

四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组细粒沉积的层序地层与岩相特征

胡宗全^{1,2,3}, 杜伟^{1,2,3}, 朱彤^{1,2,3}, 刘曾勤^{1,2,3}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化页岩油气重点实验室, 北京 102206; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

摘要:以四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组一段页岩为研究对象,通过对页岩气测录井资料及岩心和露头样品分析测试数据的对比分析,开展了层序地层划分与对比、岩相分类与识别、沉积微相-岩相分布规律研究。研究认为,五峰组-龙马溪组一段页岩可划分为3个三级层序(SQ1, SQ2和SQ3),细分为7个体系域,优质页岩主要分布于3个层序的海侵体系域(TST),其中SQ2-TST优质页岩发育范围最广,其岩相类型主要为富有机质硅质页岩、高有机质含灰硅质页岩和中-高有机质含硅粘土质页岩等。同时明确了不同类型无机矿物的区域分布规律,靠近川中古陆和黔北隆起区域碳酸盐矿物含量相对较高,随着水体深度的增加,碳酸盐矿物含量逐渐降低,生物成因石英含量逐渐增加。以SQ2-TST为例,以3种主要矿物(石英、粘土和碳酸盐)含量等值线图、总有机碳含量(TOC)等值线图为基础,结合地球化学参数(Th/U)和地层厚度等参数等值线图,编制了SQ2-TST沉积相-岩相平面分布图。四川盆地及其周缘SQ2-TST沉积时期,在川中古陆、黔北隆起和川北古陆周缘,主要发育中-低有机质粘土质页岩和中-低有机质含灰硅质粘土质页岩,在川中古陆与黔北隆起所围限的川南深水陆棚亚相区主要发育富有机质含灰硅质粘土质页岩,而涪陵地区向川东北延伸区域主要发育富有机质硅质页岩。

关键词:细粒沉积;层序地层;岩相;五峰组;龙马溪组;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sequence stratigraphy and lithofacies characteristics of fine-grained deposits of Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and on its periphery

Hu Zongquan^{1,2,3}, Du Wei^{1,2,3}, Zhu Tong^{1,2,3}, Liu Zengqin^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China; 2. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. Petroleum Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper takes the shale samples from the Wufeng Formation and the first member of Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its periphery as the research subject. Through the comparative analysis of drilling data, core and outcrop analysis, and test data, a study on the sequence stratigraphic division and correlation, lithofacies classification and identification, and sedimentary microfacies-lithofacies distribution of the rocks is carried out. The results show that the fine-grained deposits of study interval can be divided into three third-order sequences (SQ1, SQ2, and SQ3), which are subdivided into seven systems tracts. High-quality shales are mainly distributed in the transgressive systems tracts (TST) of the three sequences, of which high-quality shales of SQ2-TST are the most widely distributed. The lithofacies are mainly organic siliceous shale, organic-rich limy siliceous shale, and medium-high organic siliceous argillaceous shale. The regional distribution of different types of inorganic minerals is clarified. The contents of carbonate minerals are relatively high near the central Sichuan paleo-high and northern Guizhou Uplift. With the increase of water depth, the contents of clay minerals and quartz minerals gradually increase. The sedimentary-lithofacies of SQ2-TST is mapped by using the contour maps of the content of three terminal principal minerals (quartz, clay, and carbonate) and the

收稿日期:2022-05-07;修订日期:2022-07-20。

第一作者简介:胡宗全(1971—),男,教授级高级工程师,沉积与油气储层、致密砂岩与页岩油气地质勘探。E-mail: huzongquan_syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技部项目(P21042-3)。

content of total organic carbon (TOC), in combination with the contour maps of parameters such as geochemical parameters (Th/U) and isopachous maps. On the periphery of the central Sichuan paleo-high, central northern Guizhou paleo-high, and northern Sichuan paleo-high, medium-low organic argillaceous shales and medium-low organic limy siliceous argillaceous shales deposited. In the deep-water shelf of southern Sichuan Basin enclosed by the central Sichuan paleo-high and central northern Guizhou paleo-high, organic-rich limy siliceous argillaceous shales are mainly deposited. organic-rich siliceous shales are mainly developed in the Fuling area extending to the northeast of the Sichuan Basin.

Key words: fine-grained deposits, sequence stratigraphy, lithofacies, Wufeng Formation, Longmaxi Formation, Sichuan Basin

引用格式:胡宗全,杜伟,朱彤,等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组细粒沉积的层序地层与岩相特征[J]. 石油与天然气地质,2022,43(5):1024-1038. DOI:10.11743/ogg20220502.

Hu Zongquan, Du Wei, Zhu Tong, et al. Sequence stratigraphy and lithofacies characteristics of fine-grained deposits of Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and on its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5):1024-1038. DOI:10.11743/ogg20220502.

近年来,随着页岩油气勘探开发在全球的迅猛展开,使以页岩为代表的细粒岩沉积学研究愈来愈受到重视。细粒沉积岩是由粒径小于 $62\mu\text{m}$ 的“细粒沉积物质”组成,成分主要包含粘土矿物、粉砂、碳酸盐和有机质等^[1-3]。中国页岩气率先在四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩层系取得勘探开发重大突破,发现了涪陵、长宁等大型页岩气田并实现规模开发,并形成了一系列创新性认识^[4-8]。前人研究中多用优质页岩[总有机碳含量(TOC)>2%]连续厚度这一参数来评估四川盆地各地区五峰组-龙马溪组的页岩品质^[9]。随着页岩气田勘探开发的不断深入,多数学者发现五峰组-龙马溪组优质页岩存在明显的纵向非均质性,不同地区优质页岩层序地层格架和页岩岩相类型影响和控制了页岩气田的产能^[10-14]。

细粒沉积岩具有低速、薄层、无机-有机组分混合沉积的特点,细粒沉积岩研究比高能粗粒沉积岩要相对薄弱,针对其层序地层和岩相研究的方法技术尚不成熟和完善。首先是薄层层序地层的划分问题。细粒沉积岩多沉积于深水环境,被视为沉积速率极低的“凝缩段”。目前针对深水细粒沉积岩层序地层的研究方法主要有:①利用矿物成分、岩相及其组合法判断相对海平面变化^[15-16];②利用地球化学特征,包括有机地球化学、同位素化学等反映氧化还原条件及相对海平面的变化^[17];③依据测井划分层序界面^[18-21];④运用古生物确定时代和层序界面。研究发现,单一指标只能反映细粒沉积某一方面的特征,所以需要综合多方面特征和多种参数来对其进行层序地层与沉积研究^[14-16,22-24]。其次是细粒沉积岩岩相的识别问题。国外针对北美的Barnett, Bakken, Eagle Ford, Horn River和Marcellus等典型页岩等均开展了细粒沉积岩岩相

类型的划分与识别研究^[25-29]。国内关于细粒沉积岩早期研究的划分依据主要包括:①沉积构造与成分;②层序结构、沉积构造和有机地球化学特征^[3]。后期随着技术的进步,划分依据中结合背散射电子成像技术、扫描电镜和能谱分析,着重描述细粒沉积岩的微观组构和成分特征,着眼于有机质在非常规油气勘探中的重要作用,提出将其作为岩相划分的依据^[3]。由于细粒沉积岩粒径小,以细粉砂-粘土级碎屑沉积物及微晶-泥晶的化学沉积物或生物化学沉积物为主,成分多样且成因复杂,包括陆源沉积物(石英、长石、岩屑、粘土等)、盆地内部化学或生物-化学沉积物(生物硅、碳酸盐、黄铁矿、有机质)。前人普遍认为粘土矿物与有机质之间具有较好的共伴生关系,而陆源碎屑矿物与有机质之间具有较差的共生关系。最后是细粒沉积岩相的分布规律问题。针对深水的沉积模式研究尚在快速发展完善之中,目前对于垂向上的沉积环境演化规律及指示标志、平面上无机矿物和有机质的分布规律等方面的认识还不深入。四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩石英含量自下而上逐渐降低、粘土矿物含量自下而上逐渐升高,碳酸盐矿物在不同地区分布规律不同。涪陵页岩气田优质页岩层段石英含量较高,平均40%~55%,碳酸盐矿物含量小于10%,而威荣页岩气田以及长宁页岩气田中碳酸盐矿物含量大于20%。对该套页岩垂向上岩相随沉积环境演化,变化规律以及平面上不同岩相组合特征的认识还不深入。

本研究以四川盆地及其周缘地区的五峰组-龙马溪组一段页岩层系为研究对象(图1),以川东南地区页岩气钻井和川北地区野外露头为资料点,利用录井、测井、薄片、全岩X射线衍射和氩离子抛光扫描电

镜等分析测试数据,区域上构建了从川南威荣气田—永川—川东南涪陵气田—武隆—彭水横切深水陆棚相区、从川东南仁怀—丁山—南川—涪陵气田—建南—川东北巫溪沿深水陆棚相区、从川北剑阁—旺苍—南江—通江—川东北城口—巫溪横切北部陆棚相区等3条钻井和露头对比剖面,明确了四川盆地及其周缘不同地区五峰组—龙马溪组优质页岩展布特征,运用微观尺度观察手段和定量测试技术(全岩X射线衍射)进行岩相特征描述和定量分类,实现岩相参数分布定量预测和沉积相—岩相平面分布综合预测。

