



四川盆地西南缘金珂村剖面五峰组-龙马溪组生物地层划分及区域对比

王万能, 张耀堂, 袁永盛, 陈庆松, 于一帆

中国地质调查局 昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650000

摘 要: 为了探究上扬子海盆在奥陶纪-志留纪之交的沉积环境、明确四川盆地西南缘金珂村筠连地区有机质页岩沉积层位, 通过对金珂村剖面五峰组-龙马溪组岩石地层及生物地层的研究, 识别出自晚奥陶世凯迪阶 WF2 带至早志留世埃隆阶 LM6 带的 9 个连续生物带及组合. 认为金珂村地区是上扬子海盆最早进入前陆期的地区, 时间为鲁丹阶 LM1 期. 金珂村剖面与其北部的新地 2 井、宁 211 井、威 202 井生物地层对比发现, 自南向北黑色页岩笔石带上限自 LM6 延伸至 LM9, 呈逐渐增高的趋势. 金珂村剖面富有机质页岩层位于 WF2-LM4 带, 厚度 20.6 m, 为该地区页岩气勘探开发提供了一定的基础资料.

关键词: 金珂村剖面; 五峰组-龙马溪组; 生物带; 有机质页岩; 地层对比; 四川盆地

BIOSTRATIGRAPHIC DIVISION AND REGIONAL CORRELATION OF WUFENG FORMATION AND LONGMAXI FORMATION IN JINKECUN SECTION, SOUTHWESTERN MARGIN OF SICHUAN BASIN

WANG Wan-neng, ZHANG Yao-tang, YUAN Yong-sheng, CHEN Qing-song, YU Yi-fan
Kunming Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Kunming 650000, China

Abstract: To explore the sedimentary environment of Upper Yangtze Basin at the turn of Ordovician-Silurian period and determine the sedimentary horizon of organic shale in Junlian area on the southwestern margin of Sichuan Basin, nine continuous biozones and combinations from Late Ordovician Katian WF2 zone to Early Silurian Aeronian LM6 zone are identified based on the study of lithostratigraphy and biostratigraphy of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Jinkecun section. It is believed that Jinkecun area is the first to enter the foreland period in the Upper Yangtze Basin, in the time of Rhuddanian LM1 stage. The biostratigraphic correlation between Jinkecun section and XD-2, N-211 and W-202 wells on the north indicates that the upper limit of black shale graptolite zone extends from LM6 to LM9 from south to north, showing a gradually increasing trend. The organic-rich shale in Jinkcun section is located in WF2-LM4 zones with a thickness of 20.6 m, which provides basic data for shale gas exploration and development in the area.

Key words: Jinkecun section; Wufeng Formation-Longmaxi Formation; biozone; organic shale; stratigraphic correlation; Sichuan Basin

0 引言

近年来, 随着我国在页岩气勘探方面的不断发展,

在四川盆地及其周缘先后发现多个大型页岩气田, 含气层主要位于上奥陶统一志留系兰多维列统的五峰

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-05-26. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“滇中楚雄云龙镇等 4 幅 1:5 万区域地质调查项目”(ZD20220504).

作者简介: 王万能(1995—), 男, 主要从事区域地质调查工作, 通信地址 云南省昆明市西山区春雨路 1566 号, E-mail//1922637474@qq.com

通信作者: 陈庆松(1986—), 工程师, 主要从事基础地质调查工作, 通信地址 云南省昆明市西山区春雨路 1566 号, E-mail//416592802@qq.com

组-龙马溪组地层中. 两组在上扬子地区分布广泛, 且有机质丰度高, 具有极大的页岩气勘探开发潜力. 随着研究的不断深入, 在五峰组-龙马溪组黑色页岩的形成环境、储层特征、展布模式及成藏富集规律等方面均取得了重要进展. 研究表明, 富有机质页岩主要形成于深水陆棚区, 纳米空孔隙是页岩气的主要储集空间, 纹层发育段页岩储层品质好^[1-6], 而缓坡、鼻隆和沉积中心等古地形单元直接影响储层品质^[7]. 该套黑色页岩中赋存的笔石化石, 对全球和区域上生物地层的划分及对比起到关键性作用^[8-9]. 由中国科学院南京地质古生物研究所陈旭等提出的扬子区五峰组-龙马溪组黑色页岩笔石带的划分标准^[9], 更是成为我国奥陶系与志留系之交黑色页岩地层划分对比的“标尺”, 对南方页岩气的勘探和开发具有重要的指导意义.

前人对于五峰组-龙马溪组的研究多集中在四川盆地, 但在四川盆地西南缘靠近黔中隆起的区域研究较少, 缺乏五峰组-龙马溪组生物地层的详细划分与对比, 导致有机质页岩分布不明确, 制约了该区资源评价工作的推进. 四川省筠连县金珂村地区位于四川盆地西南缘, 靠近黔中隆起北端, 是页岩气勘探的有利区. 本研究通过生物地层划分及区域对比, 将上扬子海盆进入前陆期的时间往前推移, 并探讨区域上笔石带时限、富有机质页岩有利富集段及古地理演化, 以期对南方页岩气勘探开发提供基础地质资料.

1 地质背景

四川盆地位于我国西南部, 属扬子板块内的次级克拉通盆地. 自奥陶纪早期, 扬子海域便由广阔的陆表海覆盖, 沉积了大套碳酸盐岩; 进入奥陶纪晚期, 加里东运动导致中上扬子地区的古陆和古隆起发生隆升和扩张, 在其南部的黔中、雪峰山隆起发生抬升露出水面, 与西南缘的康滇古陆相连, 形成滇黔桂古陆; 同时随着北部边缘向华北板块的俯冲, 板块西南缘的川中隆起也在不断扩大, 使扬子海域逐渐转变为受水下隆起控制的局限海域, 形成了滞留、低能和缺氧的海洋环境, 并沉积了区域特征明显、笔石分异度高的五峰组-龙马溪组黑色页岩^[10-12].

研究区位于上扬子西缘, 四川盆地西南缘, 靠近黔中隆起的北端(图1). 区内五峰组-龙马溪组黑色岩系广泛分布, 且岩性较为单一. 五峰组主要为一套黑色

薄层硅质页岩和炭质页岩, 在靠近西南的地区其底部夹部分灰岩; 龙马溪组下部主要为一套深灰-灰黑色炭质页岩、泥岩及粉砂状泥岩, 往上部颜色变浅, 出现粉砂岩夹层^[13-14].

