

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.05.01

引用格式: 邹武建, 谢非, 马风华, 等. 基于页岩气地质调查评价的思考与认识[J]. 中国地质调查, 2021, 8(5): 1-9. (Zou W J, XIE F, Ma F H, et al. Insights and understanding about shale gas geological survey[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(5): 1-9.)

基于页岩气地质调查评价的思考与认识

邹武建¹, 谢非², 马风华³, 张勇³, 马小娟³

(1. 宁夏回族自治区矿产地质调查院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏回族自治区核地质调查院, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏回族自治区基础地质调查院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 在高频层序地层格架内, 开展页岩气储层的矿物成因、母岩性质对页岩储层中黏土等矿物的发育形成及油气储层意义、矿物演化序列过程中对有机质生烃及形态变化的控制机理、特征性矿物赋存的油气地质学意义、特殊地质条件下的油气赋存认识以及“木桶效应”参数的识别等方面的研究, 有望成为丰富页岩气地质理论的方向。在前人对页岩气地质调查评价研究的基础上, 结合页岩气地质调查评价实践与认识, 认为物源-沉积与生烃-成藏2个源汇体系的地球系统作用过程是页岩气储层非均质性的根本控制因素, 构造-沉积这一结构性控制因素对页岩储层性质起决定性作用, 后期构造改造及成藏演化等系统控制因素是对前者的修饰改造。页岩储层内烃类气体的多源多汇在一定程度上可突破储层非均质性, 认为含气量与总有机碳含量相关系数是储层非均质性强弱的一种表征。研究成果丰富了页岩气调查评价理论体系, 为后续评价工作提供了方法参考。

关键词: 页岩; 页岩气; 储层评价; 储层非均质性; 源汇体系

中图分类号: TE132.2; P618.13

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2021)05-0001-09

0 引言

页岩气作为我国清洁能源与能源保障的新的增长点^[1-2], 近10余a来开展了大量的调查评价、选区及试验开采工作。区域上以四川盆地页岩气赋存层位调查评价为重点, 先后开展了东北、银额盆地、准噶尔盆地及周缘、塔里木盆地及周缘、鄂尔多斯盆地及周缘、渤海湾盆地、青海及西藏等地区的国内全域页岩气地质调查评价工作, 并在涪陵页岩气田实现商业开发^[3-13]。目标层位呈现出古生界海相页岩、中生界海陆过渡相-陆相煤系泥页岩与中生界-新生界湖相页岩等多岩相、多层位、多期改造的特征^[4-6]。配套开展了广泛的页岩气地质理论创新、评价体系讨论、测试分析技术手段运用等涉及构造学、沉积学、岩石学、层序地层学、地球化学、储层地质学、物化探等多学科、多

维度的理论方法体系, 实现了从宏观层面到微观层面对页岩气赋存层位进行精细地解剖和研究^[14-22]。

总体来说, 目前的页岩气地质相关研究主要有页岩层位构造-沉积背景、层序及沉积相、岩相及矿物组成、孔渗物性、有机地球化学、无机地球化学、主微量元素、有机相、含气量、保存条件、厚度、孔裂隙及与之相关的技术创新运用^[23-27]。相应的也存在调查面积大、层位多但具备商业开采条件的页岩气田少或形成实际产能较低的问题, 对国内页岩气构造背景复杂、构造改造强烈、保存条件差、中生代层位岩相复杂且热成熟度相对较低等基础页岩气地质理论的研究仍相对薄弱^[9,12]。本文拟在前人丰富的研究基础上, 结合页岩气地质调查评价自身实践与认识, 对页岩气调查评价的基础地质理论、含气性及评价指标体系进行简要探讨, 以期丰富页岩气调查评价理论体系, 为页岩气调查评价提供方法参考。

1 基础地质理论

页岩气储层的概念或定义目前基本达成统一,形成了页岩气储层以黑色页岩、硅质页岩、钙质页岩、泥质页岩、暗色泥页岩及煤系泥页岩等为主体,间或夹有薄层灰岩、砂岩的暗色细粒沉积复合层系的共识^[3-4,9]。一方面是将暗色泥岩层位、煤系泥页岩纳入页岩气目标层位调查评价范畴,这与北美的纯海相页岩层系沉积建造有所区别^[5];另一方面是页岩复合层系中的夹层在钻井工作中恰恰是有没有页岩气、有多少页岩气最直接的暴露证据,是高效的页岩气显示窗口,同时也可在压裂施工中作为裂缝隔挡层,进而实现页岩储层裂缝系统的高效改造。

理论上,页岩和页岩气的发育、形成、成藏、保存是地球系统作用综合影响的结果,受物源-沉积、生烃-成藏2个源汇体系控制(图1);其原始沉积盆地所在的板块构造位置决定的物源-沉积源汇体系控制着页岩的沉积与发育,后期的埋藏、抬升等构造改造活动主导的生烃-成藏源汇体系控制了页岩、页岩气的保存与分布(图1);整体以多要素综合作用形成的泥页岩储层非均质性为最终表现,页岩气勘探的目标,就是在这种复杂的非均质性储层中寻找含气性良好的层位,并进行高效经济可行性评价及开采利用。特定区域的页岩储层含气性是在特定沉积-构造背景及后期构造改造条件下由储层非均质性控制的烃类气体生成与储存综合作用的结果。页岩气储层普遍的非均质性体现在相带、岩相、地化、储集条件、含气性等所有评价指标的差异中,而这种差异的根本控制因素则是

