

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.06005

张娣,刘伟,周业鑫,牟必鑫,周志,郝景宇,赵安坤,陆俊泽,余谦,2022. 扬子区西南缘奥陶纪末—志留纪初笔石生物地层对比及意义. 沉积与特提斯地质,42(3):413-425. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.06005

ZHANG D, LIU W, ZHOU Y X, MU B X, ZHOU Z, HAO J Y, ZHAO A K, LU J Z, YU Q, 2022. Biostratigraphic correlation of graptolites from Late Ordovician to Early Silurian on the southwestern margin of the Yangtze region. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(3):413-425. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.06005

扬子区西南缘奥陶纪末—志留纪初笔石生物地层对比及意义

张娣^{1,2}, 刘伟^{1,2}, 周业鑫^{1,2}, 牟必鑫³, 周志⁴,
郝景宇⁵, 赵安坤^{1,2}, 陆俊泽^{1,2}, 余谦^{1,2}

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081; 3. 四川省煤田地质工程勘察设计院, 四川 成都 610072; 4. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 5. 中国石油化工股份有限公司勘探分公司, 四川 成都 610041)

摘要:利用扬子西南缘天全、汉源、甘洛、布拖、金阳、永善、绥江、大关地区五峰组—龙马溪组重点剖面露头点和钻井岩心资料,通过笔石生物地层划分,建立了五峰组—龙马溪组黑色页岩的等时地层格架。通过对比纵横向黑色页岩的 TOC 含量、沉积厚度、优质页岩厚度等数据变化,探讨笔石带的分布与沉积环境、优质页岩的关系。结果表明,各剖面 and 钻井中 WF2—LM4 笔石带优质页岩普遍发育。其中布拖、金阳靠近康滇古陆边缘的地区,LM5 笔石带、LM6 笔石带岩石地层明显增厚;永善—绥江云永地 2 井、新地 2 井、绥江 B 井等地区,笔石带分布和沉积环境相似,优质页岩沉积上界由 LM4 笔石带逐步上延至 LM6 笔石带。五峰组—龙马溪组优质页岩在靠近康滇古陆一侧沉积时限为 WF2—LM4 及以下笔石带,远离古陆一侧沉积时限呈逐渐变长的趋势。天全大井坪、汉源轿顶山一带 WF2—LM5 笔石带优质页岩发育,轿顶山地区岩石地层厚度明显减薄,天全大井坪地区明显增厚,受特殊环境影响可能仍具有良好的勘探潜力。研究成果对扬子西南缘页岩气沉积有利区优选提供了依据。

关键词:扬子西南缘;奥陶纪末—志留纪初;笔石生物地层;页岩气;勘探启示

中图分类号:P618.13;P539

文献标识码:A

Biostratigraphic correlation of graptolites from Late Ordovician to Early Silurian on the southwestern margin of the Yangtze region

ZHANG Di^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, ZHOU Yexin^{1,2}, MU Bixin³, ZHOU Zhi⁴,
HAO Jingyu⁵, ZHAO Ankun^{1,2}, LU Junze^{1,2}, YU Qian^{1,2}

收稿日期:2022-01-02; 改回日期:2022-05-27 责任编辑:郭秀梅 科学编辑:杨平 英文审校:王高明

作者简介:张娣(1982—),女,硕士,工程师,主要从事生物地层研究及非常规油气调查工作。E-mail: 6505952@qq.com

通讯作者:刘伟(1981—),男,硕士,高级工程师,主要从事沉积与岩相古地理、页岩气资源调查评价工作。E-mail: 36200224@qq.com

资助项目:第二次青藏高原综合科学考察(2019QZKK0704, 2019QZKK0708);国家自然科学基金(41807333);中国地质调查局地质调查项目(DD20160176, DD20190080);成都地质调查中心“刘宝珺院士基金”;中石化项目(35450003-20-ZC0613-0003)

(1. *Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China*; 2. *Key Laboratory of Sedimentary Basins and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610081, China*; 3. *Sichuan Institute of Coal Field Geological Engineering Exploration and Designing, Chengdu 610072, China*; 4. *Oil and Gas Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China*; 5. *Sinopec Exploration Company, Chengdu 610041, China*)

Abstract: Based on the data of graptolite biozonations of section outcrops and drilling cores in the southwestern margin of Yangtze region, the isochronous stratigraphic framework of the Wufeng-Longmaxi Formation black shales is established. By comparing the horizontal and vertical changes of black shales' TOC, the thickness of depositions, and the thickness of high-quality shales, the relationship between the graptolite biozones and the depositional environments of high-quality shales is defined. The results show that the high-quality shales in Butuo, Jinyang, Ganluo, and Well Yunyongdi 3 are below graptolite biozones of WF2-LM4 while strata of LM5-LM6 are obviously thickened. In Duguan-Suijiang area, Well Yunyongdi 2, Well Xindi 2, and Well Suijiang B, the graptolite biozones and sedimentary environment are stable, but their exploration effects are obviously different. The highest level of high-quality shale is of the LM4 graptolite biozone, which may extend to the LM6 graptolite biozone gradually. Beside the Kangdian Oldland, high-quality Wufeng-Longmaxi black shales range from WF2 to LM4 graptolite biozones while away from the the Kangdian Oldland the black shales possess a higher horizon. High-quality shale of WF2-LM5 graptolite biozones well developed in Dajingping and Jiaodingshan areas. The thickness of the strata in the Jiaodingshan area of Hanyuan is obviously thinner, but it becomes thicker in the Dajingping area of Tianquan, indicating a special geological setting. This research results provide a basis for the favorable areas of shale gas exploration in the southwestern margin of the Yangtze region.

Key words: southwestern margin of Yangtze region; Late Ordovician to Early Silurian; graptolite biostratigraphy; shale gas; explorational implication

0 引言

笔石是一类已绝灭的海相群体动物,不仅具有高度的地层对比价值,又是一类指相化石,代表了较为平静海水的特殊沉积环境(穆恩之,1950,1957)。其种类多、分布广、演化迅速而且特征明显,因此成为奥陶纪—志留纪碎屑岩相地层对比研究中的标准化石,被用作确定地层年代的“黄金标尺”(陈旭等,2015)。扬子区五峰组—龙马溪组笔石带划分方案(陈旭等,2015)被中石油、中石化、地调等产业部门广泛应用,WF1—LM9的13个笔石带(图1)代表了扬子地区目前最完整、连续的笔石生物地层序列,并可高效、准确地应用于钻井施工现场,在勘探中对黑色页岩的层位起到了精准的定位作用(陈旭等,2021)。在四川盆地及周缘地区,罗超等(2017)、王红岩等(2015,2017,2018)、何贵松等(2019)、梁峰等(2016,2017,2018,2019)对笔石生物地层进行了详细划分和对比,在笔石生物地层格架下探讨了优质页岩的沉积特征、成因机制、富集规律、沉积模式、保存条件、选区评价等,越来越多的成果陆续被发表(邹才能等,2015,2019; Liu et al., 2017; Wang et al., 2020; 王玉满等,2015,2017,

2018; 聂海宽等, 2016, 2017, 2019, 2020a, 2020b; Nie et al., 2020; 陈孝红等, 2018; 童川川等, 2018; Sun et al., 2019; 周志等, 2020; 熊强青等, 2020; 武学进等, 2020), 对这套优质页岩的认识达到了新高度。邹才能等(2015, 2019)、聂海宽等(2016)提出, WF2—LM4 笔石页岩段是页岩气的富集高产段。这些研究成果对扬子区奥陶纪—志留纪间的页岩气地层对比和勘探开发起到了重要指导作用, 为页岩气区块的资源潜力评估提供了重要依据。

高精度生物地层研究, 特别是以笔石带的带化石与特征分子一起组成的生物化石组合, 可以较准确地确定地层。以笔石带为基础的生物地层对比, 反映出来的地质问题具有重要的参考意义。扬子区西南缘地质构造复杂, 生物地层研究程度较低。本文通过对扬子西南缘的沉积、生物地层研究, 探讨笔石带的分布与沉积环境、优质页岩的关系, 以期预测该地区页岩气勘探开发的富集高产层段提供基础资料。