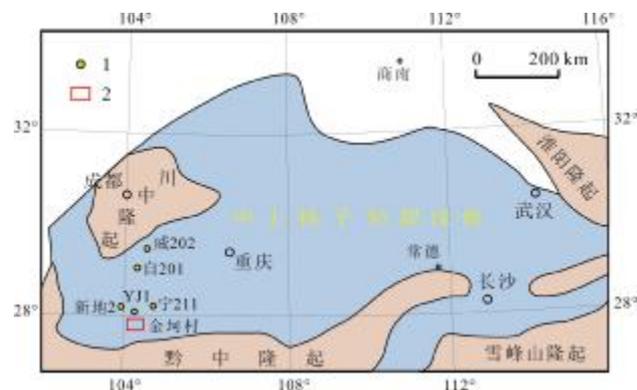


图1 研究区晚奥陶世古地理图及采样位置
(据文献[12]修改)

Fig. 1 Paleogeographic map of Late Ordovician in the study area with sampling location
(Modified from Reference [12])
1—钻井(borehole); 2—工作区(work area)

2 岩石地层

金珂村剖面位于四川省筠连县金珂村, 剖面露头良好(图2a, b), 自下而上依次为涧草沟组(部分地区称为临湘组)、五峰组、观音桥层、龙马溪组, 地层连续, 各组段之间呈整合接触. 其中涧草沟组以黑色中薄层瘤状灰岩为主, 五峰组以黑色粉砂质页岩及含钙泥质粉砂岩为主, 厚 10.97 m. 观音桥层岩性为泥质粉砂岩, 厚 0.43 m, 富含 *Hirnantia* 腕足动物化石. 龙马溪组根据岩性分为两段, 下段以黑色炭质页岩为主, 底部发育结核体(图2c, d); 上段为灰黑色-灰色炭质页岩、炭质泥岩夹灰色中薄层粉砂岩或灰岩. 具体岩性及化石特征列述如下(由于该剖面在龙马溪组仅识别出 LM1-LM6 的笔石带化石, 故上覆地层不再列述).

龙马溪组上段

以灰-灰褐色中薄层状钙质粉砂岩为主, 夹灰色薄层状粉砂质泥岩, 笔石化石稀少, 保存较差, 未见标准分子. 172.0 m

龙马溪组下段

10层: 灰黑色粉砂质页岩夹灰褐色粉砂质泥岩, 笔石化石稀少, 且保存极差, 未见标准分子. 47.48 m

9层: 灰黑色炭质页岩夹灰色薄层状粉砂岩, 笔石化石稀少, 保存差, 未见标准分子. 37.86 m

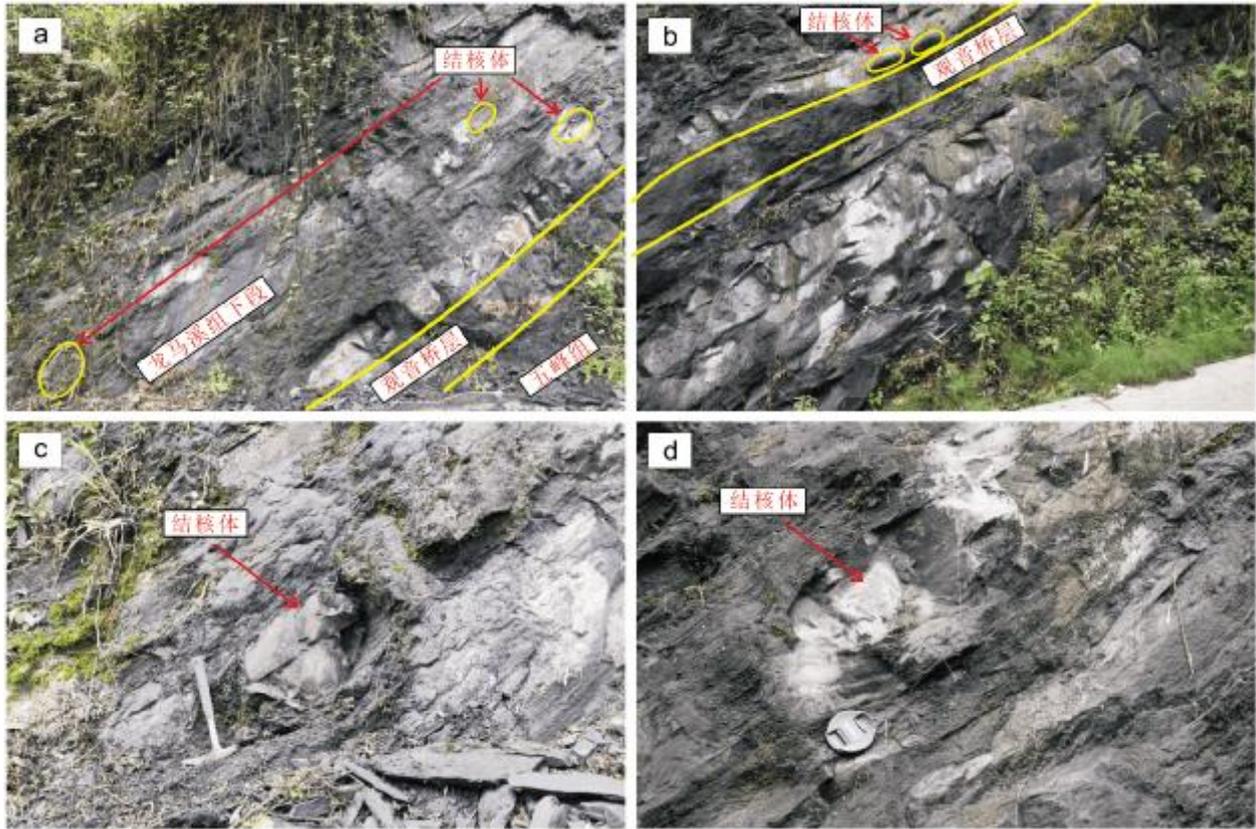


图2 金珂村剖面五峰组-龙马溪组野外露头

Fig. 2 Outcrops of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Jinkecun section

8层:灰黑色粉砂质泥岩(图3h)(未至顶). 21.64 m

7层:以黑色炭质页岩(图3g)为主,粒度较6层更细,底部发育结核体,大小约20 cm×40 cm.产笔石化石 *Parakidograptus acuminatus* (Nicholson, 1867)、*Normalograptus angustus* (Perner, 1895)、*Neodiplograptus* sp.、*Coronograptus cyphus* (Lapworth, 1876)、*Cystograptus penna* (Hopkinson, 1869)及 *Demirastrites triangulatus* (Harkness, 1851). 17.64 m

6层:灰黑色含钙泥质粉砂岩(图3f),含结核体.笔石化石丰富,但保存较差,产笔石化石:*Normalograptus angustus* (Perner, 1895)、*Normalograptus aijeri* (Legrand, 1977)及 *Neodiplograptus* sp. 0.38 m

