

鄂西来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组岩石学特征及其成因

王秀平^{1,2},牟传龙^{1,2},肖朝晖³,陈尧³,王启宇^{1,2}

(1. 国土资源部 沉积盆地与油气资源重点实验室,四川 成都 610081; 2. 成都地质调查中心,四川 成都 610081;

3. 湖北省页岩气开发有限公司,湖北 武汉 430060)

摘要:来凤-咸丰地区位于四川盆地东部外侧相邻的鄂西地区,其奥陶系五峰组-志留系龙马溪组暗色岩系的有机质丰度较低。根据6条露头剖面和3口钻井岩心的详细观测,通过借助偏光显微镜、X-射线衍射、场发射扫描电镜和有机碳含量分析等对来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组的岩石学和矿物学特征进行了研究。研究区五峰组-龙马溪组矿物组分以石英和粘土矿物为主,发育大量的粉砂级碎屑颗粒,岩石类型以富有机质的粉砂岩、泥页岩为主,由底向上依次可划分为4个岩性段:炭质(含)粉砂质页岩段、含炭含泥(质)粉砂岩段、含泥粉砂岩段及含炭粉砂质页岩段。在对比四川盆地相应层系页岩气富集条件的基础上,根据矿物、岩石特征与元素地球化学的指示,认为来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组发育较短时期的缺氧还原环境、快速变化的海平面和较小的沉积速率,使其在较高的生物产率条件下,富有机质页岩的沉积厚度和有机质的丰度相对四川盆地明显较差。

关键词:矿物组分;岩石类型;五峰组-龙马溪组;来凤-咸丰地区;四川盆地;中扬子地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Petrologic characteristics and genesis analysis of the Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in Laifeng-Xianfeng area of western Hubei

Wang Xiuping^{1,2}, Mou Chuanlong^{1,2}, Xiao Zhaohui³, Chen Yao³, Wang Qiyu^{1,2}

(1. Key Laboratory Sedimentary Basins Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Chengdu, Sichuan 610081, China;

2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China;

3. Hubei Shale Gas Development Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430060, China)

Abstract: As part of western Hubei province, Laifeng-Xianfeng area is adjacent to the east of Sichuan Basin, with its Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Formation dark rock series bearing lower organic abundance. The petrological and mineralogical characteristics of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Formations in Laifeng-Xianfeng area, were investigated according to detailed observation of the six outcrop sections and three cores, in combination with polarizing microscope, X-ray diffraction (XRD), field emission scanning electron microscopy (SEM) and organic carbon content (TOC) analysis. Large amount of clastic particles in silt size are developed in the study area whose mineral components are mainly quartz and clay minerals. Besides, siltstones and shales rich in organic matters are the main rock types in this area, which can be divided into four lithologic sections from the bottom-up including carbonaceous and siltyshales, carbonaceous and argillaceous siltstones, argillaceous siltstones and carbonaceous siltyshales. According to instructions by petrological and mineralogical characteristics and geochemistry of element, and comparison of shale enrichment conditions with the corresponding formation of Sichuan Basin, it can be figured out that the shorter-term anoxic and reducing environment, rapid change of sea level and smaller rate of deposition, render the thickness and abundance of organic matters of organic-rich shales in the Wufeng-Longmaxi Formations in Laifeng-Xianfeng area with higher bioproduc-

收稿日期:2018-01-03;修订日期:2018-10-19。

第一作者简介:王秀平,女,(1988—),博士、工程师,沉积和储层。E-mail:wangxiuping198805@126.com。

通讯作者简介:牟传龙,男,(1965—),研究员、博士生导师,沉积地质学及油气地质学。E-mail:cdmchuanlong@163.com。

基金项目:湖北省页岩气项目(HBYQ-GC1075)。

tivity to be significantly worse than those of the corresponding formation in Sichuan Basin.

Key words: mineral component, rock type, Wufeng-Longmaxi Formations, Laifeng-Xianfeng area, Sichuan Basin, Middle Yangtze region

华南地区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组黑色-暗色含笔石页岩,已被公认为是“下组合”海相地层中的优质烃源岩之一,建南气田志留系天然气来源于志留系龙马溪组炭质页岩^[1],该层段也为当前页岩气勘探开发的重点层系^[2]。中扬子区作为中国南方主要含油气区域之一^[3],湘鄂西地区是其海相页岩气勘探开发的重点地区^[4-5],其五峰组-龙马溪组的富有机质泥页岩发育,厚度稳定、有机质丰度较高、热演化和埋深适中,为页岩气勘探的有利层系^[6-15]。相对于包括四川盆地的上扬子地区,中扬子地区的页岩气勘探与研究程度较低,随着涪陵气田的发现和投产,才逐渐引起广泛关注。研究成果主要集中在通过初步摸底页岩气基本地质条件的基础上,对中扬子区内页岩气有利区及资源潜力进行评价,表明鄂西地区五峰组-龙马溪组,具有与北美和四川盆地页岩气高产层相似的构造和地质条件,具备形成页岩气聚集的有利条件和良好的页岩气勘探前景^[16-23]。其中,岩石学及岩相特征是页岩气地质评价和选层、选区的基础^[24],优势岩相的分析可以为页岩有利勘探目标的预测提供依据,是四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气地质调查及现今广泛研究的重要内容^[24-27]。而在中扬子地区,针对五峰组-龙马溪组页岩气矿物、岩石学特征的详细研究尚未进行。湖北省来凤-咸丰地区为页岩气重点勘探区块^[20],为了弄清其页岩气勘探前景,此次研究以湖北省来凤-咸丰地区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组为目的层,通过详细分析其岩石学特征,探讨其富有机质页岩发育的影响因素,为其页岩气评价提供基础。

1 区域地质背景

涵盖研究区的湘鄂西地区,位于中扬子地区的西部^[28],西与四川盆地毗邻,北靠秦岭-大别造山带,东接江南-雪峰滑脱推覆隆起带^[4]。湘鄂西地区经晋宁运动形成稳定地台后,经历了加里东期、海西期、印支期、燕山期及喜马拉雅期等重大构造运动改造,先后经历了克拉通盆地、前陆盆地和断陷盆地等多个构造演化阶段。根据区域构造特征、现今构造形迹以及前人研究成果,湘鄂西地区自南东向北西进一步分为桑植-石门复向斜带、宜都-鹤峰复背斜带、花果坪复向

斜带、中央复背斜带与利川复向斜带^[28-30],研究区主要位于宜都-鹤峰复背斜带(图1)。

中国南方晚奥陶世一早志留世沉积形成于华南盆地消亡和南华造山带形成阶段^[31],晚陶世开始,由于受到广西运动的影响,雪峰山隆起快速升为古陆,在中扬子地区形成湘鄂西水下隆起/高地^[32-34]。早志留世龙马溪期是继晚奥陶世以来中上扬子地区盆、山格局发生重大转变的时期,受加里东构造运动影响,陆块边缘处于挤压、褶皱造山过程,是形成古隆起的高峰阶段^[3]。中扬子地区古生界海相层系与上扬子地区具有相似的油气地质基本条件^[35],中奥陶世末期,扬子板块进入前陆盆地构造演化阶段,晚奥陶世一早志留世自南东方向的挤压作用增强,伴随扬子周边地区古陆上隆,华南海盆不断向西迁移,使得扬子海处于半封闭的状态,海域自南东向北西逐渐迁移^[15]。湖北省来凤-咸丰地区位于湖北省西南角处,西邻重庆市黔江区(图1),在晚奥陶世五峰组一早志留世龙马溪组沉积期,湖北省全部处于浅海陆棚沉积环境中^[17]。

四川盆地志留统龙马溪组划分为龙一段、龙二段与龙三段,其中龙一段为一套富有机质高成熟度高脆性的黑色页岩,富含微粒黄铁矿和笔石^[34,36]。五峰组和龙一段为我国页岩气勘探开发的重要层段^[34]。鄂西地区与四川盆地腹地相比,沉积地层发育齐全、层序完全可对比^[37]。根据地层中岩石组分的发育特征,将研究区志留系下统划分为龙马溪组、新滩组与罗惹坪组,其中龙马溪组相当于四川盆地龙马溪组的龙一段,新滩组相当于龙二段与龙三段,上覆地层为志留系下统罗惹坪组。根据研究区五峰组-龙马溪组的发育情况,结合该地区的页岩气勘探程度,共选取了6条露头剖面 and 来地1井、来地2井及来页2井进行观测(图1c),并借助偏光显微镜、X-射线衍射、场发射扫描电镜和有机碳含量(TOC)分析等对五峰组-龙马溪组的岩石学和矿物学特征进行研究。

2 矿物组分特征

研究区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组为细粒沉积岩,受碎屑沉积岩粘土级和粉砂级粒度及黑色有机质晕染的影响,常规偏光显微镜对岩石学特征的分析较笼统且局限,因此首先借用X-射线衍射与扫描电

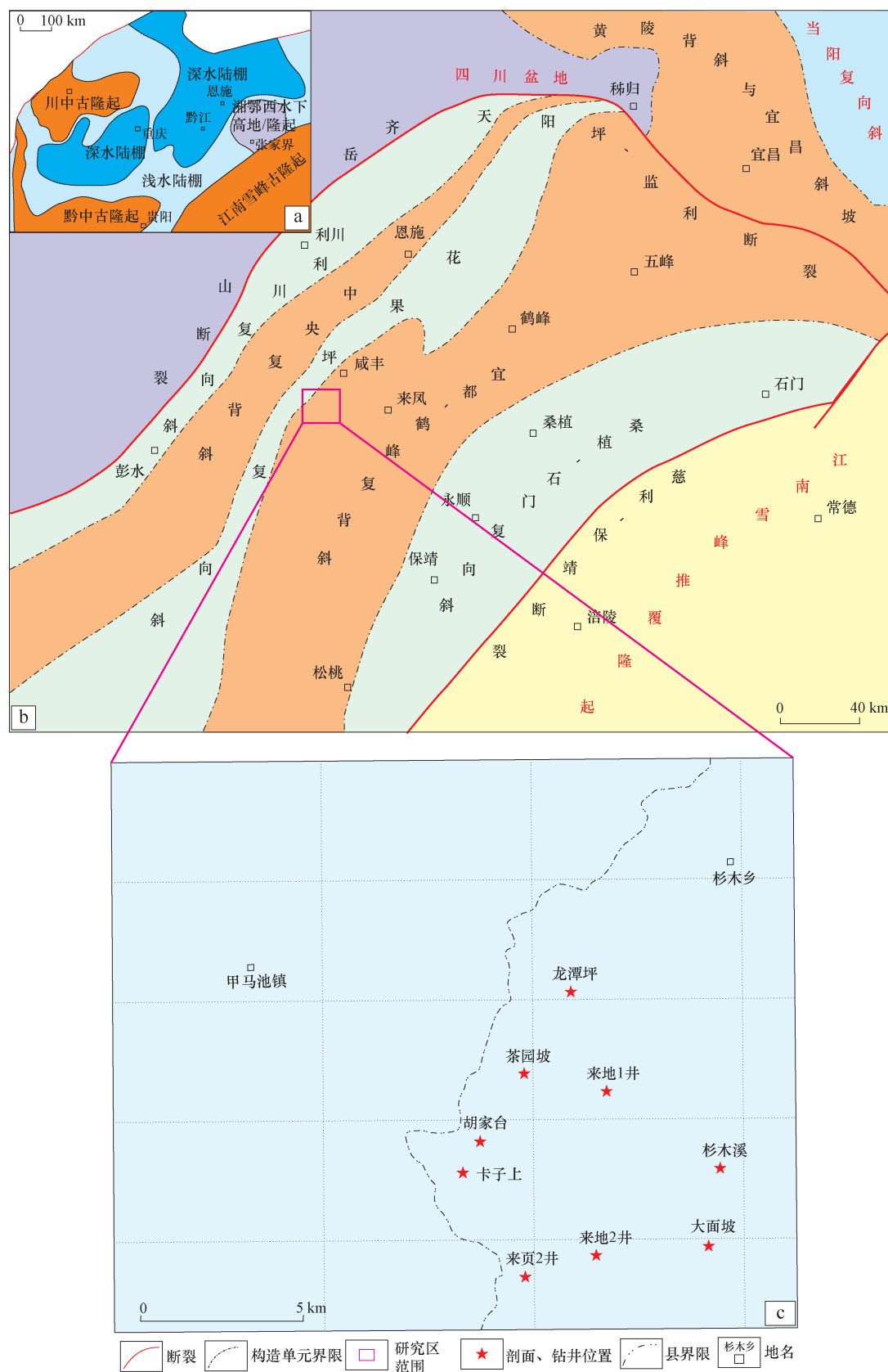


图1 研究区位置及区域构造特征(图1a据聂海宽等修改^[38];图1b据李海等^[28])

