

文章编号:1000-0550(2018)02-0215-17

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.001

再论岩相古地理可作为页岩气地质调查之指南

王秀平^{1,2}, 牟传龙^{1,2}, 王启宇^{1,2}, 周恩恩^{1,2}, 梁薇^{1,2}, 葛祥英^{1,2}, 陈小炜^{1,2}

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081

2. 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 成都 610081

摘要 在页岩气的区域地质调查阶段, 主要通过有机质含量(TOC)与类型、有机质热演化程度、含气页岩厚度、矿物组分类型与含量以及储集层特征等基本地质条件参数, 对页岩气有利区进行评价, 而以上页岩气基本地质因素均受沉积相的控制。以详细的沉积相研究为基础, 通过岩相古地理编图, 可以明确富有机质页岩的展布特征, 所以岩相古地理控制了页岩气的发育特征。通过利用主要基本地质条件参数, 对川南及邻区志留系龙马溪组黑色岩系页岩气有利区进行初步评价, 认为川南及邻区志留系龙马溪组, 只要已进入中成岩阶段的浅海陆棚相黑色岩系, 就能形成页岩气储层。在前人研究的基础上, 进一步实例论证并提出沉积相或岩相古地理研究应为页岩气地质调查和选区评价的关键和基础。

关键词 页岩气; 龙马溪组; 志留系; 川南及邻区; 沉积相; 岩相古地理; 区域地质调查

第一作者简介 王秀平, 女, 1988年出生, 博士, 工程师, 沉积与储层地质, E-mail: wangxiuping198805@126.com

通信作者 牟传龙, 男, 研究员, E-mail: cdmchuanlong@163.com

中图分类号 P531 **文献标志码** A

0 引言

页岩气是一种重要的非常规天然气资源^[1], 是指主体上存在于低孔、特低渗、富有机质的暗色细粒沉积岩层系中的天然气, 以吸附和游离状态为主^[2-4], 是烃源岩中未被即时排出的天然气^[5], 具有自生自储、吸附作用机理的特殊性; 以热成因的类型为主, 具有异于常规油气藏或水溶性气藏的地质特殊性, 例如未有二次运移或运移距离短、自封闭机理、地层饱含气、形成大规模原地连续聚集天然气的重要特点等^[3,6]。

近年来, 页岩气作为非常规油气资源勘探开发的新亮点和热点, 全球各页岩气资源大国均已投入页岩气资源的勘探开发工作^[7]。2005年以来, 中国借鉴北美页岩气经验开始了对中国页岩气地质条件评价与勘探开发的先导性试验^[8-9]。十多年来, 随着对非常规油气资源研究与勘探开发的逐渐深入, 中国页岩气飞速发展。迄今, 不仅在页岩气地质条件认识上取得了进展, 在勘探开发实践上也取得了一定的突破, 成为了全球除北美地区以外率先发现页岩气并获得工业性开发的国家^[10]。2012年, 中石化在重庆涪陵发现了焦石坝龙马溪组页岩气田, 这不仅是中国首个

大型页岩气田, 也是全球除北美地区之外最大的页岩气田, 并于2015年建成投产^[11]。

然而, 受复杂构造背景的控制, 中国页岩气发育的地质条件极为复杂, 在充分借鉴北美页岩气研究的基础上, 国内对页岩气研究基础相对薄弱但相关地质理论的研究内容宽泛, 精专的理论研究相对滞后^[12]。中国页岩气的基础地质特征(如地质背景、有机质类型、有机碳含量、热演化程度、岩石类型和矿物组分等方面)与北美页岩气具有一定的差别^[13-14]。弄清我国页岩气的实际特征及形成机理, 对中国页岩气的勘探、开发具有指导性的作用, 以配合中国页岩气的发展速度。牟传龙等^[5]通过总结页岩气实际地质特征和研究、工作现状, 重新厘定了页岩气的定义, 通过详细解读页岩气在地质调查阶段的基本任务, 提出以岩相古地理研究及编图作为基础和关键技术能有效的实现页岩气地质调查工作的基本任务, 对页岩气地质调查具有重要的指导作用。为了进一步加强对“岩相古地理研究可作为页岩气地质调查之指南”^[5]的理解, 在详细分析页岩气富集的基本地质因素的基础上, 通过总结川南及邻区志留系龙马溪组黑色岩系沉积、成岩方面及与页岩气地质条件的关系, 进一步指明沉积相或岩相古地理研究在页岩气地质调查工作

收稿日期: 2016-03-30; 收修改稿日期: 2017-10-09

基金项目: 中国地质调查局项目(12120115004301); 国家自然科学基金项目(41302093) [Foundation: China Geological Survey Project, No. 12120115004301; National Science Foundation Project, No. 41302093]

的重要地位。

1 页岩气影响因素综合分析

页岩气的富集主要且首先取决于富有机质页岩自身的物质组分特征,包括有机质的丰度(TOC)、类型与热演化程度(R_o)、页岩的厚度、脆性矿物的含量及储集层特征和含气性等多因素的控制;环境条件主要包括深度、温度与压力等^[15-16]。有机质的丰度(TOC)和热演化程度(R_o)、矿物组分特征尤其是脆性矿物的类型和含量、富有机质页岩的厚度及其顶底板条件等页岩自身地质特征,与保存条件、地面地形与水文特征等外部条件,是共同决定北美页岩气能够实现商业性开发的关键因素^[17]。因此,在页岩气选区评价中,影响页岩气富集的关键参数^[18-20]可划分为地质条件和工程技术条件两大类。地质条件类参数主要为富有机质页岩自身发育特征及油气显示等,控制页岩气的生成与富集;工程技术条件类参数则包括页岩的保存条件参数、埋深和地理地貌及交通条件等,主要控制页岩气的开发成本。在页岩气区域地质调查阶段,主要是通过详细分析其地质条件参数对页岩气的影响,对页岩气影响因素进行分析。页岩含气量的多少指示着页岩气的富集程度,不仅是评判页岩中残留气量的一个直接标志,也是目前国内进行页岩气资源量计算的一个重要参数^[21]。因此,区域地质调查中对页岩气富集影响因素的分析,实际上为影响页岩含气量因素的分析。

(1) 有机碳含量(TOC)

Shirley^[22]提出影响页岩生气量的主要因素为有机碳含量、干酪根类型和热成熟度,而前人研究表明^[23],有机质丰度还与页岩含气量呈明显的正相关性,有机碳含量(TOC)直接影响页岩含气量的大小。有机碳含量对富有机质页岩的含气量起决定性的作用,它决定了页岩的生烃能力、储集空间的大小和对页岩气的吸附能力^[24]。北美页岩气勘探开发的成功经验表明,只有富有机质页岩的有机碳含量达到一定下限时,才具有工业产气价值,因此有机碳含量是衡量页岩含气性能的一项重要指标^[6,25]。在北美页岩气开发过程中发现,页岩中有机碳的含量与页岩产气率之间呈线性关系,有机碳作为生烃物质,且具有较强的吸附特性,直接控制了页岩的吸附气量,随着有机碳含量的增加,相应的页岩吸附气量也增加,因此有机碳含量是控制页岩产气能力的重要变量^[22,26];相反的,有机碳含量减少,吸附气含量也随之降低,进

一步反映了页岩吸附能力与有机碳含量之间的密切关系^[25]。

通过对中国页岩气的研究,也发现有有机质含量是影响页岩含气量的关键因素。有机质含量是制约页岩含气量与资源潜力的关键参数^[21],其决定着生烃的多少,是生烃强度的主要影响因素^[27],有机质丰度和热演化程度是页岩气成藏的基本条件^[17]。有机碳含量也是衡量页岩含气性能的重要指标^[28],研究表明,同北美页岩一样,中国多数沉积盆地的页岩中有机碳含量与产气率之间都存在良好的线性关系^[29]。在实际勘探研究过程中,发现页岩中有机碳含量越高,其相应页岩的含气量也越大,总有机碳含量(TOC)往往与页岩的含气量呈正相关性(图1)^[21,23,30]。页岩中的有机质在生烃过程中生成大量的烃类(页岩气)并产生有机质生烃孔,可以将其生成的页岩气吸附在表面及储集在有机质生烃孔中,使得页岩的吸附能力和含气性与页岩中总有机碳含量之间均存在着良好的正相关性^[27]。韩双彪等^[31]通过试验发现渝东南地区龙马溪组页岩随着有机碳含量的增加,吸附气含量有增加的趋势,并提出这与有机质表面具有微观孔隙特征有关;薛华庆等^[32]通过四川盆地昭通区块龙马溪组页岩的有机碳含量和现场产气量测试显示,有机碳含量增加,页岩的比表面积增加,吸附能力增强,饱和吸附量变大,使得含气量增加;另外,聂海宽等^[33]分别通过实测法和公式法对四川盆地及其周缘上奥陶统一志留统黑色页岩含气量进行了分析和计算,二者所得结果吻合度较高。其中,公式法主要是根据有机质含量和页岩孔隙度的线性计算,而页岩储集层的孔隙以有机质生烃孔为主,这也受有机质含量的控制,由此可进一步说明,黑色页岩有机质的发育特征,可作为页岩气评价的重要指标和决定性因素。其中,有机质生烃孔形成于有机质的埋藏和成熟过程中,是有机质生烃作用造成的^[19]。有机碳含量越高则会使得页岩的原地渗透率增加,在页岩气开发过程中,通过水力压裂后,会形成大量的微裂缝并连通孔隙,提高页岩的渗透性,促使页岩气的最终采收率获得极大地提高^[29]。

由此可见,一方面有机碳含量越高,页岩的生气潜力就越大,单位体积页岩的含气率就越高;另一方面有机质生烃演化程度越高则形成的有机质生烃孔越多,并且有机碳含量越多,在生烃演化过程中产生的微孔增多(有机质生烃孔为主)、微孔隙度增大,可供天然气吸附的比表面积也增加,页岩的吸附气含量随

