

Laminae Growth Characteristic within the Lower Silurian Longmaxi Marine Shale in the Southeast Sichuan Basin

Bowei Yang¹, Min Xiong¹, Lei Chen¹, Dong Huang^{2,3,4}

¹School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

²Shale Gas Evaluation and Exploitation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Sichuan

³Technology Innovation Center of Shale Gas Exploration and Development in Complex Structural Areas, MNR, Chengdu Sichuan

⁴Sichuan Keyuan Testing Center of Engineering Technology, Chengdu Sichuan

Email: 194448342@qq.com

Received: Jun. 19th, 2020; accepted: Jul. 1st, 2020; published: Jul. 8th, 2020

Abstract

As the most characteristic sedimentary structure of shale, the laminae are widely developed in shale strata, which have an important impact on shale reservoirs. However, there are few studies on laminae in the marine shale. Based on drilling core, thin section identification and scanning electron microscope (SEM), the characteristics of laminae within the Lower Silurian Longmaxi marine shale in the Southeast Sichuan Basin were investigated. According to the major mineral composition, five types of laminae are identified: clay laminae, quartz laminae, carbonate laminae, mica laminae and pyrite laminae. Based on the occurrence, parallel laminae, horizontal laminae, wavy laminae and twill laminae can be identified. Combining the laminae characteristics, the sedimentary structure and the contact relationship of the minerals, three kinds of dual laminae combination are identified: clay laminae-quartz laminae, clay laminae-carbonate laminae and the quartz laminae-carbonate laminae. In addition, there is a ternary type of laminae, which is quartz laminae-clay laminae-carbonate laminae. In general, the clay and quartz laminae were mainly developed in the study area. The laminae development shows a periodic change of high-low-high development frequency from bottom to the top, reflecting the change of the sedimentary environment in different periods.

Keywords

Marine Shale, Laminae, The Lower Silurian Longmaxi

川东南龙马溪组海相页岩纹层发育特征

杨博伟¹, 熊敏¹, 陈雷¹, 黄冬^{2,3,4}

¹西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都

²页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川 成都

³自然资源部复杂构造区页岩气勘探开发工程技术创新中心, 四川 成都

⁴四川省科源工程技术测试中心, 四川 成都

Email: 194448342@qq.com

收稿日期: 2020年6月19日; 录用日期: 2020年7月1日; 发布日期: 2020年7月8日

摘要

纹层作为页岩最富特色的沉积构造, 广泛发育于页岩层系中, 对页岩储层有着重要的影响, 但目前针对海相页岩纹层的研究较少。本文以川东南龙马溪组海相页岩为研究对象, 通过岩心、薄片鉴定和扫描电镜等分析, 对其纹层发育特征进行研究。结果表明: 研究区龙马溪组一段页岩纹层按矿物组划分, 可识别出粘土纹层、石英纹层、碳酸盐岩纹层、云母纹层和黄铁矿纹层5类, 按形态可识别出平行纹层、水平纹层、波状纹层以及斜纹层。综合纹层发育特征、沉积构造特征及矿物接触关系, 可识别出粘土纹层-石英纹层互层、粘土纹层-碳酸盐互层、石英纹层-碳酸盐互层的三种二元结构类型, 以及石英纹层-粘土纹层-碳酸盐岩纹层互层的三元结构类型。综合来看, 研究区主要发育粘土纹层和石英纹层, 并且纹层发育呈现出自下而上出现频率高-低-高的周期性变化, 反映出不同时期的沉积环境具有变化特征。

关键词

海相页岩, 纹层, 龙马溪组

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

纹层又称细层, 是沉积物或沉积岩中可分辨率的最小或最薄的原始沉积, 是组成层理的最小单元。对页岩纹层发育特征进行研究, 有利于弄清楚其微观结构与储集性能, 为勘探开发提供指导。对于纹层, 不少学者从不同的方面已对其做过详细的研究。在成因机制方面, 目前提出了藻类季节性勃发、陆源季节性输入、生物化学作用以及机械沉积作用等相关理论[1] [2] [3], 并且认为纹层的形成与气候、水体的性质也有一定的关系[4]。在纹层发育特征描述方面, 早期学者仅仅关注其沉积特征的研究, 认为其只是简单的水平纹层。后期对纹层的研究逐渐深入后, 更多集中于纹层矿物组成、粒度变化、纹层组合及厚度变化的研究[5]-[11]。刘强等(2004)结合纹层发育过程和组分, 将页岩纹层划分为碎屑纹层、生物成因纹层和化学成因纹层[11]; 王超等(2019)依据矿物组成和沉积构造特征, 将焦石坝地区五峰组-龙马溪组海相页岩纹层划分为硅质纹层、钙质纹层、粘土质纹层3类以及水平纹层、杂积纹层、粒序纹层、侵蚀交错纹层、楔形交错纹层5类纹层沉积构造[5]; 除此之外, 在研究手段方面, 大都以露头、岩心及薄片描述为基础, 通过各种实验手段和方法开展综合分析[11] [12]。

