



页岩储层成岩作用及其对储层脆性的影响 ——以渝西地区五峰组—龙马溪组深层页岩为例

赵迪斐, 焦伟伟, 魏源, 张海杰, 李利格, 郭英海, Geoff Wang

引用本文:

赵迪斐, 焦伟伟, 魏源, 等. 页岩储层成岩作用及其对储层脆性的影响 ——以渝西地区五峰组—龙马溪组深层页岩为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(4): 811–825.

ZHAO DiFei, JIAO WeiWei, WEI Yuan, et al. Diagenesis of a Shale Reservoir and Its Influence on Reservoir Brittleness: Taking the deep shale of the Wufeng–Longmaxi Formation in western Chongqing as an example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(4): 811–825.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

层序地层格架及其对页岩储层发育特征的影响——以四川盆地龙马溪组页岩为例

Sequence Stratigraphic Framework and Its Influence on the Development Characteristics of Shale Reservoirs: Taking the Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin as an example

沉积学报. 2020, 38(2): 379–397 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.043>

川东南地区龙马溪组底部海相页岩高GR峰沉积成因探讨

Study on the Sedimentogenesis of the High GR Peak Strata at the Bottom of the Longmaxi Formation in Southeast Sichuan Basin

沉积学报. 2018, 36(6): 1243–1255 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.163>

龙马溪组页岩黄铁矿微观赋孔特征及地质意义

Micro pore Characteristics and Geological Significance of Pyrite in Shale Rocks of Longmaxi Formation

沉积学报. 2018, 36(5): 864–876 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.077>

渝东北田坝地区五峰—龙马溪组页岩矿物学特征及其油气地质意义

Mineralogical Characteristics and Petroleum Geological Significance of Wufeng–Longmaxi Formation Shale in the Tianba Area, Northeast of Chongqing

沉积学报. 2017, 35(4): 772–780 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.04.011>

超压对川东南地区五峰组—龙马溪组页岩储层影响分析

Analyses of Influences on Shale Reservoirs of Wufeng–Longmaxi Formation by Overpressure in the South–eastern Part of Sichuan Basin

沉积学报. 2015, 33(4): 817–827 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.04.020>

文章编号:1000-0550(2021)04-0811-15

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.034

页岩储层成岩作用及其对储层脆性的影响 ——以渝西地区五峰组—龙马溪组深层页岩为例

赵迪斐^{1,2,3,4}, 焦伟伟^{3,4}, 魏源⁵, 张海杰⁶, 李利格⁷, 郭英海⁵, Geoff Wang⁸

1. 中国矿业大学人工智能研究院, 江苏徐州 221008
2. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州 221008
3. 重庆地质矿产研究院页岩气勘探开发国家地方联合工程研究中心, 重庆 401120
4. 重庆地质矿产研究院自然资源部页岩气资源勘查重点实验室, 重庆 401120
5. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116
6. 重庆页岩气勘探开发有限责任公司, 重庆 401121
7. 石家庄经济职业学院信息工程系, 石家庄 050000
8. 昆士兰大学化学工程学院, 昆士兰州布里斯班 4072

摘要 页岩粒度细小、岩石致密、微观非均质性显著,在成岩作用改造下发育形成页岩气储层,成岩作用的研究可以为优质页岩储层发育机理提供依据。以渝西地区綦江观音桥剖面、南川泉浅1井、南川三泉剖面、大足Z-203井等代表性剖面、钻孔为例,通过X射线衍射、氩离子抛光—场发射扫描电镜、能谱、岩石薄片/光片显微观察、有机地球化学测试、力学特征测试等手段,对储层成岩作用及其对储层力学脆性的影响展开系统研究。结果表明,研究区五峰组—龙马溪组页岩物质组分、岩石结构、力学性质存在层段性差异,成岩作用阶段介于晚成岩作用阶段至极低级变质作用阶段之间;储层主要成岩作用类型可以划分为压实作用等物理性成岩作用、矿物溶蚀作用等矿物相关化学性成岩作用和有机质生烃作用等有机质相关化学性成岩作用三类。研究区五峰组—龙马溪组底部存在部分脆性矿物高于80%的超高脆性矿物含量层段,碳质—硅质富层理页岩在特殊储层成岩作用的影响下形成大量自生微晶石英,构成以微晶石英+赋孔有机质为主的显微物相组合,兼具良好的力学脆性与储集能力,而其他层段缺乏持续演化不断形成微晶石英的物质基础。储层成岩作用发生的物质基础、岩石结构、类型、作用强度在层段间的差异,是储层脆性矿物与力学性质差异的关键影响因素,应纳入储层评价与优质储层机理研究的关注范畴。

关键词 页岩储层;成岩作用;力学脆性;五峰组;龙马溪组;渝西地区

第一作者简介 赵迪斐,男,1991年出生,博士,讲师,非常规油气地质学,E-mail: diffidiffi@126.com

中图分类号 TE122 **文献标志码** A

0 引言

我国非常规油气资源储量丰富,开发潜力巨大。目前,四川盆地等地区已经实现页岩气的商业化开发^[1-3],但适用于我国地质特征的页岩气地质理论研

究仍处于起步阶段,在页岩气富集、赋存机理及影响因素等方面还有待进一步完善^[3-4]。我国页岩气实现商业化产能的主要层位为四川盆地晚奥陶系五峰组与早志留系龙马溪组底部页岩,在盆地内分布广泛、厚度适宜且普遍含气^[5-6]。页岩储层物质组分细小,

收稿日期:2020-02-08; 收修改稿日期:2021-02-10

基金项目: 重庆页岩气公司科研专项(CYS-FW-2019-0099);国家自然科学基金(41772130,41804106);刘宝珺地学青年科学基金(DMSMX2019002);教育部中央高校科研业务专项基金(2017CXNL03);重庆市科研机构绩效激励引导专项(cstc2018jxj190002);自然资源部页岩气勘查重点实验室开放基金资助项目(KLSGE-MLG-2020002);中国矿业大学青年科学基金(2021QN1061);大学生创新训练计划国家级创新训练项目(202010290035Z) [Foundation: Research Project of Chongqing Shale Gas Company, No. CYS-FW-2019-0099; National Natural Science Foundation of China, No. 41772130, 41804106; Liu Baojun Scientific Research Foundation for Youth Scholars, No. DMSMX2019002; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2017CXNL03; Achievement Excitation Guiding Project of Chongqing Scientific Research Institutions, No. cstc2018jxj190002; Open Fund of Key Laboratory of Shale Gas Exploration, Ministry of Natural Resources, No. KLSGE-MLG-2020002; Youth Science Fund of China University of Mining & Technology, 2021QN1061; National Innovation Training Program of College Students, No. 202010290035Z]

微观储集空间主要处于纳米尺度,这也造成储层物性的影响因素复杂;该层系小尺度非均质性极强,难以表征^[6-8]。目前,对五峰组—龙马溪组页岩储层沉积—古地理特征、层序格架、储层发育特征的研究已经取得了丰富的进展^[5,9-11]。在储层评价、表征以及机理研究中,页岩孔隙性质、渗透性质及其影响因素是关注的热点。同时,对页岩力学脆性的研究主要聚焦在室内力学性质的表征与评价上,而对其影响因素尤其是储层成岩作用的研究仍然有待进一步深入^[12-15]。

在特定的沉积—古地理背景下沉积形成页岩储层的物质组分,经历漫长的成岩作用改造^[6,14-15]。对五峰组—龙马溪组页岩成岩作用的研究成果仍然相对较少,但成岩作用对储层孔隙性、渗透性、力学脆性等的影响已经得到了一定程度认识。成岩作用是页岩物性最重要的塑造因素以及含气性的核心影响因素之一^[6,14-16],其对储层发育的影响,贯穿了储层生烃、成孔、物性改造的全过程。目前,四川盆地五峰组—龙马溪组页岩层系成岩作用基本类型及阶段已经初步明确,成岩作用对孔隙系统和物性的影响得到了初步认识^[1-3,6,14-16]。页岩储层在开发方式上对可压裂性能要求较高,寻找高脆性的储层区块与层段是页岩储层优选的目标,矿物组分与成岩改造被认为是塑造储层力学性质的主要因素^[6,12,16]。页岩储层成岩作用类型复杂,压实作用、矿物转化作用等储层成岩作用显著影响了储层物质组分、结构、孔隙、物性、含气性特征,目前的阶段研究主要围绕储层成岩作用过程中的物质组分演化、孔隙及物性变化、结构与力学性质变化等方面展开,也对部分页岩储层成岩作用的影响因素开展了研究^[6,8,10,14-16]。随着研究的不断深入,页岩储层成岩作用仍然在以下方面值得进一步深入:1)成岩作用及其影响的观测、描述,还需要结合先进实验手段进一步精细化、量化;2)成岩作用的研究需要进一步结合沉积环境背景下的物质组分及岩石结构差异;3)成岩作用对储层不同物性的影响,需要专门研究。本文综合X射线衍射、氩离子抛光—场发射扫描电镜、能谱、岩石薄片/光片显微观察、有机地球化学测试以及岩石力学测试手段,对页岩成岩作用展开研究,并讨论其对页岩储层力学脆性的影响。

1 测试样品与研究手段

四川盆地内五峰组—龙马溪组页岩储层广泛分布,构成一套含笔石黑色页岩层系,但五峰组与龙马溪组页岩形成的沉积环境存在差异。受“三隆夹一坳”的古地理格局限制,五峰组页岩沉积期水体相对滞留,对应滞留海盆环境^[17-18]。五峰组顶部观音桥段沉积期在全球冰期等因素的影响下水体迅速变浅,沉积以泥质灰岩、灰质泥页岩为主要岩性的观音桥段沉积物^[17]。至龙马溪组沉积期,随着冰期结束以及构造运动影响,龙马溪组页岩沉积初期水体迅速加深,在研究区内以深水陆棚环境沉积为主,沉积了典型的富笔石水平层理页岩,龙马溪组页岩向上水体深度逐渐减小,沉积环境过渡为半深水—浅水陆棚环境^[19]。