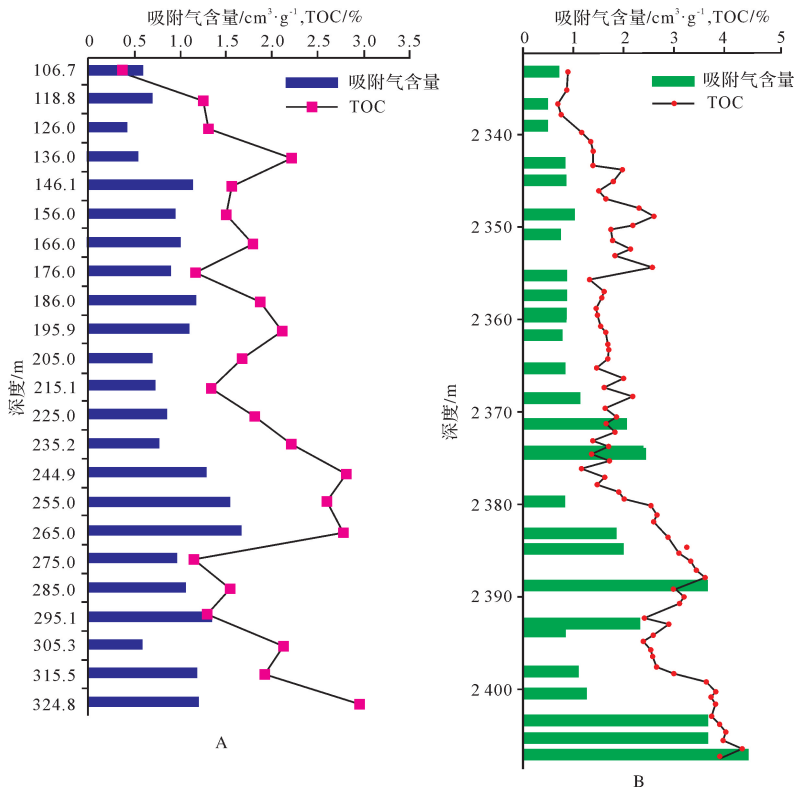


图1 川南及邻区志留系龙马溪组黑色岩系有机碳含量与吸附含气量关系

A. 渝页1井, 据韩双彪等^[31]修改; B. 焦页1井, 据郭彤楼等^[30]修改

Fig.1 Relationship between TOC and gas content of black rocks in Silurian Longmaxi Formation of southern Sichuan Basin and its peripheral region

A. Well YY1, after Han, *et al.*^[31]; B. Well JY1, after Guo, *et al.*^[30]

之增加。因此,有机碳含量是控制页岩吸附气含量的主要因素之一,是页岩气富集的重要和决定性因素。

(2) 有机质类型与成熟度

有机质的类型对页岩的生气潜力起着决定性的控制作用,它也是评价富有机质页岩生气能力的重要指标之一^[34]。有机质类型也是决定烃源岩品级最重要的因素之一,但它并不影响烃源岩层的产气数量,只影响天然气的吸附率和扩散率,总有机碳含量及其热成熟度才是决定烃源岩层产气能力的重要变量^[35]。在有机质生烃过程的不同阶段,受不同化学组成与结构特征的控制,不同类型干酪根的产气率会有明显的差别。在实验条件下,不同干酪根类型的主要生气期(天然气的生成量占总生气量的70%~80%)对应的镜质体反射率(R_o)值不同,I型、II型、III型干酪根主要生气期的 R_o 值分别为1.2%~2.3%、1.1%~2.6%与0.7%~2.0%^[36]。

有机质的热演化程度可以影响页岩的生烃潜力^[28],热演化程度(或成熟度)是确定有机质生成油

气的关键指标^[16]。Zhang *et al.*^[37]的实验发现,有机质成熟度越高,页岩的吸附气量越高。根据国际理论与应用化学联合会(IUPAC)的分类标准,孔隙直径>50 nm的称为宏孔隙(macropores),2~50 nm与<2 nm的依次为中孔隙(mesopores)和微孔隙(micropores)^[38]。武景淑等^[29]研究认为有机质成熟度和微孔体积、中孔体积具有一定的负相关性,与宏孔体积在 $R_o < 2.0\%$ 时没有相关性,在 $R_o > 2.0\%$ 时具有一定的正相关性;有机质成熟度 $R_o > 2.0\%$ 时和高成熟度有机碳含量都与宏孔体积呈正相关性,这可能是由于纳米级显微裂缝在高成熟度的有机质中发育,导致总体上宏孔体积的增加有关。由此可见,有机质成熟度影响页岩的储集空间类型,进而影响页岩含气量。一定有机质含量的含气页岩,在经历正常的生烃演化作用后,其有机质的热成熟度越高,则其生气量就越大,赋存于含气页岩的天然气尤其是游离气也越多;随着热演化程度的持续增强,在一定的埋深条件下,烃类气体的含量逐渐增加导致页岩的地层压力增大,造成页

岩的气体吸附能力增强,并最终可能会导致吸附气量增加。因此,有机质的热成熟度可作为评价页岩气资源潜力的重要参数之一^[27]。

综上所述,在不同的热演化程度下,不同类型的有机质生烃能力具有一定的差别,因此,有机质类型不仅影响页岩生烃能力,而且也影响页岩含气性^[8]。

(3) 含气页岩厚度

广泛分布的富有机质泥页岩是形成页岩气藏的物质基础和重要条件^[39],其厚度达到一定的数值是页岩气富集区发育的基本条件之一,也是控制页岩气资源量高低的重要因素之一^[40-42]。白兆华等^[27]提出足够的富有机质泥页岩厚度与埋深是保障形成页岩气工业聚集的前提,尤其是富有机质泥页岩的沉积厚度越大则就能提供越丰富的生烃物质,并在成岩过程中能产生越多的储集空间。因此,富有机质页岩的厚度与页岩气藏的富集程度成正相关性,足够厚的富有机质页岩不仅是页岩气生成的物质保障,也是页岩能提供充足的储渗空间的重要基础保证,并为页岩气赋存的载体^[23]。

另一方面,富有机质页岩的厚度和顶底板条件控制了保存条件^[17],泥页岩低孔超低渗的特征就决定了其具有一定的自封闭性,当富有机质页岩的厚度较大,且大于其有机质生烃高峰期向上下排烃的最大距离时,气体将有效地封闭在自身储集空间中^[40,43],因此富有机质页岩具有自生自储的特性。由此可见,富有机质泥页岩沉积一定的厚度时就能具有自我封闭的能力,并在经历一定的成熟演化后,赋存一定的页岩气^[43]。

由此可见,富有机质页岩具有有效的地层厚度是提供页岩气有利的生、储、盖条件的前提,富有机质泥页岩的厚度越大,生烃物质含量越高,则能产生的储集空间越多,其自封闭能力也越强,从而利于形成页岩气藏^[39]。胡东风等^[43]提出四川盆地地下古生界海相富有机质泥页岩埋深较大,从微观分析数据上看,其渗透性非常低,具有一定的自封闭性。

(4) 矿物组分

由于页岩气储层的岩性致密,需要通过外力来提高页岩的基质渗透率和气体的渗流能力,以提高页岩气的采收率,为了达到页岩气在开发过程中进行人为的加砂压裂产生渗流裂缝网络的效果,这就要求富有机质页岩本身应具有一定的脆性,以促使页岩气储层在外力作用下容易产生裂缝^[21]。脆性矿物含量控制了页岩的可改造性^[39],则页岩矿物组成与含量往往

会影响页岩气开采和压裂效果^[20]。

川南及邻区志留系龙马溪组黑色岩系岩石矿物组分与有机质含量之间具有明显的相关性^[44],进而影响页岩的含气量。黏土矿物含量与有机碳含量略呈负相关关系,所以,聂海宽等^[45]认为随着黏土物质的增加,页岩的吸附气含量略呈下降的趋势。而黏土矿物中层间微孔隙发育,伊利石、伊/蒙混层和绿泥石等也具有一定的比表面积,可以作为有机质的吸附介质,并作为吸附气的主要吸附介质之一^[32]。受成分和结构差异的控制,不同的黏土矿物对天然气具有不同的吸附能力,尤其是在富有机质泥页岩中,黏土矿物和有机质作为其主要的吸附介质,二者形成复杂的复合体,使得对富有机质页岩气体吸附能力的研究难度较大且引起广泛的重视^[46]。微孔隙尤其是晶间微孔的发育程度控制着矿物组分的比表面积,从而决定了其对气体的吸附能力,而微孔隙发育特征和气体吸附能力不仅与黏土矿物类型有关,而且明显受成岩演化程度和岩石成因的影响^[47]。由此可见,黏土矿物类型及含量不仅影响有机质含量,且影响页岩吸附性能和吸附气量。另外,岩石矿物组成的变化影响着页岩的岩石力学性质和孔隙结构,其中黏土矿物与石英、碳酸盐矿物相比有较多的微孔隙和较大的表面积,因此对气体有较强的吸附能力。

(5) 储层特征

页岩中的微孔隙和微裂缝的容积和孔径是页岩游离气体的储集空间,其分布体积大小能显著影响页岩气的赋存形式,控制页岩游离气的含量。有机质生烃孔和黏土矿物粒间孔是页岩中发育最广泛的两种孔隙类型,对气体吸附、存储具有重要意义,而微裂缝既是游离气的储集空间,又是气体渗流的主要通道^[48]。Chalmers *et al.*^[49]通过研究认为随着富有机质页岩孔隙度的增加,其总含气量增大,二者具有明显的线性关系。当页岩的孔隙度从0.5%增大到4.2%时,游离态气体的含量增加了十倍,从原来的5%上升到50%^[50],说明页岩孔隙度越大则游离气比重越高。页岩地层属于低孔、超低渗储层,其渗透率一般都小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但随着微裂缝系统的发育程度不同有很大的变化,裂缝系统越发育,岩层的渗透率越好,相对聚集的游离态页岩气量也就越大。

(6) 埋深和地层压力

林腊梅等^[51]通过进行等温吸附实验,对页岩埋深、含气量与有机碳含量之间的关系进行了研究,结果表明在有机质成熟的条件下,地层埋深相同时,页

岩的吸附气量随着有机碳含量的增加而增加;而有机碳含量一致时,页岩的吸附气含量则随着地层埋深的增加而逐渐升高,并最终在地层埋深达到1 200 m左右后逐渐趋于一个定值;总的来说,富有机质泥页岩埋深与有机碳含量和页岩含气量具有相互补偿的关系,则有机碳含量较低的富有机质页岩,需要在埋深较大的环境下,才能具有较高有机碳含量样品,在浅层埋藏环境下的含气量。

地层压力也是影响页岩气产量的因素之一,主要影响页岩的吸附气量。研究表明,富有机质泥页岩地层的压力越大,页岩对气体吸附能力和对游离气的储集能力均有所增强,则含气量越高,使得富有机质泥页岩的地层压力与含气量存在正相关性^[27,52]。胡东风等^[43]指出地层压力系数是页岩气藏保存条件的综合判别指标,压力系数的大小可以有效的指示页岩气藏的保存条件的好坏。富有机质页岩在生烃过程中造成孔隙压力增大,在封闭性较好的条件下,页岩气藏作为内源性气藏,在地层中形成局部异常高压区;如果富有机质页岩地层的封闭性不好,与外界具有良好的运移通道,受内部异常压力和烃浓度差驱使,生成的天然气则由内向外快速排出,如果排出过快则造成地层压力严重降低,甚至形成低压区^[43]。随着地层压力的升高且达到一定程度时,泥页岩中会产生大量的微裂缝,并可作为页岩气赋存的良好储集空间^[27]。良好的保存条件是页岩气富集高产的充要条件之一,因此,压力系数与页岩气产量具有一定的正相关性,呈对数正相关关系^[43]。实际上,富有机质页岩的含气量总体随地层压力的增加而增加,在低压条件下,吸附气增加较快,而当压力达到一定程度后,吸附气含量的增加速度明显减缓,而游离气仍然在明显增加,并成为页岩气的主体^[24]。因此,在未确定有其他外部控制因素的前提下,如果富有机质泥页岩出现异常高的地层压力,就可能说明页岩储层中残留有大量的烃类,也指示着富有机质页岩可能具有较高的页岩气资源量^[52]。

