文章编号: 0253-2697(2022)08-1089-18 DOI:10.7623/syxb202208005

# 深水陆棚富有机质页岩沉积微相-微地貌及其对 储层的控制作用

——以四川盆地南部五峰组—龙马溪组页岩为例

郭 伟<sup>1</sup> 李熙喆<sup>1</sup> 张晓伟<sup>1</sup> 兰朝利<sup>2,3</sup> 梁萍萍<sup>1</sup> 沈伟军<sup>4</sup> 郑马嘉<sup>5</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;
 3. 中国石油大学(北京)石油工程学院 北京 102249; 4. 中国科学院力学研究所 北京 100190;
 5. 四川长宁天然气开发有限责任公司 四川成都 610000)

摘要:根据钻井、测井、岩心描述、岩石薄片鉴定和岩心实验分析资料,结合现代海洋的沉积特征,研究了四川盆地南部泸州地区奥 陶系五峰组一志留系龙马溪组富有机质页岩中的矿物含量分布、岩相特征和沉积类型,划分了深水陆棚的沉积微相和微地貌,分析 了深水陆棚沉积微相-微地貌对储层的影响。研究结果表明:①研究区五峰组一龙马溪组富有机质页岩的陆源碎屑来自北侧川中 水下高地,其岩相主要包括硅质页岩、含黏土硅质页岩和混合页岩 3 种类型。②目的层的沉积类型以半远洋沉积和浊流沉积为主。 ③深水陆棚沉积微相可细分为钙质陆棚、钙-硅质陆棚、钙-硅-泥混合陆棚、硅-泥质陆棚、硅质陆棚和富泥扇 6 种类型,在研究区以发 育硅质陆棚、硅-泥质陆棚和钙-硅-泥混合陆棚为主;沉积微地貌可细分为陆棚高地、陆棚斜坡、陆棚沟、陆棚丘和陆棚平原 5 种类 型,在研究区以发育陆棚平原和陆棚斜坡为主。④深水陆棚沉积微相通过控制储集能力而控制富有机质页岩的储层质量,钙-硅-泥 混合陆棚和硅质陆棚具有最好的储层品质;沉积微地貌通过控制富有机质页岩的厚度从而影响页岩储层质量,其中以陆棚平原中 储层厚度最大。⑤在深水陆棚环境,随着沉积水体加深,沉积微地貌的演化由陆棚高地经陆棚斜坡(陆棚沟、陆棚丘)过渡到陆棚平 原(陆棚丘),沉积微相的演化由钙-硅质陆棚经钙-硅-泥混合陆棚过渡到硅-泥质陆棚(富泥扇),并最终演化为硅质陆棚。深水陆棚 沉积微相模式可为深层富有机质页岩的储层评价与预测提供科学支撑。⑥深水陆棚富有机质页岩沉积在陆棚边缘,其沉积水深可 超过 200 m。

关键词:富有机质页岩;深水陆棚;沉积微相;沉积微地貌;五峰组;龙马溪组 中图分类号:TE122.1 文献标识码:A

## Sedimentary microfacies and microrelief of organic-rich shale in deep-water shelf and their control on reservoirs: a case study of shale from Wufeng-Longmaxi formations in southern Sichuan Basin

Guo Wei<sup>1</sup> Li Xizhe<sup>1</sup> Zhang Xiaowei<sup>1</sup> Lan Chaoli<sup>1,2</sup> Liang Pingping<sup>1</sup> Shen Weijun<sup>4</sup> Zheng Majia<sup>5</sup>

 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 5. Sichuan Changning Natural Gas Development Company Ltd., Sichuan Chengdu 610000, China)

Abstract: Based on the data of drilling, logging, core description, thin section identification and core experimental analysis, as well as the sedimentary characteristics of modern oceans, the paper investigates the mineral content distribution, lithofacies characteristics and sedimentary types of organic-rich shale in the Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation in Luzhou area, southern Sichuan Basin, divides the types of the sedimentary microfacies and microrelief of deep-water shelf, and then analyzes the influences of the both on reservoirs. The results are as follows. (1) The terrigenous clasts of organic-rich shale in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in the study area are originated from the submerged highland in the north of the central Sichuan Basin, and their lithofacies are mainly shown as siliceous shale, clay-bearing siliceous shale and mixed shale. (2) The sedimentary types of tar-

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05035-004)和国家自然科学基金项目(No. 41972132)资助。

第一作者:郭 伟,男,1973 年 6 月生,2005 年获北京大学古生物学与地层学专业博士学位,现为中国石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事页 岩气开发地质及综合评价工作。Email:pkuguowei69@petrochina.com.cn

通信作者:兰朝利,男,1972 年 5 月生,2001 年获中国科学院地质与地球物理研究所博士学位,现为中国石油大学(北京)讲师,主要从事油气藏描述 和开发方向的教学与研究工作。Email,lanchaoli@163.com get strata are dominated by hemipelagic sediment and turbidity sediment. (3) The sedimentary microfacies in deep-water shelf can be subdivided into 6 types, i.e., calcareous shelf, calcareous-siliceous shelf, calcareous-siliceous-argillaceous mixed shelf, siliceous-argillaceous shelf, siliceous shelf and argillaceous-rich fan. Among them, siliceous shelf, siliceous-argillaceous shelf and calcareous-siliceous-argillaceous mixed shelf are mainly developed in the study area. Sedimentary microrelief can be subdivided into five types, i.e., shelf highland, shelf slope, shelf gully, shelf mound and shelf plain. Among them, shelf plain and shelf slope are mainly developed in the study area. (4) Sedimentary microfacies in deep-water shelf control the reservoir quality of organic-rich shale by controlling the reservoir capacity. Calcareous-siliceous-argillaceous mixed shelf and siliceous shelf have the best reservoir quality. Sedimentary microrelief exerts influence on the quality of shale reservoir by controlling the thickness of organic-rich shale, and the reservoir in shelf plain is the thickest. (5) In the deep-water shelf environment, with the increase of sedimentary water depth, the sedimentary microrelief is evolved from shelf highland to shelf plain (or shelf mound) through shelf slope (or shelf gully or shelf mound), and the sedimentary microfacies are evolved from calcareous-siliceous shelf to silicon-argillaceous shelf (or argillaceous-rich fan) through calcareous-siliceous-argillaceous mixed shelf, and finally evolve into siliceous shelf. The sedimentary microfacies model of deep-water shelf can provide scientific support for reservoir evaluation and prediction of deep organic-rich shale. (6) The organic-rich shale in deep-water shelf is deposited at the edge of the shelf, and its sedimentary depth can exceed 200 m.

Key words:organic-rich shale; deep-water shelf; sedimentary microfacies; sedimentary microrelief; Wufeng Formation; Longmaxi Formation

引用:郭伟,李熙喆,张晓伟,兰朝利,梁萍萍,沈伟军,郑马嘉.深水陆棚富有机质页岩沉积微相-微地貌及其对储层的控制作用—— 以四川盆地南部五峰组一龙马溪组页岩为例[J].石油学报,2022,43(8):1089-1106.

Cite :GUO Wei,LI Xizhe,ZHANG Xiaowei,LAN Chaoli,LIANG Pingping,SHEN Weijun,ZHENG Majia. Sedimentary microfacies and microrelief of organic-rich shale in deep-water shelf and their control on reservoirs: a case study of shale from Wufeng-Longmaxi formations in southern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica.2022,43(8):1089-1106.