研究区位于渝西地区,大地构造位置上跨四川盆地川南低陡褶皱带北部、川东高陡褶皱带南部以及川中低平褶皱带东南部(图1)。相比于川东地区(如涪陵焦石坝地区)、川南地区(如长宁—威远地区),渝西地区的页岩气地质研究仍然较少,研究区内五峰组—龙马溪组页岩地层稳定发育^[2],但埋深相对较大,研究程度相对较低。

对观音桥剖面、三泉剖面、泉浅1井、大足Z-203井等研究区代表性剖面或钻孔进行了系统的岩心编录与手标本研究,在此基础上,遴选各层段代表性样品制作岩石薄片、光片,系统观察岩石微观结构、沉积构造特征,找出矿物组分分异、岩石结构的层段性差异;对代表性样品展开X射线衍射、氩离子抛光-场发射扫描电镜、能谱、岩石薄片/光片显微观察、有机质特征测试,基于测试结果对储层成岩作用展开研究,并结合应力测试等手段,分析储层成岩作用对储层力学脆性的影响,为力学脆性角度的页岩储层优选提供科学支撑。

X射线衍射测试于中国矿业大学现代分析测试中心完成,使用德国D8 ADVANCE X射线衍射仪,测试前对样品进行预处理,研磨至细粉过325目筛,测试条件为电压40 kV,电流30 mA,阳极靶材料为Cu靶、K α 辐射,测角仪半径为250 mm,测试后使用Jade分析软件进行矿物组分半定量。场发射扫描电镜在哈尔滨工业大学完成,使用S-4700冷场发射扫描电子显微镜观测,最小观测尺度可达8~10 nm,测试前以Helios Nanolab 600i聚焦离子电子双束显微镜对样品进行氦离子抛光处理,在各样品获取面积

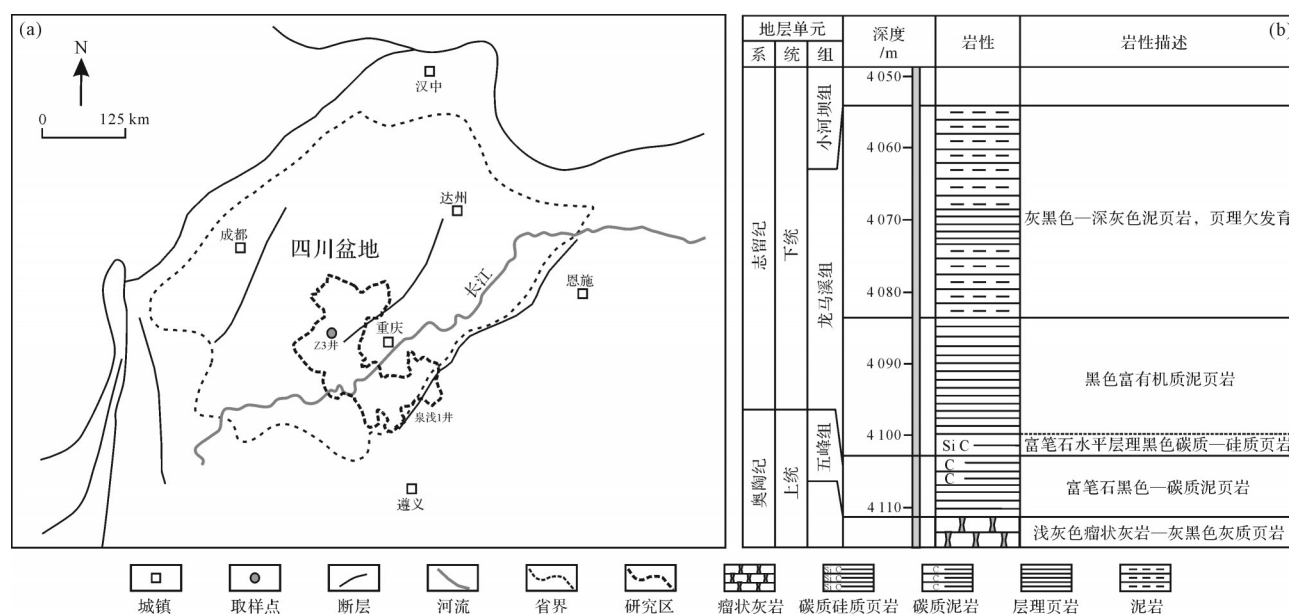


图1 研究区位置、主要取样点及代表性钻孔(Z-203井)

Fig.1 Study area, major sampling locations, and representative well (Z-203)

约2 mm²的假高斯状观测面,进行典型视域的矿物、微观结构、物质空间分布特征观测。单轴应力测试等岩石力学测试于煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室以及西南石油大学完成,选取各组段样品,均为垂向取芯,分别加工成直径2.54 cm,长度6.00 cm,端面磨平,使用GCTS RTR-2000岩石力学测试实验设备,进行单轴抗压强度实验。

2 页岩储层岩石学特征

2.1 页岩物质组分特征

剖面观测与手标本研究显示,研究区五峰组页岩储层主要岩性为黑色碳质页岩、硅质页岩(图2a),含灰质泥岩、粉砂质泥页岩等,富含笔石,水平层理较为发育。五峰组内岩性变化较为显著,碳质页岩、碳质—硅质页岩、粉砂质泥页岩等相间分布(图2b),观音桥段岩性主要为泥质灰岩—灰质泥页岩,富含赫南特贝等化石;龙马溪组底部页岩上覆于五峰组观音桥段,岩性对应碳质页岩,水平层理极为发育(图2c);龙马溪组中下部岩性以碳质页岩、粉砂质页岩为主,水平层理发育程度降低;五峰组—龙马溪组下部页岩层理面富集笔石化石(图2d),龙马溪组上部层段岩性过渡为灰黑色—深灰色粉砂质泥页岩为主,沉积构造以粉砂质纹层为主(图2e,f)。

研究区五峰组—龙马溪组页岩储层代表性样品的有机地化特征及矿物组分特征如表1所示。研究

区五峰组—龙马溪组页岩有机碳含量介于0.32%~4.45%,其中,五峰组与龙马溪组底部一下部层段含量最高,介于2.01%~4.45%。研究区页岩有机质等效海相镜质体反射率介于2.90%~3.42%,反映有机质演化达到了高一过成熟阶段。X射线衍射测试显示,页岩储层矿物组分主要包括脆性矿物、黏土矿物与黄铁矿等其他矿物,脆性矿物主要由石英矿物构成,含少量长石、方解石、白云石等,脆性矿物比例介于26%~84.4%;黏土矿物主要包括伊利石、绿泥石、伊蒙混层等类型。Z-203井龙马溪组下部一底部层段部分样品脆性矿物含量极高(>80%),绿泥石含量极少;黄铁矿普遍发育,含量介于0.8%~6.5%。同时,结合研究区前人的测试数据可知,矿物含量与比例具有层段性差异^[6,8,11,15-16]。

2.2 页岩储层力学脆性特征

选取不同层段的代表性页岩储层样品展开单轴应力测试,以表征力学脆性的层段性差异。对页岩力学脆性的表征,一般可以分为基于脆性矿物比例的评价方法与基于室内力学测试的评价两种类型^[12]。从脆性矿物比例来看,五峰组—龙马溪组下部页岩储层脆性矿物含量比例最高,介于48.2%~85.1%,均值约为69%^[8-11];龙马溪组中上部页岩储层脆性矿物含量均值小于50%。垂向钻取的代表性页岩样品力学参数测试结果表明,五峰组—龙马溪组下部页岩储层差应力介于25.2~65.3 MPa,均值约52.79 MPa,

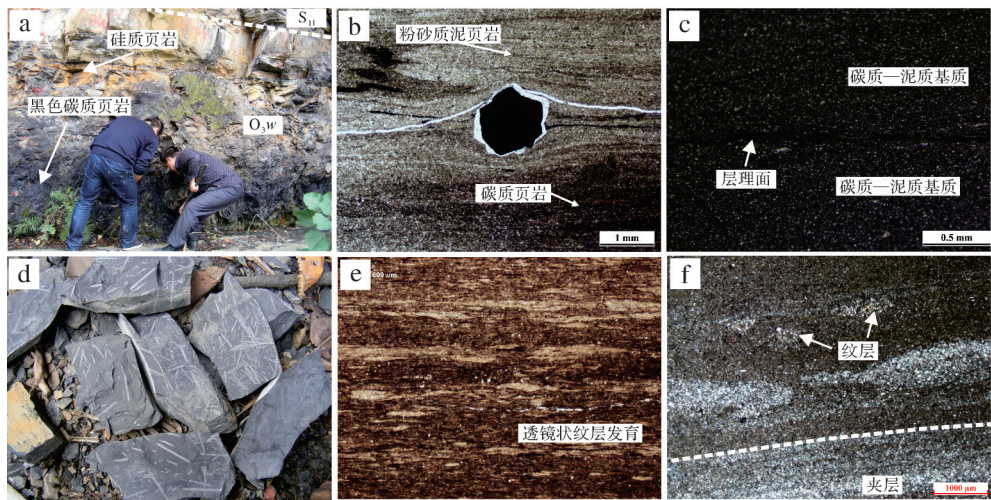


图2 研究区五峰组—龙马溪组页岩储层发育特征

(a)五峰组页岩储层, 綦江观音桥剖面; (b)五峰组碳质—粉砂质页岩, 见黄铁矿发育, 大足Z-203井Z-89样品; (c)龙马溪组底部页岩, 大足Z-203井Z-83样品; (d)五峰组—龙马溪组下部页岩, 层理面见笔石化石富集, 綦江观音桥剖面; (e)龙马溪组上部粉砂质泥页岩, 南川泉浅1井Q-2样品; (f)龙马溪组上部页岩粉砂质纹层、夹层沉积构造, 大足Z-203井Z-32样品