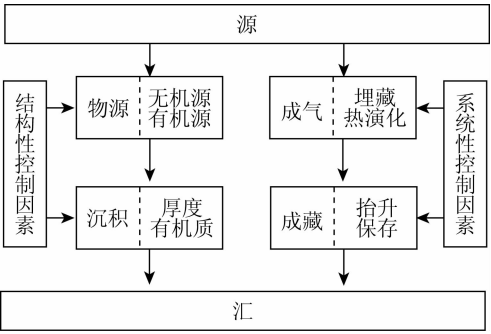


图1 页岩气储层2个源汇体系控制机理

Fig.1 The control mechanism of two source-sink systems for shale gas reservoir

沉积-构造耦合作用的结果,即便在成岩、埋深、成藏、抬升破坏等构造作用过程中会通过一系列复杂的生物的、物理的、化学的成岩作用交互影响这种非均质性的“程度”,但本质上无法撼动沉积-构造耦合作用形成页岩气储层这一根本结果;如果将沉积-构造耦合作用形成页岩气储层过程及实体的系列控制因素定义为结构性控制因素,那么该页岩气储层成岩及后期的各种改造控制因素引起的内部构造改变可定义为系统性控制因素。

1.1 结构性控制因素

结构性控制因素从根本上决定了页岩的沉积与发育,决定了页岩气生成的物质基础与储集条件等参数的非均质性,例如页岩沉积背景、沉积环境、物源、生态系统、岩相、厚度、分布、有机碳、有机质类型、岩石成分和物性参数等都是受这一过程影响控制的,也就是说,物源-沉积这一源汇体系对页岩气的调查评价选区具有决定性的作用。中国典型的3类页岩层位就是结构性控制因素的良好证明:①南方地区、塔里木盆地古生界页岩层位均是稳定的海相沉积建造,以黑色页岩为主,有机质丰度良好、热演化程度高(表1^[7,28-31])、易于压裂施工,加之“黑色岩系”较为完备的理论研究体系,是页岩气勘探取得突破的重点区域^[24-26];②鄂尔多斯盆地、银额盆地、准噶尔盆地等区域的陆相、煤系泥页岩建造,以暗色泥页岩、油页岩、煤系及夹层构成的复合层系为主,岩相类型复杂,非均质性极强,有机质丰度高,是良好的页岩油气勘探层位,这些层位取得了丰富的有机地球化学和储层参数,并开展了含气性评价(表1),评价结果显示这些盆地具备良好前景,但目前尚未实现页岩气勘探突破,原因可能是这些地区煤系泥页岩层位埋深普遍相对较浅,储层应力弱、透气性强,加之强烈的构造改造形成极为发育的裂缝系统,其形成的烃类气体经历多期次的逸散-解吸-逸散,难以形成普遍的页岩气藏^[8,27];③鄂尔多斯盆地及周缘、青海盆地及东北地区湖相泥页岩沉积建造,普遍的低成熟度是制约页岩气勘探突破的主要因素,多数湖相层位目前处于低熟至成熟阶段,尚未进入生气高峰(表1);物源多、沉积相类型多、岩相空间变化复杂、有机质供给及保存在不同程度上强化了泥页岩层位的非均质性,难以精确把控“甜点区”,在现有条件下取得页岩气勘探突破的可能性相对较小^[27,32-34]。

表 1 世界主要盆地或地区典型页岩气层位有关参数^[7,28-31]

Tab.1 Relevant parameters of typical shale gas position formation in major basins or regions of the world^[7,28-31]

地区	时代	地层	沉积环境	总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)含量/%	有机质类型	热成熟度/%	脆矿含量/%	黏土矿物含量/%
南方地区	震旦纪	陡山沱组	海相	0.58~12.00/2.02	I	2.00~4.00	28~56	25~42
南方地区	早寒武世	筇竹寺组	海相	0.35~22.1/3.4	I	1.28~5.20	28~78	8~47
塔里木	早寒武世	玉尔吐斯组	海相	0.50~14.21/2.00	I—II	1.20~5.00	55~82	4~44
湘西北	寒武纪	牛蹄塘组	海相	2.50~7.00	I	2.50~3.50	45~71	5~24
塔里木	中晚奥陶世	萨尔干组	海相	0.61~4.60/2.80	I—II	1.20~4.60	54~86	14~45
南方地区	奥陶纪—志留纪	五峰—龙马溪组	海相	0.41~25.70/2.50	I—II	1.60~3.60	21~44	10~65
塔里木	奥陶纪	印干组	海相	0.50~4.40/1.50	I—II	0.80~3.40	—	—
沁水煤田	石炭纪—二叠纪	石炭系—二叠系	海陆过渡	1.00~4.00/2.96	III	1.50~3.60	15~65	35~79
鄂尔多斯盆地	三叠纪	长 7 段	湖相	0.30~36.2	I—II ₁	0.70~1.00	43~47	24~31
鄂尔多斯盆地	三叠纪	长 9 段	湖相	0.30~11.30	I—II ₁	0.90~1.30	29~56	15~27
四川盆地	侏罗纪	自流井组	湖相	0.20~23.9	I—II ₁	1.50~1.80	52~79	10~45
鄂尔多斯盆地	侏罗纪	延安组	湖相	1.63~3.89	III—II	0.59~0.60	43~56	29~33
六盘山盆地	早白垩世	马东山组	湖相	0.50~9.80	I—II	0.50~1.30	50~98	2~50
东营凹陷	古近纪	沙三段	湖相	0.50~13.80	I—II ₁	0.40~1.20	6~35	13~49
泌阳凹陷	古近纪	核桃园组	湖相	2.00~2.98	I—II ₁	1.00~1.70	—	—
密歇安	泥盆纪	Antrim	克拉通	0.30~24.00	I	0.40~0.60	20~41	30~42
阿巴拉契亚	泥盆纪	Ohio	前陆	0.50~6.00	II	0.40~4.00	45~60	35~50
福特沃森	早石炭世	Barnett	前陆	1.00~5.60	II	1.00~2.10	35~50	35~44
圣胡安	早白垩世	Lewis	前陆	0.45~3.00	III—II	1.60~1.90	50~75	28~55

