST 时期沉积相特征

该时期海侵域由川东北向川西南超覆,主要发育开阔台地相,川东低洼地区沉积较厚的硅质灰岩(图2c),为较深水开阔台地,川西南受峨眉地幔柱活动影响,相对抬升,水体相对较浅,为浅水开阔台地,台内滩不发育(图5)。在图5a,从绵竹—广安—重庆剖面可见西南高,东北低的特点,分界明显(图5a)。该时期底界面沉积一套相对颜色较深的泥页岩或燧石结核灰岩。

2.2.2 Sq1-HST 时期沉积相特征

经过海侵域填平补齐,在高位域时期,受西高东

低北洼的古地理背景和水动力条件影响,演化为镶边碳酸盐岩台地,自西向东依次发育台地边缘、开阔台地和深水台洼3个相带。在图5a,从绵竹—广安—重庆剖面可见西南高,东北低的特点,台地边缘主要发育于川西北地区,面向广海,水动力强,营养丰富,有利于滩体的快速生长;台缘滩较发育,地震剖面上台缘滩为中低振幅、断续、杂乱反射特征(图6),主要集中在HST的中上部(图5a),岩性主要为颗粒滩、砂糖状白云岩和豹斑状白云岩(图2f);双探1井—矿山梁—矿2井—三堆镇—西北乡剖面可见白云岩累计厚度为24~76m(图7)。川中、蜀南和川东发育大面积的开阔台地,台内滩较为发育,地震剖面上可见台内滩为丘状连续强波谷响应特征(图6),主要集中在HST的中上部(图5a),厚度较大,白云石化明显,尤其集中在川中地区,如磨溪42井与广参2井(图7)。川东局部地区如云阳—万县—石柱等地仍然为低洼的台洼沉积,以眼球眼皮状灰岩沉积为主(图2h)。