Fig.2 Shale reservoir characteristics of the Wufeng-Longmaxi Formation in the study area

(a) the Wufeng Formation shale reservoir, Guanyinqiao section in Qijiang; (b) carbonaceous-silty shale of the Wufeng Formation with pyrite developed, Z-89 sample of well Z-203 from Dazu; (c) the bottom Longmaxi Formation shale, Z-83 sample of well Z-203 from Dazu; (d) the Wufeng-lower Longmaxi Formation shale, graptolite is abundant in the bedding plane, Guanyinqiao section in Qijiang; (e) the silty shale in upper part of the Longmaxi Formation, Q-2 sample of well Quanqian 1, Nanchuan; (f) sedimentary structures of silty laminae and interbeds in upper part of the Longmaxi Formation, Z-32 sample of well Z-203 from Dazu

表1 五峰组—龙马溪组页岩储层代表性样品有机地化特征及矿物组分特征

Table 1 Organic geochemical characteristics and mineral composition characteristics of representative samples from the Wufeng Longmaxi shale reservoir

样品	层位	有机组分		矿物组分/%						样品岩性
		TOC/%	R _o /%	石英	伊利石	绿泥石	伊蒙混层	长石+碳酸盐矿物	黄铁矿	
Q-2	S _{II} 上部	1.42	—	20	33	26	10	7.5	1.5	过渡为粉砂质泥页岩, 粉砂质纹层发育
Z-32	S _{II} 上部	0.32	—	39.2	28.5	11.3	9.3	9	2.5	
G-7	S _{II} 中部	2.01	2.90	38.1	31.1	5.4	10.8	11.8	2.8	岩性以碳质页岩、粉砂质页岩为主, 水平层理发育程度降低
Z-56	S _{II} 中部	2.01	3.11	47	15.3	8.4	4	21.3	2.9	
Q-4	S _{II} 中部	1.89	3.15	18	35	23	11	2.6	2	
G-12	S _{II} 下部	2.42	3.21	43.9	27.1	11.2	7.6	7.7	2.5	
S-5	S _{II} 下部	2.36	—	33	22	20	11	8.6	2	
S-6	S _{II} 下部	2.44	—	36	23	16	12	9.5	1.9	
Q-7	S _{II} 下部	2.86	3.33	43	21	10	13	9	2.6	
Z-77	S _{II} 下部	3.55	—	71.7	9.4	—	3.6	12.7	2.6	富笔石水平层理碳质页岩, 层理极发育
G-14	S _{II} 底部	2.64	3.32	46.5	24.2	7.1	8.4	10.8	3.5	
Z-83	S _{II} 底部	4.45	—	70.1	10	—	1.6	15	3.2	主要岩性为黑色碳质页岩、富有机质泥页岩、硅质页岩
G-15	O _{3W}	4.02	3.42	24	36	17	7	8	4	
G-17	O _{3W}	2.20	3.22	18	48	12	4	8	6.5	
Z-89	O _{3W}	1.11	—	62	18.2	0.7	3.9	14.4	0.8	

杨氏模量介于 $1.605\times10^4\sim2.840\times10^4$ MPa, 均值约 1.822×10^4 MPa, 泊松比介于 0.203~0.493, 均值为 0.332。适于体积压裂的页岩具有低泊松比或者高杨氏模量的特征^[12], 垂向钻取的页岩样品数据显示, 龙马溪组中上部页岩力学性质参数波动较大,

五峰组—龙马溪组下部页岩储层数据波动小, 但反映脆性的杨氏模量与泊松比并不显著优于中上部储层, 因此, 研究区代表性的深层页岩与中浅层页岩的脆性层段性特征存在显著差异, 这可能反映了深层页岩在储层成岩作用影响下的特殊性。

页岩储层在沉积层理方向与垂向均具有显著的非均质性^[8],但沿层理或纹层方向制备的柱样更易开裂,这也反映了储层沿层理方向具有特殊的力学性质。取五峰组—龙马溪组底部页岩代表性样品进行力学测试,结果表明(表2),与垂向相比,沿层理方向具有更高的杨氏模量值、更低的泊松比以及抗张强度。更高的杨氏模量值与更低的泊松比说明储层脆性较好,较低的抗张强度则反映储层在该方向易于发生破裂,力学薄弱面丰富。镜下观察显示,黏土矿物等的微观赋存状态常具有一定方向性,泥质—粉砂质形成的小尺度沉积分异等可以影响储层抵抗应力的能力,在沉积层理方向,非均质性表现为储层垂向与横向方向上矿物组分、微观结构、力学性质、渗流特征等方面的显著差异。因此,储层代表性样品的垂向力学参数具有微弱的层段间差异,但层理方向的力学脆性与垂向显著不同。

3 页岩储层成岩作用

3.1 五峰组—龙马溪组页岩储层成岩作用阶段

沉积期研究区水介质属于半咸水水介质条件^[20],据石油天然气行业标准 SY/T 5477—1992,以自生矿物类型、黏土矿物组合、混层矿物特征、黏土矿物结晶度、有机质成熟度等指标综合判断页岩成岩作用演化阶段。X射线衍射数据显示,五峰组—龙马溪组页岩黏土矿物组合属于伊利石—绿泥石—混层矿物组合类型,是一种中—晚成岩作用阶段的黏土矿物组合类型,伊蒙混层矿物的普遍存在说明

成岩作用演化没有达到极低级变质作用阶段,以伊利石为主的黏土矿物组合则是晚成岩作用阶段黏土矿物的演化特征^[6]。测试页岩的黏土矿物组合属于I型—正常转化型,可以作为成岩作用阶段判断的标志^[21]。据三泉剖面代表性样品(Q1-A10)的伊利石结晶度、绿泥石结晶度等测试数据(表3),页岩达到了中成岩作用阶段晚期—晚成岩作用阶段;有机质成熟度2.81%~3.11%,均值2.95%(表3);混层矿物的有序度和演化在成岩作用过程中不可逆,混层矿物属于R₃超点阵有序混层,第三转换带,说明混层矿物中伊利石矿物比例较高,稳定温度较高^[22]。伊利石结晶度与绿泥石结晶度在极低级变质作用阶段具有良好的相关性,研究区测试样品的伊利石结晶度与绿泥石结晶度具有相对较好的相关性(图3)。因此,综合判断研究区五峰组—龙马溪组深层页岩储层成岩作用介于晚成岩作用阶段至极低级变质作用阶段之间。

3.2 成岩作用主要类型

五峰组—龙马溪组页岩成岩作用主要包括压实作用、有机质生烃作用、固体沥青充填作用、矿物溶蚀作用、交代作用、重结晶作用与胶结作用、矿物转化作用、破裂作用与小尺度位移作用等,不同类型成岩作用在岩石演化不同阶段的叠合塑造了储层的物性特征,是页岩物性的关键影响因素^[22-23]。依据成岩演化过程中的物质组分与结构变化特征,将储层成岩作用分为物理性成岩作用、矿物相关化学性成岩作用和有机质相关化学性成岩作用三类。

表2 五峰组—龙马溪组页岩储层代表性样品的垂向力学参数

Table 2 Vertical mechanical parameters of representative samples from the Wufeng Longmaxi shale reservoir

层段	样品	方向	差应力/MPa	抗张强度/MPa	杨氏模量/ $\times 10^4$ MPa	泊松比	沉积环境与岩性
S _{II} 上部	Z-53	垂向	40.0		1.968	0.203	沉积于浅水陆棚,岩性以灰黑色—深灰色粉砂质泥页岩为主
S _{II} 上部	Z-59	垂向	25.2		2.840	0.349	
S _{II} 中部	Z-76	垂向	65.3		1.625	0.182	
S _{II} 中部	G-8	垂向	57.8		1.675	0.212	
S _{II} 下部	Z-80	垂向	59.8		1.757	0.493	沉积于半深水陆棚,岩性以碳质页岩、粉砂质页岩为主,水平层理发育程度降低
S _{II} 下部	G-13	垂向	54.6		1.689	0.353	
S _{II} 下部	Q-7	垂向	53.9		1.693	0.389	
S _{II} 底部	G-14	垂向	46.3	9.64	1.645	0.334	沉积于深水陆棚环境,岩性对应碳质页岩
		层理方向	30.6	1.24	2.970	0.201	
S _{II} 底部	Z-83	垂向	52.8		1.605	0.332	沉积于闭塞海盆环境,主要岩性为碳质页岩、富有机质泥页岩、硅质页岩
O _{3W}	G-16	垂向	62.2	12.34	1.685	0.398	
		层理方向	12.4	1.07	3.645	0.164	
O _{3W}	Z-89	垂向	56.3		1.681	0.413	
垂向测试均值			52.79	—	1.822	0.332	

表3 三泉剖面五峰组—龙马溪组页岩黏土矿物结晶度与混层黏土矿物有序度
Table 3 Crystallinity and orderliness of mixed-layer clay minerals
in the Wufeng-Longmaxi Formation of the Sanquan section

样品数量	黏土矿物结晶度/(°)		混层黏土矿物有序度	有机质成熟度/%	最大古埋深/m
15块,取均值或范围	伊利石结晶度K.I	绿泥石结晶度	I/S有序度类型	2.81%~3.11%,均值2.95%	>6 000 m
	0.22°~0.35°	0.15°~0.24°	R=3(R ₃),超点阵有序混层,第三转换带		

