

Study on Sedimentary Characteristics and Heterogeneity of Rock Composition Structure of Shuijingtuo Formation of Lower Cambrian in the Western Hubei

Xiao Chen*, Shengnan Liu, Fuhao Deng, Chengqian Yu, Zequn Wang, Zhonggui Hu#

School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan Hubei
Email: 1026320205@qq.com, #hgz1978@yangtzeu.edu.cn

Received: May 18th, 2017; accepted: Jun. 6th, 2017; published: Jun. 9th, 2017

Abstract

Based on the detailed study of the heterogeneity of shale gas reservoirs at home and abroad, the analysis of sedimentary characteristics and shale reservoir heterogeneity were carried out in Shuijingtuo Formation in western Hubei. The results show that the sediments of the Shuijingtuo Formation are divided into two third-order sequences, and the sedimentary types of the Sq1 sediments are mainly clastic rocks. The Sq2 sedimentary types of the period are mainly mixed silt pond micro-facies sediments. At the macro level, the transatlantic system mainly develops carbonaceous shale. The high system tract mainly develops calcium and silty mud shale. In microcosmic, the shale reservoir in the transgressive system has the characteristics of increasing clay mineral content and organic carbon content, and decreasing the content of brittle mineral content. The variation of shale reservoir in high system tract is opposite. The heterogeneity of the characteristics of shale gas reservoirs may be controlled by sea level rise and fall, source supply and biological action during the depositional period, and also affected by diagenesis and tectonism.

Keywords

Yichang Area, Shuijingtuo Formation, Sedimentary Characteristics, Heterogeneity

鄂西地区下寒武统水井沱组沉积特征及岩石组构非均质性分析

陈晓*, 刘胜男, 邓富豪, 余承谦, 王泽群, 胡忠贵#

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 陈晓, 刘胜男, 邓富豪, 余承谦, 王泽群, 胡忠贵. 鄂西地区下寒武统水井沱组沉积特征及岩石组构非均质性分析[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(3): 321-329. <https://doi.org/10.12677/ag.2017.73035>

长江大学地球科学学院, 湖北 武汉
Email: 1026320205@qq.com, #hgz1978@yangtzeu.edu.cn

收稿日期: 2017年5月18日; 录用日期: 2017年6月6日; 发布日期: 2017年6月9日

摘要

在详细调研国内外页岩气储层非均质性研究的基础上, 对鄂西地区水井沱组开展了沉积特征及页岩储层非均质性的分析。研究表明: 水井沱组总体为一套细粒碎屑岩沉积, 可划分为2个三级层序, S_{q1}时期沉积类型主要为碎屑岩陆棚相深水陆棚亚相泥质陆棚微相沉积, S_{q2}时期沉积类型主要为混积陆棚相浅水陆棚亚相灰质陆棚微相沉积。宏观上海侵体系域主要发育碳质页岩; 高位体系域主要发育钙质、粉砂质泥页岩。微观上海侵体系域中页岩储层具有粘土矿物和有机碳含量向上逐渐升高, 脆性矿物含量降低的特征; 高位体系域中页岩储层变化规律则相反。页岩气储层特征分布的非均质性可能受到沉积时期海平面升降变化、物源供给以及生物作用的控制, 也受到成岩作用、构造作用的影响。

关键词

宜昌地区, 水井沱组, 沉积特征, 非均质性

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近几年, 国内学者通过吸收和借鉴国外经验, 对页岩气的研究主要集中于页岩气形成机理、赋存形式、成藏机理、资源量计算和有利区优选等领域[1] [2]。随着勘探工作不断深入与有利区先行开发, 页岩气储层研究越来越受重视[3] [4]。在勘探开发方面, 美国已经进入世界领先水平, 加拿大是另一个在勘探开发方面取得巨大成功的国家。如今我们国家是继美国和加拿大之后, 最先开始对页岩气着手开发的国家。近几年页岩气勘探已经取得了较大的突破, 但是依然存在很多难以解释的现象, 如: 同一口井不同层段页岩气日产量差别较大; 有些同一稳定区块内的页岩气井, 同一层位页岩气日产量差别较大; 有些有机碳含量高的地区其页岩气产量较低, 而有机碳含量较低的地区页岩气产量反而很高等。此外, 在研究区域的选择上或是不同层位研究精细程度上还存在差异, 如勘探程度较高的五峰组-龙马溪组研究程度相对更高, 而受限于钻井资料少及埋深大等现实问题, 针对湘鄂西地区下寒武统水井沱组的研究程度相对较低。国内外学者对页岩气形成机理、赋存方式、成藏条件等基础研究相对较成熟, 虽然部分学者对富有机质页岩储层综合特征及其垂向和平面上非均质性做了有意义的探索研究[5] [6] [7], 但总体相对薄弱。根据本研究的内容, 结合富有机质页岩储层非均质性研究现状提出了以下技术思路: 即在现代沉积学和层序地层学理论指导下, 以典型剖面资料为基础, 结合区域研究成果, 确定富有机质页岩段岩石类型及组合特征, 划分其沉积相类型和层序地层单元; 分析富有机质页岩储层物质组成(矿物组分、粘土矿物组分、有机碳含量)、物性(孔隙度、渗透率)、储集空间(孔隙结构、孔隙大小)及含气性(吸附能力、解析气量)等特征, 并总结其在层序地层格架内部非均质性特征; 在此基础上, 从沉积过程和沉积后作用探讨富有机质页岩储层非均质性形成机制, 其中沉积过程主要分海平面升降、物源供给、生物作用等