————— 整合 —————

观音桥层

5层:黑色泥质粉砂岩(图3e).含大量腕足动物化石 *Fardenia* (*Coolinia*) cf. *dalwani* (Bergström, 1968)、*Plectothyrella crassicosta* (Dalman, 1828)、*Dysprosorthis sinensis* (Rong, 1984)、*Hirnantia sagittifera* (M' Coy, 1851)及 *Aegriomena convexa* (Chang, 1981). 0.43 m

————— 整合 —————

五峰组

4层:灰黑色厚层状含钙泥质粉砂岩(图3d),夹两层灰色钾质斑脱岩,厚度分别为2 cm、3 cm,斑脱岩中充填方解石细脉.产笔石化石 *Paraorthograptus pacificus* (Ruedemann, 1947)、*Appendispinograptus*

supernus (Elles and Wood, 1906)、*Appendispinograptus leptothecalis* (Mu and Ge, in Fu 1982)、*Anticostia lata* (Elles & Wood, 1906)、*Dicellograptus* sp. 及 *Rectograptus* sp. 2.08 m

3层:以黑色粉砂质页岩(图3c)为主,局部夹粉砂质泥岩,发育多层极薄层斑脱岩,斑脱岩中可见星点状黄铁矿.产笔石化石 *Tangyagraptus typicus* (Mu, 1963)、*Paraorthograptus pacificus* (Ruedemann, 1947)、*Appendispinograptus supernus* (Elles and Wood, 1906)、*Dicellograptus ornatus* (Elles and Wood, 1904)、*Rectograptus* sp. 及 *Anticostia* sp. 7.04 m

2层:以黑色粉砂质泥岩(图3a)为主,夹微-泥晶灰岩,灰岩局部黄铁矿化(图3b).产笔石化石 *Dicellograptus complexus* (Davies, 1929)、*Dicellograptus ornatus* (Elles and Wood, 1904)、*Paraplegnatograptus connectus* (Mu, in Mu and Lin, 1984) 及 *Paraorthograptus pacificus* (Ruedemann, 1947). 1.85 m

————— 整合 —————

涧草沟组

1层:岩性为灰黑色瘤状灰岩(未见底). >0.63 m

3 生物地层划分

五峰组-龙马溪组黑色岩系中含大量笔石化石,

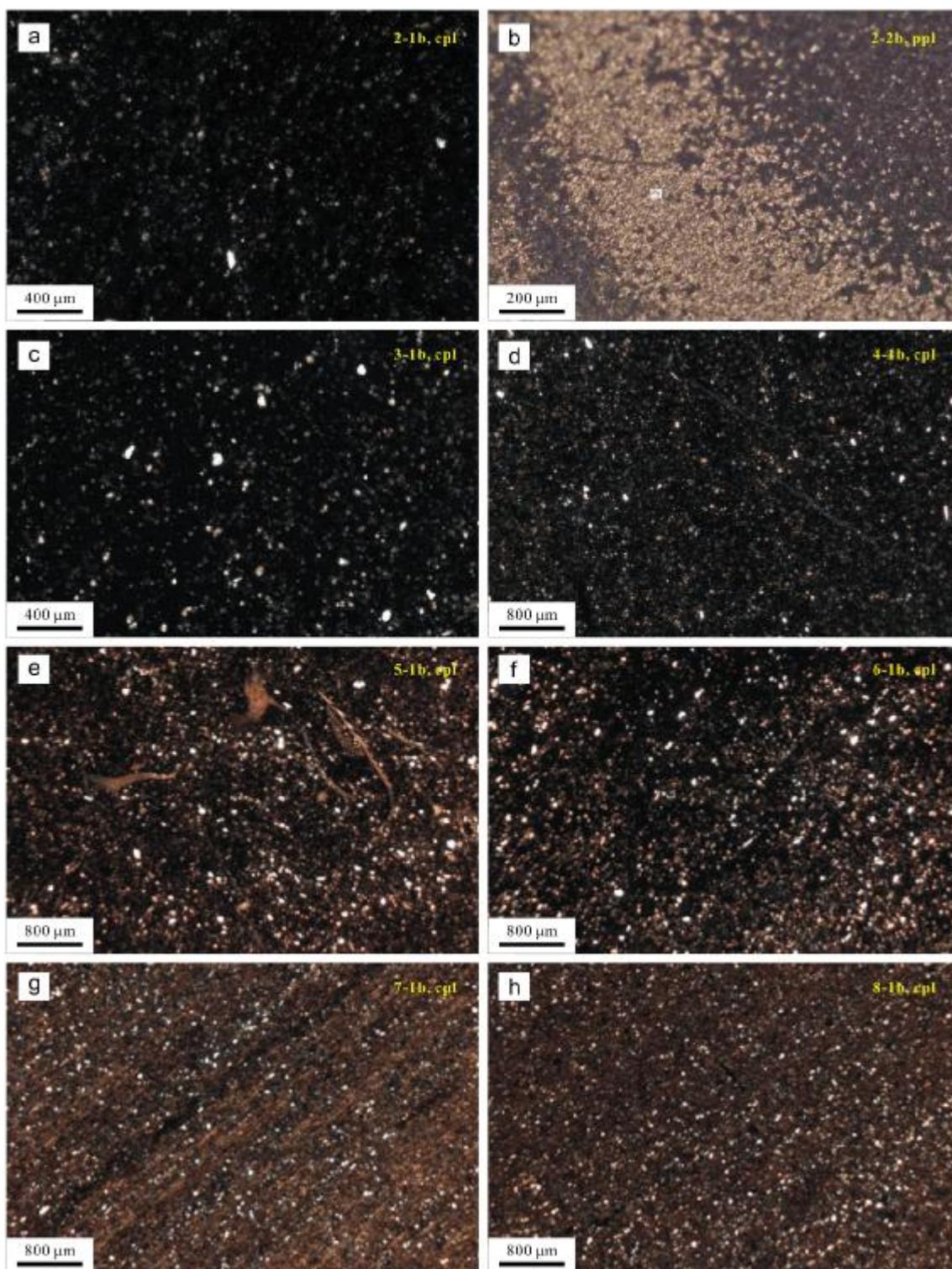


图3 五峰组-龙马溪组岩石镜下照片

Fig. 3 Microphotographs of rocks from Wufeng Formation and Longmaxi Formation

a—粉砂质泥岩,泥质结构(silty mudstone with pelitic texture); b—黄铁矿化灰岩,泥晶结构(pyritized limestone with micrite texture); c—粉砂质页岩,泥质结构、页理构造(silty shale with pelitic texture and lamellation structure); d—泥质粉砂岩,粉砂状结构(pelitic siltstone with silty texture); e—泥质粉砂岩,粉砂状结构(pelitic siltstone with silty texture); f—泥质粉砂岩,粉砂状结构(pelitic siltstone with silty texture); g—炭质页岩,泥质结构、页理构造(carbonaceous shale with pelitic texture and lamellation structure); h—粉砂质泥岩,含粉砂泥质结构(silty mudstone with silty pelitic texture)

