

中、上扬子地区晚奥陶世—早志留世古地理演化及页岩沉积模式

孙莎莎^{1,2}, 芮 昀³, 董大忠², 施振生², 拜文华², 马 超², 张磊夫², 武 瑾², 昌 燕²

(1. 山东大学, 山东 济南 250061; 2. 中国石油 勘探开发研究院, 河北 廊坊 065007;

3. 中国石油 浙江油田分公司, 浙江 杭州 310023)

摘要:为明确南方海相页岩沉积与古地理演化关系,以中、上扬子地区晚奥陶世—早志留世沉积的页岩为研究对象,以24口页岩气井笔石地层划带资料为重点,配合GBDB数据库中的露头剖面信息,综合前人资料,按照相—亚相—微相划分,结合沉积物、沉积环境、地化参数及测井特征,总结出陆棚、潮坪及三角洲3种沉积相、8种亚相以及相应的多种微相的划分方案。明确中、上扬子地区总体处于隆起围限的局限低能陆表浅海环境,其中页岩储层沉积有利相带为局限深水陆棚相。以年代地层“阶”为单位,“优势相”为方法和覆盖全区的沉积相剖面/钻井为控制点,有效推测各时期隆起边界变化情况,重建中、上扬子地区凯迪期、赫南特期、鲁丹期和埃隆期4个连续断代岩相古地理格局;以“阶”为标尺卡准各时期笔石页岩段厚度,明确各期沉积体系时空展布及页岩分布规律。黑色页岩发育受控于全球海平面上升、区域构造运动和古地理格局3种因素。页岩厚度明显受控于隆—坳相间格局,沉积模式为“两隆夹一凹”型;页岩气富集区被“两隆”所夹持,位于“一凹”之中。靠近隆起区,笔石带发生不同程度缺失,不利于页岩气的开发,页岩气作业应尽量避免远离笔石页岩发育先天不足的隆起区。

关键词:笔石;隆—坳相间;岩相古地理演化;页岩沉积模式;页岩气;晚奥陶世—早志留世;中、上扬子地区

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Paleogeographic evolution of the Late Ordovician-Early Silurian in Upper and Middle Yangtze regions and depositional model of shale

Sun Shasha^{1,2}, Rui Yun³, Dong Dazhong², Shi Zhensheng², Bai Wenhua², Ma Chao²,

Zhang Leifu², Wu Jin², Chang Yan²

(1. Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China; 3. Zhejiang Oilfield Branch Company Ltd., PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: We studied the shale deposited during the Late Ordovician-Early Silurian in Upper and Middle Yangtze regions to investigate the link between paleogeographic evolution and marine shale deposition in southern China. The graptolite-bearing shales from 24 shale gas wells that can be used to stratigraphic division are the focus of the study. Combined with the outcrop data from the GBDB database and previous data, we proposed the classification scheme in the facies-sub-facies-micro-facies sequence, that is three sedimentary facies (continental shelf, tidal-flat and delta), including eight sub-facies and several micro-facies, according to the characteristics of sediments, sedimentary setting, geo-chemical parameters and logging data. It's made certain that during the Late Ordovician-Early Silurian, the Upper and Middle Yangtze regions were in a restricted low-energy epicontinental shallow sea environment surrounded by paleo-uplifts, and the favorable sedimentary facies zones for shale reservoirs therein were the restricted deep shelf facies. The lithofacies paleogeographic framework of the Katian, Hirnantian, Rhuddanian, Aeronian stages in a row for the study area was reconstructed by taking the sedimentary facies profile/wells covering the whole region as controlling points, employing the “favorable facies” approach and taking chronostratigraphic “stage” as the research unit, and thus the boundaries of paleo-uplifts during various stages can be predicted effectively. The thicknesses of graptolite-bearing shale intervals were accurately measured by

收稿日期:2018-07-16; 修订日期:2018-08-14。

第一作者简介:孙莎莎(1984—),女,博士、工程师,非常规油气地质。E-mail:sunshasha501@163.com。

基金项目:国家油气重大专项(2017ZX05035)。

taking the “stage” as the ruler, and the temporal-spatial distribution of sedimentary systems and shale distribution pattern in each stage were summarized. The results suggest that the distribution of black shales is controlled by global sea-level rise, regional tectonic movement and palaeogeographic framework, while the thickness of black shales is apparently controlled by the pattern of alternating uplifts and depressions. The depositional model is a type of “one depression entrapped by two uplifts”, with the shale gas enrichment area located within the depression restricted by two uplifts on both sides. Graptolite-bearing shale intervals are absent to various extents at the regions near the uplifts. Such regions as well as uplifts should therefore be undesirable in terms of shale gas exploration and development.

Key words: graptolite, alternating uplift and depression, lithofacies paleogeographic evolution, depositional model of shale gas, Late Ordovician-Early Silurian, Upper and Middle Yangtze regions

古地理编图是弄清黑色页岩分布、评价有利页岩气勘探区带和确定井位目标的依据。随着中、上扬子地区四川盆地页岩气规模开发的突破^[1],古地理编图越来越成为寻找有利页岩气勘探区的关键。针对上奥陶统五峰组和志留系兰多维列统龙马溪组,20世纪50年代即开始古地理编图。早期古地理图件比例尺较小,编图单元跨度较大。近些年图件比例尺增大,编图单元更为精细,朝着以笔石带为单位的高精度编图方向发展。刘鸿允^[2]在1955年就勾勒出南方奥陶纪海、陆分布轮廓;80年代,穆恩之^[3]将五峰阶分为6个带,并分别编制相应岩相-生物相古地理图;关士聪^[4]、王鸿祯^[5]等确定了晚奥陶世、早-中志留世时期海、陆分布的古地理格局及沉积物类型;90年代后,刘宝珺和许效松等^[6]以板块构造理论为指导,以构造控盆、盆地控相为思路编制古地理图件。21世纪后,冯增昭^[7]对南方奥陶系五峰期进行了定量岩相古地理研究;陈旭等^[8]编制了中、晚 Ashgill 期至早鲁丹期岩相-生物相古地理图;马永生等^[9]以层序界面为对比开展南方 SS7 超层序(五峰期-志留纪)构造-层序岩相古地理工作。近10年以来,以许效松、牟传龙^[10-11]为代表的中国地质调查局成都地质调查中心团队基于年代地层格架开展了奥陶纪-志留纪之交的各时期^[12-15]古地理编图工作。随着页岩气的开发上产,也涌现了邹才能^[16-17]和聂海宽^[18-19]等代表的油公司团队编制页岩气主力层段系列沉积相图。伴随互联网和计算机技术的发展,近年也出现了以樊隽轩^[20-21]为代表的中科院南京地质与古生物研究所团队采用 GBDB 数据库(Geobiodiversity Database)和 GIS 联用技术绘制古地理图的新方法,精度高、数据量大,既能综合传统编图方法优点,又能充分利用数据库技术,能够代表未来古地理图编制的主流方向。