因此,在结构性控制因素制约的前提下,对于页岩气目标层位所在的盆地属性、沉积相及旋回、古环境、岩石矿物等基础地质研究极为重要。基于层序地层学中海(湖)侵体系域密集段有机质含量更高、生物化石更丰富、储层相对更为均一的事实^[15],认为比现行层序地层学更为精细的页岩层位对比研究及空间相态展布是对储层及其非均质性掌握的重点之一。所以,针对页岩气目标层段的岩相韵律性沉积与米兰科维奇旋回的对比,建立地球化学、岩相、物性等高频层序地层格架,并在此格架内开展页岩储层的综合研究,在认为存在以下 5 个可以丰富页岩气地质理论的方向。

(1)页岩气储层的矿物成因。页岩储层的矿物成因对其孔裂隙发育程度、有机质发育强度、对烃类气体的吸附程度均有重要影响;如易婷等^[35]认为有机石英在还原环境下能很好地指示有机质发育情况,且与有机碳含量呈正相关,那么黏土矿物、碳酸盐岩矿物、黄铁矿、菱铁矿等矿物的成因及其对有机质的深层次控制机理将有可能形成页岩储层有机质影响控制理论。

(2)母岩性质对页岩储层中黏土等矿物的发育形成及油气储层意义。不同源区背景下形成的泥页岩储层中黏土矿物的类型、含量、演化方向、与有机质含量的关系、对油气的运移吸附等方面的研究

将有可能揭示源区—有机质—油气赋存三者的耦合机理。

(3)矿物演化序列过程中对有机质生烃及形态变化的控制机理。不同矿物对有机质及烃类气体的吸附并不相同,尤其是黏土矿物在演化过程中对有机质形态、孔裂隙结构、吸附性能等方面的影响甚为突出,该方面的研究可有效阐述矿物—有机质同步、异步演化的矿物学规律。

(4)特征性矿物赋存的油气地质学意义。如磷灰石、锆石、磁铁矿、黑云母等重矿物含量及组合特征所反映的母岩性质及方向,再如火山灰、凝灰岩所反映的特殊地质事件及对页岩储层的影响,对特征性矿物油气地质学意义的讨论将是页岩储层评价的一个方向。

(5)特殊地质条件下的油气赋存认识。如深海浊流沉积、热液喷流、生物迸发等特殊地质条件下对页岩储层物质基础及物性的控制研究将是页岩气勘探目标层位优选的关注重点。

1.2 系统性控制因素

系统性控制因素是在页岩层位成岩、构造等作用过程中通过一系列的生物的、物理的、化学的作用对结构性控制因素基础上所形成页岩层位这一实体的改造,一方面控制了页岩的保存和分布,另一方面则控制着页岩的热演化史,也就是说控制着

生烃-成藏这一源汇体系。泥页岩中有机质成烃的阶段性和期次性对页岩气成藏影响的研究极为重要,连续的埋藏-成烃与阶段性的埋藏-成烃在本质上深刻影响着页岩气储层属性,既体现在含气量上,也体现在储层的质量上。页岩沉积、成岩后的构造改造对沉积盆地、页岩层位的保存和残留层位具有深刻的影响,或暴露地表失去成烃和保存成藏条件,或形成普遍的裂缝通道致使页岩气逸散,或将整个页岩层位碎块化,这也是北美页岩气比中国页岩气勘探开发更为有效的原因^[21,25]。在成岩、埋藏及抬升的系列演化中,有机质成烃产生的膨胀裂缝及有机酸对储层的改造、热演化对有机质孔隙及黏土矿物转换的控制、储层流体及压力物化条件改变中自身矿物的形成、埋藏-抬升引起的多期次成烃及成藏等均是系统性控制因素对页岩储层的综合改造表现。