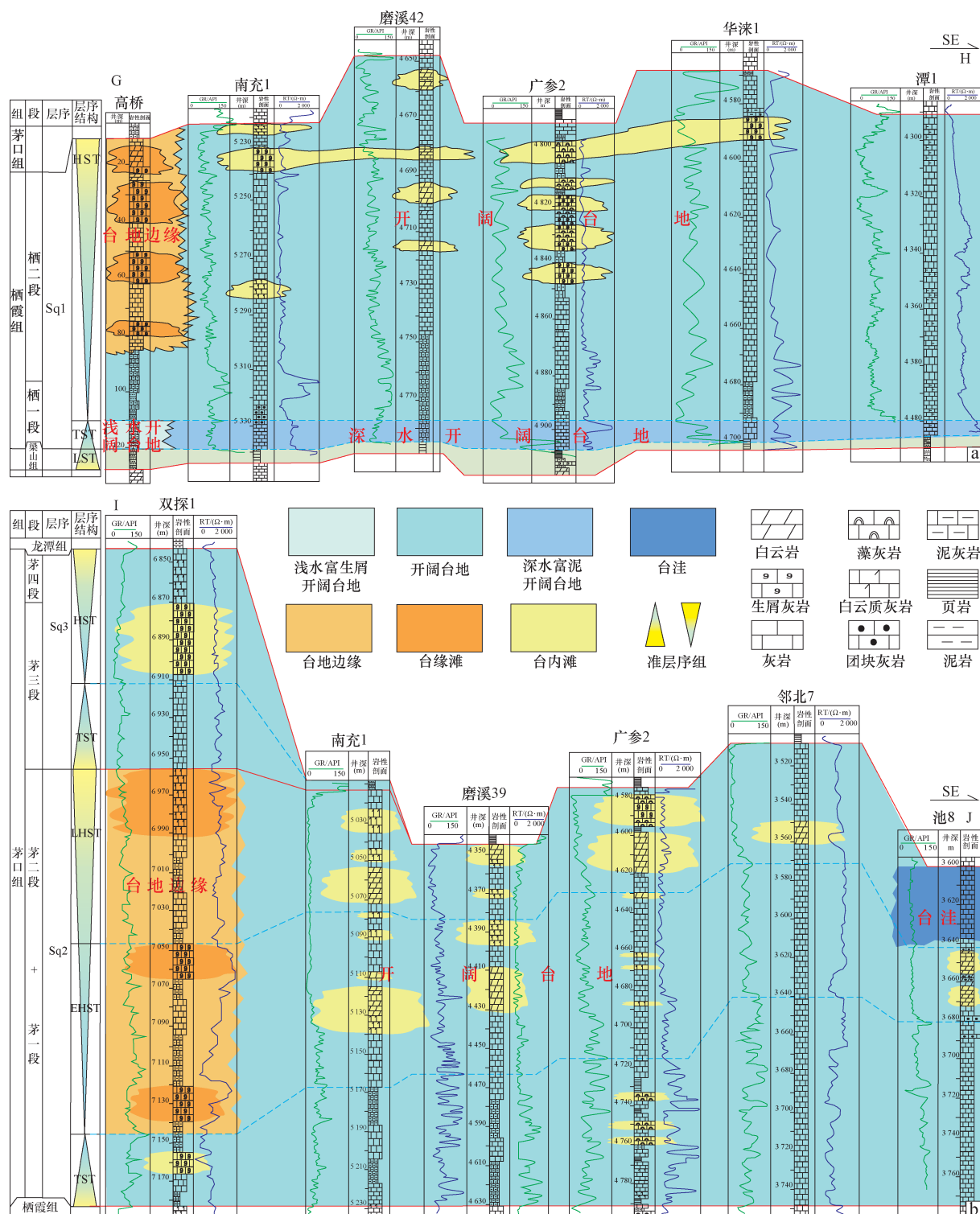


图5 四川盆地中二叠统连井沉积相带展布及演化(剖面位置见图1)

Fig. 5 Distribution and evolution of the well-tied sedimentary facies zone in the Middle Permian of Sichuan Basin

(see Fig. 1 for the profile location)

a. 梁山组和栖霞组; b. 茅口组

2.2.3 Sq2-TST时期沉积相特征

四川盆地中二叠统茅口组早期时期,相对海平面上升,海侵方向主要来自东南方向,此时由于受到大规

模的海侵,沉积水体相对较深,为开阔台地沉积和局部深水孤立台地沉积。但由于峨眉地幔柱活动影响范围向东扩大(图2i),区域上大部分地区为开阔台地沉积,在图5b,剑阁—南充—丰都连井剖面中可见此

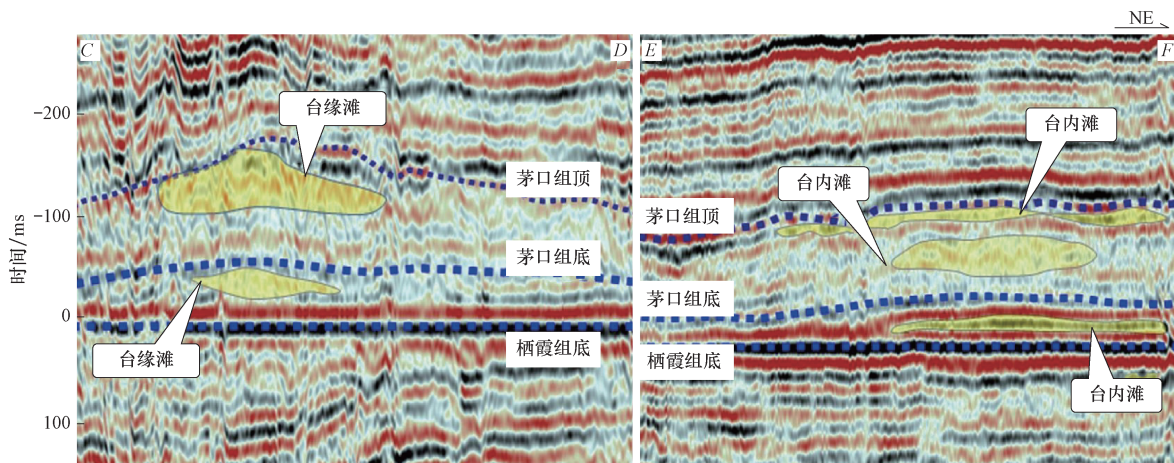


图6 四川盆地中二叠统典型地震相及分布特征(剖面位置见图1)

Fig. 6 Typical seismic facies of the Middle Permian in Sichuan Basin and its distribution characteristics
(see Fig. 1 for the profile location)