前人编图类型主要有3种,分别是以马永生、陈洪德、马力、郑和荣等为代表的构造-层序岩相古地理

图^[9,16,19,22-24]、以冯增昭^[25]为代表的沉积岩相古地理图和以刘鸿允、陈旭、牟传龙等为代表的古生物地层学岩相古地理图编图方式^[8,12,26]。构造-层序岩相古地理编图依托于大地构造和层序地层学,前期学者多将龙马溪组视为一个三级层序^[9,22],近年来又将其细分为两个三级层序^[16,19,27-28];在储层上、下、顶、底均为黑色页岩时,该方法识别层序界面困难,需要结合测井、地化测试等多种手段。沉积岩相古地理编图方式易将具有穿时性^[29]的不同时期的沉积物放在同一时间界面上进行分析;当时间界面不清晰时,很多学者多以龙马溪组早期/晚期或下段/上段等较为模糊断代作为编图单元^[14,16,30-32],造成横向标定对比困难。而古生物年代岩相古地理编图依托于生物地层学,时间断代连续、完整、精确,各地层单元顶、底界线可锁定和对比,基本具有等时性,既能够较为准确地反映各时期古地理格局,同时也不会受黑色岩系外观近似、难以识别层序界面的限制;但存在资料少、平面上不易对比等问题。

本文采用古生物地层学及沉积学岩相古地理编图思路,以24口页岩气井笔石地层划带资料为重点,配合 GBDB 数据库中的露头剖面信息(各期获取资料数量有所差别,见后文古地理图)和大量前人研究成果(区域地质报告、论文、论著等),参考最新国际年代地层系、统、阶划分方案^[33],以地层单位“阶”作为编图单元,重建晚奥陶世凯迪阶晚期和赫南特期、兰多维列世鲁丹期和埃隆期这4个连续断代时期的古地理格局。本文通过广泛收集地层缺失剖面信息,有效推测各时期隆起边界变化情况;结合盆地内页岩气丰富钻井笔石划带资料,弥补了前人工作主要集中在盆缘剖面的不足;以年代地层界线为标尺,卡准各时期笔石页岩段厚度,探讨、总结各“阶”沉积体系时空展布以及相应页岩段分布规律,指明了各阶段笔石页岩展布与古地理格局关系。研究可为五峰组-龙马溪组页岩气勘探开发提供理论基础和帮助。

1 地质背景

中、上扬子地区以四川盆地为主体,包括滇黔北、渝东—湘鄂西及黔北—黔中等盆缘区,面积约 $35 \times 10^4 \text{ km}^2$ [34]。晚奥陶世,扬子地块地处冈瓦纳大陆西缘,为热带或亚热带气候 [35],古陆和古隆起隆升扩张,上扬子海一定程度上被各隆起封闭,扬子地台结构由震旦系的“西浅东深”反转为“三面围限、向北西缓倾” [19]、“三隆一坳”的“隆后半局限浅海盆地” [10] (图1),沉积相带展布和物源受3个隆起(川中隆起、汉南古陆和黔中—雪峰隆起)控制,为南面封闭,北面受秦岭洋侵入,包括4个“海湾”的北部海湾体系 [36]。

奥陶系地层分为三统七阶 [37],岩性由下奥陶统的厚—块状碳酸盐岩向上逐渐过渡为中—厚层状灰岩夹页岩,至顶部为五峰组黑色含炭质硅质笔石页岩。志留系分为四统七阶 [38],龙马溪组隶属兰多维列世,早期为黑色页岩或粉砂质泥岩,向上逐渐过渡为海退序

列的粉砂岩、砂岩夹粉砂质泥岩组合。晚奥陶世—兰多维列世地层在不同地区命名有所差异,参考前人地层划分对比成果(表1),本文研究目的层为五峰组下部页岩、五峰组上部观音桥层和龙马溪组。“五峰页岩”的建立时期晚于“龙马页岩” [39-40],两套页岩岩性均一,外观近似,出露很广,大部分地区整合接触并夹含厚约 30 cm 的名为“观音桥层”的壳相泥质灰岩,但在少数地区两者呈地层缺失造成的假整合。本文涉及的 24 口页岩气井和部分重要露头剖面位置及后文的 3 条剖面线(A—A', B—B', C—C') 如图1所示。

2 沉积相类型及特征

2.1 沉积相类型

综合前人资料 [16,41-42],以 24 口钻井和 22 条露头为重点,辅以 GBDB 数据库中相关剖面的地层及古生物资料,认为五峰组—龙马溪组发育陆棚相、潮坪相和三角洲相 3 类沉积相(表2)。陆棚相分为浅水陆棚和

