

四川盆地东部中二叠统茅口组孤峰段展布特征及其油气地质意义

刘昇^{1,2}, 范存辉^{1,2}, 张本健³, 张亚³, 王尉³, 罗冰⁴, 白晓亮³

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室 西南石油大学, 四川 成都 610500; 3. 中国石油西南油气田分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610051; 4. 中国石油西南油气田分公司 重庆气矿, 重庆 401120)

摘要: 基于钻井岩-电特征和野外露头特征, 结合区域沉积-构造格局, 利用宏观及微观观察、主微量及稀土元素测试、总有机碳含量和镜质体反射率测定等手段对四川盆地东部中二叠统茅口组孤峰段展布特征、沉积环境和成藏条件进行研究。结果表明: ①川东地区茅口组孤峰段的存在, 证实茅口中、晚期受构造-沉积分异的影响, 出现槽台格局。在茅口组二段B亚段沉积期(茅二B沉积期), 川东地区孤峰段主要分布在盆地东北角。在茅口组二段A亚段沉积期(茅二A沉积期), 孤峰段向南扩大到渠县—大竹—梁平, 呈北西—南东向带状展布, 厚度在0.8~26.6 m, 川西北—川北则对应茅口组三段(茅三段)或茅口组四段(茅四段)。②孤峰段硅质页岩富含硅质放射虫, 有机质含量高, 具有典型的深水海槽相沉积特征。地球化学测试数据反映硅质页岩为深水缺氧还原环境且盐度较高, 硅质来源以生物硅为主。③孤峰段烃源岩为一套富有机质的优质烃源岩, 总有机碳含量整体较高、变化范围大, 分布在1.69%~38.27%, 平均值为11.51%, 处于成熟-过成熟阶段。④川东地区孤峰段优质烃源岩可通过断裂与开江—梁平海槽礁滩相储层沟通, 构成“下生上储”的源-储关系; 此外, 也可与茅口组优势滩相储层形成“旁生侧储”的成藏组合。川东地区孤峰段有望作为区域内优质烃源岩的接力勘探层系, 对研究区内下一步油气勘探开发具有重要意义。

关键词: 下生上储; 旁生侧储; 硅质页岩; 深水沉积; 孤峰段; 茅口组; 四川盆地东部

中图分类号: TE121

文献标识码: A

Distribution characteristics of Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin and its petrogeological significance

LIU Sheng^{1,2}, FAN Cunhui^{1,2}, ZHANG Benjian³, ZHANG Ya³, LUO Bing⁴, BAI Xiaoliang³

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gas field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China; 4. Chongqing Gas Field of Southwest Oil & Gas field Company, PetroChina, Chongqing 401120, China)

Abstract: The distribution characteristics, sedimentary setting and reservoir formation conditions of the Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation in the eastern Sichuan Basin were studied by means of macroscopic and microscopic observation, as well as the measurement of major and minor elements and rare earth elements (REEs), total organic carbon (TOC) content and vitrine reflectance, while considering the lithologic and electrical properties and outcrop characteristics, combined with regional depositional-tectonic framework. The results are as follows. First, the existence of Gufeng Member of the Maokou Formation in eastern Sichuan Basin confirms that a trough and platform pattern existed in the middle and late depositional stages of the Maokou Formation under the tectonic-sedimentary differentiation. During the deposition of the B sub-member of the second member of the Maokou Formation (i. e., the deposition of Mao 2B sub-member), the Gufeng Member mainly occurred in the northeast corner of the eastern Sichuan Basin. During the deposition of Mao 2A sub-member, the Gufeng Member extended southward to Quxian, Dazhu, and

收稿日期: 2023-03-08; 修回日期: 2023-05-26。

第一作者简介: 刘昇(1998—), 男, 硕士研究生, 油气地质。E-mail: lsengswpu@126.com。

通信作者简介: 范存辉(1980—), 男, 副教授、硕士生导师, 盆山构造与油气勘探。E-mail: fanchswpi@163.com。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司油气和新能源分公司科学与技术开发项目(2022KT0401)。

Liangping counties in a NW-SE-striking strip pattern with a thickness of 0.8 to 26.6 m. The Gufeng Member corresponds to the Mao 3 and 4 members in northwest and north Sichuan Basin. Second, the siliceous shale in Gufeng Member is rich in siliceous radiolaria and has high organic matter content, which is typical of deep-water trough facies deposition. The geochemical test data show that the siliceous shale is developed in a deep-water anoxic reducing environment with high salinity, with biogenic silica as the main siliceous source. Third, the source rocks in the Gufeng Member are of high quality and rich in organic matter, with the total organic carbon (TOC) content being relatively high as a whole but in a wide variety, ranging from 1.69 % to 38.27 %, with an average value of 11.51 %, and in the mature to over-mature stage. Fourth, the high-quality source rocks of the Gufeng Member can communicate with the reef-shoal reservoir of Kaijiang-Liangping trough through faults, forming an “upper source rock-lower reservoir” assemblage; and it can also form a juxtaposed “source rock-reservoir” association with the favorable beach reservoir of Maokou Formation. The Gufeng Member in eastern Sichuan is expected to be a successor target for high-quality source rock exploration in the region, which is of great significance to future oil/gas exploration and development in the study area.

Key words: “upper source rock-lower reservoir” assemblage, “juxtaposed source rock-reservoir” assemblage, siliceous shale, deep-water deposition, Gufeng Member, Maokou Formation, eastern Sichuan Basin

引用格式:刘昇,范存辉,张本健,等.四川盆地东部中二叠统茅口组孤峰段展布特征及其油气地质意义[J].石油与天然气地质,2023,44(4):993-1008. DOI:10.11743/ogg20230415.

LIU Sheng, FAN Cunhui, ZHANG Benjian, et al. Distribution characteristics of Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin and its petrogeological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 993-1008. DOI: 10.11743/ogg20230415.

四川盆地东部孤峰段可溯源至中、下扬子地区孤峰组,其为穿时的岩石地层单位,正层型位于安徽泾县孤峰镇,孤峰组自下扬子苏皖地区至中上扬子地区四川广元-旺苍一带均有发育,自东向西由茅口组沉积早期地层演变至茅口组沉积晚期地层^[1]。此前有学者为了与上扬子地区正式岩石地层单位衔接,将四川盆地孤峰组纳入四川盆地茅口组次级划分,即孤峰段^[2-3]。本次研究沿用此称谓。

前人对川北地区孤峰段的展布及成藏条件已经有了比较深入的研究与认识,张玺华等揭示了四川盆地中二叠世广元-巴中拉张槽的存在,明确了其成藏组合^[4]。付小东等证实了四川盆地北部孤峰段的存在,揭示了其优质烃源分布、沉积环境和成藏贡献^[2]。王兴志等证实了川北地区广元-旺苍一带在中二叠统茅口组沉积晚期发育一套富有机质的深水沉积,其具有典型的深水海槽相沉积特征,并探讨了海槽内部源储配置^[5]。在川东地区,针对孤峰段的研究伊始,陈卫东等就明确了王坡页岩段与孤峰段的接触关系、岩-电差异以及孤峰段的发育时期^[3]。但目前川东地区孤峰段纵横向及平面展布特征、地球化学特征和源-储特征尚未明确。本次研究综合钻井岩-电特征、岩心资料和野外露头特征,结合区域沉积-构造格局,利用各种分析测试手段,对四川盆地东部中二叠统茅口组孤峰段展布特征、沉积环境和成藏条件进行研究,以期为区域内下一步孤峰段优质烃源岩的勘探开发做出有力支撑。

1 区域地质概况

四川盆地位于扬子准地台西北部,是扬子准地台内通过北东向及北西向交叉的深大断裂活动形成的菱形沉积-构造叠合盆地。在印支期初具规模,后经喜马拉雅期强烈的压扭性断褶活动,形成现今盆构造面貌^[6-7]。前人研究认为:四川盆地的油气资源主要蕴藏在海相碳酸盐岩地层中^[8-9],中二叠统以镶边碳酸盐岩台地沉积模式为主,主要为开阔台地碳酸盐岩沉积环境,总体为一套碳酸盐岩夹少量硅质岩和泥页岩的海相沉积^[10-12]。

本文研究区为四川盆地东部,区域构造上属于川东构造带西带—川东褶皱带—华蓥山断裂和齐岳山断裂之间的薄皮隔档式褶皱带,是四川盆地内褶皱断裂最强烈的地区^[13-15](图1a),主要发育北北东-北东向、北西向的深大断裂,如铜锣峡、明月峡、黄泥堂等深大断裂,以及伴生的次级断裂^[16-17]。研究区中二叠统茅口组继承了栖霞组的沉积格局^[18],主要发育开阔台地亚相。茅口组沉积早期,随海平面上升,茅口组一段(茅一段)发育较深水的眼球、眼皮状灰岩^[19-24];茅口组沉积中、晚期,受海退影响,茅口组二段C亚段(茅二C亚段)和茅口组二段B亚段(茅二B亚段)多发育泥-粉晶灰岩,茅口组二段A亚段(茅二A亚段)和茅口组三段(茅三段)水体能量高,以发育生屑灰岩为主,其中茅