李玉喜等^[24]提出压力与埋深直接相关,对于页岩气藏,在构造稳定的地区,地层埋深越大往往表现为地层压力越高,这也验证了 Shirley^[22]、李玉喜等^[24]提出的有机碳含量和地层压力是影响页岩吸附能力的最主要的影响因素。

(7) 保存条件

与常规天然气藏相比,页岩气的聚集属于无二次运移或极短距离二次运移天然气的赋存和富集,不依

赖于常规意义上的圈闭及保存条件^[53]。页岩气藏具有典型原地成藏的特点,在漫长的有机质生烃演化过程中,生成的油气应先满足页岩自身的吸附和储集能力,在页岩储层保存条件较好时,其含气量达到充分饱和后,随着有机质热演化程度的逐渐增强,天然气持续大量生成,开始以游离相或溶解相向外进行运移,并在适宜的储集层中形成常规天然气藏^[52]。

中国大多数的沉积盆地,在地质历史时期均经历了多期次构造运动的叠加改造,发育大量且分布复杂的构造断裂,原始沉积盆地的构造格局和富有机质泥页岩原始沉积地层的完整性和稳定性均遭到了不同程度的破坏,对其页岩气保存条件的认识十分困难^[45,54]。所以保存条件作为地质理论中一项重要的研究内容,对中国页岩气的勘探开发工作来说不容忽视,相对发育于稳定构造背景下沉积盆地的北美页岩气,页岩气的保存条件特别是原型盆地恢复及其构造演化研究是中国页岩气地质理论研究的特定内容^[13]。中国页岩气勘探的关键是在原型盆地恢复的基础上,寻找构造相对稳定、富有机质页岩展布连续且具有较好保存条件的有利地区^[55]。对于页岩保存条件的研究是一个综合性很强的内容,其影响和表征的关键因素包括构造背景及演化特征、构造运动类型及分布特征及相应的断层与裂隙发育程度、盆地及其演化特征、富有机质页岩自身发育特征及其顶底地层发育特征、页岩埋深及现今地层压力状况、地表发育特征及水文地质条件等,需要综合考虑以上各因素^[56]。然而,页岩气“自生、自储、自盖”的特征及其良好的气体吸附性能,使其对保存条件要求相对常规油气藏来说通常较低^[57]。郭彤楼等^[30]分别从页岩气储集物性特征、吸附气为主的特点和连续气藏特征以及页岩本身具有良好的塑性等方面分析,结合 JY1 井已获得页岩气突破的实际情况,认为与常规气藏以孔隙、不整合、断裂等作用为油气运移通道相比,对保存条件要求相对较弱。虽然泥页岩的脆性矿物含量较少,脆性较差,具有一定的抗应力破碎能力,但中国南方下古生界海相富有机质页岩在地质历史过程中,局部受到了剧烈且频繁的构造运动,可能会造成富有机质泥页岩的流体和压力系统发生破坏,或使得顶底板岩层的封闭性变差,造成其保存条件变差^[43]。因此,页岩气保存条件的研究成为中国页岩气勘探和开发的重要内容和方向之一,应在加强利用以盆地演化认识的基础上,结合现有的构造表征特征、顶底板岩层发育特征、现今地层埋深与压力状况等来判断现今

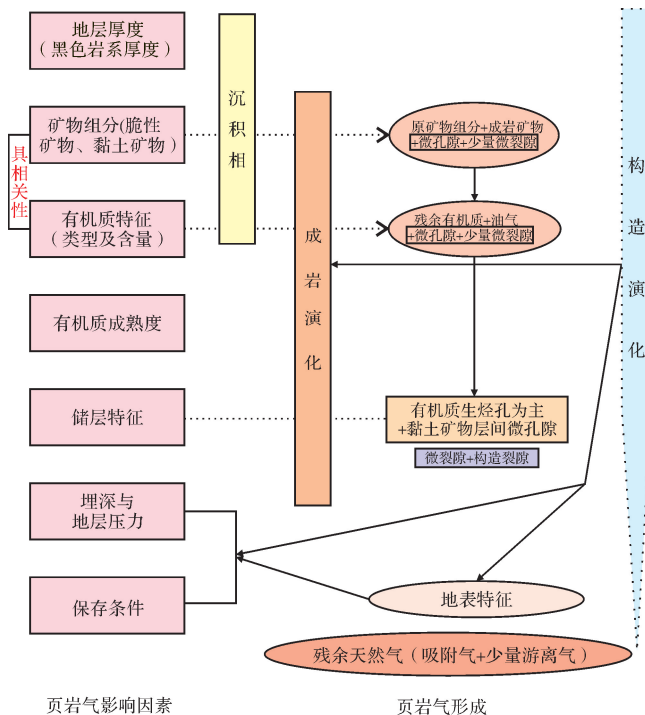
页岩气保存状况^[15]。

(8) 影响因素综合分析

有机质作为生烃物质,控制页岩气藏的存在与否;有机质生烃演化过程中,不仅产生天然气,其有机质生烃孔作为页岩主要的储集空间,控制了页岩气的含气量多少;页岩岩石矿物组分与有机碳含量具有一定的正相关性,二者作为页岩的主要物质组分不仅影响页岩的物性也影响页岩含气量;页岩储集空间及其物性主要受有机碳含量、矿物组分和有机质热演化程度和构造作用影响。由上可知,页岩储层特征直接影响含气总量,而有机质生烃孔与黏土矿物粒间孔作为主要的储集空间,均形成富有机质页岩进入中成岩 A 期后,广泛发生黏土矿物转化和有机质大量生烃转化过程中^[58],因此,有效的页岩储层与有机质含量和有机、无机成岩综合演化有关。陈尚斌等^[59]提出黏土矿物对孔隙形成的影响程度远小于有机质和脆性矿物含量,有机碳含量是泥页岩中对孔隙影响最为关键和显著的因素。吴艳艳等^[60]通过对渝东南地区龙马溪组和川东南须家河组页岩样品孔隙分析,数理统计结果显示,纳米孔隙的类型并非含气量多少的主控因素,有机碳含量(TOC)才是页岩气藏最本质因素。由此提出,页岩含气量大小是多个因素综合影响的结果,但最直接和最根本的影响因素为有机质特征,其中最主要的为有机质含量。有机质特征,即有机碳含量、有机质类型与富有机质页岩的厚度发育特征,均受沉积环境或沉积相的控制;矿物组分的特征亦受沉积环境的控制,且正是由于沉积环境对矿物组分和有机碳含量的共同影响,造成二者之间的相关性。因此,沉积环境不仅控制了富有机质泥页岩的厚度、分布面积、空间展布特征及其有机质含量等特征,还严重影响了岩相类型及特征,沉积环境从源头控制了生成页岩气的物质组分特征,在成岩作用过程中又继而决定了储层物性发育的特点,并最终影响了页岩气的成藏^[61]。沉积环境是决定页岩气富集程度的最根本因素,焦石坝地区页岩气获得突破,认为沉积环境决定的富有机质泥页岩的发育为页岩气的生成和储集提供了丰富的物质基础^[62]。

有机质在生、排烃过程中,如果具有良好的封堵性,则可以形成页岩气藏,表现为高压或异常高压分布区。考虑到在构造稳定区,地层压力与其埋深相关,因此,在一定的构造背景下,影响地层压力的主要地质因素主要为有机碳含量、有机质热演化程度和地层埋深。追溯其源,可以推测页岩气藏的形成,为在

一定的构造背景下和构造演化过程中,在缺氧、还原的沉积环境中形成的富有机质细粒沉积物,在成岩演化过程中发生水—岩反应和有机质生、排烃作用,在未受到强烈断裂破坏(保持了良好的封堵性)的情况下,形成页岩气藏(图2)。页岩气一定是富有机质的细粒沉积岩(烃源岩)中未被及时排出的“残留气”,其自生自储、运移距离很短的特征,说明其气藏大小受富有机质细粒沉积岩的厚度及展布特征的控制,而富有机质细粒沉积岩的发育特征是在一定的构造背景下,由沉积相决定。因此,岩相古地理可以初步限定页岩气的发育特征,通过认识富有机质页岩富集的沉积相(微相)的类型及发育特征,利用在区域上进行岩相古地理编图,可以明确富有机质页岩的空间展布特征。所以即岩相古地理研究可作为页岩气地质调查之指南^[5]。



页岩气影响因素

页岩气形成

图2 影响页岩气富集各因素相关示意图

Fig.2 Related schematic diagram of the factors affecting the shale gas enrichment

2 川南及邻区志留系龙马溪组实例分析

2.1 区域地质概况

震旦纪到早奥陶世时期,整个中上扬子地区处于伸展裂离背景,在陆块内部形成稳定的克拉通盆地^[63-64]。早志留世龙马溪期是中国南方挤压最强烈的时期^[65-66],受构造挤压褶皱造山的影响,中上扬子

陆块边缘地区的古陆范围不断扩大,最终形成受川西—滇中古陆、汉南古陆、川中古陆及扬子南缘的滇黔桂隆起带围限的“多隆围一坳”的构造格局,并形成被隆起所围限的局限海域特征,同时受全球性海侵的影响^[67],产生大面积低能、欠补偿、缺氧的沉积环境^[68],形成陆棚沉积体系(图3),并具有向上水体变浅的演化过程^[13]。志留系龙马溪组下部形成了一套沉积厚度较大且区域性分布的富有机质细粒沉积岩,

构成了区域范围内中国南方重要的烃源岩系^[67,70]。研究区位于四川盆地南部(图3),为上扬子克拉通内坳陷盆地的一部分,是现今上扬子地区页岩气勘探潜力最好的地区之一,目前已在威远、长宁及其邻区的昭通、彭水、黔江、涪陵等区块下组合获得页岩气突破,页岩气资源潜力较好。