在该时期碎屑岩相的生物地层研究中,笔石是划分地层的第一门类.笔石生物地层划分可以弥补岩石地层的横向穿时性,以及在单一岩相地层序列中难以细分的缺陷,不但可以作为年代地层学研究的基础,而且在地层对比中可以直接准确地发挥作用^[15-16].根据陈旭等建立的华南奥陶系-志留系之交笔石生物地层序列5阶13个笔石带划分方案^[9],对金珂村剖面五峰组-龙马溪组地层进行划分.考虑到采样精度以及仅通过

标准分子首次出现的位置划分笔石带,此方法并不十分准确,可能略低于文中标定位置,但仍可大致代表这一时间间隔并进行对比.

在上述笔石鉴定的基础上,根据扬子区五峰组-龙马溪组笔石带序列^[9]及关键笔石分子的首现位置,在金珂村剖面识别出五峰组-龙马溪组的多个笔石带(图4).笔石带自上而下划分如下(以五峰组与涧草沟组界线为0 m处).

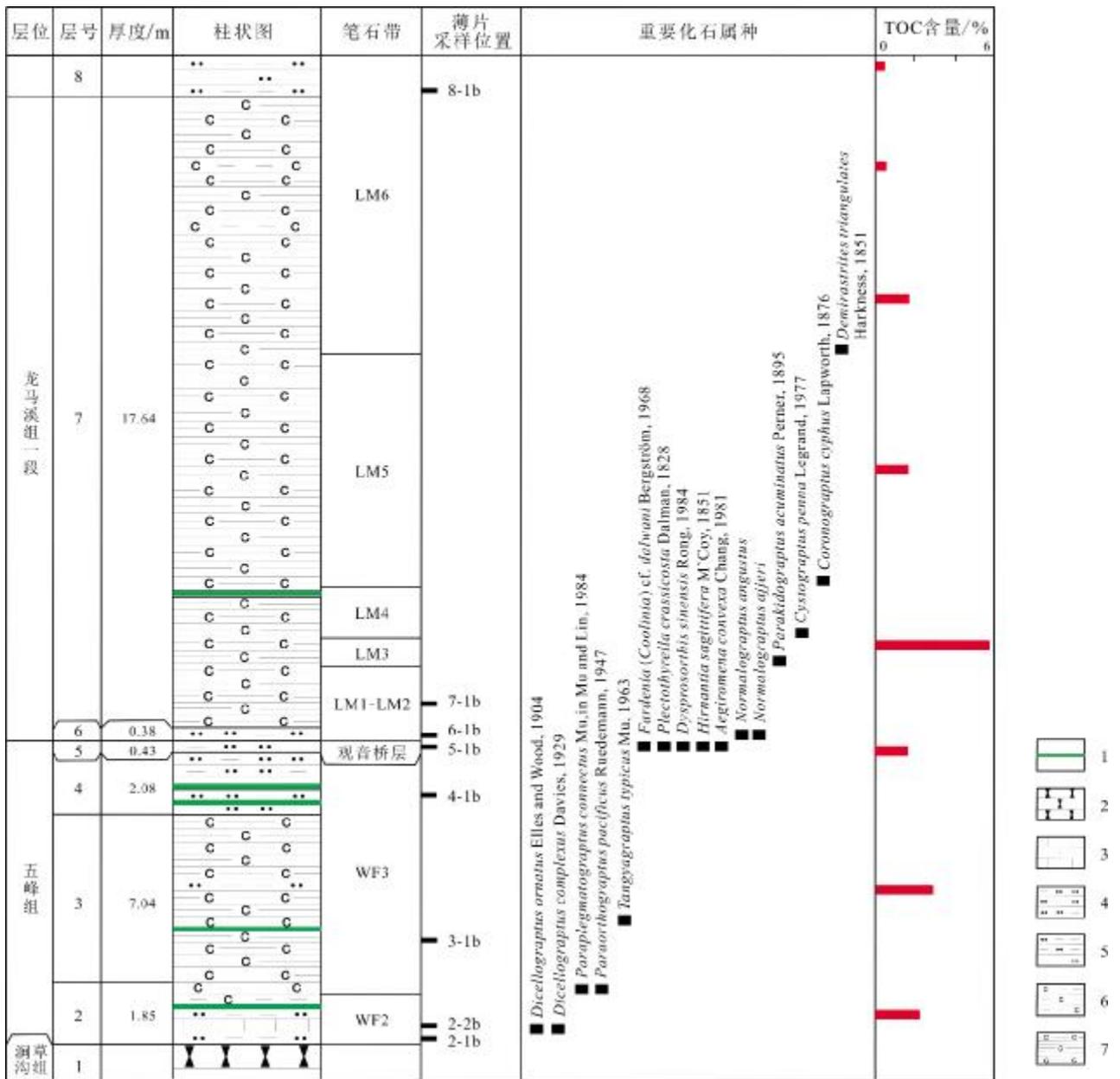


图4 金珂村剖面五峰组-龙马溪组综合柱状图

Fig. 4 Comprehensive biostratigraphic column of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Jinkecun section

1—斑脱岩(bentonite); 2—瘤状灰岩(nodular limestone); 3—灰岩(limestone); 4—泥质粉砂岩(pelitic siltstone); 5—粉砂质泥岩(silty mudstone); 6—炭质泥岩(carbonaceous mudstone); 7—炭质页岩(carbonaceous shale)

(1)龙马溪组

LM6 (*Demirastrites triangulate* 带):于 27.47 m 处首次出现 LM6 带标准分子三角半耙笔石 *Demirastrites triangulatus* (图 5i). LM6 带往上笔石丰度较低,保存极不完整,且岩相已发生改变,可能未发育埃隆阶 LM7—LM9 带笔石,故未能确定 LM6 带的顶界.

LM5 (*Coronograptus cyphus* 带):于 20.66 m 处首次出现 LM5 带标准分子曲背冠笔石 *Coronograptus cyphus* (Lapworth, 1876)(图 5h),地层厚度 6.81 m.

LM4 (*Cystograptus vesiculosus* 带):于 18.65 m 处首次出现全羽囊笔石 *Cystograptus penna* (Hopkinson, 1869)(图 5g),一般首先出现在 LM4 带,地层厚度 2.01 m.

