

四川盆地中二叠统茅口组储层形成与古构造演化关系

李大军^{1,2}, 陈辉², 陈洪德¹, 梁虹², 彭才², 夏铭², 段宏臻³

(1. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 2. 中国石油 川庆物探公司 物探研究中心, 四川 成都 610213;

3. 中国石油集团测井有限公司 青海事业部, 甘肃 敦煌 736202)

摘要:以钻井与测井资料、盆地基干地震剖面及区域地质资料为基础,开展了四川盆地中二叠统茅口组储层发育特征及主控因素分析,系统讨论了古构造演化与茅口组沉积地貌、岩溶地貌及白云石化带之间的关系,预测了储层发育有利区带。研究认为,加里东运动奠定了中、下二叠统沉积前的基本地貌格局,而峨嵋地幔柱隆升作用则持续影响了整个二叠纪的古地貌演化,使四川盆地西南部成为继承性古地貌高带。该区既是茅口组高能滩体发育的沉积地貌高带,也是茅口组顶部风化壳岩溶古地貌高地。峨嵋地裂运动的构造张裂活动,为茅口组在早期滩体沉积或岩溶改造的基础上,叠加多期次白云石化及溶蚀作用提供了热液及酸性成岩流体的运移通道,在很大程度上控制了盆内茅口组白云岩储层的分布。

关键词:古构造;白云岩;茅口组;中二叠统;四川盆地

中图分类号:T2121.2

文献标识码:A

Relationship between reservoir development in the Middle Permian Maokou Formation and paleostructure evolution in the Sichuan Basin

Li Dajun^{1,2}, Chen Hui², Chen Hongde¹, Liang Hong², Peng Cai², Xia Ming², Duan Hongzhen³

(1. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. PetroChina CCDC Geophysical Prospecting Company, Chengdu, Sichuan 610059, China;

3. CNPC Logging Qinghai Business Division, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: The development characteristics and main controlling factors of reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin were studied based on drilling and logging data, framework seismic sections and regional geological data. The relationship between paleostructure evolution and formation of geomorphology, karst landform and dolomitization zone of the Formation, was also discussed systematically to predict potential reservoir zones there. Study shows that the Caledonian Movement defined and shaped the fundamental landforms of the Middle & Lower Permian in the Basin and the Emei mantle plume's uprising exerted a continuous influence on the paleogeomorphology evolution in the whole Permian. As a result, southwestern Basin turned to an inherited paleogeomorphological high. It is not only a sedimentary paleogeomorphological high for the development of high energy bank deposits in the Formation but also a paleogeomorphological high for the development of weathering crust karst on top of the Formation. Emei tectogeny provided migration pathways of hydrothermal fluid and acid diagenesis fluids for the overprint of multi-stage dolomitization and dissolution on early band deposits and karstification, thus largely controlled the distribution of dolomite reservoirs in the Formation.

Key words: paleostructure, dolomite, Maokou Formation, Middle Permian, Sichuan Basin

自20世纪60年代以来,在四川盆地中二叠统茅口组中已经先后发现了高木顶、自流井、荷包场、阳高寺及鹿角场等50余个气田或含油气构造,累计探明天然气储量 $811.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,显示了巨大的天然气勘探潜力^[1-2]。目前盆内不同区块茅口组勘探开发程度差异较大,其中蜀南地区勘探程度较高,储层类型以岩溶型为主,而川西地区和川北地区勘探程度则较低,储层

类型复杂多样。近年来,中国石油西南油气田分公司为寻找蜀南地区茅口组岩溶储层接替领域开展了大量的地质研究及勘探工作,并在川西北SYS-HWC构造、川中NC构造及川东WLH构造等多口井钻遇茅口组白云岩储层,部分井获得高产气流,说明除蜀南地区岩溶储层外,川西北-川中-川东地区茅口组白云岩储层也具有广阔的勘探前景。相对于蜀南地区,这些区

收稿日期:2015-11-23;修订日期:2016-08-31。

第一作者简介:李大军(1977—),男,博士研究生、高级工程师,地震地质。E-mail: Lidajun.sc@cnpc.com.cn。

基金项目:中国石油西南油气田分公司科研计划重大科技专项(2013ZD01-02)。

域勘探开发程度低,目的层段井点稀少,对沉积相、风化壳古岩溶及白云石化作用等储层发育主控因素或储层成因问题仍缺乏整体和系统的研究,导致对茅口组储层发育特征及分布规律认识不清,从而制约了盆内茅口组气藏的整体勘探开发进程。本文以盆内钻测井资料、地震及区域地质资料为基础,通过地震地质综合研究,详细讨论了古构造演化与茅口组储层形成的内在关系,预测了有利储层分布区域,为四川盆地中二叠统茅口组下一步勘探开发提供了地质依据。

1 地质概况

二叠系沉积前,受加里东运动与云南运动隆升作用影响,四川盆地长期遭受剥蚀,形成准平原化的缓坡型沉积基底。早二叠世初期,在广泛海侵背景下沉积了一套碳酸盐缓坡沉积,分别超覆于石炭系、泥盆系、志留系及奥陶系之上。早二叠世末期,受东吴运动抬升作用影响,中二叠统遭受不同程度剥蚀,茅口组顶界形成区域性不整合面,发育风化壳岩溶缝洞型储层。中二叠统自下而上可分为栖霞组和茅口组,四川盆地内茅口组厚约 119 ~ 508 m,平均为 237 m,自下而上可划分为茅一段至茅四段 4 个岩性段。茅口组储层岩性主要为生屑灰岩、泥晶灰岩及眼球状结构灰岩,岩性致密,孔隙度一般在 2% 以下,渗透率常小于 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层类型多被认为是岩溶型缝洞储层。近期川西地区钻探成果显示,茅口组二段和三段的颗粒灰岩经白云石化作用形成的晶粒白云岩和云质豹斑灰岩储层基质孔隙度一般为 1.33% ~ 15.64%,渗透率一般为 $0.00013 \times 10^{-3} \sim 685 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,具孔隙型和裂缝-孔隙型储层特征,该类储层分布特征及规律也是现阶段茅口组勘探和研究的重点。