龙马溪组在研究区广泛分布,且厚度较大,为页岩气的重点层系之一,也是此次研究的目的层。区内

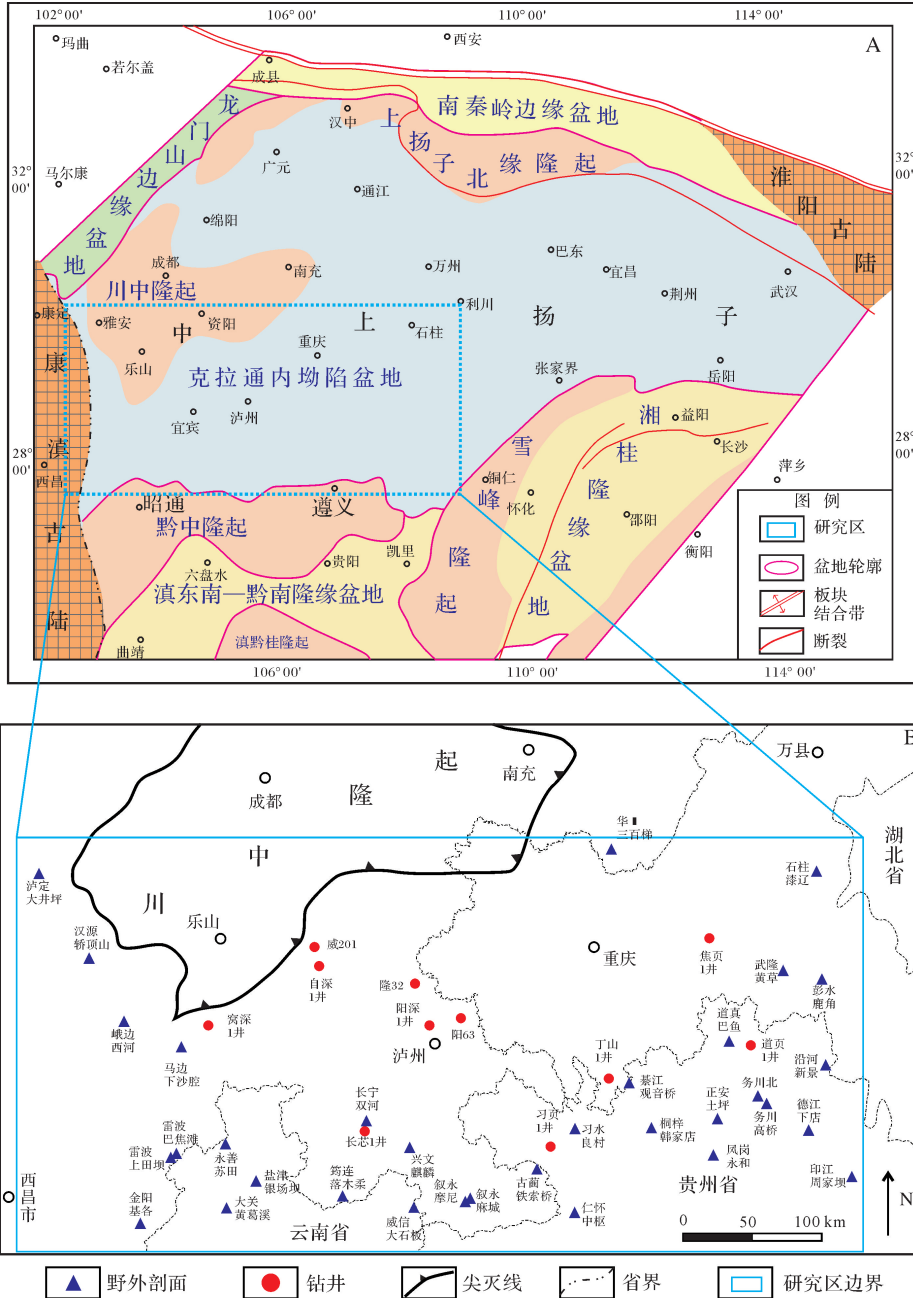


图3 川南及邻区构造位置图(A)及剖面点位置图(B)(构造位置图据黄福喜等^[69])

Fig.3 Tectonic location of southern Sichuan Basin and its peripheral region (A) and Sections distribution of Silurian Longmaxi Formation(B) (tectonic location is after Huang, et al.^[69])

大多数的龙马溪组地层,与下伏奥陶系观音桥组整合接触,上覆地层为志留系罗惹坪组/石牛栏组或小河坝组。按垂向沉积特征,龙马溪组可分为上下两段,下段主要为富有机质细粒沉积岩组合,以黑色碳质页岩、碳质硅质页岩和灰黑色钙质泥岩为主,沉积于龙马溪早期;龙马溪晚期主要表现为上段的灰绿、黄绿色泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩组合,通常夹泥灰岩透镜体,为非黑色岩系^[71]。志留系龙马溪组下段富有机质页岩发育且沉积厚度大,是中国南方页岩气勘探的重点层段之一,现已取得勘探开发的突破,获得工业气流。

页岩气地层实际上主要由细粒沉积岩组成,而非传统意义上的“页岩”,但为了描述方便,此次研究将目的层段—龙马溪组黑色富有机质页岩发育层段(主要为龙马溪组的下段)整体简述为黑色岩系段,按照现今的研究习惯,将细粒沉积岩(泥页岩)仍简述为页岩。

2.2 川南及邻区志留系龙马溪组黑色岩系发育特征

川南及邻区志留系龙马溪组黑色岩系的发育特征及其与页岩气的关系,主要是根据作者及所在团队在前阶段研究成果的基础上总结论述,包括黏土矿物^[72]、矿物组分^[44]、成岩作用^[58]、沉积环境等几个方面的成果。垂向上,研究区龙马溪组黑色岩系的发育特征如图4所示。

川南及邻区志留系龙马溪组下段黑色岩系发育的矿物组分类型较均一,而其含量在垂向上和平面上均表现为一定的非均质性。矿物组分包括硅质型矿物(石英、钾长石、斜长石、及黄铁矿等脆性矿物)、碳酸盐型矿物(方解石、白云石及少量的菱铁矿)与黏土矿物。石英作为川南及邻区志留系龙马溪组黑色岩系中含量最高,且最主要脆性矿物组分,具有生物自生成因,成岩次生和碎屑成因三种类型,并以第一种为主;且有机质含量越高,生物成因类型硅质的含量越高,成岩次生类型的含量相对陆源碎屑成因的

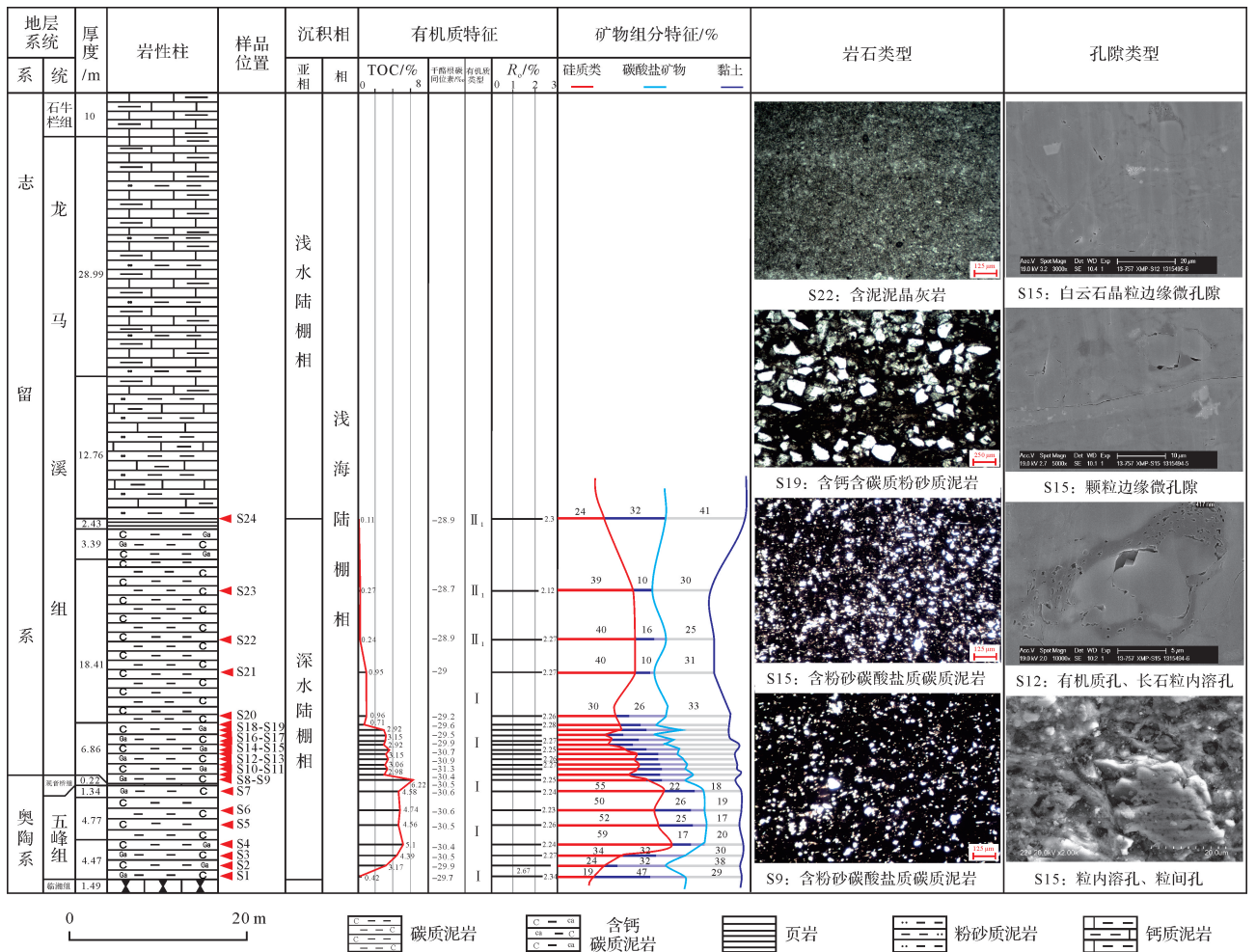


图4 XMP剖面志留系龙马溪组页岩气综合柱状图(据王秀平等^[58]修改)

Fig.4 Comprehensive geological column of Silurian Longmaxi Formation in XMP section of Sichuan province (after Wang, et al.^[58])