LM3 (*Parakidograptus acuminatus* 带):于 17.43 m 处首次出现 LM3 带标准分子尖削拟尖笔石 *Parakidograptus acuminatus* (Nicholson, 1867) (图 5f),地层厚度 1.22 m.

LM1-LM2 (*Metabolograptus persculptus*-*Akidograptus*

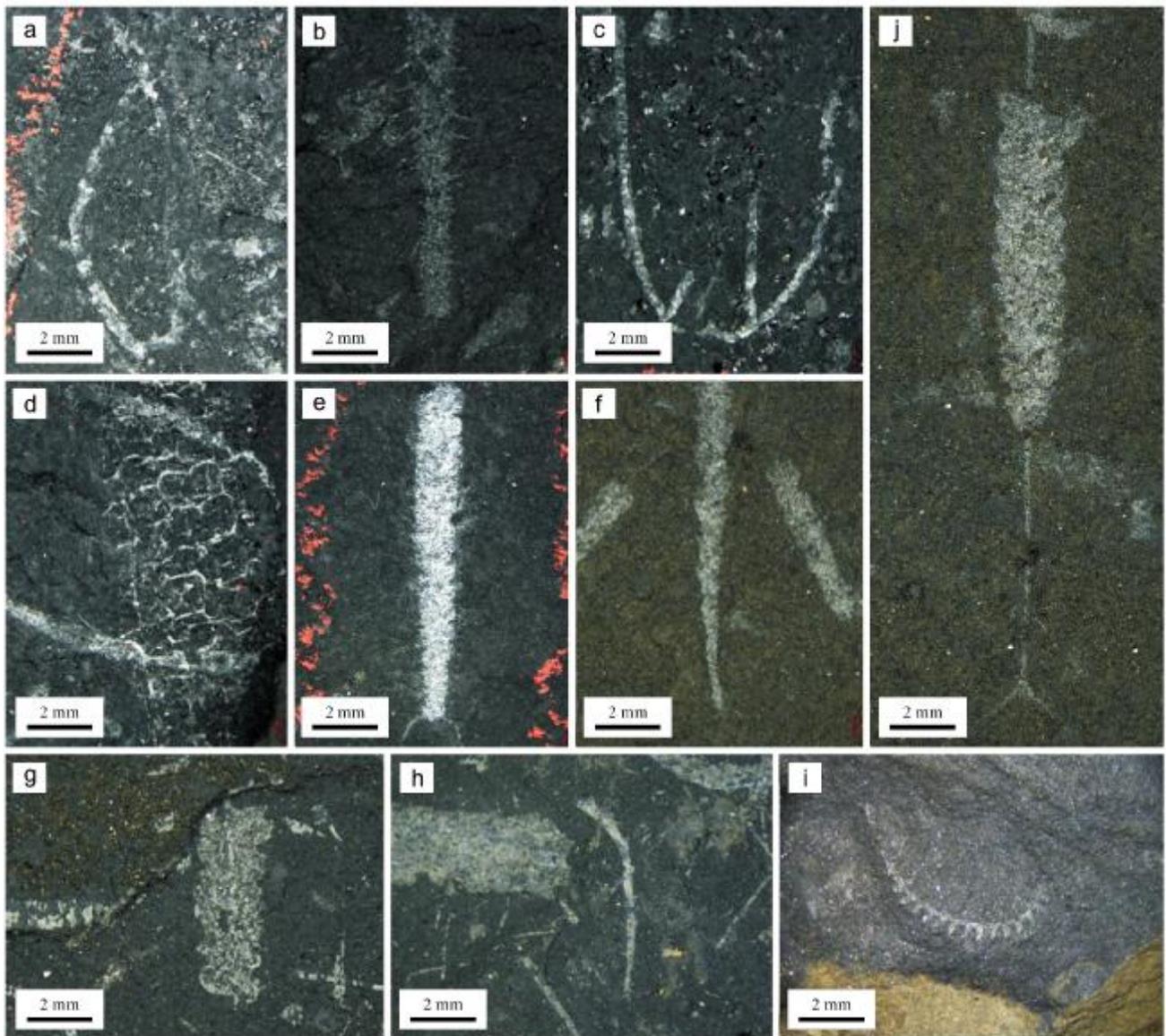


图 5 金珂村剖面五峰组-龙马溪组部分典型笔石化石

Fig. 5 Typical graptolite fossils from Wufeng Formation-Longmaxi Formation of Jinkecun section

a—*Dicellograptus complexus* Davies, 1929; b—*Paraorthograptus pacificus* (Ruedemann, 1947); c—*Tangyagraptus typicus* Mu, 1963; d—*Paraplegmatograptus connectus* Mu, in Mu and Lin, 1984; e—*Appendispinograptus supernus* (Elles and Wood, 1906); f—*Parakidograptus acuminatus* (Nicholson, 1867); g—*Cystograptus penna* (Hopkinson, 1869); h—*Coronograptus cyphus* (Lapworth, 1876); i—*Demirastrites triangulatus* (Harkness, 1851); j—*Neodiplograptus* sp.

ascensus 带): 未识别出 LM1 和 LM2 的带化石或特征分子, 但出现 *Normalograptus angustus* (Perner, 1895) 和 *Normalograptus ajjeri* (Legrand, 1977) 两种笔石, 属于 LM1-LM2 带笔石, 因此二者界线层位暂时无法确定. 地层厚度 6.03 m.

(2) 观音桥层

岩性为泥质粉砂岩, 含丰富的腕足动物化石(图 6): *Fardenia* (*Coolinia*) cf. *dalwani* (Bergström, 1968)、*Plectothyrella crassicosta* (Dalman, 1828)、*Dysprosorthis sinensis* (Rong, 1984)、*Hirnantia sagittifera* (M'Coy, 1851) 及 *Aegiromena convexa* (Chang, 1981), 时代为晚奥陶世赫南特期, 属于赫南特贝动物群. 地层厚度 0.43 m.

(3) 五峰组

WF3 (*Paraorthograptus pacificus* 带): 1.61 m 处首次出现 WF3 带标准分子太平洋拟直笔石 *Paraorthograptus pacificus* (Ruedemann, 1947)(图 5a), 地层厚度 9.36 m.

WF2 (*Dicellograptus complexus* 带): 于五峰组底部往上 1.0 m 处首次出现 WF2 带标准分子环绕叉笔石 *Dicellograptus complexus* (Davies, 1929)(图 5b), 地层厚度 1.61 m.

综上所述, 金珂村剖面从上奥陶统至志留系兰多维列统共识别出 4 阶 8 个笔石带及 *Hirnantia* 动物群, 共建立了 9 个连续的生物带及组合.