上述控制因素的划分要求地质工作者务必非常重视基础地质、区域沉积-构造背景、大地构造属性等因素对页岩层位实体形成的控制,在页岩气地质调查评价时需要系统地研究、掌握目标层段结构性控制因素,首先从根上形成客观、扎实的基础地质认识,在此基础上开展选取及优选评价,这也是丰富、强化页岩气地质理论的突破点。

2 含气性讨论

页岩气地质调查评价及其相关研究工作开展的根本目的是回答“有没有页岩气、有多少页岩气及开采价值如何”的问题,页岩气储层评价指标体系的建立正是以含气性、含气量作为评价、选区的根本,其他所有页岩气相关的研究指标都是指向,或服务于这一个根本的多维度、多学科理论体系的建立。而基于目前公开发表的文献资料来看,主要集中在页岩储层等温吸附方面,而页岩气储层含气量方面的研究数据十分有限,这将是页岩气地质调查评价下一步的工作重点。

总有机碳(TOC)含量作为页岩气储层含气性、含气量评价的最核心因素,其与含气量呈正相关性已被许多学者所证实,这是烃类气体是由碳形成的内在因果关系所控制的^[19-22],差别主要体现在不同页岩层位这种正相关性的相关系数 R 值的不同。目前对含气量与 TOC 含量相关系数 R 的定位则仅限

于说明相关系数高低程度,并未赋予实质上的物理含义。

理论上,单位 TOC 含量生成单位含气量,也就是理论含气量与 TOC 的相关系数 $R = 1$; 而实际含气量与 TOC 的相关系数 R 值为 $0 \sim 1$ 。这种系数之间的高低差异可归结为赋存在页岩储层中的烃类气体在非均质性储层中运移成藏的综合反映,也就是说 R 值在某种程度上是储层非均质属性强弱的一种表征。当 R 值为 1 时,则储层是纯均质的、理论的; R 值越小,那么储层的非均质性就相对越强; 当 R 值小于某一定值时,则不具备形成储层条件。更进一步来说,TOC 含量与吸附气含量相关系数 R 是页岩气储层吸附性能非均质性差异的表征,如渝东南下古生界、鄂尔多斯盆地山西组、四川盆地下古生界、北美 Barnett 和 Antrim 页岩的有机质含量与吸附气含量的相关性 R 值存在明显的差异,认为这种差异就是对几个页岩层位非均质性属性的综合反映(图 2^[36-39]); TOC 含量与游离气含量相关系数 r 是页岩气储层孔裂隙储集发育程度这一非均质性的表征; TOC 含量与总含量相关系数 R 是页岩气储层整体非均质性差异的表征。

实际上,针对某一确定的页岩气储层,其岩相、TOC 含量、孔裂隙、物性等所有储层参数均存在普遍的非均质性现象,那么每一个点上生成的烃类气体向空间储存将通过大量的气体活塞式运移充填共同控制这一页岩储层的含气性^[16,18],也就是说,页岩储层内部烃类气体在其内广泛运移成藏是普遍的,页岩储层内烃类气体也是“多源多汇”的,这会在一定程度上极大地突破储层非均质性(弱化储层非均质性)而进行充填成藏,这种突破性的烃类气体充填将在一定程度上改变有机碳含量高低对含气量的严格约束(图 3)。那么,这一确定储层总的含气量将是该储层总有机碳生成的含气量,也就是该确定储层所取得样品平均有机质含量将是该储层平均含气量、含气性的总体反映;个别样品的有机碳高低并不影响储层整体含气性的评价,体现出均值有机碳含量在页岩气含气性评价中的有效性。这样就将确定储层的含气性纳入一个整体进行评价、研究,能够有效提高页岩气含气性评价的准确性。所以确定层段页岩气有机碳含量的加权均值来评估泥页岩层段的含气量是科学合理的。

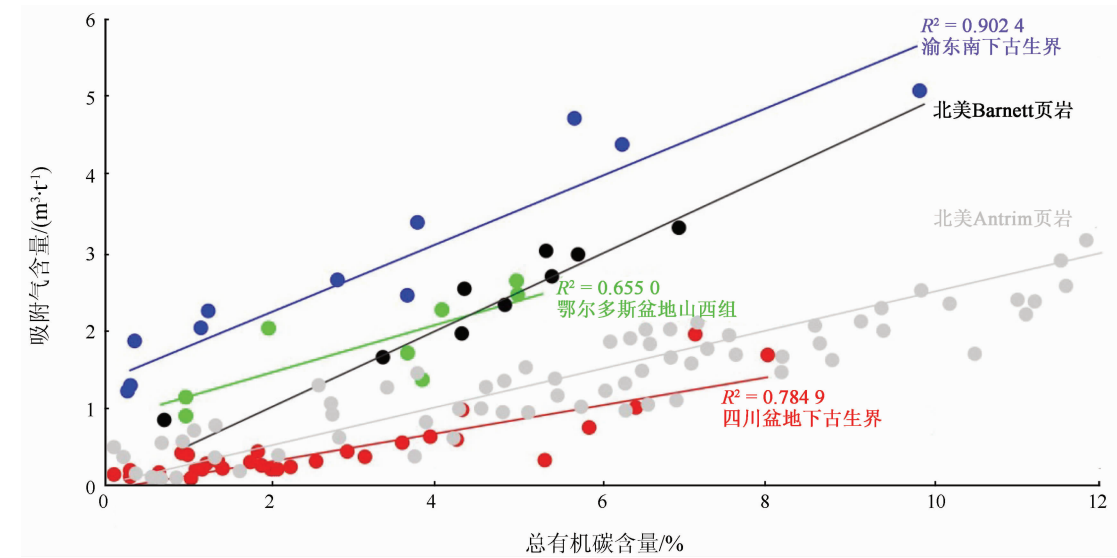


图 2 不同页岩气层位有机质含量与吸附气含量关系^[36-39]