1 地质背景

扬子区西南缘奥陶纪末—志留纪初地层主要出露于康滇古陆东缘的二郎山—西昌一线以东, 包

系	统	阶	生 物 带		年 龄(Ma)	组	
志留系	兰多维列统	特别奇阶	N2	<i>Spirograptus turriculatus</i>	438.13	南江组	
			LM9/N1	<i>Spirograptus guerichi</i>	438.49		
		埃隆阶	LM8	<i>Stimulograptus sedgwickii</i>	438.76	龙马溪组	
			LM7	<i>Lituigraptus convolutus</i>	439.21		
			LM6	<i>Demirastrites triangulatus</i>	440.77		
		鲁丹阶	LM5	<i>Coronograptus cyphus</i>	441.57		Eospirifer
			LM4	<i>Cystograptus vesiculosus</i>	442.47		
			LM3	<i>Parakidograptus acuminatus</i>	443.40		
			LM2	<i>Akidograptus ascensus</i>	443.83		
奥陶系	上奥陶统	赫南特阶	LM1	<i>Metabolograptus? persculptus</i>	444.43	Hirnantia Fauna	观音桥组
			WF4	<i>Metabolograptus extraordinarius</i>	445.16		
		凯迪阶	Paraothograptus pacificus	3c	<i>Diceratogr. mirus</i>	445.37	Manosia
				3b	<i>Tangyagraptus typicus</i>	446.34	
				3a	下部亚带	447.02	
		WF2	<i>Dicellograptus complexus</i>	447.62	洞草沟组		
		WF1	<i>Foliomena-Nankinolithus</i>				

WF1 :*Dicellograptuscomplanatus* 带;表中各带同位素年龄值均代表其底界年龄引自 Gradstein, et al.,2012;陈旭等,2018

图1 扬子区奥陶纪—志留纪之交笔石带序列(陈旭等,2015)

Fig.1 Subdivision of the Ordovician-Silurian graptolite biozones in the Yangtze region

括泸定、汉源—荥经、甘洛—越西、马边—美姑—昭觉、绥江—雷波—永善—大关、布拖—金阳—普格等地区,构造范围隶属上扬子地区,北部以雅安北部的龙门山断裂带为界,西南部至丽江滇中推覆冲断带,南部至滇东北冲断带。其沉积构造演化与扬子地区基本一致,是在 Rodinia 裂解、特提斯形成演化的全球构造背景下发育起来的,埃迪卡拉纪—早古生代经历了局限台地、陆棚、缓坡、镶边台地和局限滞留浅海盆地沉积模式,晚古生代—中生代早期主要为海相碳酸盐台地沉积,中生代陆相沉积(刘宝珺等,1993)。奥陶纪末期,相当于五峰组的连续黑色页岩已经相变为更为近岸浅水的灰岩与白云质泥岩互层的大渡河组、白云质灰岩和粉砂岩为主的铁足菲克组、碳酸盐岩沉积为主的大箐组和薄层粉砂岩夹砂质白云岩的新沟组。大渡河组、铁足菲克组大部分、大箐组上部应为五峰组同期异相沉积(唐鹏等,2017)。

2 研究方法

本文以陈旭等(2015)提出的扬子区五峰组(WF)和龙马溪组(LM)笔石生物地层作为当前黑色页岩地层划分和对比的“标尺”(图1)。剖面点采用1:500的比例尺进行实测并以10~30cm间距连续采样,钻井岩心以5~25cm间距进行连续采样或观察并进行详细鉴定。笔石化石均在徕卡LEICA M125 体式镜下拍照。

笔者等对天全大井坪剖面、轿顶山剖面、甘洛岩润剖面、云永地3井、布托A井、金阳新寨子、云永地2井、新地2井(张娣等,2019)、绥江B井等资料点(图2)进行了详细的生物地层划分,建立了纵向近南北向的天全—汉源—甘洛—永善—大关地区和横向近东西向的布拖—金阳—永善—绥江地区奥陶纪末—志留纪初生物地层剖面格架,对比了各剖面 and 钻井奥陶纪末—志留纪初笔石带分布,在建立准确的等时地层对比框架的基础上,对沉积环境、优质页岩差异性等方面进行分析 and 讨论。

3 典型剖面 and 钻井生物地层及沉积特征

3.1 天全大井坪剖面

四川泸定冷碛佛耳岩、鸳鸯岩(大井坪)等二郎山地区,大地构造位置介于康滇地轴北东边缘和龙门山台缘拗陷南部之间的过渡地带,岩性组合特征与扬子区区别明显,地层序列已自成体系。金淳泰等(1989)将其相当于五峰组、观音桥组、龙马溪组的地层命名为新沟组、二郎山组、鸳鸯岩组。新沟组为深灰色薄层粉砂岩夹砂质白云岩,上部产 *Yinograptus* sp.、*Dicellograptus ornatus* Chen、*Parakidograptus* sp.等笔石及牙形石,其层位与五峰组WF3的 *Tangyagraptus typicus* 带相当。二郎山组为深灰色钙质粉晶白云岩夹薄页岩,产笔石和牙形石,层位相当于綦江上奥陶统顶部的观音桥组,但岩性已有变化,几乎不含腕足类化石(金淳泰等,1989)。鸳鸯岩组底部为黑色薄层硅质岩夹薄砂岩,产LM1—LM4笔石带的重要分子和单笔石类化石,相当于龙马溪组,其地层沉积厚度巨大,在康滇古陆与川中古隆起之间可能存在水道与巴颜喀拉海相通(刘伟等,2010),因其上部露头不佳,本文仅划分出WF3—LM6笔石带。