中国页岩气储量位居世界第一, 勘探前景巨大。但是目前中国页岩气勘探处于起步阶段, 迫切需要在页岩气勘探中取得进一步的突破。地质理论的进步是中国页岩气勘探突破的关键, 而明确页岩气富集

规律及其控制因素是找寻页岩气甜点区的关键[13] [14] [15]。纹层作为页岩最富特色的沉积构造广泛发育于页岩层系中。纹层的发育直接导致页岩非均质性变化明显，并进一步对页岩生烃、页岩储集性以及页岩含气性等产生影响[16]。基于此，本文对川东南龙马溪组海相页岩纹层发育特征进行研究。

2. 区域地质背景

四川盆地位于四川省东部及重庆市，西抵龙门山，东至齐岳山，北至米仓山-大巴山，南至大凉山-娄山，是一个在上扬子克拉通的基础上发展形成起来的叠合盆地(图 1)。四川盆地以华蓥山和龙泉山两个背斜带为界，华蓥山断裂带以东分为川东高褶皱带和川东南斜坡高陡褶皱带，龙泉山以西为川西坳陷低陡构造区[17] (赵建华等, 2016)。研究区位于川东南地区，构造上位于川东高陡褶皱带(图 1)。

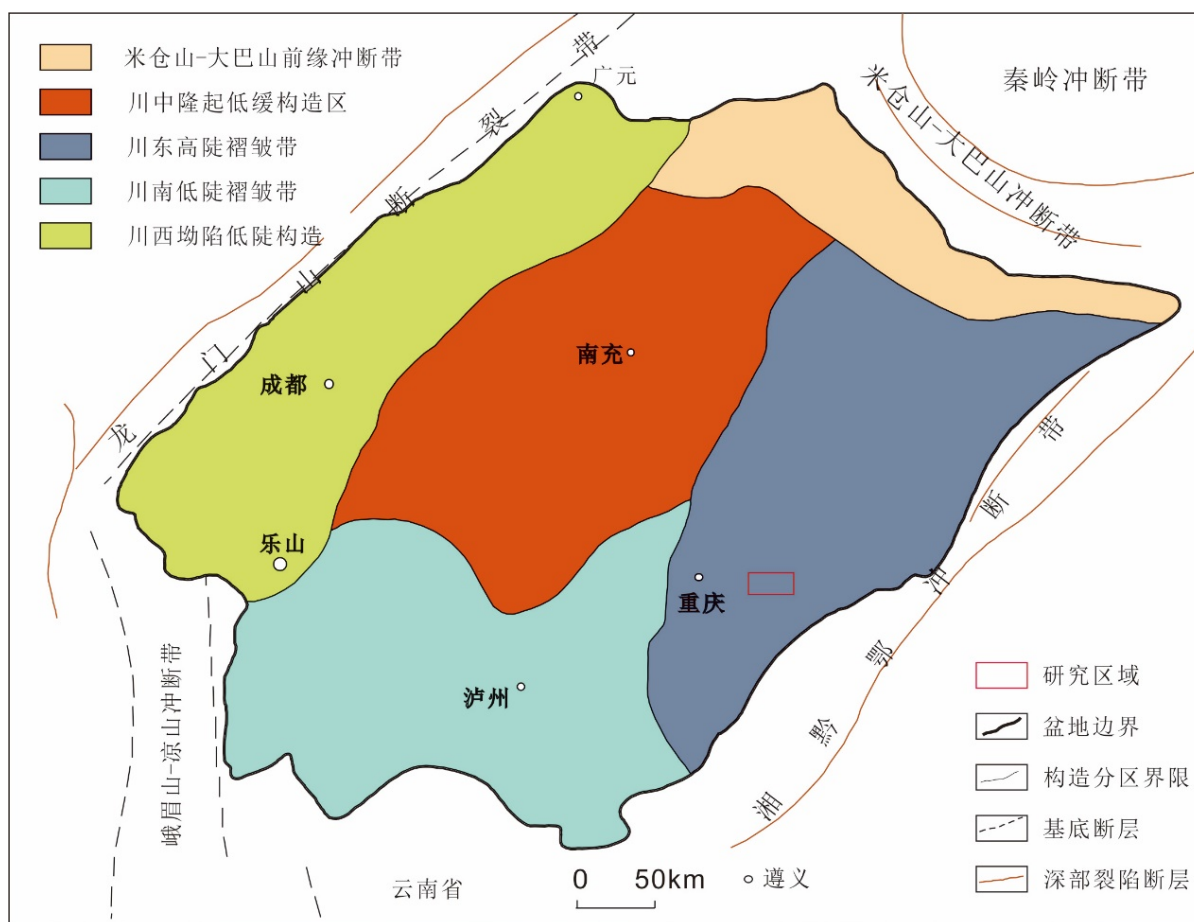


Figure 1. A regional geological map of Sichuan Basin [17]

图 1. 四川盆地地区地质概况图[17]

3. 实验分析方法

开展研究区海相页岩纹层发育特征研究，笔者对川东南龙马溪组海相页岩进行系统采样，取样层段为五峰组-龙马溪组，同时制作相应的岩石薄片，本次研究选取龙马溪组 101~243 号薄片。通过偏光显微镜和扫描电镜等实验分析，分析样品尺寸为 25 mm × 10 mm，所有样品测试均在西南石油大学地球科学与技术学院油气地质与勘探国家级实验教学示范中心完成。分析测试过程中以川东南龙马溪组海相页岩为研究对象，利用 L30 环境扫描电子显微镜、BX51TRF 多视域显微镜等实验仪器，获得海相页岩纹层

的矿物组分、结构、产状、沉积构造、组合样式等发育特征等信息，并进行相关表征，据此识别出研究区龙马溪组海相页岩纹层类型及其特征，在制备观察样品薄片时，严格按照实验标准，在实验过程中排除样品、人为操作、环境等因素的影响，保证本次实验分析的真实性、准确性。