2 古构造运动对茅口组储层形成控制作用

前人针对茅口组储层特征及受控因素开展了大量研究,普遍认为茅口组储层形成具有一定的继承性,即沉积是储层形成的基础,古岩溶是储层形成的关键,后期白云石化作用是储层改造的重要条件。但在盆地范围内,沉积地貌、古岩溶地貌及热液白云石化作用带如何分布、如何控制储层展布尚未形成统一的认识。

2.1 加里东运动控制茅口组滩体分布

加里东运动是二叠系沉积前一次大规模的构造隆升运动,盆地内乐山-龙女寺一带地层剧烈抬升,导致志留系及下伏地层暴露剥蚀,形成西南高北东低的古地貌格局。海西早中期,乐山-龙女寺古隆起继续遭

受剥蚀削平,从泥盆系及石炭系分布范围来看,其沉积主要集中在川东地区,表明该时期盆地仍具有西高东低的古地貌格局,也说明云南运动并未从根本上改变加里东末期的古地貌格局,即加里东运动已奠定了二叠系沉积前的基本地貌格局。

研究认为志留系大量剥蚀区对应二叠系沉积前古隆起区,在中二叠统沉积期也可能成为继承性古地貌高带,从而发育碳酸盐浅缓坡的高能生屑滩。图 1 是以四川盆地基干地震剖面为基础,根据地层削蚀现象确定的志留系大量剥蚀区,该区与现有钻井资料勾绘的茅口组高能滩分布区域存在较好的叠合关系,表明志留系大量剥蚀的川西-川中-蜀南地区是茅口组高能滩相发育的主要区域,向北东方向过渡为相对低能的较深水缓坡环境,滩体发育程度逐渐变差。

2.2 东吴运动与茅口组顶部风化壳岩溶古地貌关系

前人依据茅口组残余厚度划分了茅口组顶部岩溶古地貌单元,认为沿泸州-开江古隆起及其周缘的斜坡带为风化壳岩溶储层发育的有利区^[3-4]。结合区域地震地质资料,通过对茅口组厚度、沉积相及古地貌演化特征分析,认为东吴运动末期四川盆地的构造隆升方式及其与茅口组顶部古岩溶地貌的关系仍需进一步深入讨论。

1) 东吴运动末期茅口组顶部风化壳岩溶古地貌对茅口组早期沉积地貌具有一定的继承性

中二叠统沉积过程中,除受二叠系沉积前加里东末期古地貌格局影响外,峨嵋地幔柱隆升作用也是控制中二叠统古地貌演化的重要因素。罗志立、何斌等研究认为峨嵋地裂运动开始于中泥盆世,早二叠世主要发生于盐源-丽江,晚二叠世进入攀西裂谷及其以东的地区,地幔柱隆升轴部大致位于丽江-大理-攀枝花为中心的三角地区,幅度大于 1 300 m^[5-8]。峨嵋地幔柱隆升造成扬子板块西南端茅口组大规模抬升遭受剥蚀减薄,晚二叠世四川盆地西南部成为峨眉山玄武岩喷发主体,并向东逐渐减弱,到了川东仅有受断层控制的个别喷发点^[9]。至长兴组与飞仙关组沉积期,四川盆地西南部的川滇古陆仍作为物源区,由南向北依次发育陆相-海陆过渡相-台地相-海槽相,说明早二叠世盆内西南高北东低的古地理特征一直持续到早三叠世,古地貌格局具有较好的继承性,不同时期可能存在局部微地貌的调整。在上述区域构造演化背景下,茅口组沉积末期的东吴构造运动不会在短时期内从根本上改变中二叠统的沉积地貌格局,形成绵阳-通江古隆起及泸州-开江古隆起,而更可能是继承早二叠世的古地貌格局整体抬升,形成盆地西南高、北东低的古地貌特征。