4 区域对比

近年来, 随着上扬子地区五峰组-龙马溪组页岩

气的勘探, 已经通过钻井岩心在生物地层方面取得了显著成果. 本研究选取金珂村剖面周缘具有代表性的盐津 1 井、新地 2 井、宁 211#、自 201 井及威 202 井剖面资料, 进行生物地层划分、沉积厚度及 TOC 含量等方面的对比研究(表 1), 并建立了金珂村-威远地区笔石序列对比图(图 7).

4.1 钙质结核体特征

笔者在龙马溪组底部发现许多钙质结核体, 结核体呈透镜状、椭球状, 短轴 20~30 cm, 长轴 40~55 cm, 中心区钙质含量高, 滴稀盐酸剧烈起泡, 颜色较浅, 为灰色. 前人认为海相页岩中的钙质结核体主要为成岩早期还原菌降解有机质形成^[21-23]. 据王玉满等研究, 龙马溪组结核体形成于前陆挠曲初期和前陆挠曲发展期, 是前陆期深水-半深水陆棚相快速沉积的产物, 也是前陆期物源输入稳定性变差和陆源碎屑物质发生突发性、短暂性改变的标志^[24]. 在川东南拗陷区的长宁双河地区, 结核体主要发育于 *Coronograptus cyphus* 带(LM5)中部及 *Demirastrites triangulatus* 带(LM6)下部; 永善苏田及 DT1 井主要发育于 *Demirastrites triangulatus* 带(LM6)下部及中部; 綦江观音桥地区主要发育于 *Coronograptus cyphus* 带(LM5)中部; 道真巴渔地区发育于 *Demirastrites triangulatus* 带(LM6); 鄂北拗陷区的利川毛坝地区发育于 *Demirastrites triangulatus* 带(LM6)中部, 石柱漆辽地区则发育于 *Demirastrites triangulates* 带(LM6)及 *Lituigraptus convolutus* 带(LM7)上部(图 8). 反映了前陆挠曲拗陷自南向北迁移的特征.

金珂村剖面龙马溪组结核体主要发育于



图 6 金珂村剖面观音桥层腕足类化石

Fig. 6 Brachiopod fossils from Guanyinqiao Bed in Jinkecun section

表1 区域生物地层划分、沉积厚度及 TOC 含量对比

Table 1 Regional comparison of biostratigraphy, sedimentary thickness and TOC content

系	统	阶	笔石带	沉积时间/Ma	金珂村剖面(本文)		盐津1井 ^[17]		长宁211井 ^[18]		新地2井 ^[15]		自201井 ^[19]		威202井 ^[20]		
					沉积厚度/m	TOC/%	沉积厚度/m	TOC/%	沉积厚度/m	TOC/%	沉积厚度/m	TOC/%	沉积厚度/m	TOC/%	沉积厚度/m	TOC/%	沉积厚度/m
志留系	兰多维列统	埃隆阶	LM9										>25		>6?		
			LM8	0.27				33.16	0.55	52.99	0.74	5.64		5.16	2.10		
			LM7	0.45			>140		38.57	0.86	40.65	1.31	6.53		4.29		
		LM6	1.56		1.91	53.50		61.71	1.42	36.53	2.76	3.53		10.52	3.70		
		LM5	0.8	6.80	1.83	12.93		13.53	1.48	2.10	3.94	1.03		5.74	3.30		
		鲁丹阶	LM4	0.9	2.00		12.44		10.24	4.50	9.20	5.85	3.30				
			LM3	0.93	1.20				4.99	4.25							4.90
		LM2	0.43		5.99		6.06		4.13	3.69			5.14				
		奥陶系	上奥陶统	赫南特阶	LM1	0.6				2.71	6.80	1.07	6.16(?)				
					WF4	0.73	0.40	1.83	0.35		2.63	5.59					
凯迪阶	WF3			1.86	9.40	2.48		8.09		2.32	3.00			7.70		7.81	
	WF2			0.6	1.60	2.27				3.51	2.56	0.84	2.10				

LM7带^[17];新地2井和宁211井五峰组-龙马溪组均识别出4阶9个笔石带和 *Hirnantia* 动物群,顶界至LM8带,建立了12个连续生物带和组合^[15,18];自201井建立了9个生物带,笔石带顶界至特列奇阶LM9笔石带^[20];威202井共识别出5阶7个笔石带,笔石带顶界至特列奇阶LM9笔石带,建立了连续的13个生物带和组合^[19].

通过对比,金珂村剖面笔石带顶界较盐津1井低1个笔石带;新地2井和宁211井大致处于同一纬度,二者具有相同的笔石带顶界,金珂村剖面位于其南部,更靠近黔中古隆起,较二者笔石带顶界低了2个笔石带;自201井和威202井位于宁211井北侧,远离黔中古隆起,靠近川中隆起,较金珂村剖面高3个笔石带.由此可见,自南向北,龙马溪组笔石带顶界呈逐渐增高的趋势.这也验证了陈旭等提出的在上扬子区西北部黑色页岩顶界普遍高于东南部的结论^[9].

4.3 富有机质页岩空间展布

根据生物地层的划分结果,结合TOC测试结果,金珂村剖面富有机质页岩(TOC \geq 2%)的有利沉积期位于WF2—LM4带,厚度20.60m;盐津1井富有机质

页岩位于WF2—LM4带,厚26.94m^[17];新地2井富有机质页岩位于WF2—LM6带,厚66.25m^[15];宁211井富有机质页岩位于WF2—LM4带,厚30.53m^[18];威202井富有机质页岩位于WF2—LM9带,厚40.00m^[19].通过对比,金珂村剖面与盐津1井和宁211井具有相同的富有机质页岩笔石带顶界,较新地2井低2个笔石带,较威202井低5个笔石带,表明富有机质页岩笔石带的顶界在上扬子地区具有穿时性^[15],自南东向北西,其顶界亦呈逐渐增高的趋势.

金珂村剖面更靠近黔中古陆,在LM1—LM4带表现为高有机质丰度及低沉积速率的沉积特征,LM5带开始,沉积速率快速增高,沉积厚度快速增加,TOC值则显著下降;宁211井和盐津1井较金珂村剖面更靠北,二者亦在LM1—LM4带表现为高有机质丰度及低沉积速率的沉积特征,从LM5带开始出现TOC值明显下降;新地2井则在LM1—LM6带表现为高有机质丰度与低沉积速率的沉积特征,自LM7带开始出现TOC值的显著下降;而位置更靠北的威202井,自LM1—LM9带整体表现为高有机质丰度,较低的沉积速率及较高的TOC值.上述剖面及各井沉积速率的差

异,指示了不同古地理区沉积演化的差异.在川东南拗陷区,五峰组-龙马溪组笔石带时限自东南部向西北部呈逐渐增高的趋势,富有机质页岩时限亦自东南部向西北部逐渐变长.