3.2 汉源轿顶山剖面

汉源轿顶山剖面位于四川省雅安市汉源县尖子

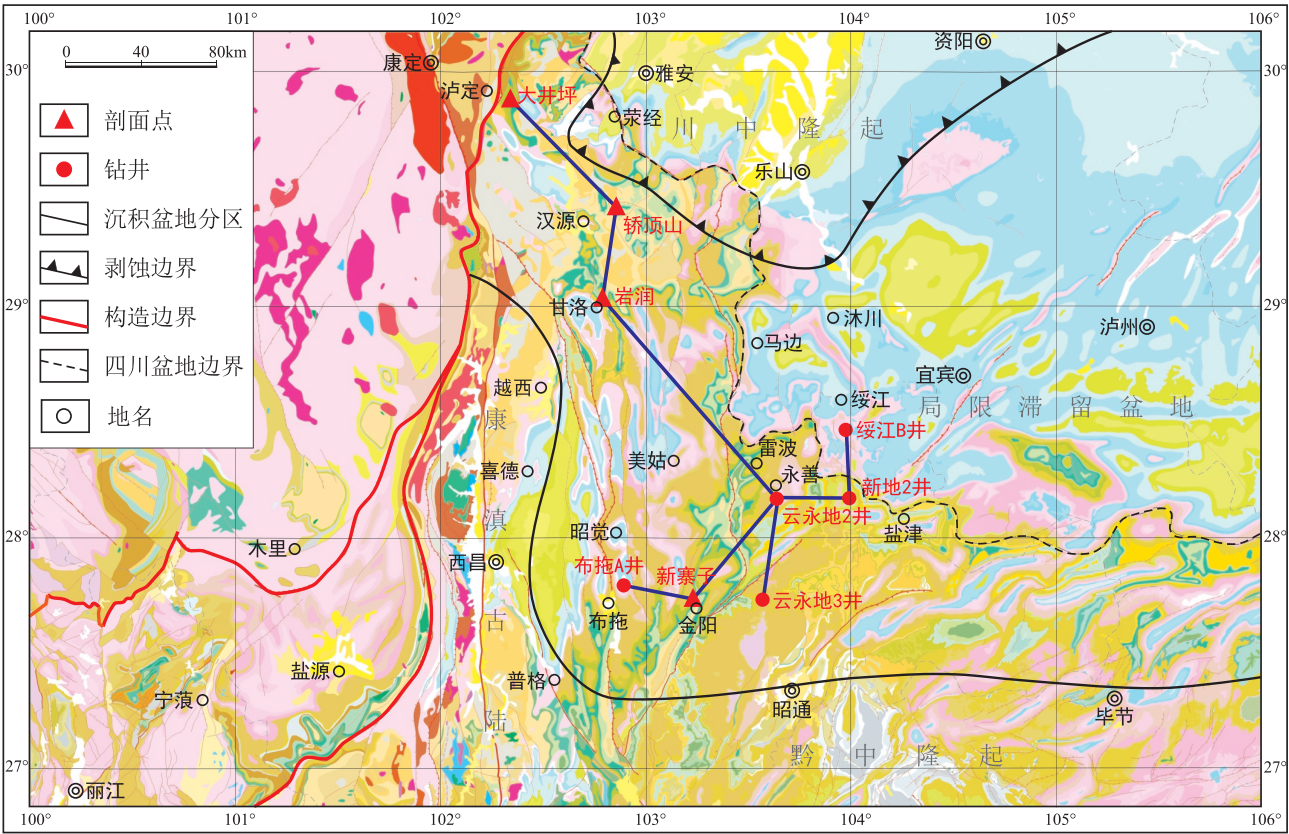
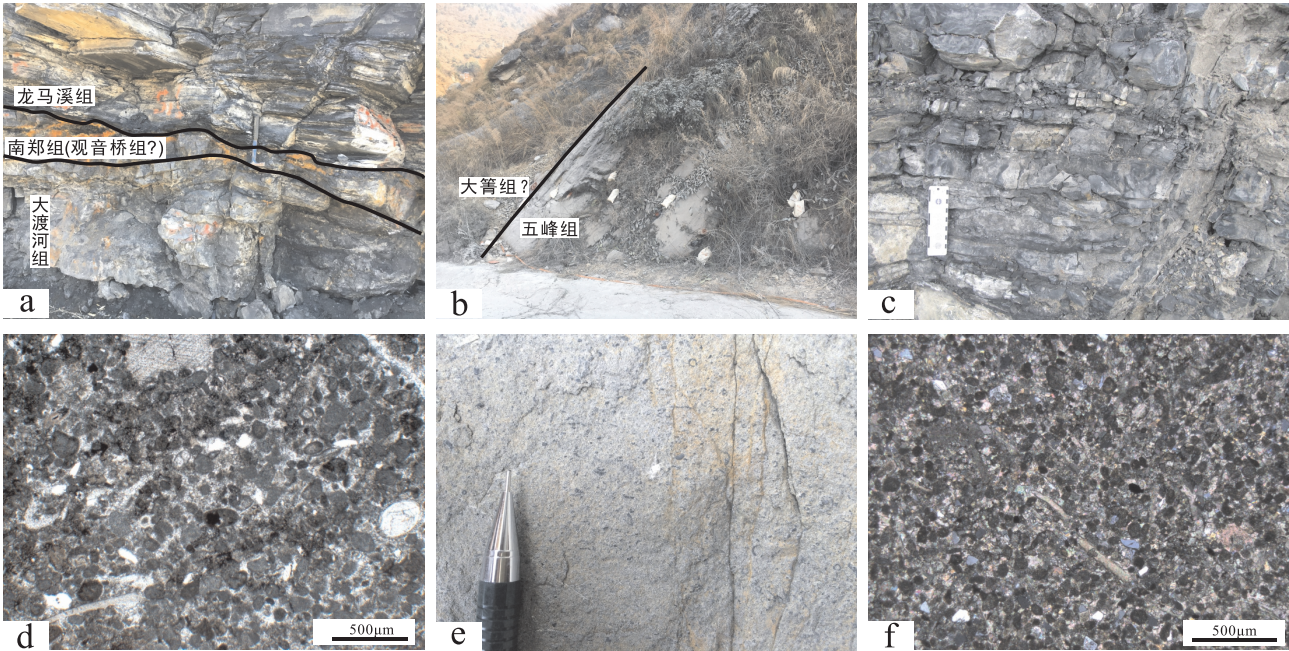


图2 研究区奥陶纪—志留纪之交古地理格局
Fig. 2 Paleogeographic frame from Ordovician to Silurian in the study area



a. 龙马溪组与南郑组、大渡河组界线, 汉源轿顶山; b. 大渡河组与五峰组界线, 大渡河组为灰色中—厚层状灰质白云岩与白云质灰岩, 五峰组为硅质、钙质黑色碳质页岩与薄层状泥质白云岩互层, 甘洛岩洞; c. 薄层状透镜体状硅质灰岩夹笔石页岩, 五峰组, 金阳新寨子; d. 泥微晶生屑砂页岩, 观音桥组, 金阳新寨子; e. 海百合等生物碎屑发育, 观音桥组, 金阳新寨子; f. 泥微晶生屑砂页岩, 观音桥组, 云永地3井, 996.57m

图3 研究区奥陶纪—志留纪之交岩石地层接触关系及岩石类型

Fig. 3 The contact relationship and rock types from Ordovician to Silurian in the study area

山北西 400m, 地层发育连续完整, 仅龙马溪组上部出露不佳。五峰组同期地层以含锰碳酸盐岩为主, 间夹黑色笔石页岩, 与扬子区的五峰组在岩性上差异明显, 因此, 建立了大渡河组这一新的岩石地层单元, 该剖面为大渡河组的命名剖面(胡正国, 1980; 穆恩之等, 1981; 冯洪真, 1991)。大渡河组实际为扬子区五峰组的同期异相沉积(冯洪真, 1991; 唐鹏 2017)。对轿顶山剖面 1.9m 左右的灰质白云岩及其下薄层黑色碳质泥岩(图 3a)进行详细的生物地层划分, 发现凯迪阶 WF2—WF3 的特征分子 *Appendispinograptus supernus* (Elles and Wood) (图 4a)、*Appendispinograptus venustus* (Hsü) (图 4b)、*Appendispinograptus ex gr. longispinus* (T. S. Hall)、*Dicellograptus ornatus* Elles and Wood, 灰质白云岩经牙形刺鉴定为 *Protopanderodus insculptus* 带, 时代为凯迪中—晚期。其上南郑组(观音桥组?)主要沉积深灰色中厚层钙质粉砂岩, 含生物骨屑灰岩透镜体, 具有典型的 *Hirnantia* 动物群分子(冯洪真, 1991; 牟传龙等, 2015), 划分出赫南特阶上部的 LM1 *Metabolograptus persculptus* 带(图 4c)。龙马溪组黑色笔石页岩识别出鲁丹阶的 LM2—LM3 *Akidograptus ascensus* 带—*Parakidograptus acuminatus* 带(图 4d)、LM4 *Cystograptus vesiculosus* 带(图 4e)、LM5 *Coronograptus cyphus* 带(图 4f)、埃隆阶的 LM6 *Demirastrites triangulatus* 带(图 4g), 之上为坡积物所掩盖。

3.3 甘洛岩润剖面

甘洛岩润剖面位于甘洛县城东北 2km 处, 地层倒转但发育连续完整(图 3b), 风化较严重, TOC 数据仅供参考。通过对甘洛岩润剖面进行详细测制和笔石生物鉴定, 自下而上识别出 WF2—LM6。甘洛岩润剖面五峰组及其下大箐组连续发育, 见五峰组特征分子 *Dicellograptus* sp. (图 4h)、*Dicellograptus ornatus* Elles and Wood, *Rectograptus abbreviatus* (Elles and Wood) (图 4i) 及 WF3 带化石 *Paraorthograptus pacificus* (图 4j)。因露头不佳未发现典型观音桥组沉积, 本文以大量爆发式正常笔石属的出现作为观音桥组与龙马溪组的界线。何心一(2009)曾报道甘洛田坝地区上奥陶统赫南特阶观音桥组中发现四射珊瑚 *Borelasma*, *Crassilasma* 和 *Streptelasma* 等属。值得指出的是, 甘洛剖面浮游笔石与典型的底栖树形笔石一起埋藏, 这对于解释古生态环境和古地理位置都具有重要的意义(图 4k)。