1 区域地质背景

四川盆地位于扬子准地台的西北部,介于龙门山—大巴山台缘坳陷与滇黔川鄂台褶带之间,盆地呈北东

向菱形四边形展布,是中生代发育起来的大型内陆盆地(图1)。早奥陶世晚期—志留纪,华夏板块与扬子板块的汇聚使得四川盆地处于挤压应力环境,盆地性质为克拉通背景下继承性挤压拗陷盆地,克拉通边缘持续挤压隆升,形成“三隆夹一拗”(川中古隆起、黔北古隆起和雪峰古隆起夹持的陆内拗陷)的沉积格局^[30-33],沉积环境为低能、欠补偿、缺氧的深水陆棚沉积,为五峰组—龙马溪组页岩中有机质的生成和保存提供了有利的沉积环境^[22]。随着五峰组—龙马溪组页岩基础地质特征研究的逐渐深入,借鉴古生物学家对奥陶系—志留系深水笔石带和浅水壳相的研究成果,多数学者认识到奥陶系—志留系之间沉积环境曾经发生重大变迁^[31-34]。陈旭提出笔石种属在奥陶纪和志留纪交替过程中发生了剧变,五峰组发育高分异度笔石动物群,其年代跨度为447.62~443.83 Ma^[32]。

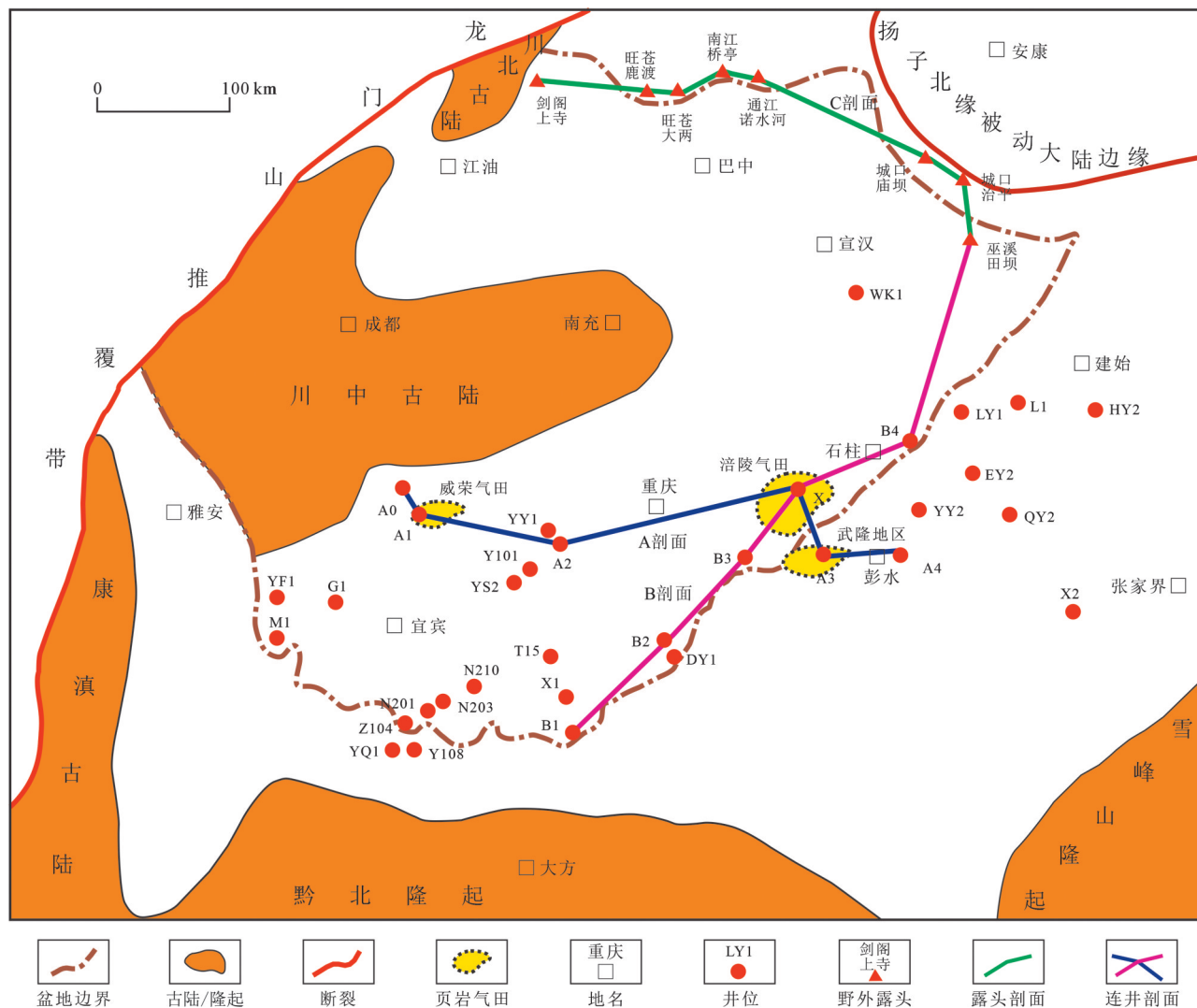


图1 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组沉积背景与研究资料点

Fig. 1 Schematics showing the sedimentary setting of Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and on its periphery with data gathering locations

2 细粒沉积的岩相特征

本研究运用露头、岩心、常规薄片和氩离子抛光等手段,对细粒沉积岩进行米级-厘米级-微米级-纳米级的变尺度观察,基于三大主量矿物含量进行三端元岩相图解分析以确定无机岩相类型,基于 TOC 进行有机相分级,在此基础上进行无机-有机岩相划分与命名(图2)。针对五峰组-龙马溪组细粒沉积主要划分出富有机质硅质页岩、高有机质含灰质硅质粘土质页岩、中-高有机质硅质粘土质页岩、中-高有机质含灰质粘土质页岩、中有机质粘土质页岩、低有机质含粉砂粘土质页岩、低有机质灰质泥岩和低有机质介壳灰岩(主要特指观音桥段)等岩相类型(表1)。

TOC 是控制页岩气形成与富集的最为关键的参数之一。北美典型页岩的研究表明,Appalachian盆地Marcellus页岩的 TOC 与页岩中硅质含量具有较好的正相关关系^[19]。页岩中有机质的宏、微观赋存特征对于确定其成因、时空分布以及生烃机理等均具有重要的意义。页岩岩相对有机质具有明显的控制作用,矿物成分及其含量直观地反映了页岩中有机质生成、聚

集和保存的沉积环境。四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中呈 TOC 与硅质矿物含量呈正相关关系、与粘土矿物含量的负相关关系,该规律与北美典型高产页岩气藏具有相同的趋势。 TOC 与碳酸盐矿物含量的相关性比较复杂,整体呈负相关关系,且不同地区碳酸盐矿物含量不同,靠近川中古陆的威远地区碳酸盐矿物含量相对较高,而涪陵和武隆地区碳酸盐矿物含量相对较低(图3)。

3 层序地层划分与对比

3.1 层序地层划分

穆恩之、陈旭和戎嘉余等通过对奥陶纪-志留纪交替期生物地层的详细对比分析,明确五峰组沉积期持续时间约3.19 Myr,龙马溪组约6.30 Myr^[32-35]。本研究通过岩性、测井、古生物和地球化学等多种方法的综合对比与交叉验证进行层序和体系域界面识别,并且以层序和体系域为单元,开展石英、粘土矿物、碳酸盐矿物三大主量矿物和 TOC 定量评价、纵向演化规律分析,在五峰组-龙马溪组一段识别出4个三级层序