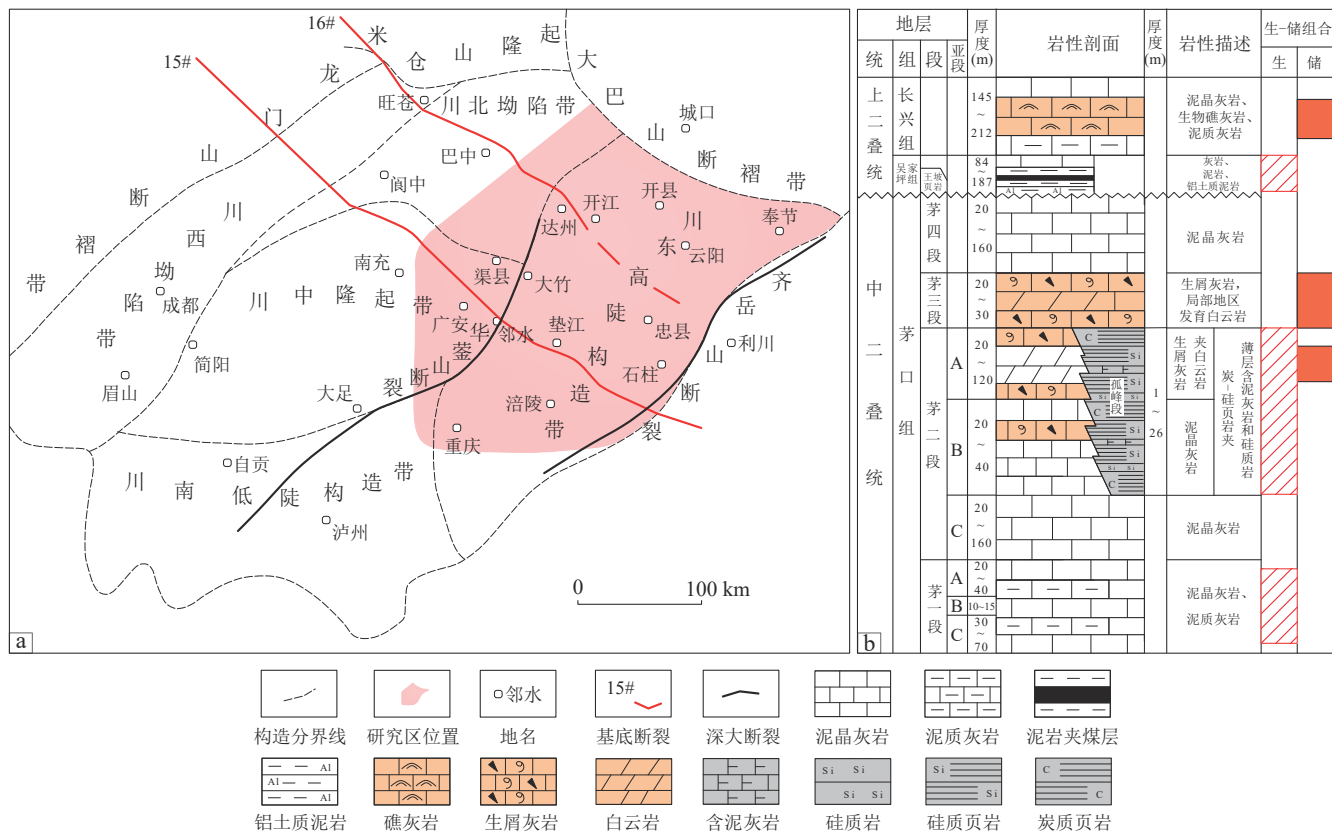


图1 四川盆地东部位置(a)和地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Location map (a) and composite stratigraphic column (b) of the eastern Sichuan Basin

二A亚段发育构造-热液成因的晶粒白云岩带^[25],茅三段少见白云岩;在茅二B沉积期—茅二A沉积期,研究区也发育以炭质-硅质泥页岩为主的孤峰段^[3]。受东吴运动影响,研究区北部大部分茅三段和茅四段地层被剥蚀,随后在晚二叠世初期,海平面缓慢上升,吴家坪组底部沉积滨岸-沼泽环境的王坡页岩,茅口组顶部灰岩或孤峰段炭质-硅质泥页岩与吴家坪组底部呈平行不整合接触^[3,5](图1b)。

2 孤峰段地层研究

2.1 孤峰段的识别与划分

孤峰组在下扬子地区与茅口组为等时异相沉积,往西在中上扬子地区,孤峰组的底界向上穿时,顶界向下穿时^[26-27](图2),如前所述,本研究将其定义为孤峰段。川东地区孤峰段主要发育黑灰色炭质-硅质泥页岩夹薄层含泥灰岩和硅质岩^[3],在野外剖面上,据梅仕龙等实测观音洞渡口剖面 and 本次研究实测的开县红花园剖面显示,孤峰段在川东北地区不仅存在,且其上覆叠置茅口组灰岩,梅仕龙等^[26]将宣汉渡口茅口组剖面

牙形石与国际标准的中二叠统(Guadalupean)进行对比,其中 *M. serrate*—*M. postserrata* 3个牙形石带具有一致性,该剖面王坡页岩段与深水相孤峰段之间发育61 m的碳酸盐岩(图2)。钻井上,根据研究区250余口钻井岩、电特征差异及岩心资料和录井岩性的复查,最终有效识别并划分了研究区70余口钻井孤峰段,发现如YH3井、L7井(图3e,f)等钻井的孤峰段之上也叠置有茅二段和茅三段灰岩,但在钻井中此叠置关系只占少数,多数钻井孤峰段之上大段灰岩被剥蚀,致使孤峰段直接与上覆吴家坪组底部接触。

孤峰段的发育始于茅二B沉积期,结束于茅二A沉积期^[3],在前人明确孤峰段发育时期的基础上,本研究进一步厘清了孤峰段与相邻地层的接触关系,孤峰段与下伏茅口组灰岩呈整合接触,但孤峰段与上覆地层的接触关系在野外剖面和不同钻井上有差异,其与上覆地层主要有两种接触关系:其一是与上覆吴家坪组底部呈假整合接触;其二是或与上覆茅口组灰岩呈整合接触。

2.1.1 上覆吴家坪组

吴家坪组底部在川东地区有3种岩性:①以黄褐

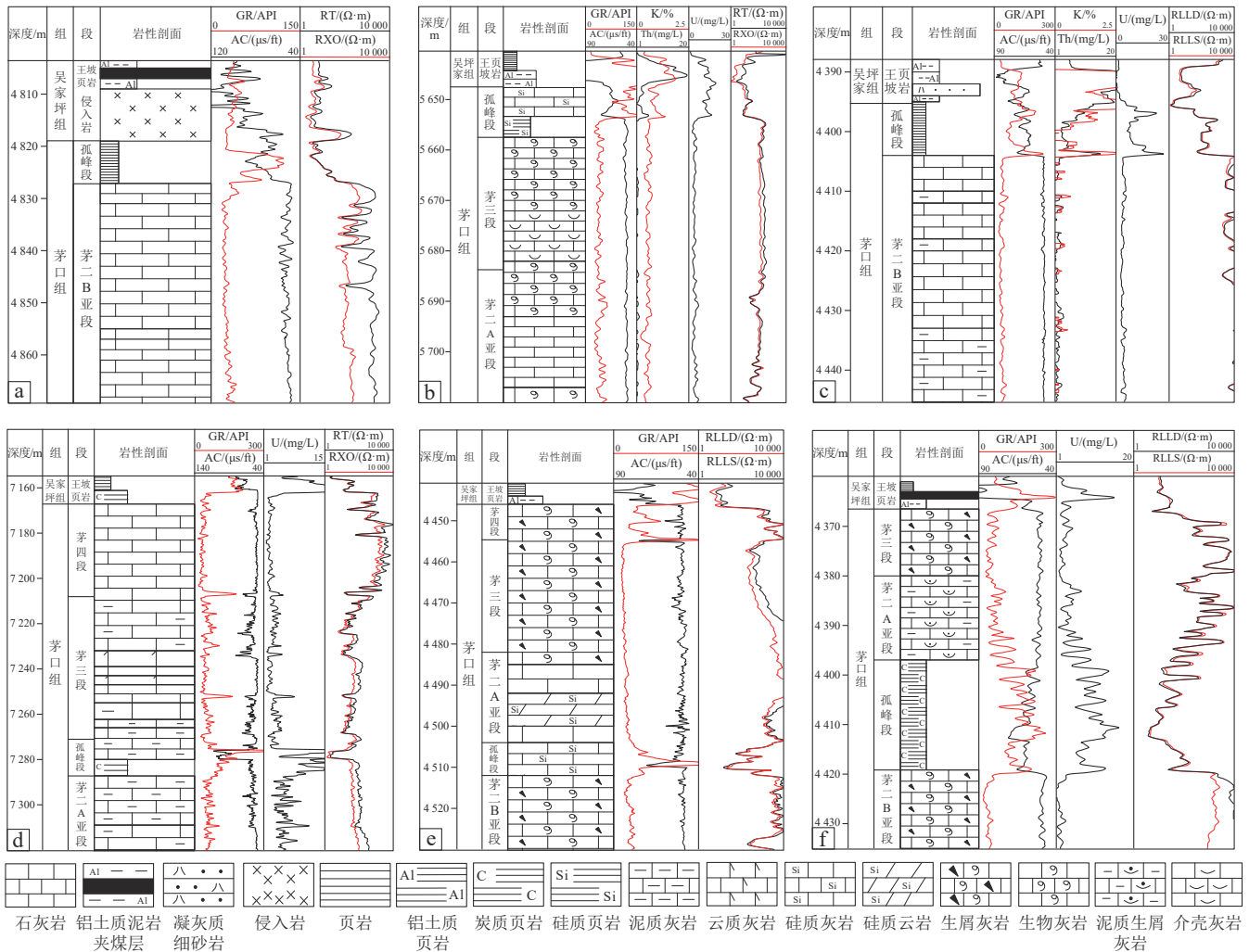


图3 四川盆地东部及邻区钻井岩-电综合特征(钻井位置见图4)

Fig. 3 Characteristics of lithologic-electrical properties in eastern Sichuan Basin and adjacent areas (see Fig. 4 for the drilling site)

a. WT1井; b. Long17井(四川盆地西北部); c. TD32井; d. LG70井(四川盆地西北部); e. L7井; f. YH3井

开江古隆起的影响,在中二叠世末期,东吴运动导致川东北部及中部地区抬升,而作为沉积古地貌高点的开江古隆起成为剥蚀中心,遭受剥蚀最为严重^[29-31],只残留部分孤峰段。

川西北—川北地区茅口组顶部的深水沉积与中、下扬子地区孤峰组地层同属深水缺氧环境,且岩石学及古生物特征可追溯对比,故按照本次研究的地层划分方案,这套深水沉积也应划分为孤峰段,纵向上对应于茅三段或茅四段(图3b,d),为茅口组同时异相沉积^[2,5]。