3.4 金阳新寨子剖面

金阳新寨子剖面位于金阳县北西方向天地坝

镇新寨子村, 与金阳县城直线距离约 3.70km。剖面出露较好, 关键地层界限清楚, 笔石丰富。下部临湘组小瘤状灰岩特征明显, 其上岩性由灰黑色薄层状透镜体状硅质灰岩夹笔石页岩逐渐过渡为中厚层含钙质碳质泥岩夹薄层碳质泥岩(图 3c), 笔石丰富, 见 WF1 带化石 *Dicellograptus cf. complanatus* (Lapworth) (图 4n)、WF3 带化石 *Paraorthograptus pacificus* (Ruedemann) 和 WF2—3 笔石带特征分子 *Appendispinograptus supernus* (Elles and Wood) (图 4l)、*Dicellograptus ornatus* Elles and Wood、*Appendispinograptus cf. Leptothecalis* (Ge) (图 4m)、*Rectograptus uniformis* (Mu and Lee) (图 4o) 等, 观音桥组岩性为灰色泥微晶生屑砂屑灰岩(图 3d), 肉眼可见海百合茎碎片丰富(图 3e)。龙马溪组下部主要岩性为灰黑色钙质碳质泥岩, 夹数层含生屑泥质灰岩。因上部露头不佳, 本文划分出 WF1—LM6 笔石带。

3.5 布托 A 井

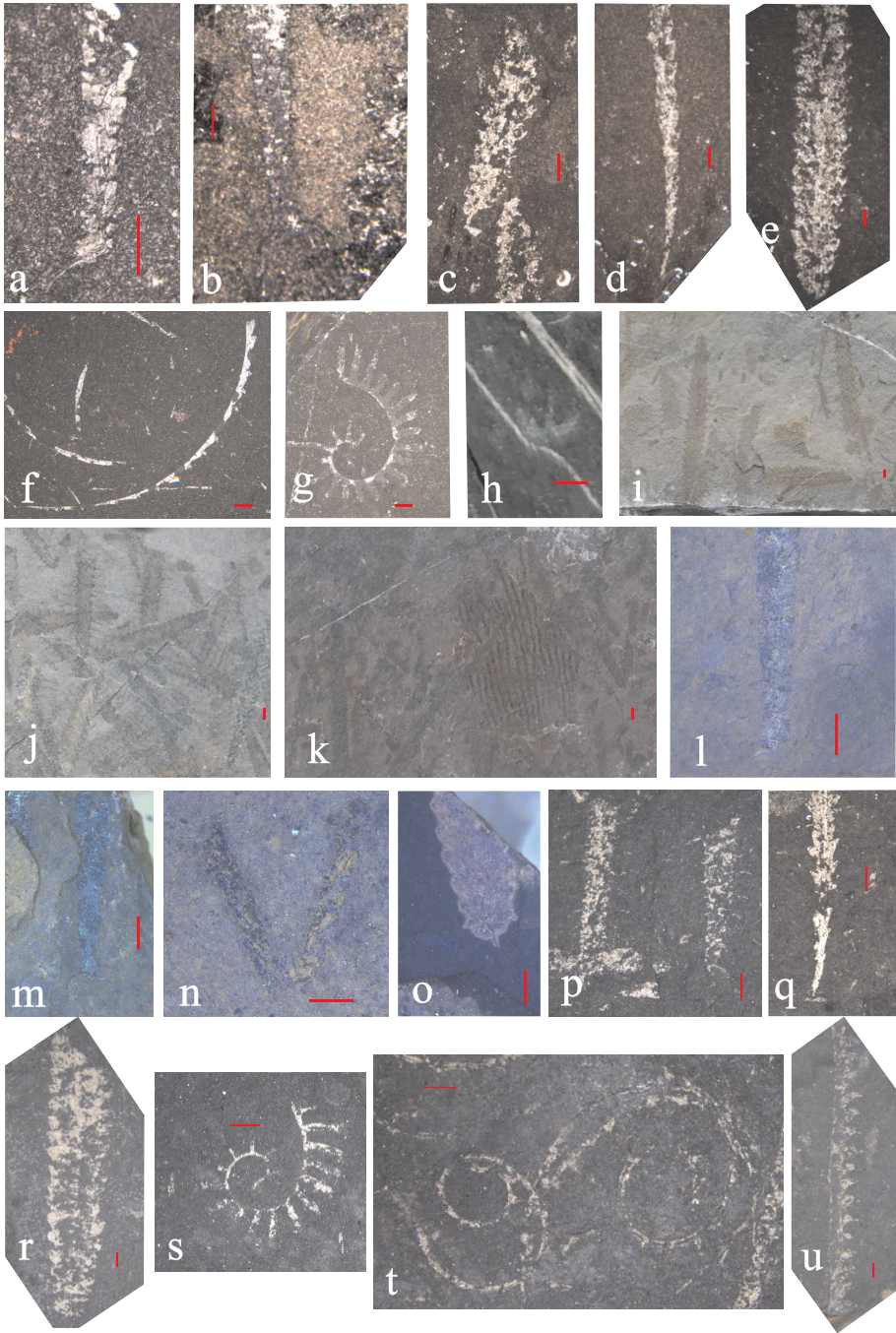
布托 A 井位于四川省凉山彝族自治州布拖县火烈乡, 处于龙恩河断裂和瓦都断裂两条逆冲断层组成的对冲构造内的宽缓褶皱带。该井五峰组下部为硅质页岩, 中部夹多套钙质粉砂质泥岩, 顶部为微晶生屑灰岩; 观音桥组主要岩性为灰—深灰色中层状含生屑灰岩, 生物碎屑以腕足类为主; 龙马溪组为黑色、深灰色、黄灰色炭质、钙质、砂质页岩及粉砂岩; 划分出 WF2—LM6 笔石带。

3.6 新地 2 井

新地 2 井位于云南省昭通市大关县木杆镇漂坝村, 区域构造位置处于滇东北冲断褶皱带大关木杆向斜。该井临湘组为浅灰色瘤状灰岩; 五峰组为灰黑色钙质含碳—碳质泥岩夹灰黑色薄层硅质岩, 含多层斑脱岩; 观音桥组为含腕足介壳及海百合茎碎屑泥灰岩, 见 *Hirnantia* 动物群; 龙马溪组为黑色笔石页岩, 岩性以灰黑色钙质含碳—碳质泥岩为主。通过详细的生物地层划分, 可识别出 WF1—LM8 连续笔石带和组合(张娣, 2019)。

3.7 云永地 2 井

云永地 2 井位于云南省永善县溪洛渡镇玉笋村, 完钻井深 1456.74m。奥陶系—志留系地层由下至上分别为: 五峰组为灰黑色含硅质碳质泥页岩与含钙质碳质泥页岩间互, 与下伏临湘组呈整合接触; 观音桥组为深灰色含 *Hirnantia* 动物群泥质灰岩; 龙马溪组灰黑色碳质页岩与灰黑色含钙质碳质泥岩互层, 笔石丰富。通过详细的笔石鉴定, 建立了



a. *Appendispinograptus superus* (Elles and Wood), WF2-4, 轿顶山; b. *Appendispinograptus venustus* (Hsu), WF2-4, 轿顶山剖面; c. *Metabolograptus* cf. *perscultus*(Elles and Wood), LM1, 轿顶山; d. *Parakidograptus acuminatus*(Nicholson), LM3, 轿顶山剖面; e. *Cystograptus vesiculosus* (Nicholson), LM4, 轿顶山; f. *Coronograptus tenellus* (Chen and Lin), LM5, 轿顶山; g. *Rastrites approximatus* Perner LM6, 轿顶山; h. *Dicellograptus* sp. WF3,甘洛岩润; i. *Rectograptus abbreviatus*(Elles and Wood), WF1-4, 甘洛岩润; j. *Paraorthograptus pacificus* (Ruedemann), WF3, 甘洛岩润; k. *Dictyonema* sp., 网格笔石, 甘洛岩润; l. *Appendispinograptus supernus* (Elles and Wood), WF2-4, 新寨子; m. *Appendispinograptus* cf. *Leptothecalis*(Ge), WF2-4, 新寨子; n. *Dicellograptus* cf. *complanatus*(Lapworth), WF1, 新寨子; o. *Rectograptus uniformis* (Mu and Lee), WF1-4, 新寨子; p. *Paraorthograptus pacificus* (Ruedemann)1, WF3, 1331.30m, 云永地2井; q. *Parakidograptus acuminatus* (Nicholson), LM3, 1329.30m, 云永地2井; r. *Cystograptus vesiculosus* (Nicholson), LM4, 1324.11m, 云永地2井; s. *Rastrites approximatus* Perner LM6, 1289.72m, 云永地2井; t. *Lituigraptus convolutus* (Hisinger), LM7, 1280.19m, 云永地2井; u. *Stimulograptus sedgwickii*(Portlock) LM8, 1240.76m, 云永地2井; 图中比例尺均代表1mm