从盆地内地震资料来看,四川盆地基干地震剖面中川西地区上二叠统底界普遍存在振幅减弱的现象。

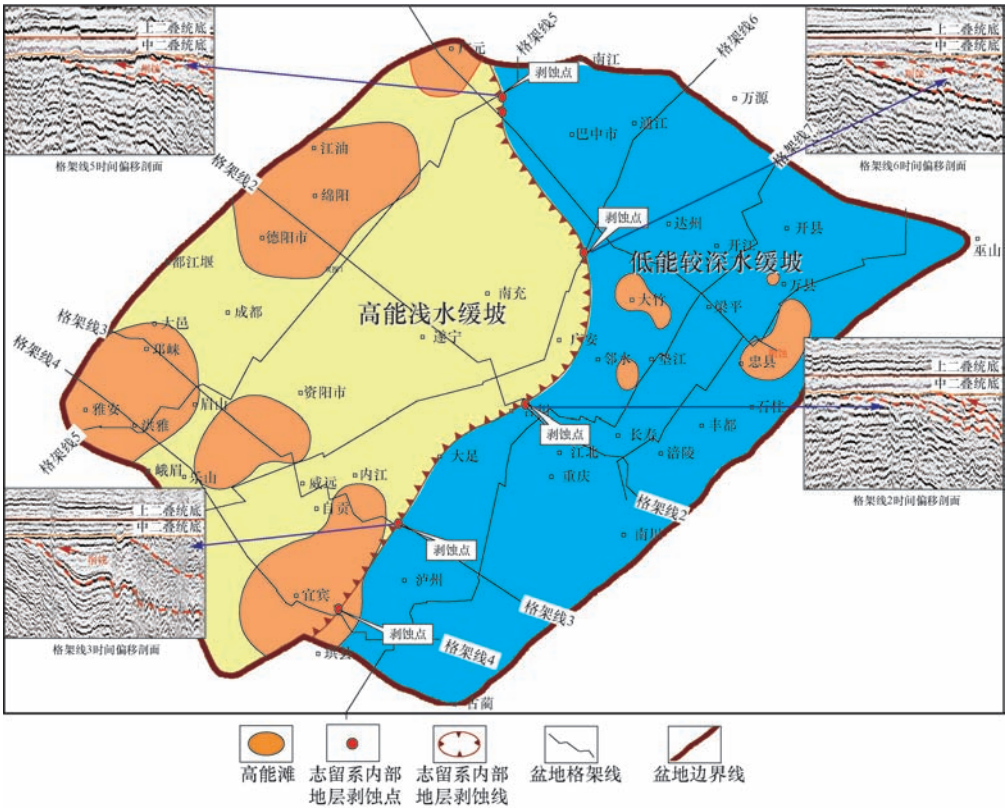


图 1 四川盆地加里东末期志留系剥蚀区与茅口组二段上亚段高能滩体叠合图

Fig. 1 Congruent map of massive denudation area of the Siluric strata in the Late Caledonian and distribution area of high-energy bank deposits in the second member of the Maokou Formation in the Sichuan Basin

通过井震标定,认为川西北地区(如秋林—双鱼石一带)上二叠统吴家坪组碳酸盐岩地层、川西南地区(如周公山—龙泉山一带)上二叠统底部广泛发育的峨眉山玄武岩沉积皆为高速层,常与下伏茅口组高速灰岩地层形成弱振幅地震反射特征,代表茅口组沉积末期、上二叠统沉积初期的古地貌相对高带。而川东及川北地区(如大天池及九龙山构造)上二叠统下部以龙潭组的低速泥岩沉积为主,常与下伏茅口组高速灰岩在地震剖面上形成中强振幅反射特征,代表茅口组沉积末期、上二叠统沉积初期的古地貌相对低带。上二叠统底界弱振幅反射

区也往往对应志留系大量剥蚀区及茅口组高能生屑滩发育区(图 2),进一步表明中二叠统沉积结束后,川西地区继承早期沉积地貌一直处于古地貌相对高地,尤其是川西南地区受峨眉地幔柱隆升影响进一步抬升,形成岩溶高地,向川东及川北地区上二叠统龙潭组低能沉积区则逐渐过渡为岩溶洼地。此外,盆内典型地震剖面中茅口组顶部未见明显削蚀或区域性角度不整合现象,表明东吴运动与加里东运动的大规模差异性升降性质不同,可能为规模相对较小的整体构造抬升,并对早期古地貌具有一定的继承性。

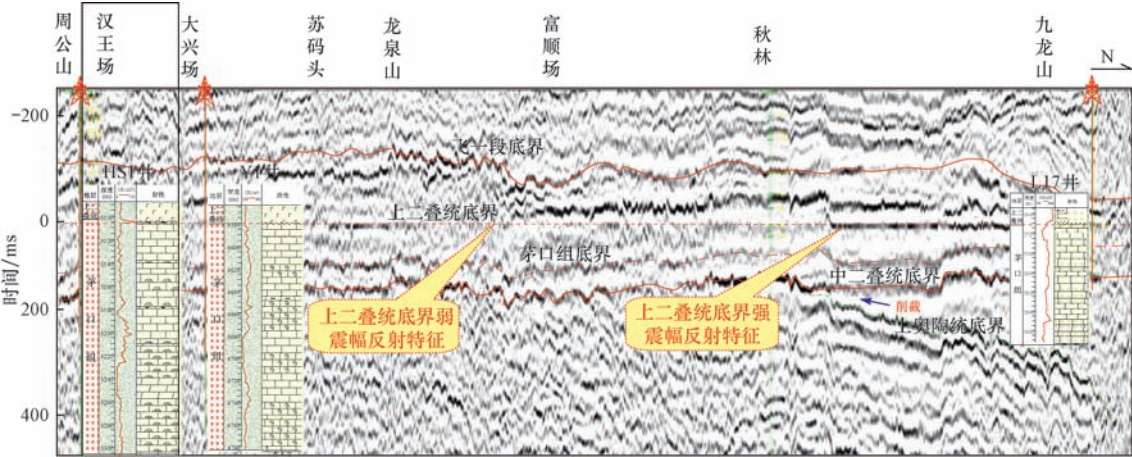


图 2 四川盆地格架地震剖面⑤上二叠统底界地震反射特征

Fig. 2 Seismic reflection characteristics of bottom boundary in the Upper Permian in the framework seismic section ⑤ in the Sichuan Basin