进行分析，而沉积后作用主要从成岩作用、构造作用、水文地质等方面开展研究。

因此，本论文拟对湘鄂西地区下寒武统水井沱组典型剖面富有机质页岩岩石组构非均质性开展研究，探讨造成这种非均质性的原因，进而优选出较有利富有机质页岩储层发育区段，对指导南方海相页岩气勘探开发具有重要的科学意义。

2. 区域地质及沉积特征

鄂西地区位于宜昌以西地区，总体属于中扬子地台，区内包括宜都-鹤峰复背斜、花果坪复向斜、中央复背斜及黄陵背斜南缘等次级构造区(图 1)。受早寒武世的澄江-加里东运动抬升的影响，该区处于海退的碳酸盐台地环境。晋宁运动后初期海侵规模大，沉积水体总体上较为安静，沉积了磷块岩、硅质岩和黑色页岩，代表最大海泛面。该地区在早寒武世，受西部的康滇古陆和泸定古陆陆源碎屑物质影响，下寒武统水井沱组总体以陆源碎屑岩沉积为主，沉积了以黑色炭质页岩为主，夹灰岩、粉砂质细碎屑岩、石灰岩、白云岩等岩石类型。

以宜昌王家坪剖面为例，该剖面下寒武统水井沱组发育较齐全，保存较完整，出露较好。其与下伏上震旦统灯影组为一平行不整合界面，界面之上为碳质页岩，界面之下为微晶白云岩；与上覆地层呈整合接触。该剖面水井沱组总厚度约为 98.75 m，细分为 11 层，自下而上依次发育着黑色炭质页岩、灰黑色炭质页岩、深灰色灰岩、灰黑色炭质、泥质页岩、深灰色中厚层灰岩、深灰色页岩、深灰色薄层状灰质页岩，颜色普遍较深，炭质含量较高。黑色炭质页岩，底部炭质页岩风化覆盖较为严重，上部出露较好，其中炭质页岩中夹粉砂质泥岩透镜体(图 2)。