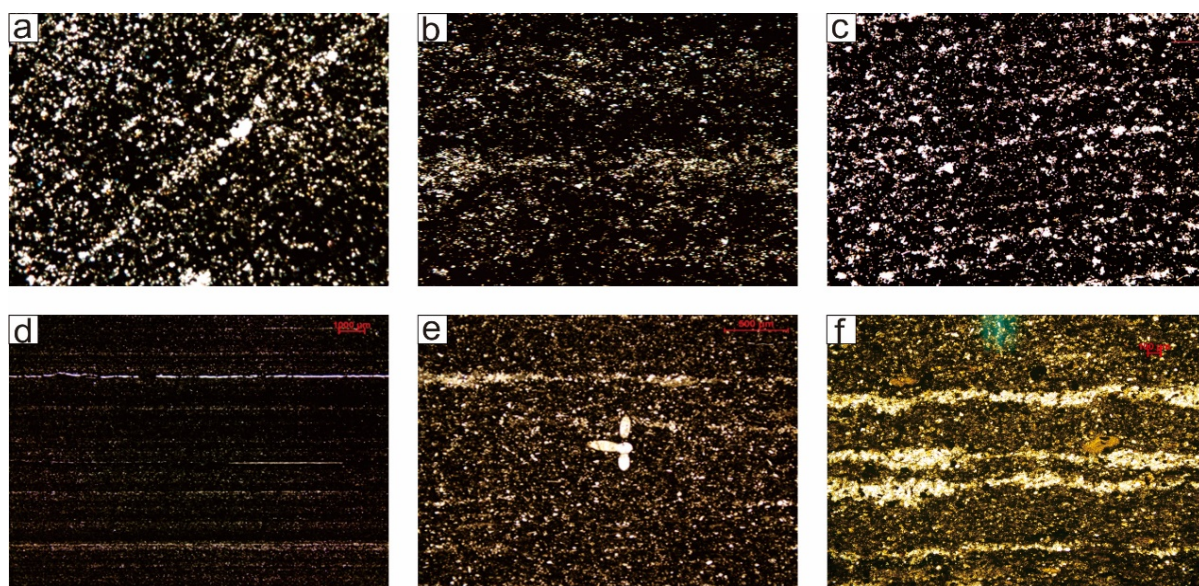
4. 纹层发育类型及其特征

4.1. 页岩纹层类型

通过对川东南龙马溪组页岩进行镜下观察，基于矿物成分发现研究发育 5 种纹层类型：粘土纹层、石英纹层、碳酸盐岩纹层、云母纹层和黄铁矿纹层。

4.1.1. 石英纹层

该纹层组成以石英颗粒为主，纹层通常较薄，约为 0.03~0.2 mm，可见少量较粗石英纹层，厚度约 0.3 mm (图 2)。石英颗粒呈次棱角 - 次原状，分选较好，颗粒周围多被粘土、炭质侵染，较粘土纹层中颗粒大(图 2)。部分纹层中可见较大石英颗粒，结晶程度高，具波状消光，可能为强水动力环境沉积或重结晶形成。石英纹层分布较广，纹层产状以平行纹层为主，同时具波状纹层、交错纹层、断续状纹层、透镜状及厚度横向变化的纹层。



(a) 石英纹层厚度横向变化，正交偏光；(b) 石英纹层，正交偏光；(c) 斜石英纹层，正交偏光；(d) 平行石英纹层，正交偏光；(e) 石英透镜体，正交偏光；(f) 波状石英纹层，单偏光。

Figure 2. Characteristics of quartz laminae under a polarizing microscope

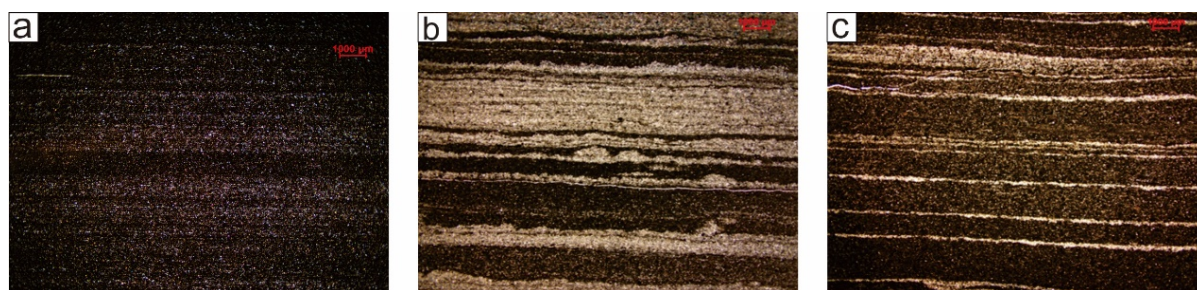
图 2. 石英纹层偏光显微镜下微观特征

4.1.2. 粘土纹层

粘土纹层镜下呈暗色，主要为粘土和少量细粉砂形成的泥内碎屑，内部粘土矿物颗粒小，不可辨别。根据有机质含量可将粘土纹层分为富有机质粘土纹层和贫有机质粘土纹层，且在镜下表现为随有机质含量增加颜色变深(图 3)。薄片粘土质纹层横向连续性差，厚度通常大，单层厚度为 0.3~3 mm，纹层边界较清晰。粘土质纹层在研究区普遍发育，以水平纹层，平行纹层为主。