Fig.1 Location and regional tectonic characteristics of the study area
(Fig.1a modified from NieHaikuan et al^[38]; Fig.1b from Li Hai et al^[28])

a. 区域沉积背景; b. 构造背景; c. 研究区及其剖面、钻井位置

镜的手段确定岩石的矿物组分特征,作为对其岩石类型划分的基础。

来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组全岩和粘土矿物成分分析结果表明(共65件样品),矿物组分以石英和粘土矿物为主,其次为长石、碳酸盐矿物和黄铁矿,其中石英含量介于5%~66%,平均为40.92%,粘土矿物含量为16%~73.8%,平均36.62%,钾长石和斜长石均发育,其平均含量分别为3.58%与10.93%,总体上脆性矿物含量高。来地1井矿物组分分析结果表明(共45件样品),碳酸盐矿物分布不均匀且含量较低,白云石相对较发育,最高达19%,方解石和白云石平均为2.23%与3.17%,白云石以铁白云石为主,

含量较低,对有机质的发育影响较小。黄铁矿在五峰组-龙马溪组中均有分布,含量为0.7%~9.6%,平均为2.98%。且在下伏奥陶系临湘组与上覆志留系新滩组中也均有发育,含量与之相差不大。粘土矿物以伊利石和伊/蒙混层为主,平均相对含量为58.2%与29.5%,并含少量绿泥石。

扫描电镜下发育大量的粉砂级碎屑颗粒,分散状分布于泥质基底中(图2a),含量主要介于30%~50%,粒径多小于0.1 mm,石英、斜长石和钾长石为主,受后期溶蚀作用的影响,石英与长石均具有不规则的溶蚀边缘和粒内溶蚀孔隙(图2b,c),长石多呈现蚀变为伊利石的特征。粘土矿物主要发育沉积成因的絮

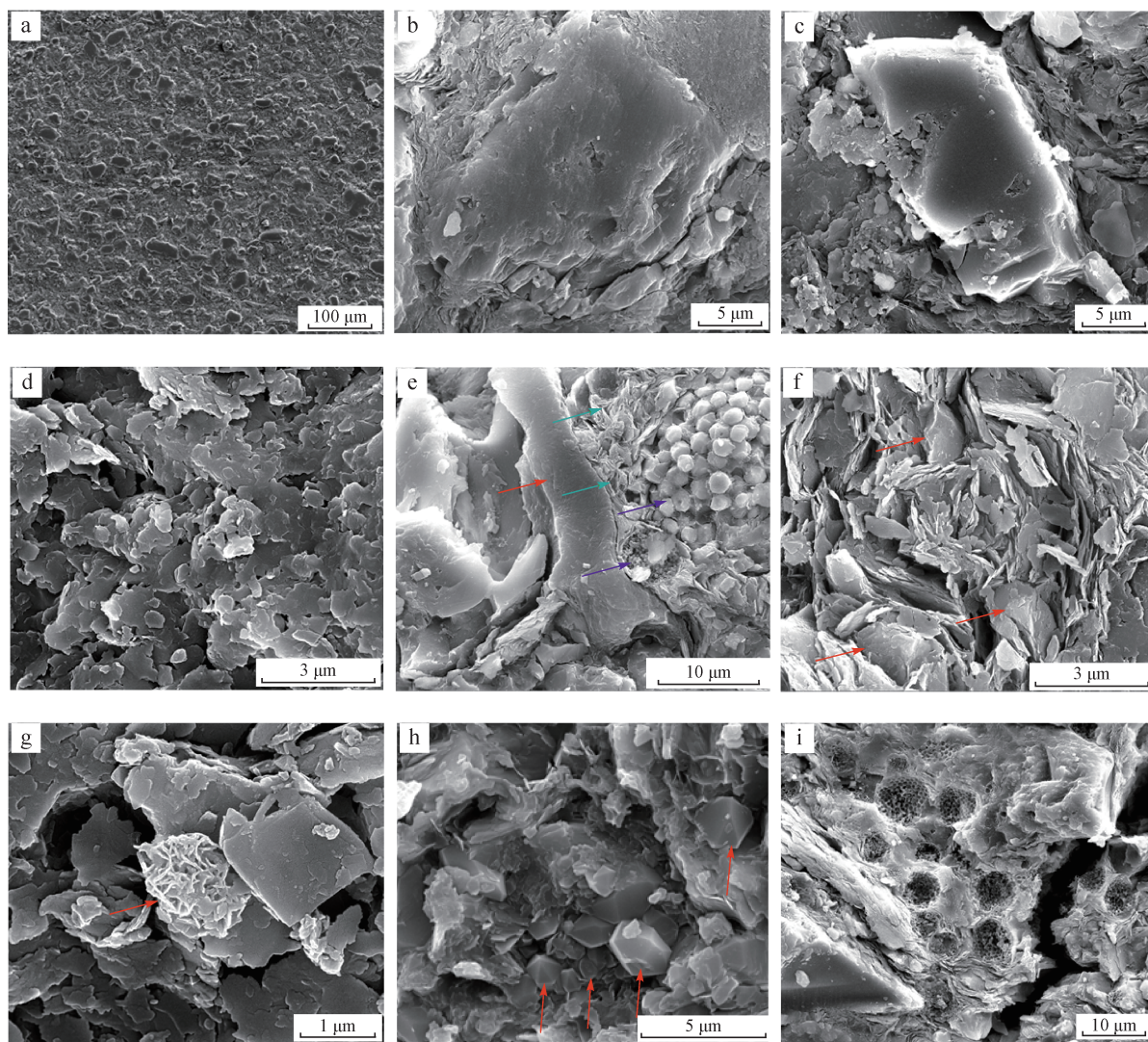


图2 来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组暗色岩系矿物组分特征

Fig. 2 Mineralogical characteristics of black rocks in Wufeng-Longmaxi Formations in Laifeng-Xianfeng area

a. 粉砂质泥质结构, DMPP7-D1, 大面坡剖面; b. 钾长石, 边缘蚀变成粘土矿物, 粒内发育溶蚀孔隙, KZSP18-C1, 卡子上剖面; c. 石英粉砂颗粒, 局部发生溶蚀, 并被粘土矿物充填孔隙, DMPP7-D1, 大面坡剖面; d. 凝絮状粘土矿物, HJTP16-D1, 胡家台剖面; e. 条带状有机质(红色箭头)与片状粘土矿物(绿色箭头)及黄铁矿(蓝色箭头)共生, KZSP14-D1, 卡子上剖面; f. 片状粘土矿物, 片晶间发育硅质(红色箭头), HJTP15-D4, 胡家台剖面; g. “花瓣状”伊/蒙混层, HJTP16-D1, 胡家台剖面; h. 自生石英, LD1-B2, 埋深647m, 来地1井; i. 蜂窝状红藻有机质, HJTP4-D1, 胡家台剖面

状体(图2d)和充填原生孔隙的片状结合体(图2e,f),伊/蒙混层矿物通常位于颗粒边缘,呈叶片状或鳞片状,并出现纤细的丝状物,似“花瓣状”(图2g),绿泥石含量很少,呈厚度较大的片状或薄板状,多与伊利石等混杂共生。粘土矿物中常见泥级的石英碎屑,以及次生粘土矿物多与硅质共生的特征(图2f)。硅质呈晶粒状和片晶状两种类型,其中自生硅质多呈晶形较好的晶粒状,晶粒大小多介于 $1 \sim 5 \mu\text{m}$,充填粒间孔(图2h);片晶状的硅质胶结物主要为次生成因的类型,形成于粘土矿物转化和硅质的再胶结过程中,结构较均匀。黄铁矿广泛发育,见莓粒状集合体,多与粘土矿物共生(图2e),单晶均小于 $1 \mu\text{m}$,集合体小于 $10 \mu\text{m}$,晶间多发育片状有机质。碳酸盐矿物含量较少,且分布不均匀,局部见连晶状胶结物的特征,较均匀致密。有机质多呈块状和条带状(图2e),分布在碎屑颗粒间及与粘土矿物共生,含量总体较少,生烃孔发育。研究区五峰组-龙马溪组中广泛发育红藻有机质,呈蜂窝状,发育大量的微孔,大小主要介于 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,最大的可达 $10 \mu\text{m}$,具有局部富集的特征(图2i)。红藻吸收蓝光,可以生活在较深水区^[39],指示研究区五峰组-龙马溪组沉积水体较深。

3 岩石类型及特征

以矿物组分特征为基础,借用偏光显微镜对研究区五峰组-龙马溪组的岩石类型进行划分。以富含有机质的粉砂岩和泥页岩为主,主要包括含炭(含)泥质粉砂岩、炭质粉砂质页岩、含炭粉砂质页岩与含炭含粉砂页岩,总体呈含炭或炭质泥质粉砂岩夹含泥(质)粉砂岩的特征。相对四川盆地内五峰组-龙马溪组的岩石类型^[40-42],其陆源碎屑颗粒含量较高,有机质含量总体较低且分布不均匀。

其中,炭质粉砂质页岩(图3a,b)主要分布在五峰组及龙马溪组底部,泥质结构为主,基质支撑-过渡支撑,具显微定向构造,呈黑褐色、黑色。主要由泥质组成,其次为粉砂级碎屑颗粒。碎屑颗粒的粒径均小于 0.05 mm ,次棱角-次圆状,含量约 $30\% \sim 40\%$,石英为主,多呈显微条带状局部富集。泥质含量约 $50\% \sim 65\%$,粘土矿物发育且具有明显的重结晶作用,呈显微鳞片状,含量约占全部基质的 $60\% \sim 70\%$ 。炭质呈浸染状,分布在颗粒间多与泥质共生,含量约 $20\% \sim 40\%$ 。见少量的白云母发育,呈短细条状,长度均小于 0.05 mm 。碳酸盐矿物包括方解石和白云石,含量较少且受有机质晕染的影响,主要以泥晶结构为主,少量

半自形-自形的铁白云石晶粒发育,星点状分布。

含炭粉砂质页岩(图3c)发育较少,主要分布在局部地区的龙马溪组顶部,泥质结构,具显微定向构造,呈黑褐色、褐色为主。岩石主要由泥质组成,含量约 $50\% \sim 60\%$,以局部发生重结晶作用的粘土矿物为主,呈显微鳞片状。碎屑颗粒的粒径多小于 0.05 mm ,次棱角-次圆状为主,局部呈点接触,含量约 $25\% \sim 35\%$ 。炭质多与泥质共生,浸染状为主,含量约 $15\% \sim 25\%$ 。白云母呈细长条状,分散状分布,含量约 2% ,呈一定的定向分布。碳酸盐矿物发育总体较少,局部呈现沿裂缝充填或呈条带状分布的特征,泥晶为主,少量的半自形-自形的白云石。