Fig 2 Linear correlation between organic content and absorbed gas of different shale gas positions^[36-39]

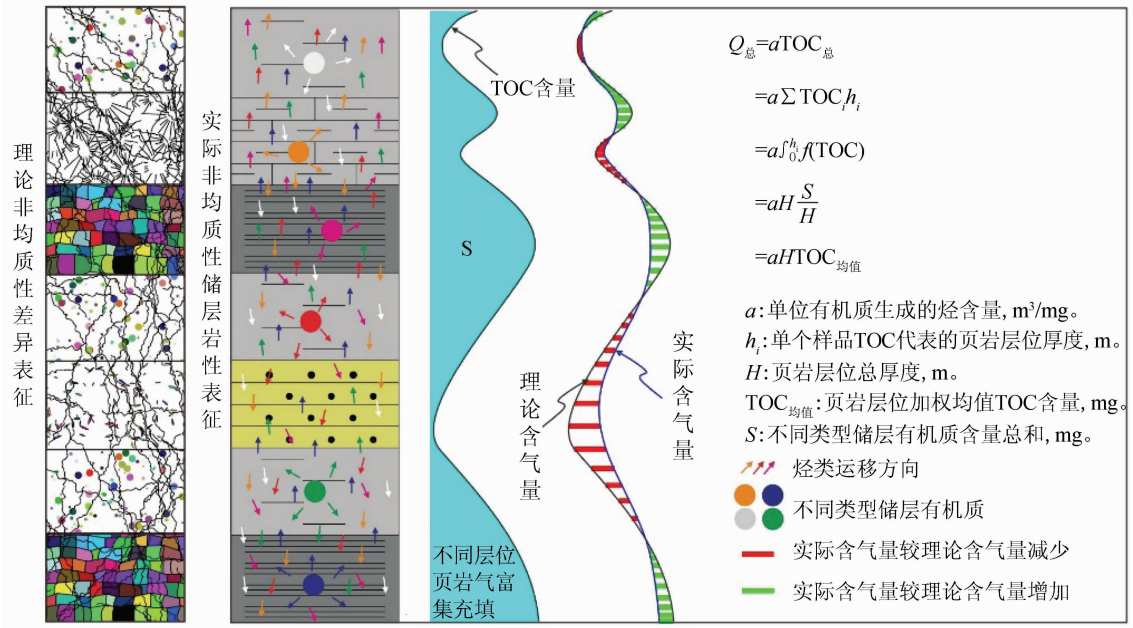


图 3 烃类气体多源多汇弱化页岩储层非均质性示意图

Fig.3 Schematic diagram of the attenuation effect of multiple sources and multiple sinks on the heterogeneity of shale reservoirs

3 评价指标体系讨论

控制页岩气含气量的因素具有多元性,具备多要素耦合控制的机理特征,但各要素在不同地区、不同类型页岩层位中的影响力和影响程度是不对称、不一致的;这种多要素不对称协同控制机理影响着页岩气地质调查评价及参数选择的

方方面面。

3.1 木桶效应

需要讨论的是,在页岩气多要素构成的评价体系中是否存在“木桶效应”,即是否存在某一参数会否定某个储层评价结果的现象。以页岩气形成的物质基础与成藏保存条件为主线,涵盖有机质含量、热演化程度及具体的构造改造情况等要素;低有机质含量不构成页岩气储层,低热演化

程度目前基本上否定其勘探潜力,复杂构造改造总体上对页岩气储层呈较为明显的破坏性,具体表现为将有利区块碎片化,从而区域性破坏页岩气储层整体含气性。因此,在不同构造属性背景、不同成因类别的页岩气储层评价中,对类似这种存在“木桶效应”的参数或因素的梳理研究对页岩气的调查评价至关重要。

3.2 评价指标

围绕页岩气调查评价的核心指标,即含气量的高低,以储层的非均质性为根本控制因素,从页岩气的生成与保存 2 个方面开展调查评价,将有机碳、热演化及储集条件作为一级指标,将控制、影响一级指标的次一级评价指标或参数定义为二级指标,在此基础上开展的其他诸如岩石无机地球化学、油源对比、元素地球化学、岩石矿物、生化指标、模拟实验及其他多维度、多学科研究定义为研究指标。需要强调的是,各要素、各指标之间存在内在的、交互的影响,是结构性控制因素与系统性控制因素综合作用的结果。这种指标体系的划分更多地体现在页岩气调查评价程度中,诸如远景区、有利区和目标区等阶段性评价的参数选择。这种选择可以有效指导根据不同工作程度选区评价指标的高效性和有效性,使所开展的相关工作更具有指向性(表 2)。