3 沉积-构造格局

前人研究发现勉略有限古洋盆在二叠纪及以前发生扩张,二叠纪中晚期开始消减^[32],川东地区位于上

扬子西北缘—勉略古洋盆西南大陆边缘,茅口组沉积早期(茅一沉积期—茅二B沉积期),勉略洋持续扩张,川东地区构造稳定,沉积分异小,整体为宽缓的开阔海沉积,水体相对较深。川东地区茅口组早期地层具有南厚北薄的特征,且研究区具有南高北低的沉积古地貌背景,茅一段至茅二B亚段厚度整体变化不大,其中盆地东北角地层最薄(图5a),该区沉积时水体最深,沉降速度慢,为孤峰段海槽相沉积的先决条件。茅二B沉积期,勉略古洋盆开始由扩张转为消减阶段,扬子板块向北俯冲,在为研究区内裂陷槽拉张提供内动力的同时,发生由北向南的海侵,盆地东北角沉积了小面积的孤峰段,槽台分异的格局初步形成,在达州—开江一带沿海槽发育台地边缘相,该期海槽面积小,台地边缘水体能量不强,台缘滩面积较小(图5b)。随后,在茅二A沉积早期,研究

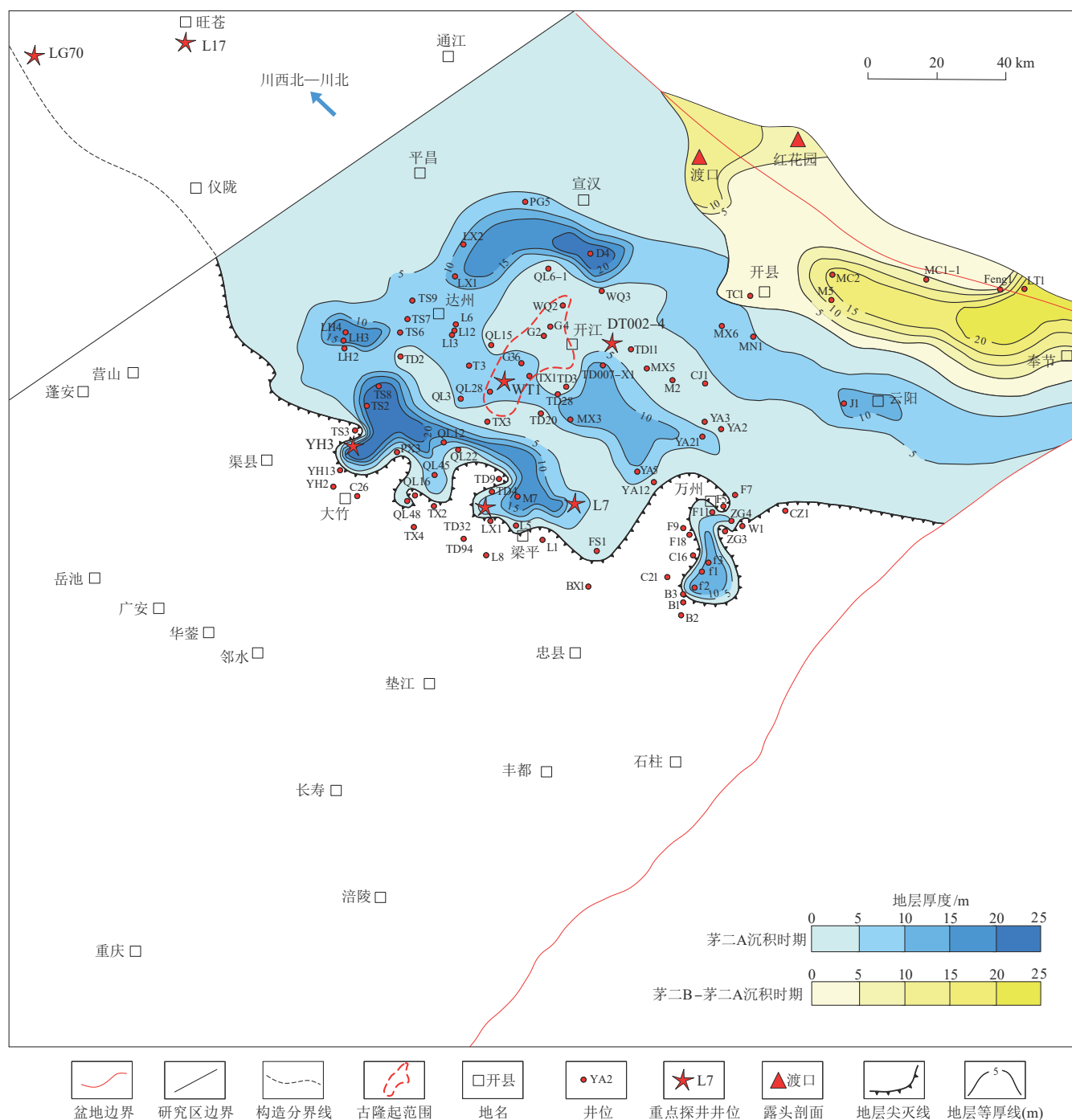


图4 四川盆地东部孤峰段厚度分布

Fig. 4 Isopach map of the Gufeng Member in eastern Sichuan Basin

(古隆起范围根据文献27-29绘制。)

区依然处于勉略古洋盆消减俯冲的动力学背景下,同时受东吴运动早期构造作用影响,研究区内北东向基底断裂复活^[33],海槽在张性应力作用下,沿基底断裂方向拉开,同时,海侵范围进一步扩大,致使川东北地区槽台分异加剧,海槽向南扩大至梁平—万州一带,形成以炭质—硅质泥页岩沉积为主的盆内裂陷,该期水体能量强,有利于大面积边缘滩相发育,

台地边缘相沿广安—邻水—丰都一带分布(图5c)。最后,在茅二A沉积中晚期—茅三沉积期,川东地区发生大面积海退,孤峰段深水海槽相的沉积范围逐渐向北萎缩,取而代之的是茅口组灰岩沉积,整体发育浅水开阔台地沉积(图5d)。

川东地区茅口组经历了早期较深水开阔海沉积—中、晚期槽台分异—晚期较浅水开阔台地的沉积旋

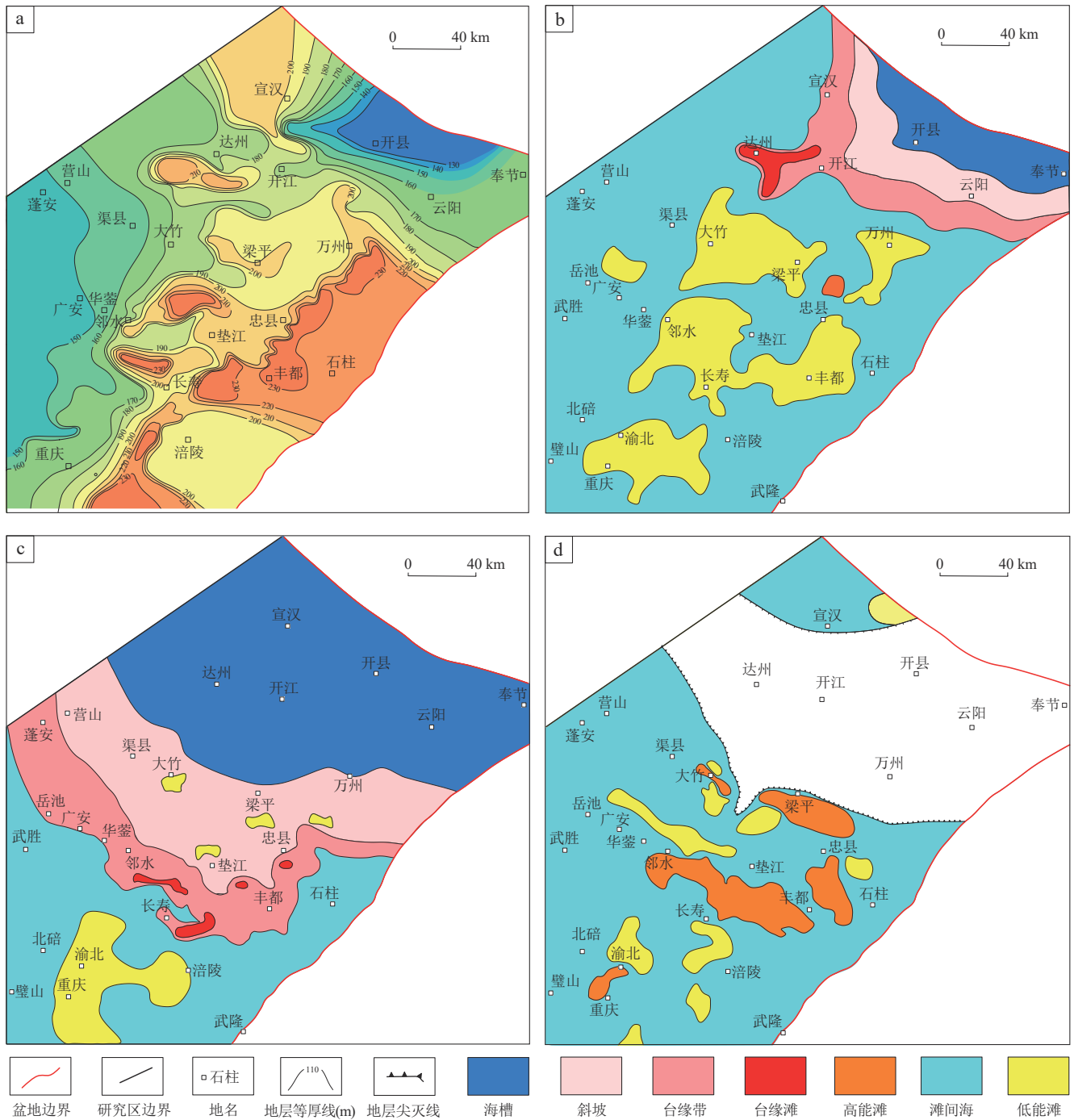


图5 四川盆地东部茅口组厚度和沉积相平面展布

Fig. 5 Isopach map with sedimentary facies overlaid of the Maokou Formation, eastern Sichuan Basin

a. 茅一段—茅二B亚段厚度; b. 茅二B亚段沉积相; c. 茅二A亚段沉积相; d. 茅三段沉积相

回,受沉积古地貌和海西期整体拉张环境的影响,在茅口组中晚期,由古地貌相对低部位的孤峰段深水海槽相,向古地貌高部位转变为开阔台地沉积。茅口组沉积以后,受东吴运动的影响,川东地区整体抬升,使得先期沉积的地层遭受不同程度的剥蚀,自南向北剥蚀程度逐渐增加,在川东大竹—梁平以南地区,残余茅三段及其以上地层,向北剥蚀程度增加,