硅质含量也越高。根据岩石矿物组分对页岩岩石类型进行划分的标准,川南及邻区龙马溪组黑色岩系页岩主要发育硅质型页岩,其次为黏土质型页岩^[44]。

川南及邻区志留系龙马溪组下段黑色岩系属于细粒沉积岩,主要由黏土级和粉砂级沉积物组成。偏光显微镜下,呈细粉砂—泥质结构,碎屑颗粒含量多为10%~50%,包括石英、长石、云母等,呈漂浮状分布于泥质和胶结物基底中,粒度通常<0.05 mm;胶结物与泥质碎屑多与黑色有机质共生,在偏光显微镜下很难辨认,通过扫描电镜及矿物组分分析,胶结物与泥质碎屑的矿物组分相差不大,主要为黏土矿物和硅质,局部地区以碳酸盐矿物及黄铁矿胶结物发育为特征^[44]。通过野外观察与常规电镜分析,结合矿物组分分析,将川南及邻区龙马溪组下段的黑色岩系划分为7种主要岩石类型,其中富有机质页岩主要为(含钙)碳质(硅质)页岩、含粉砂(含钙)碳质页岩与含碳(含钙)粉砂质页岩与含碳页岩。

川南及邻区龙马溪组黑色岩系有机质丰度较高且不均匀分布,平面上,剩余有机碳含量平均为0.02%~5.37%,大部分地区都在1.0%以上。干酪根类型为I型和II₁型,均为有利于生成页岩气的有机质类型^[44]。研究区龙马溪组黑色岩系成岩演化已达到晚成岩阶段,有机质已演化至过成熟阶段早期,生成大量的干气^[58]。据前人的研究,龙马溪组黑色岩系的孔隙度、渗透率及孔隙类型与北美页岩相似^[30,33,59],川南及邻区志留系龙马溪组黑色岩系储层表现为低孔、超低渗的致密特征。发育的孔隙类型主要有粒间孔(粒间骨架孔、凝絮成因孔、晶间孔与刚性矿物颗粒边缘溶孔)、粒内孔(黏土矿物层间微孔、粒内溶孔等)、有机质孔隙和微裂缝,其中,有机质孔隙和黏土矿物层间孔隙是川南及邻区志留系龙马溪组下段黑色岩系基质孔隙的主要贡献者,微裂缝则提供主要的渗流通道。

川南及邻区志留系龙马溪组下段为黑色岩系的主要发育层段,通过对研究区龙马溪组下段沉积相的分析,沉积相以浅海陆棚相最为发育,潮坪分布于隆起区的周缘。研究发现,川南及邻区龙马溪组有机质的富集主要受局限滞留的浅海陆棚沉积环境的控制,同时受适宜的沉积速率降低了有机质的稀释率及快速海侵形成的分层水体,同时在上部富氧层形成较高的生物产率的影响,利于有机质的形成和保存。研究区沉积中心的深水陆棚相沉积区,受海侵作用造成分层水体明显,上层富氧区古生产力高,下层缺氧区的

还原性强,形成以生物成因硅质发育、黏土矿物含量中等、碳酸盐矿物含量较少的富有机质黑色岩系,全部为页岩气的有利区;浅水陆棚相中以砂泥质浅水陆棚相最为发育,应为页岩气发育的次级有利区,其沉积水体较深,多以脆性矿物含量较高的硅质型页岩为主,有机质含量也较高;浅水陆棚相中局部发育的灰泥质浅水陆棚相和隆起边缘的潮坪相沉积,沉积水体较干净,碳酸盐矿物含量较高,造成有机质含量很低,均为页岩气的非有利区。

通过对川南及邻区志留系龙马溪组黑色岩系岩石矿物组分、沉积环境、成岩作用等研究的总结来看,沉积于海侵初期,即龙马溪组底部的碳质硅质页岩与碳质页岩的有机碳含量最高,其次为沉积厚度较大且分布广泛的含粉砂碳质(含碳)页岩,局部地区发育含粉砂(粉砂质)钙质碳质(含碳)页岩,其有机碳含量也较高,而粉砂岩及钙质页岩或碳酸盐岩的有机质含量很低,因此有机碳含量作为黑色岩系的重要组成部分,与黑色岩系的岩石类型具有良好的对应关系;矿物组分与有机碳含量之间的相关性更加明显,其中硅质型页岩发育大量的石英、长石等脆性矿物,其有机碳含量最高,碳酸盐质型页岩有机质含量最低,介于二者之间的为黏土质型页岩^[44];研究区黑色岩系储集空间的发育特征主要受矿物组分和有机质含量及其演化程度的影响,孔隙的演化特征主要与成岩作用有关;黏土矿物层间微孔隙和有机质微孔隙主要形成于生烃演化强烈的成岩阶段,为页岩基质孔隙的主要类型,前者受黏土矿物转化作用的控制,后者与有机质生烃作用有关,主要形成于干气大量生成的中成岩A期的弱溶蚀、胶结阶段,为页岩气储层发育的主要原因^[60]。通过总结国内外页岩气藏的勘探、开发实践来看,认为在不考虑“保存条件”的前提下,影响页岩气富集的几大因素归根到底为自身的“有机质发育特征”,追本溯源为“沉积环境或沉积相”。由此,提出“富有机质页岩,在埋藏成岩过程中,只要是进入“生油窗”,就可以形成页岩储层”。根据有机质生烃理论,富含有机质的细粒沉积岩只要其热成熟度进入生气窗范围,在未受强烈构造作用影响的条件下,所生成的天然气都将会不同程度的残留在烃源岩中,即可形成页岩气藏(不一定有工业价值)^[21]。对于川南及邻区志留系龙马溪组,只要已进入中成岩阶段的浅海陆棚相黑色岩系,就能形成页岩气储层。页岩气异于常规油气最重要的特点是“自生自储”,因此首先是其自身发育特征决定了储层与气藏的特征。

2.3 川南及邻区志留系龙马溪组黑色岩系页岩气评价

页岩气选区评价的目的是优选出页岩气勘探的目的层和目标区,在富有机质页岩层系的发育区进行页岩气选区评价的首要工作和基础是页岩气区域地质调查^[21]。在不同工作基础的地区,页岩气地质综合评价所处阶段不同,主要评价指标也不同,随着工作程度的提高,资料不断丰富,评价指标也逐步增加^[73]。通过地质调查,了解富有机质页岩层系在区域上的有机质发育特征,初步筛选出具有页岩气勘探潜力的页岩层段,作为一个页岩气勘探评价区的目的层,是页岩层系的区域地质特征评价主要目标^[21]。页岩气地质评价以区域地质演化分析为基础,主要涉及含气页岩评价、页岩含气性和资源潜力评价与页岩气开发条件和开发经济性评价^[73]。国外油气公司根据自身所在探区的地质条件和勘探开发技术的不同,采用了不同的选取评价方法和指标体系,选区评价参数包括8类指标:页岩有机碳、页岩有机质成熟度、页岩含气性、页岩厚度、页岩物性、页岩埋深、页岩矿物组成与页岩力学性质^[74]。

通过以上分析,为了进一步验证“岩相古地理研究可作为页岩气地质调查之指南”,即“对于川南及邻区志留系龙马溪组,只要成岩演化进入中成岩阶段的浅海陆棚相黑色岩系,就能形成页岩气储层”,将各影响因素进行对比、分析。川南及邻区志留系龙马溪组下段的深水陆棚相和砂泥质浅水陆棚相为页岩气的远景区;根据目前的资料条件及勘探经验^[62,74],有利区优选的有机碳含量标准多选择采用 $\text{TOC} \geq 2.0\%$;川南及邻区龙马溪组黑色岩系以干酪根类型以 I 型为主,次为 II₁ 型,干酪根的类型不同,则生气的热演化程度的底线不同,然而差别不大,则选择 $R_o > 1.3\%$ 为下限,而考虑到有机质热演化程度对页岩储层物性的影响,则选择 $R_o > 2.0\%$ 为较有利地区(R_o 值为剖面上的平均值);根据国内外页岩气勘探、开发经验,页岩气的有利区选择富有机质页岩气的厚度大于 30 m,单层厚度不小于 10 m(川南及邻区富有机质页岩均发育于龙马溪组下段,富有机质页岩发育较连续,大于 1 m 的非有机质页岩夹层少见,因此,一般不用考虑单层厚度的特征);川南及邻区龙马溪组黑色岩系的硅质型页岩的 TOC 最高,碳酸盐质型页岩的 TOC 最低,介于中间的为黏土质型页岩,因此选择硅质型页岩发育的地区为页岩气较有利的地区。早古生代海相富有机质页岩沉积后,四川盆地内部主要经

历了先后两次反复埋藏和隆升剥蚀共四个阶段的构造演化过程,其有机质具有生烃时间早且热成熟度较高的特点^[75],研究区绝大部分地区 R_o 大于 1.3%。由图 5 可知,利用有机碳含量、富有机质页岩厚度、镜质体反射率和矿物岩石类型对页岩气有利区进行初步圈定,均位于深水陆棚与砂泥质浅水陆棚相的分布范围内。深水陆棚相和砂泥质浅水陆棚相发育区,有机碳含量均大于 2%,富有机质页岩厚度大部分地区大于 30 m,多以硅质型页岩为主。王志刚等^[11]、郭旭升等^[74]先后提出南方海相页岩气“三元富集”与“二元富集”理论,均提出深水陆棚相优质页岩是页岩气富集的基础。综上所述,寻找有利的沉积相(亚相、微相)是页岩气地质调查的基础和页岩气有利区评价的最重要的依据之一。

3 岩相古地理与页岩气

岩相古地理研究与编图应当以揭示沉积和能源矿产分布的内在联系为终极目标之一,这是岩相古地理学及其编图(方法)在油气中最大的应用^[68]。实际上,沉积学、岩相古地理学及其编图(方法)在常规油气勘探中一直处于十分重要的地位^[68,76-82]。运用岩相古地理理论,采用岩相古地理的编图思路和方法现已进行了大量深入的研究,并广泛运用于全国的油气地质调查工作中,且有效的指导了油气勘探开发工作^[68,80,83-86]。近十几年来,岩相古地理学的理论发展和相关技术的进步,如层序岩相古地理编图技术的创新和发展,在沉积矿产及常规油气资源的地质调查及勘探开发过程中发挥了非常重要的作用,开拓了在陆相、海相及海陆过渡相中找油的新领域等,推动了油气资源的勘探开发并起到了不可替代的作用^[86],可以说是一种指南和关键的技术方法。研究认为,烃源岩的基础地质研究及确定,特别是优质烃源岩的确定,可以为科学评价盆地的油气资源潜力,深入揭示油气生成、运移、聚集及富集规律等具有十分重要的作用和意义^[87-88]。其中,对于源储一体的页岩气藏而言,其物质基础及其控制因素等的精细研究尤为重要。

综合中国页岩气研究现状、存在问题和研究趋势的分析,明确富有机质页岩(烃源岩)的发育特征和时空分布规律,并优选出页岩气富集的远景区与有利区,为现阶段中国页岩气地质调查工作的最为基本和主要的任务^[5]。通过研究证明,沉积环境不仅控制了富有机质页岩的厚度、分布面积、有机碳含量等特