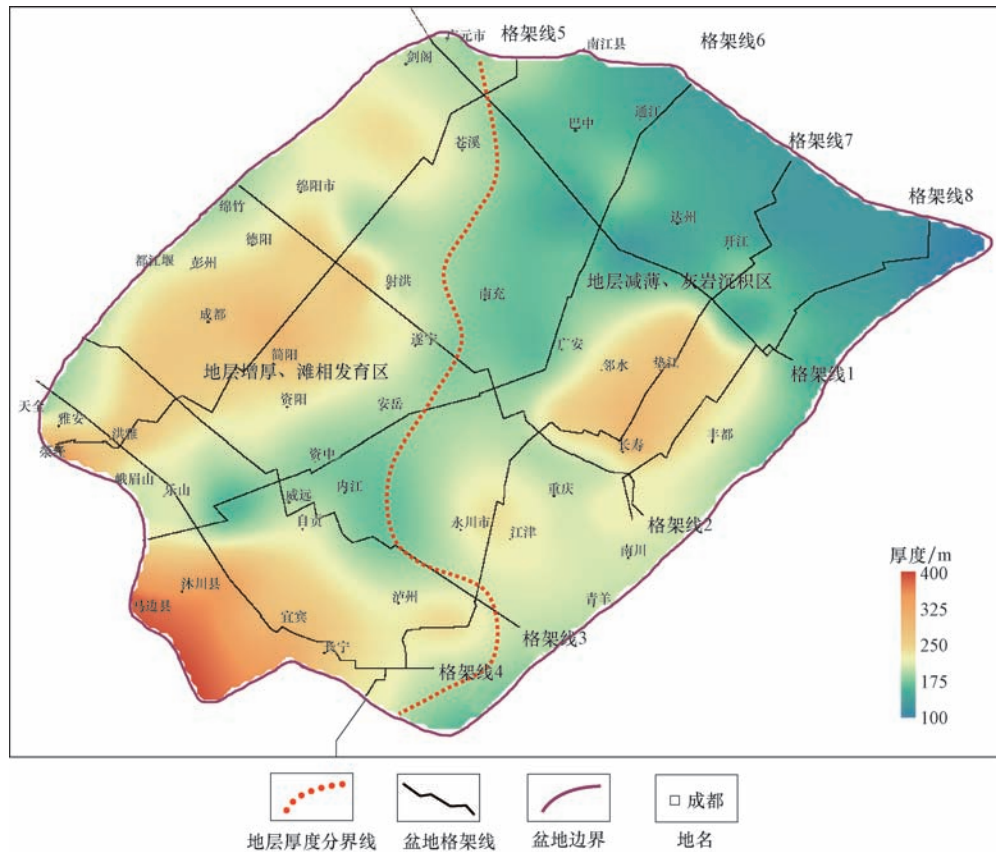


图3 四川盆地中二叠统茅口组残余厚度

Fig. 3 Residual thickness of the Maokou Formation in the Middle Permian in the Sichuan Basin

2) 茅口组残余厚度是沉积与剥蚀作用的综合响应

茅口组残余厚度受沉积作用与剥蚀作用综合影响,地层厚薄并不仅仅反映构造剥蚀的强弱情况。图3是以四川盆地基于格架地震剖面为基础,结合钻测井资料,编制的茅口组残余厚度图,图中红色区域代表地层厚区,蓝色区域代表地层减薄区。从该图可以看出,茅口组残余地层厚度一般为90~400 m,较厚区域主要集中在川西南及川西北地区,向东北地层逐渐减薄。这种变化规律与图1中茅口组沉积环境及滩体分布规律基本一致,进一步说明川西地区处于沉积地貌高带,碳酸盐沉积速率高、地层厚度大且生屑滩发育。而川东及川北地区处于沉积地貌相对低部位,碳酸盐沉积速率低、地层厚度薄、以相对深水灰岩沉积为主,由此可以考虑盆内茅口组厚度变化更多受沉积作用控制,而不是主要受东吴末期构造抬升剥蚀作用影响。

综上所述,东吴运动末期,四川盆地表现为整体构造抬升,并继承早二叠世古地貌格局形成了西南高北东低的古岩溶地貌特征,此时泸州—开江一带并未形成古隆起,而是处于岩溶斜坡—岩溶洼地。盆地内岩溶斜坡带主要位于南充—磨溪—高石梯—邻水—泸州地区,具有北西—南东向展布的特点,该带茅口组岩溶作用的强弱进一步受岩相及岩溶微地貌等因素控制,是盆内岩溶储层发育最有利的区域。

2.3 茅口组白云岩储层形成与峨嵋地裂运动关系

1) 茅口组白云岩成因具有混源改造、多期叠加的特点

针对茅口组白云石化成因及白云岩储层分布规律,前人开展了大量研究工作,取得了很大进展,但也存在许多不同观点。金振奎、冯增昭等人认为川西南部茅口组块状、斑状白云岩是混合水白云石化成因、玄武岩淋滤白云石化成因或埋藏热液白云石化成因;张荫本、王运生等认为川西北部白云岩是混合水白云石化、构造热液白云石化或埋藏白云石化成因;何幼斌、陈明启等人认为盆地及其周缘地区发育的细晶至粗晶白云岩和白云质灰岩是埋藏白云石化作用形成的^[10-16]。由此可见,四川盆地中二叠统茅口组白云岩往往具有经大气淡水与海水组成的混合水、深部热(水)液或其他不同时期富 Mg^{+} 成岩流体混合改造、多期叠加的特征。

2) 峨嵋地裂运动为茅口组热(水)液白云石化及溶蚀作用提供了流体运移通道

早中二叠世,受峨嵋地幔柱隆升影响,四川盆地发生差异隆升,形成西南高、北东低的缓坡型沉积基底,川西南部处于继承性古地貌高部位。至晚二叠世,川西南部随地幔柱隆升进一步抬升,而盆地中北部地区地层受到峨眉山玄武岩喷发产生的巨大冲击力由南向北离散,

并在基底断裂带及南秦岭洋盆扩张等因素的影响下^[17],发生拉张沉陷,产生大量同沉积断裂带,形成台槽相间的古地貌格局。近年来,在川西北—川中—川东地区沿15#基底断裂带附近的多口钻井中发现了茅二段白云岩储层。汪华等人研究认为该套白云岩储层受热次盆微相控制,具有热水成因性质^[18],即茅口组沉积期川北地区可能已经进入构造拉张活跃期,深部热水沿深大断裂向上运移,使茅口组发生次生白云石化。上二叠统沉积期,随着张裂活动的增强,茅口组沉积随上覆地层拉张沉陷,形成坳陷相间的古地貌格局。大量断裂及断块可为深部热液及成岩流体提供运移通道,尤其是开江—梁平海槽及川中台内凹槽,它们与北西—南东向的两组基底断裂带存在一定叠合关系,是发生热液白云石化最为可能的区域。图4是利用四川盆地21条地震格架线刻画的晚二叠世拗拉槽分布特征。从目前钻井情况来看,位于开江—梁平海槽及川中台内两侧古地貌高带的ST1井、NC1井、GC2井、MX31-X1井及W67井等均钻遇茅口组二段白云岩储层,并获高产气流,进一步证实了基底断裂带及晚二叠世拗拉槽对茅口组白云岩的发育具有重要的控制作用。