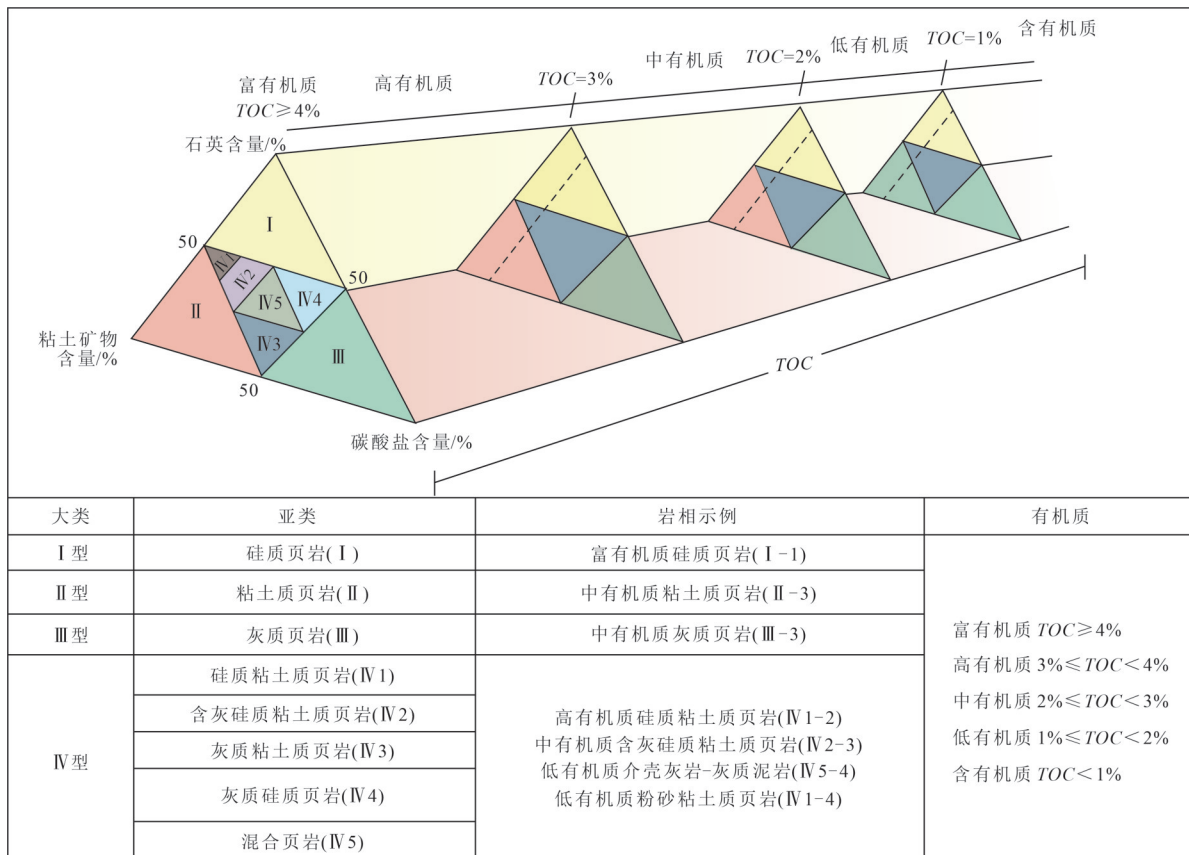
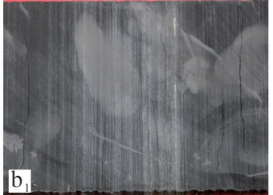
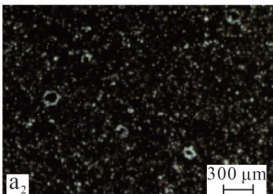
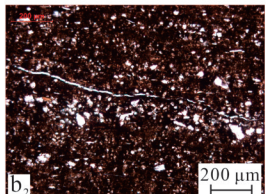
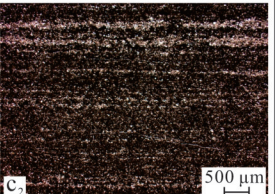
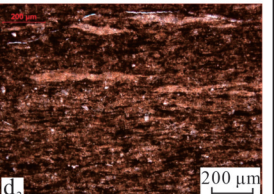
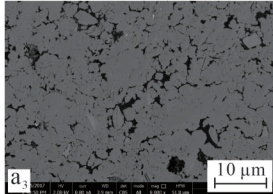
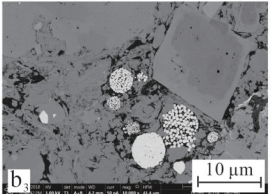
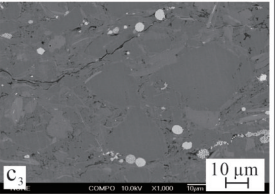
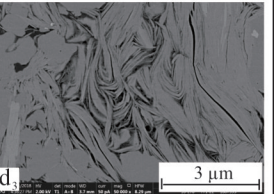
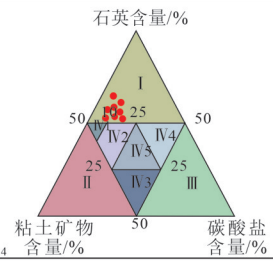
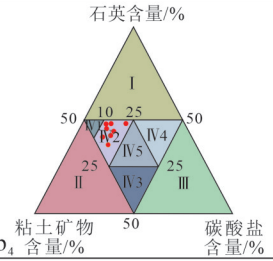
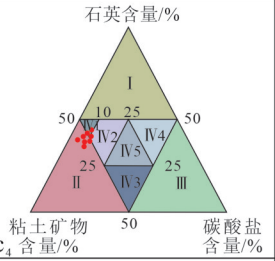
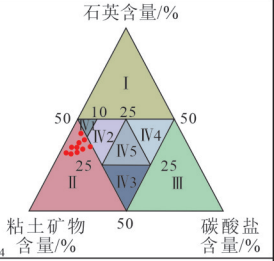


图2 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩有机-无机综合岩相划分方案

Fig. 2 Comprehensive division of organic-inorganic lithofacies in Wufeng-Longmaxi shales in the Sichuan Basin and on its periphery

表1 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组细粒沉积典型岩相特征

Table 1 Typical lithofacies characteristics of fine-grained deposits of the Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and on its periphery

岩相	富有机质 硅质页岩	中-高有机质含灰质 硅质粘土质页岩	低有机质含粉砂 粘土质页岩	中-低有机质 粘土质页岩
露头/岩心	 巫溪田坝	 A1井, 埋深3 588.85 m	 X井, 埋深2 375.44 m	 巫溪田坝露头
薄片	 X井, 埋深2 411.05 m	 A1井, 埋深3 831.25 m	 X井, 埋深2 373.52 m	 X井, 埋深2 332.63 m
氟离子抛光	 X井, 埋深2 406.16 m	 A1井, 埋深3 831.25 m	 X井, 埋深2 366.74 m	 X井, 埋深2 340.82 m
主量矿物三角图	 a ₄	 b ₄	 c ₄	 d ₄
特征描述	黑色、灰黑色, 页理发育; 以生物、成岩硅质为主, 含量大于50%; 黄铁矿发育; 有机碳含量大于4%; 发育大量海绵骨针、放射虫, 笔石带为WF1—WF4和LM1—LM3; 见较多凝灰岩层, 成层性好	黑灰色; 碳酸盐矿物增多, 以生物硅、碳酸盐矿物和粘土矿物为主, 碳酸盐矿物含量为15%~40%; 黄铁矿发育; 有机碳含量2%~4%; 笔石带主要为LM5—LM7; 碳酸盐纹层发育, 凝灰岩层少见	深灰色; 以陆源碎屑石英和粘土为主, 见较多直径大于10 μm的颗粒, 黄铁矿较少; 有机碳含量小于2%; 笔石带主要为LM5—LM6; 砂质纹层发育, 凝灰岩层少见	黑灰色-灰色; 粘土矿物含量大于50%, 粘土絮凝体颗粒较大, 压实后呈宽50 μm、长200 μm的长条状; 陆源碎屑以石英为主, 含少量黄铁矿; 有机碳含量小于2%; 笔石带主要为LM6—LM7; 页理发育, 凝灰岩层少见

界面和3个最大海泛面,共划分出3个层序、7个体系域(表2;图4)。

以典型井-涪陵气田X井为例说明层序地层划分的依据和各体系域的岩相特征。SQ1的MFS1为晚奥陶世末的一次较大规模海侵,具有快速海侵-快速海退的特点,SQ1被划分为海侵(TST)和高位(HST)2个体系域;SQ2的MFS2为早志留世早期最大规模的海侵,具快速海侵-多阶段缓慢海退的特点,可划分为海侵(TST)和早期高位(EHST)、晚期高位(LHST)3个体系域;SQ3的MFS3为早志留世晚期一次较小规模的海

侵,具快速海侵-较快速海退的特点,可划分为海侵(TST)和高位(HST)2个体系域。

层序I(SQ1)为五峰组的一次海水进退旋回,厚度从几米到十余米,层序底界为涧草沟组与五峰组页岩的分界,测井上对应GR值的突然增大和Th/U值的突然降低,顶界对应于观音桥组与龙马溪组页岩的分界,测井上对应GR值的增大和Th/U值的降低。五峰组页岩段为SQ1的TST,下部粘土矿物含量较高,向上由于海侵作用过渡为富有机质硅质页岩,发育WF1—WF4共4个笔石带;观音桥段为SQ1的HST,对应于一个小

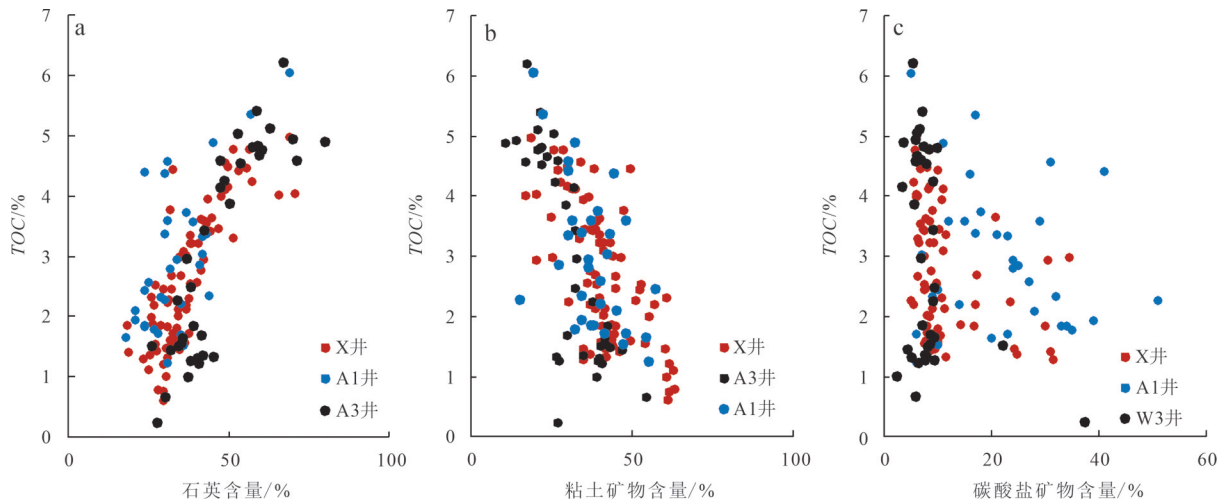


图3 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组主要无机矿物与TOC相关关系

Fig. 3 Correlation between main inorganic minerals and TOC of the Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and on its periphery

a. 石英; b. 粘土矿物; c. 碳酸盐矿物

表2 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组一段层序地层特征

Table 2 Sequence stratigraphic characteristics of the Wufeng Formation and the first member of the Longmaxi Formation, Sichuan Basin and on its periphery