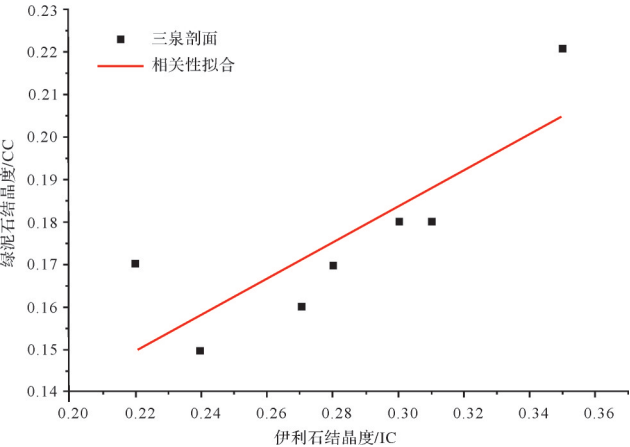


图3 研究区五峰组—龙马溪组页岩储层
伊利石—绿泥石结晶度相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of illite-chlorite crystallinity in the shale reservoirs of the Wufeng Formation and Longmaxi Formation in the study area

3.2.1 物理性储层成岩作用

由于上覆应力的持续存在,研究区五峰组—龙马溪组页岩受到了机械压实作用的持续影响,造成了岩石的致密特性(图4a),在微观上使物质组分之间紧密接触(图4b),储层内小尺度形变普遍(图4c),接触关系以面接触、凹凸状接触为主(图4d),塑性变形显著^[6]。在沉积造成的物质分异的基础上,储层经由机械压实作用形成组分间接触紧密的微观结构,但由于沉积物质分异(图4e),储层实际上由多个碳质—泥质、泥质—粉砂质、碳质微层理构成(图4f)^[23],微层理组合的存在是储层显著小尺度非均质性的重要成因^[24]。观察显示,五峰组黏土矿物、有机质等存在微弱变形(图4g),龙马溪组底部未见显著矿物变形(图4h),而龙马溪组中上部黏土矿物等微观变形显著(图4i)。

破裂作用表现为部分矿物的破裂以及矿物间力学薄弱面的开裂(图4f),是储层基质中大量微裂隙的重要发育机理;小尺度位移作用常发育在层理面间,是塑造储层层理间断性力学结构的动力之一。破裂作用和小尺度位移作用形成的微米尺度微裂隙可以构成从纳米尺度孔隙网络到人造裂缝和井筒的气体渗流通道,有助于提高页岩基质渗透率。

3.2.2 有机质相关的化学性储层成岩作用

有机质生烃作用、固体沥青充填作用等是页岩储层中与有机质相关的主要化学性储层成岩作用。对于以有机质孔隙为主要孔隙类型的页岩储层,有机质生烃演化不仅为储层提供了丰富的气源,也形成了具有丰富内表面的有机质纳米孔隙^[24]。页岩储层中的固体沥青多属于热演化成因沥青,主要是以缩合作用形成的多环焦沥青残余物,其光性结构可以作为有机质成熟度标志,对研究油气生成、运移以及成藏期研究具有重要意义,在页岩储层的固体沥青观察中,多孔固体沥青常有短距离运移迹象^[25]。固体沥青充填作用是被忽视的重要成岩作用类型之一,固体沥青是岩石有机质热演化裂解而形成的可以发生短距离运移的聚集有机质。由于在固体沥青的演化和充填过程中伴随生烃和成分改变,因此归入化学性成岩作用。固体沥青具有短距离运移能力,运移通道主要是破裂作用与小尺度位移作用形成的渗流通道(图5a),其内部具有发育的有机质纳米孔(图5b),在储层基质中以流动状充填于微裂隙、矿物间微观储集空间中,研究表明,孔隙发育的固体沥青具有一定的抵抗外界应力的能力,有助于储层中微裂隙与矿物间储集空间的保存^[25]。在五峰组部分层段、龙马溪组底部页岩储层中,固体沥青充分充填石英等脆性矿物间储集空间,固体沥青中纳米尺度孔隙系统发育,高脆性矿物基质提供了力学骨架,保护了固体沥青中的纳米孔隙系统,也使储层具有极好的压裂脆性。

3.2.3 矿物相关的化学性储层成岩作用

页岩储层中的矿物相关化学性储层成岩作用主要包括化学压实作用、矿物溶蚀作用、交代作用、重结晶作用与胶结作用、矿物转化作用等。化学压实作用发生在2 000 m埋深以下,达到压溶临界条件,同时有化学活动性流体的参与^[26]。矿物溶蚀作用可以是在酸性条件下由有机酸溶蚀形成,或由黏土矿物交代易溶蚀矿物形成^[27](图5c),在四川盆地其他地区页岩储层的观测研究中,见有石英矿物边缘被交代或溶蚀现象^[28],观测研究区样品也见有黄铁矿、

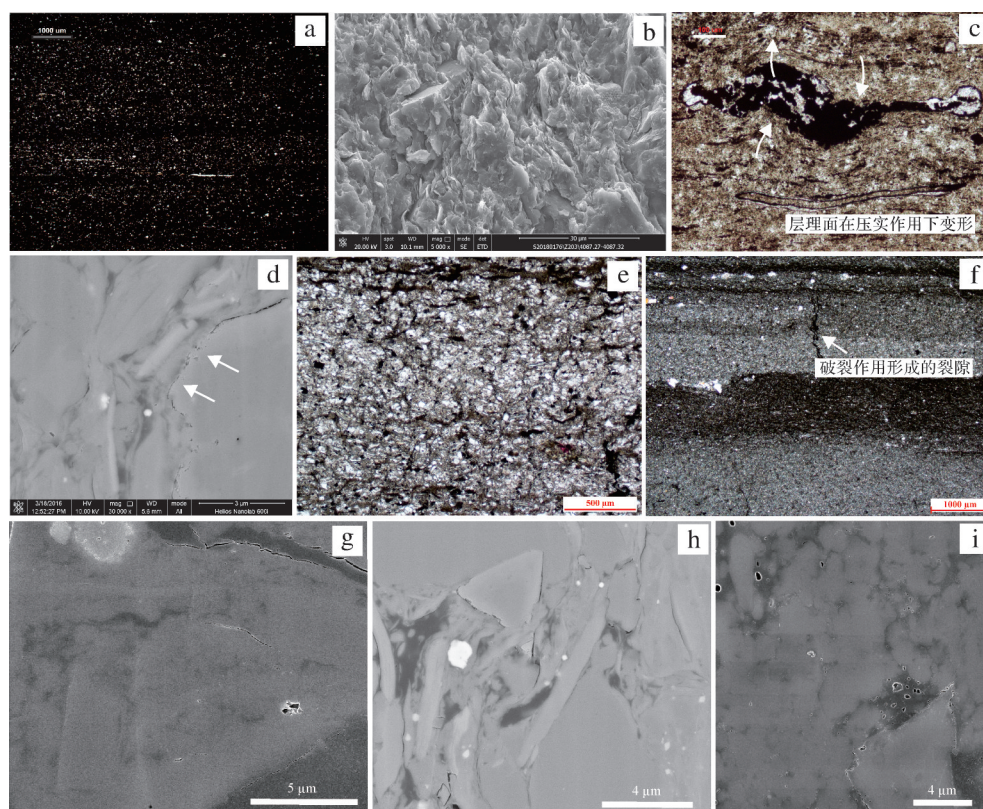


图4 五峰组—龙马溪组页岩储层的压实物理性成光作用与破裂作用观察

(a,b)龙马溪组底部受压实作用影响极为致密的页岩储层特征,大足Z-203井Z-77样品;(c,d)五峰组页岩层理面受压实作用影响而发生的变形特征,大足Z-203井Z-89样品;(e,f)龙马溪组中部因沉积分异作用形成的粉砂质层段,南川泉浅1井Q-4样品;(g)五峰组黏土矿物、有机质等存在微弱变形,大足Z-203井Z-89样品;(h)龙马溪组底部微观特征,大足Z-203井Z-83样品;(i)龙马溪组中部微观特征,大足Z-203井Z-56样品

Fig.4 Physical digenesis and micro-fracturing in the Wufeng-Longmaxi Formation

(a,b) reservoir characteristics of shale at the bottom of the Longmaxi Formation due to compaction, Z-77 sample of well Z-203 from Dazu; (c,d) deformation characteristics of shale bedding plane in the Wufeng Formation due to compaction, Z-89 sample of well Z-203 from Dazu; (e,f) silty layer in the middle of the Longmaxi Formation due to sedimentation differentiation, Q-4 sample of well Quanqian 1, Nanchuan; (g) weak deformation of Clay minerals, organic matter, etc. in the Wufeng Formation, Z-89 sample of well Z-203 from Dazu; (h) microscopic characteristics of the bottom part of the Longmaxi Formation, Z-83 sample of well Z-203 from Dazu; (i) microscopic characteristics of the middle part of the Longmaxi Formation, Z-56 sample of well Z-203 from Dazu

石英等矿物的部分溶蚀现象(图5d)。莓状黄铁矿集合体在储层中普遍发育(图5e),微晶间充填有机质,内部发育有丰富的纳米孔隙^[29];储层自生矿物的发育为化学充填作用提供了物质基础,可以有效降低储集空间发育程度,自生黏土矿物、方解石、黄铁矿、自生石英等是较为发育的充填矿物,也在五峰组、龙马溪组下部观测到同沉积黄铁矿结核等(图5f)。层理缝、裂缝等发生的化学充填作用主要是自生方解石与黄铁矿的充填作用(图5g)。

五峰组—龙马溪组下部层段页岩储层富含生物源硅质(图5h),生物成因蛋白石向稳定石英矿物的转化是储层中发生的重要矿物转化。晚成岩作用阶段—极低级变质作用阶段的演化程度也可以使储层中的硅质胶结物发生进一步的致密化,如筇竹寺组页岩储层中石英矿物的次生加大现象^[30]。五峰组—