2.4 茅口组储层发育及古地貌演化模式

茅口组储层发育主控因素多样,多期不同影响因素的叠加,导致了茅口组储层类型及空间分布规律的复杂性。从四川盆地二叠系沉积前古地貌特征与茅口组沉积厚度及滩相发育区的一致性,茅口组沉积地貌与茅顶岩溶地貌的继承性,盆地中北部茅口组白云石化带与基底断裂带、晚二叠世台槽分布格局的关联性来看,茅口组储层发育与古构造演化存在必然的内在联系。基于上述分析,选取了地质历史时期中与茅口组储层形成密切相关的几个古构造运动,建立了茅口组古地貌演化与储层发育模式(图5)。研究认为晋宁运动期前震旦基底沉陷区地层在地幔热柱及热对流作用下不断拉张与沉陷,形成了控制四川盆地基底格局的主要深大断裂带,这些基底断裂带为晚二叠世峨嵋地裂运动形成沟通中深层的裂缝及断裂系统奠定了基础(图5a)。加里东差异升降运动彻底改变了前震旦系一下古生界的古地貌格局,形成了盆内西南高北东低的古地貌特征,也奠定了二叠系沉积前的基本地貌格局(图5b)。海西中期,受峨眉地幔柱隆升影响,川西南

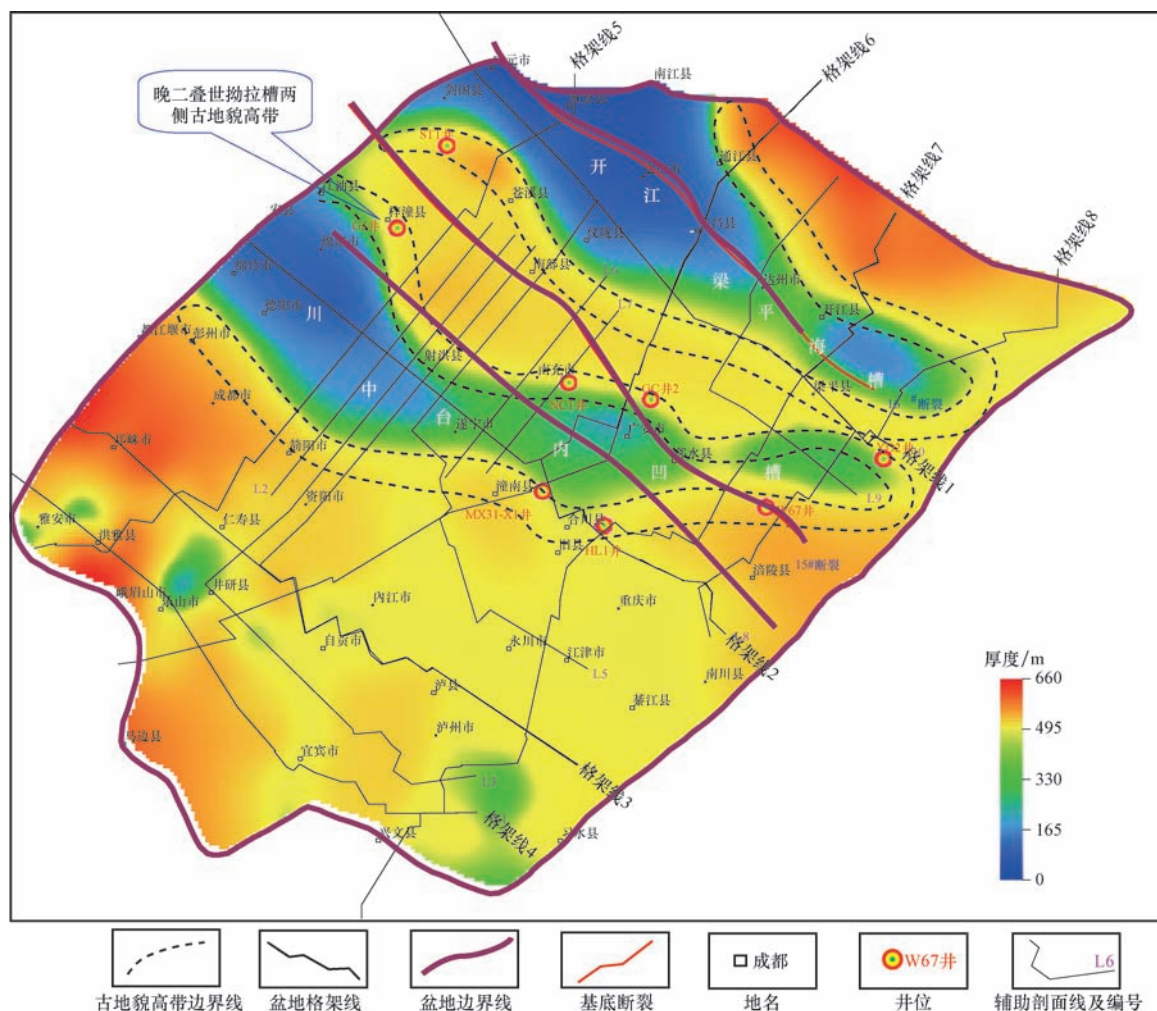


图4 四川盆地晚二叠世拗拉槽分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of aulacogen in the Late Permian in the Sichuan Basin