图4 研究区奥陶纪—志留纪之交部分典型笔石化石

Fig.4 Typical graptolites from Ordovician to Silurian in the study area

WF2—LM8 完整的笔石带序列(图 4p—u),但受后期构造运动影响,裂缝发育,含气性极差,现场岩心浸水实验基本看不见气泡。

3.8 绥江 B 井

绥江 B 井为位于云南省昭通市绥江县。五峰组为灰黑色含硅质碳质泥页岩与含钙质碳质泥页岩间互;观音桥组为深灰色含生物碎屑灰岩,非常薄,只有 0.05m 左右,需细致观察才可识别,见 *Paromalomena polonica* (Temple),为赫南特贝动物群的重要分子。龙马溪组岩性以灰黑色碳质泥岩、灰黑色含钙质碳质泥岩为主,笔石丰富。绥江 B 井从五峰组到龙马溪组具有 WF2—LM8 下部完整的笔石带序列,其笔石带与新地 2 井有许多相似之处。

3.9 云永地 3 井

云永地 3 井位于云南省永善县莲峰镇大荡村,完钻井深 1501.27m。五峰组为灰黑色含碳钙质泥岩,夹少量深灰色泥灰岩,深灰色泥晶灰岩,偶夹灰黑色钙质泥岩条带。见 WF3 带化石 *Paraorthograptus pacificus* (Ruedemann) 和 WF2—WF4 特征分子 *Appendispinograptus supernus* (Elles and Wood), *Dicellograptus minor* Toghil,以底部深灰—灰黑色含碳钙质泥岩与下伏地层临湘组顶部深灰色泥微晶灰岩为界。观音桥组为灰—深灰色含泥—泥质生屑砂屑灰岩(图 3f),中部 0.34m 段含丰富腕足介壳。龙马溪组底部为厚层状黑色钙质碳质泥岩,其上为灰—深灰色含粉砂钙质泥岩与浅灰—灰色钙质粉砂岩组成的毫米—厘米级韵律层,可识别出 LM2—LM5 笔石带,见 *Normalograptus angustus* (Perner), *Normalograptus ajjeri* (Legrand), *Cystograptus vesiculosus* (Nicholson), *Cystograptus penna* (Hopkinson), *Dimorphograptus nanjingensis* Sun, *Coronograptus annellus* Li 等分子。向上逐渐过渡为灰色含钙泥岩夹浅灰色微—粉晶灰岩、含泥砾微—粉晶灰岩。云永地 3 井位于古隆起边缘,具有向上变浅的沉积序列特征。本井的有机碳含量整体较低,仅在龙马溪底部明显升高,TOC 最大值为 3.86%,微含气,现场解析含气量最高为 1.16m³/t,受断层的影响作用较小,有利于页岩气保存。

4 笔石带的分布与对比

根据上述剖面 and 钻井资料点笔石鉴定结果,并与陈旭等(2015,2021)建立的扬子区笔石带划分标

准进行对比如表 1,表 2 所示。笔石带的分布与对比可以看出,五峰组内的 WF2 和 WF3 笔石带广泛分布,而赫南特阶的 WF4 和 LM1 的笔石动物群在云永地 2 井、新地 2 井、轿顶山等地分布,但这些地点地层连续完整,应当有这两个带的层位。龙马溪组的 LM2—LM6 笔石带,特别是 LM2—LM4 笔石带遍及全区,而 LM6 以上的笔石带,特别是 LM7 带之上,分布局限。因此,扬子西南缘五峰组和龙马溪组笔石带的分布基本特征和上扬子地区总体格局是一致的,其中 WF2—LM4 笔石带是分布最广泛的“甜点层段”(邹才能等,2015,2019;聂海宽等,2016),是页岩气产出的主要烃源岩层及储层。从上述笔石带的分布来看,扬子西南缘同样具有扬子地台含页岩气层位的基础条件。

5 讨论

5.1 基于生物地层的沉积环境及优质页岩对比

五峰组—龙马溪组笔石带对比总体规律同上扬子其他地区一致。由于邻近古陆边缘,笔石带分布与对比的不均匀性,展示了各剖面点之间沉积环境的差异,优质页岩沉积时限也表现出了区域不均一性。

5.1.1 东西向的差异性

通过布拖—金阳—永善—绥江地区生物地层剖面格架对比(图 5),西部的布拖—金阳地区凯迪阶 WF2—WF4 笔石带以钙质碳质页岩、硅质灰岩为主,局部层位钙质含量较高,显著特征为碳酸盐岩和碎屑岩的混合沉积,且碎屑岩内部多含有钙质成分,沉积构造仍以水平层理为主,较深水陆棚相相比,水体深度相对较浅,钙质成分较多,仍属浅海陆棚范围(牟传龙等,2015),为灰泥质浅水陆棚沉积。龙马溪组底部 LM1—LM6 笔石带为碳质泥岩、碳质钙质泥岩为主,应为深水陆棚环境,优质页岩(TOC ≥2%)沉积上界一般不高于 LM4 带。优质页岩厚度明显减薄,约 10~30m。向上钙质、粉砂质含量逐渐增加,LM5 笔石带、LM6 笔石带岩石地层明显增厚,有机质含量显著降低,其上地层为灰质、粉砂质所代替,LM7—LM8 笔石带不发育。

东部永善—绥江地区云永地 2 井、新地 2 井、绥江 B 井等地区,五峰组 WF2—WF4 笔石带以钙质碳质泥岩、含碳质泥灰岩,偶夹灰岩透镜体或灰岩薄层,为灰泥质浅水陆棚沉积。龙马溪组 LM1—LM8

表 1 布拖—金阳—永善—绥江地区笔石带对比

Table 1 Comparison of graptolite biozonesamong Butuo, Jinyang, Yongshan and Suijiang areas

系	统	阶	笔石带代码	笔石带名称	沉积时间 (Ma) Gradstein et al.,2012	布拖 A 井	金阳新寨子	云永地 2 井	新地 2 井	绥江 B 井
志留系	兰多维列统	特列奇阶	N2	<i>Spirograptus turriculatus</i>						
			LM9/N1	<i>Spirograptus guerichi</i>	0.36					
		埃隆阶	LM8	<i>Stimulograptus sedgwickii</i>	0.27	?		LM8	LM8	LM8
	鲁丹阶		LM7	<i>Lituiograptus convolutus</i>	0.45	?	露头不佳	LM7	LM7	LM7
			LM6	<i>Demirastrites riangulatus</i>	1.56	LM6	LM6	LM6	LM6	LM6
			LM5	<i>Coronograptus cyphus</i>	0.80	LM5	LM5	LM5	LM5	LM5
			LM4	<i>Cystograptus vesiculosus</i>	0.90		LM4	LM4	LM4	LM4
			LM3	<i>Parakidograptus acuminatus</i>	0.93	LM1—LM4	LM3			LM3
			LM2	<i>Akidograptus ascensus</i>	0.43					
奥陶系	上奥陶统	赫南特阶	LM1	<i>Metabolograptus persculptus</i>	0.60		LM1—LM2			LM1—LM2
			WF4	<i>Metabolograptus extraordinarius</i>	0.73					
	凯迪阶(上部)		WF3	<i>Paraorthograptus pacificus</i>	1.86	WF2—WF4	WF2—WF4	WF2—WF4	WF3—WF4	WF3—WF4
			WF2	<i>Dicellograptus complexus</i>	0.60				WF2	WF2
			WF1	<i>Dicellograptus complanatus</i>		?	WF1	?	WF1	?