4.1.3. 碳酸盐岩纹层

镜下薄片观察矿物成分以泥晶碳酸盐为主，正交偏光下呈高级白干涉色，为浅色纹层，见生物碎屑

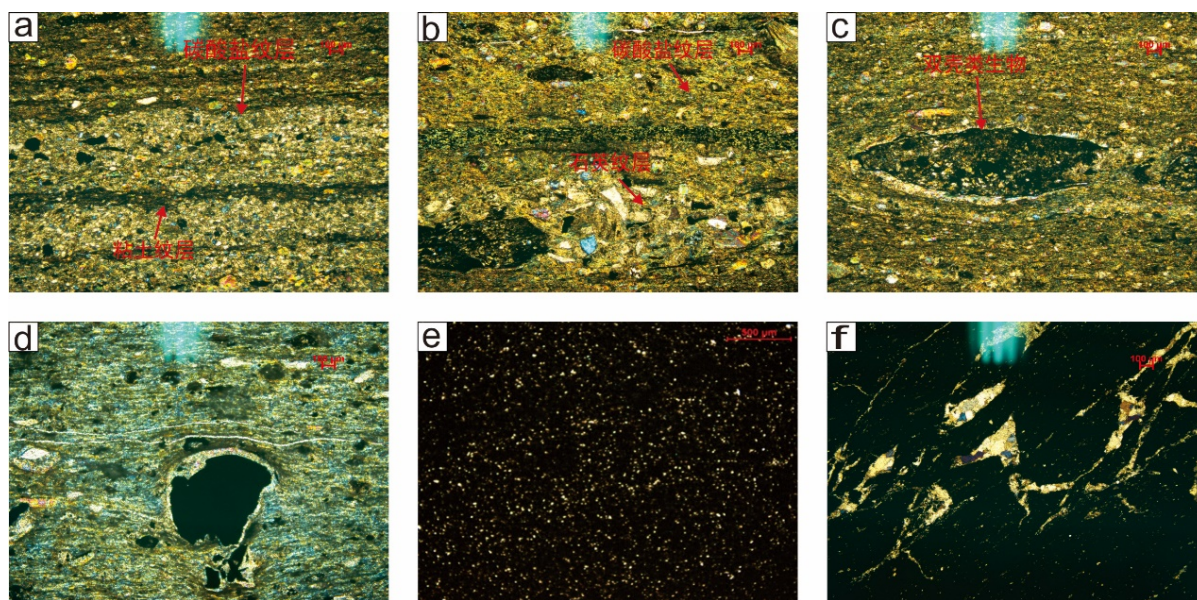


(a) 平行状富有机质粘土纹层，正交偏光；(b) 平行状贫有机质粘土纹层，单偏光；(c) 平行状粘土纹层，单偏光。

Figure 3. Characteristics of clay laminae under a polarizing microscope

图 3. 粘土纹层偏光显微镜下微观特征

颗粒，以及碳酸盐的重结晶现象，局部也可见石英碎片(图 4)。在不同深度，碳酸盐岩纹层厚度变化较大，约为 0.03~0.5 mm，颗粒较粘土纹层中大，较石英纹层中小或相当，部分纹层中可见较少重结晶形成具较好晶形的菱形白云石晶粒或方解石晶粒。碳酸盐纹层分布较石英纹层及粘土纹层少，碳酸盐含量在不同深度变化较大，主要集中在龙马溪组底部及五峰组，以平行纹层为主，还有斜纹层，波状纹层，及生物附近的变形纹层。



(a) 平行碳酸盐岩纹层，正交偏光；(b) 波状碳酸盐岩纹层，正交偏光；(c) 双壳类生物，外壳被碳酸盐岩充填，正交偏光；(d) 含生物碳酸盐岩纹层，正交偏光；(e) 平行碳酸盐岩纹层，正交偏光；(f) 页岩不规则孔缝充填碳酸盐岩，正交偏光。

Figure 4. Characteristics of carbonate laminae under a polarizing microscope

图 4. 碳酸盐纹层偏光显微镜下微观特征

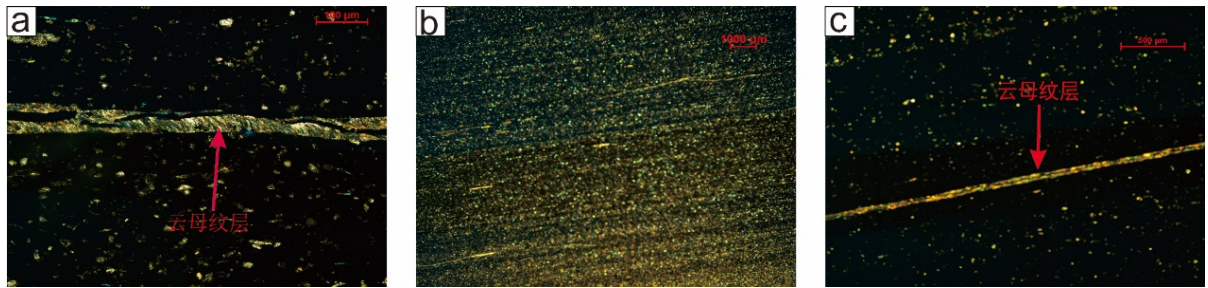
4.1.4. 云母纹层

镜下薄片观察矿物成分以云母颗粒为主，多呈断续状分布于粘土纹层中正交偏光下呈二 - 三级干涉色，绢云母呈橙黄色，常见于石英与粘土纹层互层的纹层页岩中(图 5)。纹层厚度约为 0.2 mm，常呈纤维状，鳞片状，推测为成岩成因。