在研究区中部及其以北孤峰段之上大段茅二A亚段和茅三段灰岩被剥蚀殆尽(图5d),由于孤峰段炭质—硅质泥页岩具有难溶的特点,在东吴运动期间得以残留,使得吴家坪组直接覆盖在孤峰段之上(图6),在靠近盆地东北缘的野外剖面上和部分钻井中仍见孤峰段上覆沉积灰岩,为台地—海槽—台地叠置沉积(图2)。

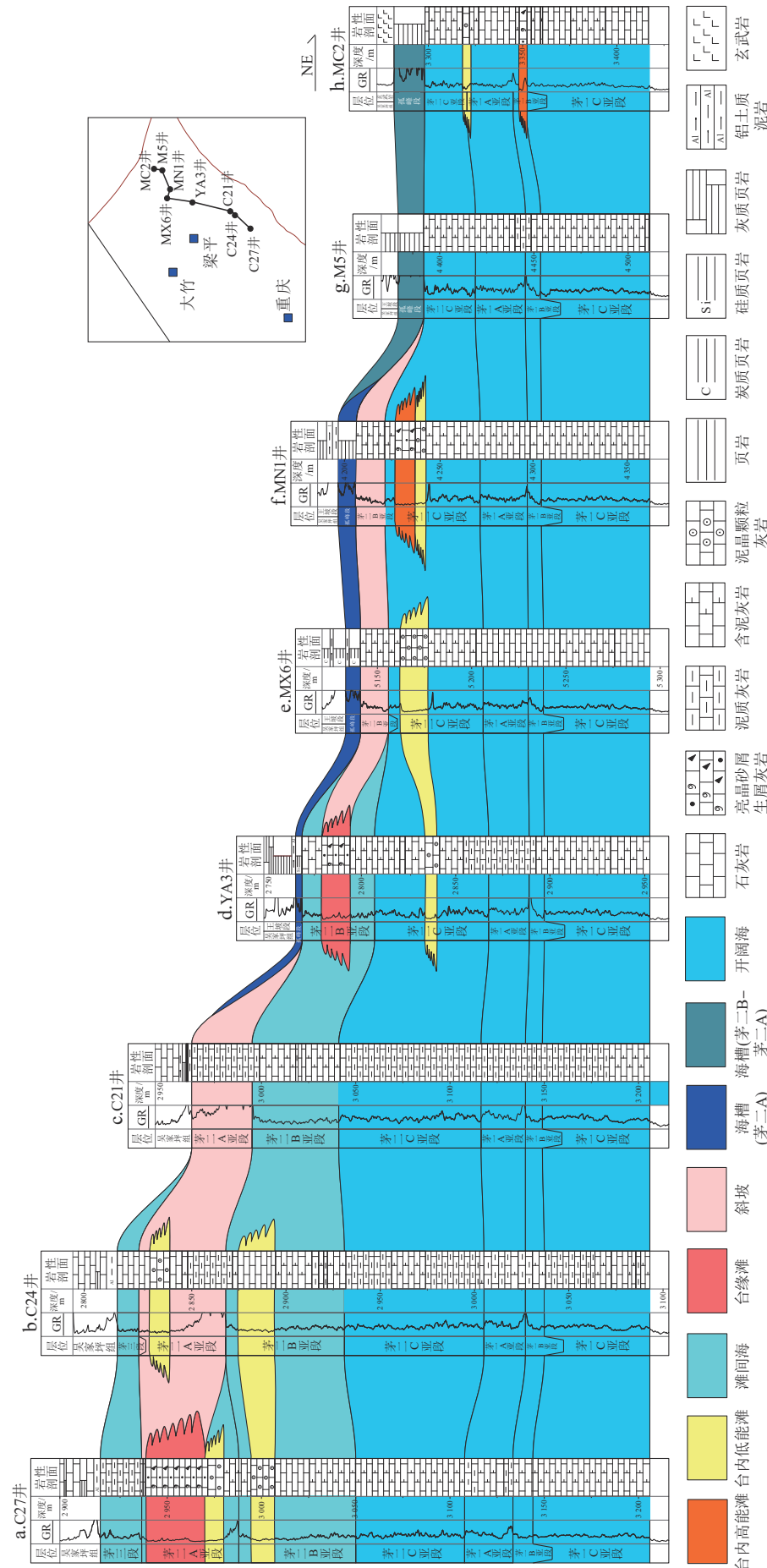


图6 四川盆地东部中二叠统沉积相展布及演化连井剖面

Fig. 6 Well-tied section showing the distribution and evolution of the sedimentary facies in the Middle Permian of eastern Sichuan Basin

4 沉积环境

本次研究对2口钻井和1条野外剖面进行取样,钻井为DT002-4井和C67井,野外剖面为开县红花园剖面。采集样品中包括孤峰段硅质页岩样品8个,吴家坪组硅质页岩3个,茅二段泥质灰岩、含泥灰岩4个,茅二段晶粒白云岩4个(为凸显深水与浅水沉积环境的差异性,特采集研究区C67井4个茅二段晶粒白云岩做对比分析)。本次研究所用主量、微量稀土元素测试结果如表1所示。

当样品 δCe 与 δEu 呈现正相关关系时,表明样品受成岩作用影响^[34],DT002-4井与红花园剖面样品 δCe 与 δEu 相关系数为-0.131,相关性不强,表明其较少受到后期成岩作用的影响;此外,如果沉积物或沉积岩的Y/Ho元素含量比值高于27.00(后太古宙页岩PASS的Y/Ho比值),并且接近44.00(现代海水的Y/Ho比值),表明没有或仅有很少量的陆源碎屑加入^[35],本文所采样品的Y/Ho平均值为39.57,且只有少数样品值脱离上述区间,说明样品仅受少量陆源碎屑的影响,能够反应古海洋环境。

4.1 氧化还原条件

Mo, U, Cr和V等微量元素在沉积物中会因氧化还原条件的改变而发生不同程度的富集,Algeo和Tribouillard的研究表明^[36],在现代低氧开放性海洋系统沉积物中,氧化还原条件与自生Mo-U富集的关系十分明确:①氧化条件下Mo和U基本不富集;②在次氧化条件下Mo和U适度富集;③在缺氧条件下Mo和U强烈富集,而古代低氧海洋系统与现代低氧海洋系统具有相似

的自生Mo-U关系。此外,沉积物中的高Cr和V含量也可以用来指示还原环境,本研究将样品Mo, U, Cr和V元素含量测试值以Mo-U和Cr-V交会图的形式给出,孤峰段大部分硅质页岩样品最为富集,形成于缺氧还原环境;茅二段含泥灰岩、泥质灰岩、孤峰段部分硅质页岩、吴家坪组硅质页岩适度富集,形成于次氧化环境;茅二段晶粒白云岩基本不富集,形成于氧化环境(图7)。

4.2 古水深及古盐度

Rb/K元素含量比值可以用来指示古水深的变化,Rb/K越大,水体越深^[37-38],同时全岩Ce元素含量异常也可以指示海平面的升降,Ce亏损程度越大,海平面越高^[39],Ce异常指数(Ce_{anom})值通过 $\lg[3\text{Ce}_n/(2\text{La}_n+\text{Nd}_n)]$ 计算得出,式中样品的相关REE值引用NASC值标准化,据Rb/K比值与Ce异常值在红花园剖面 and DT002-4井纵向上的趋势可以看出(图8a),DT002-4井中由孤峰段硅质页岩过渡到吴家坪组硅质页岩的沉积时期,Rb/K比值由大变小,Ce异常值由小变大,指示沉积水体由深变浅,水体较动荡。在吴家坪组沉积时期,Rb/K比值和Ce异常值均趋于平缓,但Ce异常值有小幅波动,指示个别时期会发生短暂的海侵,导致海平面上升,但水动力总体较平稳;红花园剖面孤峰段硅质页岩沉积时期,水动力稳定,但由孤峰段硅质页岩过渡到上覆茅二段含泥灰岩、泥质灰岩的沉积时期,Ce异常值小幅度升高后陡降,Rb/K比值连续波动,指示在此过渡时期水体动荡,水体深度变化快,与氧化还原分析结果一致。

Sr/Ca和V/Ni元素含量比值是判定沉积水体古盐度的良好指标,Sr/Ca和V/Ni比值越高,反映沉积水体的含盐度越高^[40-41],DT002-4井Sr/Ca与V/Ni值在孤峰段沉积时期平均分别为0.17和5.76,吴家坪组沉积时

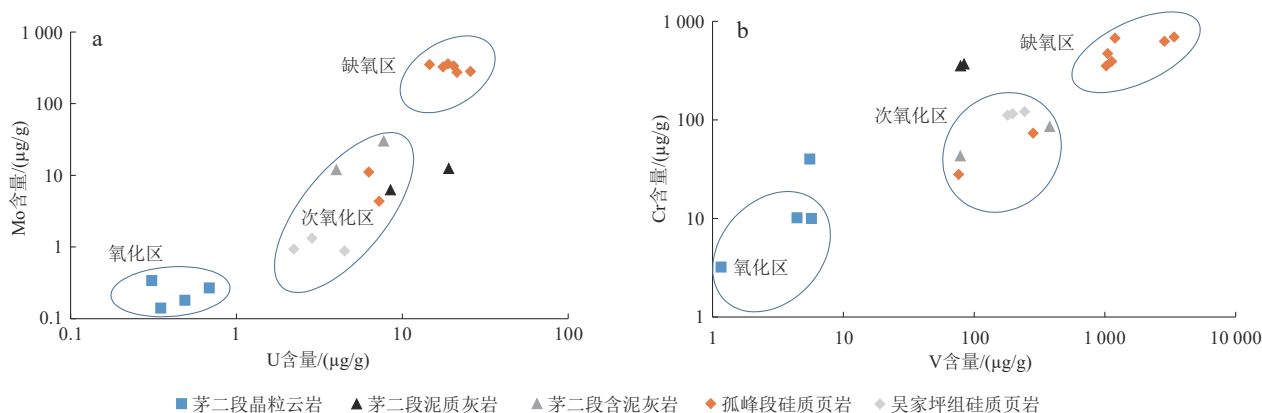


图7 四川盆地东部样品U, Mo, V和Cr微量元素特征

Fig. 7 Correlations of trace elements U, Mo, V and Cr in samples from the eastern Sichuan Basin

a. Mo含量与U含量相关图; b. Cr含量与V含量相关图

表1 四川盆地东部红花园剖面、DT002-4井和C67井茅口组—吴家坪组地球化学特征分析
Table1 Geochemical characteristics of Maokou-Wujiaping formations on Honghuayuan outcrop, and in well DT002-4 and well C67 in eastern Sichuan Basin