对海相富有机质页岩沉积环境的认识得益于页岩 气的商业化勘探开发<sup>[1]</sup>。海相富有机质页岩发育在海 侵体系域<sup>[2-5]</sup>(尤其是在凝缩段)或海侵体系域一高位 体系域下部<sup>[6-9]</sup>,其岩相主要以富硅质、富碳质为典型 特征,例如:Barnett 组层状硅质泥岩<sup>[10]</sup>和硅质非钙质 泥岩<sup>[2]</sup>,Marcellus 组硅质碳质细粒泥岩<sup>[11]</sup>,Haynesville 组非层状球粒硅质泥岩、层状球粒硅质泥岩和生 物扰动硅质泥岩<sup>[3,12]</sup>,五峰组一龙马溪组碳质页 岩<sup>[13]</sup>、富含有机质非层状页岩<sup>[14]</sup>和硅质页岩<sup>[15-16]</sup>。部 分海相富有机质页岩中磷质、钙质含量较高,如五峰 组一龙马溪组磷质页岩<sup>[15]</sup>和 Haynesville 组层状球粒 钙质泥岩和生物扰动钙质泥岩<sup>[12]</sup>。

在海相环境中,富有机质页岩可形成在浅海陆棚 或深海斜坡—盆地环境<sup>[17]</sup>。典型浅海陆棚环境沉积的 富有机质页岩包括北美地区 Woodford 页岩、Marcellus 页岩、Fayetteville 页岩、Eagle Ford 页岩<sup>[4,17]</sup>和中国五峰 组中、下部—龙马溪组一段(龙一段)1 亚段 4 小层页 岩<sup>[18-21]</sup>,而 Barnett 页岩和 Haynesville 富有机质页岩 被认为沉积于深海斜坡—盆地环境<sup>[2-3,10,12]</sup>。浅海陆 棚环境位于真光带内且被风暴周期性改造,水深普遍 小于 200 m,所形成富有机质页岩的有机质含量通常 高于深海页岩。其有机质的富集机制包括:①地表径 流和上升流提供营养物质,致使水体非常肥沃、生产力 非常高,尤其是在强烈上升流区域,陆架沉积物中通常 富集有机质和蛋白石;②由于水深较浅,有机质的沉积 途径较短,因而有机质不易在搬运过程中被严重氧化; ③浅海的沉积速率比深海高,有助于有机质在贫氧环 境中保存<sup>[17]</sup>。深海环境形成的富有机质页岩以远洋 沉积为主,其有机质保存机制包括:①远洋沉积区表层 海水的生产力高;②富有机质的浅海陆架沉积物可通 过重力流快速搬运到深海环境埋藏;③沉积物被氧气 最低层(即水体中因大量有机质降解而产生的耗氧层) 覆盖;④ 孔隙水中的含氧量低;⑤ 生物捕食能力匮 乏<sup>[17]</sup>。实际上,沉积水体中氧气最低层的垂向分布位 置决定了富有机质沉积物的分布。在该层覆盖的堆积 区,由于水体中的氧气含量最低,因此不论水体深或 浅,沉积物中的有机质均最有可能被保存且含量较高。

大陆边缘的海底地貌对有机质的保存有显著影响。浅海陆棚上的地貌低地更有利于沉积物中有机质保存,其原因包括:①低地处的水体比上层更孤立,通过海水循环混入的氧气含量少,且有机质的氧化作用(aerobic oxidation)更可能使其缺氧;②地貌低地是低密度有机质的有利捕获场所<sup>[17]</sup>。在高纬度地区,古陆的存在具有阻挡来自两极富氧水体的作用,这可导致低纬度侧陆缘地区的水体更贫氧,如在印度洋北部大陆边缘,其氧气最低层覆盖大陆坡,海底沉积物通常富含有机质<sup>[17]</sup>。在海岭、海床和海岛发育的大陆边缘,海底地形复杂,海水循环受限,氧气最低层覆盖了海底,海底沉积物富含有机质,如加利福利亚地区的大陆边缘<sup>[17]</sup>。

四川盆地及其邻区五峰组一龙马溪组页岩发育在 奥陶纪一志留纪过渡时期,受控于华夏古陆与扬子古 陆之间"陆缘洼地型"活动大陆边缘<sup>[22-24]</sup>。其中,富有 机质页岩主要发育在对比性很好的五峰组 WF2— WF3 笔石带和龙马溪组 LM1—LM4 笔石带内<sup>[25-28]</sup>。 五峰组和龙马溪组富有机质页岩普遍被认为分别属于 两个三级层序的海侵体系域<sup>[7-8,10,29-32]</sup>。五峰组—龙马 溪组页岩沉积在浅水陆棚、半深水陆棚和深水陆棚环 境,但主力产层(五峰组上部—龙一段1 亚段 3 小层) 中的富有机质页岩沉积于深水陆棚环境<sup>[33-36]</sup>,沉积水 深不超过 200 m<sup>[37-40]</sup>,沉积水体具有古生产力高、闭 塞、滞留和缺氧的特征<sup>[19-21,23,31,33-34,38-39,41-44]</sup>。此外,在 自贡—威远地区,五峰组—龙马溪组沉积期海底古地 形的初步研究表明,陆棚低缓台地(低隆起)对富有机 质页岩的分布具有重要影响<sup>[45-46]</sup>。

陆棚环境不仅仅只存在浅水与深水之分。现代大 陆边缘的大陆架、大陆坡和大陆隆内部均存在多种微 环境(微相),海底也发育不同微地貌<sup>[47]</sup>。前人的研究 认为,五峰组一龙马溪组富有机质页岩的沉积亚相和 古地貌多发育在中一浅层深水陆棚区<sup>[48-50]</sup>,但在四川 盆地南部(川南地区),五峰组一龙马溪组页岩多发育 在深层深水陆棚区<sup>[32-35,51-52]</sup>。这种深层深水陆棚亚相 内部是否存在不同的微相和微地貌?如果存在,这些 微相和微地貌差异对页岩的总有机碳(TOC)含量、 物性和储层展布又有何影响?笔者以川南泸州地区 五峰组一龙马溪组富有机质页岩段(五峰组一龙一 段1亚段3小层)为研究对象,尝试研究其深水陆棚 亚相内部沉积微相、微地貌的构成及其沉积模式,并 探讨深水陆棚沉积微相-微地貌对深层页岩储层质量 的影响。

### 1 区域地质概况

川南地区深层五峰组一龙马溪组在构造上整体呈 北高南低展布。其中,北部地层受控于 NE—SW 向 褶皱构造,南部地层受控于 EW 向和 SN 向褶皱构 造,褶皱普遍具有窄背斜一宽向斜组合特征。断层 属于褶皱伴生构造,以逆断层为主,主要发育在背斜 的陡倾翼部,北部以发育 NE 向断层为主,南部以发 育 NE 向和 SN 向断层为主、EW 向断层为辅。川南 泸州地区五峰组一龙马溪组主力产层主要受控于深 水陆棚亚相,向 NW 方向,从深水陆棚向浅水陆棚过 渡(图 1)。



图 1 四川盆地五峰组沉积晚期—龙马溪组沉积早期岩相古地理特征及研究区井位分布(岩相古地理据文献[51]修改) Fig. 1 Lithofacies paleogeographic characteristics from Upper Wufeng Formation to Lower Longmaxi Formation in Sichuan Basin and well location distribution in the study area

川南地区五峰组下部岩性主要为灰色钙质页岩夹 泥质灰岩,其 TOC 含量低于 2%;中一上部岩性主要 为黑色含碳质页岩或碳质页岩,TOC 含量常大于 2%;顶部岩性为观音桥段灰岩。川南地区龙一段1亚 段1小层—3小层的岩性以黑色碳质页岩为主,TOC 含量最高,普遍大于 3%;龙一段1亚段 4 小层的岩性 主要为含碳质页岩,TOC 含量多小于 2%(图 2)。根 据研究区(川南泸州地区)的钻井地层特征(图 3)分 析,五峰组、龙一段1亚段1小层—2小层的地层厚度 分布较为稳定,仅在局部存在厚度变薄,而龙一段1亚 段3小层的厚度则有向南加厚的趋势,这导致研究区 五峰组—龙一段1亚段3小层的总厚度呈向南变 厚(图 3),同时也反映在龙一段1亚段3小层沉积期 研究区的沉降中心在西南部。 川南地区在五峰组沉积早期以发育浅水灰泥质 陆棚沉积为主;五峰组沉积中期发生海侵,以发育深 水硅泥质陆棚沉积为主;五峰组沉积晚期发生短暂 全球性冰川事件,海平面下降,堆积了观音桥段介壳 灰岩<sup>[22-24,28]</sup>。川南地区在龙马溪组沉积早期(龙马溪 组一段1亚段1小层沉积期)海侵迅速扩大,广泛分布 深水硅质陆棚沉积,陆源碎屑供应受限;至龙马溪组一 段1亚段2小层一3小层沉积期,随着海侵过程放缓,



Fig. 2 Comprehensive stratigraphic characteristics from Wufeng Formation to Member 1 of Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin



图 3 泸 204 井一泸 207 井地层对比(剖面位置见图 1) Fig. 3 Stratigraphic correlation from Well Lu204 to Well Lu207

陆源碎屑供应增加,以发育深水硅泥质陆棚沉积为主; 至龙马溪组一段亚段 4 小层沉积期,海平面保持在高 位,加积特征明显,以发育半深水泥质或钙泥质陆棚沉 积为主<sup>[20-26]</sup>。