三级层序	体系域	岩性		测井		古生物	地球化学
		矿物成分	接触关系	GR曲线形态	Th/U	笔石带	TOC/%
龙马溪组一段上部(SQ3)	HST	含粉砂质粘土质岩、含灰质粘土质页岩	顶突变	箱形持续加积型	>2	LM8	1~2
	TST	粘土质页岩、(含灰质)粘土质页岩	底突变	齿形退积-进积交互型	1~2	LM7	2~3
龙马溪组一段下部(SQ2)	LHST	上部粉砂质页岩、下部灰质粘土质页岩	顶突变	箱形持续加积型	>2	LM5—LM6	上部1~2, 下部2~3
	EHST	粘土质硅质页岩、含灰质硅质页岩	渐变	橄榄形退积-进积型	1~2	LM4—LM5	2~4
	TST	硅质页岩	底突变	指状-箱状退积型	<1	LM1—LM3	>4
五峰组(SQ1)	HST	介屑灰岩	顶突变	漏斗形退积型	<1	WF4	<1
	TST	上部硅质页岩、下部灰质粘土质页岩	底渐变或突变	漏斗形退积型	<1	WF1—WT3	上部>2, 下部1~2

冰期和海退期,沉积富含浅水相小壳化石碳酸盐岩沉积。观音桥段冰期和龙马溪组底部全球海平面快速上升的过程,在地层中留下了较多的记录,包括奥陶系笔石种属的灭绝等特殊地质事件^[29-31,36-38]。

层序2(SQ2)为龙马溪组一段下部的一个海水进退旋回,厚度约60 m,对应于LM1—LM6笔石带,表现为向上硅质减少、粘土质增加、TOC降低的变化旋回,顶界以低有机质粉砂粘土质页岩与上覆中有机质粘土质页岩分界。SQ2下部存在一个厚约35 m的高有机质段,以高硅质、低粘土质、低碳酸盐矿物、高有机质、高GR值、低Th/U值为特征,整体代表海侵期到最大海泛期的优质页岩沉积,以中间一个短暂的粘土矿物略有上升、硅质含量和TOC略有下降的界面为界,进一步分为海侵体系域(TST)和早期高位体系域(EHST),其中TST的页岩品质更高。SQ2上部近25 m的低有机质

粉砂粘土质页岩对应于晚期高位体系域(LHST)。

层序3(SQ3)为龙马溪组一段中上部的一个规模较小的海水进退旋回,厚度约20 m,对应于LM7—LM8笔石带,粘土矿物含量总体较高,下部TST的TOC达到中等,上部HST为低TOC。

3.2 层序地层对比

1) 川南—川东南横跨深水陆棚方向

SQ1,从川南到川东南地势总体呈两边高而中间低,剖面中间的X井和A3井的TST厚度较大,指示海侵彻底而水深较大;西面的A2井地层厚度有所减薄,处于深水拗陷与西侧川中古陆之间的斜坡区;最靠西边的A0井厚度小,反映其靠近川中古陆、地势高、以较浅水沉积为主;最靠东边的A4井比A3井的地层更薄、水体变浅,反映彭水以东地区处于深水拗陷区向东一

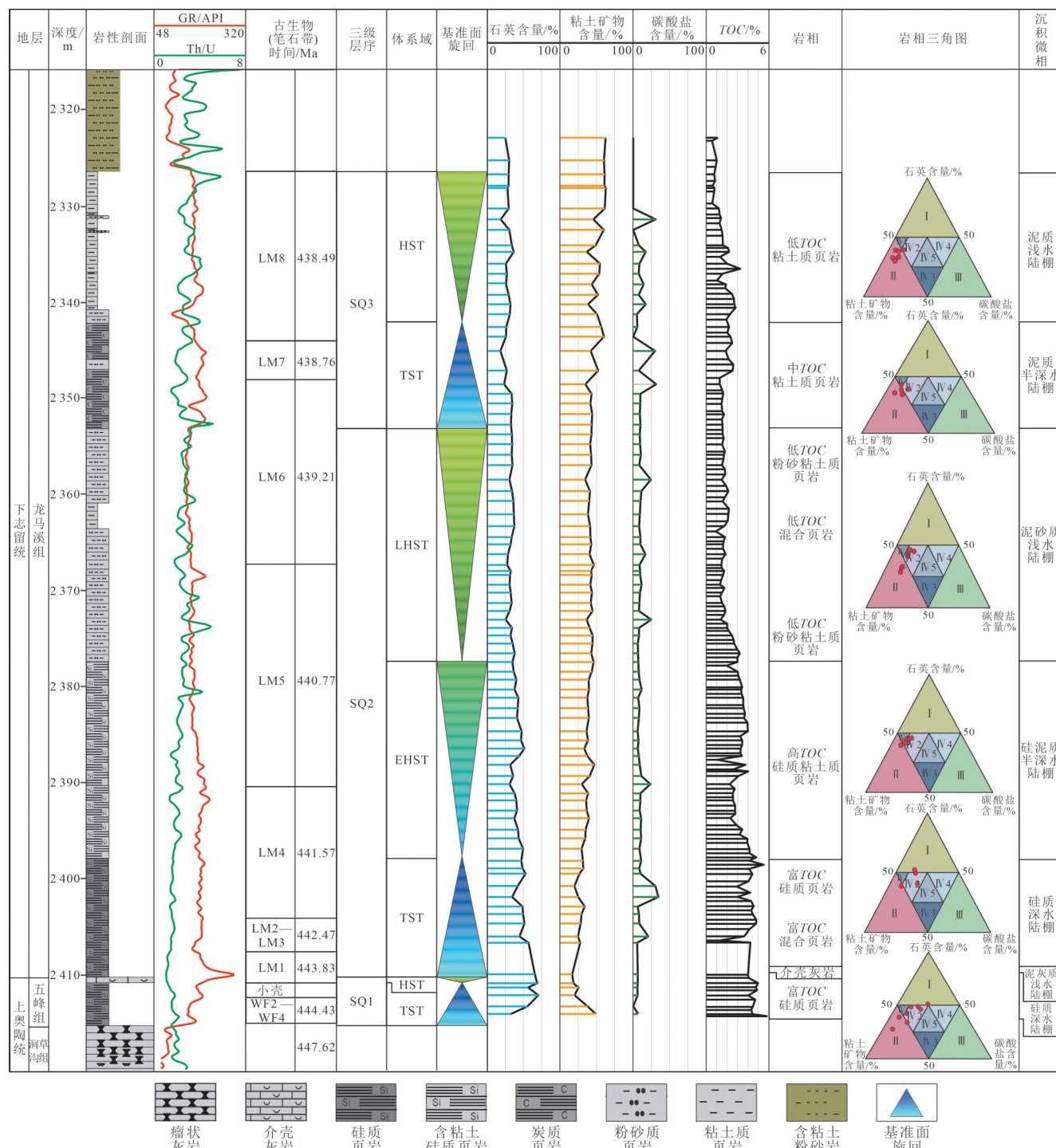


图4 四川盆地及其周缘典型X井五峰组-龙马溪组层序地层划分

Fig. 4 Sequence stratigraphic division of the Wufeng-Longmaxi Formations in typical wells in the Sichuan Basin and on its periphery

侧的斜坡区。SQ2, TST和EHST中间的X井和A3井处于深洼区, 至LHST, 西侧的A2井的厚度最大, 反映在东部雪峰山隆升和向西推覆的作用之下, 台内坳陷区从早期的武隆—焦石坝一带向西迁移到永川地区的川南次级坳陷, 该坳陷以含有较多的灰质为特征, 与川东北方向上坳陷含有较多的硅质明显不同; A4井的厚度较大, 这是雪峰山的活动导致东部的彭水地区陆源碎