龙马溪组页岩储层中的硅质胶结作用主要包括蒙脱石层间水脱除成因的石英微晶(70℃~90℃热力条件)和蒙脱石或高岭石进一步脱除层间水而形成的石英微晶集合体(90℃~100℃以上)^[31-33]。黏土矿物在压实作用下充分充填矿物间空间,而后在储层成岩作用过程中转化形成微晶石英为主的硅质胶结物(图5i)。

4 页岩储层成岩作用对储层力学脆性的影响

页岩储层成岩作用是塑造纳米尺度储集空间、造成“低孔低渗”特征的主要影响因素^[6],在储层演化过程中,成岩作用不仅影响孔隙发育与物性特征,也通过改变矿物类型比例、接触关系等影响储层的力

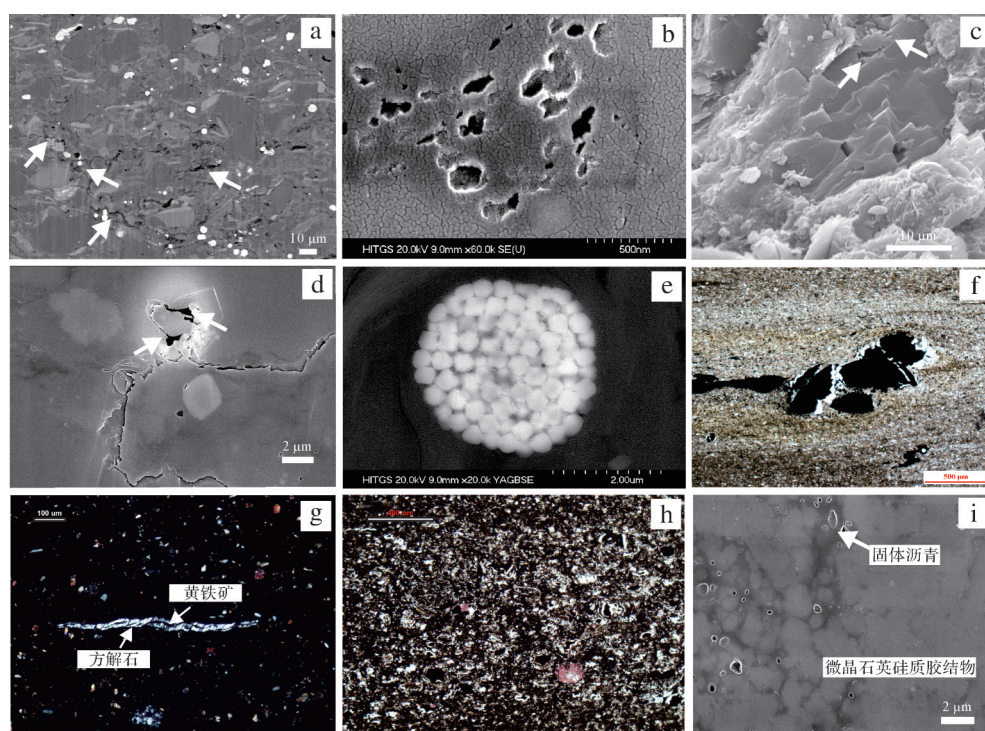


图5 研究区五峰组—龙马溪组页岩储层成岩作用观察

(a)破裂作用与小尺度位移作用形成的固体沥青渗流通道,南川泉浅1井Q-4样品;(b)固体沥青内部发育的有机质纳米孔,南川泉浅1井Q-4样品;(c)矿物边缘的溶蚀作用现象,綦江观音桥剖面G-12样品;(d)黄铁矿部分溶蚀现象,南川泉浅1井Q-7样品;(e)储层中发育的莓状黄铁矿集合体黄铁矿部分溶蚀现象,南川泉浅1井Q-7样品;(f)储层中的黄铁矿结核,大足Z-203井Z-89样品;(g)层理缝中的自生方解石与黄铁矿充填作用现象,大足Z-203井Z-83样品;(h)五峰组富生物源硅质层段微观特征,大足Z-203井Z-87样品;(i)微晶石英为主的硅质胶结物及其间充填的固体沥青,大足Z-203井Z-83样品

Fig.5 Observations of reservoir diagenesis from the Wufeng-Longmaxi Formation in the study area

(a) seepage channel of solid bitumen formed by fracturing and small-scale displacement, Q-4 sample of well Quanchian 1, Nanchuan; (b) organic nano-pores in solid bitumen, Q-4 sample of well Quanchian 1, Nanchuan; (c) dissolution on mineralogical edge, G-12 sample of Guanyinqiao section, Qijiang; (d) partial dissolution of pyrite, Q-7 sample of well Quanchian-1, Nanchuan; (e) partial dissolution of pyrite in the framboidal pyrite aggregate, Q-4 sample of well Quanchian 1, Nanchuan; (f) pyrite nodules in reservoirs, Z-89 sample of well Z-203 from Dazu; (g) filling phenomenon of authigenic calcite and pyrite in bedding fracture, Z-83 sample of well Z-203 from Dazu; (h) microscopic characteristics of biogenic siliceous-rich layers in the Wufeng Formation, Z-87 sample of well Z-203, Dazu; (i) siliceous cement mainly composed of microcrystalline quartz filled with solid bitumen, Z-83 sample of well Z-203, Dazu

学脆性,进而影响储层的压裂效果^[34-35]。在进行储层力学脆性评价时,目前的评价方式主要是从物质组分和力学结构的角度展开评价。这两个角度是储层力学脆性的直接影响因素,但页岩储层力学脆性是微观物质组分与小尺度微观结构的变化在宏观的反映,因此探究页岩成岩作用演化过程对力学特征的影响,有助于总结优质力学脆性储层的发育机理^[36]。

4.1 储层成岩演化作用过程中的矿物组合变化

储层矿物演化受到构造—埋藏过程影响下温度—压力的控制,在储层演化的不同阶段,储层矿物组合存在差异(图6)。五峰组—龙马溪组下部页岩随着埋深的增加,储层黏土矿物由I型(正常)高岭石—蒙脱石为主的矿物组合向混层矿物+伊利石矿物为主的黏土矿物组合演化,并在黏土矿物转化、钾长石溶解、生物源硅质演化等作用下不断形成以自生石

英为主的脆性矿物^[37];储层中的脆性矿物含量不断增加,研究区五峰组—龙马溪组底部部分层段脆性矿物含量比例达到80%以上。储层中的沉积有机质也在成岩演化过程中发生分解、生烃、排烃、空间位置移动等,排出的有机酸等产物进一步参与矿物溶蚀作用。但在储层中—晚期成岩作用阶段,随着储层上覆应力和其他构造因素的影响,储层中的破裂作用和小尺度位移作用在储层中形成微裂隙、层理缝、裂缝等空间,自生方解石、黄铁矿晶体等对微裂隙、层理缝、裂缝等进行充填,调整了储层力学结构。

储层不同层段成岩作用的差异受到岩石原始物质组分与结构的影响。储层演化过程中铝硅酸盐矿物的水岩作用显著改变了储层矿物组合^[38]。五峰组—龙马溪组下部页岩储层中石英矿物以生物源硅质为主,含少量陆源石英,此外火山灰来源的蒙脱石含

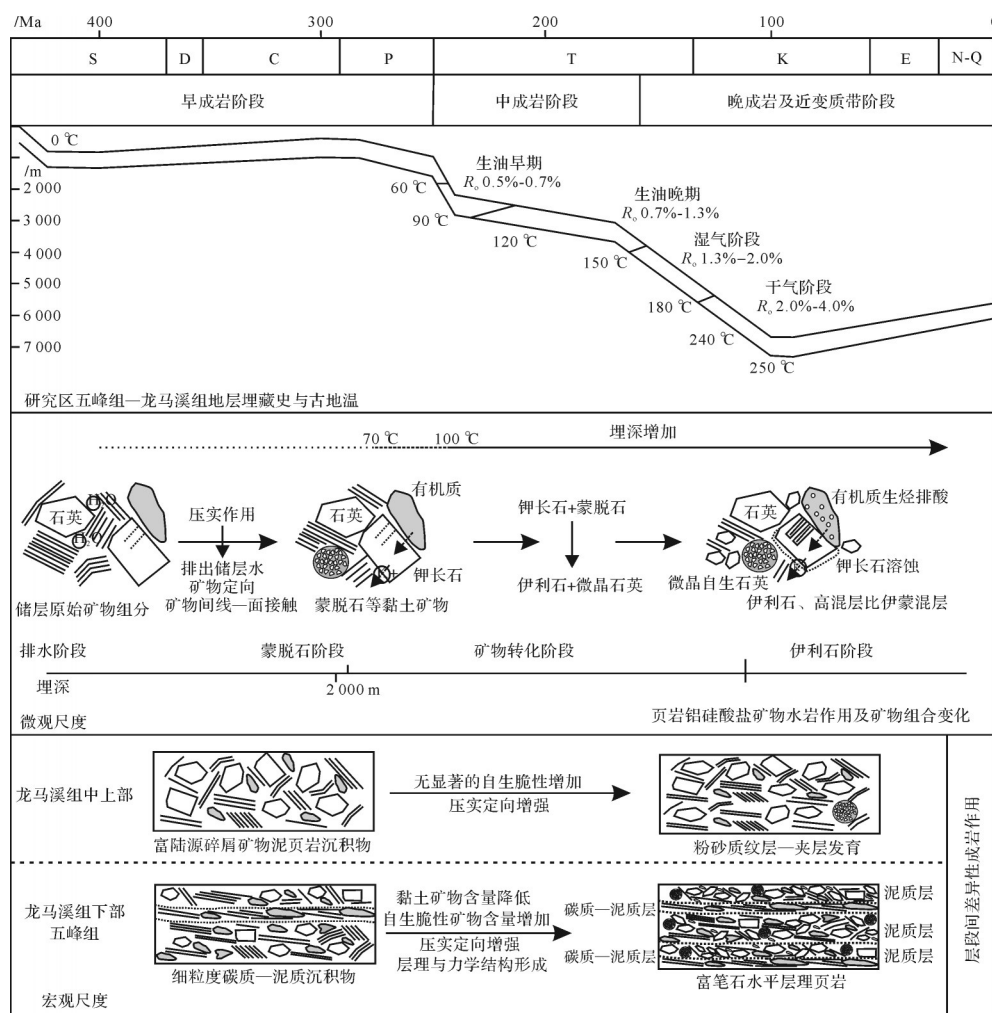


图6 构造—埋藏控制下的页岩储层矿物组合转化与组构演化

Fig.6 Mineral assemblage and fabric evolution of shale reservoir under tectonic burial process