### 2 五峰组一龙马溪组深水陆棚页岩微 相、微地貌的划分

2.1 深水陆棚页岩沉积微相、微地貌的表征方法

沉积微相和微地貌是两个不同的研究领域,需要 分别采取不同的研究方法。对五峰组—龙马溪组富有 机质页岩沉积微相的分析立足于前期认识,即这些富 有机质页岩沉积于深水陆棚亚相环境<sup>[19-21,32-34,36]</sup>。基 于沉积亚相,页岩沉积微相的划分主要根据岩相类型、 矿物含量的平面分布、岩心沉积学描述和岩石薄片鉴 定结果进一步确定。页岩岩相的划分参考了王玉满 等<sup>[53]</sup>的方案。为便于岩相分类方案应用并考虑深层 在温度升高情况下泥质含量对页岩岩石力学性质的潜 在影响,在建立的新岩相分类方案中,硅质端元的组分 中不考虑长石含量(图 4),这是由于考虑长石和硅质 是完全不同的组分,加入长石组分将夸大硅质的影响。 在页岩岩相的划分中,笔者统一使用了测井解释的矿



物含量数据,以弥补岩心实验数据较少和标准不统一的缺陷。其中,用于测井解释矿物含量的模型依据全岩 X 射线衍射分析所得的矿物含量数据和岩石薄片鉴定的矿物含量数据进行标定。在分析矿物含量的平面分布特征时,所使用的组分参数包括硅质、碳酸盐、黏土矿物、长石和黄铁矿。

限于资料占有程度,笔者对微地貌单元的划分主 要考虑水体的相对深度,并结合岩相组合和沉积微相 的平面分布特征进行分析。其中,水体深度根据中国 南海大陆边缘海底表层沉积物中的碳酸盐含量与水深 的统计关系(图 5)确定<sup>[54]</sup>。





Fig. 5 Relationship between mean carbonate content of seafloor surface sediments and water depth in western South China Sea

### 2.2 矿物含量的平面分布特征

在大陆边缘,页岩中主要组分(黏土矿物、硅质、碳 酸盐和长石)在平面上的变化规律对分析岩相(或岩相 组合)和沉积微相具有重要的指示作用。碳酸盐含量 的高低能够指示水体的浅深、沉积物离岸距离的远近、 冷泉区或上升流区<sup>[54-55]</sup>。硅质来自陆源区和硅质生 物;当沉积物远离陆源区时,硅质含量起先会出现降 低,在陆源影响降低后,随着硅质生物发育,硅质含量 降低的速度将减缓,并可能随着硅质生物的繁盛反而 升高。黏土矿物可能来自陆源区或大气层,其本身为 片状矿物,可呈悬浮状态搬运;由于黏土矿物能够与有 机质结合成混合物,因此大陆边缘的黏土矿物含量在 平面上的变化比较复杂。长石主要来自陆地,距离陆 源区越远,长石含量往往越低,因此长石含量的分布能 够指示陆源位置;长石的其次来源为火山喷发,局部地 区长石含量的升高可能反映火山作用的影响。

在研究区五峰组页岩中,碳酸盐含量表现出在 SE-NW 向的坛 101 井-自 201 井-线较高,长石含 量在坛 101 井一古 202-H1 井一线较高,硅质含量变 化复杂,这反映物源可能主要来自东南侧的黔中古陆 或水下高地。而在龙马溪组页岩中,矿物含量的变化 则反映研究区该组的物源更可能来自北侧的川中水下 高地。以龙一段1亚段1小层为例,页岩中的碳酸盐 含量在研究区的北西部最高,其次为北中部一北东部, 其余地区的碳酸盐含量普遍小于 15%[图 6(a)],这反 映研究区北西部的水体较浅,其次为北部的中部-北 东部,而中部和南部的水体较深;长石含量在西北 部一北部较高,普遍大于 4% [图 6(b)], 反映物源来 自北侧川中水下高地;硅质含量普遍较高,尤其在研 究区中部和南部最高,可达 70% [图 6(c)]; 黏土矿 物含量在研究区中部泸 206 井区和东部坛 101 井一 来101H井区最高,达40%,其余大部分地区低于 30%,局部井点低于10%[图6(d)]。总体上,硅质 和长石含量的分布特征可反映研究区龙马溪组页岩 的物源来自北侧的川中水下高地,碳酸盐含量的变 化可反映在龙马溪组沉积期研究区北部水体浅、南 部水体较深,而局部较高的黏土矿物含量可能与某 类事件性沉积有关。

### 2.3 岩相特征

研究区五峰组一龙一段1亚段3小层富有机质 页岩段的单井岩相在垂向上的组合包括4种类型: ①富泥型(以泸206井为代表),其中的五峰组一龙一 段1亚段3小层以混合页岩一含黏土硅质页岩为 主(图7);②富硅型(分布在研究区西北部,以自205 井为代表),其中的五峰组以硅岩、硅质页岩为主,龙一 段1亚段1小层—3小层以硅质页岩、硅岩为主;③硅-泥型(分布在研究区北部一中部,以泸208井为代表), 其中的五峰组以含黏土硅质页岩、硅质页岩、硅岩为 主,龙一段1亚段1小层—3小层以硅质页岩、硅岩为 主;④混合型(分布在研究区南部,以泸204井为代 表),其中的五峰组为硅质页岩、混合页岩、龙一段1亚 段1小层—3小层以含黏土硅质页岩、建局页岩 支(图8)。

剖面上,五峰组和龙马溪组各小层的岩相类型复杂。五峰组沉积早期以发育混合页岩、含黏土硅质页岩为主,中一晚期以发育硅质页岩、含黏土硅质页岩、混合页岩和硅岩为主;龙一段1亚段1小层和2小层中硅质页岩和硅岩极其发育,局部发育含黏土硅质页岩和混合页岩;龙一段1亚段3小层下部岩性以硅质页岩为主,含黏土硅质页岩和硅岩相对发育,中一上部岩性以含黏土硅质页岩和硅质页岩为主(图 8)。



图 6 龙一段 1 亚段 1 小层页岩中碳酸盐、长石、硅质和黏土矿物含量的分布

Fig. 6 Distribution of carbonate, feldspar, silica and clay mineral in shale of submember 1 of Member 1 of Longmaxi Formation

平面上,五峰组富有机质页岩的岩相组合主要为 硅岩+硅质页岩,其次为含钙硅混合页岩+混合页 岩+硅质页岩+含黏土硅质页岩;龙一段1亚段1 小层(图9)和2小层的岩相组合均以硅岩+硅质页 岩为主;龙一段1亚段3小层的岩相组合以硅岩+ 硅质页岩+含黏土硅质页岩、硅质页岩+含黏土硅 质页岩为主。

总体上,研究区五峰组一龙一段1亚段3小层富 有机质页岩的岩相主要为硅质页岩、含黏土硅质页岩 和混合页岩3种类型,其次为硅岩、黏土质页岩和含钙 硅混合页岩。

### 2.4 沉积类型

根据对五峰组一龙马溪组龙一段1亚段3小层富 有机质页岩段的岩心描述和岩石薄片观察,其沉积类 型除半远洋沉积、事件性沉积和等深流沉积外,还发育 频繁出现但厚度极薄的硬底和可能的冷泉沉积。其 中,以半远洋沉积和浊流沉积为主,等深流居次。

2.4.1 半远洋沉积

半远洋沉积构成了五峰组一龙一段1亚段3小层 富有机质页岩的主体,其沉积物来源包括自生钙质生 物和硅质生物碎屑、陆源漂浮黏土矿物和粉砂以及火 山灰尘,沉积过程以垂直沉降为主,沉积构造以弱水平 层理为主[图 10(a)]。

2.4.2 事件性沉积

目的层内的事件性沉积包括浊流沉积、火山沉积、 泥石流和风暴流,这些沉积夹持于半远洋沉积之中,厚 度较薄,普遍小于 10 cm。

细粒浊流沉积主要为粉砂—泥质浊流沉积,其垂 向鲍玛序列以发育 Te 段(页岩、泥岩段)为主,Td 段(平行纹层段)极薄[图 10(b)]。在五峰组—龙一段 1 亚段 3 小层富有机质页岩中,细粒浊流沉积所占比 例仅次于半远洋沉积。



Fig. 7 Lithofacies and sedimentary microfacies from Wufeng Formation to the third interval of submember 1 of Member 1 of Longmaxi Formation in Well Lu206