屑物质供给充足、沉积速率明显加大所致, 在岩相对比上表现出页岩中的粉砂含量增加。SQ3, 由川南到川东南地势总体由高变低, 但地层厚度变化趋势较为平缓(图5)。

2) 川东南—川东北沿深水陆棚延伸方向

SQ1, 从川东南到川东北地势总体由高变低, TST厚度逐步加大, 在最南端靠近黔北隆起的B1井地层

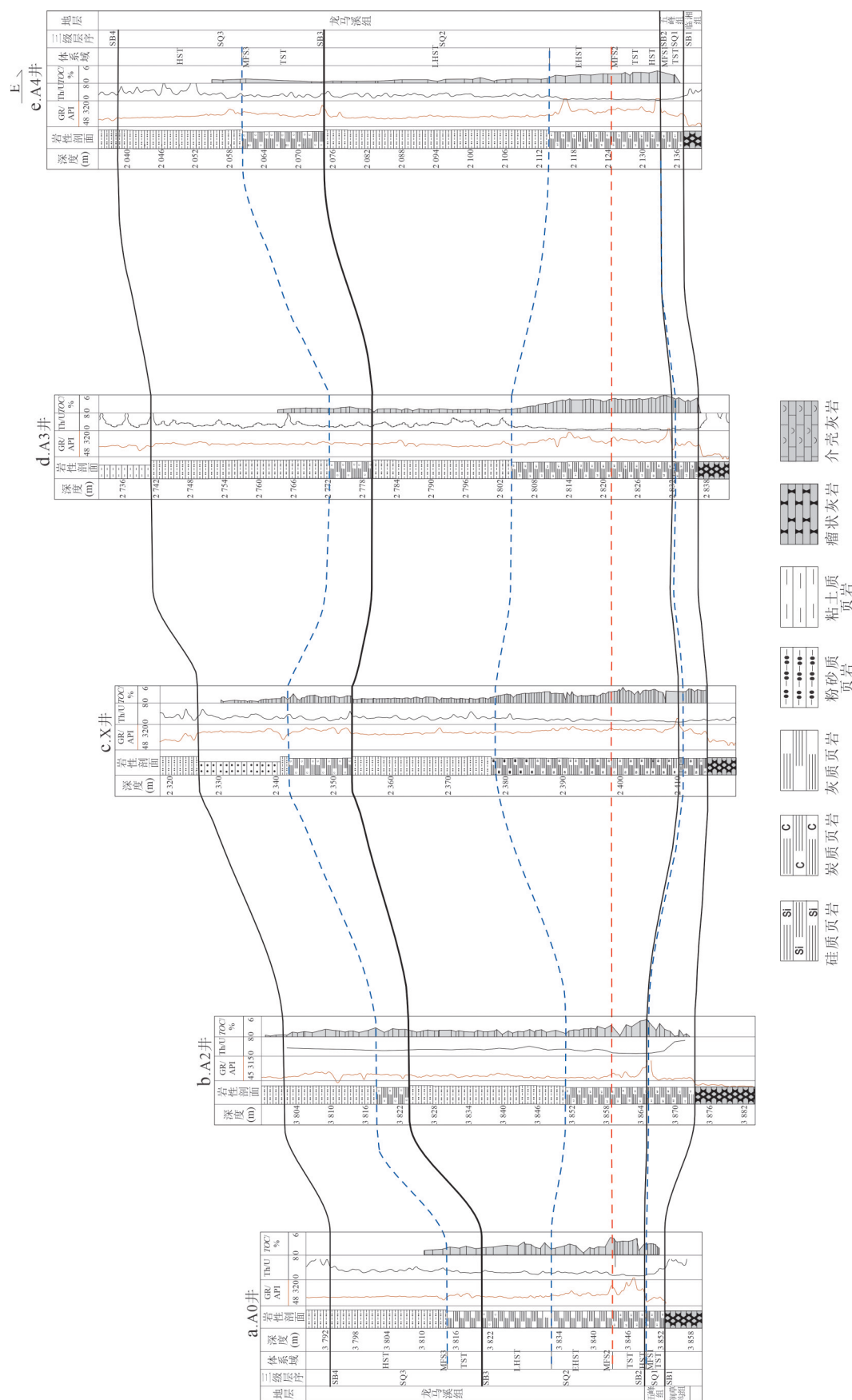


图5 川南—川东南地区五峰组—龙马溪组层序地层对比

厚度小、地势较高,由B2井向东北方向地层厚度明显增大、水体加深。HST代表浅水沉积的观音桥段介壳灰岩,从西南向东北方向逐渐减薄,同样指示地势降低、水体加深。SQ2,在靠近黔北隆起的B1井中TST厚度较小,由B2井向东北方向地层厚度明显增大、水体加深,但在B3井、B4井中有局部减薄的特征,指示多个局部水下隆起的存在,将深水拗陷区分割成多个次级凹陷。SQ2,从EHST开始一直到LHST,由川东南到川东北方向地层厚度单调增厚的特征更明显。SQ3,由川东南到川东北地势和地层厚度变化趋势进一步平缓,表明经过沉积填充补齐作用之后沉积地形差异有所降低(图6)。

3) 川西北—川东北横跨陆棚方向

SQ1,由西向东厚度逐步增大,反映地势逐步走低、水深逐步加大的变化特征。在整个川北—川东北地区,均没有见到典型的HST观音桥段介壳灰岩。最靠西部的剑阁上寺剖面,SB1层序界面之下的临湘组和界面之上的五峰组均缺失,呈下剥上超特征,上覆龙马溪组与下伏宝塔组呈不整合接触,指示川北古陆的暴露剥蚀时期较长;旺苍、南江、通江诺水河存在TST沉积但地层厚度较薄;向东至城口再到巫溪一带TST厚度明显增大。SQ2,地层变化趋势与SQ1具有很好的继承性,由东向西从上寺—旺苍—南江—通江SQ2-TST的厚度一直较薄,而到城口—巫溪厚度陡增,指示在通江与城口之间存在一个水深突然加大的坡折。SQ2-EHST和SQ2-LHST的厚度分布与SQ2-TST的厚度分布具有很好的相似性,深水沉积相区没有发生明显的横向迁移,主要是由于川东北地区距离雪峰山较远,受雪峰山向西北方向推覆作用远程效应的影响较弱,该区的沉积主要受海平面升降和继承性古地形的影响(图7)。

4 五峰组—龙马溪组重点体系域的岩相分布规律

以美国为代表的典型海相页岩沉积环境包括陆棚、半远洋—远洋环境,一般认为在陆棚上坡折之下的斜坡区才是优质页岩的沉积区^[13,19]。中国以五峰组—龙马溪组页岩为代表的沉积相研究,目前形成的共识是总体处于陆棚沉积环境($Th/U < 1$),相对低洼的深水陆棚相区发育富有机质页岩,相对较高的浅水陆棚亚相($Th/U > 2$)的有机质含量降低^[10,23-24]。

本研究以体系域为单元,对钻井和野外露头进行地层厚度、矿物成分、TOC、Th/U等环境地化参数的

统计和量化平面成图,基于不同参数对水深、古地理单元、无机岩相、有机相与古生态环境、水体氧化—还原条件等沉积环境的指示意义,最终预测沉积相和岩相的分布^[22]。在五峰组—龙马溪组3个层序7个体系域中,以优质页岩最为发育的SQ2-TST为例,说明各岩相要素和沉积岩相的分布规律。

SQ2-TST沉积厚度一般小于20 m,在深水陆棚区主要发育隆凹相间的沉积格局;川东北巫溪、川东南涪陵和川南宜宾存在3个局部厚度大于10 m的沉积中心,其连线方向指示深水陆棚的延伸方向,彼此之间被位于石柱、南川地区的两个水下低隆起所分隔;向川中古陆、黔北隆起、川北古陆周缘地层厚度减薄至5 m以下(图8a)。

石英含量总体呈现由川东北向川西南逐步降低的变化趋势,川东北最高达70%以上,川西南在50%左右,呈统一的、向川东北敞开的喇叭状特征,深水陆棚的洼槽位于巫溪—涪陵—宜宾一线(图8b)。粘土矿物含量与石英含量呈明显的消长关系,沿深水陆棚洼槽向西南、向西北、向东南均逐渐增高,川东北巫溪地区最低至20%左右,川西南宜宾地区在30%左右,环绕川北、川中等古陆、黔北隆起和雪峰山隆起周缘地区均在30%以上(图8c)。碳酸盐矿物含量主要在靠近川中古陆南缘和黔北隆起北缘的地区较高,两个古陆围限的川西南拗陷有利于碳酸盐矿物沉积。川中古陆南缘的碳酸盐矿物含量普遍在10%以上,最高达20%,黔北隆起北缘的碳酸盐矿物含量最高在15%左右(图8d)。TOC存在由川东北向川西南延伸的大面积高值区,其中TOC大于4%区域沿巫溪—焦石坝—宜宾一线分布(图8e)。Th/U值小于1所代表的强还原环境分布与TOC高值区分布具有很高的吻合度(图8f)。

综合上述因素分析,预测了SQ2-TST的沉积相—岩相分布。在经历观音桥小冰期之后,龙马溪组沉积期气候变暖导致大规模的海侵作用,水深大且流动性差,为滞留缺氧的沉积环境,沉积速率低,有利于有机质的沉积与保存。在川中古陆、黔北隆起和雪峰山隆起之间围限了一个台内拗陷区,由川西南向川东北方向敞开^[30-31]。海侵自川东北向川西南拓展,川西南—川东南—川东北的台内拗陷低洼带为深水陆棚亚相区。由涪陵向川东北方向为富有机质硅质页岩沉积,为最有利的页岩气岩相甜点区;在川中古陆与黔北隆起所围限的川南深水陆棚亚相区则以富有机质含灰硅质粘土质页岩沉积为主,为最有利的页岩气岩相甜点区;中陆棚过渡相区以沉积高有机质粘土质页岩为主,为有利的页岩气岩相甜点区;在川中古陆、黔北隆起、川北