时开阔台地范围较大,台内滩局部发育,且厚度较薄(图5b,图7)。茅一段或茅二段底部可见少量眼球眼皮状灰岩(图2j),广元关口露头剖面茅一段都可见。

2.2.4 Sq2 - HST 时期沉积相特征

该时期是茅口组水体最浅时期,该时期由于相对海平面下降,川西地区以碳酸盐岩台地边缘滩相沉积为主,自西向东一次发育台地边缘、开阔台地和深水台洼3个相带。从剑阁—南充—丰都连井大剖面中可见(图5b),由西南向北东,水体逐渐加深,依次发育台地边缘、开阔台地和深水台洼。平面上台地边缘主要发育于川西北地区,在川西龙门山中段川北永庆剖面已发现大量茅口组生物礁滩(图2k,l)。台缘滩较发育,地震剖面上台缘滩为中—低振幅、断续、杂乱反射特征,发育颗粒滩、晶粒白云岩,白云岩累计厚度为20~70 m,纵向上主要集中在HST的中上部,(图5b,图6,图7)。川中、蜀南和川东发育大面积的开阔台地,台内滩较为发育,白云石化强烈,地震剖面上台内滩滩顶白云岩为中—弱波谷响应特征,中部滩体表现为断续杂乱反射特征,主要集中在川中和蜀南地区HST的中上部,厚度较大,如磨溪42井、南充1井、磨溪39井、广参2井,(图5b,图6,图7)。而在茅口组沉积时期,受东吴运动早期构造拉张,北西向和北东向基底断裂活动,发育系列北西—南东向台内裂陷^[18-19],开阔台地台内滩滩体发育主要沿断裂带走向,为北西南东向,而台缘滩滩体主要受局部古隆起和台缘带沉积控制,沿台地边缘生长,所以呈现出台内滩滩体与台缘滩滩体平面上走向垂直的现象。

2.2.5 Sq3 - TST 时期沉积相特征

该时期沉积相对海平面上升,水体加深,发育一套开阔台地沉积,东南缘局部地区水体较深,为深水台洼沉积。由于受东吴运动的抬升剥蚀影响,与安县—涪陵地震大剖面以及剑阁—南充—丰都连井剖面中可见,川东北部分地区以及川中大部分区域该时期地层被剥蚀,高石梯—磨溪区块该体系域缺失严重(图4,图5b,图7)。

2.2.6 Sq3 - HST 时期沉积相特征

该时期继承了Sq3海侵时期的沉积模式,川西北地区地区和川东南地区以开阔台地沉积为主。但是受东吴运动的抬升剥蚀影响,剥蚀范围扩大,覆盖了川东大部分地区以及川中、蜀南、川西北部分地区,关基井、南充1井与阳深2井缺失该体系域(图4,图5b,图7)。

3 沉积相模式演化

二叠系沉积前,四川盆地在受到加里东运动的影响,川西南地区整体抬升,呈现出大隆大拗的构造格局,川西—川中古隆起、川北—蜀南低隆起与川东低洼。海西早期,四川盆地区域大规模抬升的古隆起遭到削平,形成准平原化的格局。之后,峨眉地幔柱活动使之前准平原化的格局受到影响,发生了差异隆升,大邑—宜宾以西地区为地幔柱穹隆状隆起的顶部为Ⅰ区,隆升地貌最高,遂宁—内江地区隆升高度其次为Ⅱ区,川东北地区影响较小为Ⅲ区(图1b)。四川盆地二叠纪发生了大规模的海侵,沉积了栖霞组,栖霞组受峨眉地幔柱影响较大。栖霞组早期以碳酸盐岩台