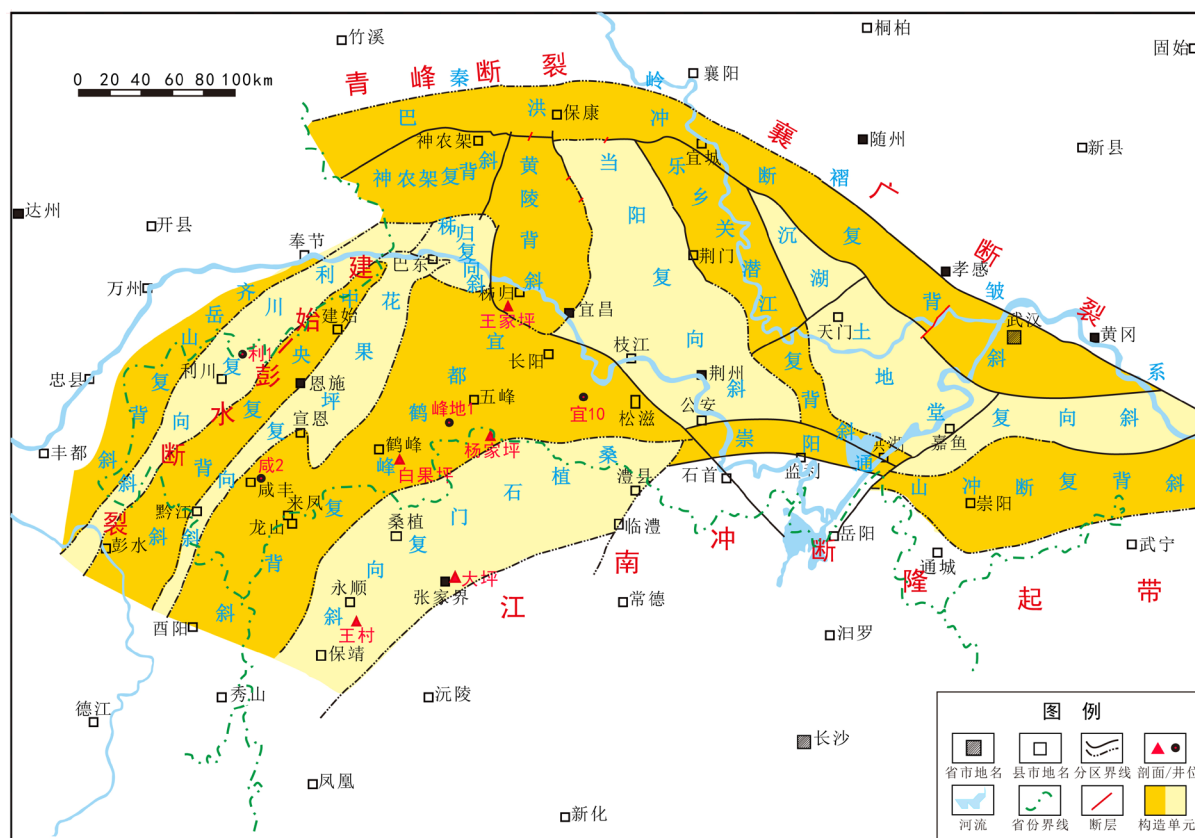


Figure 1. Tectonic zoning map and location of research region
图 1. 区域构造背景及典型剖面位置

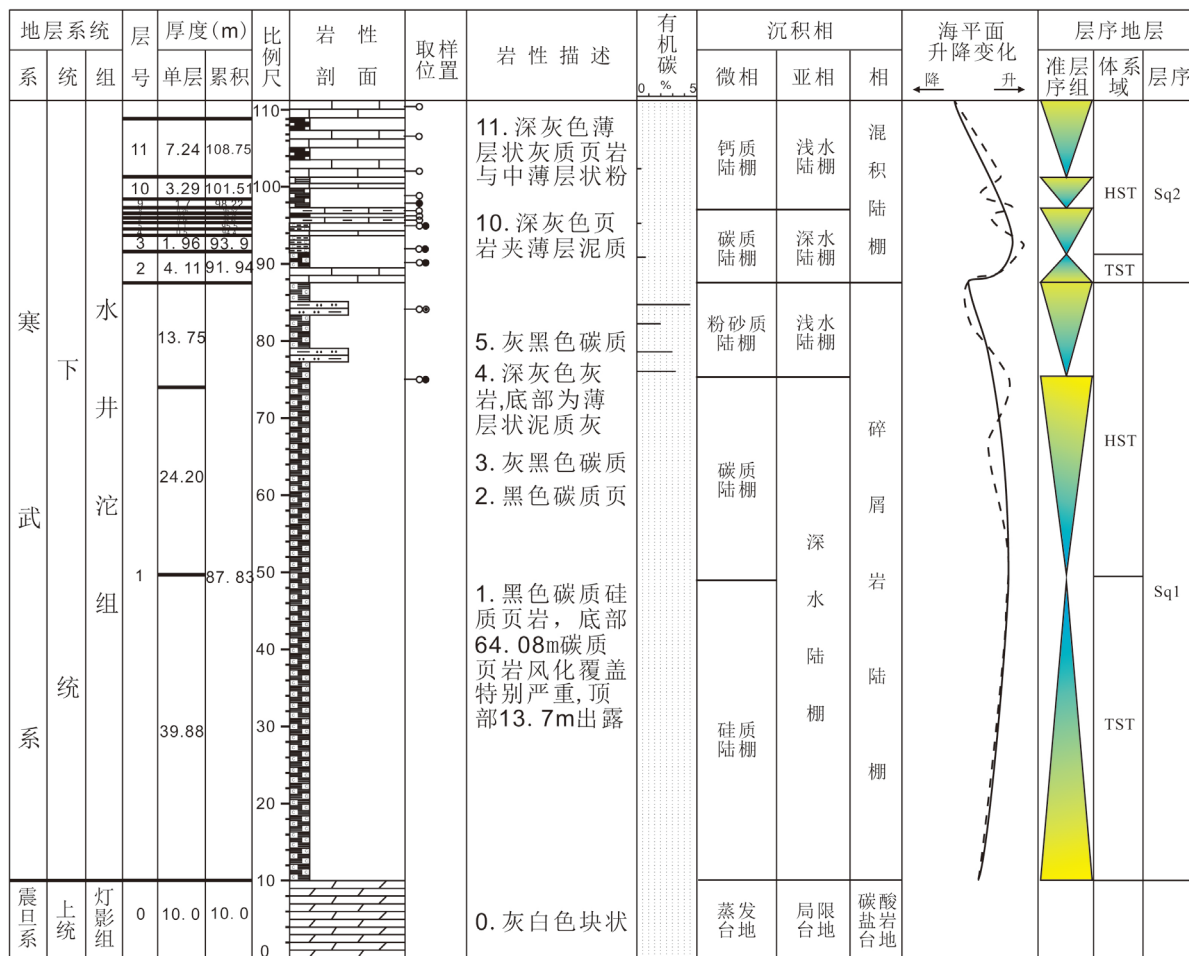


图 例



Figure 2. Comprehensive column of Shuijingtu formation in Wangjiaping outcrop of Yichang
图 2. 宜昌王家坪剖面水井沱组柱状剖面图