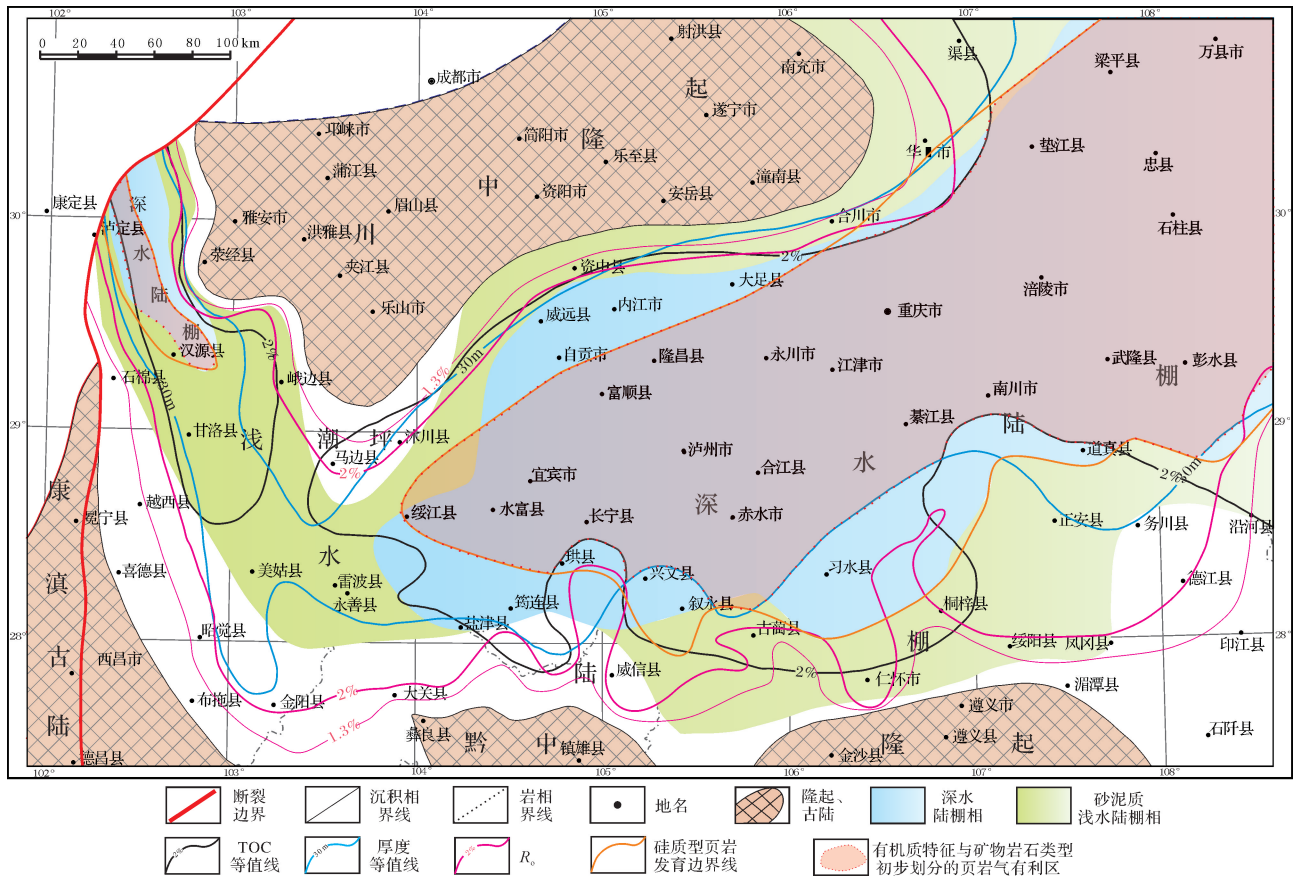


图5 川南及邻区志留系龙马溪组有利沉积相带与页岩气有利区展布图

Fig.5 Distribution of favorable sedimentary facies and profitable areas delineated by basic geological parameters for shale gas of Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its peripheral regions

征,沉积相还强烈影响着页岩气赋存载体—富有机质页岩的精细岩石类型以及岩石的矿物组成,而其岩石类型以及矿物组成的差异又决定着自身储层物性的发育特征,进而影响页岩气成藏。对于页岩气而言,岩相古地理及其重建可以帮助阐明其赋存载体—富有机质页岩的相关科学问题:最终的成图是根据大量基础的第一手资料进行岩相古地理研究成果的反映,据此可以了解富有机质泥页岩发育时期的自然地理面貌和演化历史,进而弄清页岩气发育的各种地质条件,从而有助于厘清页岩气的分布规律,进行综合的预测。页岩气藏与常规油气藏不同,不需要构造的圈闭,只要有富有机质页岩发育(具有堆积的空间),就有可能形成页岩气。即从某种程度上来说,在任何沉积盆地中,只要有富有机质泥页岩的存在,就有可能形成页岩气^[89]。

对于页岩气的基础地质调查工作而言,对页岩气的烃源岩及储层的沉积学和岩相古地理学的研究,并以此为一种方法来圈定远景区、有利区及目标区应作

为贯穿整个页岩气地质调查工作及进一步勘探开发过程的永恒主题。实际上,页岩气地质调查工作的根本目标就是寻找页岩气的远景区和有利区,从而为页岩气勘探开发提供科学依据。因此,以“岩相古地理编图为基础,采用叠合法进行页岩气的远景区、有利区及目标区评价”的理论及方法应是大规模页岩气地质调查工作的关键技术方法,即“岩相古地理研究与编图可作为基本方法及关键的技术能够为页岩气的地质调查工作提供指南”^[5]。沉积学和岩相古地理学作为沉积地质学的核心,能够为油气资源的地质调查和进一步的勘探开发工作提出有效的建议和认识,岩相古地理研究不仅可作为一种工作方法,更应是油气资源研究和工作的基础与必要内容^[68]。中国页岩气基础地质调查工作现已经处于广泛开展阶段,沉积相及岩相古地理研究与编图可作为关键的地质基础理论及方法,是不可或缺的,并可为页岩气地质调查工作提供指南。

由上可知,对于地质调查过程中的页岩气选区评

价,应在详细的构造背景下,首先进行沉积相划分,确定出页岩气藏富集的沉积相和沉积微相,结合成岩作用、成岩演化的分析,进一步选择合适的 TOC、 R_0 和矿物组分等参数界限,并最终对页岩气进行综合选区评价。其中,岩相古地理研究作为相和古沉积环境的综合反映,是影响富有机质页岩发育的主控因素和基础要素,应是页岩气地质调查工作中的基础和关键技术。在页岩气地质调查阶段,应从主要分析页岩气评价的地质条件类参数出发,结合实际资料情况,选择以岩相古地理平面展布图为基础,叠合有机碳含量等值线图、富有机质页岩厚度等值线图及有机质镜质体反射率等值线图(主要控制因素),再将矿物组分(黏土矿物、脆性矿物)平面展布图与之叠加,最后通过研究区埋深图进一步限制,并通过含气量资料进行验证和校正。

4 结论

在详细分析页岩气富集的基本地质因素的基础上,进一步提出岩相古地理控制了页岩气的发育特征,岩相古地理研究可以为页岩气评价提供基础和指导。通过总结川南及邻区志留系龙马溪组黑色岩系沉积、成岩方面及与页岩气地质条件的关系,提出“川南及邻区志留系龙马溪组,只要已进入中成岩阶段(生油窗)的浅海陆棚相黑色岩系,就可以形成页岩气储层”。通过选定合理的页岩气基本地质参数,主要为富有机质页岩厚度、有机碳含量(TOC)、有机质成熟度(R_0)、矿物组分特征等,对川南及邻区志留系龙马溪组页岩气有利区进行了初步限定,有利区的展布范围几乎全部位于页岩气的有利沉积相带(深水陆棚相、砂泥质浅水陆棚相)内。由此,再一次实例验证了“岩相古地理可作为页岩气地质调查之指南”,沉积相或岩相古地理研究应为页岩气地质调查和页岩气选区评价的关键和基础。

参考文献(References)

- [1] 叶军,曾华胜. 川西须家河组泥页岩气成藏条件与勘探潜力[J]. 天然气工业,2008,28(12):18-25. [Ye Jun, Zeng Huasheng. Pooling conditions and exploration prospect of shale gas in Xujiache Formation in western Sichuan depression[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 18-25.]
- [2] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业,2010,30(10):7-12. [Jiang Yuqiang, Dong Dazhong, Qi Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7-12.]
- [3] 张金川,金之钧,袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业,2004,24(7):15-18. [Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.]
- [4] 张金川,聂海宽,徐波,等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业,2008,28(2):151-156. [Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.]
- [5] 牟传龙,王启宇,王秀平,等. 岩相古地理研究可作为页岩气地质调查之指南[J]. 地质通报,2016,35(1):10-19. [Mou Chuanlong, Wang Qiyu, Wang Xiuping, et al. A study of lithofacies-palaeogeography as a guide to geological survey of shale gas[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(1): 10-19.]
- [6] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [7] 杜金虎,杨华,徐春春,等. 关于中国页岩气勘探开发工作的思考[J]. 天然气工业,2011,31(5):6-8. [Du Jinhu, Yang Hua, Xu Chunchun, et al. A discussion on shale gas exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(5): 6-8.]
- [8] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2010,37(6):641-653. [Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.]
- [9] 张大伟. 加快中国页岩气勘探开发和利用的主要路径[J]. 天然气工业,2011,31(5):1-5. [Zhang Dawei. Main solution ways to speed up shale gas exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(5): 1-5.]
- [10] 董大忠,邹才能,杨桦,等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. 石油学报,2012,33(增刊1):107-114. [Dong Dazhong, Zou Caineng, Yang Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Suppl.1): 107-114.]
- [11] 王志刚. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J]. 石油与天然气地质,2015,36(1):1-6. [Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 1-6.]
- [12] 李世臻,姜文利,王倩,等. 中国页岩气地质调查评价研究现状与存在问题[J]. 地质通报,2013,32(9):1440-1446. [Li Shizhen, Jiang Wenli, Wang Qian, et al. Research status and currently existent problems of shale gas geological survey and evaluation in China[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(9): 1440-1446.]
- [13] 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]. Geol-