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net





图 9 龙一段 1 亚段 1 小层的典型岩相组合

Fig. 9 Typical lithofacies association of the first interval of submember 1 of Member 1 of Longmaxi Formation

火山沉积的成分以凝灰岩、沉凝灰岩为主,颜色较浅,其顶、底部与富有机质页岩呈突变接触[图 10(c)]。 火山沉积的沉积构造以块状为主,也可见正递变 层理。

泥石流中的砾石为撕裂状泥砾,分选差,呈杂乱堆 积[图 10(d)],可能为斜坡上部不稳定堆积垮塌所致。 泥石流的分布局限,仅在个别井中可见。

风暴流沉积以观音桥段发育的介壳灰岩为典型, 其中,生物碎屑的破碎程度差异较大,生屑的杂乱堆积 反映了快速堆积的过程。在风暴流沉积底部,冲刷面 非常醒目[图 10(e)]。风暴流沉积的厚度相对较厚, 但普遍小于 50 cm。

2.4.3 等深流沉积

等深流沉积包括泥质、砂泥质和砂质等深流。泥 质等深流沉积中可见生物掘穴构造;砂泥质等深流中可 见块状构造,成分以细砂为主,分选较好[图 10(f)]。等 积岩中的砂层厚度较薄,普遍小于 10 cm;等积岩在垂 向上夹持于半远洋沉积之中。等深流沉积在五峰组— 龙一段 1 亚段 3 小层均可出现。 2.5 深水陆棚页岩沉积微相、微地貌的类型与划分依据
 2.5.1 深水陆棚沉积微相的划分

根据深水陆棚沉积亚相内的矿物含量、岩相类型 和沉积类型,可将深水陆棚亚相划分为6种沉积微相, 包括钙质陆棚、钙-硅质陆棚、钙-硅-泥混合陆棚、硅-泥 质陆棚、硅质陆棚和富泥扇,其划分依据见表1。

2.5.2 深水陆棚沉积微地貌的划分

根据目的层的碳酸盐含量,结合中国南海海底表 层沉积物碳酸盐含量与水深的统计关系<sup>[54]</sup>,预测研究 区目的层的水深多小于1500m。结合现代大陆边缘 海底地貌的考察成果<sup>[47,55]</sup>,将深水陆棚微地貌划分为 5种地貌单元,即陆棚高地、陆棚斜坡、陆棚沟、陆棚丘 和陆棚平原,其划分依据见表2。

### 3 深水陆棚沉积微相-微地貌的平面展 布特征

川南泸州地区富有机质页岩主要分布在五峰组沉 积中一晚期,且主要分布在研究区中部、中北部及东北 部,其沉积微相-微地貌以硅质陆棚平原为主,其次为 硅-泥质陆棚平原,钙质陆棚基本出现在研究区西北角 的自 201 井区。

五峰组沉积晚期[图 11(a)],研究区东南部的海底 地形较高,发育钙质陆棚高地、钙-硅质陆棚高地,并向 NW方向从钙-硅-泥陆棚斜坡向硅-泥质陆棚平原过渡, 而硅质陆棚平原、硅-泥质陆棚平原呈 NE-SW 向分布 在研究区中西部-北部;古 205-H1 井区和来 101 井区 发育富泥扇;自 201 井区发育硅-泥质陆棚斜坡。



(a)半远洋沉积,弱水平层理,龙一段1亚段2小层,阳101井353210~353220m;(b)粉砂—泥质浊流,发育Td(极薄层灰色粉砂岩)—Te(相对厚层黑色泥岩)段,龙一段1亚段3小层,坛101井333470~333480m;(c)凝灰岩,块状构造,内部和上部泥岩中可见黄铁矿化火山弹(箭头),龙一段1亚段2小层,洞201-H1井369290~36929m;(d)泥石流沉积,撕裂状泥砾堆积杂乱,五峰组,坛101井333950~333955m;(e)风暴成因介壳灰岩,底部冲刷面(箭头)清晰可见,观音桥段,古202-H1井382884~382896m;(f)砂泥质等积岩,泥岩中可见生物扰动构造,龙一段1亚段2小层,来101井404273~404280m。

图 10 五峰组一龙一段 1 亚段 3 小层富有机质页岩的典型岩心照片

Fig. 10 Typical core images of organic-rich shale from Wufeng Formation to the third interval of submember 1 of Member 1 of Longmaxi Formation

| 表 1 | 深水陆棚沉积微相的划分 |
|-----|-------------|
|     |             |

| Table 1 | Classification | of | sedimentary | microfacies  | in | deep | water | shelf |
|---------|----------------|----|-------------|--------------|----|------|-------|-------|
| able 1  | Clussification |    | seamentary  | mici oracies |    | uccp | mutur | Shen  |

| 类型        | 划分依据   |
|-----------|--|
| 钙质陆棚      | 碳酸盐含量 $\geq 50\%$ ;以发育灰岩和钙质页岩为主;沉积类型主要为半远洋沉积或钙质生物沉积                                    |
| 钙硅质陆棚     | 碳酸盐含量为 $30\%\sim50\%$ ,硅质含量为 $55\%\sim65\%$ ;以发育含钙硅混合页岩、混合页岩、                          |
|           | 硅质页岩为主;沉积类型主要为半远洋沉积  |
| 钙₋硅₋泥混合陆棚 | 碳酸盐含量为 $15\% \sim 30\%$ ,硅质含量为 $45\% \sim 60\%$ ,泥质含量为 $15\% \sim 30\%$ ;以发育混合页岩、硅质页岩和 |
|           | 含黏土硅质页岩为主;沉积类型主要为半远洋沉积和细粒浊流  |
| 硅−泥质陆棚    | 黏土矿物含量 $\geq$ 25 $\%$ ,硅质含量为 50 $\%\sim$ 65 $\%$ ;以发育含黏土硅质页岩、硅质页岩、黏土质页岩和               |
|           | 混合页岩为主;沉积类型主要为半远洋沉积和细粒浊流   |
| 硅质陆棚      | 硅质含量 $\geq 65\%$ ;以发育硅岩和硅质页岩为主;沉积类型主要为半远洋沉积或硅质生物沉积                                     |
| 富泥扇       | 斜坡下部一陆棚平原上部的富泥堆积体,其中的泥质远源浊流或等深流可能参与沉积;泥质含量>30%。  |

#### 表 2 深水陆棚微地貌的划分

Table 2 Classification of microrelief in deep water shelf

| 类型   | 划分依据  |
|------|---|
| 陆棚高地 | 向陆侧接浅水陆棚,为海底高地,包括钙质陆棚高地和钙-硅质陆棚高地,水深往往小于 600 m                               |
| 陆棚斜坡 | 位于陆棚高地向陆棚平原过渡地区,上部地形相对较陡、下部较缓,为钙-硅-泥混合陆棚所控制,水深为 $600\!\sim\!1000\mathrm{m}$ |
| 陆棚沟  | 位于陆棚斜坡下部一陆棚平原上部的沟状地貌,可能为硅-泥质陆棚或硅质陆棚,水深为 800~1 200 m                         |
| 陆棚丘  | 陆棚斜坡下部──陆棚平原上部的丘状凸起,可能为冷泉发育区,发育钙-硅-泥混合陆棚或钙-硅陆棚,水深为 800~1 200 m              |
| 陆棚平原 | 相对平缓的海底地貌,硅质陆棚、硅-泥质陆棚发育,水体最深(1000~1500m)                                    |







龙一段1亚段1小层沉积期[图11(b)],研究区 西北部地形较高,为陆棚高地所控制,向南通过钙-硅-泥陆棚斜坡向硅-泥质陆棚平原过渡,以发育硅质陆棚 平原、硅-泥质陆棚平原为主;在泸206井区和坛101 井一来101井一带发育富泥扇;钙-硅-泥混合陆棚丘 分布在泸204井、阳101H2-7井附近;斜坡下部陆棚 沟的沉积微相可能为硅质陆棚或硅-泥质陆棚。

龙 - 段 1 亚 段 2 小 层 沉 积 期 [图 11(c)], 研 究 区

以发育硅质陆棚平原为主,且规模较前期更大。在研 究区西北部和东北部,由于地形相对较高,硅-泥质陆 棚平原、富泥扇的面积较龙一段1亚段1小层沉积期 缩小,在阳101H2-7井区陆棚丘的面积扩大,而北侧 地形也因硅质陆棚平原向北局部推进而变得复杂。