宜昌王家坪剖面水井沱组共分为 2 个三级层序。Sq1 相当于水井沱组第 1 层、Sq2 相当于水井沱组第 2 层~第 11 层。沉积相由早期的碎屑岩陆棚相至晚期的混积陆棚相,反映沉积水体总体由深 - 浅的过程(图 2)。

Sq1 以黑色碳质页岩沉积为主,沉积厚度较大。Sq1 早期随海平面上升,形成一套对应剖面深度为距底 0 m~40 m 的黑色碳质页岩,沉积相类型为碎屑岩陆棚相深水陆棚亚相泥质陆棚微相,分为 1 个退积的准层序组。在剖面距底深 40 m~78 m 为 Sq1 晚期沉积,随水体逐渐变浅,出现粉砂质泥岩透镜体,属于碎屑岩陆棚相浅水陆棚亚相砂纸页岩微相沉积。Sq1 高位体系域(HST)共分为 2 个进积的准层序组,对应剖面第 1 层的中上部,其厚度分别为 24.2 m 和 13.7 m,岩性分别为碳质页岩及碳质页岩夹粉砂质泥岩透镜体。

Sq2 的海侵体系域(TST)主要岩性为碳质页岩,分为 1 个退积准层序组,沉积厚度较小,反映该时期水体快速上升的过程,对应剖面深度约为距底深 78 m~82 m,属于混积陆棚相浅水陆棚亚相泥质陆棚微相。距底深度约 92~99 m 为 Sq2 的高位体系域(HST),划分为 3 个进积准层序组,其岩性主要为泥灰岩、

泥质灰岩及灰岩，第 1 个准层序组为碳质泥岩到泥质灰岩，对应剖面 3 至 8 层，为泥质陆棚微相。第 2 个准层序组为 9 至 10 层，岩性主要由钙质页岩变为灰岩。第 3 个准层序组为 11 层的钙质页岩与灰岩互层。垂向向上钙质含量变多，反映水体逐渐变浅。对应的沉积相为混积陆棚相浅水陆棚亚相钙质页岩微相。

3. 页岩气储层岩石组构特征及其非均质性

富有机质页岩一般由粘土矿物(如蒙脱石、伊利石、绿泥石、高岭石、伊-蒙混层、绿-蒙混层等)、陆源碎屑矿物(如石英、长石等)、自生非粘土矿物(如方解石、白云石、黄铁矿等)和有机质组成[8]。由于页岩气赋存方式的特殊性，吸附气主要吸附于有机质和粘土矿物表面[9]，游离气主要赋存于孔隙和裂缝中，因此页岩储层研究有别于常规储层，此外由于现阶段关于页岩气储层非均质性研究成果和关于下寒武统页岩含气性资料有限，笔者主要定性的分析页岩储层岩石组构非均质性特征，即页岩储层的物质组成纵横向变化规律。

页岩储层岩石组构特征主要包括储层岩石的矿物成分、结构特征和胶结物特征。在常规砂岩储层中结构和胶结物特征对储层的孔隙度和渗透率有着重要的影响，但泥页岩储层的孔隙度较小，结构较简单，胶结物含量极其有限，故此处主要分析矿物成分对页岩储层的影响。美国页岩气勘探开发证明，页岩储层孔隙度和渗透率都很低，其裂缝体系的发育程度对页岩气的聚集和开发具有重要的影响作用。北美页岩气勘探证明，当泥页岩中粘土矿物含量较少，硅质、碳酸盐岩等矿物较多时，岩石脆性较大，裂缝系统容易形成[10]，如 Barnett 硅质页岩粘土矿物通常小于 50%，石英等含量超过 40%。根据永顺王村、张家界大坪、宜昌王家坪、鹤峰白果坪等野外剖面样品及咸 2 井、宜 10 井等岩屑样品的全岩 X 衍射分析结果：粘土矿物含量 13.8%~20.4%，石英含量 45.2%~86.4%，钾长石含量 0.3%~1.9%，斜长石含量 5.2%~14.6%，铁白云石含量 0.3%~1.7%，黄铁矿含量 0.2%~0.3%，菱铁矿含量 0.1%~0.3%，表明湘鄂西地区水井沱组矿物含量以石英矿物为主，其次为碳酸盐矿物和粘土矿物。粘土矿物含量平均分布在 10.4%~28.9%，平均 18.7%；总体粘土矿物主要有伊/蒙间层(I/S)、伊利石(I)和绿泥石(C)，其中尤以伊利石含量最高。