- ical Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 372-384.]
- [14] 司马立强,李清,闫建平,等. 中国与北美地区页岩气储层岩石组构差异性分析及其意义[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2013,35(9):29-33,58. [Sima Liqiang, Li Qing, Yan Jianping, et al. Analysis on the differences of rock fabrics in shale gas reservoir and its significance[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(9): 29-33, 58.]
- [15] 张丽雅,李艳霞,李净红,等. 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, et al. Accumulation conditions 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.]
- [16] 李贤庆,赵佩,孙杰,等. 川南地区下古生界页岩气成藏条件研究[J]. 煤炭学报,2013,38(5):864-869. [Li Xianqing, Zhao Pei, Sun Jie, et al. Study on the accumulation conditions of shale gas from the lower Paleozoic in the south region of Sichuan Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 864-869.]
- [17] 李建青,高玉巧,花彩霞,等. 北美页岩气勘探经验对建立中国南方海相页岩气选区评价体系的启示[J]. 油气地质与采收率,2014,21(4):23-27,32. [Li Jianqing, Gao Yuqiao, Hua Caixia, et al. Marine shale gas evaluation system of regional selection in South China: Enlightenment from North American exploration experience[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 23-27, 32.]
- [18] Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(1): 87-125.
- [19] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [20] Martineau D F. History of the Newark East field and the Barnett Shale as a gas reservoir[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 399-403.
- [21] 王世谦,王书彦,满玲,等. 页岩气选区评价方法与关键参数[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(6):609-620. [Wang Shiqian, Wang Shuyan, Man Ling, et al. Appraisal method and key parameters for screening shale gas play[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(6): 609-620.]
- [22] Shirley K. Shale gas exciting again[J]. AAPG Explorer, 2001, 22(3): 24-25.
- [23] 涂乙,邹海燕,孟海平. 页岩气评价标准与储层分类[J]. 石油与天然气地质,2014,35(1):153-158. [Tu Yi, Zou Haiyan, Meng Haiping. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 153-158.]
- [24] 李玉喜,乔德武,姜文利,等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J]. 地质通报,2011,30(2/3):308-317. [Li Yuxi, Qiao Dewu, Jiang Wenli, et al. Gas content of gas-bearing shale and its geological evaluation summary[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 308-317.]
- [25] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort worth basin: issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [26] Jarvie D M, Hill R J, Pollastro R M. Assessment of the gas potential and yields from shales: the Barnett shale model[C]//Cardott B J. Unconventional Energy Resources in the Southern Midcontinent, 2004 Symposium. Norman: Oklahoma University Press, 2005: 37-50.
- [27] 白兆华,时保宏,左学敏. 页岩气及其聚集机理研究[J]. 天然气与石油,2011,29(3):54-57. [Bai Zhaohua, Shi Baohong, Zuo Xuemin. Study on shale gas and its aggregation mechanism[J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29(3): 54-57.]
- [28] 韩双彪,张金川,李玉喜,等. 黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩气地质调查井位优选[J]. 天然气地球科学,2013,24(1):182-187. [Han Shuangbiao, Zhang Jinchuan, Li Yuxi, et al. The optimum selecting of shale gas well location for geological investigation in Niutitang Formation in lower Cambrian, northern Guizhou area[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 182-187.]
- [29] 武景淑,于炳松,张金川,等. 渝东南渝页1井下志留统龙马溪组页岩孔隙特征及其主控因素[J]. 地学前缘,2013,20(3):260-269. [Wu Jingshu, Yu Bingsong, Zhang Jinchuan, et al. Pore characteristics and controlling factors in the organic-rich shale of the lower Silurian Longmaxi Formation revealed by samples from a well in southeastern Chongqing[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(3): 260-269.]
- [30] 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 breakthrough in 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.]
- [31] 韩双彪,张金川,邢雅文,等. 渝东南下志留统龙马溪组页岩气聚集条件与资源潜力[J]. 煤炭学报,2013,38(增刊1):168-173. [Han Shuangbiao, Zhang Jinchuan, Xing Yawen, et al. Shale gas accumulation conditions and resource potential of the lower Silurian Longmaxi Formation in southeast Chongqing[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(Suppl.1): 168-173.]
- [32] 薛华庆,王红岩,刘洪林,等. 页岩吸附性能及孔隙结构特征:以四川盆地龙马溪组页岩为例[J]. 石油学报,2013,34(5):826-832. [Xue Huaqing, Wang Hongyan, Liu Honglin, et al. Adsorption capability and aperture distribution characteristics of shales: Taking the Longmaxi Formation shale of Sichuan Basin as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 826-832.]
- [33] 聂海宽,包书景,高波,等. 四川盆地及其周缘下古生界页岩气保存条件研究[J]. 地学前缘,2012,19(3):280-294. [Nie Haikuan, Bao Shujing, Gao Bo, et al. A study of shale gas preservation conditions for the lower Paleozoic in Sichuan Basin and its periphery[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 280-294.]
- [34] 王丽波,久凯,曾维特. 上扬子黔北地区下寒武统海相黑色泥

- 页岩特征及页岩气远景区评价[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3263-3278. [Wang Libo, Jiu Kai, Zeng Weite. Characteristics of lower Cambrian marine black shales and evaluation of shale gas prospective area in Qianbei area, Upper Yangtze region[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9): 3263-3278.]
- [35] 白振瑞. 遵义—綦江地区下寒武统牛蹄塘组页岩沉积特征及页岩气评价参数研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012. [Bai Zhenrui. Sedimentary characteristics of the lower Cambrian Niutitang Fm shale and evaluation parameters of shale gas in Zunyi-Qijiang area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.]
- [36] 赵文智, 邹才能, 宋岩, 等. 石油地质理论与方法进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 132-134. [Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Song Yan, et al. Developments in theories and methods of petroleum geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 132-134.]
- [37] Zhang T W, Ellis G S, Ruppel S C, et al. Effect of organic-matter type and thermal maturity on methane adsorption in shale-gas systems[J]. Organic Geochemistry, 2012, 47: 120-131.
- [38] Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C W, et al. Recommendations for the characterization of porous solids (technical report) [J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(8): 1739-1758.
- [39] 杨振恒, 李志明, 沈宝剑, 等. 页岩气成藏条件及我国黔南拗陷页岩气勘探前景浅析[J]. 中国石油勘探, 2009, 14(3): 24-28. [Yang Zhenheng, Li Zhiming, Shen Baojian, et al. Shale gas accumulation conditions and exploration prospect in southern Guizhou depression[J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(3): 24-28.]
- [40] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256. [Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.]
- [41] 李艳丽. 页岩气储量计算方法探讨[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 466-470. [Li Yanli. Calculation methods of shale gas reserves[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 466-470.]
- [42] 梁兴, 叶熙, 张介辉, 等. 滇黔北拗陷威信凹陷页岩气成藏条件分析与有利区优选[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 693-699. [Liang Xing, Ye Xi, Zhang Jiehui, et al. Reservoir forming conditions and favorable exploration zones of shale gas in the Weixin sag, Dianqianbei depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 693-699.]
- [43] 胡东风, 张汉荣, 倪楷, 等. 四川盆地东南缘海相页岩气保存条件及其主控因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 17-23. [Hu Dongfeng, Zhang Hanrong, Ni Kai, et al. Main controlling factors for gas preservation conditions of marine shales in southeastern margins of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 17-23.]
- [44] 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 evaluation of black rock series of Longmaxi Formation in southern Sichuan and its periphery[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 36(2): 150-162.]
- [45] 聂海宽, 何发岐, 包书景. 中国页岩气地质特殊性及其勘探对策[J]. 天然气工业, 2011, 31(11): 111-116. [Nie Haikuan, He Faqi, Bao Shujing. Peculiar geological characteristics of shale gas in China and its exploration countermeasures[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(11): 111-116.]
- [46] 肖贤明, 宋之光, 朱炎铭, 等. 北美页岩气研究及对我国下古生界页岩气开发的启示[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 721-727. [Xiao Xianming, Song Zhiguang, Zhu Yanming, et al. Summary of shale gas research in North American and revelations to shale gas exploration of lower Paleozoic strata in China south area[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 721-727.]
- [47] 吉利明, 邱军利, 张同伟, 等. 泥页岩主要黏土矿物组分甲烷吸附实验[J]. 地球科学, 2012, 37(5): 1043-1050. [Ji Liming, Qiu Junli, Zhang Tongwei, et al. Experiments on methane adsorption of common clay minerals in shale[J]. Earth Science, 2012, 37(5): 1043-1050.]
- [48] 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 301-311. [Yang Feng, Ning Zhengfu, Hu Changpeng, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoir[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(2): 301-311.]
- [49] Chalmers G R L, Bustin R M. Light volatile liquid and gas shale reservoir potential of the Cretaceous Shaftesbury Formation in north-eastern British Columbia, Canada[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(7): 1333-1367.
- [50] Ross D J K, Bustin R M. The importance of shale gas composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 916-927.
- [51] 林腊梅, 张金川, 刘锦霞, 等. 页岩气勘探目标层段优选[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 259-263. [Lin Lamei, Zhang Jinchuan, Liu Jinxia, et al. Favorable depth zone selection for shale gas prospecting[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 259-263.]
- [52] 王祥, 刘玉华, 张敏, 等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 350-356. [Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, et al. Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 350-356.]
- [53] 张金川, 边瑞康, 荆铁亚, 等. 页岩气理论研究的基础意义[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 318-323. [Zhang Jinchuan, Bian Rui-kang, Jing Tieya, et al. Fundamental significance of gas shale theoretical research[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 318-323.]
- [54] 郭旭升, 郭彤楼, 魏志红, 等. 中国南方页岩气勘探评价的几点思考[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 101-105. [Guo Xusheng, Guo Tonglou, Wei Zhihong, et al. Thoughts on shale gas exploration in southern China[J]. Engineering Science, 2012, 14(6): 101-105.]
- [55] Bust V K, Majid A A, Oletu J U, et al. The petrophysics of shale