量非常丰富,储层中发育多层斑脱岩^[39],因此,生物源硅质+陆源石英+钾长石+高蒙脱石黏土矿物为主的矿物组合在晚成岩—极低级变质作用阶段转化为自生微晶石英+陆源石英+高伊利石黏土矿物为主的组合(图6),脆性矿物含量显著增高,有助于改善储层的力学脆性特征。而在龙马溪组页岩储层的中上部,由于沉积物中陆源碎屑矿物含量显著增高,生物源硅质含量较低,蒙脱石含量降低,储层自生微晶石英的矿物转化作用微弱,储层不具备在成岩演化过程中形成大量自生脆性矿物的能力。

4.2 储层成岩演化作用过程中的小尺度组构变化

页岩储层成岩演化受到构造—埋藏过程的控制。相对快速埋藏阶段在2000 m以下,储层埋深加大会造成地层水大量排出^[40],机械压实作用在此阶段内塑造了储层较为致密的小尺度结构。在毫米—宏观尺度,不同层段的页岩由于沉积物粒度与分布差

异呈现不同的宏观特征,五峰组—龙马溪组下部矿物粒度细小,形成宏观上相对均质的储层,在龙马溪组中上部,随着陆源碎屑含量的增多,储层含粉砂质纹层、夹层,均质性更差;在微米—纳米尺度,五峰组—龙马溪组下部储层在沉积条件的控制下形成微米级显微层理,由于碳质—矿物质含量的层理间差异,储层形成大量的水平向力学薄弱面。在此阶段可能发生黄铁矿交代生物结构形成莓状集合体(莓状黄铁矿存在生物成因与非生物成因之争)^[29],同时发生初步的有机质热演化和矿物转化作用,矿物间接触关系更加紧密,储层抵抗外界应力能力增强。

由于页岩储层不同层段的沉积环境与沉积条件具有层段性差异,在其基础上的受储层成岩作用影响的小尺度岩石结构和微观组构也具有层段性差异(图7)。五峰组—龙马溪组底部页岩的碳质—泥质富笔石水平层理,经过机械压实作用影响后形成层

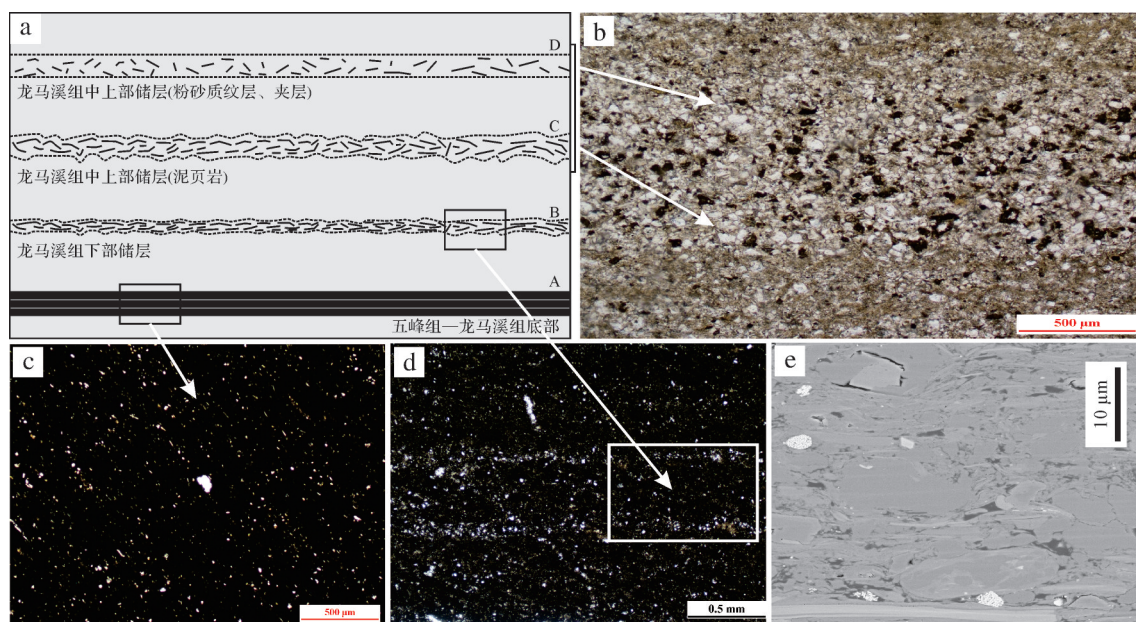


图7 沉积—成岩控制下的页岩储层岩石结构层段性差异

Fig.7 Rock structure and interval difference of shale under sedimentary-diagenetic control

理结构,增强了黏土矿物等的定向性,并在外界应力的影响下发生破裂作用与小尺度位移作用,形成裂缝性小尺度储集空间,并在其中发生化学充填作用与固体沥青充填作用,同时在演化过程中通过矿物转化作用等造成自生石英等脆性矿物的含量比例增长。受该过程影响,五峰组—龙马溪组下部页岩储层垂向渗透率极低。储层脆性矿物含量极高,并且脆性矿物之间填充的塑性黏土矿物等含量较低,因此抵御外界压力的能力相对较差,易破裂。此外,该层段沿层理面方向发育密集的力学薄弱面,使其在地层水平方向具有更好的破裂延伸能力。

从力学测试结果来看,五峰组—龙马溪组下部的高硅质页岩与龙马溪组中上部的纹层状粉砂质页岩相比数据更稳定,但垂向压裂测试得到的脆性指数仅略微优于龙马溪组中上部。五峰组—龙马溪组下部页岩层理方向的破裂性能显著更好,说明层理通过塑造具有方向性的力学薄弱面体系,造成储层力学性质显著的方向性差异。

4.3 超高脆性矿物含量页岩储层发育机理

研究区五峰组部分层段以及龙马溪组底部层段存在超高脆性矿物含量层段(表1),脆性矿物含量可以高达80%以上,有机质含量一般高于3%,同时具有优质的层理方向压裂脆性。该现象在涪陵焦石坝等地区同样存在^[8,11,23,41]。选取超高脆性矿物含量层段代表性样品进行系统观察,在微观上,该层段物相特征

与其他层段具有显著差异(图8a),微区物相组合以微晶石英+有机质为主(图8),高分辨率观测显示(图8b,c),大部分微晶石英粒度介于400 nm~8 μm之间(图8b),脆性矿物之间充填有丰富的固体沥青,固体沥青内部发育有机质纳米孔(图8c),黏土矿物仅在长石等矿物周缘以及部分石英矿物间少量发育。微晶石英的密集发育受控于自生石英形成的空间(原始粒间孔隙)的结晶方式,微晶石英集合体可能与化学性压实作用有关,微晶石英形成于早—中成岩阶段,其中生物硅质向蛋白石CT转化主要发生在早成岩阶段,这个阶段化学压实作用不占主导地位。

层段特殊的物质组分与微观结构特征说明,超高脆性矿物含量页岩储层是在特定物质组分基础上经由特殊储层成岩作用演化而形成的(图9):1)从超高脆性矿物含量页岩储层的发育层段来看,层段均处于生物源硅质丰富的五峰组—龙马溪组底部层段,同时也处于蒙脱石等丰富的火山活动活跃层段,主要沉积环境是相对滞留的闭塞海盆(五峰组)以及海平面快速上升背景下的深水陆棚(龙马溪组底部)^[23,42],储层在原始物质组分上富生物源硅质、黏土矿物中蒙脱石比例较高,有利于为自生石英转化提供充足的矿物来源;2)超高脆性矿物含量页岩储层均发育典型的水平层理沉积构造,使储层具有良好的自封性;3)经压实作用改造后,自生石英经由矿物转化作用形成,形成大量微晶自生石英,构成岩石骨

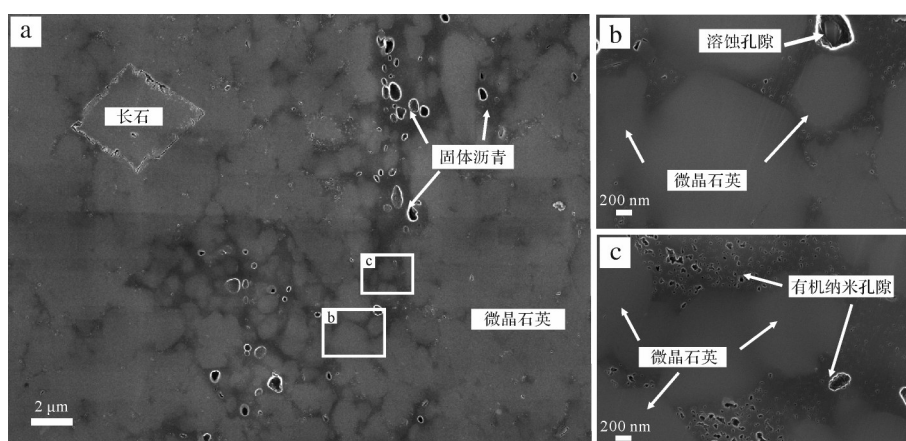


图8 超高脆性矿物含量页岩储层微观特征

Fig.8 Micro-scale characteristics of shale reservoir with ultra-high brittle mineral content