纵向上页岩段矿物学特征也存在差异，以张家界大坪剖面为例(图 3)：1) 海侵体系域中长英(长石、石英)质矿物 53.8%~58.7%，平均值 56.3%；粘土矿物含量 22.1%~24.9%，平均值 23.5%；碳酸盐矿物含量 16.8%~23.9%，平均值 20.3%；2) 高位体系域中长英质矿物 34.5%~56.4%，平均值 44.6%；粘土矿物含量 21.5%~29.8%，平均值 26.4%；碳酸盐矿物含量 18.4%~43.3%，平均值 29.0%。海侵体系域中长英质矿物含量相对较高，碳酸盐矿物和粘土矿物含量相对较低；高位体系域中碳酸盐矿物和粘土矿物含量相对较高，长英质矿物含量相对较低。通过对张家界大坪剖面水井沱组泥页岩准层序组物质组成分析表明，在 Sq1 的海侵体系域中退积的准层序组中岩性由碳质页岩变为硅质页岩，其硅质含量上升，碳酸盐矿物含量下降(图 4(a))，在 Sq2 的高位体系域中第 1、2 个进积的准层序组中碳酸盐矿物含量上升(图 4(b))。

通过对咸 2 井、王村、白果坪、宜 10 井等井的横向对比发现，咸 2 井和王村剖面粘土矿物和长英质矿物含量相对较高，而白果坪和宜 10 井数据表明其碳酸盐岩矿物相对含量较高于西部地区，这一特征与相带展布特征匹配较好(图 5)。

4. 页岩气储层非均质性形成机制探讨

富有机质页岩储层非均质是绝对的，且造成页岩储层非均质性的原因较多，总体上可归纳为两个方面，即沉积作用和沉积后作用，其中影响沉积作用的包括海平面升降变化、物源供给及生物作用等因素，沉积后作用主要包括成岩作用、构造作用等因素，以上这些因素共同控制着页岩储层的非均质性。