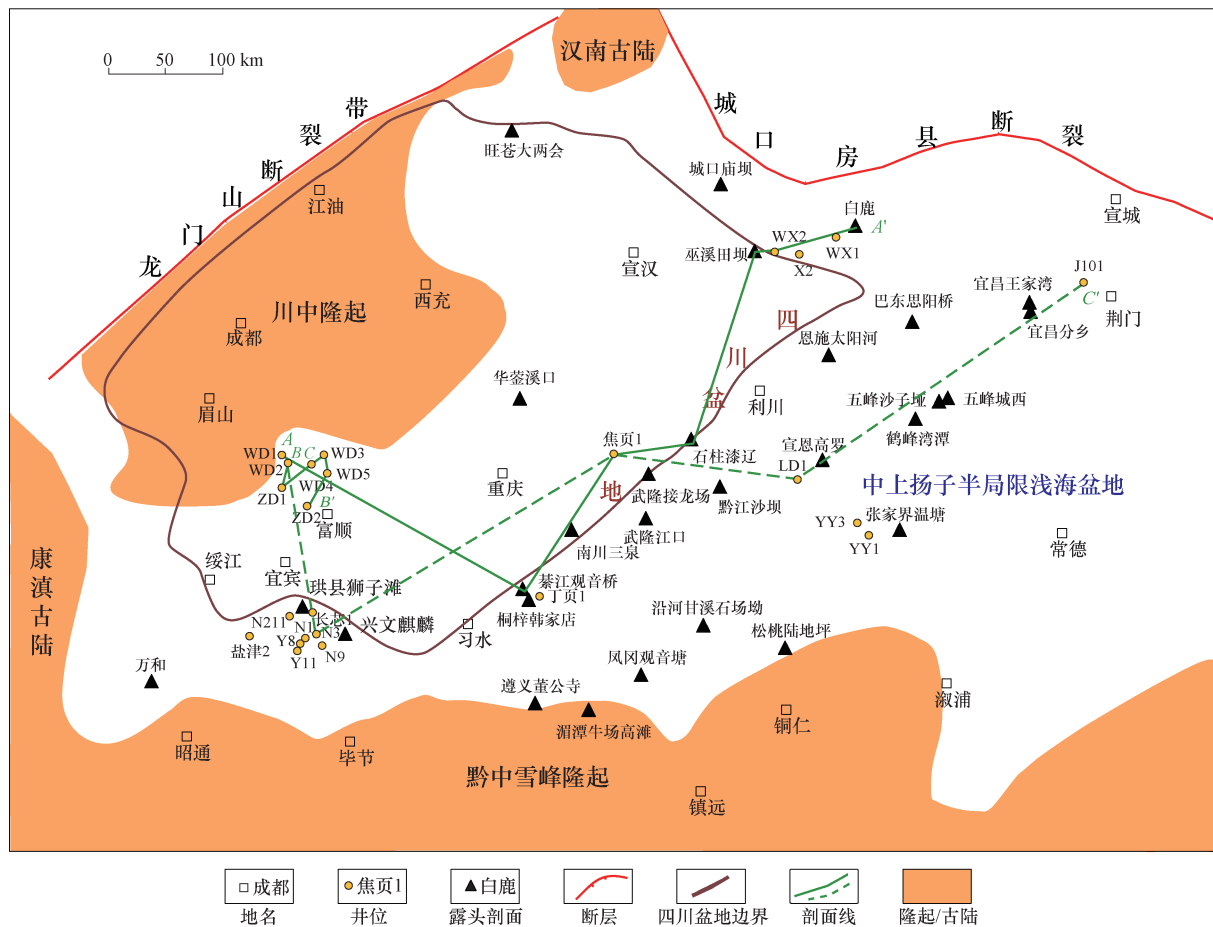


图1 中、上扬子地区奥陶纪—志留纪“三隆一坳”盆地格局及重点剖面位置

Fig.1 The basin pattern of “three uplifts-one depression” in the Ordovician-Silurian, Upper and Middle Yangtze regions and locations of its key profiles

表 1 中、上扬子地区晚奥陶世—早志留世地层划分对比^[26,40]

Table 1 Stratigraphic division and correlation of the Late Ordovician – Early Silurian in Upper and Middle Yangtze regions^[26,40]

年代地层				笔石带	滇北	川南－渝东南				黔北		黔东北		鄂西	
系	统	阶	距今年代/Ma		大关黄葛溪	綦江观音桥	秀山妙泉	长宁双河	桐梓红花园	沿河甘溪	石阡雷家屯	务川龙井坡	恩施	宜昌分乡	
上覆地层					嘶风崖组	韩家店组	小河坝组	小河坝组	韩家店组	小河坝组	马脚冲组		小河坝组	纱帽组	
志留系	兰多维列统	埃隆阶	438.49	<i>Stimulograptus sedgwickii</i> (LM8)		黄葛溪组	石牛栏组	龙马溪组	龙马溪组	石牛栏组	龙马溪组	雷家屯组	香树园组	龙马溪组	罗惹坪组
			440.77	<i>Demirastrites convolutus</i> (LM7)			桥沟组			松坎段?		香树园组			
		<i>Demirastrites triangulatus</i> (LM6)		龙马溪组	龙马溪组	龙马溪组	龙马溪组								
		<i>Coronograptus cyphus</i> (LM5)						龙马溪组							
		<i>Cystograptus vesiculosus</i> (LM4)			龙马溪组										
		<i>Parakidograptus acuminatu</i> (LM3)				龙马溪组									
		<i>Akidograptus ascensus</i> (LM2)		龙马溪组											
		鲁丹阶	443.83		<i>Persculptogr. persculptus</i> (LM1)		观音桥层	观音桥层	观音桥层	观音桥层	观音桥层	观音桥层	观音桥层	观音桥层	观音桥层
				<i>Metabologr. extraordinirius</i> (WF4)		观音桥层									
		奥陶系	上统	赫南特阶	445.16		<i>Paraorthogr. pacificus</i>	<i>Diceratograptus minus</i> (WF3c)		五峰组	五峰组	五峰组	五峰组	五峰组	五峰组
<i>Tangyagraptus typicus</i> (WF3b)															
<i>Lower Subzone</i> (WF3a)															
<i>Dicellograptus complexus</i> (WF2)															
<i>Dicellograptus complanatus</i> (WF1)						临湘组	临湘组	临湘组	临湘组	临湘组	洞草沟组	洞草沟组	洞草沟组	临湘组	临湘组

深水陆棚 2 个亚相;潮坪相分为潮上坪、潮间坪和潮下坪 3 个亚相;三角洲相分为三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲 3 个亚相。不同相、亚相和微相沉积物组成、沉积构造、地球化学参数及测井曲线特征均存在差异。

2.1.1 潮坪相

潮坪相水深一般小于 20m^[26],呈环带状分布于各古隆起边缘,为发育在水动力较强区域的近岸浅水沉积,纵向上主要发育于五峰组、观音桥层及弱氧化环境的龙马溪组顶部。潮坪相为边缘相带,分布范围有限,有机碳含量低,非页岩气有利相带。靠近滨岸,海平面升降频繁,微相上包括碳酸盐岩潮坪、碎屑岩潮坪和混合潮坪,岩相组合以粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和碳酸盐岩或其混合岩为主,沉积构造可见水平层理、波状层

理、块状层理和风暴作用引起的交错层理。重庆巫溪地区 WX2 井龙马溪组顶部特列奇阶见灰白色石英粉砂岩夹深灰色泥岩纹层,发育小型波状层理,为潮坪相产物(图 2a,b)。X2 井龙马溪组顶部特列奇阶为一套灰白色石英粉砂岩夹深灰色粉砂质泥岩纹层,发育水平层理,局部见小型交错层理(图 2c)。

2.1.2 陆棚相

陆棚相为近滨外侧至大陆坡坡折间地带,包括浅水陆棚亚相和局限浅海深水陆棚亚相。

浅水陆棚亚相水深一般为 20 ~ 60m^[16],主要发育于五峰组晚期和龙马溪组中、晚期的埃隆阶和特列齐阶,平面上环绕于川中古隆起及黔中隆起周缘的潮坪相以外、位于隆后盆地内东西向展布的广阔海域。其

表 2 中、上扬子地区上奥陶统—兰多维列统主要沉积类型及特征 (改自文献 [14, 33, 42])
 Table 2 Major sedimentary types and traits of the Late Ordovician-Early Silurian in Upper and Middle Yangtze regions (modified From references [14, 33, 42])