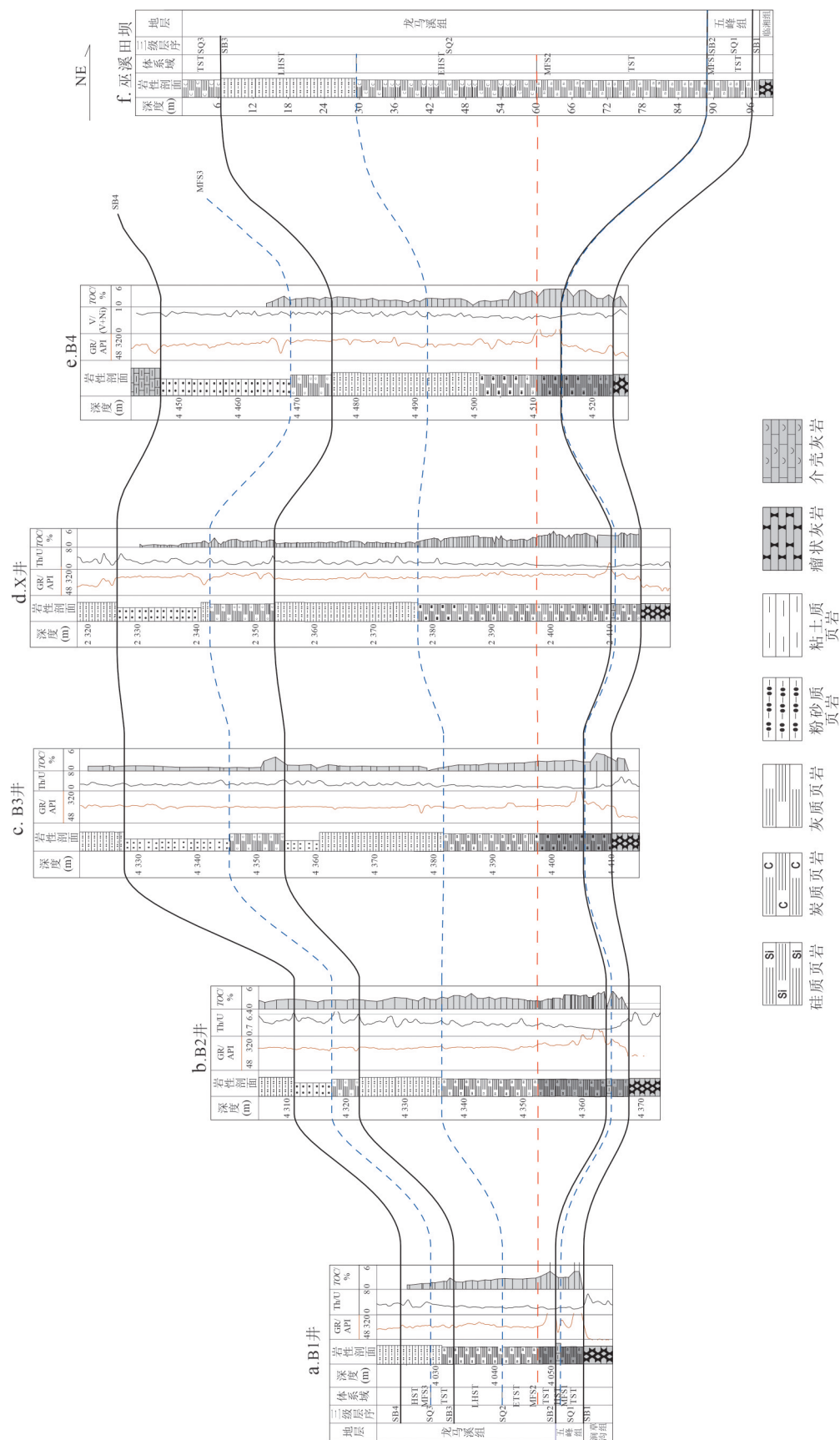


图6 川东南—川东北地区五峰组—龙马溪组层序地层对比

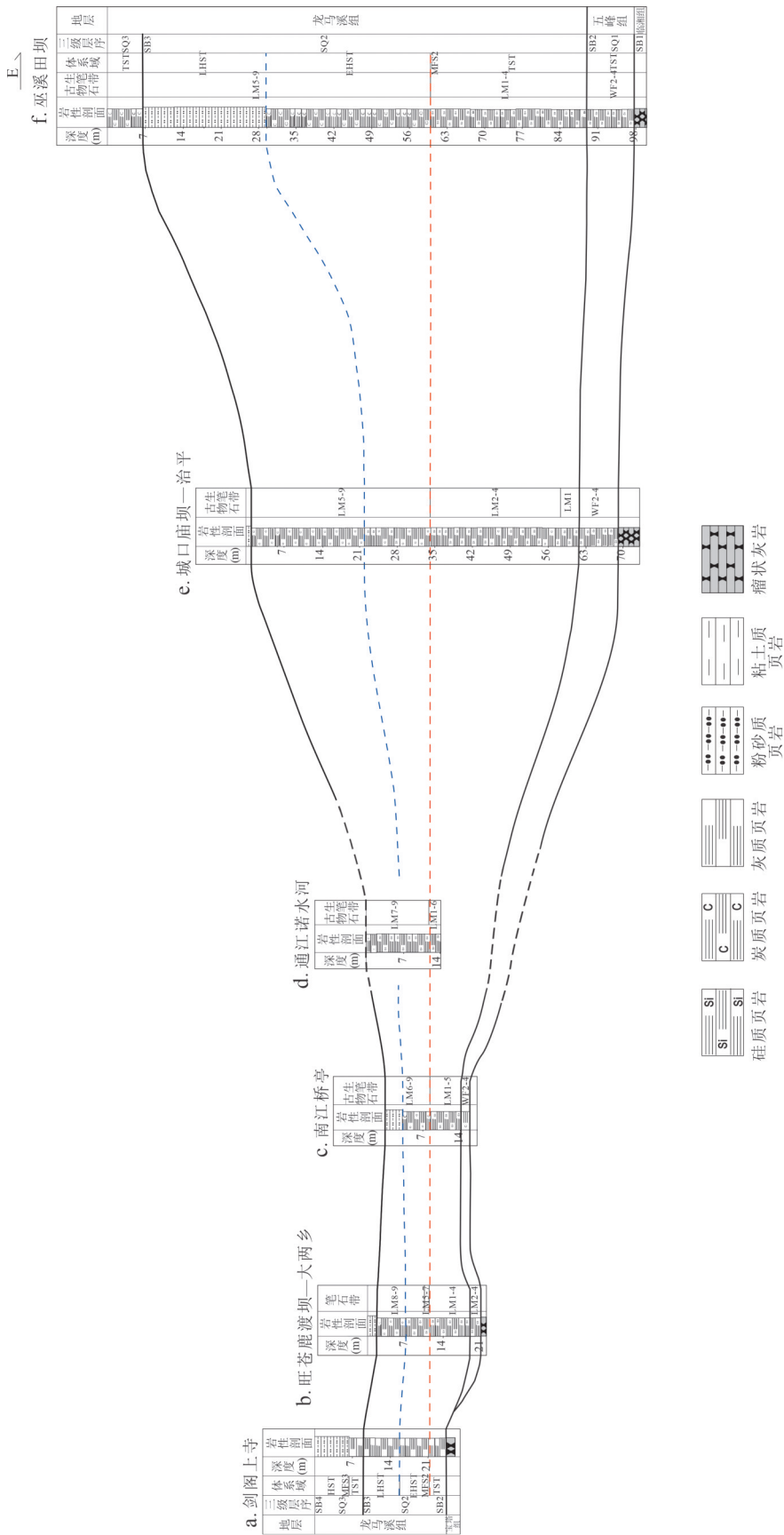


图7 川西北—川东北地区五峰组—龙马溪组层序地层对比
Fig. 7 Sequence stratigraphic correlation of the Wufeng-Longmaxi Formations in the northwestern and northeastern Sichuan Basin