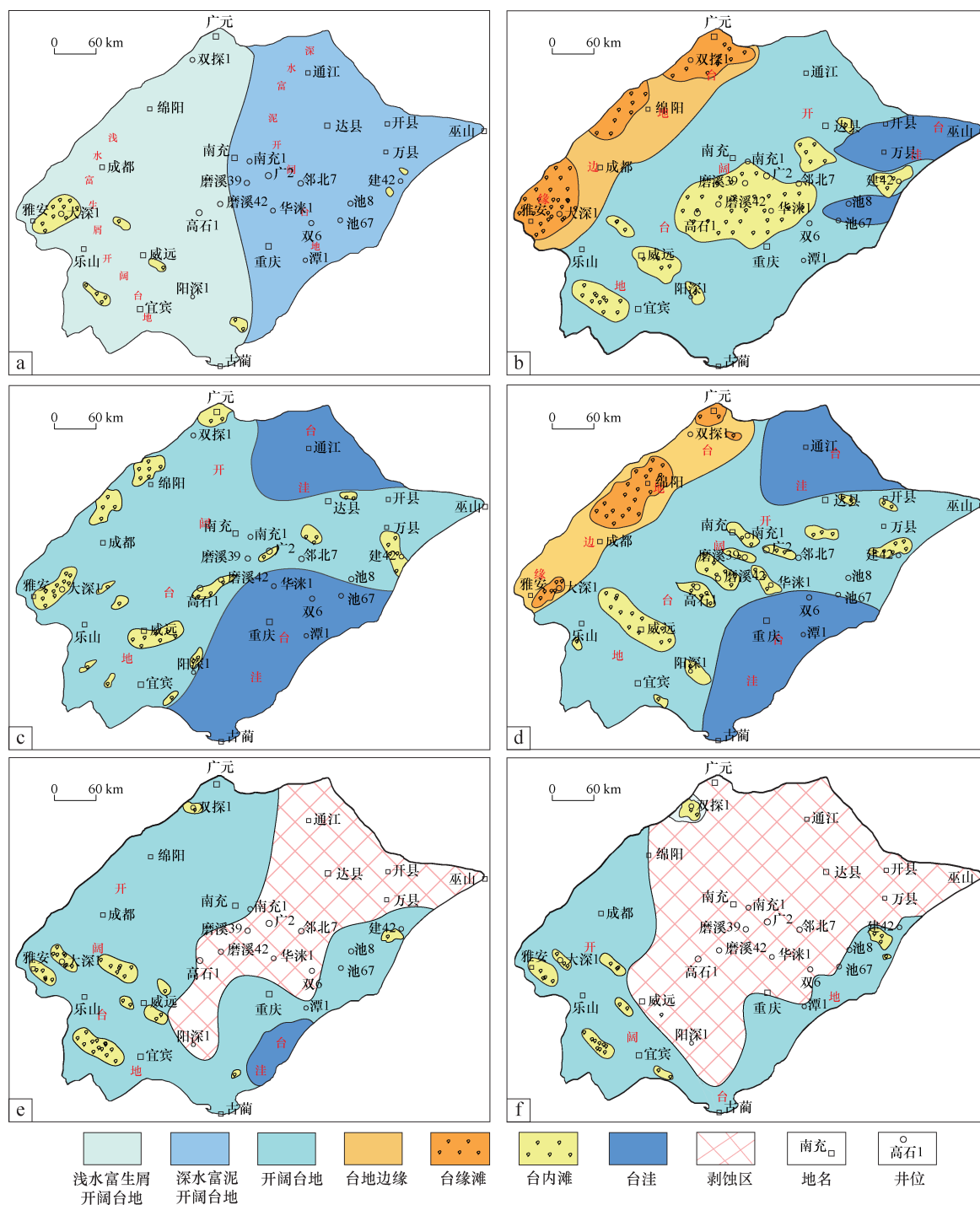


图7 四川盆地中二叠统层序格架内沉积相平面展布

Fig. 7 Plane view of sedimentary facies within the sequence framework of the Middle Permian in Sichuan Basin

a. 栖霞组 Sq1 - TST 沉积相; b. 栖霞组 Sq1 - HST 沉积相; c. 茅口组 Sq2 - TST 沉积相;
d. 茅口组 Sq2 - HST 沉积相; e. 茅口组 Sq3 - TST 沉积相; f. 茅口组 Sq3 - HST 沉积相

地模式为主,由于海水由东南方向入侵,再结合峨眉山幔柱影响下整体西高东低的古地理背景,川东主要沉积深水富泥的开阔台地,以晶泥灰岩和泥质灰岩为主;川西南地区沉积浅水富生屑开阔台地,雅安和自贡等地发育一定厚度的台内滩。而在栖霞组中晚期,由于继承早期西南高,北东低的沉积特点,海平面下降,海

水逐渐向东退去,水体开始变浅,碳酸盐岩生长加速,礁滩生长环境适宜,且逐渐向深水方向延伸,川西北和川中地区逐渐演变为镶边台地模式。广元—雅安一带发育台地边缘沉积,绵阳—绵竹和雅安等地台缘滩较发育,川中大部分地区发育开阔台地,特别是磨溪和高石梯区块发育较厚的台内滩沉积(图6),而水体相对