相	亚相	微相	沉积物特征				沉积环境				地化参数			测井特征		代表地区	主要层位	
			岩相组合	颜色	层理构造	生物化石	钙质含量/%	水深/m	水动力	能量	氧化还原环境	TOC/%	干酪根 $\delta^{13}C/\text{‰}$	黑色泥岩厚度/m	自然伽马/API			电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$
陆棚	浅水陆棚	(砂)泥质浅水陆棚	(粉)砂质页岩、泥质粉砂岩、粉砂岩	灰色—灰绿色	冲刷面,生物扰动,波状层理、交错层理	笔石、腕足、珊瑚等,蓝藻、珊瑚类	<25	20~60	冲刷回流	局部强	弱还原—弱氧化	0.5~8	-32~-27	5~30	50~150	<10	川北—川中—川东	龙马溪组上段
		钙质浅水陆棚	钙质页岩、泥灰岩/灰岩、钙质粉砂岩			>25								<120	200~700	川南—滇东		
	局限浅海深水陆棚	钙质深水陆棚	钙质页岩、硅质页岩、钙质硅质页岩、钙质炭质页岩	黑色	薄层状,水平层理,无扰动构造,偶见冲刷面	笔石、钙球、褐藻、红藻	<40	60~200	弱或间歇性风暴	平静	还原	2~11	-35~-30	>30	150~300	10~70	川东—鄂西、川北—川中、中扬子	五峰组、龙马溪组下段
		(硅)泥质深水陆棚	炭质页岩、硅质页岩、炭质硅质页岩			<10												
潮坪	碳酸盐潮坪	潮上—潮间带、潮下带	薄层砂—泥互层、(粉)砂岩、砂质泥岩、钙质粉砂质泥岩	浅色—黑色	透镜状层理、脉状层理,生物扰动构造	少见	—	<20	潮汐波浪	强	弱氧化—氧化	<0.5	—	—	<100	—	古隆起边缘—中隆起北缘、雪峰隆起带西侧	龙马溪组中—上段
	碎屑岩潮坪																	
	混积潮坪																	
三角洲	三角洲平原	—	砂岩与泥岩互层、石英粉—细砂、滨外泥页岩	深灰—黑色	潮汐、波浪构造	少见	—	<20	波浪河流	低	弱氧化—氧化	<0.5	—	12~20	<100	—	龙山、永顺、红岩溪	龙马溪组中—上段
	三角洲前缘																	
	前三角洲																	

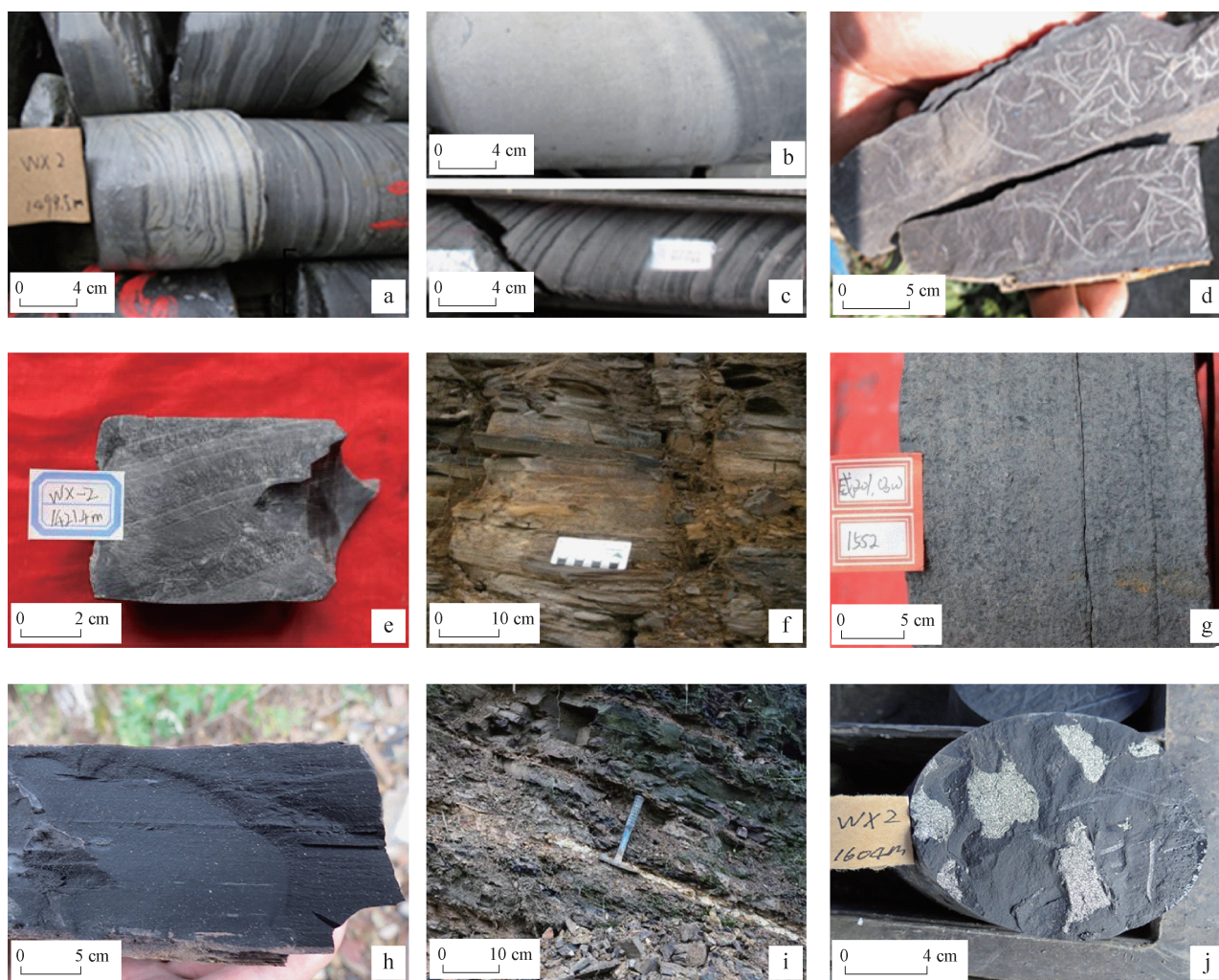


图2 中、上扬子地区晚奥陶世一早志留世五峰组—龙马溪组页岩沉积相标志

Fig. 2 Sedimentary facies markers of the Wufeng-Longmaxi Fms shales in Upper and Middle Yangtze regions

a. 灰白色石英粉砂岩夹深灰色泥岩纹层, 小型波状层理, 潮坪沉积, WX2 井, S_1l , 埋深 1 499.5 m; b. 白色石英粉砂岩与深灰色泥岩互层, 砂岩局部见底冲刷现象, 潮坪沉积, WX2 井, S_1l , 埋深 1 510 m; c. 灰白色石英粉砂岩夹深灰色泥岩纹层, 发育水平层理, 浅水陆棚—潮坪沉积, X2 井, S_1l , 埋深 1 780 m; d. 灰色粉砂质页岩, 发育水平层理, 层面见大量笔石, 浅水陆棚沉积, 巫溪田坝剖面, S_1l ; e. 灰黑色粉砂质页岩, 浅水陆棚沉积, WX2 井, S_1l , 埋深 1 421.4 m; f. 灰黄色粉砂岩与粉砂质页岩互层, 浅水陆棚沉积, 来凤三堡岭剖面, S_1l ; g. 灰色泥质灰岩、粉砂质页岩与黑色页岩互层, 浅水陆棚沉积, WD1 井, O_3w , 埋深 1 552 m; h. 黑色页岩, 见灰色石英粉砂岩断续条带, 发育水平层理, 深水陆棚沉积, 巫溪田坝剖面, S_1l ; i. 硅质页岩夹斑脱岩, 水平层理发育, 深水陆棚沉积, 长宁双河剖面, O_3w ; j. 黑色硅质页岩, 发育大量黄铁矿结核及直笔石, 深水陆棚沉积, WX2 井, S_1l , 埋深 1 604 m