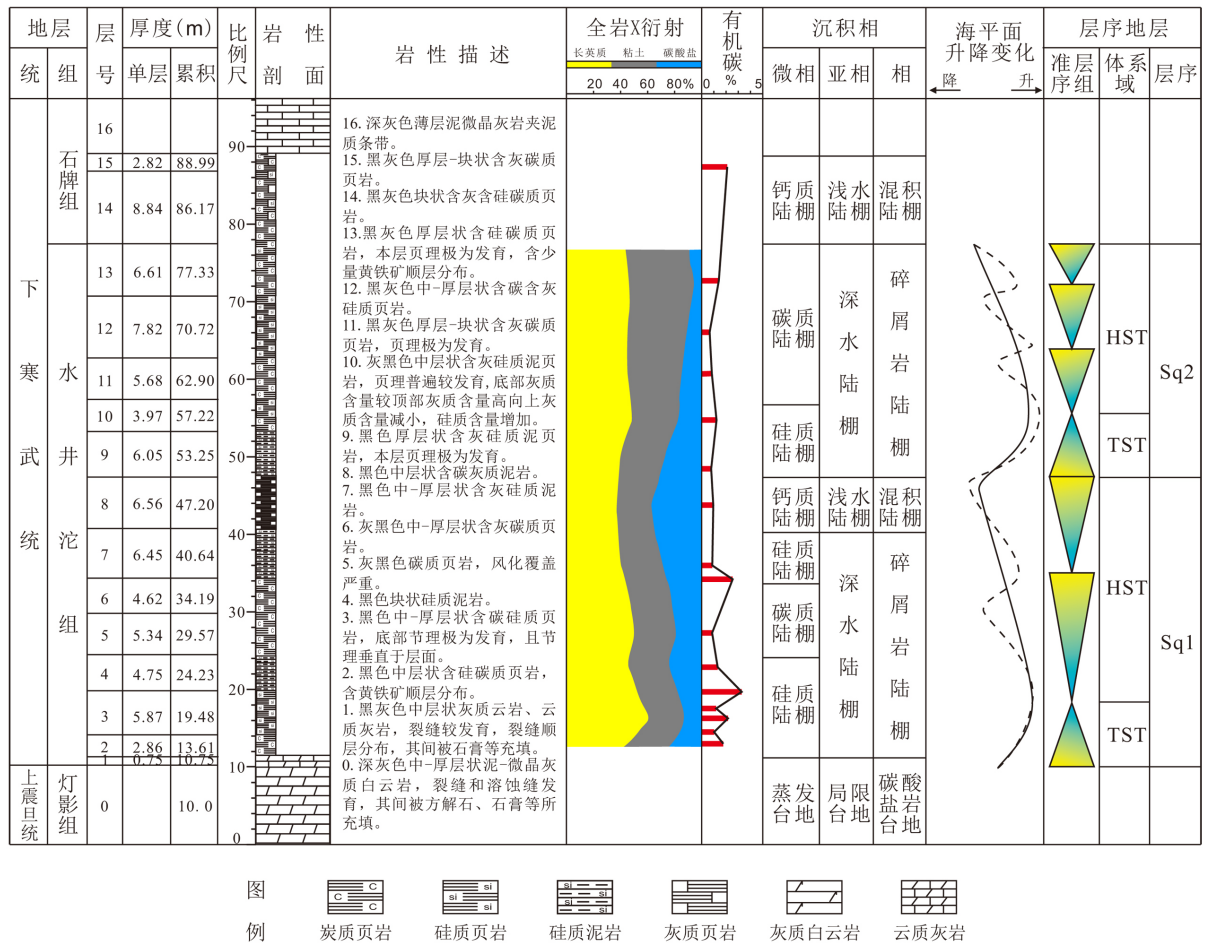


Figure 3. Comprehensive column of Shuijingtuo Formation in Daping outcrop of Zhangjiajie

图 3. 张家界大坪剖面水井沱组综合柱状图

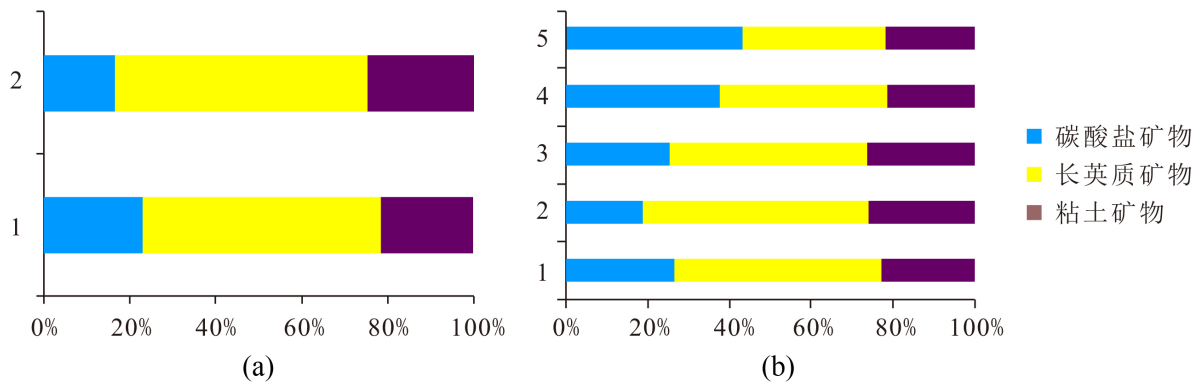


Figure 4. Mineral constituent of retrograding Parasequence set (a) and prograding Parasequence set (b) in Shuijingtuo Formation, in Daping outcrop, Zhangjiajie

图 4. 张家界大坪剖面水井沱组退积(a)、进积型(b)准层序组中矿物组成特征

4.1. 沉积作用对储层非均质性的影响

海平面的升降变化与泥页岩沉积密切相关。有人认为海相泥页岩沉积于深水环境, 海平面升降变化对其沉积物的影响甚小。其实不然, 通过对国内外海相泥页岩沉积调查研究发现, 泥页岩矿物的组成与