龙一段1亚段3小层沉积期[图11(d)],研究区 以发育硅质陆棚平原、硅-泥质陆棚平原为主,尤其是 硅-泥质陆棚平原面积较前期大大增加,这反映研究区 泥质输入加大、水体变浅、地形差异减小;陆棚沟、陆棚 丘、陆棚斜坡分布的面积较小。

总体上,研究区五峰组一龙一段1亚段3小层的 深水陆棚沉积微相主要表现为硅质陆棚、硅-泥质陆棚 和钙-硅-泥混合陆棚,沉积微地貌以陆棚平原和陆棚 斜坡为主,局部发育陆棚高地、陆棚丘并使得深水陆棚 地形复杂化,形成闭塞环境,有利于有机质保存。垂向 上,微地貌的演化反映研究区的海底地形由五峰组沉 积晚期表现出的 SE 方位较高演化为在龙一段1亚段 1小层—2小层沉积期 NW 方位较高,至龙一段1亚段 3小层沉积期微地貌差异逐渐缩小。从五峰组沉积 晚期到龙一段1亚段1小层沉积期,尽管海底地形有巨 大变化,但龙一段1亚段1小层的岩相组合以硅岩+硅 质页岩最为普遍(图9),这表明海平面的快速上升对 龙一段1亚段1小层沉积的控制作用大于海底地形对 沉积的控制作用。

### 4 讨 论

4.1 深水陆棚沉积微相→微地貌对储层的控制作用4.1.1 沉积微相对储层的控制作用

页岩的储集能力受厚度、孔隙度和 TOC 含量影 响。由于五峰组—龙一段1亚段3小层富有机质页岩 的厚度相对薄,导致基于单个因素不能客观地评价目 的层页岩的储集能力,要综合考虑3个因素的影响。 笔者构建了页岩储集系数(储集系数=地层厚度×孔 隙度×TOC 含量)新参数,以评价目的层页岩的储层 品质。龙一段1亚段1小层为研究区储层品质最好的 层位,统计显示该层深水陆棚和硅质陆棚的储集系 数最高,钙-硅质陆棚其次,富泥扇和硅-泥质陆棚较 低。这表明泥质含量较低的钙-硅-泥混合陆棚和硅质 陆棚具有最好的储集能力(表3),泥质含量升高,储集 能力降低。需要说明的是,对龙一段1亚段1小层硅-泥质陆棚微相的分析仅有一口井,代表性稍差。

4.1.2 沉积微地貌对储层的控制作用

沉积微地貌对富有机质页岩储层的影响表现在对 地层厚度的控制方面。以龙一段1亚段1小层为例, 陆棚平原处地层的平均厚度最大,陆棚斜坡和陆棚沟 居次,陆棚丘和陆棚高地处地层厚度最小(表 3),即水 下地貌相对越高,沉积地层的厚度相对越薄,这可能与 水下相对地貌高地、斜坡更易受到水下底流侵蚀有关。 不同类型的深水底流<sup>[56-58]</sup>,包括风驱动底流、温盐底流 和深水潮汐底流,可能是导致深水陆棚相对高地或斜 坡上的细粒物质(粉砂、泥级沉积物)被卷起并搬运至 深处陆棚平原的原因,由此也导致海底正向地貌单元 上地层厚度较薄而负向地貌单元内沉积较厚。这种认 识与前人在中一浅层页岩地貌单元研究中取得的认 识<sup>[45-46]</sup>相一致。

表 3 深水陆棚沉积微相、微地貌的储层参数 Table 3 Reservoir parameters of sedimentary microfacies and

microrelief in deep-water shelf

| 沉;   | 积微相⊣微地貌类型 | TOC/<br>% | 孔隙度∕<br>% | <b>地层厚度</b> /<br>m | <b>储集系数</b> /<br>m |
|------|-----------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|
| 沉积微相 | 钙−硅质陆棚    | 5.74      | 5.86      | 1.17               | 38.32              |
|      | 钙−硅−泥混合陆棚 | 5.59      | 4.87      | 1.57               | 42.99              |
|      | 硅−泥质陆棚    | 4.98      | 5.68      | 0.72               | 20.21              |
|      | 硅质陆棚      | 4.96      | 4.59      | 1.78               | 40.48              |
|      | 富泥扇       | 3.56      | 5.51      | 2.15               | 36.77              |
| 微地貌  | 陆棚高地      | 5.74      | 6.19      | 1.05               | 36.63              |
|      | 陆棚斜坡      | 5.75      | 4.74      | 1.67               | 45.69              |
|      | 陆棚沟       | 4.98      | 4.39      | 1.58               | 34.78              |
|      | 陆棚丘       | 5.73      | 5.36      | 1.35               | 40.86              |
|      | 陆棚平原      | 4.38      | 5.18      | 1.87               | 37.98              |

### 4.2 沉积模式

研究区五峰组—龙一段1亚段3小层深水陆棚沉 积微相-微地貌随水体加深的演化过程(图 11)反映: ①沉积微相表现为钙-硅质陆棚→钙-硅-泥混合陆棚→ 硅-泥质陆棚(富泥扇)→硅质陆棚;②沉积微地貌表现 为陆棚高地→陆棚斜坡(陆棚沟、陆棚丘)→陆棚平 原(陆棚丘)。微地貌与微相的变化具有较好相关性, 即随着水体加深,深水陆棚沉积物中碳酸盐的含量降 低,泥质含量先增加再降低。其中,碳酸盐含量的降低 是由于方解石随水体加深导致溶蚀加速而造 成<sup>[47,54-55,59]</sup>, 而泥质含量的变化可能是由于在深水陆 棚的相对高地上细粒沉积物被内波、内潮汐侵蚀、搬运 至陆棚平原而造成,由此导致陆棚高地或陆棚斜坡处 泥质含量较低,而陆棚平原近陆棚斜坡处泥质含量较 高,形成硅-泥质陆棚或富泥扇。伴随着大量来自相对 高地的泥质在近陆棚斜坡处沉积,硅质生物沉积的比 例也增加,最终由硅质陆棚微相占据了大部分陆棚平 原。笔者根据这一认识建立了研究区五峰组一龙马溪 组龙一段1亚段3小层的深水陆棚沉积微相-微地貌 沉积模式(图 12):在深水陆棚环境中,随着水体加深, 沉积微相由钙-硅质陆棚经钙-硅-泥混合陆棚过渡到 硅-泥质陆棚(或富泥扇),并最终演化为硅质陆棚。这 种横向相变规律可对深水陆棚沉积微相的划分与预测 提供科学支持。

受 Loucks 等<sup>[10]</sup> 沉积模式启发, Liang 等<sup>[60]</sup> 根据 川南地区五峰组—龙马溪组页岩的岩相、沉积构造、生 物种类和矿物成分提出了斜坡—深海沉积模式, 认为 富有机质页岩的发育受与上升流相关的悬浮沉降沉积 控制, 而贫有机质页岩则与浊流沉积有关, 但未给出沉



Fig. 12 Sedimentary model of organic-rich shale from Wufeng Formation to the third interval of submember 1 of Member 1 of Longmaxi Formation

积水体的深度范围。笔者根据研究区五峰组一龙马溪 组富有机质页岩的沉积微相-微地貌特征,结合对沉积 模式的认识认为:斜坡一深海沉积模式内部存在不同 的微相-微地貌单元;在研究区以外的川南地区,尤其 是在 NE 方位或 SE 方位,由于陆棚丘或陆棚高地的 规模可能较大,限制了下部水体的循环,从而导致水体 缺氧。笔者提出的沉积模式与北美地区 Midland 盆地 上宾夕法尼亚统 Cline 段富有机质页岩的沉积模式<sup>[61]</sup> 颇为相似,但后者的页岩中富陆源碎屑或钙质碎屑重 力流沉积的占比更高,且被认为沉积于被海山局限的 环陆架(低水位期的陆源碎屑质陆架或高水位期的钙 质陆架)斜坡一盆地环境,因受海山隔挡而导致缺乏上 升流沉积<sup>[61]</sup>。笔者提出的沉积模式认为,在川南地区 五峰组一龙马溪组富有机质页岩发育时期,海底存在 丘状地貌或相对高地,尽管其规模小于海山,虽不能完 全阻挡上层海水循环,却能够发育上升流并阻碍下部 水体循环,而厌氧环境的形成更可能是受海底地貌与 有机质耗氧过程双重控制。笔者提出的沉积模式也与 北非一阿拉伯一土耳其南部地区下志留统"热页岩"沉 积模式<sup>[62-63]</sup>有相似之处,后者的页岩覆盖在砂岩、砂砾 岩之上,其成因被认为是沉积于奥陶纪末期冰蚀作用 形成的陆架谷地上,形成于海侵初期,受陆架谷地局限 而阻隔了与外海的循环,并在缺氧的沉积环境下使得 有机质保存下来<sup>[62-63]</sup>;所不同的是,"热页岩"发育的陆 架谷地可能因沉积水体浅而导致其对沉积环境的限制 性更好,且受上升流影响显著。目前,制约"热页岩"沉 积模式的一个问题是,既然陆架谷地对沉积环境的限 制性非常强,为何能够广泛发育上升流?考虑到现代 大陆边缘环境中上升流发育在大陆架外缘<sup>[47]</sup>,笔者推 测陆架谷地对沉积环境的限制性程度可能有限,水体 也并非较浅。