含炭泥质粉砂岩、含炭含泥粉砂岩(图3d)较发育,主要分布在龙马溪组的中下部,沉积厚度较大,多大于 15 m 。粉砂状结构,过渡支撑为主,颗粒间具有点接触和少量的线接触,多呈黑褐色、褐色。碎屑颗粒含量为 $60\% \sim 70\%$,次棱角状-次圆状,粒径小于 0.05 mm ,石英为主。颗粒间充填物含量为 $30\% \sim 40\%$,主要为泥质,其次为炭质。粘土矿物多发育重结晶作用,呈显微鳞片状,含量约 $20\% \sim 30\%$;炭质呈浸染状、粒状,不均匀分布,含量约 $10\% \sim 20\%$ 。短细条状白云母少量发育,近定向分布,含量约 $3\% \sim 5\%$ 。碳酸盐矿物含量较少,多小于 10% ,包括方解石和(铁)白云石,泥晶结构为主,星点状分布,见少量半自形-自形的白云石晶粒。黄铁矿少量,粒状为主,少量正方形、菱形。

含炭含粉砂页岩(图3e)主要分布在局部地区龙马溪组的顶部,泥质结构,显微定向构造发育。泥质含量约 70% ,主要为粘土矿物,呈显微鳞片状。炭质不均匀分布,呈浸染状、粒状、条带状,含量约 $10\% \sim 20\%$ 。碎屑颗粒小于 0.03 mm ,次棱角-次圆状,局部呈斑块状富集,含量约 $15\% \sim 25\%$,石英为主。可见数条不规则裂隙,宽度小于 0.03 mm ,被硅质充填或未被充填。细长条状的白云母含量较少,远远低于粉砂岩中的含量。碳酸盐矿物含量较少,多小于 10% 。

含泥(质)粉砂岩(图3f)呈粉砂状结构,过渡支撑,以褐色、浅褐色为主,主要分布在龙马溪组的中上部。碎屑颗粒含量可达 80% 以上,以石英为主,次棱角状-次圆状,粒径小于 0.06 mm ,颗粒多呈点接触。基质以粘土矿物为主,炭质少量。受明显的重结晶作用的影响,粘土矿物多呈显微鳞片状,呈现以淀杂基结构为主的特征,含量约占全部基质的 $80\% \sim 90\%$;炭质呈浸染状、粒状、条带状,含量均小于 10% ,多以小于 5% 为主,越靠近龙马溪组的下部,有机质含量越

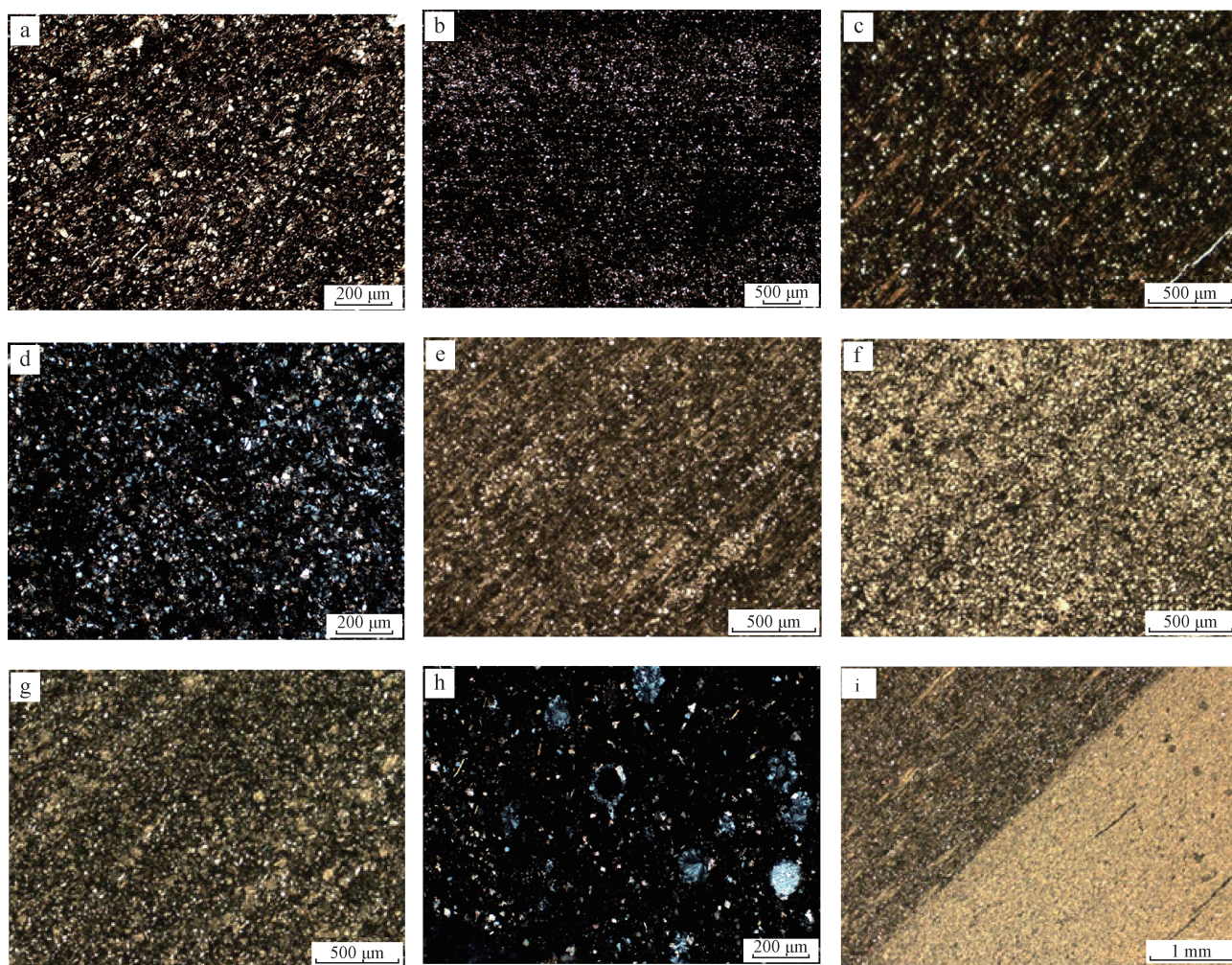


图3 来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组岩石类型特征

Fig. 3 Rock type characteristics of Wufeng-Longmaxi Formations in Laifeng-Xianfeng area

a. 炭质粉砂质页岩, LD1-A40, 埋深 944.77 m, 正交偏光, 来地 1 井; b. 炭质粉砂质页岩, LD1-A8, 埋深 908.96 m, 单偏光, 来地 1 井; c. 含炭粉砂质页岩, LD1-A41, 埋深 946.36 m, 单偏光, 来地 1 井; d. 含炭含泥粉砂岩, HJTP15-B1, 单偏光, 胡家台剖面; e. 含炭含粉砂页岩, HJTP16-B1, 单偏光, 胡家台剖面; f. 含泥粉砂岩, LD1-A1, 埋深 901.53 m, 正交偏光, 来地 1 井; g. 含云含炭含泥粉砂岩, HJTP17-B1, 单偏光, 胡家台剖面; h. 含硅质放射虫炭质页岩, HJTP11-B1, 正交偏光, 胡家台剖面; i. 普通页岩, DMPP6-B1, 单偏光, 大面坡剖面

高。细长条状的白云母常见, 顺层分布的特征, 局部富集, 最高含量可达 5%。碳酸盐矿物含量也较少, 主要为后期交代、充填的产物, 多小于 10%。

另外, 富有机质层段还发育少量的含云含炭含泥粉砂岩与含硅质放射虫炭质页岩, 其中含云含炭含泥粉砂岩(图 3g)主要分布在龙马溪组的中下部, 即富有机质层段的中部, 指示沉积水体短暂性变浅的特征。粉砂状结构, 基质支撑, 呈褐色、褐黄色。碎屑颗粒含量为 55%~65%, 呈次棱角状-圆状, 粒径小于 0.06 mm, 石英为主。填隙物主要为泥质, 其次为白云石, 炭质少量。泥质主要为粘土矿物, 含量占全部基质的 50%; 白云石呈不规则状分布在碎屑间孔隙处, 含量约占全部基质的 40%; 炭质呈浸染状、粒状, 含量约 10%。

含硅质放射虫炭质页岩(图 3h)主要分布在五峰组-龙马溪组的下部黑色层段, 指示沉积水体较深的特征。有机质含量较高, 泥质结构, 基底支撑, 发育近似球形的硅质放射虫, 形状多不规则, 大小均小于 0.2 mm, 含量约 15%, 放射虫体腔多被显微硅质完全充填, 或被有机质或沥青质充填。碎屑颗粒以石英为主, 次棱角状-次圆状, 呈漂浮状不均匀分布于基质中, 粒径小于 0.03 mm, 含量均小于 10%, 并发育被碳酸盐矿物交代的特征。含少量的碳酸盐矿物, 包括方解石和白云石, 呈交代碎屑颗粒和少量半自形-自形晶粒状发育, 呈点状分布, 含量小于 10%。极少量的短细条状白云母分散状分布, 长度均小于 0.05 mm, 定向性较差。基质含量可达 85% 以上, 泥质为主, 炭质与泥质共生, 呈浸染状。

由龙马溪组向新滩组,岩性由含炭含粉砂页岩快速过渡为普通页岩,二者具有明显的岩相相变面。志留系新滩组底部的普通页岩(图3i)呈明显的泥质结构,显微定向构造特征发育,泥质含量可达90%以上,粘土矿物为主,呈显微鳞片状,结构较均匀、致密。

4 黑色岩系空间发育特征

4.1 垂向发育特征

由来地1井、来地2井和来页2井的岩心分析,由底向上五峰组-龙马溪组依次可划分为4个岩性段,分别为①炭质(含)粉砂质页岩段、②含炭含泥(质)粉砂岩段、③含泥粉砂岩段及④含炭粉砂质页岩段,此4个岩性段与上覆地层志留系新滩组普通页岩及泥质粉砂岩的发育,充分反映了研究区五峰组-新滩组沉积水体呈深一浅的变化特征。其中,①炭质粉砂质页岩段,粉砂含量较少,有机质含量较高,局部含少量的含生物硅质炭质(粉砂质)页岩,相对于下伏临湘组泥晶灰岩,为水体较深的产物;向上过渡为②含炭含泥(质)粉砂岩段,局部夹少量的含云含泥粉砂岩,有机质含量减少,粉砂含量增多,指示沉积水体变浅的特征;随着沉积水体的逐渐变浅,有机质含量明显减少,呈现为③含泥粉砂岩段,粉砂含量增多,多呈颗粒支撑,细小的白云母分布较广泛,含量应在5%以上,有机质含量很少,镜下多呈棕色,指示五峰组-龙马溪组沉积最浅的时期;龙马溪组的顶部为④含炭粉砂质页岩段,泥质含量增加,粉砂质泥质结构,有机质含量增加,镜下多呈深棕色或棕黑色,指示沉积水体再次加深