较深的东部演变为孤立台凹模式(图8)。

中二叠世茅口组早期,随着构造拉张运动的加强,整个华南遭受了最大的海侵事件,海侵继承了栖霞组原貌。此时由于受到大规模的海侵,除周边的古陆之外,整个台地几乎全部被海水掩盖,沉积水体相对较深^[12]。海侵方向主要来自东南方向,即由黔北和鄂西向西北方向侵入,其次由秦岭地槽经川北侵入,再次则由西向东通过龙门山古岛链侵入^[3]。受此影响,四川盆地茅口组早期以碳酸盐岩台地模式为主,受峨眉地幔柱隆升影响范围加大(图1b),开阔台地范围增大,以亮晶生屑灰岩和泥晶生屑灰岩为主,台内滩主要分布在广元、绵阳、雅安、自贡与广安等地。而东南缘和东北缘局部地区发育深水台洼沉积,茅口组中期,海平面开始下降,海水向东南方向退去,碳酸盐岩生长环境得以改善,礁滩生长速度较快,台地边缘礁滩相带开始初见规模,并逐渐向水体较深处迁移。川西北和川中地区演变为镶边台地模式,在广元—雅安一带发育台地边缘沉积,以厚层的生屑灰岩为主。川中大部分地区发育开阔台地,台内滩范围广,厚度大(图6)。而川东缘和南缘局部地区演变为孤立台凹模式,茅口组晚期受东吴运动晚期的影响,地层整体抬升剥蚀,北东—南西方向均受到不同程度的剥蚀,未剥蚀区以碳酸盐岩台地模式为主(图8)。

4 有利储集体分布预测

研究区栖霞组和茅口组岩石类型较多,根据各岩石类型物性资料统计分析,晶粒白云岩的孔隙度最高,可高达1.96%;颗粒白云岩次之,为1.36%;豹斑状白云岩为1.12%,亮晶颗粒灰岩最差,为0.94%。对应研究区各沉积亚相主要岩石类型,以晶粒白云岩、豹斑状白云岩和亮晶颗粒灰岩为主的台缘滩具有较好的储集性能;以颗粒白云岩、晶粒白云岩和亮晶颗粒灰岩为主的台内滩储集性能也较好。因此,有利的储集体主要集中在台缘滩和台内滩。

对比层序格架下沉积相的分布特征,总结出,Sq1—TST时期,以浅水开阔台地和较深水开阔台地相的低能泥质灰岩、泥晶灰岩和硅质结核为主,岩性较为致密,台内滩不发育。Sq1—HST时期,水体相对较浅,川西北发育台地边缘的台缘滩亚相;该时期颗粒滩大量白云石化,残余颗粒结构晶粒白云岩、晶粒白云岩和颗粒滩都较发育,尤以雅安—绵竹和剑阁—广元等区带台缘滩最为发育,为较有利的储集体分布区带;研究区其他区域主要以开阔台地沉积为主,台内滩较发育,特别是川中地区,颗粒滩大量白云石化,形成颗粒白云岩,大量增加了颗粒滩的孔隙度,尤以高石梯—磨溪区