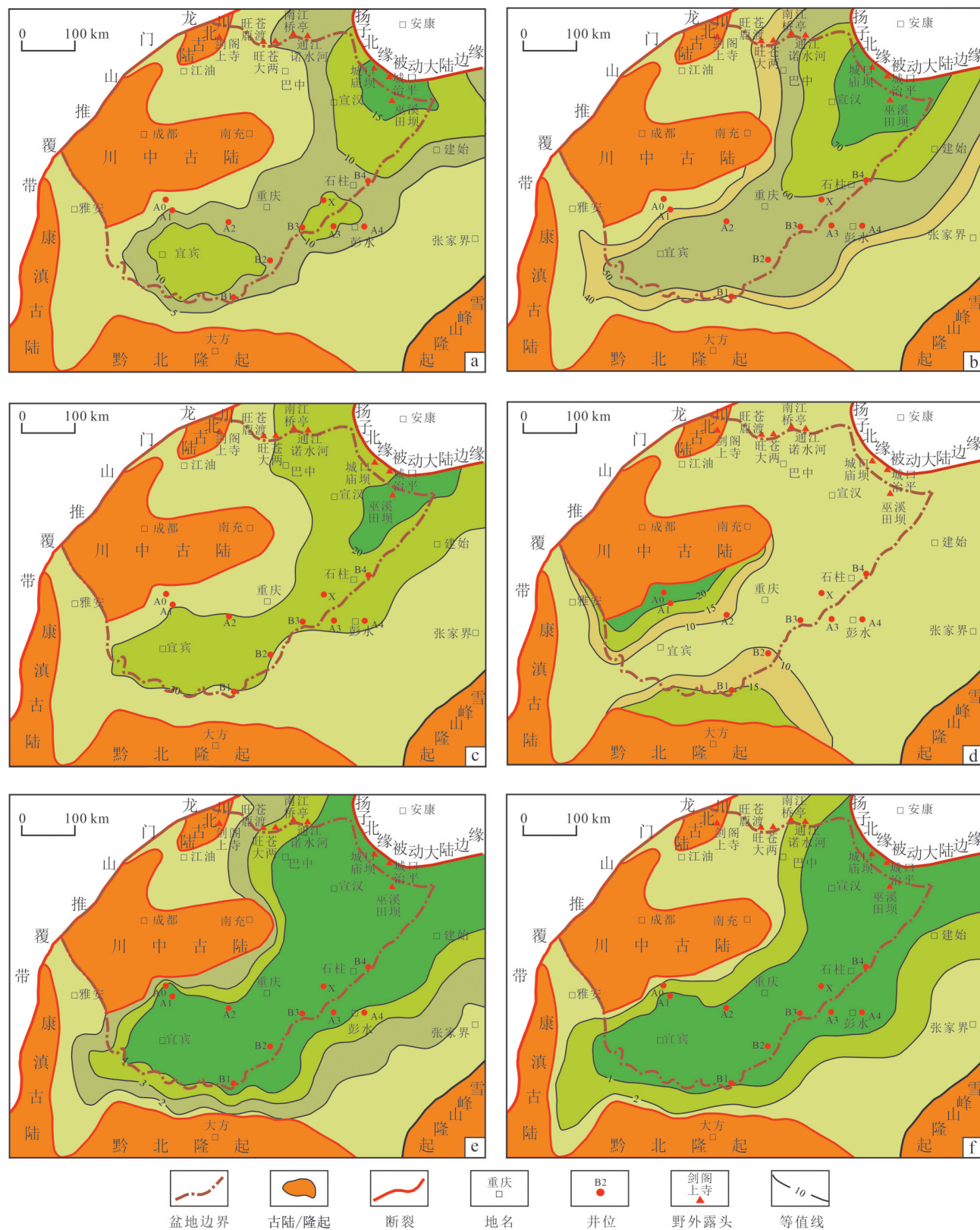


图8 四川盆地及其周缘地区五峰组-龙马溪组SQ2-TST各岩相要素平面分布

Fig. 8 Distribution of lithofacies elements of SQ2-TST of the Wufeng-Longmazi Formations in the Sichuan Basin and on its periphery

a. 地层厚度(m); b. 石英含量(%); c. 粘土矿物含量(%); d. 碳酸盐矿物含量(%); e. TOC(%); f. Th/U

古陆周缘, 沉积中-低有机质粘土质页岩和中-低有机质含灰硅质粘土质页岩, 为较有利的页岩气岩相区; 在

雪峰山隆起西侧周边区沉积低有机质含粉砂粘土质页岩, 页岩气沉积条件明显变差(图9)。

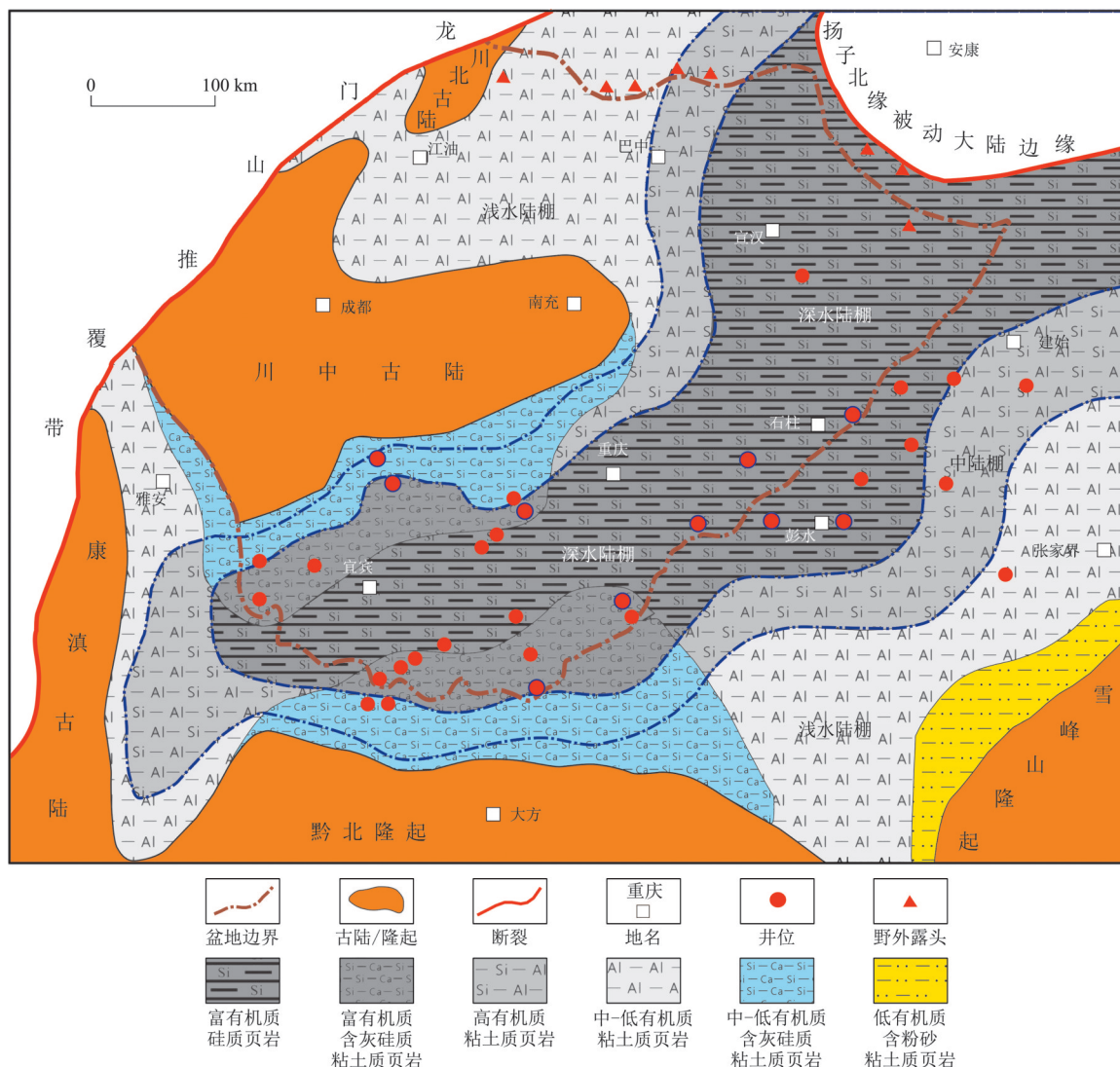


图9 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组SQ2-TST各岩相要素平面分布

Fig. 9 Distribution of lithofacies elements of SQ2-TST of the Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and on its periphery

5 结论

1) 建立了基于无机矿物-有机组分的细粒沉积岩相综合划分方法,明确了五峰组-龙马溪组富有机质页岩层段主要发育富有机质硅质页岩、高有机质含灰质硅质粘土质页岩、中-高有机质硅质粘土质页岩、中-高有机质含灰质粘土质页岩、中有机质粘土质页岩、低有机质含粉砂粘土质页岩、低有机质灰质泥岩和低有机质介壳灰岩(主要特指观音桥段)等岩相类型。

2) 建立了基于岩性、岩相、电性、矿物和有机组分、古生物、地球化学参数等多参数综合的细粒沉积层序与体系域划分方法,将四川盆地五峰组-龙马溪组富有机质页岩层段划分为3个层序、7个体系域,明确了优质页岩主要发育于3个层序的海侵体系域,尤其

以第2层序最为发育。

3) 明确了不同类型无机矿物的区域分布规律,靠近川中古陆和黔北隆起区域碳酸盐矿物含量相对较高,随着水体深度的增加,碳酸盐矿物含量逐渐降低,生物成因石英含量逐渐增加。