的特征。至新滩组有机质含量很低的普通页岩与泥质粉砂岩,指示沉积水体相对龙马溪组的顶部明显变浅的特征。

由上述分析可知,研究区五峰组-龙马溪组中,不同岩石类型的矿物组分具有一定的差别(表1)。石英含量主要介于30%~40%,石英含量最高的为沉积于五峰组-龙马溪组底部的炭质(含)粉砂质页岩与中上部的含泥粉砂岩,而此二者的有机碳含量相差大,分别为有机碳含量最高和最低的岩石类型;长石含量后者几乎是前者的2倍,粘土矿物含量后者比前者少约10%,由此可见二者石英矿物的成因应不同。考虑到炭质(含)粉砂质页岩上部的含炭含泥(质)粉砂岩组成了研究区五峰组-龙马溪组主要的富有机质层段,且随着有机碳含量的降低,石英含量减少的特征,及四川盆地石英矿物与有机碳含量的正相关性^[42],说明炭质(含)粉砂质页岩中石英具有一定的生物成因。碳酸盐矿物包括方解石和白云石,且白云石以铁白云石为主,由底向上总体呈现减少的特征,且粉砂岩中含量较页岩中高,结合碳酸盐矿物多呈交代石英、长石及充填粒间孔呈星点状分布特征,说明研究区五峰组-龙马溪组碳酸盐矿物应主要为后期成岩作用的产物。龙马溪组顶部的含炭(含)粉砂质页岩的粘土矿物含量最高,与其上覆地层新滩组的普通页岩粘土矿物含量相当,且总体上二者矿物组分相差不大,而前者的黄铁矿和有机碳含量较高,由此推断志留系龙马溪组有机质的富集应受到了缺氧沉积环境的控制。位于五峰组-龙马溪组中下部的含炭含泥(质)粉砂岩其沉积厚度最大,且TOC主要介于1.0%~2.0%,与位于顶部的含炭(含)粉砂质页岩的有机碳含量相似,前者代

表1 来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组不同岩石类型的矿物组分特征

Table 1 Mineralogical characteristics of different rock types of Wufeng-Longmaxi Formations in Laifeng-Xianfeng area

序号	样品数/个	岩性	TOC/%	矿物含量/%						备注
				石英	长石	方解石	白云石	粘土矿物	黄铁矿	
5		普通页岩	0.20~0.59	36.7~41.5	8.8~11.0	4.4	5.7	40.9~54.3	1.2,3.8	来地2井 新滩组
			0.30	39.1	9.4	(仅一件)	(仅一件)	48.4	(仅两件)	
④	16	含炭(含)粉砂质页岩	0.88~1.95	26.9~38.2	7.3~13.8	0.4~5.3	0~5.9	42.1~51.2	2.3~6.7	龙马溪组 顶部
			1.31	33.6	10.0	1.8	1.8	48.2	4.5	
③	24	含泥粉砂岩	0.33~0.96	34.3~49.3	11.0~25.4	0~17.4	1.0~22.7	14.7~51.1	1.0~4.2	龙马溪组 中上部
			0.60	41.1	20.1	3.8	5.9	26.7	2.4	
②	39	含炭含泥(质)粉砂岩	0.47~1.96	15.9~44.9	9.4~18.8	0~23.9	1.7~15.2	23.3~60.2	2.0~8.3	龙马溪组 中下部
			1.21	38.4	15.0	5.1	5.2	32.8	3.5	
①	15	炭质(含)粉砂质页岩	1.83~4.18	29.9~66.0	3.2~13.7	0~20.4	1.8~7.2	20.4~48.2	0.7~4.3	龙马溪组 底部
			2.72	43.3	10.5	4.6	3.5	35.2	2.7	

表龙马溪组沉积水体开始逐渐变浅的沉积物,沉积环境仍一定程度上保留了前期较深水缺氧的特征,后者代表龙马溪组经历了较长时间的相对浅水沉积后,沉积水体再次逐渐加深的沉积物,沉积环境相对中下部含炭含泥(质)粉砂岩的还原性可能会较差,有机质的富集可能应主要受控于古生产力。

4.2 平面发育特征

来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组岩石类型的垂向发育特征在平面上可进行有效的对比(图4),对比的标志层为富有机质的炭质(含)粉砂质页岩段(①)、位于暗色粉砂岩和页岩之间的含泥粉砂岩(③),以及各层段的相互配置关系。来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组的岩性特征可与四川盆地焦石坝地区焦页1井进行有效对比(图4)。同时,借鉴四川盆地五峰组-龙马溪组层序地层的划分标准^[34],研究区奥陶系五峰组-志留系新滩组可划分为一个三级层序。其中,底部的炭质(含)粉砂质页岩段(①)为海侵体系域的产物(TST);位于龙马溪组中部的含炭含泥(质)粉砂岩段(②)与含泥粉砂岩段(③),沉积厚度较大,代表沉积水体逐渐变浅的早期高位体系域(EHST);而龙马溪组顶部的含炭粉砂质页岩段(④),代表晚期高位体系域(LHST),泥质和有机质含量均明显增加,至新滩组含粉砂页岩,应为另一个三级层序的沉积物。焦页1井龙一段属于为浅海陆棚相中的深水陆棚亚相^[43],而研究区相对层位的龙马溪组根据其岩石学、沉积构造特征,表现为底部的炭质(含)粉砂质页岩段(①)为深水陆棚亚相,其上3个岩性段均为浅水陆棚亚相的产物。聂海宽等^[38]通过对湘鄂西地区五峰组-龙马溪组页岩研究,表明该区五峰组和龙马溪组页岩明显含有较高的灰质,反映了其具有比焦页1井相应层位沉积水体较浅的特征。同时,越靠近研究区的东南部其粉砂含量越高,部分地区龙马溪组的中上部和上部出现细砂级碎屑颗粒,且其底部的炭质(含)粉砂质页岩段沉积厚度相对较薄,多以小于5 m为主,有机质含量总体呈现由北向南逐渐减少的特征。这很可能是受研究区东南方向处雪峰山隆起的影响,越靠近隆起区其陆源碎屑含量越高,造成其沉积环境的氧化性增强,有机质含量较低。

5 富有机质暗色岩系成因初探

中上扬子地区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组作为富有机质的暗色岩系,研究者普遍认为其是有利的

页岩气发育层段。研究区五峰组-龙马溪组的暗色岩系为炭质(含)粉砂质页岩段(①)与含炭含泥(质)粉砂岩段(②)以及含炭粉砂质页岩段(④),与已经取得页岩气突破的四川盆地地下古生界五峰组-龙马溪组相比^[26,34,42,44-45],其矿物组分相差不大,而粉砂岩较发育,有机质含量及富有机质层段的厚度却明显低于四川盆地内的相应地层。通过前面的分析,研究区五峰组-龙马溪组有机质的发育特征明显受沉积环境和岩相的控制,因此,从岩石类型、矿物组分特征出发,结合元素地球化学特征,可以为探索研究区五峰组-龙马溪组富有机质暗色岩系的发育和成因提供依据。

5.1 有机质及矿物组分发育特征

利用有机碳含量(TOC)对富有机质黑色岩系及矿物组分的成因分析,作为常用的手段已经取得了有效的成果^[42]。来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组暗色岩系的TOC最大为6.55%,最小0.47%,主要介于1.0%~2.0%,相对于四川盆地相应层系,有机质丰度较差。其中TOC>1.0%的样品占总样品的72.6%,TOC>2.0%的样品占总样品的16.8%,而大于4.0%的样品仅占总样品的0.03%。垂向上,TOC由下向上总体减小,TOC>2.0%的样品仅位于底部的炭质(含)粉砂质页岩(图4),则研究区五峰组-龙马溪组的有机碳含量较低。

根据来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组暗色岩系的发育特征,以页岩气评价过程中有机碳含量的划分标准^[46-47]为参考,将研究区五峰组-龙马溪组有机碳含量划分为4类(表2)。

总的来看,随着有机质含量的减少,长石含量逐渐增加,研究区五峰组-龙马溪组长石全部表现为陆源碎屑颗粒,说明陆源碎屑颗粒与有机质含量呈明显的负相关性。TOC>2.0%的样品石英含量最高,而有TOC<2.0%的样品,石英随着有机质含量的降低而增加,说明随着碎屑粉砂含量的逐渐增加有机质逐渐减少的特征,同时指出有机质含量较高的炭质粉砂质泥岩中,石英具有一定的生物成因类型。明显地,随着碳酸盐矿物含量的增加,有机碳含量降低,且方解石含量总体相差不大,而白云石含量与有机碳含量呈明显的负相关性。另外,粘土矿物含量越高,有机碳含量越高,进一步说明黑色岩系中泥页岩更有利于有机质的发育,粉砂级碎屑颗粒含量越高则有机质含量越低。中国南海滨岸至深海现代沉积物就具有从陆源碎屑到钙质沉积、硅质沉积和深海粘土沉积的完整序列^[48],说明在正常海水沉积环境中,沉积水体越深粘土矿物

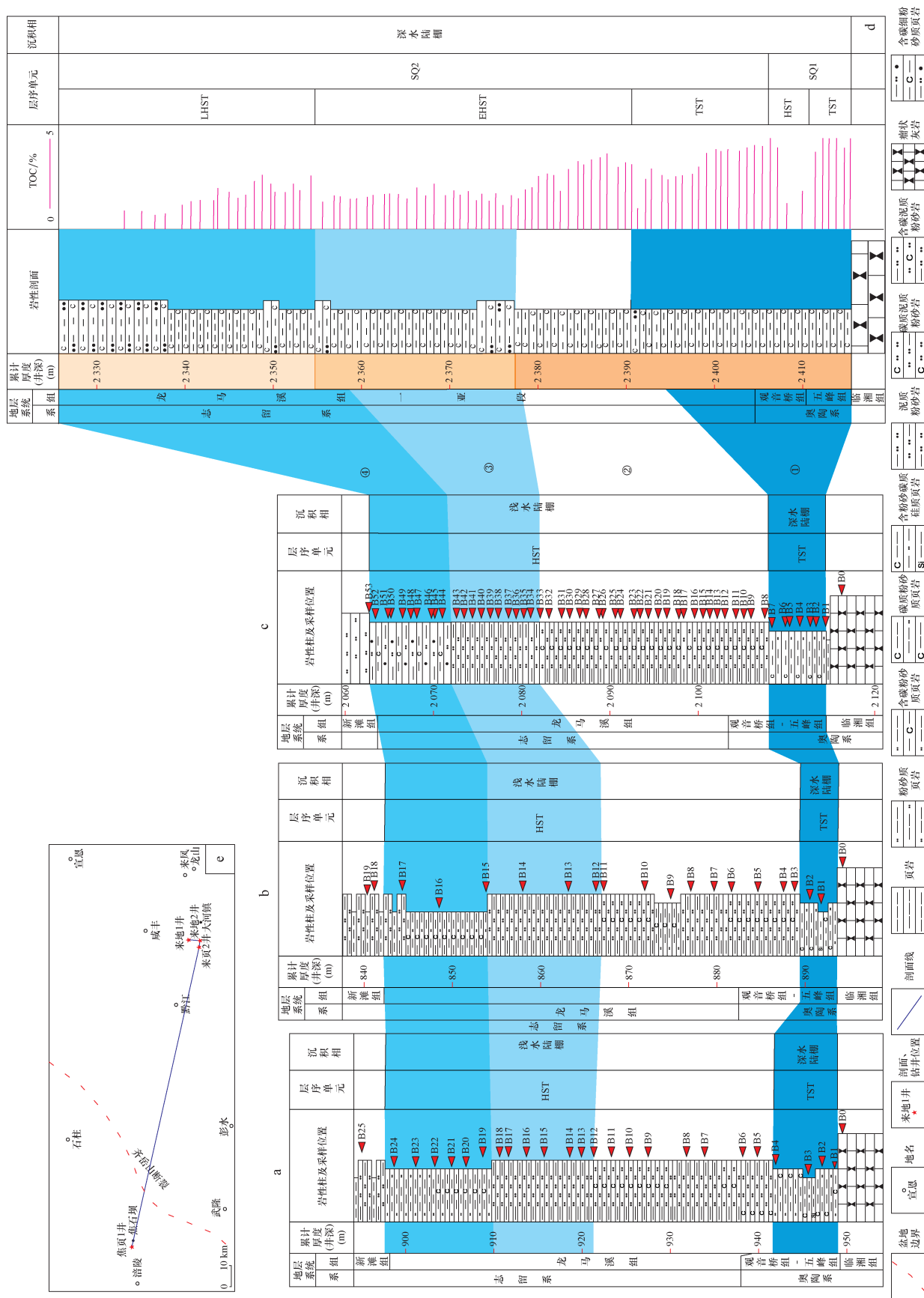


图4 来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组岩石类型的空间发育特征 (图4d转引自郭彤楼等[44]; 陆扬博等[34]; 有修改)