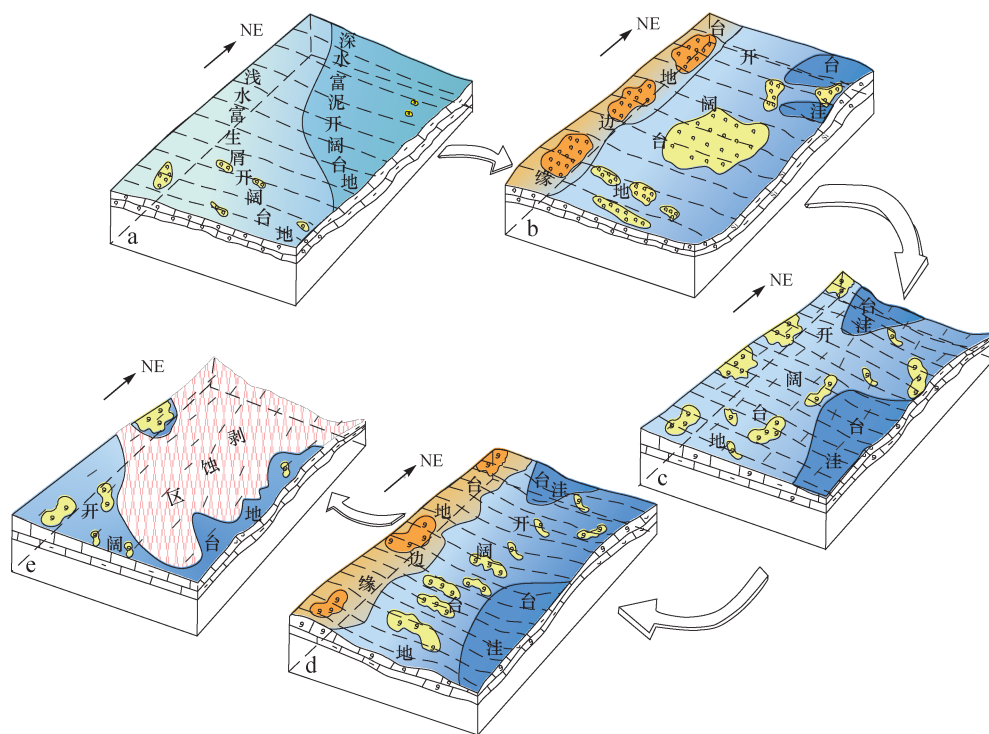


图8 四川盆地中二叠统沉积演化模式

Fig. 8 A model showing the Middle Permian sedimentary evolution in Sichuan Basin

- a. 栖霞早期碳酸盐台地模式;b. 栖霞晚期镶边碳酸盐岩台地+孤立台凹模式;c. 茅口早期碳酸盐岩台地+孤立台凹模式;
d. 茅口中期镶边碳酸盐岩台地+孤立台凹模式;e. 茅口晚期碳酸盐岩台地模式

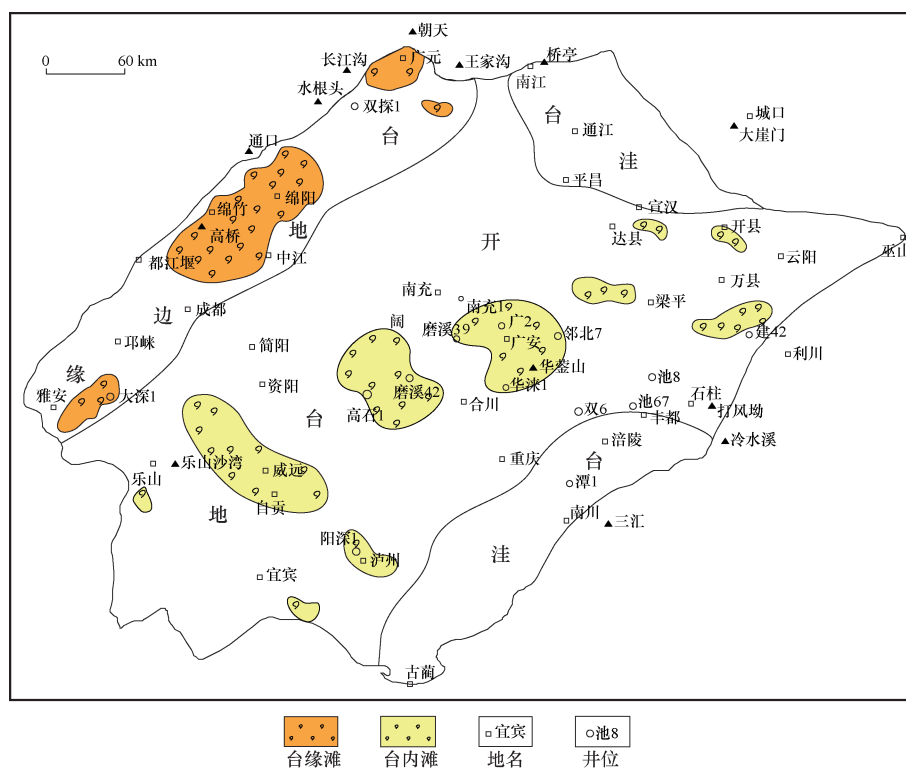


图9 四川盆地中二叠统有利储集体分布

Fig. 9 Distribution of favorable reservoirs in the Middle Permian of Sichuan Basin