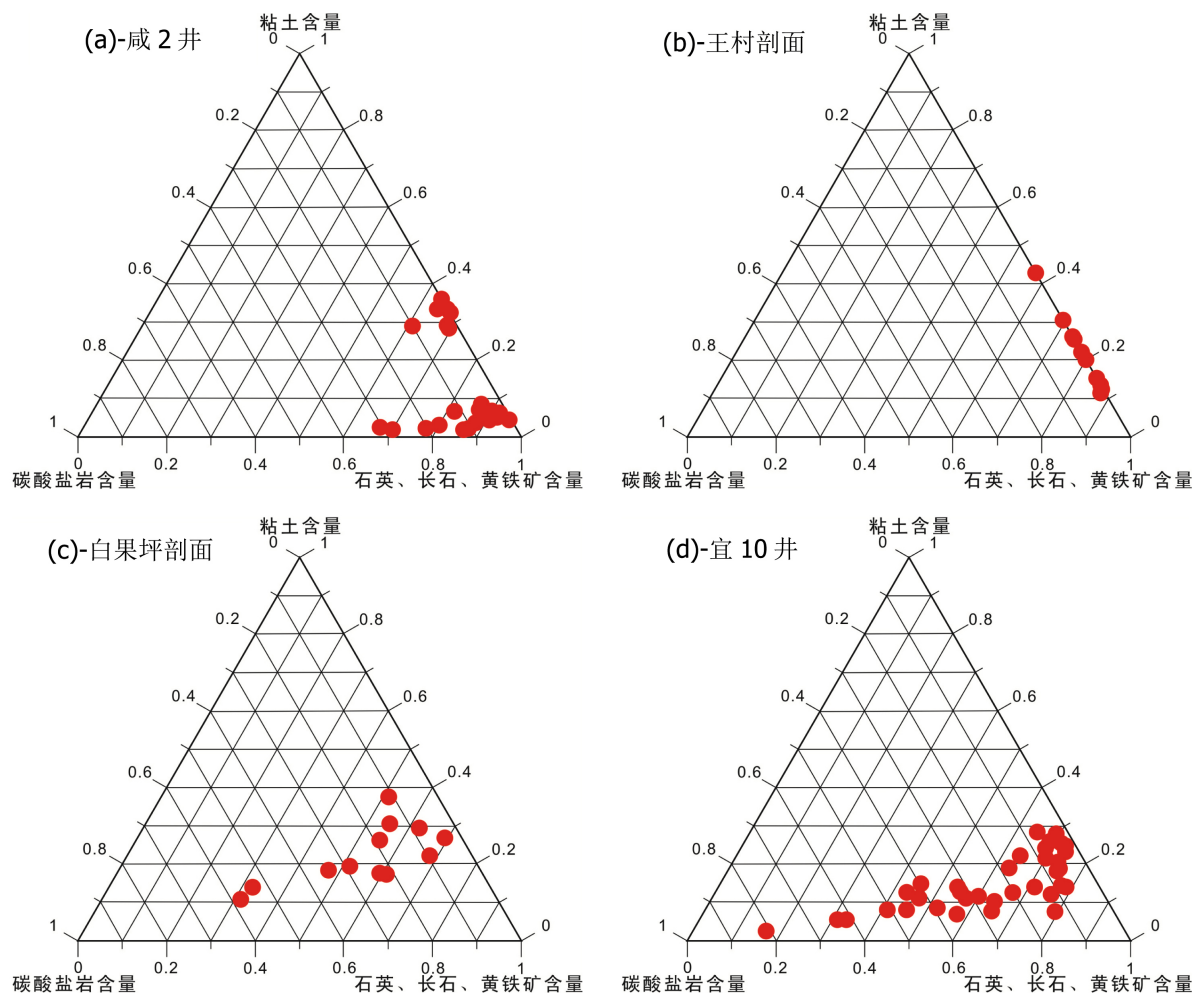


Figure 5. Triangle map of Mineral composition in shale by Single well

图 5. 水井沱组单剖面(井)泥页岩矿物组成三角图

海平面升降变化有着密切的联系。在海平面下降至陆棚坡折带以下时，主要发育低位体系域沉积，深水区主要发育泥页岩夹斜坡扇、海底扇的粗碎屑沉积。在海平面上升时期，主要发育海侵体系域和早期高位体系域，盆地处于非补偿阶段，主要沉积硅质、碳质泥页岩；较浅水地区沉积碳酸盐岩与陆源碎屑混合的钙质泥页岩。当海平面上升到凝缩层完成以后的高位体系域形成期，陆源碎屑充足时沉积进积型粉砂质页岩，陆源碎屑不足时沉积加积到进积型钙质页岩。

物源供给是碎屑岩沉积的物质基础，物源所提供沉积物的类型及丰富程度对沉积物类型及特征具有重要的影响。早寒武世水井沱期，湘鄂西地区远离西部的康滇古陆物源区，物源不足，较粗的陆源碎屑难以运移到研究区，沉积物主要为原地沉积的硅质页岩、碳质页岩等。研究区东部“鄂州古隆起”的抬升，江汉平原区沉积水体相对较浅，靠近“鄂中古隆起”地区发育碳酸盐以及钙质页岩。

生物作用对硅质页岩、碳质页岩的分布有着重要作用。宜昌长阳地区水井沱组黑色页岩中保存有丰富的蠕虫、大型双瓣壳节肢动物、宏体藻类、软舌螺类和可疑的海绵类等化石，由于宏体藻类以及底栖的海绵类和软舌螺化石存在，说明其沉积环境为水体较深有氧环境，沉积物主要为泥页岩。但是由于页岩沉积时具有较高水分，在快速沉积背景下将死亡生物躯体埋藏，伴随着沉积的不断进行，沉积水与外界水体交换量逐渐减少，加之生物腐烂产生的 H_2S 气体，形成了沉积物内部的强还原环境，有机质得

以保存,最终形成黑色碳质页岩[11][12]。寒武系底部的黑色页岩的碳质体中还发现有大量硅质体,系海绵骨针化石,可能为深海热(液)水环境重要的生物类型,是部分硅质页岩的重要成因[13]。