Fig. 4 Space development characteristics of rock types of Wufeng-Longmaxi Formations in Laifeng-Xianfeng area (d. quoted from Guo Tonglou et al[44], and Lu Yangbo et al[34] with modifications)

a.来凤1井; b.来凤2井; c.来凤1井; d.来凤2井; e.来凤1井; f.来凤2井

表 2 来凤-咸丰地区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组矿物组分与 TOC 的关系

Table 2 Relationship between mineral composition and TOC of Wufeng-Longmaxi Formations in Laifeng-Xianfeng area

TOC	样品数/个	矿物含量/%					
		石英	长石	方解石	白云石	黄铁矿	粘土矿物
>2%	17	33.5~66	3.2~13.7	0~20.4	0~7.2	0~4.3	20.4~46.4
		46.4	9.48	3.69	2.81	2.12	35.4
1%~2%	57	26.9~57	5~18.8	0~23.9	0~15.2	0~10	25.3~55
		38.6	12.7	3.5	3.14	3.4	38.6
0.5%~1%	23	30~46	8~22.8	0~9.6	0~15.1	1~8.3	18.8~50
		38.8	16.7	3.38	5.21	3.2	32.8
<0.5%	14	15.9~49.3	11~25.4	0~17.4	1.0~22.7	1~5.1	14.7~60.2
		40.9	20.2	3.8	6.3	2.0	20.9

含量越高,指示了研究区五峰组-龙马溪组沉积水体越深有机质越富集。

由上可知,研究区五峰组-龙马溪组硅质具有生物成因的类型,主要发育在其底部,矿物组分中石英含量较高且长石含量较低的岩石类型为生物硅质较发育类型,有利于有机质的富集。长石作为全部是陆源碎屑成因的类型,且具有斜长石含量较高的特征,以及研究区五峰组-龙马溪组广泛发育少量片状白云母的特征,说明较高的陆源碎屑物质的输入应是造成其有机质发育较少,且富有机质页岩厚度较小的原因之一。

5.2 元素地球化学证据

有利于页岩气成藏的主控因素和基本要素之一为有机质的富集,有机质的富集主要与高生物产率和缺氧的环境的叠加有关^[49],前者的高生产力提供有机质,后者则作为保存条件,二者同时作为形成优质烃源岩的必要条件,主要是受沉积环境的控制^[50]。通过对来地 1 井和来地 2 井的古生产力和缺氧还原环境分析,研究区五峰组-龙马溪组总体上呈富氧的特征(图 5),仅底部 TOC>2.0%的层段,呈缺氧-贫氧,厚度小于 10 m。其中,指示沉积环境氧化还原特征的 V/Cr, Ni/Co, U/Th 与 Ce/La 这 4 个指标呈相似的特征(表 3),均指示出①炭质(含)粉砂质页岩段为缺氧-贫氧的特征,其还原性数值最高;而③含泥粉砂岩均表现为富氧的特征,其还原性数值最低。有机碳含量相似的②含炭含泥(质)粉砂岩段与④含炭(含)粉砂质页岩段,表现为龙马溪组下段的还原性相对较好,且志留系新滩组的还原性总体比龙马溪组差。总的来看,五峰组-龙马溪组由底向上呈缺氧-贫氧-富氧的演化特征,①炭质(含)粉砂质页岩段为缺氧-贫氧的特征,②含炭含泥(质)粉砂岩呈贫氧-富氧的变化特征,有机质含量最低且陆源碎屑粉砂含量最高的③含泥粉砂岩为富氧的特征,龙马溪组顶部含一定有机质

的④含炭(含)粉砂质页岩也表现为富氧的特征。由来地 1 井中反映古生产力的 P, Ba 等指标分布特征可知,五峰组-龙马溪组总体上富磷矿物较发育,反映了沉积水体中具有较高的生物产率。Ba 元素与有机碳含量呈明显的正相关性,表明古生产力对有机碳含量的影响较大。尤其是④含炭(含)粉砂质页岩段表现为富氧的沉积环境,而其有机质含量相对③含泥粉砂岩段较高,应主要是受控于较高的古生产力的影响。由此可见,较高的古生产力和缺氧的还原环境控制有机碳的富集,前者是富有机质页岩发育的充分条件,而后者是必要条件。

5.3 综合讨论分析

通过对四川盆地南部及其周缘地区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组富有机质页岩沉积相与页岩气地质条件关系的分析^[51],认为该地区五峰组-龙马溪组页岩气富集的主要因素为:①局限滞留的缺氧还原环境造成有机质的富集和保存;②快速海侵形成分层水体利于有机质的富集;③适宜的沉积速率不仅利于有机质的保存,也有有效的控制了有机质的稀释率;④较高的生物产率控制有机质的丰度;⑤沉积环境控制岩石类型及矿物组分特征,造成龙马溪组富有机质页岩段以硅质型页岩为主,利于页岩气的勘探、开发。相对于四川盆地五峰组-龙马溪组,来凤-咸丰地区该层位中富有机质页岩的沉积厚度较薄,有机质含量较低,由此,主要从研究区页岩气富集的主要因素与川南地区五峰组-龙马溪组进行对比分析。

1) 局限滞留的缺氧还原环境发育时间短

由研究区五峰组-龙马溪组的地球化学特征可知,沉积环境主要呈富氧的特征,有利于有机质富集和保存的缺氧-贫氧的还原环境仅分布于五峰组-龙马溪组的底部(图 5,表 3)。莓粒状黄铁矿的发育可以指示缺氧的还原环境^[52-55],在来地 1 井五峰组-龙马溪

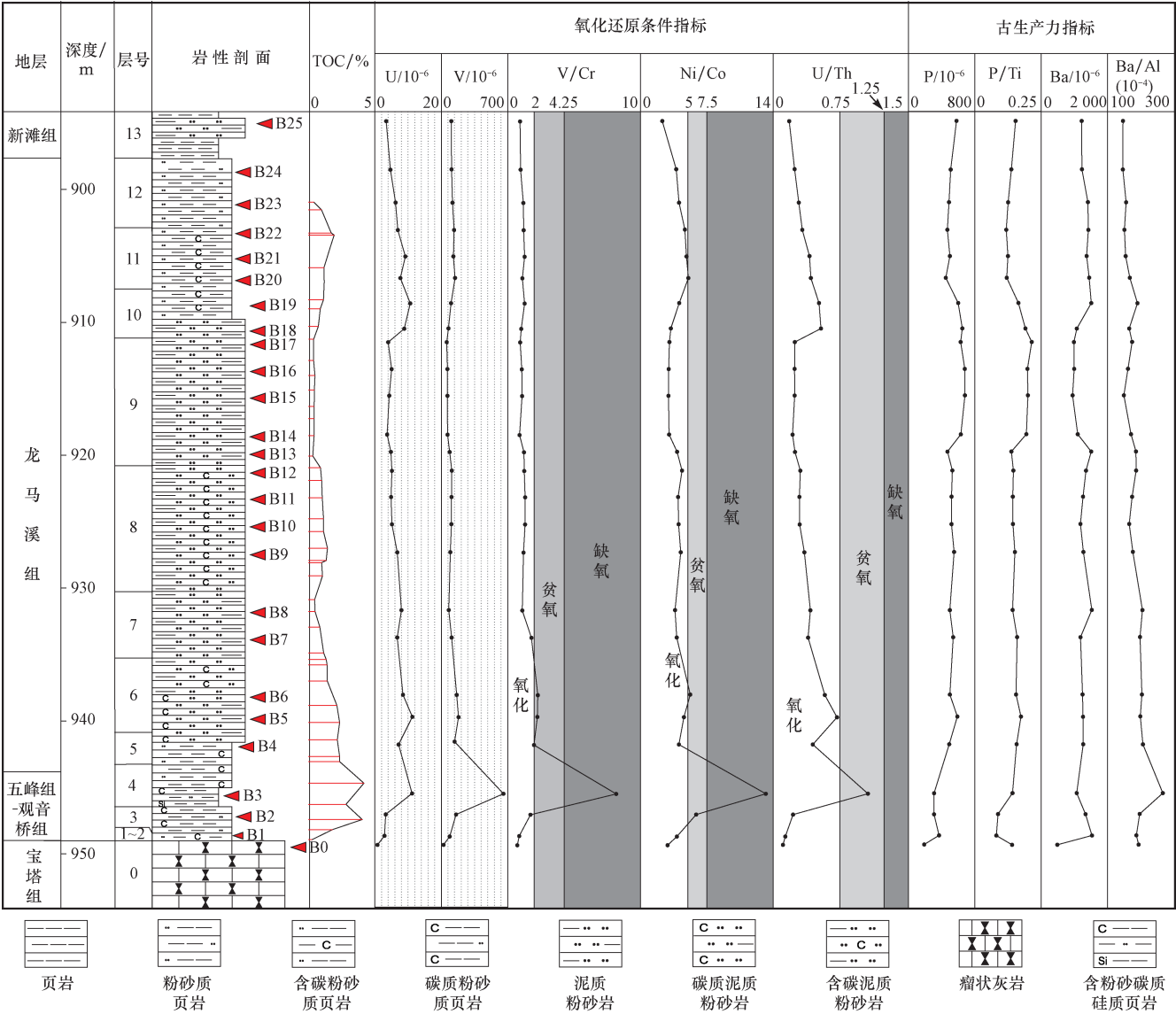


图5 来凤-咸丰地区来地1井奥陶系五峰组-志留系龙马溪组氧化还原条件与古生产力特征

Fig. 5 Characteristics of redox conditions and paleoproductivity of the Ordovician Wufeng-Longmaxi Formations in Well LD1

表3 来凤-咸丰地区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组的氧化还原特征

Table 3 Characteristics of redox conditions of the Ordovician Wufeng-Longmaxi Formations in Laifeng-Xianfeng area

序号	样品数	岩性	TOC/%	V/(V + Ni)	V/Cr	Ni/Co	U/Th	Ce/La	备注
	3	普通页岩	0.2 ~ 0.59	0.66 ~ 0.69	1.39 ~ 1.51	2.31 ~ 3.67	0.17 ~ 0.24	1.80 ~ 2.0	新滩组
			0.3	0.68	1.44	3.07	0.2	1.93	
④	8	含炭(含)粉砂质页岩	0.88 ~ 1.95	0.61 ~ 0.7	1.44 ~ 1.8	3.18 ~ 5.31	0.23 ~ 0.44	1.64 ~ 2.10	龙马溪组顶部
			1.31	0.63	1.65	4.37	0.33	1.95	
③	11	含泥粉砂岩	0.33 ~ 0.96	0.56 ~ 0.72	1.4 ~ 1.8	2.81 ~ 4.39	0.21 ~ 0.53	1.86 ~ 2.43	龙马溪组中上部
			0.6	0.68	1.58	3.47	0.3	2.12	
②	14	含炭含泥(质)粉砂岩	0.47 ~ 1.96	0.52 ~ 0.71	1.35 ~ 2.76	3.17 ~ 6.08	0.26 ~ 0.77	1.93 ~ 2.29	龙马溪组中下部
			1.21	0.64	1.89	4.04	0.47	2.09	
①	8	炭质(含)粉砂质页岩	1.83 ~ 4.18	0.63 ~ 0.86	1.26 ~ 10.55	3.83 ~ 13.23	0.13 ~ 1.07	1.77 ~ 2.51	龙马溪组底部
			2.72	0.72	3.27	6.66	0.48	2.18	