表 2 页岩气地质调查评价程度与指标优选

Tab.2 Shale gas geological survey evaluation level and index optimization

控制因素	远景区(一级指标)	有利区(二级指标)	目标区 (三级指标)
结构控制 因素 ↓ 构造-沉积 背景	沉积相-岩相	主微量元素	有机质赋存 状态及形式 地层压力 含水饱和度 含气饱和度 压裂工艺
	物源	稀土元素	
	植被生物有机系统	高频层序	
	页岩厚度	古气候	
系统控制 因素 ↓ 构造改造 及保存	岩石矿物组成	古水体盐度	
	有机碳	古水深	
	有机质类型	古氧化还原条件	
		孔隙类型	
	孔渗	溶蚀改造	
	页岩分布	自生矿物	
	有机显微组分	黏土矿物演化	
	氯仿沥青及族组成	生物标志化合物	
	热成熟度	页岩气赋存形式	
	岩石热解参数	杨氏模量	
		泊松比	
		含气量	

4 结论

(1)认为物源-沉积与生烃-成藏 2 个源汇体系的地球系统作用过程是页岩气储层形成及其非均质性的根本控因,强调构造-沉积这一结构性控制因素对页岩储层性质的决定性作用,后期构造改造及成藏演化的系统性控制因素是对前者的修饰改造。

(2)页岩储层内烃类气体的多源多汇在一定程度上可突破储层非均质性,含气量与 TOC 含量相关系数为反映储层非均质性强弱的一种表征参数。页岩气储层成烃的阶段性和期次性对其评价具有深刻影响,且目标层段的有机质含量均值能更为科学地反映其整体含气情况。

(3)在高频层序地层格架内开展页岩气储层的矿物成因、母岩性质对页岩储层中黏土等矿物的发育形成及油气储层意义、矿物演化序列过程中对有机质生烃及形态变化的控制机理、特征性矿物赋存的油气地质学意义、特殊地质条件下的油气赋存认识、“木桶效应”参数的识别等方面的研究将可能是丰富页岩气地质理论的方向。

参考文献(References):

[1] 邹才能,赵群,张国生,等. 能源革命:从化石能源到新能源[J]. 天然气工业,2016,36(1):1-10.
Zou C N,Zhao Q,Zhang G S,et al. Energy revolution:From a fossil energy era to a new energy era[J]. Nat Gas Ind,2016,36(1):1-10.

[2] 董大忠,王玉满,李新景,等. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J]. 天然气工业,2016,36(1):19-32.
Dong D Z,Wang Y M,Li X J,et al. Breakthrough and prospect of shale gas exploration and development in China[J]. Nat Gas Ind,2016,36(1):19-32.

[3] 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 C N,Dong D Z,Wang S J,et al. Geological characteristics,formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petrol Explorat Dev,2010,37(6):641-653.

[4] 李玉喜,聂海宽,龙鹏宇. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区[J]. 天然气工业,2009,29(12):115-118.
Li Y X,Nie H K,Long P Y. Development characteristics of organic-rich shale and strategic selection of shale gas exploration ar-