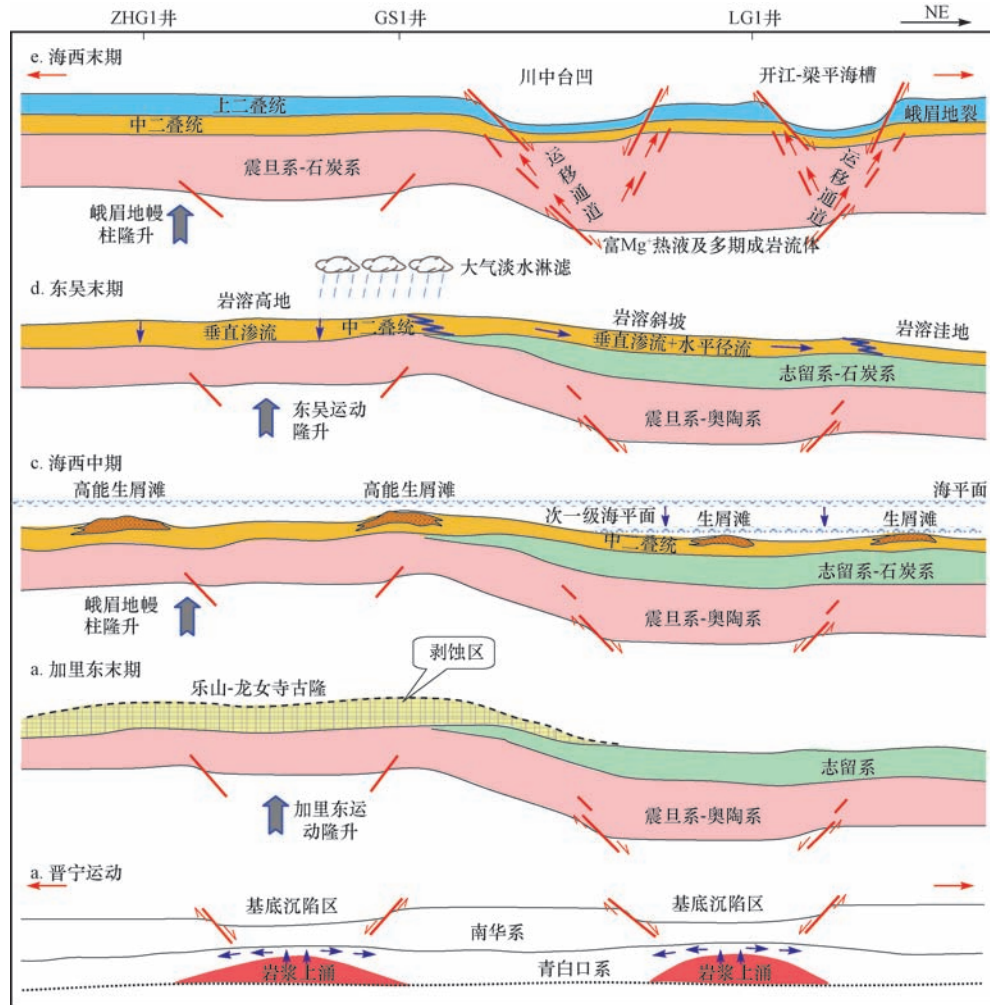


图5 四川盆地古构造演化及茅口组储层发育模式

Fig. 5 Paleogeographic evolution and development mode of the Maokou Formation in the Sichuan Basin

地区进一步抬升,为盆内中二叠统茅口组高能滩体沉积的有利区域,盆地东北部为古地貌相对低部位,整体处于相对低能环境,但局部地区(如卧龙河构造)也存在一些古地貌相对高带,发育高能生屑滩,这些早期滩体沉积为后期岩溶及白云石化改造奠定了物质基础(图5c)。东吴运动末期,四川盆地整体抬升遭受剥蚀,并继承中二叠统沉积格局,川西南部处于岩溶高地,向川中—蜀南地区过渡为岩溶斜坡,为岩溶储层发育最有利区,川东北位于岩溶洼地,储层不发育(图5d)。海西末期,峨眉地裂运动进入高峰期,川北地区沿基底断裂带展布方向形成台槽相间的古地貌格局,当这些同沉积断裂带与前震旦(晋宁运动)基底断裂带沟通,则可形成热液或多期成岩流体运移通道,茅口组沉积物可受深部热液及后期酸性成岩流体影响,沿沉陷区边缘发生热液白云石化及溶蚀作用,形成优质白云岩储层(图5e)。

3 茅口组储层发育有利区带

根据四川盆地茅口组沉积地貌特征、岩溶地貌特

征、古断裂系统发育特征及储层发育主控因素,将盆内茅口组划分为川西南、川西北、川西—川中—川东及蜀南4大储层发育有利区带(图6)。其中川西南部受加里东运动及峨眉地幔柱隆升影响处于继承性古地貌高地,高能滩体发育,易于暴露接受大气淡水淋滤,发生溶蚀及混合水白云石化作用,配合古断裂带也可发生热液白云石化作用,为地台内高能滩相白云岩储层发育有利区。川西北部中坝—双鱼石—河湾场地区在中二叠统沉积期,位于上扬子地台西北缘的台缘隆起带,为继承性古地貌高带,高能滩发育且易于发生混合水白云石化,为台缘高能滩相白云岩储层发育的有利区。川西—川中—川东地区沿15°断裂带附近的区域位于古岩溶和热(水)液白云石化作用叠合区,该区多口钻井在茅口组获气,储层类型以白云岩为主,储层发育主要受基底断裂带及晚二叠世拉张槽控制,为热(水)液白云岩储层发育有利区。蜀南地区位于茅口组顶部岩溶古地貌的岩溶斜坡带,区内已钻遇茅口组的974口井中有580口井发生了漏失和放空,为盆内岩溶储层最为发育的区域,经过多年勘探,蜀南地区茅口组岩