笔石带下段黑色页岩总体有机质含量相对较高,笔石及放射虫生物均较发育,整体属于深水陆棚沉积环境。优质页岩沉积上界由 LM4 笔石带逐步上延至 LM6—LM7 笔石带(图 5),优质页岩厚度增加至 60 ~ 80m。

通过东西向对比,WF2—LM4 笔石带沉积环境表现出了较强的稳定性。自西向东优质页岩表现出缓慢增厚的趋势(图 5),表明沉积水体缓慢加深。WF2—LM4 笔石带总体上继承了沉积基底宽缓的古地貌差异。LM5—LM6 笔石带沉积环境表现出了相带分异,自西向东沉积厚度逐渐减薄,西部钙泥质及粉砂逐渐成为优势组分,而有机质含量快速降低,但东部永善—绥江地区 LM5—LM6 笔石带仍发育优质页岩。

5.1.2 南北向的差异性

通过天全—汉源—甘洛—大关地区生物地层格架剖面对比(图 6),其中北部的天全大井坪地区,凯迪期新沟组 WF2—WF4 笔石带发育浅水陆棚沉积,岩性为含白云质粉砂岩夹砂质白云岩。鲁丹期鸳鸯岩组 LM2—LM6 笔石带厚度达上百米,为含碳

硅质钙质泥页岩,发育深水陆棚沉积。

轿顶山地区凯迪期大渡河组发育 WF2—WF3 笔石带特征分子,主体为灰质白云岩,并含锰、钴矿,岩石中含大量蓝绿藻、红藻和绿藻,并具大量隐藻组构(曲红军,1988),为藻礁相沉积(牟传龙等,2015)。龙马溪组 LM2—LM6 笔石带为黑色碳质页岩,页理发育,笔石丰富,有机质含量较高,为深水陆棚沉积,但岩石地层明显减薄。

甘洛岩润剖面凯迪期识别出 WF2—WF3 笔石带的特征分子和 WF3 的带化石,主要为含碳硅质钙质泥页岩沉积,为灰泥质浅水陆棚沉积。龙马溪组下部 LM2—LM5 笔石带总体为含碳粉砂质泥页岩、含碳钙质泥页岩,并夹灰岩透镜体或灰岩薄层,LM2—LM5 笔石带厚度稍薄,有机质发育,为深水陆棚沉积。LM6 笔石带及以上则以贫有机质的粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、泥灰岩为主,笔石相对减少,种属趋于单一。

南部的云永地 3 井位于相对更靠近黔中古隆起一侧。凯迪期 WF2—WF3 笔石带为灰黑色含碳钙质泥岩,夹少量深灰色灰岩,呈灰岩与泥岩互层,灰

表 2 天全—汉源—甘洛—永善—大关地区笔石带对比

Table 2 Comparison of graptolite biozones among Tianquan, Hanyuan, Ganluo, Yongshan and Daguan

系	统	阶	笔石带代码	笔石带名称	沉积时间 (Ma) Gradstein et al.,2012	大井坪 (金泰淳、叶 少华等, 1989)	轿顶山	甘洛岩润	云永 地 2 井	云永 地 3 井
志留系	兰多维列统	特列奇阶	N2	<i>Spirograptus turriculatus</i>		N2				
			LM9/N1	<i>Spirograptus guerichi</i>	0.36	LM9				
		埃隆阶	LM8	<i>Stimulograptus sedgwickii</i>	0.27	LM8		LM8		
			LM7	<i>Lituigraptus convolutus</i>	0.45	LM7	露头不佳	露头不佳	LM7	
			LM6	<i>Demirastrites triangulatus</i>	1.56	LM6	LM6	LM6	LM6	灰岩
	鲁丹阶		LM5	<i>Coronograptus cyphus</i>	0.80	LM5	LM5		LM5	LM4—5
			LM4	<i>Cystograptus vesiculosus</i>	0.90	LM4	LM4		LM4	
			LM3	<i>Parakidograptus acuminatus</i>	0.93	LM3	LM3	LM1-LM5		
			LM2	<i>Akidograptus ascensus</i>	0.43	LM1—LM2	LM2		LM1—LM3	LM1—LM3
	上奥陶统	赫南特阶	LM1	<i>Metabolograptus persculptus</i>	0.60		LM1			
			WF4	<i>Metabolograptus extraordinarius</i>	0.73					
		凯迪阶 (上部)	WF3	<i>Paraorthograptus pacificus</i>	1.86	WF2—WF4	WF2—WF4	WF2—WF4	WF2—WF4	WF2—WF4
			WF2	<i>Dicellograptus complexus</i>	0.60					
			WF1	<i>Dicellograptus complanatus</i>		?	?	?	?	?

岩厚度明显增加,为灰泥质浅水陆棚沉积。龙马溪组 LM2—LM4 笔石带为厚层状黑色钙质碳质泥岩,发育深水陆棚沉积。向上逐渐过渡为浅灰色微—粉晶灰岩(LM5 笔石带),呈向上变浅的沉积特征。LM5 及以上笔石带沉积浅灰色钙质泥岩夹钙质粉砂岩,已不具备深水陆棚面貌。笔石带顶界只达 LM5 带,未见 LM6 及以上笔石带的特征分子。优质页岩在云永地 3 井明显减薄。

通过南北向对比,WF2—LM4 笔石带沉积环境相对稳定,自北向南优质页岩受沉积基底古地貌起伏变化的影响,变化较大。LM5—LM6 笔石带沉积环境表现出浅水陆棚特征,代表了受川中隆起、黔中古隆起影响的相带分异。

5.2 对比结果

通过上述剖面和钻井笔石带对比表明,上扬子地区五峰组—龙马溪组优质页岩的顶界具有明显的穿时性,由更靠近古陆的云永地 3 井(LM2—LM3 笔石带),向永善、绥江、长宁、焦石坝地区(LM5—LM6 笔石带),直至威远、巫溪(LM6—LM7 笔石带)等地笔石带顶界逐步升高。越靠近古陆边缘,优质

页岩顶界越低;越靠近水体深的地区,笔石带顶界越高。总体来看,五峰组—龙马溪组优质页岩在靠近古隆起或古陆一侧沉积时限为 WF2—LM4 笔石带,远离古陆或古隆起一侧(进入局限海或水体较深、沉积拗陷区)优质页岩沉积时限为 WF2—LM6 笔石带甚至更高,呈逐渐变长的趋势。

综上所述,甘洛—布拖—金阳—云永地 3 井及其周缘地区,分别为靠近康滇古陆和黔中隆起的边缘地区,沉积水体明显变浅。优质页岩沉积上界不高于 LM4 笔石带,深水陆棚亚相持续时间为至 LM2—LM4(或更短),优质页岩厚度一般 10~30m。云永地 3 井优质页岩仅为 3m。在“二元富集理论”指导下(郭旭升,2014),甘洛—布拖—金阳—云永地 3 井等靠近康滇古陆或黔中古隆起的边缘地区,优质页岩厚度不大,物质基础较差。

扬子西南缘永善—绥江云永地 2 井、新地 2 井及绥江 B 井等地区,尽管深水陆棚沉积时限长,优质页岩厚度大,划分为沉积有利区无疑,但是勘探效果却呈现巨大差异。云永地 2 井、绥江 B 井基本不含气,新地 2 井现场解析含气量大于 2m³/t 的优