4.4 古地理演化

晚奥陶世,自凯迪期开始,扬子海域逐渐由碳酸盐台地转变为以碎屑岩为主的局限浅海,伴随着扬子板块前陆隆起由东向西推移和隆升,在扬子克拉通内部或边缘不断出现一些水下隆起,有些出露水面形成岛屿^[26].至早志留世鲁丹阶,广西运动和华夏陆块自东向西碰撞、挤压,导致上扬子南缘的黔中隆起和宜昌上升^[27],随着前陆隆起不断向西北迁移和扩大,在隆后盆地形成多个沉积中心.

沉积期地形变化可造成沉积厚度差异.在均衡补偿作用下,地势越低,沉积厚度越大;地势越高,沉积厚度越小^[28].在晚奥陶世—志留纪兰多维列世,威远—自贡地区西北部发育川中古隆起,东南部为深水盆地,盆内发育大套黑色页岩,地形呈现“一缓坡、一鼻隆、一台地、一中心”的分布格局^[7].

五峰期主要受广西运动的影响,隆起逐步扩大抬升,局部陆表海表现有较深水沉积.该时期自金珂村至威远地区,沉积速率均处于较低水平,沉积厚度变化不大.

观音桥层沉积期,金珂村地区沉积一套钙质碳泥质粉砂岩,镜下观察为粉砂状结构(图3e),岩石主要由粒度0.06~0.12 mm的细砂(约占2%)、粒度0.004~0.06 mm的粉砂(56%)及粒度小于0.004 mm的填隙物(39%)组成,含少量生物屑(2%~3%).细-粉砂碎屑呈次棱角状—次圆状,成分为灰岩岩屑(成分为微晶方解石)、碳泥质岩屑(15%±)、石英(7%)及少量白云母等.生物屑为少量腕足、三叶虫及笔石等碎屑,零星分布于岩石中.填隙物成分主要为碳泥质(23%),其次为钙质胶结物(16%).钙质胶结物成分为泥晶方解石,碳泥质为黑色隐晶质,钙质与碳泥质混杂分布于粉砂颗粒间.发育大量腕足类化石,厚0.43 m.而新地2井、长宁及威远地区观音桥层则以沉积灰岩为主,沉积厚度均较薄.

观音桥层沉积期特殊的岩性及生物面貌主要受两个方面的影响.一是赫南特冰期导致的全球性海平面下降,上扬子海盆水体亦随之变浅;二是晚奥陶世以

来,广西运动向北西方向对华夏古陆的不断推动导致上扬子地台的整体抬升,加速水体变浅,总体表现为由南向北水深变浅较快,自西向东水深变浅较慢的特征.二者的共同作用,使得早期形成的大量海相沉积岩露出水面,陆地风化物源由冰期前的正常状态转变为以新暴露的陆表海碳酸盐岩台地为主^[29],金珂村所处位置更靠近黔中隆起,强烈的风化作用使得大量碳酸盐岩碎屑输入海洋,供给该地层的沉积.

志留纪早期,上扬子海域发生了阶段性的海侵—海退事件,而在受黔中隆起、川中隆起及雪峰山隆起三面古陆包围的川东南拗陷区,与外海连通性更差,形成极为闭塞、滞留的古海洋环境,为该时期富有机质页岩的沉积提供了良好的场所,并因此而形成了长宁及威远等页岩气田.虽然五峰组与龙马溪组沉积厚度可达几百米,但页岩气的有利沉积层段通常仅有20~80 m^[30],特别是在兰多维列世早期,气候回暖导致全球海平面上升,在该区表现为LM1—LM5带黑色页岩自北向南的海侵渐进模式^[30].自LM6带开始,随着黔中隆起的持续抬升作用的加剧,水体逐渐变浅不再沉积富有机质页岩.这种影响自南向北逐渐延伸,在靠近黔中隆起一侧的金珂村地区受到的影响更为剧烈,在LM4带之后率先结束富有机质页岩的沉积,其西北部的新地2井随之在LM6之后结束富有机质页岩的沉积,而更往北部的威远地区,则一直延伸至LM9带,且沉积厚度逐渐增加.

5 结论

(1)四川省筠连县金珂村地区龙马溪组底部钙质结核体的发育,表明上扬子海盆自鲁丹阶早期LM1带开始便进入前陆期,该地区是奥陶纪—志留纪之交上扬子海盆最早进入前陆期的地区.

(2)金珂村剖面五峰组—龙马溪组黑色页岩具较为完整的笔石生物地层序列,共识别出上奥陶统凯迪阶至志留系兰多维列统埃隆阶的4阶8个笔石带及*Hirnantia*动物群.

(3)在金珂村剖面五峰组—龙马溪组WF2—LM4笔石带中识别出富有机质页岩层,厚20.6 m.在川东南拗陷区,自东南向西北富有机质页岩厚度逐渐增加.此结果可为该区页岩气勘探工作提供基础地质资料.