- gas reservoirs: technical challenges and pragmatic solutions [J]. *Petroleum Geoscience*, 2013, 19: 91-103.
- [56] 陈诚, 史晓颖, 裴云鹏, 等. 鄂尔多斯盆地南缘晚奥陶世钾质斑脱岩: SHRIMP 测年及其成因环境 [J]. *现代地质*, 2012, 26(2): 205-219. [Chen Cheng, Shi Xiaoying, Pei Yunpeng, et al. K-bentonites from the Jinsushan Formation of late Ordovician, southern Ordos Basin: SHRIMP dating and tectonic environment [J]. *Geoscience*, 2012, 26(2): 205-219.]
- [57] 王鹏万, 陈子焯, 贺训云, 等. 桂中坳陷泥盆系页岩气成藏条件与有利区带评价 [J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(3): 353-363. [Wang Pengwan, Chen Ziliao, He Xunyun, et al. Shale gas accumulation conditions and play evaluation of the Devonian in Guizhong depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3): 353-363.]
- [58] 王秀平, 牟传龙, 王启宇, 等. 川南及邻区龙马溪组黑色岩系成岩作用 [J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1035-1047. [Wang Xiuping, Mou Chuanlong, Wang Qiyu, et al. Diagenesis of black shale in Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin and its periphery [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1035-1047.]
- [59] 陈尚斌, 夏筱红, 秦勇, 等. 川南富集区龙马溪组页岩气储层孔隙结构分类 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 760-765. [Chen Shangbin, Xia Xiaohong, Qin Yong, et al. Classification of pore structures in shale gas reservoir at the Longmaxi Formation in the south of Sichuan Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 760-765.]
- [60] 吴艳艳, 曹海虹, 丁安徐, 等. 页岩气储层孔隙特征差异及其对含气量影响 [J]. *石油实验地质*, 2015, 37(2): 231-236. [Wu Yanyan, Cao Haihong, Ding Anxu, et al. Pore characteristics of a shale gas reservoir and its effect on gas content [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(2): 231-236.]
- [61] 王阳, 陈洁, 胡琳, 等. 沉积环境对页岩气储层的控制作用: 以中下扬子区下寒武统筇竹寺组为例 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 845-850. [Wang Yang, Chen Jie, Hu Lin, et al. Sedimentary environment control on shale gas reservoir: A case study of lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the middle lower Yangtze area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 845-850.]
- [62] 郭旭升, 胡东风, 文治东, 等. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素: 以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例 [J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 893-901. [Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wen Zhidong, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formation of Jiaoshiba area [J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 893-901.]
- [63] 黄福喜. 中上扬子克拉通盆地沉积层序充填过程与演化模式 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011. [Huang Fuxi. Filling process and evolutionary model of sedimentary sequence in middle-upper Yangtze Cratonic basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.]
- [64] 黄盛, 王国芝, 邹波, 等. 中上扬子区志留系龙马溪组页岩气勘探区优选 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(2): 190-197. [Huang Sheng, Wang Guozhi, Zou Bo, et al. Preferred targets of the shale gas from Silurian Longmaxi Formation in middle-upper Yangtze of China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2012, 39(2): 190-197.]
- [65] 郭英海, 李壮福, 李大华, 等. 四川地区早志留世岩相古地理 [J]. *古地理学报*, 2004, 6(1): 20-29. [Guo Yinghai, Li Zhuangfu, Li Dahua, et al. Lithofacies palaeogeography of the early Silurian in Sichuan area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(1): 20-29.]
- [66] 张海全, 余谦, 李玉喜, 等. 中上扬子区下志留统页岩气勘探潜力 [J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(4): 353-355. [Zhang Haiquan, Yu Qian, Li Yuxi, et al. Explorative prospect of shale gas of lower Silurian in middle-upper Yangtze area [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(4): 353-355.]
- [67] 戎嘉余. 上扬子区晚奥陶世海退的生态地层证据与冰川活动影响 [J]. *地层学杂志*, 1984, 8(1): 19-29. [Rong Jiayu. The ecological formation evidence and glacier activities for the regression late Ordovician Epoch in upper Yangtze region [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1984, 8(1): 19-29.]
- [68] 牟传龙, 周恩恩, 梁薇, 等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探 [J]. *地质学报*, 2011, 85(4): 526-532. [Mou Chuanlong, Zhou Kenken, Liang Wei, et al. Early Paleozoic sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the middle-upper Yangtze region and petroleum and gas exploration [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(4): 526-532.]
- [69] 黄福喜, 陈洪德, 侯明才, 等. 中上扬子克拉通加里东期(寒武—志留纪)沉积层序充填过程与演化模式 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2299-2317. [Huang Fuxi, Chen Hongde, Hou Mingcai, et al. Filling process and evolutionary model of sedimentary sequence of middle-upper Yangtze Craton in Caledonian (Cambrian-Silurian) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2299-2317.]
- [70] 张正顺, 胡沛青, 沈娟, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩矿物组成与有机质赋存状态 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 766-771. [Zhang Zhengshun, Hu Peiqing, Shen Juan, et al. Mineral compositions and organic matter occurrence modes of lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 766-771.]
- [71] 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(1): 136-145. [Zhang Chunming, Zhang Weisheng, Guo Yinghai. Sedimentary environment and its effect on hydrocarbon source rocks of Longmaxi Formation in southeast Sichuan and northern Guizhou [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 136-145.]
- [72] 王秀平, 牟传龙, 葛祥英, 等. 四川盆地南部及其周缘龙马溪组黏土矿物研究 [J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(11): 1781-1794. [Wang Xiuping, Mou Chuanlong, Ge Xiangying, et al. Study on clay minerals in the lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its periphery [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(11): 1781-1794.]

- [73] 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,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.]
- [74] 郭旭升.南方海相页岩气“二元富集”规律:四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J].地质学报,2014,88(7):1209-1218. [Gou Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China—understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209-1218.]
- [75] 聂海宽,张金川,包书景,等.四川盆地及其周缘上奥陶统一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, Bao Shujing, et al. Shale gas accumulation conditions of the upper Ordovician-lower Silurian in Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 335-345.]
- [76] 田在艺,万仑昆.中国侏罗系岩相古地理与含油气远景[J].新疆石油地质,1993,14(2):101-116. [Tian Zaiyi, Wan Lunkun. Lithofacies palaeogeography and petroliferous prospect, Jurassic, China[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1993, 14(2): 101-116.]
- [77] 冯增昭,李尚武,杨玉卿,等.从岩相古地理论中国南方二叠系油气潜景[J].石油学报,1997,18(1):10-17. [Feng Zengzhao, Li Shangwu, Yang Yuqing, et al. Potential of oil and gas of the Permian of South China from the viewpoint of lithofacies paleogeography[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(1): 10-17.]
- [78] 冯增昭,杨玉卿,金振奎,等.从岩相古地理论中国南方石炭系油气潜景[J].古地理论,1999,1(4):86-92. [Feng Zengzhao, Yang Yuqing, Jin Zhenkui, et al. Potential of oil and gas of the Carboniferous in South China from the viewpoint of lithofacies palaeogeography[J]. Journal of Palaeogeography, 1999, 1(4): 86-92.]
- [79] 冯增昭.从定量岩相古地理论谈华南地区海相地层油气勘探[J].古地理论,2005,7(1):1-11. [Feng Zengzhao. Discussion on petroleum exploration of marine strata in South China from quantitative lithofacies palaeogeography[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 1-11.]
- [80] 牟传龙,许效松.华南地区早古生代沉积演化与油气地质条件[J].沉积与特提斯地质,2010,30(3):24-29. [Mou Chuanlong, Xu Xiaosong. Sedimentary evolution and petroleum geology in South China during the early Palaeozoic[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30(3): 24-29.]
- [81] 陈洪德,倪新锋,田景春,等.华南海相下组合层序地层格架与油气勘探[J].石油与天然气地质,2006,27(3):370-377. [Chen Hongde, Ni Xinfeng, Tian Jingchun, et al. Sequence stratigraphic framework of marine lower assemblage in South China and petroleum exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 370-377.]
- [82] 陈洪德,钟恰江,侯德才,等.川东北地区长兴组—飞仙关组碳酸盐岩台地层序充填结构及成藏效应[J].石油与天然气地质,2009,30(5):539-547. [Chen Hongde, Zhong Yijiang, Hou Mingcai, et al. Sequence styles and hydrocarbon accumulation effects of carbonate rock platform in the Changxing-Feixianguan Formations in the northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 539-547.]
- [83] 许效松,刘宝珺,牟传龙,等.中国中西部海相盆地分析与油气资源[M].北京:地质出版社,2004:1-236. [Xu Xiaosong, Liu Baojun, Mou Chuanlong, et al. Marine basin analysis and oil and gas resources in central and western China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1-236.]
- [84] 牟传龙,谭钦银,王立全,等.四川宣汉盘龙洞晚二叠世生物礁古油藏的发现及其重要意义[J].地质论评,2003,49(3):315. [Mou Chuanlong, Tan Qinyin, Wang Liqun, et al. Late Permian bioherm oil paleo-pool discovered in Panlongdong, Xuanhan county, Sichuan[J]. Geological Review, 2003, 49(3): 315.]
- [85] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J].石油学报,2010,31(3):347-354. [Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 347-354.]
- [86] 朱筱敏.沉积岩石学(第四版)[M].北京:石油工业出版社,2008:1-126. [Zhu Xiaomin. Sedimentology[M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 1-126.]
- [87] 卢进才,李玉宏,魏仙祥,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组油页岩沉积环境与资源潜力研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(6):928-932. [Lu Jincai, Li Yuhong, Wei Xianyang, et al. Research on the depositional environment and resources potential of the oil shale in the Chang 7 member, Triassic Yanchang formation in the Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(6): 928-932.]
- [88] 侯读杰,张善文,肖建新,等.济阳坳陷优质烃源岩特征与隐蔽油气藏的关系分析[J].地学前缘,2008,15(2):137-146. [Hou Dujie, Zhang Shanwen, Xiao Jianxin, et al. The excellent source rocks and accumulation of stratigraphic and lithologic traps in the Jiyang depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 137-146.]
- [89] 吴馨,任志勇,王勇,等.世界页岩气勘探开发现状[J].资源与矿业,2013,15(5):61-67. [Wu Xin, Ren Zhiyong, Wang Yong, et al. Situation of world shale gas exploration and development[J]. Resources & Industries, 2013, 15(5): 61-67.]

Recommend on the Study of Lithofacies Palaeogeography as a Guide for Geology Survey of Shale Gas

WANG XiuPing^{1,2}, MOU ChuanLong^{1,2}, WANG QiYu^{1,2}, ZHOU KenKen^{1,2}, LIANG Wei^{1,2},
GE XiangYing^{1,2}, CHEN XiaoWei^{1,2}

1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610081, China

2. Key Laboratory Sedimentary Basins Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Chengdu 610081, China

Abstract: The basic geological parameters, including total organic carbon content (TOC) and type, thermal evolution of organic matter (R_o) thickness of hydrocarbon source rocks, mineral composition and content, reservoir characteristics, which all controlled by sedimentary facies, are the main elements to evaluate the enrichment of shale gas in regional geology survey stage. On the basis of the detailed study of sedimentary facies, by mapping the lithofacies palaeogeography, distribution of the fine-grained sedimentary rocks which are rich in organic matter can be figured out. So, the lithofacies paleogeography controls the developmental characteristics of the shale gas. Using the basic geological parameters, the shale gas favorable areas in southern Sichuan Basin and its peripheral region were preliminarily evaluated. The black rocks of shallow shelf facies in Longmaxi Formation of Silurian, as long as being up into middle diagenetic stage, would be able to be shale gas reservoirs in southern Sichuan Basin and its periphery. On the basis of our previous study, through analyzing the shale gas geologic feature of Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its periphery, the point of view is further demonstrated, that the study of sedimentary facies or lithofacies palaeogeography is the key and foundation of shale gas geology survey and evaluation.

Key words: shale gas; Longmaxi Formation; Silurian; southern Sichuan Basin and its peripheral region; sedimentary facies; lithofacies palaeogeography; regional geology survey