4.1.5. 黄铁矿纹层

镜下薄片观察黄铁矿颗粒呈不连续、弯曲状分布，厚约 0.2 mm，该纹层在研究区段很少出现。黄铁

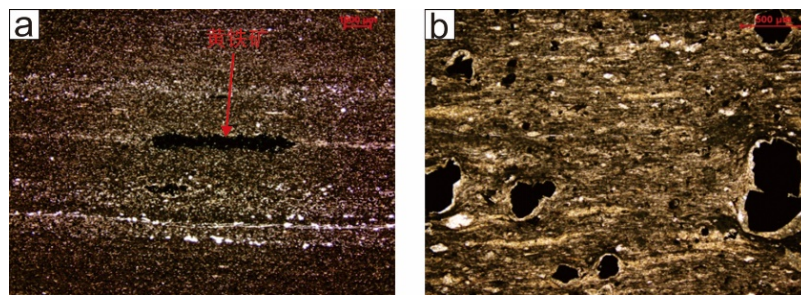
矿颗粒分布不均，直径分布范围 0.08~0.16 mm，内部被石英、粘土所充填(图 6)。



(a) 较厚云母纹层，正交偏光；(b) 云母纹层断续状分布于石英纹层，正交偏光；(c) 云母纹层，正交偏光。

Figure 5. Characteristics of mica laminae under a polarizing microscope

图 5. 云母纹层偏光显微镜下微观特征



(a) 长条状黄铁矿，正交偏光；(b) 黄铁矿结核，正交偏光。

Figure 6. Characteristics of pyrite laminae under a polarizing microscope

图 6. 黄铁矿纹层偏光显微镜下微观特征

4.2. 纹层组合及分布

通过对不同类型纹层特征的总结，发现研究区二元结构比较常见，三元纹层结构仅局部可见，研究区可见发育较好的石英、粘土、碳酸盐岩纹层以含量以 1:1:2 分布的三元结构。二元纹层组合类型主要有：粘土纹层 - 石英纹层互层、粘土纹层 - 碳酸盐互层、石英纹层 - 碳酸盐互层(图 7)。



(a) 粘土纹层与碳酸盐纹层互层；(b) 石英纹层与碳酸盐纹层互层；(c) 粘土纹层与缓波状石英纹层互层。

Figure 7. Characteristics of laminae combination under a polarizing microscope

图 7. 偏光显微镜下纹层组合微观特征

对研究区所采的 243 个样品的薄片进行分析，发现含粘土纹层的薄片共 126 片，占比 43%；含石英纹层的薄片共 109 片，占比 37%；含碳酸纹层的薄片共 30 片，占比 10%；含云母纹层的薄片共 24 片，占比 8%；含黄铁矿纹层的薄片共 4 片，占比最少，为 2%。在此基础上，对其不同类型的二元纹层类型

进行统计,发现粘土纹层-石英纹层互层类型最多,占比86%,粘土纹层-碳酸盐互层类型占比11%,石英纹层-碳酸盐互层类型最少,占比3%(图8)。根据薄片不同类型的纹层发育情况来看,研究区主要发育粘土纹层和石英纹层,且在深度上自下而上纹层发育呈现好-差-好的周期性特征。

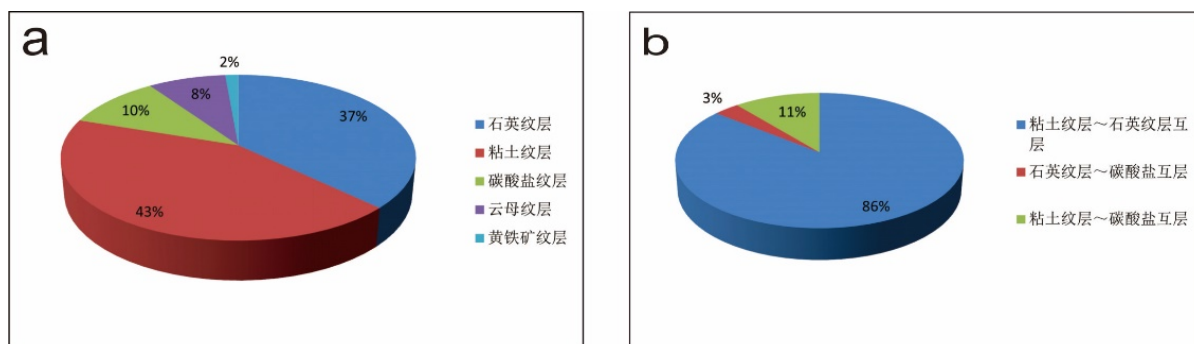


Figure 8. (a) Pie chart for different laminae (b) Pie chart for interlaminae types