组底部最富有机质的($TOC > 2.0\%$)层段, TOC 与黄铁矿含量为高负相关性,相关系数达 -0.80 。中部及上部,二者为弱正相关,相关系数为 0.34 。这可能是由于研究区五峰组-龙马溪组还原环境中形成的莓粒状黄铁矿相对较少,黄铁矿主要以晶粒状为主,为后期成岩作用的产物。另外,有机碳含量能独立用于缺氧条件的识别^[50],研究区五峰组-龙马溪组有机碳含量在平面上和垂向上均呈不均匀分布,垂向上由下向上总体呈现降低再增加的趋势,与氧化还原元素指标反映的沉积环境变化相似;平面上,由四川盆地沉积中心向隆起区亦逐渐降低,更直观地说明缺氧的还原环境利于有机质的富集与保存。

同四川盆地一样,硅质岩在龙马溪组不发育,磷元素与有机碳含量没有明显的正相关的趋势(图5),表明研究区五峰组-龙马溪组沉积时上升洋流并不发育^[50,56],对有机质的富集贡献不大^[56]。总的来说,还原环境控制着五峰组-龙马溪组有机质的丰度,而研究区目的层中缺氧-贫氧的还原环境仅发育在其底部,发育时间较短(< 2 Ma),造成其富有机质页岩沉积厚度较薄,不利于页岩气的富集。

2) 海平面变化速度快造成海侵初期的富有机质页岩发育较薄

富有机质页岩多发育在海侵体系域中,海侵初期对陆源碎屑物质的抑制作用是造成有机质富集的重要因素之一^[50,57-60]。由于研究区位于四川盆地与外海相连的东北方向处,受雪峰隆起形成的湘鄂西水下隆起/高地^[32-34]的影响,研究区五峰组-龙马溪组体系域间的转变较快,快速的海侵海退,造成海侵初期的页岩沉积厚度较薄,而海侵后期和高位体系域中的富陆源碎屑物质的粉砂岩含量较高,不利于有机质的富集。

四川盆地志留系龙马溪组快速海侵形成分层水体造成有机质的富集与碳酸盐矿物的缺乏^[51,61-62]。由矿物组分分析可知,研究区五峰组-龙马溪组的碳酸盐矿物含量相差不大,介于 $1.86\% \sim 8.97\%$,平均为 4.53% ,其中碳酸盐矿物和方解石含量最高的为③含泥粉砂岩段,最低的为顶部的④含炭(含)粉砂质页岩,而①炭质(含)粉砂质页岩段、②含炭含泥(质)粉砂岩段与③含泥粉砂岩段总体呈现随着海平面的降低,碳酸盐矿物含量逐渐减少的特征,可能指示了在海侵的中晚期和高位体系域中,随着海平面的降低造成地层水逐渐与上层温暖水体混合,并未再发育明显的分层水体的特征,不仅造成有机质的稀释,同时造成沉积水体呈富氧的特征,使得有机质的保存条件变差,造成有机碳含量大量减少。即②含炭含泥(质)粉砂岩

段呈贫氧-富氧的变化特征,有机质含量最低且陆源碎屑粉砂含量最高的③含泥粉砂岩为富氧的特征。

3) 较小的沉积速率不利于有机质的保存

沉积速率影响岩石矿物组分的丰度,适当的沉积速率是有机质富集有利条件^[61-63]。最有利于有机质保存的沉积速率应在 $20 \sim 80$ m/Ma,古水体深度范围为 $30 \sim 400$ m^[48,64]。根据陈旭院士等^[65]建立的扬子区奥陶纪-志留纪之交笔石带序列(图6),对比来地1井奥陶系五峰组和志留系龙马溪组黑色页岩地层的划分与对比。奥陶系五峰组-志留系龙马溪组的沉积时间约 8.62 Ma,其中奥陶系晚期的沉积时间约为 3.79 Ma,志留系龙马溪组的沉积时间约 4.83 Ma。研究区五峰组-龙马溪组的沉积厚度介于 $40 \sim 70$ m,其平均视沉积速率主要为 $5 \sim 8$ m/Ma。龙马溪组早期沉积的①炭质(含)粉砂质页岩段、②含炭含泥(质)粉砂岩段的沉积时间约为 7.62 Ma,其沉积厚度主要约为 $10 \sim 30$ m,因此同四川盆地一样,五峰组-龙马溪组早期沉积速率较慢^[66]。王同等^[67]研究认为川南地区龙马溪组下段的黑色笔石页岩段,厚 $79.3 \sim 94.5$ m,其沉积速率为 $13.35 \sim 14.2$ m/Ma,较有利于有机质的保存。由此推断,研究区龙马溪组早期以粉砂岩为主的沉积物,相对川南地区较为丰富的笔石页岩,在成岩过程

统	阶	生物带	组
兰多维列统	特别奇阶	N2 <i>Spirograptus turriculatus</i> 438.13 Ma	南江组
		LM9/N1 <i>Spirograptus guerichi</i> 438.49 Ma	
	埃隆阶	LM8 <i>Stimulograptus sedgwickii</i> 438.76 Ma	龙马溪组
		LM7 <i>Lituigraptus convolutus</i> 439.21 Ma	
		LM6 <i>Demirastrites triangulatus</i> 440.77 Ma	
		LM5 <i>Coronograptus cyphus</i> 441.57 Ma	
	鲁丹阶	LM4 <i>Cystograptus vesiculosus</i> 442.47 Ma	
		LM3 <i>Parakidogr. acuminatus</i> 443.40 Ma	
		LM2 <i>Akidograptus ascensus</i> 443.83 Ma	
	赫南特阶	LM1 <i>Persculptogr. persculptus</i> 444.43 Ma	观音桥层
		WF4 <i>Normalogr. extraordinarius</i> 445.16 Ma	
上奥陶统	凯迪阶	3c <i>Diceratograptus</i> 445.37 Ma	五峰组
		WF3 3b <i>Tangyagraptus typicus</i> 446.34 Ma	
		3a Lower Subzone 447.02 Ma	
		WF2 <i>Dicellograptus complexus</i> 447.62 Ma	
		WF1 <i>Foliomena</i> <i>Nankinolithus</i>	涧草沟组

图6 扬子区五峰组和龙马溪组笔石分带^[65]

Fig. 6 Zonation of the Ordovician-Silurian graptolites in the Yangtze region^[65]

中,抗压实能力不会弱于后者,而沉积厚度不及后者的二分之一,因此,其沉积速率则应远远小于川南地区的沉积速率,不利于有机质的保存。龙马溪组顶部④含炭(含)粉砂质页岩段的沉积时间约0.5 Ma或更短,沉积厚度约10 m,其沉积速率应在10 m/Ma及以上,较有利于有机质的保存,由此形成了在较富氧的环境下的富有机质层段。富有机质页岩发育于陆源碎屑输入量大量减少的环境中^[66],而龙马溪组中期,相对浅水的沉积环境,陆源碎屑沉积物的显著增加造成对有机质的稀释,使有机质含量降低。因此,五峰组-龙马溪组在水体适中的陆棚环境中,早期较小的沉积速率不利于有机质的富集与保存,造成有机质含量较低。

4) 较高的生物产率一定程度上控制了有机质的丰度

由上分析可知,研究区五峰组-龙马溪组古生产力对有机碳含量的影响较大。而磷元素与有机碳含量之间相关性不是很明显,且五峰组-新滩组磷元素的丰度相差不大,主要介于310~680 $\mu\text{g/g}$,说明整体上沉积水体中的生物生产率相差不大,有机碳含量的差异可能主要是有机质沉积后受后期氧化环境的改造所致。高生产力可以促进水体缺氧形成还原环境^[68-69],然而研究区五峰组-龙马溪组的沉积速率很低,即使在沉积期具有较高的生产力,在如此低的沉积速率下很难形成封闭还原环境,自身无法形成缺氧的水体环境,造成其有机质被大量消耗。进一步得出,较低的沉积速率严重控制了其有机质的保存,是造成研究区五峰组-龙马溪组有机碳含量较低的根本因素。

5) 沉积相控制岩相类型及矿物组分影响页岩气的地质特征

由岩相的分析发现,仅发育于深水陆棚环境的炭质(含)粉砂质页岩的有机碳含量较高,沉积水体较深,其碳酸盐矿物含量较低、硅质含量较高,利于页岩气的富集成藏与勘探、开发。深水陆棚相页岩高TOC,高硅质含量具良好耦合关系,深水陆棚沉积环境为高有机质丰度优质页岩的形成提供了良好的基础条件。含炭含泥(质)粉砂岩与含炭粉砂质页岩主要发育于浅水陆棚环境中,其有机碳含量也相对较高,且随着碎屑颗粒与碳酸盐矿物含量的增高,有机碳含量逐渐降低,前者与有机碳含量的相关性更敏感,说明陆源碎屑提供量大的较富氧的沉积环境不利于有机质的保存,碳酸盐矿物的增加可能只起到稀释有机质丰度的作用。由此可见,沉积环境影响岩相的类型及展布,进而影响有机质的展布特征。研究区五峰组-龙马溪组深水陆棚相仅发育于其底部,且受海平面快速降低的影

响其沉积厚度较小,难以形成页岩气富集的有效厚度。

研究区五峰组-龙马溪组其局限滞留的缺氧还原环境发育时间短,并且受海平面快速变化的影响造成海侵初期的富有机质页岩发育较薄,造成有利于页岩气富集的深水陆棚相发育较少,同时较小的沉积速率不利于有机质的保存,使得五峰组-龙马溪组在较高的生物产率条件下,有机碳含量较低,古生产力仅在一定程度上控制了有机质的丰度,沉积环境的变化,最终造成研究区五峰组-龙马溪组富有机质页岩的沉积厚度和有机质的丰度相对四川盆地明显较差。总的来看,距离物源区较近且沉积水体较浅的沉积环境,应是造成研究区五峰组-龙马溪组富有机质页岩发育较少的根本性因素。

另外,王玉满等^[70]指出晚奥陶世的观音桥段岩相是判断五峰组-龙马溪组页岩气储集层质量优劣的重要标志,在观音桥组缺失区,页岩一般缺失“甜点”储集层、有效厚度薄且有机质丰度低。陈旭等^[32]、樊隽轩等^[33]、聂海宽等^[38]、王玉满等^[70]等均指出研究区属于受“宜昌上升”影响的湘鄂西水下隆起区,缺失观音桥组,这可能是造成研究区五峰组-龙马溪组页岩气地质特征相对四川盆地较差的另一重要原因。同时,聂海宽等^[38]提出湘鄂西水下高地/隆起可能与江南-雪峰古隆起相连,导致在湘鄂西地区五峰组页岩沉积厚度较薄,页岩气地质条件较差。

6 结论

1) 来凤-咸丰地区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组矿物组分以石英和粘土矿物为主,其次为长石、碳酸盐矿物和黄铁矿,总体上脆性矿物含量高。粘土矿物以伊利石和伊/蒙混层为主,含少量的绿泥石。

2) 岩石类型以含有机质的粉砂岩、泥页岩为主,主要包括含炭(含)泥质粉砂岩、炭质粉砂质页岩、含炭粉砂质页岩与含炭含粉砂页岩。由底向上,研究区五峰组-龙马溪组可划分为四个岩性段:①炭质(含)粉砂质页岩段、②含炭含泥(质)粉砂岩段、③含泥粉砂岩段及④含炭粉砂质页岩段,并可与四川盆地五峰组-龙马溪组有效对比。

3) 来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组的TOC值主要介于1.0%~2.0%,相对于四川盆地相应层系,有机质丰度较低。对比分析四川盆地相应层系页岩气富集的主要因素,认为来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组其局限滞留的缺氧还原环境发育时间短,受海平面快速变化的影响造成海侵初期的富有机质页岩发育