#### 4.3 沉积水深

川南地区五峰组—龙马溪组富有机质页岩普遍被 认为沉积于深水陆棚环境[19-21,32-35],其沉积水深依据 笔石生态学分析普遍认为不超过 200 m,即在半耙笔 石的生活底界以深[21,32,37]。然而,基于笔石生态学判 断沉积水深的依据本身存在不确定性,这是由于笔石 为浮游生物,其在水体中生活的深度本身存在很大的 变化范围,此外,浮游生物保存的水体底部深度可能远 大于浮游生物生活的水体深度。目前,对于四川盆地 五峰组—龙马溪组富有机质页岩的沉积水深,学界普 遍依据笔石生态学来判断,这主要是由于没有找到其 他更适合判断页岩沉积古水深的方法。笔者基于中国 南海海底沉积物中碳酸盐含量与水深的统计关系提出 了根据龙马溪组页岩中的碳酸盐含量来反推页岩沉积 期水体深度的方法,应用该方法得出的页岩沉积水深, 其结果与主要沉积类型的分析结果相吻合,即五峰 组一龙马溪组页岩以半远洋和浊流沉积为主,形成于 具有一定坡度的静水大陆边缘环境。事实上,水深超 过 200 m 的陆棚(大陆架)在现代大陆边缘环境中不乏 实例,如加拿大东岸陆架外缘的水深大于 200 m、挪威 岸外陆架外缘的水深为 270~360 m、阿根廷岸外陆架 外缘的水深大于 350 m 和西澳大利亚岸外陆架外缘的 水深为 180~1800 m<sup>[47]</sup>。王玉满等<sup>[20]</sup> 曾提出川南地 区五峰组一龙马溪组在鲁丹阶沉积期的沉积水深超过 200 m。据此分析,五峰组一龙马溪组富有机质页岩很 可能沉积于水深超过 200 m 的深水陆棚边缘环境。对 这一沉积水深的认识是根据现代海底沉积物中碳酸盐 含量与水深的关系得到的,还需要将来发展更可靠的 沉积水深预测方法来验证。另外,现代海底沉积物中 的碳酸盐含量可能在埋藏成岩过程中因发生溶蚀作用 而降低,这可能在一定程度上影响该方法的预测精度。 4.4 深水富有机质页岩沉积微相-微地貌的研究方法

深水陆棚页岩的颜色普遍较深,指示其形成于厌 氧沉积环境,但仅凭借肉眼观察难以区分究竟是还原 环境还是强还原环境,需要应用地球化学方法进行分 析。然而,对于强还原环境内存在的沉积微相差异,地 球化学方法难以提供更多支持,例如,当 U/Th 比值 超过 1. 25 时,越高的 U/Th 值并不一定意味着沉积环 境的还原性更强。深水陆棚页岩的粒度普遍较细,肉 眼观察往往难以精细表征其粒度变化,这反映其沉积 时的水动力强弱的差异小。粒度变化不明显导致岩石 的自然伽马测井特征差异小,由此也导致在利用测井 资料来反映深水页岩的沉积微相时受限。因此,深水 页岩的沉积微相研究主要基于岩心的沉积学描述[主 要通过分析硬底(hardground)和斑脱岩等特殊岩性、 沉积构造以及古生物学特征]、岩石薄片观察和 X 射 线衍射实验来确定岩相类型,并结合对沉积类型的判 识进行沉积微相划分(表 1)。深水页岩的沉积微地貌 研究需要综合沉积类型(如典型沉积序列)、沉积微相 的平面分布规律、沉积水深、地震相特征(如超覆)、古 生态学特征(如遗迹化石特征)以及相似环境的现代海 底地貌调查结果等来确定。目前,对川南地区目的层 开展的沉积微地貌分析在一定程度上仍受可利用的全 井段岩心资料少、地震相资料识别精度差、缺乏古生态 学研究证据等因素限制,这是今后深水页岩沉积微地 貌研究需要进一步解决的问题。

### 5 结 论

(1)川南泸州地区五峰组一龙一段1亚段3小层 富有机质页岩的岩相主要包括硅质页岩、含黏土矿物 硅质页岩和混合页岩3种类型;沉积类型以半远洋沉 积和浊流沉积为主。

(2) 深水陆棚沉积微相可细分为钙质陆棚、钙-硅 质陆棚、钙-硅-泥混合陆棚、硅-泥质陆棚、硅质陆棚和 富泥扇6种类型,川南泸州地区五峰组一龙一段1亚 段3小层沉积微相以发育硅质陆棚沉积、硅-泥质陆棚 沉积和钙-硅-泥混合陆棚沉积为主;沉积微地貌包括 陆棚高地、陆棚斜坡、陆棚沟、陆棚丘和陆棚平原5种 类型,研究区目的层的沉积微相以发育陆棚平原和陆 棚斜坡为主。

(3)深水陆棚沉积微相通过控制储层的储集能力 而控制富有机质页岩的储层质量,其中,研究区目的层 以钙-硅-泥混合陆棚和硅质陆棚的储层品质最好。沉 积微地貌通过控制富有机质页岩的厚度而影响页岩储 层质量,陆棚平原处具有最厚的储层厚度。

(4)在深水陆棚环境,随着沉积水体加深,沉积微 地貌的演化由陆棚高地经陆棚斜坡(陆棚沟、陆棚丘) 过渡到陆棚平原(陆棚丘),沉积微相的演化由钙-硅质 陆棚经钙-硅-泥混合陆棚过渡到硅-泥质陆棚(或富泥 扇)并最终演化为硅质陆棚。

#### 参考文献

- [1] 邹才能,潘松圻,荆振华,等.页岩油气革命及影响[J].石油学报,2020,41(1):1-12.
   ZOU Caineng,PAN Songqi,JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica,2020,41(1):1-12.
- [2] ABOUELRESH M O, SLATT R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett shale in east-central Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1-22.
- [3] HAMMES U, FRÉBOURG G. Haynesville and Bossier mudrocks: a facies and sequence stratigraphic investigation, East Texas and Louisi-

ana, USA[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 31(1):8-26.

- [4] SLATT R M,RODRIGUEZ N D. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: commonality or coincidence ? [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012,8:68-84.
- [5] HEMMESCH N T, HARRIS N B, MNICH C A, et al. A sequencestratigraphic framework for the Upper Devonian Woodford shale, Permian Basin, West Texas [J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(1):23-47.
- [6] SLATT R M. Sequence stratigraphy of unconventional resource shales[M]//REZAEE R. Fundamentals of gas shale reservoirs. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015:71-88.
- [7] 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.
- [8] 郭旭升.上扬子地区五峰组-龙马溪组页岩层序地层及演化模式
   [J].地球科学,2017,42(7):1069-1082.
   GUO Xusheng. Sequence stratigraphy and evolution model of the Wufeng-Longmaxi shale in the Upper Yangtze area[J]. Earth Science,2017,42(7):1069-1082.
- [9] 张靖宇,陆永潮,付孝悦,等.四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组 一段层序格架与沉积演化[J].地质科技情报,2017,36(4):65-72. ZHANG Jingyu, LU Yongchao, FU Xiaoyue, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary evolution of the Wufeng Formation—the 1st member of Longmaxi Formation in Fuling area, Sichuan Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2017,36(4):65-72.
- [10] LOUCKS R G, RUPPEL S C. Mississippian Barnett Shale: lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):579-601.
- [11] BRUNER K R, WALKER-MILANI M, SMOSNA R. Lithofacies of the Devonian Marcellus shale in the eastern Appalachian basin, U. S. A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 2015, 85(8): 937-954.
- [12] HAMMES U, HAMLIN H S, EWING T E. Geologic analysis of the Upper Jurassic Haynesville shale in east Texas and west Louisiana[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(10):1643-1666.
- [13] 梁超,姜在兴,杨镱婷,等.四川盆地五峰组一龙马溪组页岩岩相 及储集空间特征[J].石油勘探与开发,2012,39(6):691-698. LIANG Chao,JIANG Zaixing,YANG Yiting, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2012,39(6):691-698.
- [14] 刘树根,马文辛,LUBA J,等. 四川盆地东部地区下志留统龙马 溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报,2011,27(8):2239-2252.
   LIU Shugen, MA Wenxin, LUBA J, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan Basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011,27(8):2239-2252.
- [15] 王志峰,张元福,梁雪莉,等.四川盆地五峰组—龙马溪组不同水动力成因页岩岩相特征[J].石油学报,2014,35(4):623-632.
   WANG Zhifeng, ZHANG Yuanfu, LIANG Xueli, et al. Characteristics of shale lithofacies formed under different hydrodynamic conditions in the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4):623-632.
- [16] 赵建华,金之钧,金振奎,等.四川盆地五峰组一龙马溪组页岩岩

相类型与沉积环境[J]. 石油学报,2016,37(5):572-586.

ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, JIN Zhenkui, et al. Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(5):572-586.

- [17] TRABUCHO-ALEXANDRE J. Organic matter-rich shale depositional environments [M] // REZAEE R. Fundamentals of gas shale reservoirs. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015:21-45.
- [18] LI Yizhen, WANG Xingzhi, WU Bin, et al. Sedimentary facies of marine shale gas formations in southern China; the Lower Silurian Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin[J]. Journal of Earth Science, 2016, 27(5): 807-822.
- [19] 牟传龙,王秀平,王启宇,等. 川南及邻区下志留统龙马溪组下段 沉积相与页岩气地质条件的关系[J]. 古地理学报,2016,18(3): 457-472.

MOU Chuanlong, WANG Xiuping, WANG Qiyu, et al. Relationship between sedimentary facies and shale gas geological conditions of the Lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(3):457-472.

- [20] 王玉满,李新景,董大忠,等. 上扬子地区五峰组一龙马溪组优质 页岩沉积主控因素[J]. 天然气工业,2017,37(4):9-20.
   WANG Yuman,LI Xinjing,DONG Dazhong, et al. Main factors controlling the sedimentation of high-quality shale in Wufeng-Longmaxi Fm,Upper Yangtze region[J]. Natural Gas Industry, 2017,37(4):9-20.
- [21] 蒲泊伶,董大忠,王凤琴,等.川南地区龙马溪组沉积亚相精细划分 及地质意义[J].中国石油大学学报:自然科学版,2020,44(3): 15-25.

PU Boling, DONG Dazhong, WANG Fengqin, et al. Re-division and evolution of sedimentary subfacies of Longmaxi shale in southern Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2020, 44(3):15-25.

[22] 苏文博,李志明,ETTENSOHN F R,等. 华南五峰组一龙马溪组 黑色岩系时空展布的主控因素及其启示[J]. 地球科学:中国地 质大学学报,2007,32(6):819-827.

SU Wenbo, LI Zhiming, ETTENSOHN F R, et al. Distribution of black shale in the Wufeng-Longmaxi formations (Ordovician-Silurian), South China; major controlling factors and implications [J]. Earth Science; Journal of China University of Geosciences, 2007,32(6):819-827.

[23] 王清晨,严德天,李双建.中国南方志留系底部优质烃源岩发育的构造-环境模式[J].地质学报,2008,82(3):289-297.
 WANG Qingchen, YAN Detian, LI Shuangjian. Tectonic-envi-

ronmental model of the Lower Silurian high-quality hydrocarbon source rocks from South China[J]. Acta Geologica Sinica,2008, 82(3):289-297.

- [24] 戎嘉余,陈旭,王怿,等. 奥陶一志留纪之交黔中古陆的变迁:证据与启示[J]. 中国科学:地球科学,2011,41(10):1407-1415.
   RONG Jiayu, CHEN Xu, WANG Yi, et al. Northward expansion of central Guizhou oldland through the Ordovician and Silurian transition: evidence and implications[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2011,41(10):1407-1415.
- [25] 樊隽轩, MELCHIN M J, 陈旭, 等. 华南奥陶一志留系龙马溪组黑 色笔石页岩的生物地层学[J]. 中国科学:地球科学, 2012, 42(1): 130-139.

FAN Junxuan, MELCHIN M J, CHEN Xu, et al. Biostratigraphy and geography of the Ordovician-Silurian Lungmachi black shales in South China[J]. Science China Earth Sciences ,2011,54(12): 1854-1863.

- [26] 陈旭,樊隽轩,张元动,等. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆 盖区内的划分与圈定[J]. 地层学杂志,2015,39(4):351-358. CHEN Xu,FAN Junxuan,ZHANG Yuandong, et al. Subdivision and delineation of the Wufeng and Lungmachi black shales in the subsurface areas of the Yangtze platform[J]. Journal of Stratigraphy,2015,39(4):351-358.
- [27] 王红岩,郭伟,梁峰,等.四川盆地威远页岩气田五峰组和龙马溪 组黑色页岩生物地层特征与意义[J].地层学杂志,2015,39(3): 289-293.

WANG Hongyan,GUO Wei,LIANG Feng,et al. Biostratigraphy characteristics and scientific meaning of the Wufeng and Longmaxi Formation black shales at well Wei 202 of the Weiyuan shale gas field,Sichuan Basin[J]. Journal of Stratigraphy,2015, 39(3):289-293.

[28] 聂海宽,金之钧,马鑫,等.四川盆地及邻区上奥陶统五峰组一下志 留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征[J].石油学报,2017,38(2): 160-174.

NIE Haikuan, JIN Zhijun, MA Xin, et al. Graptolites zone and sedimentary characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2):160-174.

[29] 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 palaeo-

geography of the Early Silurian in Sichuan area[J]. Journal of Palaeogeography,2004,6(1):20-29.

[30] 朱志军,陈洪德,林良彪,等.黔北一川东南志留系层序格架下的 沉积体系演化特征及有利区带预测[J].沉积学报,2010,28(2): 243-253.

ZHU Zhijun, CHEN Hongde, LIN Liangbiao, et al. Depositional system evolution characteristics in the framework of sequences of silurian and prediction of favorable zones in the northern Guizhou—southeastern Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28 (2): 243-253.

- [31] 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.
- [32] 王玉满,董大忠,李新景,等.四川盆地及其周缘下志留统龙马溪 组层序与沉积特征[J].天然气工业,2015,35(3):12-21.
   WANG Yuman,DONG Dazhong,LI Xinjing, et al. Stratigraphic sequence and sedimentary characteristics of Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its peripheral areas[J]. Natural Gas Industry,2015,35(3):12-21.
- [33] 梁狄刚,郭彤楼,边立曾,等.中国南方海相生烃成藏研究的若干 新进展(三)南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制 因素[J].海相油气地质,2009,14(2):1-19.
   LIANG Digang,GUO Tonglou,BIAN Lizeng, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in

marine sedimentary regions, southern China (Part 3):controlling factors on the sedimentary facies and development of Palaeozoic marine source rocks [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009,14(2):1-19.

[34] 张春明,张维生,郭英海. 川东南一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.

- [35] 郑和荣,高波,彭勇民,等.中上扬子地区下志留统沉积演化与页 岩气勘探方向[J].古地理学报,2013,15(5):645-656.
   ZHENG Herong, GAO Bo, PENG Yongmin, et al. Sedimentary evolution and shale gas exploration direction of the Lower Silurian in Middle-Upper Yangtze area[J]. Journal of Palaeogeography,2013,15(5):645-656.
- [36] 蒲泊伶,董大忠,王凤琴,等. 沉积相带对川南龙马溪组页岩气富 集的影响[J]. 中国地质,2020,47(1):111-120.
  PU Boling,DONG Dazhong,WANG Fengqin,et al. The effect of sedimentary facies on Longmaxi shale gas in southern Sichuan Basin[J]. Geology in China,2020,47(1):111-120.
- [37] 陈旭.论笔石的深度分带[J].古生物学报,1990,29(5):507-526. CHEN Xu. Graptolite depth zonation[J]. Acta Palaeontologica Sinica,1990,29(5):507-526.
- [38] 程立雪,王元君,陈洪德,等.上扬子地区震旦系—早古生界黑色 页岩的沉积和埋藏环境[J].岩石学报,2013,29(8);2906-2912.
   CHENG Lixue, WANG Yuanjun, CHEN Hongde, et al. Sedimentary and burial environment of black shales of Sinian to Early Palaeozoic in Upper Yangtze region[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013,29(8);2906-2912.
- [39] 李艳芳,吕海刚,张瑜,等.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩 U-Mo协变模式与古海盆水体滞留程度的判识[J].地球化学, 2015,44(2):109-116.