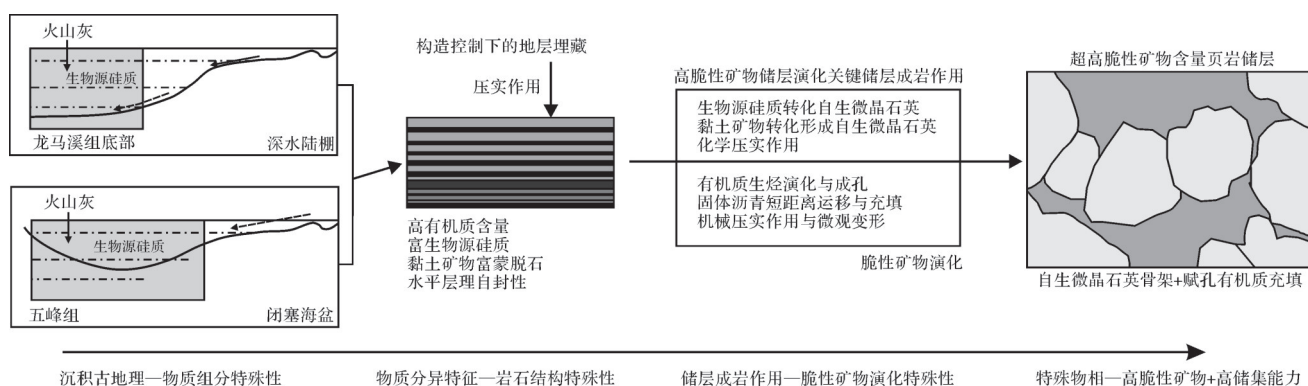


图9 超高脆性矿物含量页岩储层发育机理

Fig.9 Development mechanism of a shale reservoir with ultra-high brittle mineral content

架;4)在储层演化过程中,有机质不断生烃演化,固体沥青在应力作用下经短距离运移充分调整、充填微晶自生石英间的微观储集空间,使储层兼具极好的力学脆性、储集能力以及丰富的气源。层段低黏土矿物含量使储层更容易破裂,而不是产生小尺度塑性变形。

4.4 成岩作用与优质力学脆性页岩储层评价优选

五峰组—龙马溪组页岩储层中,碳质—硅质富笔石水平层理页岩经过特殊储层成岩改造形成自生微晶石英+有机质为主的物相组合,碳质—泥质富笔石水平层理页岩次之;陆源碎屑含量较高、水平层理发育程度较差的页岩在成岩作用过程中没有经受自生微晶石英发育等脆性矿物大规模增加的储层成岩作用影响。由于五峰组—龙马溪组页岩不同层段的沉积环境与沉积条件不同,其所沉积的物质组分与岩石结构也存在差异;在此基础上,页岩储层所经历的成岩作用改造强度不同,影响储层的物性、含气性

与压裂潜力。因此,在原始物质与结构的基础上,成岩作用是导致储层力学性质差异的本质原因。

目前,由于页岩储层勘探开发需要采用水平井和水力压裂等工程手段,亟待探明储层精细小层评价的机理、依据与方法^[11],对页岩储层的层位优选可以为储层工程改造提供科学依据;对优质页岩力学脆性储层的发育机理的研究,可以为海相页岩优质储层的勘探、开发、评价、工程建议提供支撑。研究表明,基于物质组分、室内参数的力学评价都还不能精准反映储层的压裂潜力,储层成岩作用、成岩演化及力学脆性演化对储层含气性特征的影响还需要进一步明确^[43-45],对深层页岩、高演化程度页岩压裂潜力的评价需要考虑成岩作用的影响,对优质页岩储层发育机理的研究,也应当深入到储层成岩作用影响矿物演化、微观结构等方面,对页岩储层岩石力学的分析,也有待在矿物类型、组合、排列在储层成岩作用改造过程中的演化差异等方面进一步细化。

5 结论

(1) 渝西地区五峰组—龙马溪组页岩储层矿物组分以脆性矿物、黏土矿物、黄铁矿等为主,脆性矿物以石英矿物为主,矿物组分类型较为稳定,但矿物含量与比例具有层段性差异,五峰组—龙马溪组底部页岩脆性矿物含量相对较高,水平层理发育方向具有更好的脆性。

(2) 五峰组—龙马溪组页岩储层达到中—晚成岩作用阶段—极低级变质作用阶段,储层物质组分、结构及物性受到了成岩作用的深度改造;主要成岩作用类型包括压实作用、有机质生烃作用、固体沥青充填作用、矿物溶蚀作用、交代作用、重结晶作用与胶结作用、矿物转化作用、破裂作用与小尺度位移作用等,在构造—埋藏作用的控制下,储层经历埋藏初期的相对快速埋藏阶段、中成岩期有机质规模演化阶段、晚成岩作用—近变质带阶段三个阶段。

(3) 五峰组—龙马溪组底部存在部分脆性矿物高于80%的超高脆性矿物含量层段,碳质—硅质富层理页岩在特殊储层成岩作用的影响下形成大量自生微晶石英,构成以微晶石英+赋孔有机质为主的显微物相组合,兼具良好的力学脆性与储集能力,而其他层段缺乏持续演化不断形成微晶石英增量的物质基础。

(4) 储层成岩作用发生的物质基础、岩石结构、类型、作用强度在层段间的差异,是储层脆性矿物与力学性质差异的关键影响因素,应作为储层层段优选、评价与优质储层机理研究的科学依据。

致谢 感谢中国矿业大学李壮福副教授、朱炎铭教授、沈玉林教授、申建教授、王超勇副教授、安徽理工大学张敬霞博士、中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所李艳芳博士后、重庆市地质矿产研究院曾春林、汪生秀、张志平高级工程师、昆士兰大学Tom Rufford教授、中国石油勘探开发研究院廊坊分院武瑾博士等对论文提出的建议与意见,感谢南京大学解德录博士、中国矿业大学李冠霖、崇璇以及上海工程技术大学李刚等在野外工作、样品整理、资料整理等方面的工作。

参考文献(References)

- [1] 邹才能,董大忠,王玉满,等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 689-701. [Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 689-701.]
- [2] 邹才能,董大忠,王玉满,等. 中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 166-178. [Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (II) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 166-178.]
- [3] 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 Dazhong, Wang Yuman, Li Xinjing, et al. Breakthrough and prospect of shale gas exploration and development in China [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 19-32.]
- [4] 张小龙,张同伟,李艳芳,等. 页岩气勘探和开发进展综述[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(2): 116-122. [Zhang Xiaolong, Zhang Tongwei, Li Yanfang, et al. Research advance in exploration and development of shale gas [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(2): 116-122.]
- [5] 邱振,邹才能. 非常规油气沉积学:内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29. [Qiu Zhen, Zou Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 1-29.]
- [6] 赵迪斐,郭英海,杨玉娟,等. 渝东南下志留统龙马溪组页岩储集层成岩作用及其对孔隙发育的影响[J]. 古地学报, 2016, 18(5): 843-856. [Zhao Difei, Guo Yinghai, Yang Yujuan, et al. Shale reservoir diagenesis and its impacts on pores of the Lower Silurian Longmaxi Formation in southeastern Chongqing [J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(5): 843-856.]
- [7] 据宜文,黄聘,孙岩,等. 纳米地球科学:内涵与意义[J]. 地球科学, 2018, 43(5): 1367-1383. [Ju Yiwen, Huang Cheng, Sun Yan, et al. Nanogeoscience: Connotation and significance [J]. Earth Science, 2018, 43(5): 1367-1383.]
- [8] 郭英海,赵迪斐. 微观尺度海相页岩储层微观非均质性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 300-307. [Guo Yinghai, Zhao Difei. Analysis of micro-scale heterogeneity characteristics in marine shale gas reservoir [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 300-307.]
- [9] 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.]
- [10] 李一凡,樊太亮,高志前,等. 渝东南地区志留系黑色页岩层序地层研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(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, 23 (2): 299-306.]
- [11] 赵迪斐,郭英海,Wang G,等. 层序地层格架及其对页岩储层发育特征的影响:以四川盆地龙马溪组页岩为例[J]. *沉积学报*,2020,38(2):379-397. [Zhao Difei, Guo Yinghai, Wang G, et al. Sequence stratigraphic framework and its influence on the development characteristics of shale reservoirs: Taking the Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(2): 379-397.]
- [12] 李庆辉,陈勉,金衍,等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. *岩石力学与工程学报*,2012,31(8):1680-1685. [Li Qinghui, Chen Mian, Jin Yan, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(8): 1680-1685.]
- [13] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(12): 848-861.
- [14] 栾国强,董春梅,马存飞,等. 基于热模拟实验的富有机质页岩成岩作用及演化特征[J]. *沉积学报*,2016,34(6):1208-1216. [Luan Guoqiang, Dong Chunmei, Ma Cunfei, et al. Pyrolysis simulation experiment study on diagenesis and evolution of organic-rich shale [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(6): 1208-1216.]
- [15] 孔令明,万茂霞,严玉霞,等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩储层成岩作用[J]. *天然气地球科学*,2015,26(8):1547-1555. [Kong Lingming, Wan Maoxia, Yan Yuxia, et al. Reservoir diagenesis research of Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(8): 1547-1555.]
- [16] Liu H M, Zhang S, Song G Q, et al. Effect of shale diagenesis on pores and storage capacity in the Paleogene Shahejie Formation, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 103: 738-752.
- [17] 张琳娜,樊隽轩,陈清. 华南上奥陶统观音桥层的空间分布和古地理重建[J]. *科学通报*,2016,61(18):2053-2063. [Zhang Linna, Fan Junxuan, Chen Qing. Geographic distribution and palaeogeographic reconstruction of the Upper Ordovician Kuanyinchiao Bed in South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(18): 2053-2063.]
- [18] 周恩恩. 中上扬子及其东南缘中奥陶世—早志留世沉积特征与岩相古地理演化[D]. 北京:中国地质科学院,2015. [Zhou Kenken. Middle Ordovician-Early Silurian lithofacies paleogeography of Middle-Upper Yangtze and its southeastern margin [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2015.]
- [19] Wang Y M, Li X J, Dong D Z, et al. Major controlling factors for the high-quality shale of Wufeng - Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2017, 35 (4): 444-462.
- [20] 窦菲菲. 川东龙马溪组下部页岩储层特征研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014. [Dou Feifei. Reservoir characteristics research of the lower Longmaxi Formation shale in east of Sichuan [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.]
- [21] 赵杏媛,王行信,张有瑜. 中国含油气盆地粘土矿物[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1995:47-49. [Zhao Xingyuan, Wang Hangxin, Zhang Youyu. Clay minerals in hydrocarbon-bearing basins of China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1995: 47-49.]
- [22] 张哲,陈小明,赵明. 利用伊/蒙混层矿物对山东济阳坳陷古地温 and 剥蚀深度的反演[J]. *南京大学学报(自然科学版)*,2008,44(6):621-631. [Zhang Zhe, Chen Xiaoming, Zhao Ming. The use of the mixed-layer illite/smectite to trace the paleotemperature and the eroded strata thickness in the Jiyang Basin, eastern China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2008, 44(6): 621-631.]
- [23] 赵迪斐,郭英海,毛潇潇,等. 渝东南龙马溪组下部页岩岩石学特征与优质储层形成机理[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*,2017,36(4):32-41. [Zhao Difei, Guo Yinghai, Mao Xiaoxiao, et al. Petrographic characteristics of Lower Longmaxi Formation shale in south-east Chongqing and the Formation mechanism of high quality reservoir [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2017, 36 (4): 32-41.]
- [24] 赵迪斐,郭英海,朱炎铭,等. 海相页岩储层微观孔隙非均质性及其量化表征[J]. *中国矿业大学学报*,2018,47(2):296-307. [Zhao Difei, Guo Yinghai, Zhu Yanming, et al. Analysis of micro-scale heterogeneity characteristics in marine shale gas reservoir (II): Pore heterogeneity and its quantitative characterization [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(2): 296-307.]
- [25] Cardott B J, Landis C R, Curtis M E. Post-oil solid bitumen network in the Woodford Shale, USA -A potential primary migration pathway [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 139: 106-113.
- [26] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96 (6): 1071-1098.
- [27] 刘金库,彭军,石岩,等. 致密砂岩储层石英溶蚀成因及对孔隙发育的影响:以川中—川南过渡带须家河组为例[J]. *石油学报*,2015,36(9):1090-1097. [Liu Jinku, Peng Jun, Shi Yan, et al. The genesis of quartz dissolution in tight sand reservoirs and its impact on pore development: A case study of Xujiahe Formation in the transitional zone of central-southern Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1090-1097.]
- [28] 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. Miner-