- ea in China[J]. Nat Gas Ind, 2009, 29(12): 115–118.
- [5] 张金川, 姜生玲, 唐玄, 等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 109–114.
- Zhang J C, Jiang S L, Tang X, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. Nat Gas Ind, 2009, 29(12): 109–114.
- [6] 康玉柱. 中国非常规泥页岩油气藏特征及勘探前景展望[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 1–5, 117.
- Kang Y Z. Characteristics and exploration prospect of unconventional shale gas reservoirs in China[J]. Nat Gas Ind, 2012, 32(4): 1–5, 117.
- [7] 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(S1): 107–114.
- Dong D Z, Zou C N, Yang H, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China[J]. Acta Petrol Sin, 2012, 33(S1): 107–114.
- [8] 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, 131–132.
- Nie H K, He F Q, Bao S J. Peculiar geological characteristics of shale gas in China and its exploration countermeasures[J]. Nat Gas Ind, 2011, 31(11): 111–116, 131–132.
- [9] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385–399.
- Zou C N, Zhang G S, Yang Z, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petrol Explorat Dev, 2013, 40(4): 385–399.
- [10] 陈建渝, 唐大卿, 杨楚鹏. 非常规含气系统的研究和勘探进展[J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 55–59.
- Chen J Y, Tang D Q, Yang C P. Advances in the research and exploration of unconventional petroleum systems[J]. Geol Sci Technol Inform, 2003, 22(4): 55–59.
- [11] 邱振, 邹才能, 李建忠, 等. 非常规油气资源评价进展与未来展望[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(2): 238–246.
- Qiu Z, Zou C N, Li J Z, et al. Unconventional petroleum resources assessment: progress and future prospects[J]. Nat Gas Geosci, 2013, 24(2): 238–246.
- [12] 贾承造, 郑民, 张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 1–10.
- Jia C Z, Zheng M, Zhang Y F. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology[J]. Acta Petrol Sin, 2014, 35(1): 1–10.
- [13] 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 J C, Jin Z J, Yuan M S. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Nat Gas Ind, 2004, 24(7): 15–18.
- [14] 曾庆辉, 钱玲, 刘德汉, 等. 富有机质的黑色页岩和油页岩的有机岩石学特征与生、排烃意义[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 113–122.
- Zeng Q H, Qian L, Liu D H, et al. Organic petrological study on hydrocarbon generation and expulsion from organic-rich black shale and oil shale[J]. Acta Sedimentol Sin, 2006, 24(1): 113–122.
- [15] 魏琳, 许文国, 杨仓, 等. 页岩层序划分的界面沉积标志及地球化学指示[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 524–533.
- Wei L, Xu W G, Yang C, et al. Sedimentary boundary markers and geochemical indexes of shale sequence stratigraphy[J]. Oil Gas Geol, 2017, 38(3): 524–533.
- [16] 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, 113–114.
- Jiang Y Q, Dong D Z, Qi L, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Nat Gas Ind, 2010, 30(10): 7–12, 113–114.
- [17] 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 J C, Nie H K, Xu B, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Nat Gas Ind, 2008, 28(2): 151–156.
- [18] 张卫东, 郭敏, 姜在兴. 页岩气评价指标与方法[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 1093–1099.
- Zhang W D, Guo M, Jiang Z X. Parameters and method for shale gas reservoir evaluation[J]. Nat Gas Geosci, 2011, 22(6): 1093–1099.
- [19] 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 Y X, Zhang J C, Jiang S L, et al. Geologic evaluation and targets optimization of shale gas[J]. Earth Sci Front, 2012, 19(5): 332–338.
- [20] 李延钧, 刘欢, 刘家霞, 等. 页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(2): 28–34.
- Li Y J, Liu H, Liu J X, et al. Geological regional selection and an evaluation method of resource potential of shale gas[J]. J Southwest Petro Univ: Sci Technol Ed, 2011, 33(2): 28–34.
- [21] 王社教, 杨涛, 张国生, 等. 页岩气主要富集因素与核心区选择及评价[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 94–100.
- Wang S J, Yang T, Zhang G S, et al. Shale gas enrichment factors and the selection and evaluation of the core area[J]. Eng Sci, 2012, 14(6): 94–100.
- [22] 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 Y X, Qiao D W, Jiang W L, et al. Gas content of gas-bearing shale and its geological evaluation summary[J]. Geol Bull China, 2011, 30(2/3): 308–317.
- [23] 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 等. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J]. 地球科学进展, 2010, 25(6): 597–604.
- Zhang X F, Lu X C, Zhang L Y, et al. Occurrences of shale gas