LI Yanfang, LÜ Haigang, ZHANG Yu, et al. U-Mo covariation in marine shales of Wufeng-Longmaxi Formations in Sichuan Basin, China and its implication for identification of watermass restriction[J]. Geochimica, 2015, 44(2):109-116.

[40] 陈旭,樊隽轩,王文卉,等. 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式[J]. 中国科学:地球科学,2017,47(6): 720-732.

CHEN Xu, FAN Junxuan, WANG Wenhui, et al. Stage-progressive distribution pattern of the Lungmachi black graptolitic shales from Guizhou to Chongqing, Central China [J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(6):1133-1146.

[41] 李艳芳,邵德勇,吕海刚,等.四川盆地五峰组一龙马溪组海相页 岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J].石油学报,2015, 36(12):1470-1483.

LI Yanfang, SHAO Deyong, LÜ Haigang, et al. A relationship between elemental geochemical characteristics and organic matter enrichment in marine shale of Wufeng Formation—Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1470-1483.

 [42] 孙莎莎,芮昀,董大忠,等.中、上扬子地区晚奥陶世一早志留世古 地理演化及页岩沉积模式[J].石油与天然气地质,2018,39(6): 1087-1106.
 SUN Shasha, RUI Yun, DONG Dazhong, et al. Paleogeographic

evolution of the Late Ordovician-Early Silurian in Upper and Middle Yangtze regions and depositional model of shale[J]. Oil & Gas Geology,2018,39(6):1087-1106.

[43] 张琴,梁峰,王红岩,等.页岩元素地球化学特征及古环境意 义——以渝东南地区五峰—龙马溪组为例[J].中国矿业大学学报,2018,47(2):380-390.

ZHANG Qin, LIANG Feng, WANG Hongyan, et al. Elements geochemistry and paleo sedimentary significance: a case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southeast Chongqing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(2); 380-390.

[44] 何龙,王云鹏,陈多福,等.重庆南川地区五峰组一龙马溪组黑色页 岩沉积环境与有机质富集关系[J].天然气地球科学,2019,30(2): 203-218.

HE Long, WANG Yunpeng, CHEN Duofu, et al. Relationship between sedimentary environment and organic matter accumulation in the black shale of Wufeng-Longmaxi Formations in Nanchuan area, Chongqing[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(2): 203-218.

- [45] 王同,张克银,熊亮,等. 四川自贡地区五峰组—龙马溪组下段古地 貌刻画及其油气意义[J]. 石油实验地质,2018,40(6):764-770.
   WANG Tong, ZHANG Keyin, XIONG Liang, et al. Paleogeomorphology restoration of Wufeng Formation—Lower Member of Longmaxi Formation in Zigong area of Sichuan Province and its oil and gas significance[J]. Petroleum Geology & Experiment,2018,40(6):764-770.
- [46] 施振生,王红岩,林长木,等.威远一自贡地区五峰期一龙马溪期古 地形及其对页岩储层品质的控制[J].地层学杂志,2020,44(2): 163-173.

SHI Zhensheng, WANG Hongyan, LIN Changmu, et al. Paleotopography of Weiyuan-Zigong area in Wufengian-Lungmachian stages (Ordovician-Silurian transition) and its effect on the quality of shale gas reservoir[J]. Journal of Stratigraphy, 2020, 44(2):163-173.

- [47] 吕炳全.海洋地质学概论[M].上海:同济大学出版社,2007.
   LÜ Bingquan. An introduction of marine geology[M]. Shanghai: Tongji University Press,2007.
- [48] 梁兴,徐政语,张介辉,等. 浅层页岩气高效勘探开发关键技术——以昭通国家级页岩气示范区太阳背斜区为例[J].石油学报,2020,41(9):1033-1048.

LIANG Xing, XU Zhengyu, ZHANG Jiehui, et al. Key efficient exploration and development technoloiges of shallow shale gas; a case study of Taiyang anticline area of Zhaotong National Shale Gas Demonstration Zone[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(9); 1033-1048.

- [49] 郭彤楼,何希鹏,曾萍,等.复杂构造区页岩气藏地质特征与效益 开发建议——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油学报,2020,41(12):1490-1500.
  GUO Tonglou,HE Xipeng,ZENG Ping,et al. Geological characteristics and beneficial development scheme of shale gas reservoirs in complex tectonic regions: a case study of Wufeng-Longmaxi Formations in Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica,2020,41(12):1490-1500.
- [50] 何骁,吴建发,雍锐,等.四川盆地长宁—威远区块海相页岩气田成 藏条件及勘探开发关键技术[J].石油学报,2021,42(2):259-272.
   HE Xiao,WU Jianfa,YONG Rui, et al. Accumulation conditions and key exploration and development technologies of marine shale gas field in Changning-Weiyuan block, Sichuan Basin[J].
   Acta Petrolei Sinica,2021,42(2):259-272.
- [51] 何治亮,聂海宽,胡东风,等.深层页岩气有效开发中的地质问题——以四川盆地及其周缘五峰组一龙马溪组为例[J].石油学报,2020,41(4):379-391.

HE Zhiliang, NIE Haikuan, HU Dongfeng, et al. Geological problems in the effective development of deep shale gas: a case

study of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi formations in Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 379-391.

- [52] MA Xinhua, XIE Jun, YONG Rui, et al. Geological characteristics and high production control factors of shale gas reservoirs in Silurian Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5):901–915.
- [53] 王玉满,王淑芳,董大忠,等. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表 征[J]. 地学前缘,2016,23(1):119-133.
  WANG Yuman,WANG Shufang,DONG Dazhong, et al. Lithofacies characterization of Longmaxi Formation of the Lower Silurian,southern Sichuan[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 119-133.
- [54] 李学杰,陈芳,刘坚,等. 南海西部表层沉积物碳酸盐分布特征及 其溶解作用[J]. 地球化学,2004,33(3);254-260.
   LI Xuejie, CHEN Fang, LIU Jian, et al. Distribution and its dissolution of carbonate in seafloor surface sediment in the western South China Sea[J]. Geochimica,2004,33(3);254-260.
- [55] 张兰兰,陈木宏,陈忠,等.南海表层沉积物中的碳酸钙含量分布 及其影响因素[J].地球科学:中国地质大学学报,2010,35(6): 891-898.

ZHANG Lanlan, CHEN Muhong, CHEN Zhong, et al. Distribution of calcium carbonate and its controlling factors in surface sediments of the South China Sea[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(6):891-898.

- [56] SHANMUGAM G. Deep-water bottom currents and their deposits[J]. Developments in Sedimentology, 2008, 60:59-81.
- [57] REBESCO M, HERNÁNDEZ-MOLINA F J, VAN ROOIJ D, et al. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: state-of-the-art and future considerations [J]. Marine Geology, 2014, 352:111-154.
- [58] SCHIEBER J. Mud re-distribution in epicontinental basins—Exploring likely processes[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 71: 119-133.
- [59] SCHLAGER W. Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy[M]. Tulsa, Oklahoma; SEPM, 2005.
- [60] LIANG Chao, JIANG Zaixing, CAO Yingchang, et al. Deep-water depositional mechanisms and significance for unconventional hydrocarbon exploration: a case study from the Lower Silurian Longmaxi shale in the southeastern Sichuan Basin [J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(5):773-794.
- [61] PENG Junwen. Sedimentology of the Upper Pennsylvanian organicrich Cline shale, Midland Basin: from gravity flows to pelagic suspension fallout[J]. Sedimentology, 2021, 68(2):805-833.
- [62] LÜNING S, CRAIG J, LOYDELL D K, et al. Lower Silurian 'hot shales' in North Africa and Arabia: regional distribution and depositional model[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 49(1/4):121-200.
- [63] DONER Z, KUMRAL M, DEMIREL I H, et al. Geochemical characteristics of the Silurian shales from the central Taurides, southern Turkey:organic matter accumulation, preservation and depositional environment modeling[J]. Marine and Petroleum Geology,2019,102:155-175.

(收稿日期 2021-09-13 改回日期 2022-03-02 编辑 雷永良)