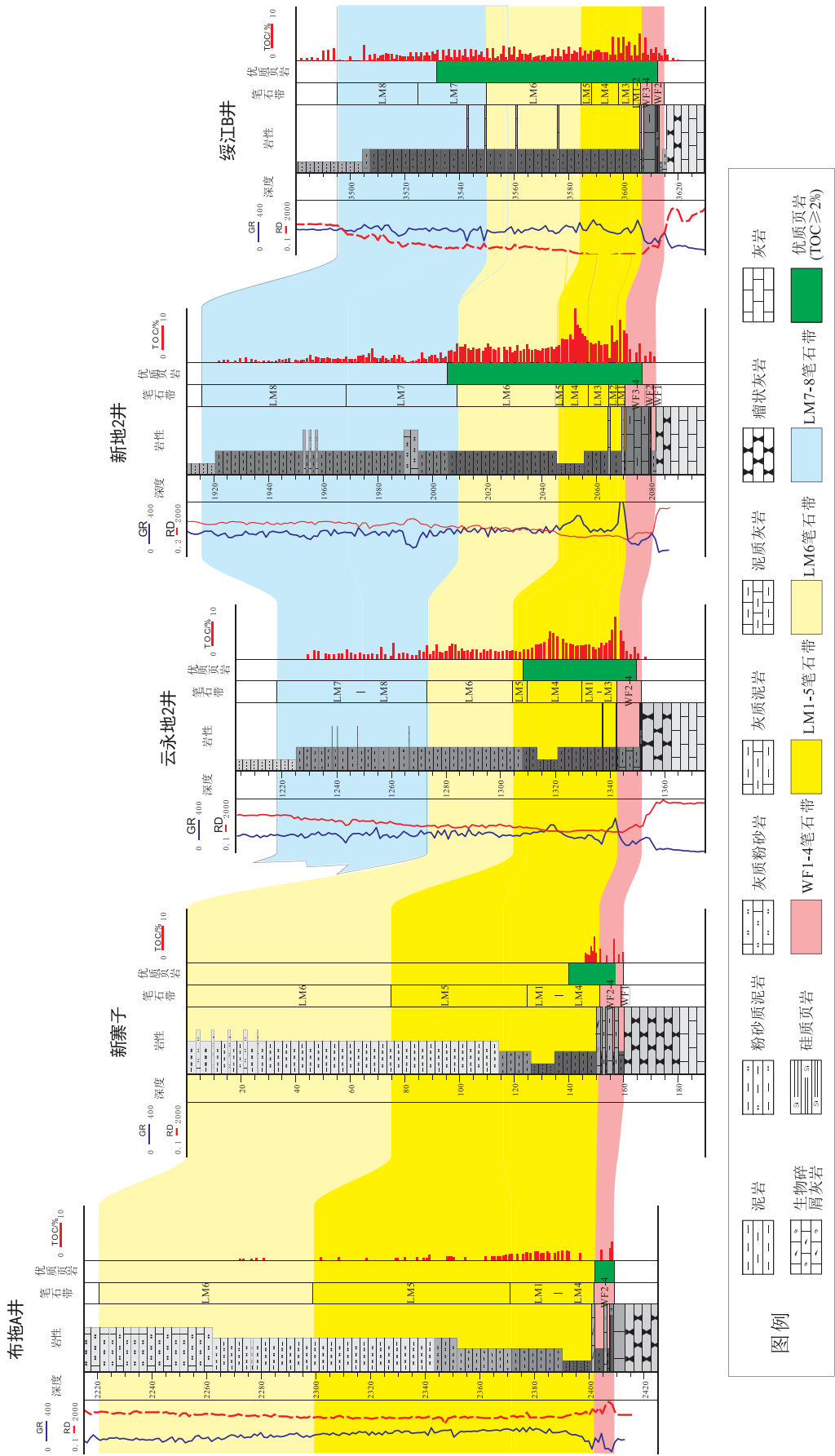


图 5 布拖—金阳—永善—绥江地区五峰组—龙马溪组生物地层剖面(剖面位置见图 2)

Fig. 5 Comparison of biostratigraphic sections of Wufeng-Longmaxi Formation among Butuo, Jinyang, Yongshan and Suijiang

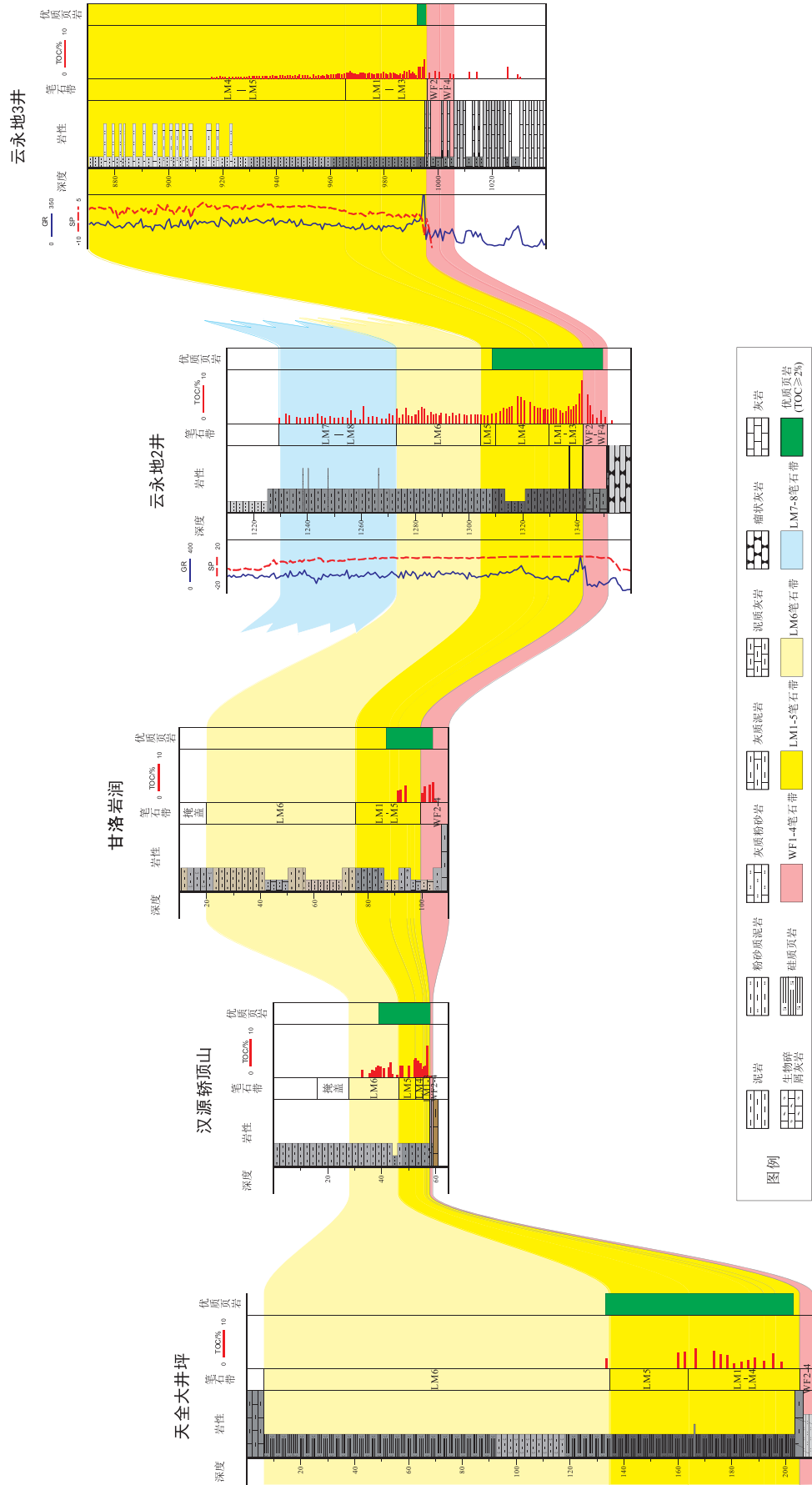


图 6 天全—汉源—甘洛—永善—大关地区五峰组—龙马溪组生物地层格架剖面(剖面位置见图 2)

Fig. 6 Comparison of biostratigraphic sections of Wufeng-Longmaxi Formation among Tianquan, Hanyuan, Ganluo, Yungshan and Dagan

质页岩厚度达38m,距新地2井200m左右部署实施的云大页1井直井地层含气性测试获得了5280m³/d的工业气流(余谦等,2020)。

扬子西南缘天全—汉源—甘洛新区中,优质页岩沉积上界由LM4带逐步上延至LM5笔石带甚至更高。天全大井坪优质页岩厚度增厚至上百米(图6),轿顶山地区优质页岩厚度依然有20m以上,且受特殊的古地貌、沉积环境和古构造影响(曲红军,1988,1992),有机质含量高,具备了页岩气沉积有利区的地质条件。

6 结论

通过精细的生物划分建立地层格架,结合优质页岩厚度变化,可以得出以下启示:

(1)笔石生物地层对比揭示了优质页岩在区域上的沉积时限差异。大关云永地3井、甘洛、布拖、金阳靠近古陆边缘,优质页岩沉积时限短,厚度普遍较小。永善—绥江地区的云永地2井、绥江B井与新地2井,沉积环境接近,优质页岩沉积时限长,厚度可观,指示了黑色页岩沉积有利区。

(2)笔石生物地层对比揭示了页岩气选区评价的关键控制因素。古陆边缘页岩气沉积物质基础稍差,远离古陆的沉积有利区,云永地2井、绥江B井与新地2井、云大页1井,勘探效果出现巨大差异,说明物质基础不是唯一决定因素。

(3)笔石生物地层对比为工作程度较低的新区天全—汉源地区提供了选区依据。天全大井坪、汉源轿顶山一带WF2—LM5笔石带优质页岩发育,轿顶山地区岩石地层厚度明显减薄,天全大井坪地区却明显增厚,可能仍具有良好的勘探潜力。

致谢:本文笔石化石鉴定均为笔者在陈旭院士指导下完成,在此对陈老师致以最诚挚的谢意!