图 8. (a)不同纹层占比统计饼状图、(b)纹层互层类型占比统计饼状图

5. 结论

1) 根据纹层矿物组分特征分析,川东南龙马溪组海相页岩纹层发育类型可划分为石英纹层、粘土纹层、碳酸盐纹层、云母纹层及黄铁矿纹层 5 类,其中粘土纹层居多,黄铁矿纹层较少出现。根据纹层的组合结构特征,可将研究区二元纹层结构划分为粘土纹层-石英纹层互层、粘土纹层-碳酸盐互层、石英纹层-碳酸盐互层 3 种互层类型。

2) 研究区纹层类型以粘土纹层及石英纹层为主,发育频率呈现高-低-高的周期性变化。

3) 纹层颗粒粒度反映了沉积期水动力条件的强弱。总体看来,碳酸盐组分为主的纹层中,沉积物相对较细,沉积期水动力相对较弱,多呈平行状、波状,部分生物碎屑附近发育变形纹层;硅质组分为主的纹层中,沉积物颗粒粒度较粗,沉积期水动力相对较强,多发生变形。

基金项目

本次研究受国家自然科学基金委青年科学基金项目《海相页岩纹层多样性及其对页岩储层品质的影响》(编号:41602147)资助。

参考文献

- [1] 刘传联,徐金鲤,汪品先.藻类勃发-湖相油源岩形成的一种重要机制[J].地质评论,2001,47(2):207-209.
- [2] 王冠民,钟健华.湖泊纹层的沉积机理研究评述与展望[J].岩石矿物学杂志,2004,23(1):43-48.
- [3] 伊海生,时志强,杨伟,等.湖相叠层石纹层生长节律记录的天文周期信号[J].沉积学报,2010,28(3):405-411.
- [4] 柳波,吕延防,孟元林,等.湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义——以三塘湖盆地马郎凹陷二叠系芦草沟组为例[J].石油勘探与开发,2015,42(5):1-10.
- [5] 王超,张柏桥,舒志国,等.焦石坝地区五峰组-龙马溪组页岩纹层发育特征及其储集意义[J].地球科学,2019,44(3):972-982.
- [6] 王冠民.济阳凹陷古近系页岩的纹层组合及成因分类[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3):666-680.
- [7] 王冠民,钟健华,马在先.湖泊纹层状沉积物的同生期变化研究述评[J].世界地质,2003,22(3):231-236.
- [8] 李婷婷,朱如凯,白斌,等.酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相细粒沉积岩纹层特征及研究意义[J].中国石油勘探,2015,20(1):38-47.
- [9] 施振生,丘振,董大忠,等.四川盆地巫溪 2 井龙马溪组含气页岩细粒沉积纹层特征[J].石油勘探与开发,2018,

45(2): 339-348.

- [10] 覃文圣, 刘建波, 韩宝福, 等. 山东山旺中新世硅藻土的纹层类型及成因[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 267-275.
- [11] 刘强, 游海涛, 刘嘉麒. 湖泊沉积物年纹层的研究方法及其意义[J]. 地四纪研究, 2004, 24(6): 683-694.
- [12] 李勇良, 翟秋敏, 李荣全. 安吉里淖沉积纹层的扫描电镜研究[J]. 电子显微学报, 2001, 20(4): 387-388.
- [13] 董大忠, 邹才能, 杨焯, 等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 107-114.
- [14] 王超, 张柏桥, 舒志国, 等. 四川盆地涪陵地区五峰组 - 龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 485-497.
- [15] 张士万, 孟志勇, 郭战峰, 等. 涪陵地区龙马溪组页岩储层特征及其发育主控因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 16-24.
- [16] 刘国恒, 黄志龙, 姜振学, 等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相页岩纹层发育特征及储集意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 408-417.
- [17] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组 - 龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境[J]. 石油学报, 2016, 37(5): 572-586.