致谢：特别感谢中国科学院南京地质古生物研究所陈清副研究员对本次研究中笔石化石种属鉴定以及成文过程中的耐心指导。

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 C N, Dong D Z, Wang Y M, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 689-701.
- [2] 郭旭升, 胡东风, 文治东, 等. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素——以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 893-901.
Guo X S, Hu D F, Wen Z D, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: A case study of the Wufeng-Longmaxi formation of Jiaoshiba area [J]. Geology in China, 2014, 41(3): 893-901.
- [3] 郭旭升, 胡东风, 魏志红, 等. 涪陵页岩气田的发现与勘探认识[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 24-37.
Guo X S, Hu D F, Wei Z H, et al. Discovery and exploration of Fuling shale gas field [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 24-37.
- [4] 聂海宽, 金之钧, 马鑫, 等. 四川盆地及邻区上奥陶统五峰组—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 H K, Jin Z J, Ma X, 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.
- [5] 王玉满, 李新景, 董大忠, 等. 上扬子地区五峰组—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 Y M, Li X J, Dong D Z, 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.
- [6] 董大忠, 施振生, 管全中, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气勘探进展、挑战与前景[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 67-76.
Dong D Z, Shi Z S, Guan Q Z, et al. Progress, challenges and prospects of shale gas exploration in the Wufeng-Longmaxi reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 67-76.
- [7] 施振生, 王红岩, 林长木, 等. 威远—自贡地区五峰期—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 Z S, Wang H Y, Lin C M, 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.
- [8] 樊隽轩, Melchin M J, 陈旭, 等. 华南奥陶—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 J X, Melchin M J, Chen X, 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.
- [9] 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 X, Fan J X, Zhang Y D, 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.
- [10] 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-134.
Liu B J, Xu X S, Pan X N, et al. Evolution and mineralization of earth crust of paleocontinent in South China [M]. Beijing: Science Press, 1993: 1-134. (in Chinese)
- [11] 刘宝珺, 许效松, 徐强. 扬子东南大陆边缘晚元古代—早古生代层序地层和盆地动力演化(英文)[J]. 岩相古地理, 1995, 5(3): 1-16.
Liu B J, Xu X S, Xu Q. Sequence stratigraphy and basin dynamics of the southeastern margin of the Yangtze Plate in South China during the Late Proterozoic to Early Palaeozoic [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1995, 5(3): 1-16.
- [12] 张海全, 许效松, 余谦, 等. 扬子板块西北缘晚奥陶—早志留世岩相古地理演化与烃源岩的关系[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(2): 43-47.
Zhang H Q, Xu X S, Yu Q, et al. Relationship between lithofacies paleogeographic evolution and source rocks of the Late Ordovician-Early Silurian in northwestern Yangtze Plate [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(2): 43-47.
- [13] 陈清, 樊隽轩, 张琳娜, 等. 下扬子区奥陶纪晚期古地理演变及华南“台—坡—盆”格局的打破[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(6): 767-777.
Chen Q, Fan J X, Zhang L N, et al. Paleogeographic evolution of the Lower Yangtze region and the break of the “platform-slope-basin” pattern during the Late Ordovician [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(5): 625-636.
- [14] 武学进, 陈清, 李关访, 等. 黔北习科1井五峰组—龙马溪组黑色页岩的地层划分与对比[J]. 地层学杂志, 2020, 44(1): 1-11.
Wu X J, Chen Q, Li G F, et al. Stratigraphic subdivision and correlation of the Wufeng and Lungmachi black shales from Xike-1 drillcore in northern Guizhou Province, South China [J]. Journal of Stratigraphy, 2020, 44(1): 1-11.
- [15] 张娣, 余谦, 陆俊泽, 等. 云南永善—大关地区五峰组—龙马溪组黑色页岩生物地层划分与沉积环境探讨: 以新地2井为例[J]. 地球科学, 2020, 45(3): 739-751.
Zhang D, Yu Q, Lu J Z, et al. Graptolite biozonation of the Wufeng

- and Longmaxi formations and its environmental implications from the Xindi 2 borehole in Yongshan-Daguan area, NE Yunnan[J]. *Earth Science*, 2020, 45(3): 739-751.
- [16]王红岩,施振生,孙莎莎,等.四川盆地及周缘志留系龙马溪组一段深层页岩储层特征及其成因[J].*石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 66-75.
- Wang H Y, Shi Z S, Sun S S, et al. Characterization and genesis of deep shale reservoirs in the first member of the Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its periphery[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 66-75.
- [17]梁峰,王红岩,拜文华,等.川南地区五峰组-龙马溪组页岩笔石带对比及沉积特征[J].*天然气工业*, 2017, 37(7): 20-26.
- Liang F, Wang H Y, Bai W H, et al. Graptolite correlation and sedimentary characteristics of Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(7): 20-26.
- [18]罗超,王兰生,石学文,等.长宁页岩气田宁211井五峰组-龙马溪组生物地层[J].*地层学杂志*, 2017, 41(2): 142-152.
- Luo C, Wang L S, Shi X W, et al. Biostratigraphy of the Wufeng to Longmaxi formation at well Ning 211 of Changning shale gas field[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2017, 41(2): 142-152.
- [19]王红岩,郭伟,梁峰,等.川南自201井区奥陶系-志留系间黑色页岩生物地层[J].*地层学杂志*, 2018, 42(4): 455-460.
- Wang H Y, Guo W, Liang F, et al. Biostratigraphy of Ordovician-Silurian black shale at well Zi 201, South Sichuan[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2018, 42(4): 455-460.
- [20]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 H Y, Guo W, Liang F, 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.
- [21]张先进,彭松柏,李华亮,等.峡东地区的“三峡奇石”——沉积结核[J].*地质论评*, 2013, 59(4): 627-636.
- Zhang X J, Peng S B, Li H L, et al. “Three Gorges landscape stones”: The sedimentary concretion in eastern Three Gorges area[J]. *Geological Review*, 2013, 59(4): 627-636.
- [22]庞谦,李凌,胡广,等.川北地区下寒武统筇竹寺组钙质结核特征及成因机制[J].*沉积学报*, 2017, 35(4): 681-690.
- Pang Q, Li L, Hu G, et al. Characteristics and genetic mechanism of calcareous concretions in the Early Cambrian Qiongzhusi Formation of northern Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(4): 681-690.
- [23]Mozley P S, Burns S J. Oxygen and carbon isotopic composition of marine carbonate concretions: An overview[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1993, 63(1): 73-83.
- [24]王玉满,李新景,王浩,等.四川盆地志留统龙马溪组结核体发育特征及其沉积环境意义[J].*天然气工业*, 2019, 39(10): 10-21.
- Wang Y M, Li X J, Wang H, et al. Development characteristics of concretions in the Longmaxi Formation of Lower Silurian in the Sichuan Basin and the indicating significance of their depositional environment[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(10): 10-21.
- [25]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 L N, Fan J X, Chen Q. Geographic distribution and palaeogeographic reconstruction of the Upper Ordovician Kuanyinchiao Bed in South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(18): 2053-2063.
- [26]张海全,许效松,刘伟,等.中上扬子地区晚奥陶世-早志留世岩相古地理演化与黑色页岩的关系[J].*沉积与特提斯地质*, 2013, 33(2): 17-24.
- Zhang H Q, Xu X S, Liu W, et al. Late Ordovician-Early Silurian sedimentary facies and palaeogeographic evolution and its bearings on the black shales in the Middle-Upper Yangtze area[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2013, 33(2): 17-24.
- [27]陈旭,戎嘉余,周志毅,等.上扬子区奥陶-志留纪之交的黔中隆起和宜昌上升[J].*科学通报*, 2001, 46(12): 1052-1056.
- Chen X, Rong J Y, Zhou Z Y, et al. The central Guizhou and Yichang uplifts, upper Yangtze Region, between Ordovician and Silurian[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(18): 1580-1584.
- [28]Schieber J. Mud re-distribution in epicontinental basins-Exploring likely processes[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 71: 119-133.
- [29]Kump L R, Arthur M A. Interpreting carbon-isotope excursions: Carbonates and organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1/3): 181-198.
- [30]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 X, Fan J X, Wang W H, 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.