参考文献(References):

Liu Z H, Thomas J A, Guo X S, et al., 2017. Paleo-environment cyclicity in the Early Silurian Yangtze Sea (South China): Tectonic or Glacio-eustatic control [J]? *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 466(1): 59–76.

Nie H K, Li D H, Liu G X, et al., 2020. An overview of the geology and production of the Fuling shale gas field, Sichuan Basin, China[J]. *Energy Geoscience*, 1(3–4): 147–164.

Sun Z Y, Fan J X, Wu L, et al., 2019. Stratigraphy of the Lungmachi

black shales from the Huaying drill core in southwestern China and its palaeogeographic implications [J]. *Palaeoworld*, 28(3): 295–302.

Wang H Y, Shi Z S, Zhao Q, et al., 2020. Stratigraphic framework of the Wufeng-Longmaxi shale in and around the Sichuan Basin, China: Implications for targeting shale gas[J]. *Energy Geoscience*, 1(3–4): 124–133.

陈孝红,张保民,陈林,等,2018. 鄂西宜昌地区晚奥陶世—早志留世页岩气藏的主控地质因素与富集模式[J]. *地球学报*, 39(3): 257–268.

陈旭,陈清,甄勇毅,等,2018. 志留纪初宜昌上升及其周缘龙马溪组黑色笔石页岩的圈层展布模式[J]. *中国科学:地球科学*, 48(9): 1198–1206.

陈旭,樊隽轩,王文卉,等,2017. 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*, 47(6): 720–732.

陈旭,樊隽轩,张元动,等,2015. 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*, 39(4): 351–358.

陈旭,王红岩,赵群,等,2021. 中国扬子区奥陶纪末至志留纪初含页岩气地层[M]. 杭州:浙江大学出版社.

冯洪真,俞剑华,方一亭,1991. 四川汉源轿顶山地区晚奥陶世五峰期地层及化石组合[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 3(4): 387–397.

郭旭升,2014. 南方海相页岩气“二元富集”规律:四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. *地质学报*, 88(7): 1209–1218.

何贵松,万静雅,周岷娜,等,2019. 南川地区南页1井五峰组—龙马溪组页岩特征与生物地层[J]. *地层学杂志*, 43(4): 376–388.

何心一,唐兰,陈建强,2009. 川南甘洛黔北仁怀地区晚奥陶世和早志留世四射珊瑚新资料及其地质意义[J]. *古生物学报*, 48(1): 9–22.

胡正国,1980. 大渡河下游地区的“达尔曼虫层”[J]. *地层学杂志*, 4(1): 29–36.

金泰淳,叶少华,江新胜,等,1989. 四川二郎山地区志留纪地层及古生物[M]. 成都:中国地质科学院成都地质矿产研究所所刊, 11: 1–224.

刘宝珺,许效松,潘杏南,等,1993. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京:科学出版社:1–236.

梁峰,拜文华,邹才能,等,2016. 渝东北地区巫溪2井页岩气富集模式及勘探意义[J]. *石油勘探与开发*, 43(3): 350–358.

梁峰,王红岩,拜文华,等,2017. 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*, 37(7): 20–26.

梁峰,张琴,熊小林,等,2019. 四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组富有机质页岩沉积演化模式[J]. *沉积学报*, 37(4): 847–857.

梁峰,2018. 中上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气富集模式及有利区优选评价[D]. 中国矿业大学:1–158.

刘伟,许效松,冯心涛,等,2010. 中上扬子上奥陶统五峰组含放射虫硅质岩与古环境[J]. *沉积与特提斯地质*, 30(3): 65–70.

罗超,王兰生,石学文,等,2017. 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,41(2):142–152.

牟传龙,葛祥英,周恩恩,等,2015. 川西南晚奥陶世五峰期岩相古地理[J]. 中国地质,42(1):192–198.

穆恩之,李积金,葛梅钰,等,1981. 华中区晚奥陶世古地理图及其说明书[J]. 地层学杂志,5(3):165–170.

穆恩之,1950. 关于笔石的演化和分类[J]. 地质论评,(4–6):171–183.

穆恩之,1957. 谈谈笔石的生活环境[N]. 地质知识,(6):22–25.

聂海宽,何治亮,刘光祥,等,2020b. 四川盆地五峰组–龙马溪组页岩气优质储层成因机质[J]. 天然气工业,40(6):31–41.

聂海宽,金之钧,边瑞康,等,2016. 四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气“源–盖控藏”富集[J]. 石油学报,37(5):557–571.

聂海宽,金之钧,马鑫,等,2017. 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,38(2):160–174.

聂海宽,李东晖,姜涛,等,2020a. 基于笔石带特征的页岩等时地层测井划分方法及意义——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油学报,41(3):273–283.

聂海宽,汪虎,何治亮,等,2019. 常压页岩气形成机制、分布规律及勘探前景——以四川盆地周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油学报,40(2):131–143.

曲红军,1988. 轿顶山式锰矿岩相古地理特征及成矿规律探讨[J]. 地质与勘探,24(11):7–13.

曲红军,1992. 试论古构造对轿顶山式锰矿的控制作用[J]. 地质与勘探,28(6):1–5.

唐鹏,黄冰,吴荣昌,等,2017. 论上扬子区上奥陶统大渡河组[J]. 地层学杂志,41(2):119–133.

童川川,包书景,周志,等,2018. 贵州正安奥陶—志留纪之交五峰—龙马溪组黑色页岩的划分与对比[J]. 地层学杂志,42(2):206–212.

王红岩,郭伟,梁峰,等,2018. 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,42(4):455–460.

王红岩,郭伟,梁峰,等,2015. 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,39(3):289–293.

王红岩,郭伟,梁峰,等,2017. 宣汉—巫溪地区五峰组—龙马溪组黑色页岩生物地层特征及分层对比[J]. 天然气工业,37(7):27–33.

王玉满,董大忠,李新景,等,2015. 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,35(3):12–21.

王玉满,李新景,陈波,等,2018. 中上扬子地区埃隆阶最厚斑脱岩层分布特征及地质意义[J]. 天然气地球科学,29(1):42–54.

王玉满,李新景,董大忠,等,2017. 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,37(4):9–20.

武学进,陈清,李关访,等,2020. 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,44(1):1–11.

熊强青,王中鹏,张娣,等,2020. 下扬子巢湖地区皖含地 1 井五峰组—高家边组下段生物地层[J]. 地层学杂志,44(1):46–55.

叶少华,1991. 塔形螺旋笔石(*Spirograptus turriculatus*)在四川二郎山的发现[J]. 地层学杂志,15(1):68–68.

余谦,汪正江,刘家洪,等,2020. 云南大关—永善地区页岩气资源调查评价与区块优选[R]. 成都:中国地质调查局成都地质调查中心.

张娣,余谦,陆俊泽,等,2020. 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,45(3):739–751.

周志,姜振学,李世臻,等,2020. 鄂西建始地区五峰组—龙马溪组黑色页岩生物地层特征[J]. 地球科学,46(2):432–443.

邹才能,董大忠,王玉满,等,2015. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. 石油勘探与开发,42(6):689–701.

邹才能,龚剑明,王红岩,等,2019. 笔石生物演化与地层年代标定在页岩气勘探开发中的重大意义[J]. 中国石油勘探,24(1):1–6.