- al 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.]
- [29] 赵迪斐,郭英海,朱炎铭,等. 龙马溪组页岩黄铁矿微观赋孔特征及地质意义[J]. 沉积学报, 2018, 36(5): 864-876. [Zhao Difei, Guo Yinghai, Zhu Yanming, et al. Micropore characteristics and geological significance of pyrite in shale rocks of Longmaxi Formation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(5): 864-876.]
- [30] 冶正阳. 云南寻甸下寒武统筇竹寺组页岩储层特征研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018. [Ye Zhengyang. Research on shale reservoir characteristics of the Early Cambrian Qiongzhusi Formation in Xundian, Yunnan[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018.]
- [31] 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.]
- [32] Peltonen C, Marcussen Ø, Bjørlykke K, et al. Clay mineral diagenesis and quartz cementation in mudstones: The effects of smectite to illite reaction on rock properties[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 887-898.
- [33] Hower W F, G. W. Brindley and G. Brown, Editors. *Crystal structures of clay minerals and their identification*. London (Mineralogical Society), Monograph 5, 1980. viii + 496 pp., 103 figs., 7 pls. Price £28·00 including postage[J]. Mineralogical Magazine, 1981, 44(335): 363.
- [34] 赵迪斐. 川东下古生界五峰组—龙马溪组页岩储层孔隙结构精细表征[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. [Zhao Difei. Quantitative characterization of pore structure of shale reservoirs in the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formation of the east Sichuan area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.]
- [35] Zhang D C, Ranjith P G, Perera M S A. The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: A review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 143: 158-170.
- [36] Gholami R, Rasouli V, Sarmadivaleh M, et al. Brittleness of gas shale reservoirs: A case study from the North Perth Basin, Australia[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 1244-1259.
- [37] 陈红宇,卢龙飞,刘伟新,等. 蛋白石硅质页岩成岩过程中的孔隙结构变化特征[J]. 石油实验地质, 2017, 39(3): 341-347. [Chen Hongyu, Lu Longfei, Liu Weixin, et al. Pore network changes in opaline siliceous shale during diagenesis[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(3): 341-347.]
- [38] 付常青. 渝东南五峰组—龙马溪组页岩储层特征与页岩气富集研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017. [Fu Changqing. Study on reservoir characteristics and shale gas enrichment of Wufeng-Longmaxi Formation shale in southeast Chongqing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.]
- [39] 王玉满,李新景,王皓,等. 四川盆地东部上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组斑脱岩发育特征及地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 653-665. [Wang Yuman, Li Xinjing, Wang Hao, et al. Developmental characteristics and geological significance of the bentonite in the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Formation in eastern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 653-665.]
- [40] Fairbridge R W. Phases of diagenesis and authigenesis[M]//Larsen G, Chilingar G V. Developments in sedimentology. Amsterdam: Elsevier, 1967: 19-89.
- [41] 郭彤楼,张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 28-36. [Guo Tonglou, Zhang Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 28-36.]
- [42] Li Y F, Zhang T W, Ellis G S, et al. Depositional environment and organic matter accumulation of Upper Ordovician-Lower Silurian marine shale in the Upper Yangtze Platform, South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 466: 252-264.
- [43] Zhao D F, Guo Y G, Yin S, et al. Prediction of geomechanical sweet spots in a tight gas sandstone reservoir: A case study of Lower Permian strata in the southern Qinshui Basin, China[J]. Interpretation, 2019, 7(1): T207-T219.
- [44] Li Z C, Li L C, Li M, et al. A numerical investigation on the effects of rock brittleness on the hydraulic fractures in the shale reservoir[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 50: 22-32.
- [45] 武瑾,梁峰,吝文,等. 渝东北地区巫溪2井五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征[J]. 石油学报, 2017, 38(5): 512-524. [Wu Jin, Liang Feng, Lin Wen, et al. Reservoirs characteristics and gas-bearing capacity of Wufeng-Longmaxi Formation shale in well WX-2, northeast Chongqing area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(5): 512-524.]

Diagenesis of a Shale Reservoir and Its Influence on Reservoir Brittleness: Taking the deep shale of the Wufeng-Longmaxi Formation in western Chongqing as an example

ZHAO DiFei^{1,2,3,4}, JIAO WeiWei^{3,4}, WEI Yuan⁵, ZHANG HaiJie⁶, LI LiGe⁷, GUO YingHai⁵,
WANG Geoff⁸

1. Institute of Artificial Intelligence, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China

2. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, Xuzhou, Jiangsu 221008, China

3. Key Laboratory of Shale Gas Exploration, Ministry of Natural Resources, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China

4. National and Local Joint Engineering Research Center of Shale Gas Exploration and Development, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China

5. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

6. Chongqing Shale Gas Exploration and Development Co. Ltd., Chongqing 401121, China

7. School of Information Engineering, Shijiazhuang Vocational College of Economics, Shijiazhuang 050000, China

8. School of Chemical Engineering, University of Queensland, Brisbane, Queensland 4072, Australia

Abstract: Shale is developed with a small grain size and strong microscopic heterogeneity, forming gas reservoirs during the transformation of diagenesis process. The research of diagenesis provides a basis for a deeper understanding of high-quality reservoir forming mechanisms. This paper studies reservoir diagenesis and its effect on shale using the Qijiang Guanyinqiao section, Nanchuan Sanquan section, Quanjian-1 well, and Dazu Z-3 well in the western Chongqing area as an example using X-ray diffraction (XRD), argon ion polishing-field emission scanning electron microscopy (AIP-FESEM), Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS), microscopical observation, and geochemical and mechanical tests. The results show that the Wufeng-Longmaxi Formation has interval differences in material component, rock structure, and mechanical properties. The reservoir diagenesis is between the late diagenetic stage and very-low-grade metamorphism stage and is divided into three categories: physical diagenesis (e.g., Compaction), mineral related chemical diagenesis (e.g., mineral dissolution), and organic matter related chemical diagenesis (e.g., hydrocarbon generation of organic matter). Carbonaceous-siliceous shale layers with more than 80% brittle minerals and a large amount of authigenic microcrystalline quartz exist in the Wufeng and bottom Longmaxi Formation with microfacies of microcrystalline quartz and pore-bearing organic matter under the influence of special diagenesis process. In contrast, other intervals in the Wufeng-Longmaxi Formation lack the material base for the continuous development of authigenic quartz. The material basis, rock structure, type, and influence degree of diagenesis show interval differences, which is a key factor that influences brittle minerals and mechanical properties and should be included in the scope of reservoir evaluation and high-quality reservoir mechanisms.

Key words: shale reservoir; diagenesis; mechanical brittleness; Wufeng Formation; Longmaxi Formation; western Chongqing area