取样井/剖面	样品编号	岩性	取样层位	矿物含量/%										微量元素含量/10 ⁻⁶										δCe _{norm}	δEu	Y/Ho			
				Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	K ₂ O	Rb	Sr	Ni	Cr	V	U	Mo	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Y				Ho		
红花园剖面	HHY1	泥质灰岩		5.068	0.793	36.770	24.496	0.281	9.632	2.932	46	215.35	367.12	83.76	8.52	6.28	12.57	8.00	1.83	7.04	1.32	0.27	1.36	13.38	0.27	0.35	-0.48	0.88	49.75
	HHY2	泥质灰岩	茅一段	5.609	1.501	41.644	22.231	0.511	11.169	1.044	62	452.28	350.67	78.49	19.12	12.46	16.83	12.44	2.69	10.56	1.90	0.39	2.06	18.39	0.39	0.39	-0.43	0.87	47.50
	HHY3	含泥灰岩		4.748	0.312	31.060	24.500	0.091	5.218	2.470	89	11.77	42.98	78.46	4.02	11.99	3.28	4.91	0.63	2.21	0.41	0.09	0.42	3.93	0.10	0.74	-0.13	0.94	37.52
	HHY4	含泥灰岩		2.581	0.780	6.189	23.861	0.446	8.815	557.83	72.83	85.11	378.42	7.76	29.98	9.65	12.72	1.37	4.89	0.89	0.19	0.91	7.69	0.19	0.73	-0.16	0.91	40.88	
	HHY5	硅质页岩		1.514	2.827	92.728	0.215	0.382	20.950	280.08	155.27	669.31	1 190.54	18.94	359.32	34.66	38.28	4.82	17.04	21.17	0.62	2.97	16.04	0.53	0.62	-0.23	0.75	30.53	
	HHY6	硅质页岩	孤峰段	1.795	2.784	92.543	0.236	0.346	20.485	275.45	148.73	468.20	1 052.35	20.45	336.27	35.88	37.47	4.76	16.58	17.63	0.55	2.86	15.86	0.48	0.60	-0.25	0.87	33.04	
	HHY7	硅质页岩		1.913	1.809	91.444	0.234	0.500	18.050	258.92	100.46	351.10	1 020.90	14.66	352.40	45.71	49.17	5.90	17.84	7.93	0.48	2.37	8.64	0.28	0.62	-0.23	1.04	30.72	
	HHY8	硅质页岩		1.894	2.054	91.634	0.224	0.480	18.875	251.32	105.64	389.50	1 064.59	17.66	326.24	43.46	51.33	5.82	18.52	30.88	0.46	2.24	8.25	0.23	0.67	-0.19	0.72	35.87	
DT002-4井	DT1	硅质页岩		19.664	8.748	47.763	2.233	2.087	36.901	524.87	69.17	111.22	180.37	2.86	1.32	119.29	234.20	30.66	111.20	13.70	3.07	14.85	48.29	1.85	0.84	-0.05	0.92	26.10	
	DT2	硅质页岩	吴家坪组	21.602	6.755	48.786	1.619	2.264	40.532	549.31	60.44	114.80	197.07	4.50	0.88	109.09	216.27	27.69	99.29	3.22	3.15	14.17	80.25	2.94	0.86	-0.04	0.88	27.26	
	DT3	硅质页岩		14.579	9.867	53.374	2.322	1.417	27.932	308.24	101.85	120.67	243.70	2.23	0.93	55.57	94.93	12.75	44.72	3.13	1.76	6.99	39.42	1.41	0.78	-0.09	0.81	27.87	
	DT4	硅质页岩		27.147	3.063	60.536	0.223	2.292	43.308	711.12	20.59	27.81	76.03	7.27	4.36	178.90	404.18	50.67	217.78	2.71	3.88	16.99	63.75	2.15	0.92	-0.03	0.83	29.70	
	DT5	硅质页岩	孤峰段	44.386	1.221	42.200	0.171	2.218	44.447	488.89	49.22	72.82	282.05	6.30	11.09	83.50	135.16	19.02	71.89	2.83	2.60	11.21	67.67	2.16	0.74	-0.12	0.80	31.28	
	DT6	硅质页岩		1.652	1.642	91.873	0.397	0.260	20.749	126.34	480.45	623.79	3 275.61	21.48	273.58	32.75	40.87	5.46	19.54	3.22	0.58	2.18	15.33	0.45	0.65	-0.20	0.95	34.07	
	DT7	硅质页岩		1.694	1.705	91.958	0.416	0.220	20.666	117.13	498.99	688.69	3 385.55	25.89	281.13	30.50	41.21	5.52	19.80	3.14	0.64	2.27	16.13	0.41	0.68	-0.17	1.04	39.77	
C67井	C1	晶粒云岩		—	—	—	—	—	0.03	84.29	527.13	9.97	5.69	0.69	0.27	1.25	0.42	0.19	0.69	0.15	0.23	0.17	2.68	0.05	0.18	-0.76	6.25	56.97	
	C2	晶粒云岩	茅一段	—	—	—	—	—	0.03	60.52	7741.50	3.19	1.16	0.49	0.18	0.14	0.11	0.03	0.13	0.03	0.01	0.04	0.45	0.01	0.39	-0.43	1.05	51.17	
	C3	晶粒云岩		—	—	—	—	—	0.07	155.47	93.76	10.12	4.41	0.49	0.14	1.70	0.80	0.29	1.05	0.22	0.26	0.22	3.07	0.06	0.25	-0.62	5.15	55.38	
	C4	晶粒云岩		—	—	—	—	—	0.44	1 995.57	114.49	39.93	5.54	0.31	0.34	2.85	1.31	0.32	1.11	0.32	3.76	0.37	2.61	0.04	0.28	-0.60	47.66	66.45	

注:“—”表示该样品未开展相关分析测试。

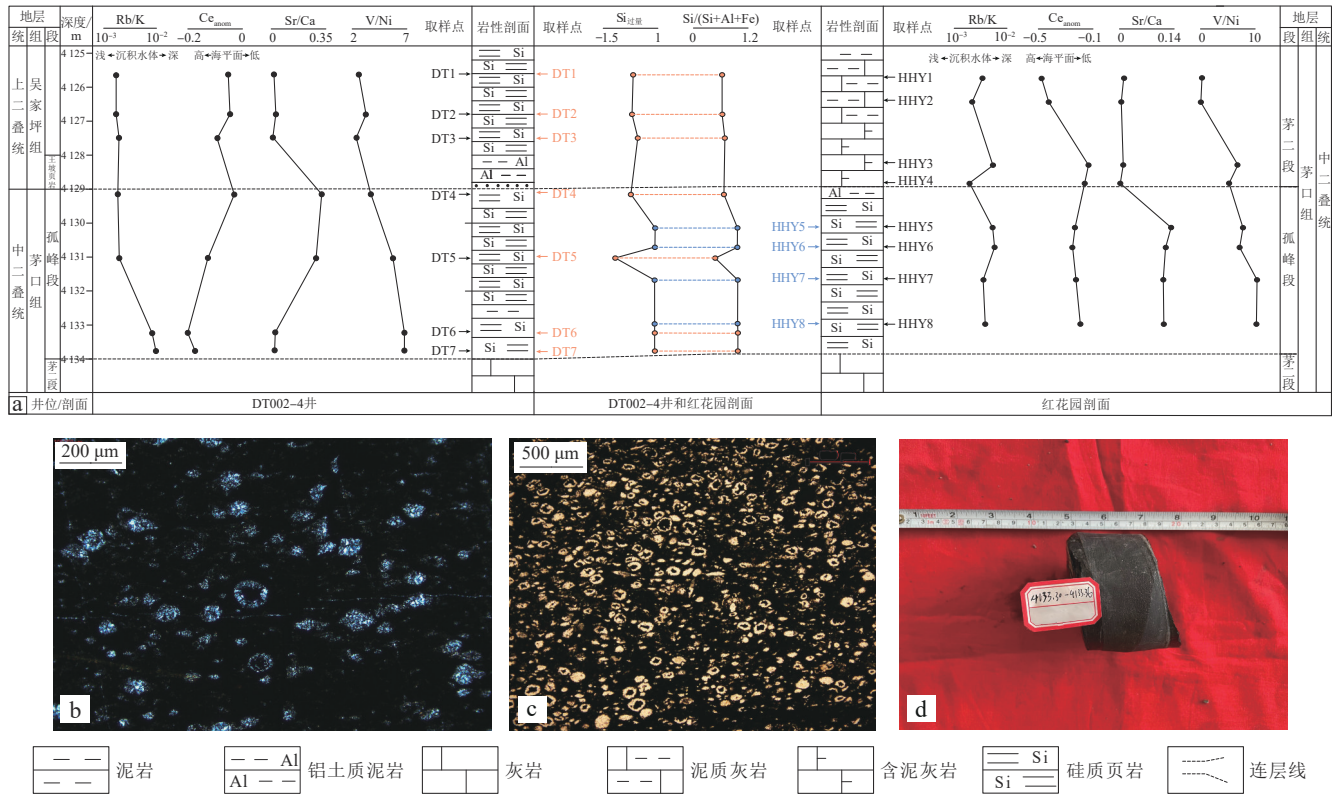


图8 四川盆地东部DT002-4井和红花园剖面茅口组-吴家坪组地球化学及岩石学特征

Fig. 8 Geochemical and petrological characteristics of the Maokou and Wujiaping formations in well DT002-4 and on Honghuayuan outcrop in eastern Sichuan Basin

a. 地球化学特征分布; b. 红花园剖面, 硅质放射虫岩, 正交偏光显微照片, 取样点 HHY7; c. DT002-4 井, 埋深 4 133.3 m, 硅质放射虫岩, 有机质含量高, 单偏光显微照片, 取样点 DT6; d. DT002-4 井, 埋深 4 133.3 m, 硅质放射虫岩, 岩心照片, 取样点 DT6