域发育较大范围的台内滩,说明高石梯—磨溪区块为有利储集体分布区域。Sq2 - TST 时期,水体总体较深,以浅水开阔台地和深水开阔台地潮下亚相的低能的眼球眼皮状灰岩、泥质灰岩和泥晶灰岩为主,岩性较为致密;台内滩零星分布,厚度较薄,有利储集体分布不均,范围较小。Sq2 - HST 时期,川西北尤其是雅安—绵竹—广元区带发育台地边缘的台缘滩亚相,该时期颗粒滩大量白云岩化,是该时期有利的储集体分布区带;研究区其他区域主要以开阔台地沉积为主,台内滩较发育,特别是川中地区,白云石化作用强烈,再加之岩溶作用和构造热液的叠加影响,在高石梯—磨溪区块台内滩呈条带状展布;而在威远—自贡区带也发育台内滩储集体,这两区块都为该时期有利储集体分布区带。Sq3 - TST 时期,水体总体较深,以浅水开阔台地和深水开阔台地潮下亚相的低能的泥质灰岩和泥晶灰岩为主,岩性较为致密,台内滩储集体不发育。Sq3 - HST 时期,地层大量被剥蚀,残余地层较少,颗粒滩和白云岩不发育,台内滩储集体不发育。研究区主要有利台缘滩和台内滩相储集体分布如图9所示。

5 结论

1) 四川盆地中二叠统主体以镶边碳酸盐岩台地为主,但内部存在分异。其中栖霞组以早期的碳酸盐

岩台地模式为主,中晚期演变为镶边台地和孤立台凹模式;茅口组以早期的碳酸盐岩台地模式为主,在中期演变为镶边台地和孤立台凹模式,晚期地层剥蚀严重,局部未剥蚀区以碳酸盐岩台地模式为主。

2) 研究区主要发育台缘滩和台内滩两类主要储集体,且主要集中在层序高位域的中上部。其中 Sq1 - HST 期以雅安—绵竹和剑阁—广元等区带台缘滩储集体较发育,川中高石梯—磨溪区块为台内滩储集体发育区域;Sq2 - HST 时期,雅安—绵竹—广元区带发育台缘滩储集体,川中地区台内滩储集体发育,受古岩溶和构造热液叠加影响,高石梯—磨溪区块台内滩储集体呈条带状展布。

参考文献

- [1] 周进高,姚根顺,杨光,等. 四川盆地栖霞组—茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带[J]. 天然气工业,2016,36(4):8-16.
Zhou Jingao, Yao Genshun, Yang Guang, et al. Lithofacies paleogeography and favorable gas exploration zones of Qixia and Makou Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(4): 8-16.
- [2] 江青春,胡素云,汪泽成,等. 四川盆地中二叠统中—粗晶白云岩成因[J]. 石油与天然气地质,2014,35(4):503-510.
Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Genesis of medium-macro-crystalline dolomite in the middle Permian of Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 503-510.
- [3] 胡明毅,胡忠贵,魏国齐,等. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测[J]. 石油勘探与开发,2012,39(1):45-55.