较薄,造成有利于页岩气富集的深水陆棚相发育较少;同时较小的沉积速率不利于有机质的保存,使得五峰组-龙马溪组在较高的生物产率条件下,有机碳含量较低,古生产力仅在一定程度上控制了有机质的丰度;沉积环境的变化,最终造成研究区五峰组-龙马溪组富有机质页岩的沉积厚度和有机质的丰度相对四川盆地明显较差。

参 考 文 献

- [1] 李爱荣,李净红,张金功,等. 建南气田志留系天然气地球化学特征及气源探讨[J]. 石油实验地质,2015,37(4):500-505.
Li Airong, Li Jinghong, Zhang Jingong, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas from the Silurian in Jiannan gas field [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(4): 500-505.
- [2] 邹才能. 页岩气开发突出“海相”突破“陆相”[J]. 地球, 2014, (9): 44-45.
Zou Caineng. Shale gas development in China shale highlight “the marine” and break through “terrestrial” [J]. Earth, 2014, (9): 44-45.
- [3] 邱小松,杨波,胡明毅. 中扬子地区五峰组-龙马溪组页岩气储层及含气性特征[J]. 天然气地球科学,2013,24(6):1274-1283.
Qiu Xiaosong, Yang Bo, Hu Mingyi. Characteristics of shale reservoirs and gas content of Wufeng-Longmaxi Formation in the middle Yangtze region [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1274-1283.
- [4] 杨飞,叶建中. 川东南-湘鄂西地区构造特征与页岩气勘探潜力[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2011,1-11.
Yang Fei, Ye Jianzhong. The structure characteristics and the shale gas exploration potential of the Southeast Sichuan and Western Hubei and Hunan [M]. Wuhan: China university of geosciences Press, 2011, 1-11.
- [5] 陈康,张金川,唐玄. 湘鄂西下志留统龙马溪组页岩含气性测井评价[J]. 特种油气藏,2016a,23(1):16-20.
Chen Kang, Zhang Jinchuan, Tang Xuan. Gas content logging evaluation of Lower Silurian Longmaxi shale in Western Hunan-Hubei [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2016a, 23(1): 16-20.
- [6] 张丽雅,李艳霞,李净红. 页岩气成藏条件及中上扬子区志留系页岩气勘探前景分析[J]. 地质科技情报,2011,30(6):90-93.
Zhang Liya, Li Yanxia, Li Jinghong. Accumulation condition for shale gas and its future exploration of Silurian in the Central-Upper Yangtze region [J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(6): 90-93.
- [7] 李艳霞,林娟华,龙幼康,等. 中扬子地区下古生界海相泥页岩含气勘探远景[J]. 地质通报,2011,30(2/3):349-356.
Li Yanxia, Lin Juanhua, Long Youkang, et al. Exploration prospect of gas-bearing marine mudstone-shale in Lower Palaeozoic in the central Yangtze area, China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 349-356.
- [8] 黄文明,刘树根,马文辛,等. 川东南-鄂西渝东地区下古生界页岩气勘探前景[J]. 地质通报,2011,30(2/3):364-371.
Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Shale gas exploration prospect of Lower Paleozoic in southeastern Sichuan and western Hubei-eastern Chongqing areas, China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 364-371.
- [9] 朱定伟,丁文龙,邓礼华,等. 中扬子地区泥页岩发育特征与页岩气形成条件分析[J]. 特种油气藏,2012,19(1):34-37.
Zhu Dingwei, Ding Wenlong, Deng Lihua, et al. Development characteristics of mud shale and shale gas formation condition in the middle Yangtze region [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(1): 34-37.
- [10] 郑和荣,高波,彭勇民,等. 中上扬子地区下志留统沉积演化与页岩气勘探方向[J]. 古地理学报,2013,15(5):645-656.
Zheng Herong, Gao Bo, Peng Yongmin, et al. Sedimentary evolution and shale gas exploration direction of the Lower Silurian in Middle-Upper Yangtze area [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 645-656.
- [11] 聂海宽,张金川,包书景,等. 四川盆地及其周缘上奥陶统-下志留统页岩气聚集条件[J]. 石油与天然气地质,2012,33(3):335-345.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Baoshujing, et al. Shale gas accumulation condition of the Upper Ordovician-Lower Silurian in Sichuan Basin and its periphery [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 335-345.
- [12] 马文辛,刘树根,黄文明,等. 鄂西渝东志留系储层特征及非常规气勘探前景[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(6):27-37.
Ma Wenxin, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Reservoir rocks characters of silurian and its unconventional gas prospect in Western Hubei-Eastern Chongqing [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(6): 27-37.
- [13] 周文,王浩,谢润成,等. 中上扬子地区下古生界海相页岩气储层特征及勘探潜力[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(5):569-576.
Zhou Wen, Wang Hao, Xie Runcheng, et al. Characteristics and exploration potential of Lower Paleozoic marine shale gas reservoir in middle-upper Yangtze area, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(5): 569-576.
- [14] 龙幼康. 中扬子地区下古生界页岩气的勘探潜力[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 344-348.
Long Youkang. Lower Paleozoic shale gas exploration potential in the central Yangtze area, China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 344-348.
- [15] 龙幼康. 中扬子地区五峰-龙马溪组页岩气成藏地质条件[J]. 江汉石油职工大学学报,2017,30(3):25-28.
Long Youkang. Geological conditions of shale gas accumulation of Wufeng-Longmaxi in Middle Yangtze region [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2017, 30(3): 25-28.
- [16] 王鹏万,邹辰,刘月早,等. 湘鄂西地区鹤峰区块页岩气勘探前景评价[J]. 地质科技情报,2014,33(6):104-109.
Wang Pengwan, Zou Chen, Liu Yuezhao, et al. Shale gas exploration prospect evaluation in the Hefeng Block of Western Hubei and Hunan provinces [J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(6): 104-109.

- [17] 石创,徐思煌,拜文华,等. 湖北及周缘五峰组-龙马溪组页岩气资源潜力[J]. 特种油气藏,2015,22(6):65-69.
Shi Chuang, Xu Sihuang, Bai Wenhua, et al. Shale gas resource potential of Wufeng-Longmaxi Formation in Hubei and its periphery [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 65-69.
- [18] 魏国庆,李博,彭传圣,等. 湖北来凤地区龙马溪组页岩气微观孔隙结构特征[J]. 资源环境与工程,2016,30(2):188-193.
Wei Guoqing, Li Bo, Peng Chuansheng, et al. Micro pore structure characteristics of Longmaxi formation shale in Laifeng area in Hubei province[J]. Resources Environment & Engineering, 2016, 30(2): 188-193.
- [19] 刘安,包汉勇,李海,等. 湖北省上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩气地质条件分析及有利区带预测[J]. 华南地质与矿产,2016,32(2):126-134.
Liu An, Bao Hanyong, Li Hai, et al. Analysis of the shale gas geological conditions of the Upper Ordovician Wufeng formation-Lower Silurian Longmaxi formation in Hubei province and predict the favorable zone[J]. Geology and Mineral Resources of the South China, 2016, 32(2): 126-134.
- [20] 李博,魏国庆,洪克岩,等. 中国南方盆外复杂构造区页岩气井评价与认识—以湖北来凤-咸丰区块来凤1井为例[J]. 天然气工业,2016,36(8):29-35.
Li Bo, Wei Guoqing, Hong Keyan, et al. Evaluation and understanding on the shale gas wells in complex tectonic provinces outside Sichuan Basin, South China: A case study from Well Laiye 1 in Laifeng-Xianfeng Block, Hubei[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(8): 29-35.
- [21] 陈康,张金川,唐玄,等. 湘鄂西地区下志留统龙马溪组页岩气吸附能力主控因素[J]. 石油与天然气地质,2016b,37(1):23-29.
Chenkang, Zhangjinchuan, Tang Xuan, et al. Main controlling factors on shale adsorption capacity of the Lower formation in western Hunan-4Hubei area[J]. Oil & Gas Geology, 2016b, 37(1): 23-29.
- [22] 王登,余江浩,李雄伟,等. 鄂西来凤地区上奥陶统-下志留统龙马溪组富有机质页岩储层特征—以龙潭坪剖面为例[J]. 资源环境与工程,2017,31(3):295-299.
Wang Deng, Yu Jianghao, Li Xiongwei, et al. Characteristics of Organic-rich shale reservoir in the Upper Ordovician-Lower Silurian Longmaxi formation of Laifeng area in Western Hubei province: Taking Longtanping Section as an example[J]. Resources Environment & Engineering, 2016, 30(2): 188-193.
- [23] 张胜蓉,文志刚,赵璐阳. 湘鄂西地区志留系龙马溪组页岩气勘探潜力评价[J]. 长江大学学报(自然版),2017,14(7):25-27.
Zhang Shengrong, Wen Zhigang, Zhao Luyang. The evolution on exploration potential of shale gas of Longmaxi Formation in Hunan and the west of Hubei area[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(7): 25-27.
- [24] 王玉满,王淑芳,董大忠,等. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表征[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京);北京大学),2016a,23(1):119-133.
Wang Yuman, Wang Shufang, Dong Dazhong, et al. Lithofacies characterization of Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan[J]. Earth Science Frontiers, 2016a, 23(1): 119-133.
- [25] 朱逸青,王兴志,冯明友,等. 川东地区下古生界五峰组-龙马溪组页岩岩相划分及其与储层关系[J]. 岩性油气藏,2016,28(5):59-66.
Zhu Yiqing, Wang Xingzhi, Feng Mingyou, et al. Lithofacies classification and its relationship with reservoir of the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formation in the eastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(5): 59-66.
- [26] 吴蓝宇,胡东风,陆永潮,等. 四川盆地涪陵气田五峰组-龙马溪组页岩优势岩相[J]. 石油勘探与开发,2016,43(2):189-197.
Wu Lanyu, Hu Dongfeng, Lu Yongchao, et al. Advantageous shale lithofacies of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling gas field of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 189-197.
- [27] 解习农,郝芳,陆永潮,等. 南方复杂地区页岩气差异富集机理及其关键技术[J]. 地球科学,2017,42(7):1045-1056.
Xie Xinong, Hao Fang, Lu Yongchao, et al. Differential enrichment mechanism and key technology of shale gas in complex areas of South China[J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1045-1056.
- [28] 李海,白云山,王保忠,等. 湘鄂西地区下古生界页岩气保存条件[J]. 油气地质与采收率,2014,21(6):22-25.
Li Hai, Bai Yunshan, Wang Baozhong, et al. Preservation conditions research on shale gas in the Lower Paleozoic of western Hunan and Hubei area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 22-25.
- [29] 付宜兴,张萍,李志祥,等. 中扬子区构造特征及勘探方向建议[J]. 大地构造与成矿学,2007,31(3):308-314.
Fu Yixing, Zhang Ping, Li Zhixiang, et al. The tectonic characteristics and their significance for hydrocarbon exploration in Mid-Yangtze area[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(3): 308-314.
- [30] 陈玉明,高星星,盛贤才. 湘鄂西地区构造演化特征及成因机理分析[J]. 石油地球物理勘探,2013,48(增刊1):158-162.
Chen Yuming, Gao Xingxing, Sheng Xiancai. Tectonic evolution characteristics and mechanism in Western Hunan-Hubei [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(Supplement 1): 158-162.
- [31] 许效松,尹福光,万方,等. 广西钦防海槽迁移与沉积-构造转换面[J]. 沉积与特提斯地质,2001,21(4):1-10.
Xu Xiaoson, Yin Fuguang, Wan Fang, et al. The migration of the Qinzhou-Fangcheng trough in Guangxi and associated sedimentary-tectonic transform surfaces[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2001, 21(4): 1-10.
- [32] 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 and Yichang uplifts, Upper Yangtze region, between Ordovician and Silurian [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(12): 1052-1056.
- [33] 樊隽轩, Melchin M J, 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 Juanxuan, Melchin M J, Chen Xu, et al. Biostratigraphy and geography of Ordovician-Silurian Lungmachi black shales in South China[J]. Science China Earth Science, 2011, 54(12): 1854-1863.
- [34] 陆扬博,马义权,王雨轩,等. 上扬子地区五峰组-龙马溪组主要地质事件及岩相沉积响应[J]. 地球科学,2017,42(7):1169-1184.