期其平均分别为 0.07 和 2.75, 结合曲线形态可知 (图 8a), 由孤峰段过渡到吴家坪组古盐度有变小的趋势, 指示沉积水体由孤峰段咸水过渡到吴家坪组半咸水或淡水; 红花园剖面孤峰段硅质页岩 Sr/Ca 与 V/Ni 比值均处于高值区, 上覆茅二段含泥灰岩、泥质灰岩均处于低值区, 自下而上变小趋势明显, 指示由孤峰段过渡到茅二段沉积时期, 水体从咸水过渡到淡水, 与古水深和氧化还原条件分析结果基本一致, 但红花园剖面茅二段泥质灰岩段 Ce 异常指数较低, Rb/K 值较高, 指示沉积水体较深, 甚至与孤峰段硅质页岩水体深度相当, 而泥质灰岩段 Sr/Ca 和 V/Ni 值低, 指示此时期沉积水体古盐度较低, 此处古盐度和古水深分析结果相悖, 可能是由于孤峰段沉积后, 川东地区发育开阔台地沉积, 但由于海平面差异上升, 虽然处于较深水的沉积环境, 但已非高盐度的海水沉积, 同时也不排除实验测试过程中的误差导致。

4.3 硅质来源

过量 Si 指来源于生物作用, $Si_{\text{过量}} = Si_{\text{样品}} - Al_{\text{样品}} \times (Si/Al)_{\text{背景}}$ [(Si/Al)_{背景} 采用平均页岩比值 3.11], 通过对页

岩样品过量 Si 的研究可以明确其硅质来源^[42], Si/(Si+Al+Fe) 元素含量比值越大, 页岩样品硅质来源则与生物成因更相关^[43]。测试结果显示 (图 8a): 红花园剖面硅质页岩样品和 DT002-4 井孤峰段早期沉积的硅质页岩样品, 其过量硅含量远大于 0, 且接近于 1, Si/(Si+Al+Fe) 比值位于高值区, 指示此时期硅质来源于生物作用, 与薄片观察的结果一致 (硅质放射虫岩) (图 8b, c)。DT002-4 井由孤峰段中晚期过渡到吴家坪组时期, 页岩样品过量硅为 0, Si/(Si+Al+Fe) 比值位于低值区, 表明陆源硅占主导。

基于上述氧化还原条件和古水深等地球化学指标的分析, DT002-4 井孤峰段下部主要沉积生物成因的深水硅质页岩, 随着沉积水体逐渐变浅, 孤峰段内部逐渐沉积水体相对浅的, 有部分陆源碎屑硅输入的硅质页岩 (其与吴家坪组硅质页岩具有相似的氧化还原条件, 但沉积水体相对更大), 随后沉积茅口组灰岩, 由于东吴运动的影响茅口组灰岩被全部剥蚀, 在晚二叠世初期, 海平面缓慢上升, 沉积王坡页岩; 红花园剖面孤峰段主要沉积生物成因的深水硅质页岩, 往上逐渐沉积茅二段灰岩 (图 9)。

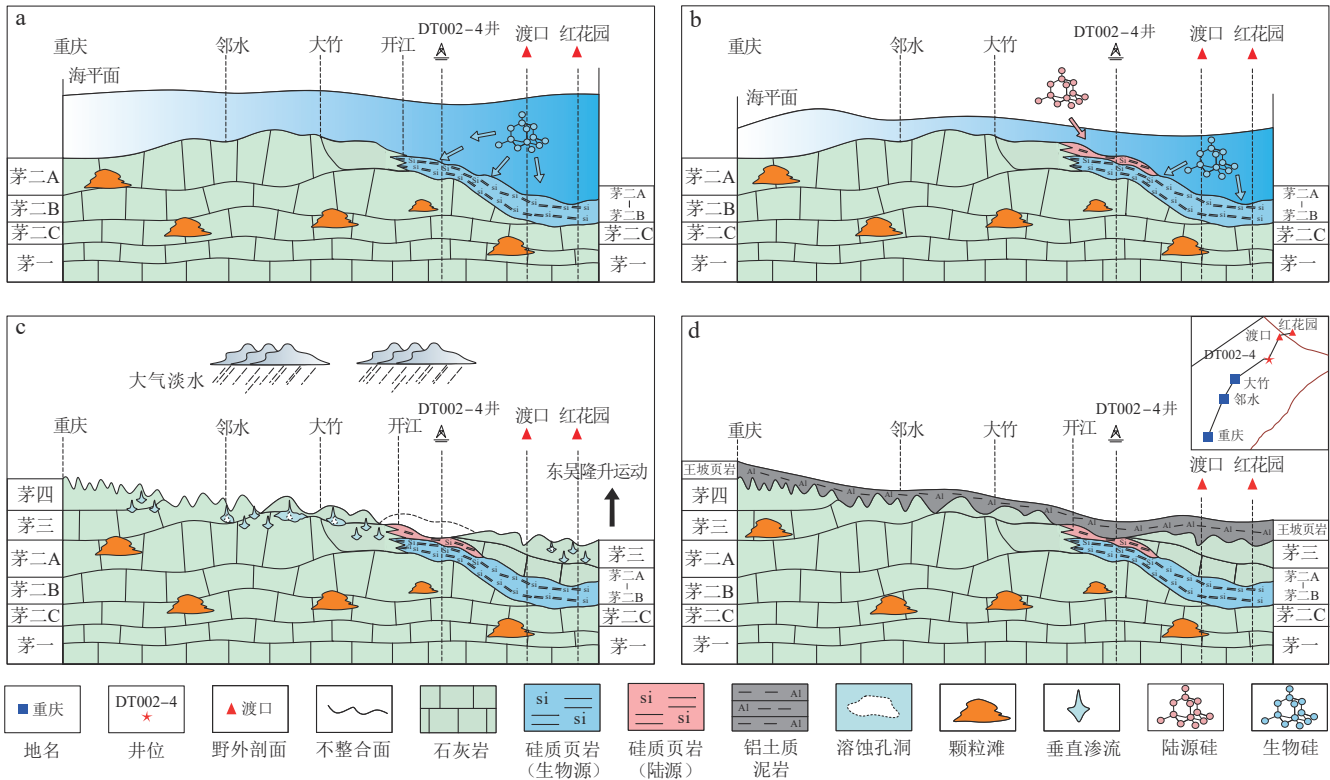


图9 四川盆地东部孤峰段沉积环境演化模式

Fig. 9 Evolutionary model showing the depositional environments of Gufeng Member, eastern Sichuan Basin
a. 孤峰段沉积早期; b. 孤峰段沉积晚期; c. 茅三段—茅四段沉积时期; d. 王坡页岩沉积时期

5 油气地质意义

5.1 孤峰段优质烃源岩

川东地区茅口组顶部孤峰段烃源岩为一套富有机质的优质烃源岩,本研究采用总有机碳含量(TOC)和镜质体反射率(R_o)测试,对DT002-4井和红花园剖面的硅质页岩样品和茅二段泥质灰岩、含泥灰岩样品送样分析,其中孤峰段硅质页岩样品 TOC 分布在1.69%~38.27%,均达到烃源岩标准($TOC>0.50\%$), TOC 大于2.00%的优质烃源岩样品占比达83.30%(表2),吴家坪组硅质页岩和茅二段泥质灰岩 TOC 较高,也为优质烃源岩,而茅二段含泥灰岩仅为0.43%,未达到烃源岩标准。孤峰段硅质页岩 R_o 介于2.31%~2.98%(表2),均值为2.64%,茅二段泥质灰岩和吴家坪组硅质页岩 R_o 均大于2.00%,指示这些样品均处于过成熟阶段,属于深部高温生气阶段^[44]。

5.2 成藏组合

四川盆地茅口组气藏存在多源供烃,除志留系、吴

表2 四川盆地东部红花园剖面 and DT002-4井有机质丰度及成熟度特征(取样点位置见图8a)

Table 2 Maturity and abundance of organic matter on Honghuayuan outcrop and in Well DT002-4 in eastern Sichuan Basin (see Fig. 8a for the sampling points)

序号	取样点	层位	岩性	TOC/%	R_o /%
1	DT1	吴家坪组	硅质页岩	5.73	2.52
2	DT2	吴家坪组	硅质页岩	5.86	2.64
3	DT3	吴家坪组	硅质页岩	2.55	2.54
4	DT4	孤峰段	硅质页岩	1.69	2.58
5	DT5	孤峰段	硅质页岩	5.96	2.78
6	DT6	孤峰段	硅质页岩	38.27	2.98
7	DT7	孤峰段	硅质页岩	4.11	2.91
8	HHY5	孤峰段	硅质页岩	7.05	2.53
9	HHY7	孤峰段	硅质页岩	11.98	2.31
10	HHY1	茅二A亚段	泥质灰岩	5.17	2.18
11	HHY2	茅二A亚段	泥质灰岩	6.97	2.26
12	HHY3	茅二A亚段	含泥灰岩	0.43	2.28

家坪组烃源和茅一段泥质岩类烃源外^[45-46],川东地区孤峰段自身烃源的贡献也不容忽视,研究区内主要发育白云岩储层和风化壳型岩溶储层,茅口组白云岩储层纵向上主要发育在茅二A亚段,横向上分布在广安—邻水—丰都一带台地边缘相内,储层类型为裂