- Hu Mingyi, Hu Zhonggui, Wei Guoqi, et al. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 45–55.
- [4] 陈洪德, 田景春, 刘文均, 等. 中国南方海相震旦系—中三叠统层序划分与对比[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(3): 355–379.
- Chen Hongde, Tian Jingchun, Liu Wenjun, et al. Division and correlation of the sequences of marine Sinian system to Middle Triassic Series in the south of China[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002, 29(3): 355–379.
- [5] 赵宗举, 周慧, 陈轩, 等. 四川盆地及邻区二叠纪层序岩相古地理及有利勘探区带[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 35–51.
- Zhao Zongju, Zhou Hui, Chen Xuan, et al. Sequence lithofacies paleogeography and favorable exploration zones of the Permian in Sichuan Basin and adjacent areas, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S2): 35–51.
- [6] 冯增昭, 何幼斌, 吴胜和. 中下扬子地区二叠纪岩相古地理[J]. 沉积学报, 1993, 11(3): 13–24.
- Feng Zengzhao, He Youbin, Wu Shenghe. Lithofacies paleogeography of Permian middle and lower Yangtze Region[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1993, 11(3): 13–24.
- [7] 冯增昭, 杨玉卿. 中国南方一叠纪岩相古地理[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 1–11.
- Feng Zengzhao, Yang Yuqing. Lithofacies paleogeography of the Permian of South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(2): 1–11.
- [8] 黄先平, 杨天泉, 张红梅. 四川盆地地下二叠统沉积相及其勘探潜力区研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(1): 10–12.
- Huang Xianping, Yang Tianquan, Zhang Hongmei. Research on the sedimentary facies and exploration potential areas of Lower Permian in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(1): 10–12.
- [9] 宋章强, 王兴志, 曾德铭. 川西北二叠纪栖霞期沉积相及其与油气的关系[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(6): 20–23.
- Song Zhangqiang, Wang Xingzhi, Zeng Deming. Sedimentary facies and its relativity with petroleum-gas at C'hihsia age of Permian in the northwest of Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(6): 20–23.
- [10] 胡明毅, 魏国齐, 胡忠贵, 等. 四川盆地中一叠统栖霞组层序—岩相古地理[J]. 古地志, 2010, 12(5): 515–526.
- Hu Mingyi, Wei Guoqi, Hu Zhonggui, et al. Sequence lithofacies palaeogeography of the middle Permian Qixia formation in Sichuan basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(5): 515–526.
- [11] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地茅口组风化壳岩溶地貌及勘探选区[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 949–960.
- Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Paleokarst landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and selection of exploration regions[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 949–960.
- [12] 钟怡江, 侯梅生, 夏杰, 等. 重庆石柱中二叠统栖霞组和茅口组沉积微相[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(4): 458–467.
- Zhong Yijiang, Hou Meisheng, Xia Jie, et al. Microfacies of Qixia Formation and Maokou Formation in Shizhu, Chongqing, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2014, 41(4): 458–467.
- [13] 陈宗清. 论四川盆地中二叠统栖霞组天然气勘探[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 325–334.
- Chen Zongqing. Discussion on gas exploration of middle Permian Qixia Formation, Sichuan basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 325–334.
- [14] 苏旺, 江青春, 陈志勇, 等. 四川盆地中二叠统茅口组层序地层特征及其对源储的控制作用[J]. 天然气工业, 2015, 35(7): 34–43.
- Su Wang, Jiang Qingqing, Chen Zhiyong, et al. Sequence stratigraphic features of Middle Permian Maokou formation in the Sichuan basin and their controls on source rocks and reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(7): 34–43.
- [15] 张运波. 四川盆地中二叠统层序地层及沉积模式[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- Zhang Yunbo. Sequence stratigraphic and deposition models of the Middle Permian in Sichuan basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [16] 魏国齐, 杨威, 朱永刚, 等. 川西地区中二叠统栖霞组沉积体系[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 442–448.
- Wei Guoqi, Yang Wei, Zhu Yonggang, et al. Depositional system of the Middle Permian Qixia Formation in the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 442–448.
- [17] 张廷山, 陈晓慧, 刘治成, 等. 峨眉地幔柱构造对四川盆地栖霞期沉积格局的影响[J]. 地质学报, 2011, 85(8): 1251–1264.
- Zhang Tingshan, Chen Xiaohui, Liu Zhicheng, et al. Effect of Emeishan mantle plume over the sedimentary pattern of Mid-Permian Qixia Period in Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(8): 1251–1264.
- [18] 杨巍, 张廷山, 刘治成, 等. 地幔柱构造的沉积及环境响应——以峨眉地幔柱为例[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 835–850.
- Yang Wei, Zhang Tingshan, Liu Zhicheng, et al. Sedimentary and environmental responses to mantle plume: a case study of Emeishan mantle plume[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3): 835–850.
- [19] 罗志立, 金以钟, 朱夔玉, 等. 试论上扬子地台的峨眉地裂运动[J]. 地质论评, 1988, 34(1): 15–28.
- Lou Zhili, Jin Yizhong, Zhu Kuiyu, et al. On Emeishan tectonogenesis of the upper Yangtze platform[J]. Geological Review, 1988, 34(1): 15–28.
- [20] 李大军, 陈辉, 陈洪德, 等. 四川盆地中二叠统茅口组储层形成与古构造演化关系[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 756–763.
- Li Dajun, Chen Hui, Chen Hongde, et al. Relationship between reservoir development in the Middle Permian Maokou Formation and paleostructure evolution in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 756–763.
- [21] 唐雪松, 谭秀成, 刘宏, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组白云岩及云质硅岩储层特征与发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 731–743.
- Tang Xuesong, Tan Xiucheng, Liu Hong, et al. Characteristics and development mechanism of dolomite and dolomitic quartzite reservoirs of the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 731–743.