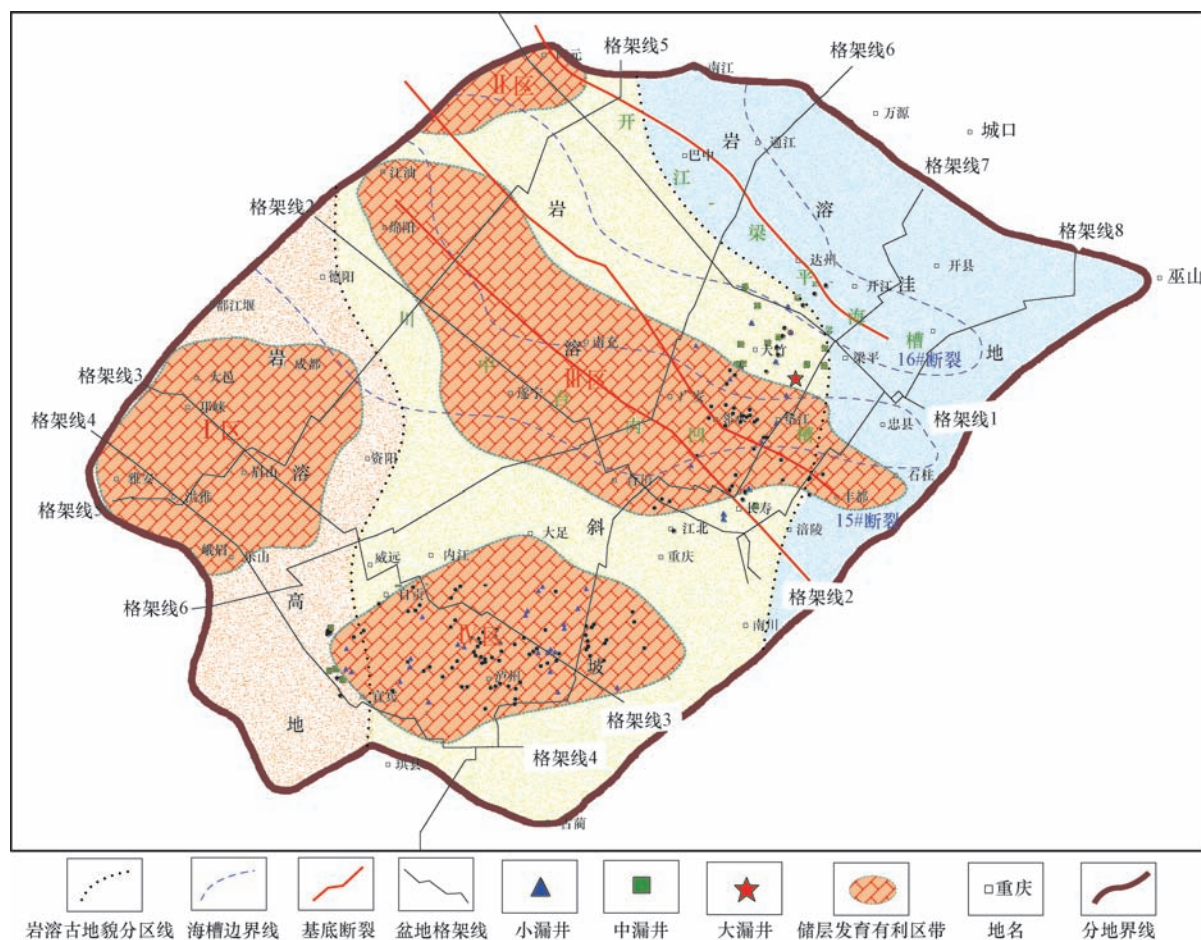


图6 四川盆地中二叠统茅口组储层有利区带

Fig. 6 Distribution of play fairway in the Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin

溶储层勘探工作虽已进入成熟阶段,但不同区域油气勘探程度不均,很多区块仍有较大的勘探潜力。

4 结论

1) 加里东运动奠定了中-下二叠统的基本地貌格局,形成了盆内西南高、北东低的古地势。茅口组沉积期,川西南地区受峨眉地幔柱隆升作用进一步抬升,成为盆地内高能滩体发育最有利的区域。钻井资料显示,川西南地区茅口组岩性以生屑灰岩为主,白云石化程度往往不高,表明茅口组沉积期,该区海侵速度略大于地层隆升和滩体生长速度,大部分滩体沉积后快速被海水淹没进入海底成岩环境发生碳酸盐胶结作用。东吴运动末期,四川盆地茅口组虽然整体抬升暴露,但该时期区内茅口组生屑灰岩孔隙多已被胶结堵死,无法接受大气淡水淋滤发生溶蚀及混合水白云石化作用,从而无法为后期建设性成岩改造保留有效的孔隙空间。因此,川西南地区寻找茅口组白云岩储层的关键仍在于寻找茅口组沉积期的微古地貌高带,即滩体沉积后能充分暴露的区域,这些区域配合古断裂带可发生多期溶蚀及次生白云石化作用,形成优质白云岩储层。

2) 盆内钻测井资料、地震资料及沉积相研究成果表明,峨眉地幔柱隆升活动持续影响整个二叠纪古地貌格局,形成了盆内西南高、北东低的古地貌格局。该格局具有良好的继承性,甚至影响了下三叠统飞仙关组的沉积相分异。从古构造运动演化的继承性来看,茅口组沉积末期,四川盆地地层很难在短时期内发生地貌反转,形成泸州-开江古隆起雏形,东吴运动末期的构造隆升运动更可能是峨眉地幔柱活动的一部分,即以盆地内整体抬升为总体特征,并继承了中二叠统沉积期盆地西南部隆升、东北部沉降的构造格局,形成具有南高北低的风化壳岩溶古地貌特征。