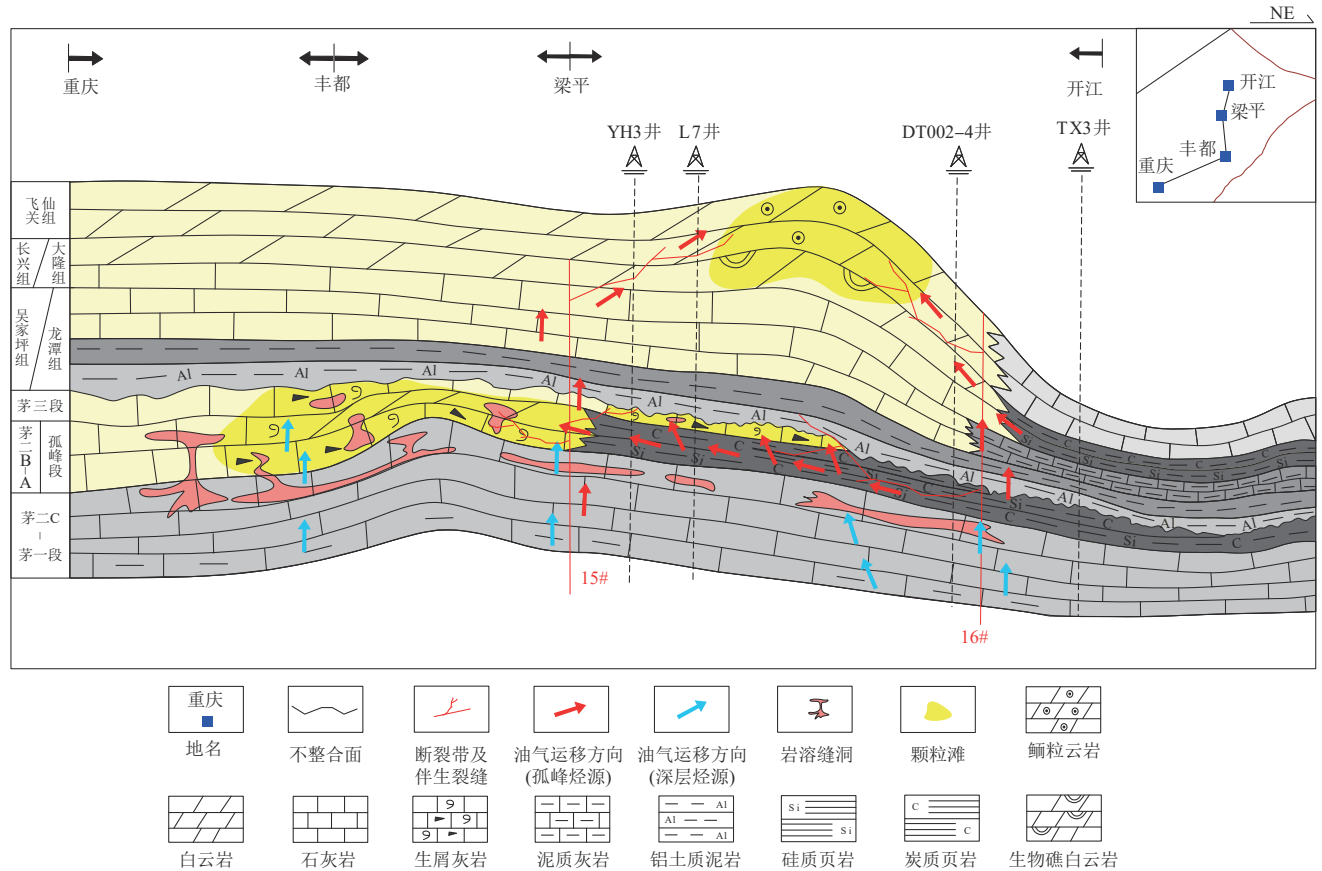


图10 四川盆地东部中二叠统油气成藏模式

Fig. 10 Hydrocarbon accumulation model of the Middle Permian in the eastern Sichuan Basin

缝-孔洞型。茅口组岩溶是典型的相控型岩溶,岩溶型储层纵向上发育在茅二B亚段—茅三段,主要分布在台地边缘相和开阔台地台内滩中,储层类型主要为裂缝-孔洞型。上述优势相带内储层发育,为油气储集的良好场所。峨眉地裂运动形成的断裂及伴生的裂缝系统和茅口组顶部因受剥蚀而形成的不整合面可作为油气运移聚集成藏的输导体系^[47-50],研究区北部茅二B—茅二A沉积时期形成的孤峰段优质烃源可通过油气输导体系向南运移到不同时期台地边缘相储集层中,或在向南运移的同时向上运移至茅三段台内滩相储集层中,形成“下生上储”和“旁生侧储”的成藏组合。此外,川东地区孤峰段与长兴组-飞仙关组开江-梁平海槽东南侧台地边缘相具有较好的纵向叠置关系,孤峰段烃源可通过断裂构成的纵向输导体系向上运移至台缘礁滩相储层中聚集成藏(图10)。

6 结论

1) 本研究结合野外露头、钻井、地球化学等资料,

证实川东茅口组孤峰段的存在,从四川盆地东部沉积-构造格局深入分析,明确茅口组中晚期受构造-沉积分异的影响,出现槽台格局。在茅二B沉积期,川东地区孤峰段主要分布在盆地东北角;在茅二A沉积期,孤峰段向南扩大到研究区中部,呈北西-南东向带状展布,厚度0.8~26.6 m,川西北—川北地区则对应茅三段或茅四段。

2) 孤峰段硅质页岩富含硅质放射虫,有机质含量高,具有典型的深水海槽相沉积特征,地球化学测试数据反映硅质页岩为深水缺氧还原环境且盐度较高,硅质来源以生物硅为主;

3) 孤峰段烃源岩为一套富有机质的优质烃源岩,TOC整体较高,变化范围大,分布在1.69%~38.27%,平均值为11.51%,处于成熟-过成熟阶段;

4) 川东地区孤峰段优质烃源岩可通过断裂与开江-梁平海槽礁滩相储层沟通,构成“下生上储”的源-储关系。此外,也可与茅口组优势滩相储层形成“旁生侧储”的成藏组合。川东地区孤峰段有望作为区域内优质烃源岩的接力勘探层系,对研究区内下一步油气勘探开发具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 胡世忠. 对孤峰组的新认识[J]. 火山地质与矿产, 2000, 21(1): 63-68.
HU Shizhong. New consideration of Gufeng Formation by stratigraphy check up [J]. Volcanology & Mineral Resources, 2000, 21(1): 63-68.
- [2] 付小东, 陈娅娜, 罗冰, 等. 四川盆地北部中二叠统茅口组孤峰段优质烃源岩特征及其油气地质意义[J]. 地质学报, 2021, 95(6): 1903-1920.
FU Xiaodong, CHEN Yana, LUO Bing, et al. Characteristics and petroleum geological significance of the high-quality source rocks in the Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation in the northern Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(6): 1903-1920.
- [3] 陈卫东, 陈义才, 徐发波, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组地层划分、对比与岩溶古地貌恢复[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 27-36.
CHEN Weidong, CHEN Yicai, XU Fabo, et al. Stratigraphic division and correlation and karst palaeogeomorphology restoration of the Middle Permian Maokou Formation in the eastern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 27-36.
- [4] 张玺华, 陈聪, 黄婕, 等. 四川盆地中二叠统广元—巴中拉张槽的发现及其油气地质意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 466-475.
ZHANG Xihua, CHEN Cong, HUANG Jie, et al. The discovery of Middle Permian Guangyuan-Bazhong extensional trough in the Sichuan Basin and its petroleum geological significance [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 466-475.
- [5] 王兴志, 李博, 杨西燕, 等. 四川盆地北部中二叠世晚期“广元—旺苍”海槽特征及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 562-574.
WANG Xingzhi, LI Bo, YANG Xiyan, et al. Characteristics of “Guangyuan-Wangcang” trough during Late Middle Permian and its petroleum geological significance in northern Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 562-574.
- [6] 陈韵骐. 川东地区中二叠统茅口组颗粒滩分布规律及对风化壳岩溶的控制[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
CHEN Yunqi. Distribution law of grain shoals in the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan and its control on weathering crust karst [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [7] 徐国盛, 何玉, 袁海峰, 等. 四川盆地嘉陵江组天然气藏的形成与演化研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(2): 171-178, 20.
XU Guosheng, HE Yu, YUAN Haifeng, et al. Study on the formation and evolution of gas accumulation in Lower Triassic Jialingjiang Formation of Sichuan Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(2): 171-178, 20.
- [8] 周雁, 陈洪德, 王成善, 等. 中扬子区中二叠统层序地层研究[J]. 地层学杂志, 2005, 29(3): 270-274, 280.
ZHOU Yan, CHEN Hongde, WANG Chengshan, et al. The Middle Permian sequence stratigraphy of the Mid-Yangtze area [J]. Journal of Stratigraphy, 2005, 29(3): 270-274, 280.
- [9] 刘雁婷, 张文军, 熊治富, 等. 四川盆地东北部中二叠统层序地层特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2014, 34(2): 47-53.
LIU Yanting, ZHANG Wenjun, XIONG Zhifu, et al. Sequence stratigraphy of the Middle Permian strata in northeastern Sichuan Basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2014, 34(2): 47-53.
- [10] 杨光, 汪华, 沈浩, 等. 四川盆地中二叠统储层特征与勘探方向[J]. 天然气工业, 2015, 35(7): 10-16.
YANG Guang, WANG Hua, SHEN Hao, et al. Characteristics and exploration prospects of Middle Permian reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(7): 10-16.
- [11] 黎荣, 胡明毅, 杨威, 等. 四川盆地中二叠统沉积相模式及有利储集体分布[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 369-379.
LI Rong, HU Mingyi, YANG Wei, et al. Sedimentary facies model and favorable reservoir distribution of the Middle Permian in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 369-379.
- [12] VAIL P R, AUDEMARD F, BOWMAN S A, et al. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology: An overview [M]//EINSELE G, RICKEN W, SEILACHER A. Cycles and Events in Stratigraphy. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 617-659.
- [13] 梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 等. 湘鄂西—川东中生代陆内递进扩展变形:来自裂变径迹和平衡剖面的证据[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2010, 35(2): 161-174.
MEI Lianfu, LIU Zhaoqian, TANG Jiguang, et al. Mesozoic intra-continental progressive deformation in western Hunan-Hubei-eastern Sichuan provinces of China: Evidence from apatite fission track and balanced cross-section [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2010, 35(2): 161-174.
- [14] 刘树根, 邓宾, 钟勇, 等. 四川盆地及周缘下古生界页岩气深埋藏—强改造独特地质作用[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 11-28.
LIU Shugen, DENG Bin, ZHONG Yong, et al. Unique geological features of burial and superimposition of the Lower Paleozoic shale gas across the Sichuan Basin and its periphery [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 11-28.
- [15] 吴航. 川东地区中—新生代构造隆升过程研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
WU Hang. Meso-Cenozoic tectonic uplift process of the eastern Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [16] 王文飞. 四川盆地东部中二叠统茅口组沉积与层序地层特征[J]. 断块油气田, 2015, 22(2): 154-159.
WANG Wenfei. Sedimentary and sequence stratigraphic characteristics of Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2015, 22(2): 154-159.
- [17] 张亮鉴, 丁伟明, 朱世新, 等. 四川盆地东南部卫星象片的构造解译[J]. 成都地质学院学报, 1981, 8(3): 80-88.
ZHANG Liangjian, DING Weiming, ZHU Shixin, et al.