4) 以体系域为单元,基于无机矿物含量、有机质含量进行无机-有机相预测,基于地化参数分析沉积环境,编制了四川盆地及其周缘重点体系域沉积微相-岩相综合平面图。明确了龙马溪组底部沉积时期由涪陵向川东北一线方向发育富有机质硅质页岩沉积,川中古陆与黔北隆起所围限的川南地区发育富有机质含灰质硅质粘土质页岩沉积。中陆棚过渡相区以高有机质粘土质页岩为主;在川中古陆、黔北隆起、川北古陆周缘沉积地层以低有机质粘土质页岩和中-低有机质含灰质硅质粘土质页岩为主。

致谢:本次使用了中国石化江汉油田分公司、西南油气分公司、华东油气分公司以及勘探分公司的相关数据和资料,在此致以衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] Schieber J, Zimmerle W. The history and promise of shale research [C]// Schieber J, Zimmerle W, Sethi P. Shales and Mudstones: Basin studies, sedimentology and paleontology. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1998, 1-10.
- [2] Aplin A C, Macquaker J S H. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.
- [3] 朱如凯,李梦莹,杨静儒,等. 细粒沉积学研究进展与发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 251-264.
Zhu Rukai, Li Mengying, Yang Jingru, et al. Advances and trends of fine-grained sedimentology[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 251-264.
- [4] 郭旭升,李宇平,刘若冰,等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9-16.
Guo Xusheng, Li Yuping, Liu Ruobing, et al. Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi Shale Play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 9-16.
- [5] 王岳岳,胡宗全,周彤,等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控储意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1295-1306.
Wang Ruyue, Hu Zongquan, Zhou Tong, et al. Characteristics of fractures and their significance for reservoirs in Wufeng-Longmaxi shale, Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1295-1306.
- [6] 赵文智,李建忠,杨涛,等. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 499-510.
Zhao Wenzhi, Li Jianzhong, Yang Tao, et al. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 499-510.
- [7] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 561-574.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 561-574.
- [8] 聂海宽,张柏桥,刘光祥,等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气高产地质原因及启示——以涪陵页岩气田 JY6-2HF 为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 463-473.
Nie Haikuan, Zhang Baiqiao, Liu Guangxiang, et al. Geological factors contributing to high shale gas yield in the Wufeng-Longmaxi Fms of Sichuan Basin: A case study of Well JY6-2HF in Fuling shale gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 463-473.
- [9] 郭彤楼,刘若冰. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘 JY1 井为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 643-651.
- [10] 易积正,王超. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组海相页岩储层非均质性特征[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 13-19.
Yi Jizheng, Wang Chao. Differential Pore development characteristics in various shale lithofacies of Longmaxi Formation in Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(1): 13-19.
- [11] 熊亮. 川南威荣页岩气田五峰组-龙马溪组页岩沉积相特征及其意义[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 326-332.
Xiong Liang. Characteristics and significance of sedimentary facies of Wufeng-Longmaxi formation shale in Weirong Shale Gas field, southern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 326-332.
- [12] 胡宗全,杜伟,彭勇民,等. 页岩微观孔隙特征及源-储关系——以川东南地区五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 1001-1008.
Hu Zongquan, Du Wei, Peng Yongmin, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi formation in Fuling area, the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 1001-1008.
- [13] 杜伟,胡宗全,朱彤,等. 四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组岩相特征[J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 398-404.
Du Wei, Hu Zongquan, Zhu Tong, et al. Lithofacies of Upper Ordovician Wufeng Formation in Sichuan Basin and its periphery [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 398-404.
- [14] 王岳岳,胡宗全,龙胜祥,等. 四川盆地上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 353-364.
Wang Ruyue, Hu Zongquan, Long Shengxiang, et al. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas geology, 2022, 43(2): 353-364.
- [15] 王红岩,董大忠,施振生,等. 川南海相页岩岩石相类型及“甜点”分布——以长宁双河剖面五峰组-龙马溪组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 68-81+94.
Wang Hongyan, Dong Dazhong, Shi Zhensheng, et al. Lithofacies and “sweet spot” interval of marine shale in southern Sichuan: A case study of Shuanghe Outcrop in Wufeng-Longmaxi formation, Changqing [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 68-81+94.
- [16] 王玉满,董大忠,李新景,等. 四川盆地及其周缘下志留统龙马溪组层序与沉积特征[J]. 天然气工业, 2015, 35(3): 12-21.
Wang Yuman, Dong Dazhong, Li Xinjing, et al. Stratigraphic sequence and sedimentary characteristics of Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its peripheral areas [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(3): 12-21.
- [17] 邹才能,董大忠,王玉满,等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 689-701.

- Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6):689-701.
- [18] 樊隽轩, Michael J M, 陈旭, 等. 华南奥陶-志留系龙马溪组黑色笔石页岩的生物地层学[J]. 中国科学:地球科学, 2012, 42(1): 130-139.
- Fan Junxuan, Michael J M, Chen Xu, et al. Biostratigraphy and geography of the Ordovician-Silurian Lungmachi black shales in South China[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2012, 42(1):130-139.
- [19] 李一凡, 樊太亮, 高志前, 等. 渝东南地区志留系黑色页岩层序地层研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2):299-306.
- Li Yifan, Fan Tailiang, Gao Zhiqian, et al. Sequence stratigraphy of Silurian black shale and its distribution in the southeast area of Chongqing[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(2):299-306.
- [20] Singh P. Lithofacies and sequences stratigraphic framework of the barnett shale[D]. Northeast Texas: University of Oklahoma, 2008.
- [21] Solange, Angulo, Luis, et al. Integrating depositional models, ichnology, and sequence stratigraphy in reservoir characterization: The middle member of the Devonian-Carboniferous Bakken Formation of subsurface southeastern Saskatchewan revisited [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6):1017-1043.
- [22] Slatt R M, Rodriguez N D. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: Commonality or coincidence?[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012, 8:68-84.
- [23] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (4) : 579-601.
- [24] Stow D, Huc A Y, Bertrand P. Depositional processes of black shales in deep water[J]. Marine & Petroleum Geology, 2001, 18 (4):491-498.
- [25] 陈建芳. 古海洋研究中的地球化学新指标[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3):402-410.
- Chen Jianfang. New geochemical proxies in Paleocyanography studies[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(3):402-410.
- [26] Almon W R, Dawson W C, Sutton S J, et al. Sequence stratigraphy, facies variation and petrophysical properties in deep water shales, Upper Cretaceous Lewis Shale, south-central Wyoming [J]. Geags Transactions, 2002, 52, 1041-1053.
- [27] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (4) : 579-601.
- [28] Abouelresh M O, Slatt R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1), 1 - 22.
- [29] Camp W, Sven E, Juergen S, et al. A compositional classification for grain assemblages in fine-grained sediments and sedimentary rocks—discussion [J]. Journal of Sedimentary Research, 2016, 86(1):1-5.
- [30] 郑和荣, 胡宗全. 中国前古生代构造—岩相古地理图集[M]. 北京:地质出版社, 2010:1-194.
- Zheng Herong, Hu Zongquan. China Pre-Paleozoic structure-lithofacies palaeogeographic atlas[M]. Beijing: Geological Press, 2010: 1-194.
- [31] 陈旭, 戎嘉余, 周志毅, 等. 上扬子区奥陶—志留纪之交的黔中隆起和宜昌上升[J]. 科学通报, 2001, 46(12):1052-1056.
- Chen Xu, Rong Jiayu, Zhou Zhiyi, et al. The central Guizhou uplift and Yichang uplift at the turn of the Ordovician-Silurian period in the opper Yangtze region[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(12): 1052 - 1056.
- [32] 陈旭, 戎嘉余. 从生物地层学到大地构造学——以华南奥陶系和志留系为例[J]. 现代地质, 1999, 13(4):385-389.
- Chen Xu, Rong Jiayu. From biostratigraphy to tectonics—with Ordovician and Silurian of south China as an example [J]. Geoscience, 1999, 13(4): 385 - 389.
- [33] 穆恩之, 李积金, 葛梅钰, 等. 华中区上奥陶统笔石[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- Mu Enzhi, Li Jijin, Ge Meiyu, et al. Upper Ordovician graptolites in Central China[M]. Beijing: Science Press, 1933.
- [34] 戎嘉余, 陈旭, 王怿, 等. 奥陶—志留纪之交黔北隆起的变迁: 证据与启示[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(10):1407-1415.
- Rong Jiayu, Chen Xu, Wang Yi, et al. Northward expansion of Central Guizhou Oldland through the Ordovician and Silurian transition: Evidence and implications [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41: 1407 - 1415.
- [35] Rong J Y, Melchin M J, Williams S H, et al. Report of the restudy of the defined global stratotype of the base of the Silurian System[J]. Episodes, 2008, 31: 315-318.
- [36] Arthur M A, Sageman B B. Marine black shales: depositional mechanisms and environments of Ancient deposits [J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 1994, 22(1):499-551.
- [37] Arthur M A, Sageman B B. Sea-level control on source-rock development: Perspectives from the Holocene Black Sea, the Mid-Cretaceous Western Interior Basin on North America, and the Late Devonian Appalachian Basin [J]. Special Publications, 2013: 35-59.
- [38] Lazar O R, Bohacs K M, Macquaker J H S, et al. Capturing key attributes of fine-grained sedimentary rocks in outcrops, cores, and thin sections: nomenclature and description guidelines [J]. Journal of Sedimentary Research, 2015, 85(3):230-246.

(编辑 张亚雄)