4.2. 沉积后作用对储层非均质性的影响

由于区域成岩环境的差异,前期相同的页岩储层经过不同成岩环境改造后,其每个成岩阶段的粘土矿物组分比例各不相同,造成了页岩储层纵横向上的非均质性。如粘土矿物在埋深增加时,为了适应温度升高、压力升高的环境,会发生相应的转化。其中在成岩早期阶段以蒙脱石含量较多,同时可以共存有伊利石、高岭石、绿泥石,并且在混层矿物中蒙脱石所占的比率较多;中成岩阶段蒙脱石多转化为伊利石或伊/蒙混层,最终以蒙脱石的消失为界限,早期是伊蒙混层矿物含量较多,伊利石含量较少,同时应共存有高岭石、绿泥石,此时混层矿物中的蒙脱石所占比率已经逐渐减少;随着高岭石的消失,中成岩阶段也进入了晚期,此时共存的粘土矿物应为伊蒙混层、伊利石、绿泥石等,且伊蒙混层的相对含量要少于伊利石,此时伊蒙混层中主要以伊利石为主;晚期成岩阶段以伊蒙混层的消失为界,伊利石大量出现,与绿泥石,混层矿物中蒙脱石比例也较少。在埋藏条件下,有机质的成熟、演化过程中产生的大量有机酸对页岩储层中的长石、碳酸盐矿物等也会产生不同程度的溶蚀作用。

构造作用也可能对页岩储层非均质性产生影响。如构造作用造成的局部泥页岩的抬升和下降控制着泥页岩热演化作用,水井沱组在黄陵背斜、宜都-鹤峰复背斜地区富有机质页岩遭受抬升,其泥页岩的热演化程度较弱,而其余地区也演化程度较强;构造作用是泥页岩内部产生裂缝的主要因素,也控制着地层水的流动与停滞,区内湘鄂西地区构造格局为复向斜区,断裂主要为小断裂且地层平缓,一般控制着地层水上下窜层流动,总体是顺层流动,因此对页岩储层含气性保存较好。

除此以外,水文地质作用对于页岩储层的含气性非均质性、保存条件等也有着重要的影响,限于目前研究程度较低尚待进一步深化认识。

5. 结论

1) 鄂西地区水井沱组中深水陆棚主要发育碳质页岩和硅质页岩,为有利页岩气储层发育的相带。层序地层的研究对于页岩气储层非均质性分析具有重要意义,水井沱组可划分为2个三级层序,富有机质页岩主要发育于Sq1和Sq2的海侵体系域中。

2) 层序地层格架内水井沱组页岩储层特征存在着较大差异,从宏观尺度看海侵体系域主要发育薄层状硅质、碳质页岩,而高位体系域中主要发育薄-中层钙质、粉砂质泥页岩;从微观尺度分析表明海侵体系域中页岩储层具有粘土矿物和有机碳含量向上逐渐升高,长英质(碳酸盐岩矿物)含量降低的特征;高位体系域中页岩储层变化特征与海侵体系域中恰恰相反。页岩气储层特征分布的非均质性可能受到沉积作用和沉积后作用的共同控制,沉积时期海平面升降变化、物源供给以及生物作用控制着泥页岩的物质组成,沉积后作用中泥页岩成岩作用、构造运动以及水文地质改造了泥页岩物质组成、储集空间及含气性特征。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(项目编号:20150020);湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目“湘鄂西地区下寒武统牛蹄塘组页岩气储层非均质性及成因机理”。

参考文献 (References)

- [1] 郑军卫,孙德强,李小燕,等.页岩气勘探开发技术进展[J].天然气地球科学,2011,22(3):511-517.
- [2] 侯读杰,包书景,毛小平,等.页岩气资源潜力评价的几个关键问题讨论方[J].地球科学与环境学报,2012,

34(3): 7-16.

- [3] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 775-782.
- [4] 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]. 地学前缘, 2013, 20(3): 247-253.
- [5] 江凯禧, 彭丽, 何文祥, 等. 页岩气储层非均质性研究——以四川盆地寒武统筇竹寺组为例[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(8): 47-54.
- [6] 陈尚斌, 秦勇, 王阳, 等. 中上扬子区海相页岩气储层孔隙结构非均质性特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(8): 1455-1463.
- [7] Slatt, R.M. (2012) Comparative Sequence Stratigraphy and Organic Geochemistry of Gas Shales Commonality or Coincidence? *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **8**, 68-84. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2012.01.008>
- [8] 龙鹏宇, 张金川, 李玉喜, 等. 重庆及其周缘地区下古生界页岩气成藏条件及有利区预测[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 221-232.
- [9] Ross, D.J.K. and Bustin, R.M. (2007) Shale Gas Potential of the Lower Jurassic Gordondale Member Northeastern British Columbia, Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, **55**, 51-75. <https://doi.org/10.2113/gscpgbull.55.1.51>
- [10] 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 27-32.
- [11] 赵明胜, 王约, 田景春, 等. 从生物化石组合特征剖析黑色页岩的沉积环境——以鄂西长阳地区寒武系牛蹄塘组为例[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1484-1492.
- [12] 陈孝红, 汪啸风. 湘西地区晚震旦世 - 早寒武世黑色岩系的生物和有机质及其成矿作用[J]. 华南地质与矿产, 2000(1): 16-23.
- [13] 魏怀瑞. 贵州早寒武世黑色岩系热(液)水沉积特征及热水生物群研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2008.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org