- Lu Yangbo, Ma Yiquan, Wang Yuxuan, et al. The sedimentary response to the major geological events and lithofacies characteristics of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Upper Yangtze area [J]. *Earth Science*, 2017, 42(7): 1169-1184.
- [35] 焦方正, 冯建辉, 易积正, 等. 总扬子地区海相天然气勘探方向、关键问题与勘探对策[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(2): 1-8.
- Jiao Fangzheng, Feng Jianhui, Yi Jizheng, et al. Direction, key factors and solution of marine natural gas exploration in Yangtze area [J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(2): 1-8.
- [36] 郭旭升. 上扬子地区五峰组-龙马溪组页岩层序地层及演化模式[J]. *地球科学*, 2017, 42(7): 1069-1082.
- Guo Xusheng. Sequence stratigraphy and evolution model of the Wufeng-Longmaxi shale in the Upper Yangtze area [J]. *Earth Science*, 2017, 42(7): 1069-1082.
- [37] 何志祥, 赵旭, 刘乔平, 等. 川东鄂西页岩气层位优选研究[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(6): 53-56.
- He Zhixiang, Zhao Xu, Liu Qiaoping, et al. Shale gas horizon optimization in the Eastern Sichuan and Western Hubei area [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(6): 53-56.
- [38] 聂海宽, 金之钧, 马鑫, 等. 四川盆地及邻区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征[J]. *石油学报*, 2017, 38(2): 160-174.
- Nie Haikuan, Jin Zhijun, Ma Xin, et al. Graptolites zone and sedimentary characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its adjacent areas [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(2): 160-174.
- [39] 梁狄刚, 郭彤楼, 边立曾, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三) 南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(2): 1-19.
- Liang Digang, Guo Tonglou, Bian Lizeng, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (Part 3): Controlling factors on the sedimentary facies and development of Palaeozoic marine source rocks [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(2): 1-19.
- [40] 曾祥亮, 刘树根, 黄文明, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩与美国 Fort Worth 盆地石炭系 Barnett 组页岩地质特征对比[J]. *地质通报*, 2011, 30(2-3): 372-384.
- Zeng Xiangliang, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Comparison of Silurian Longmaxi Formation shale of Sichuan Basin in China and Carboniferous Barnett Formation shale of Fort Worth Basin in United States [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2-3): 372-384.
- [41] 梁超, 姜在兴, 杨懿婷, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 691-698.
- Liang Chao, Jiang Zaixing, Yang Yiting, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng - Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 691-698.
- [42] 王秀平, 牟传龙, 葛祥英, 等. 川南及邻区龙马溪组黑色岩系矿物组分特征及评价[J]. *石油学报*, 2015, 36(2): 150-162.
- Wang Xiuping, Mou Chuanlong, Ge Xiangying, et al. Mineral component characteristics and the evaluation of black rock series of Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its periphery [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(2): 150-162.
- [43] 张美玲, 李建明, 郭战峰, 等. 涪陵焦石坝地区五峰组-龙马溪组富有机质泥页岩层序地层与沉积相研究[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2015, 12(11): 17-21.
- Zhang Meiling, Li Jianming, Guo Zhanfeng, et al. Study on sequence stratigraphy and sedimentary facies of rich organic mud shale of Wufeng-Longmaxi Formation in Fuling Jiaoshiba area [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2015, 12(11): 17-21.
- [44] 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.
- Guo Tonglou, Liu Ruobing. Implications from marine shale gas exploration break through on complicated structural area at high thermal stage: Taking Longmaxi Formation in well JY1 as an example [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(4): 643-651.
- [45] 孟志勇. 四川盆地涪陵地区五峰组-龙马溪组含气页岩段纵向非均质性及其发育主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(6): 838-846.
- Meng Zhiyong. Vertical heterogeneity and its controlling factors of the gas shale in the Wufeng-Longmaxi Fms in Fuling area, the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 838-846.
- [46] 李玉喜, 张金川, 姜生玲, 等. 页岩气地质综合评价和目标优选[J]. *地学前缘(中国地质大学(北京);北京大学)*, 2012, 19(5): 332-338.
- Li Yuxi, Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, et al. Geologic evaluation and targets optimization of shale gas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 332-338.
- [47] 李延钧, 刘欢, 张烈辉, 等. 四川盆地南部上古生界龙马溪组页岩气评价指标下限[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(7): 1088-1095.
- Li Yanjun, Liu Huan, Zhang Liehui, et al. Lower limits of evaluation parameters for the lower Paleozoic Longmaxi shale gas in southern Sichuan Province [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(7): 1088-1095.
- [48] 付小东, 秦建中, 滕格尔, 等. 烃源岩矿物组成特征及油气地质意义——以中上扬子古生界海相优质烃源岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(6): 671-684.
- Fu Xiaodong, Qin Jianzhong, Teng Geer, et al. Mineral components of source rocks and their petroleum significance: A case from Paleozoic marine source rocks in the Middle-Upper Yangtze region [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6): 671-684.
- [49] 金强. 有效烃源岩的重要性及其研究[J]. *油气地质与采收率*, 2001, 8(1): 1-4.
- Jin Qiang. Importance and research about effective hydrocarbon source rocks [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2001, 8(1): 1-4.
- [50] 李双建, 肖开华, 沃玉进, 等. 南方海相上奥陶统一志留统优质烃源岩发育的控制因素[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 872-880.
- Li Shuangjian, Xiao Kaihua, Wo Yujin, et al. Developmental controlling factors of Upper Ordovician-Lower Silurian high quality source rock in marine sequence, South China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 872-880.

- ica, 2008, 26(5): 872–880.
- [51] 牟传龙, 王秀平, 王启宇, 等. 川南及邻区下志留统龙马溪组下段沉积相与页岩气地质条件的关系[J]. 古地理学报, 2016, 18(3): 457–472.
- Mou Chuanlong, Wang Xiuping, Wang Qiyu, et al. Relationship between lithofacies paleogeography and shale gas of Lower Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its periphery[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(3): 457–472.
- [52] Wilken R T, Barnes H L, Brantley S L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 3897–3912.
- [53] Hackley P C. Geological and geochemical characterization of the Lower Cretaceous Pearsall Formation, Maverick Basin, south Texas: A future shale gas resource? [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(8): 1449–1482.
- [54] 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.
- [55] 黄保家, 黄合庭, 吴国璋, 等. 北部湾盆地始新统湖相富含有机质页岩特征及成因机制[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 25–31.
- Huang Baojia, Huang Heting, Wu Guoxuan, et al. Geochemical characteristics and formation mechanism of Eocene lacustrine organic-rich shales in the Beibuwan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 25–31.
- [56] 王清晨, 严德天, 李双建. 中国南方志留系底部优质烃源岩发育的构造–环境模式[J]. 地质学报, 2008, 82(3): 289–297.
- Wang Qingchen, Yan Detian, Li Shuangjian. Tectonic-environmental model of the Lower Silurian high-quality hydrocarbon source rocks from south China [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(3): 289–297.
- [57] 肖开华, 李双建, 汪新伟, 等. 中上扬子区志留系油气成藏特点与勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 589–596.
- Xiao Kaihua, Li Shuangjian, Wang Xinwei, et al. Hydrocarbon accumulation features and exploration direction in the Silurian of the Middle-Upper Yangtze Platform [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 589–596.
- [58] Wignall P B, Maynard J R. The sequence stratigraphy of transgressive black shales [C] // Katz B J, Pratt L M, eds. Source Rocks in a Sequence stratigraphy Framework. AAPG Stud. Geol, 1993, 37: 35–47.
- [59] 陈洪德, 黄福喜, 徐胜林, 等. 中上扬子地区海相成烃物质聚集分布规律及主控因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(6): 569–577.
- Chen Hongde, Huang Fuxi, Xu Shenglin, et al. Distribution rule and main controlling factors of marine facies hydrocarbon substance in the middle and upper parts of Yangtze region, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2009, 36(6): 569–577.
- [60] 李一凡, 樊太亮, 高志前, 等. 渝东南地区志留系黑色岩层层序地层研究[J]. 天然气地球科学, 2012, (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, (2): 299–306.
- [61] 陈践发, 张水昌, 孙省利, 等. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素[J]. 地质学报, 2006b, 80(3): 467–472.
- Chen Jianfa, Zhang Shuichang, Sun Shengli, et al. Main factors influencing marine carbonate source rock formation [J]. Acta Geologica Sinica, 2006b, 80(3): 467–472.
- [62] 陈践发, 张水昌, 鲍志东, 等. 海相优质烃源岩发育的主要影响因素及沉积环境[J]. 海相油气地质, 2006a, 11(3): 49–54.
- Chen Jianfa, Zhang Shuichang, Bao Zhidong, et al. Main sedimentary environment and influencing factors of development of marine organic-rich source rocks [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006a, 11(3): 49–54.
- [63] Passey Q R, Bohacs K M, Esch W L, et al. From oil-prone source rock to gas-producing shale reservoir-geologic and petrophysics characterization of unconventional shale gas reservoir [A]. International Oil and Gas Conference [C]. 2010.
- [64] Pedersen T F, Calvert S E, Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic carbon rich sediments and sedimentary rocks [J]. AAPG Bulletin, 1990, 4: 454–466.
- [65] 陈旭, 樊隽轩, 张元动, 等. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区的划分与圈定[J]. 地层学杂志, 2015, 39(4): 351–358.
- Chen Xu, Fan Juanxuan, Zhang Yuangong, et al. Subdivision and delineation of the Wufeng and Longmaxi black shales in the subsurface area of the Yangtze Platform [J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(4): 351–358.
- [66] 张春明, 张维生, 郭英海. 川东南—黔北地区龙马溪组沉积环境及对烃源岩的影响[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 136–145.
- Zhang Chunming, Zhang Weisheng, Guo Yinghai. Sedimentary environment and its effect on hydrocarbon source of Longmaxi Formation in southeast Sichuan and north Guizhou, China [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 136–145.
- [67] 王同, 杨克明, 熊亮, 等. 川南地区五峰组—龙马溪组页岩层序地层及其对储集层的控制[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 915–925.
- Wang Tong, Yang Keming, Xiong Liang, et al. Shale sequence stratigraphy of Wufeng-Longmaxi Formation in Southern Sichuan and their control on reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(8): 915–925.
- [68] Hickey J J, Henk B. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett Shale, Mitchell 2 T. P. Sims well, Wise County, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 437–443.
- [69] Calvert S E. Oceanographic controls on the accumulation of organic matter in marine sediments. In: Brook J, Fleet A J eds. Marine Petroleum Source Rock. Blackwell Scientific, London, 1987: 137–151.
- [70] 王玉满, 董大忠, 黄金亮, 等. 四川盆地及周边上奥陶统五峰组观音桥段岩相特征及对页岩气选区意义[J]. 石油勘探与开发, 2016b, 43(1): 42–50.
- Wang Yuman, Dong Dazhong, Huang Jinliang, et al. Guanyinqiao Member lithofacies of the Upper Ordovician Wufeng Formation around the Sichuan Basin and the significance to shale gas plays, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016b, 43(1): 42–50.