岩性为灰黑—灰色—灰绿色粉砂质页岩、钙质粉砂质页岩、碳酸盐岩和碎屑岩的混合沉积, 偶夹薄层粉砂岩; 发育波状层理、水平层理、砂质团块及钙质结核, 生物以浮游笔石为主, 局部见腕足及三叶虫化石等。该带由于陆源碎屑输入量大, 有机碳含量 (TOC) 低, 一般小于 2%, 非页岩气发育的有利相带。根据岩相组合特征, 浅水陆棚亚相可分为 (砂) 泥质浅水陆棚微相 (碳酸盐矿物含量 < 25%) 和钙质浅水陆棚微相 (碳酸盐矿物含量 > 25%)。 (砂) 泥质浅水陆棚相主要发育灰黑色—灰色泥页岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和粉砂岩。如巫溪田坝剖面龙马溪组顶部见灰色粉砂质页岩, 发育水平层理, 层面见大量笔石, 页理不发育, 砂质

含量较高 (图 2d), WX2 井可见黑色页岩与黄灰色粉砂岩互层 (图 2e), 来凤三堡岭剖面可见灰黄色粉砂岩与粉砂质页岩互层 (图 2f)。钙质浅水陆棚相主要发育 (含) 钙质泥页岩和含粉砂含钙炭质页岩, 如 WD1 井五峰组为灰色泥质灰岩、粉砂质页岩与黑色页岩互层 (图 2g)。

局限浅海深水陆棚亚相水深一般在 60 ~ 200 m^[10,26,41], 主要形成于古隆起围限的滞留强还原性的低能静深水环境, 与浅水陆棚亚相相比水体较深, 但仍属浅水环境, 是页岩气形成的主要有利沉积相带。该亚相纵向上发育在五峰组沉积早期及龙马溪组沉积早期的鲁丹阶和埃隆阶沉积早期, 平面上分布于隆起

带之间的凹陷区,如川中—黔中隆起之间的威远—习水凹陷区、川东—鄂西凹陷区和汉南—川中隆起间的巴中凹陷区。其岩性以黑色富有机质硅质页岩、钙质页岩、炭质页岩及其三者的混合页岩为主,普遍发育纹层状水平层理或断续水平层理(图2h),可见有多层火山成因斑脱岩(图2i), TOC 一般大于2%,笔石化石十分丰富(图2j),见少量腕足等,黄铁矿结核呈分散状和条带状分布(图2j)。以岩相组合为依据,划分出(硅)泥质深水陆棚和钙质深水陆棚2种沉积微相(表2)。硅质深水陆棚微相主要发育黑色硅质(泥)页岩、黑色泥页岩与灰黑色粉砂质泥岩。硅质(泥)页岩中普遍含笔石、放射虫和海绵骨针,放射虫含量在15%~30%,外壳及内部被玉髓和自生石英充填^[10],具有高 TOC 、高含气性和高孔隙度特征^[42]。泥质深水陆棚主要发育黑色(泥)页岩、黑色炭质(泥)页岩与灰黑色泥质粉砂岩。钙质深水陆棚主要发育钙质(泥)页岩和硅质(泥)页岩。

2.1.3 三角洲相

三角洲相研究只见于周恩^[43]等学者研究的少数文献,他认为中、上扬子地区三角洲相主要见于受板块挤压影响剧烈的湘西北一带,形成受控于雪峰隆起。与其他地区龙马溪组的单一泥页岩序列明显不同的是,湘西北龙山—永顺地区发育完整的潮控型三角洲沉积^[43],底部为陆棚相黑色泥岩,向上变为前三角洲和三角洲前缘亚相,顶部为潮坪相正旋回,为下细上粗的进积序列,发育大量具潮汐层理的粉砂岩、泥岩。

2.2 沉积相分布演化

东西横向上3条剖面线即WD1井—綦江观音桥—焦页1井—石柱漆辽—巫溪田坝—WX2井—巫溪白鹿(图3),WD2井—ZD1井—WD4井—WD3井—WD5井—ZD2井(图4)以及WD2井—N3井—焦页1井—LD1井—WX2井—J101井(图5)沉积微相对比图显示整体一致、东西分区的沉积特征。在大多数地区,纵向上可以见到陆棚相与潮坪相组成海退—海进—海退的序列(图3),凯迪期—赫南特早、中期为持续海退,赫南特晚期—鲁丹期为持续海进,埃隆期—特列奇期为海退阶段,整体经历了潮坪、浅水陆棚相、深水陆棚相及潮坪/三角洲4个阶段。横向上,从盆缘隆起区至盆地内拗陷方向,潮坪相、浅水陆棚相、深水陆棚相依次过渡排列,远离古隆起区的深水陆棚相厚度大、展布稳定,东部为硅(泥)质深水沉积,页岩组分中硅质、炭质成分较高,西部以钙质深水沉积为主,矿

物组分中碳酸盐岩成分较高,均是页岩气发育的有利沉积相带。

3 岩相古地理格局及演化

本文运用优势相作图原则,以文献调研为基础,收集大量1:500 000上扬子区地质图与前人古地理工作成果^[6,8-9,12,17,46],在野外及室内、宏观与微观工作相结合基础之上,结合石油地质调查剖面及钻井岩心等资料分析,以生物地层对比方案为基本框架,确定以阶为单位的4个断代时期编图单元,更新近些年学者在研究区的新认识比如黔中隆起前缘边界线在各期的演化、湘鄂西水下隆起的形状等,结合钻井新资料修正部分认识如川中隆起为陆上而非水下的观点。点、线、面结合,以现今地理坐标为基准底图,修编各时期的古地理单元、岩相和沉积环境,分析古地理特征、平面相带并以笔石带为标尺卡准各时期页岩厚度、明确其展布变化规律。

3.1 晚奥陶世凯迪晚期(五峰期)