- Structural interpretation of satellite images in the southeastern Sichuan Basin [J]. *Journal of Chengdu Institute of Geology*, 1981, 8(3): 80–88.
- [18] 雷涵. 四川盆地茅口组一段眼球-眼皮状石灰岩成因及储层微观特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- LEI Han. Genesis and reservoir microscopic characteristics of eyelid-eyeball-shaped limestone in the 1st Member of Maokou Formation, Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2021.
- [19] 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): 1–8.
- 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): 1–8.
- [20] 李源, 陈胜, 王鹏, 等. 川南地区下二叠统茅口组岩溶储集体地震识别[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(5): 529–540.
- LI Yuan, CHEN Sheng, WANG Peng, et al. Seismic response identification of karst reservoir in Lower Permian Maokou Formation in southern Sichuan Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(5): 529–540.
- [21] 罗进雄, 何幼斌. 中-上扬子地区二叠系眼球状石灰岩特征及成因研究[J]. 地质论评, 2010, 56(5): 629–637.
- LUO Jinxiong, HE Youbin. Origin and characteristics of Permian eyeball-shaped limestones in Middle–Upper Yangtze region [J]. *Geological Review*, 2010, 56(5): 629–637.
- [22] 胡东风, 王良军, 张汉荣, 等. 碳酸盐岩烃源岩气藏的发现及其油气地质意义——以四川盆地涪陵地区中二叠统茅口组一段气藏为例[J]. 天然气工业, 2020, 40(7): 23–33.
- HU Dongfeng, WANG Liangjun, ZHANG Hanrong, et al. Discovery of carbonate source rock gas reservoir and its petroleum geological implications: A case study of the gas reservoir in the first member of Middle Permian Maokou Formation in the Fuling area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(7): 23–33.
- [23] 潘磊, 秦华, 张文睿, 等. 川东南地区二叠系—三叠系碳酸盐岩气藏气源及成因类型[J]. 断块油气田, 2022, 29(2): 245–250.
- PAN Lei, QIN Hua, ZHANG Wenrui, et al. Gas source and genetic types of Permian-Triassic carbonate gas reservoirs in southeast Sichuan [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(2): 245–250.
- [24] 金若谷. 一种深水沉积标志——“瘤状结核”及其成因[J]. 沉积学报, 1989, 7(2): 51–61.
- JIN Ruogu. A deep water sedimentary criteria—“knotty nodule” and origin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1989, 7(2): 51–61.
- [25] 李让彬, 段金宝, 潘磊, 等. 川东地区中二叠统茅口组白云岩储层成因机理及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(9): 1347–1357.
- LI Rangbin, DUAN Jinbao, PAN Lei, et al. Genetic mechanism and main controlling factors of the Middle Permian Maokou Formation dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(9): 1347–1357.
- [26] 梅仕龙, 金玉环, WARDLAW B R. 四川宣汉渡口二叠纪“孤峰组”牙形石序列及其全球对比意义[J]. 古生物学报, 1994, 33(1): 1–23.
- MEI Shilong, JIN Yugan, WARDLAW B R. Succession of conodont zones from the Permian “Kuhfeng” Formation, Xuanhan, Sichuan and its implication in global correlation [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1994, 33(1): 1–23.
- [27] 吴勘, 马强分, 冯庆来. 扬子板块北缘孤峰组地层划分及空间分布特征[J]. 地层学杂志, 2015, 39(1): 33–39.
- WU Kan, MA Qiangfen, FENG Qinglai. Stratigraphic division and spatial distribution of the Middle Permian Kuhfeng Formation in the northern Yangtze Block [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2015, 39(1): 33–39.
- [28] 李宏博, 朱江. 峨眉山玄武岩与茅口组灰岩的接触关系: 对峨眉山地幔柱动力学模型的指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 571–579.
- LI Hongbo, ZHU Jiang. Contact between the Emeishan basalt and Maokou Formation: Implication for the geodynamic model of the Emeishan mantle plume [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(4): 571–579.
- [29] 谷志东, 殷积峰, 姜华, 等. 四川盆地宣汉—开江古隆起的发现及意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 893–904.
- GU Zhidong, YIN Jifeng, JIANG Hua, et al. Discovery of Xuanhan–Kaijiang paleouplift and its significance in the Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 893–904.
- [30] 赵宗举, 朱琰, 邓红婴, 等. 中国南方古隆起对中、古生界原油气藏的控制作用[J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 10–17, 27.
- ZHAO Zongju, ZHU Yan, DENG Hongying, et al. Control of paleouplifts to the Meso-Paleozoic primary oil and gas pools in the south of China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(1): 10–17, 27.
- [31] 韩克猷. 川东开江古隆起大中型气田的形成及勘探目标[J]. 天然气工业, 1995, 15(4): 1–5, 107.
- HAN Keyou. Forming of large-middle scale gas fields at Kaijiang palaeohigh in east Sichuan and exploration target [J]. *Natural Gas Industry*, 1995, 15(4): 1–5, 107.
- [32] 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 746–768.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin, DONG Yunpeng, et al. Rethinking of the Qinling orogen [J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(5): 746–768.
- [33] 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): 8–15.
- ZHOU Jingao, YAO Genshun, YANG Guang, et al. Lithofacies palaeogeography and favorable gas exploration zones of Qixia and Maokou Fms in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(4): 8–15.
- [34] 陈松, 傅雪海, 桂和荣, 等. 皖北新元古界望山组灰岩微量元

- 素地球化学特征[J]. 古地理论, 2012, 14(6): 813-820.
- CHEN Song, FU Xuehai, GUI Herong, et al. Geochemical characteristics of trace elements in limestone of the Neoproterozoic Wangshan Formation in northern Anhui Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(6): 813-820.
- [35] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 91-99.
- CHANG Huajin, CHU Xuelei, FENG Lianjun, et al. Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies [J]. Geological Review, 2009, 55(1): 91-99.
- [36] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, BAUDIN F, et al. Analysis of marine environmental conditions based on molybdenum-uranium covariation—Applications to Mesozoic paleoceanography [J]. Chemical Geology, 2012, 324/325: 46-58.
- [37] 刘振庄. 宣城地区GD1井中上二叠统页岩元素地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- LIU Zhenzhuang. Elementary geochemistry of Middle-Upper Permian shale from Well GD1 in Xuancheng area [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020.
- [38] 郑一丁, 雷裕红, 张立强, 等. 鄂尔多斯盆地东南部张家滩页岩元素地球化学、古沉积环境演化特征及油气地质意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7): 1395-1404.
- ZHENG Yiding, LEI Yuhong, ZHANG Liqiang, et al. Characteristics of element geochemistry and paleo sedimentary environment evolution of Zhangjiantan shale in the southeast of Ordos Basin and its geological significance for oil and gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7): 1395-1404.
- [39] 冯洪真, ERDTMANN B D, 王海峰. 上扬子区早古生代全岩Ce异常与海平面长缓变化[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2000, 30(1): 66-72.
- FENG Hongzhen, ERDTMANN B D, WANG Haifeng. Early Paleozoic whole rock Ce anomaly and sea level change in the Upper Yangtze region [J]. Science China Earth Sciences, 2000, 30(1): 66-72.
- [40] 李进龙, 陈东敬. 古盐度定量研究方法综述[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(5): 1-3, 5.
- LI Jinlong, CHEN Dongjing. Summary of quantified research method on paleosalinity [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(5): 1-3, 5.
- [41] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用——以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 307-310, 314.
- LIU Gang, ZHOU Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment——Taking Qianjiang Formation in the Jianghan Basin as an example [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 307-310, 314.
- [42] 肖威, 张兵, 姚永君, 等. 川东二叠系龙潭组页岩岩相特征与沉积环境[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 152-162.
- XIAO Wei, ZHANG Bing, YAO Yongjun, et al. Lithofacies and sedimentary environment of shale of Permian Longtan Formation in eastern Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(2): 152-162.
- [43] HARRIS N B, MISKIMINS J L, MNICH C A. Mechanical anisotropy in the Woodford Shale, Permian Basin: Origin, magnitude, and scale [J]. The Leading Edge, 2011, 30(3): 284-291.
- [44] 李二庭, 靳军, 王剑, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷周缘中、浅层天然气地球化学特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 175-185.
- LI Erting, JIN Jun, WANG Jian, et al. Geochemical characteristics and genesis of mid-to-shallow natural gas on the periphery of Shawan Sag, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 175-185.
- [45] 汪泽成, 江青春, 黄士鹏, 等. 四川盆地中二叠统茅口组天然气大面积成藏的地质条件[J]. 天然气工业, 2018, 38(1): 30-38.
- WANG Zecheng, JIANG Qingchun, HUANG Shipeng, et al. Geological conditions for massive accumulation of natural gas in the Mid-Permian Maokou Fm of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(1): 30-38.
- [46] 张宇, 曹清古, 罗开平, 等. 四川盆地二叠系茅口组油气藏勘探发现与启示[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 610-620.
- ZHANG Yu, CAO Qinggu, LUO Kaiping, et al. Reservoir exploration of the Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and enlightenment obtained [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 610-620.
- [47] 尹帅, 孙晓光, 邬忠虎, 等. 鄂尔多斯盆地东北缘上古生界构造演化及裂缝耦合控气作用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3724-3737.
- YIN Shuai, SUN Xiaoguang, WU Zhonghu, et al. Coupling control of tectonic evolution and fractures on the Upper Paleozoic gas reservoirs in the northeastern margin of the Ordos Basin [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3724-3737.
- [48] 许茜, 王彦明, 张雯超. 基于正交试验的充填体力学及微观特性研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(6): 90-98.
- XU Qian, WANG Yanming, ZHANG Wenchao. Mechanical performances and microscopic properties of cemented backfilling based on orthogonal experiment [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 90-98.
- [49] 夏雨, 卢爱红. 连续级配高强胶结充填体力学特性及破坏特征分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(1): 013037.
- XIA Yu, LU Aihong. Analysis of the mechanical properties and damage characteristics of continuously graded high-strength cemented backfill [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(1): 013037.
- [50] 尹帅, 邬忠虎, 吴晓明, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区洪德区块侏罗系延安组油藏富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1167-1179.
- YIN Shuai, WU Zhonghu, WU Xiaoming, et al. Oil enrichment law of the Jurassic Yan'an Formation, Hongde Block, Longdong area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1167-1179.