- and their petroleum geological significance[J]. *Adv Earth Sci*, 2010, 25(6): 597–604.
- [24] 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 Z G. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration[J]. *Oil Gas Geol*, 2015, 36(1): 1–6.
- [25] 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]. *地质学前沿*, 2012, 19(3): 280–294.
- Nie H K, Bao S J, Gao B, et al. A study of shale gas preservation conditions for the Lower Paleozoic in Sichuan Basin and its periphery[J]. *Earth Sci Front*, 2012, 19(3): 280–294.
- [26] 王淑芳, 邹才能, 董大忠, 等. 四川盆地富有机质页岩硅质生物成因及对页岩气开发的意义[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(3): 476–486.
- Wang S F, Zou C N, Dong D Z, et al. Biogenic silica of organic-rich shale in Sichuan Basin and its significance for shale gas[J]. *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 2014, 50(3): 476–486.
- [27] 林森虎, 袁选俊, 杨智. 陆相页岩与泥岩特征对比及其意义——以鄂尔多斯盆地延长组 7 段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(3): 517–523.
- Lin S H, Yuan X J, Yang Z. Comparative study on lacustrine shale and mudstone and its significance: A case from the 7th member of Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Oil Gas Geol*, 2017, 38(3): 517–523.
- [28] 罗鹏, 吉利明. 陆相页岩气储层特征与潜力评价[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5): 1060–1068.
- Luo P, Ji L M. Reservoir characteristics and potential evaluation of continental shale gas[J]. *Nat Gas Geosci*, 2013, 24(5): 1060–1068.
- [29] 范柏江, 师良, 庞雄奇. 页岩气成藏特点及勘探选区条件[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18(6): 9–13.
- Fan B J, Shi L, Pang X Q. Accumulation characteristics and exploration screening of shale[J]. *Petrol Geol Recov Effic*, 2011, 18(6): 9–13.
- [30] 李智学, 邵龙义, 李明培, 等. 鄂尔多斯盆地黄陵北部延安组页岩气勘探潜力分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2014, 42(4): 31–35.
- Li Z X, Shao L Y, Li M P, et al. Analysis of shale gas resource exploration potential of Yan'an Formation in northern Huangling mining area of Ordos Basin[J]. *Coal Geol Explorat*, 2014, 42(4): 31–35.
- [31] 钟秋, 傅雪海, 张苗, 等. 沁水煤田石炭系—二叠系煤系地层页岩气开发潜力评价[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(1): 110–121.
- Zhong Q, Fu X H, Zhang M, et al. Development potential of Carboniferous–Permian coal measures shales gas in Qinshui coal-field[J]. *Nat Gas Geosci*, 2020, 31(1): 110–121.
- [32] 马风华, 潘进礼, 马瑞赟, 等. 华北板块南缘六盘山盆地固参 1 井马东山组泥页岩段古沉积环境研究[J]. *地质论评*, 2019, 65(5): 1123–1130.
- Ma F H, Pan J L, Ma R Y, et al. Paleo-sedimentary environmental study of mud-shale member of Madongshan Formation of well Gucan-1 in Liupanshan Basin, North China Plate[J]. *Geol Rev*, 2019, 65(5): 1123–1130.
- [33] 马风华, 潘进礼, 张勇, 等. 六盘山盆地固参 1 井白垩系马东山组泥页岩储层特征[J]. *现代地质*, 2019, 33(3): 662–671.
- Ma F H, Pan J L, Zhang Y, et al. Shale reservoir characteristics of Cretaceous Madongshan Formation of well Guye 1 in Liupanshan Basin[J]. *Geoscience*, 2019, 33(3): 662–671.
- [34] 马风华, 潘进礼, 马瑞赟, 等. 六盘山盆地马东山组低熟泥页岩有机质类型划分[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(9): 1370–1377.
- Ma F H, Pan J L, Ma R Y, et al. Division of immature mud-shale organic type of Madongshan Formation in Liupanshan Basin[J]. *Nat Gas Geosci*, 2019, 30(9): 1370–1377.
- [35] 易婷, 周文, 杨璠, 等. 四川盆地龙马溪组页岩气储层石英类型与特征[J]. *矿物学报*, 2020, 40(2): 127–136.
- Yi T, Zhou W, Yang F, et al. Types and characteristics of quartz in shale gas reservoirs of the Longmaxi Formation, Sichuan Basin, China[J]. *Acta Mineralog Sin*, 2020, 40(2): 127–136.
- [36] 韩双彪, 张金川, Horsfield B, 等. 页岩气储层孔隙类型及特征研究: 以渝东南下古生界为例[J]. *地质学前沿*, 2013, 20(3): 247–253.
- Han S B, Zhang J C, Horsfield B, et al. Pore types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic shale in southeast Chongqing[J]. *Earth Sci Front*, 2013, 20(3): 247–253.
- [37] 付金华, 郭少斌, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界山西组页岩气成藏条件及勘探潜力[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43(2): 382–389.
- Fu J H, Guo S B, Liu X S, et al. Shale gas accumulation condition and exploration potential of the Upper Paleozoic Shanxi Formation in Ordos Basin[J]. *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2013, 43(2): 382–389.
- [38] 聂海宽, 张金川. 页岩气聚集条件及含气量计算——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. *地质学报*, 2012, 86(2): 349–361.
- Nie H K, Zhang J C. Shale gas accumulation conditions and gas content calculation: A case study of Sichuan Basin and its periphery in the Lower Paleozoic[J]. *Acta Geol Sin*, 2012, 86(2): 349–361.
- [39] 王飞宇, 贺志勇, 孟晓辉, 等. 页岩气赋存形式和初始原地气量(OGIP)预测技术[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 501–510.
- Wang F Y, He Z Y, Meng X H, et al. Occurrence of shale gas and prediction of original Gas In-place(OGIP)[J]. *Nat Gas Geosci*, 2011, 22(3): 501–510.

Insights and understanding about shale gas geological survey

ZOU Wujian¹, XIE Fei², MA Fenghua³, ZHANG Yong³, MA Xiaojuan³

(1. Mineral Geological Survey Institute of Ningxia, Ningxia Yinchuan 750021, China; 2. Nuclear Geological Survey Institute of NingXia, Ningxia Yinchuan 750021, China; 3. Basic Geological Survey Institute of Ningxia, Ningxia Yinchuan 750021, China)

Abstract: The investigations under shale gas reservoirs in high – frequency sequence stratigraphic framework could be the research orientation in enriching shale gas geological theory, which include the significance of mineral causes and source rock properties in the development of clay mineral in shale gas reservoirs, the control mechanism of mineral causes and source rock properties on the organic matter hydrocarbon generation and morphological changes during the process of mineral evolution sequence, the significance of oil and gas geology with characteristic minerals occurrence, the understanding of oil and gas occurrence under special geological conditions, and the identification of Cask Effect parameters. Based on the previous studies on shale gas geological investigation and evaluation, combined with the practice and understanding of shale gas geological survey, the authors in this paper identified that the process of earth system interaction between two source – sink systems, provenances – depositional system and hydrocarbon generation – accumulation system, is the fundamental controlling factor of shale gas reservoir heterogeneity. Besides, the structural control factor of tectonic – sedimentary plays a decisive role in shale reservoir properties. The systematic control factors of tectonic transformation and reservoir forming and evolution in the later stage are the modification of the earlier stage. The multi – source and multi – sink of hydrocarbon gas in shale reservoir can break through the reservoir heterogeneity to a certain extent, and the correlation coefficient between gas content and TOC content is a characterization of reservoir heterogeneity. This research would enrich shale gas geological survey and evaluation theory, and provide method references for future work.

Keywords: shale; shale gas; reservoir evaluation; reservoir heterogeneity; source – sink system

(责任编辑：常艳)