该期岩石地层上对应五峰组下部WF2—WF3黑色笔石页岩段(WF1笔石页岩段仅在贵州松桃局部地区发育,本文不作讨论)。受加里东运动影响,隆起扩大抬升,气候温热、降雨丰富,陆表淡化局限海域水体在全球具有唯一性^[47]。隆起区水深30~100 m^[48](底栖组合带BA4—5),富含DDO笔石动物群(Dicranograptidae-Diplograptidae-Orthograptidae)^[8]。该期沉积体系由早—中奥陶世的碳酸盐缓坡转为细粒页岩沉积^[32,49-50],为浅海陆表海中的较深水产物,依次发育古隆起、潮坪相、浅海陆棚相以及局限浅海深水陆棚相(图6)。

潮坪相环绕于各隆起带周缘,不同隆起带周缘潮坪类型不同。川中隆起西南缘和康滇古陆东缘分布碳酸盐潮坪,为局限低能潮下环境^[51],发育泥灰岩+白云质灰岩/页岩。川中隆起东缘与汉南古陆周缘为碎屑岩潮坪,发育粉砂岩和含炭粉砂质页岩互层。黔中隆起周缘为混合潮坪,北缘金阳—威信一带沉积白云质钙质粉砂岩,往东向遵义带砂质增多,发育砂质页岩与泥质粉砂岩互层,为潮下泥坪和沙坪间互低能带沉积^[52],至东到松桃—秀山一带变为砂质页岩+含炭质页岩。

潮坪外为浅水陆棚相,发育3种岩石组合:①灰质泥岩+钙质粉砂岩+笔石页岩,为五峰组同期的大渡河组,灰岩含量高^[53],分布在雷波—永善一带,往北东

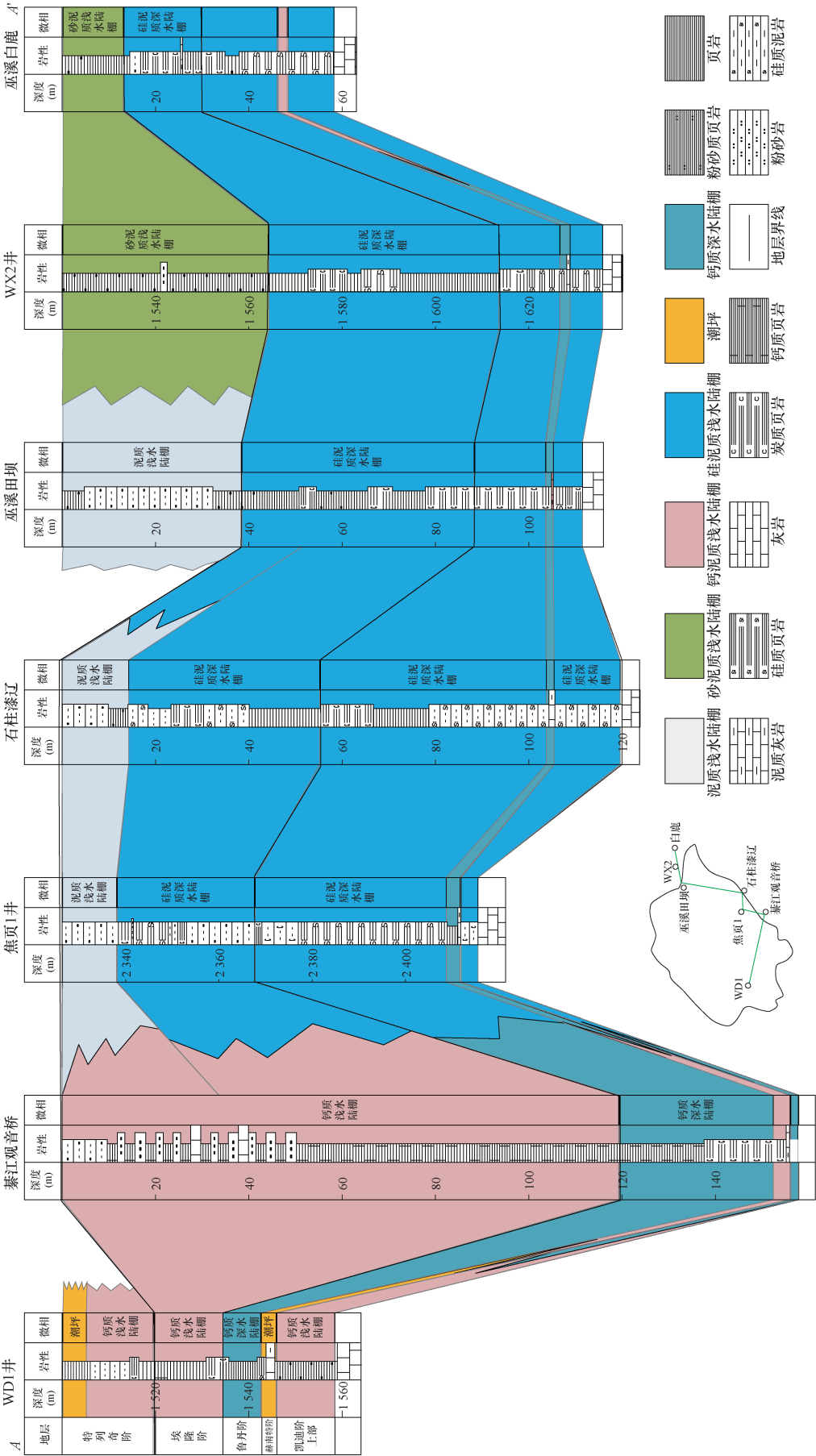


图 3 中、上扬子地区晚奥陶世—早志留世东西向沉积微相连井对比剖面
Fig. 3 EW-trending well-tied profile for correlation of sedimentary micro-facies of the Late Ordovician-Early Silurian in Upper and Middle Yangtze regions