3) 四川盆地中北部地区受峨眉地裂运动的张裂作用影响持续拉张沉陷,在晚二叠世达到高峰。茅口组随上覆二叠统沉积拉张沉陷,形成堑垒相间的古地貌格局,此时产生的大量裂缝及断裂系统不仅为茅口组白云石化提供了热(水)液运移通道,也为后期富二氧化碳及有机酸等酸性成岩流体提供了运移通道,有助于岩层溶蚀及孔隙空间的形成。白云石化作用与溶蚀作用相互促进,形成了川西-川中-川东地区围绕川中台内凹槽两侧古地貌高带广泛发育的优质白云岩储层。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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, 2011.
Zhang Yunbo. Sequence stratigraphy and depositional models of the Middle Permian in Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- [3] 江青春,胡素云,汪泽成,等. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J]. 石油学报,2012,33(6):950-959.
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):950-959.
- [4] 郭旭升,李宇平,魏全超. 川东南地区茅口组古岩溶发育特征及勘探领域[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(6):1-6.
Guo Xusheng, Li Yuping, Wei Quanchao. Palaeokarst reservoirs and exploration areas of Maokou Formation in the Southeast of Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(6):1-6.
- [5] 罗志立. 峨眉地裂运动观对川东北大气区发现的指引作用[J]. 新疆石油地质,2012,33(4):401-407.
Luo Zhili. Guidance function of Emei Taphrogenesis viewpoint on discovery of large gas province in Northeastern Sichuan[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(4):401-407.
- [6] 何斌,徐义刚,肖龙,等. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布:来自沉积地层学的新证据[J]. 地质学报,2003,77(2):194-202.
He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, et al. Generation and spatial distribution of the Emeishan Large Igneous province: new evidence from stratigraphic records[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2):194-202.
- [7] 何斌,徐义刚,王雅玫,等. 用沉积记录来估计峨眉山玄武岩喷发前的地壳抬升幅度[J]. 大地构造与成矿学,2005,29(3):316-320.
He Bin, Xu Yigang, Wang Yamei, et al. The magnitude of crustal uplift prior to the Eruption of the Emeishan Basalt: inferred from sedimentary records[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2005, 29(3):316-320.
- [8] 侯增谦,卢记仁,林盛中. 峨眉地幔柱的榴辉岩-地幔岩源区:主元素、痕量元素及Sr、Nd、Pb同位素证据[J]. 地质学报,2005,79(2):200-219.
Hou Zengqian, Lu Jiren, Lin Shengzhong. The Axial zone consisting of Pyrolyte and Eclogite in the Emei Mantle Plume: major, trace element and Sr-Nd-Pb isotope evidence[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(2):200-219.
- [9] 罗志立,刘顺,刘树根,等. “峨眉地幔柱”对扬子板块和塔里木板块离散的作用及其找矿意义[J]. 地球学报,2004,25(5):515-522.
Luo Zhili, Liu Shun, Liu Shugen, et al. The action of “Emei Mantle Plume” on the separation of the Yangtze Plate from the Tarim Plate and its significance in exploration[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(5):515-522.
- [10] 王运生,金以钟. 四川盆地二叠统白云岩及古岩溶的形成与峨眉地裂运动的关系[J]. 成都理工大学学报,1997,24(1):9-16.
Wang Yunsheng, Jin Yizhong. The formation of dolomite and Paleokarst of the Lower Permian Series in Sichuan Basin and the relation to the Emei Taphrogenesis[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1997, 24(1):9-16.
- [11] 金振奎,冯增昭. 滇东-川西二叠统白云岩的形成机理—玄武岩淋滤白云化[J]. 沉积学报,1999,17(3):383-389.
Jin Zhen kui, Feng Zengzhao. Origin of dolostones of the Lower Permian in East Yunnan—West Sichuan—Dolomitization through Leaching of Basalts[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(3):383-389.
- [12] 何幼斌,冯增昭. 四川盆地及其周缘下二叠统细-粗晶白云岩成因探讨[J]. 江汉石油学院学报,1996,18(4):15-20.
He Youbin, Feng Zengzhao. Origin of Fine-to Coarse-grained Dolostones of Lower Permian in Sichuan Basin and its peripheral regions[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 1996, 18(4):15-20.
- [13] 张荫本. 四川盆地二叠系中的白云岩[J]. 石油学报,1980,3(1):29-33.
Zhang Yinben. Dolomite of Middle Permian of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1980, 3(1):29-33.
- [14] 陈明启. 川西南下二叠统白云岩成因探讨[J]. 沉积学报,1989,7(2):45-50.
Chen Mingqi. A discussion of the origin of Yangxin dolomite of Lower Permian in Southwest Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7(2):45-50.
- [15] 金振奎,冯增昭. 滇东-川西二叠统白云岩的形成机理——玄武岩淋滤白云化[J]. 沉积学报,1999,17(3):383-389.
Jin Zhenkui, Feng Zengzhao. Origin of dolostones of the Lower Permian in East Yunnan—West Sichuan —Dolomitization through leaching of basalts[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(3):383-389.
- [16] 李茂竹,王玉英. 四川华蓥山中段下二叠统灰岩中“砂糖状白云岩”特征及其白云化作用的讨论[J]. 川煤地勘,1991,9(1):45-48.
Li Maozhu, Wang Yuying. Character and origin of saccharoidal dolomite in Lower Permian limestone in middle Huayinshan mountain, Sichuan basin[J]. Sichuan Coal Exploration, 1991, 9(1):45-48.
- [17] 罗志立,孙玮,韩建辉. 峨眉地幔柱对中上扬子区二叠纪成藏条件影响的探讨[J]. 地学前缘,2012,19(6):144-150.
Luo Zhili, Sun Wei, Han Jianhui. Effect of Emei mantle plume on the conditions of Permian accumulation in middle-upper Yangtze Area[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(6):144-150.
- [18] 汪华,沈浩,黄东,等. 四川盆地中二叠统热水白云岩成因及其分布[J]. 天然气工业,2014,34(9):25-32.
Wanghua, Shen Hao, Huang Dong, et al. Origin and distribution of hydrothermal dolomites of the Middle Permian in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(9):25-32.

(编辑 董立)