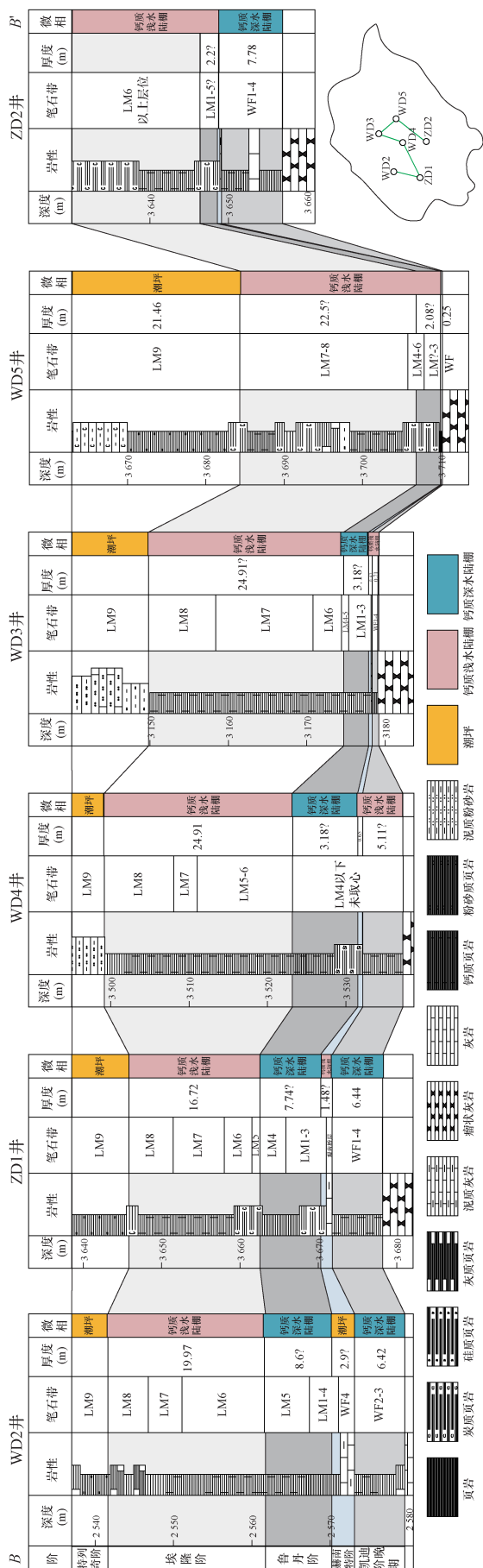


图 4 四川盆地威远地区 WD2 井、ZD1 井、WD3 井、WD5 井和 ZD2 井五峰组—龙马溪组黑色页岩笔石带对比剖面

Fig. 4 Correlation of the graptolite-bearing zones in the Wufeng-Longmaxi black shales on profile across Well WD2, ZD1, WD3, WD5 and ZD2 in Weiyuan area, Sichuan Basin (WD2 井五峰组—龙马溪组笔石带划分文献[44], WD5 井五峰组—龙马溪组笔石带划分文献[45])

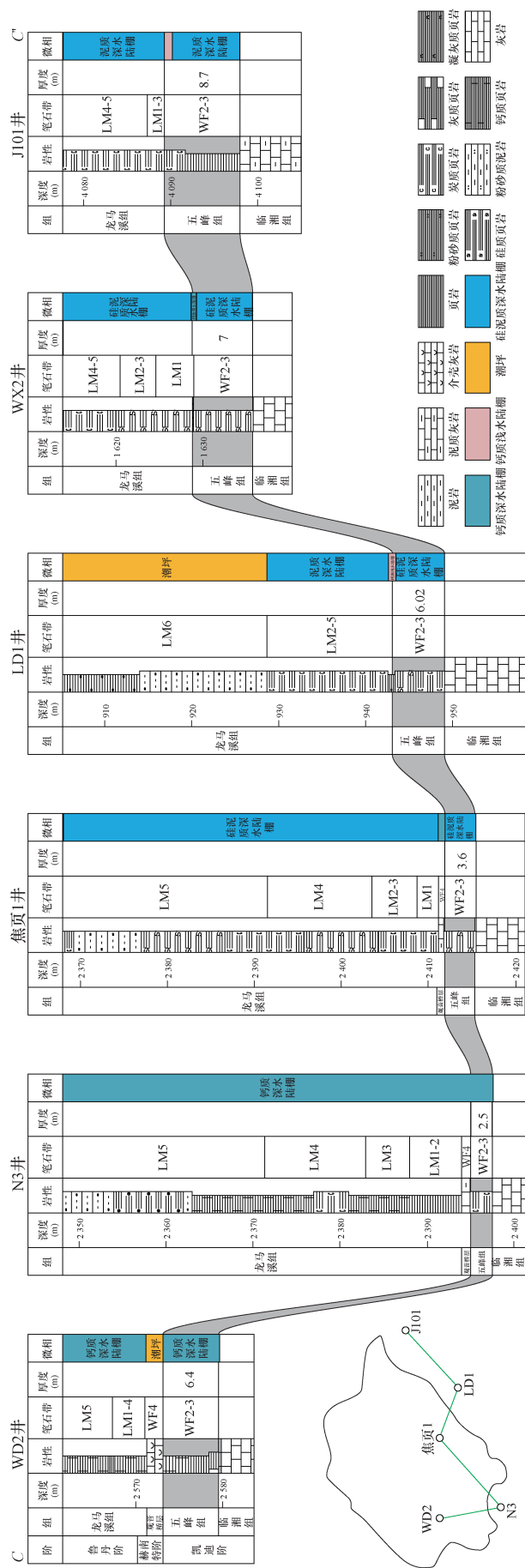


图 5 四川盆地威远地区 WD2 井、N3 井、焦页 1 井、LD1 井、WX2 井和 J101 井五峰组—龙马溪组黑色页岩笔石带对比剖面

Fig. 5 Correlation of the graptolite-bearing zones in the Wufeng-Longmaxi black shales on profile across Well WD2, N3, Jiaoye1, LD1, WX2 and J101 in Weiyuan area, Sichuan Basin (WD2 井五峰组—龙马溪组笔石带划分文献[44], N3 井、焦页 1 井和 WX2 井五峰组—龙马溪组笔石带划分文献[1])

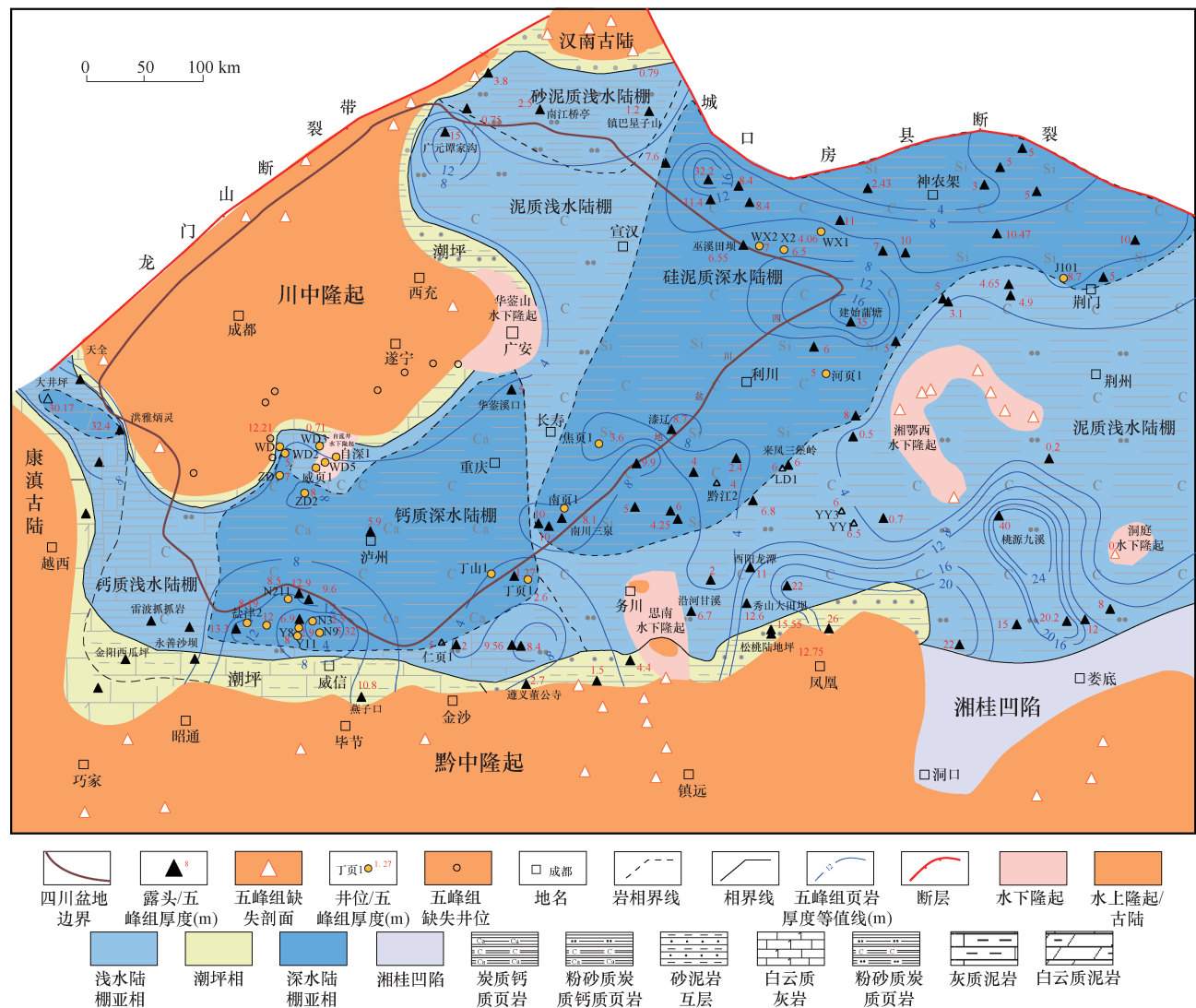


图 6 中、上扬子地区晚奥陶世凯迪晚期五峰组下部地层沉积时期岩相古地理
Fig. 6 Sedimentary lithofacies paleogeography of the lower Wufeng Formation in the Late Katian of the Late Ordovician in Upper and Middle Yangtze regions
(湘鄂西-洞庭水下隆起改自文献[20], 黔中隆起北缘线及古岛改自文献[40], 自流井-华蓥山水下隆起改自文献[18], 主要剖面厚度及缺失数据引自 GBDB 数据库。)

至威远地区灰岩含量减少, 笔石页岩成分变多, WD1 井及 WD3 井五峰组黑色页岩均夹有灰岩, 越近隆起灰质含量越高, 为钙质浅水陆棚相; ②含炭含粉砂页岩, 粉砂质成分较高, 分布于南江—镇巴一带, 为砂泥质浅水陆棚相; ③粉砂质炭质页岩, 炭质成分较高, 分布于广元—宣汉—长寿和沿河—秀山—张家界—桃源—荆州一带, 为泥质浅水陆棚相。深水陆棚相分布于 2 个地形凹陷区: 盐津—泸州及南川—漆辽—巫溪, 分别发育黑色炭质页岩+钙质页岩和含放射虫硅质页岩+炭质页岩, 为钙质深水陆棚和硅泥质深水陆棚相。川西天全—大井坪—洪雅炳灵一带发育小范围深水陆棚相, 岩性以含云硅质泥岩+炭质硅质泥岩为主^[26]。

五峰期板块内部活动使基底地形起伏不平呈隆—

坳相间^[19]。隆起区出露水面情况不一, 具不同程度笔石带缺失现象, 如黔北遵义—松桃一带的零星古岛出露水面(务川地区^[40])及鄂西—湘北一带的湘鄂西水下隆起^[8, 54]。图 6 中粉色马蹄形^[20]缺失 2~3 个笔石带^[55]。整体上, 笔石页岩靠近隆起区厚度相对较大(图 5), 岩性也有变化。如靠近川中隆起的 WD2 井 WF2—WF3 笔石带厚度为 6.4 m、岩性为页岩夹灰岩, 靠近湘鄂西水下高地的 LD1 井 WF2—WF3 笔石带厚度为 6.02 m、岩性为粉砂质页岩, 均反映水体较浅。距古隆起相对较远的 N3 井和焦页 1 井位于沉积中心, WF2—WF3 笔石带厚度分别为 2.5 m 和 3.6 m, 均未超过 5 m, 岩性分别为钙质页岩和炭质硅质页岩。

五峰组黑色笔石页岩厚度一般为 2~20 m (由于

岩性变化较大,统计厚度时未将五峰组同期沉积地层考虑在内),整体呈东南厚、西北薄(图6)。受黔中—雪峰前陆隆起带扩大抬升影响,陆源朝西北向供给加快,盆缘浅水陆棚区发育较厚层粉砂质页岩,盆内方向逐渐变为黑色笔石页岩。位于湖南北部雪峰前陆隆起带附近的笔石页岩厚度较大,为20~40 m,如桃源九溪处五峰组厚度达40 m;黔中隆起一带,松桃地区笔石页岩最厚达15.55 m,毕节燕子口处为10.8 m;盆内克拉通中部地区五峰组笔石页岩厚度减薄,整体厚度约2~10 m;川南地区笔石页岩厚度为2.5~12.9 m,川东地区厚度为2.4~12.2 m,川北地区厚度为0.79~15 m;鄂西地区受湘鄂西水下隆起影响,笔石页岩厚度普遍较小,为0.5~5 m。

3.2 晚奥陶世赫南特期(观音桥层沉积期)

赫南特阶时限约2 Ma^[29],是奥陶系最顶部的一个阶,五峰组与龙马溪组的地层界线位于其间。该期岩石地层单元对应观音桥层和龙马溪组最底部LM1笔石带(资料限制,LM1带难以划分,本文未作讨论)。受冰期海退和广西运动影响,隆起区扩大,水体变浅,盆地面积减小,普遍沉积含有赫南特贝^[56]的观音桥层,主要形成于水体单层充氧、开放、畅通、盐度正常的浅水中(水深20~30 m,底栖组合带BA2-3^[20]),具全球广布特征^[57],发育灰岩、泥质灰岩和灰质泥岩等。该期早期沉积相类型有潮坪相、浅水陆棚相和局限浅海深水陆棚相(图7)。

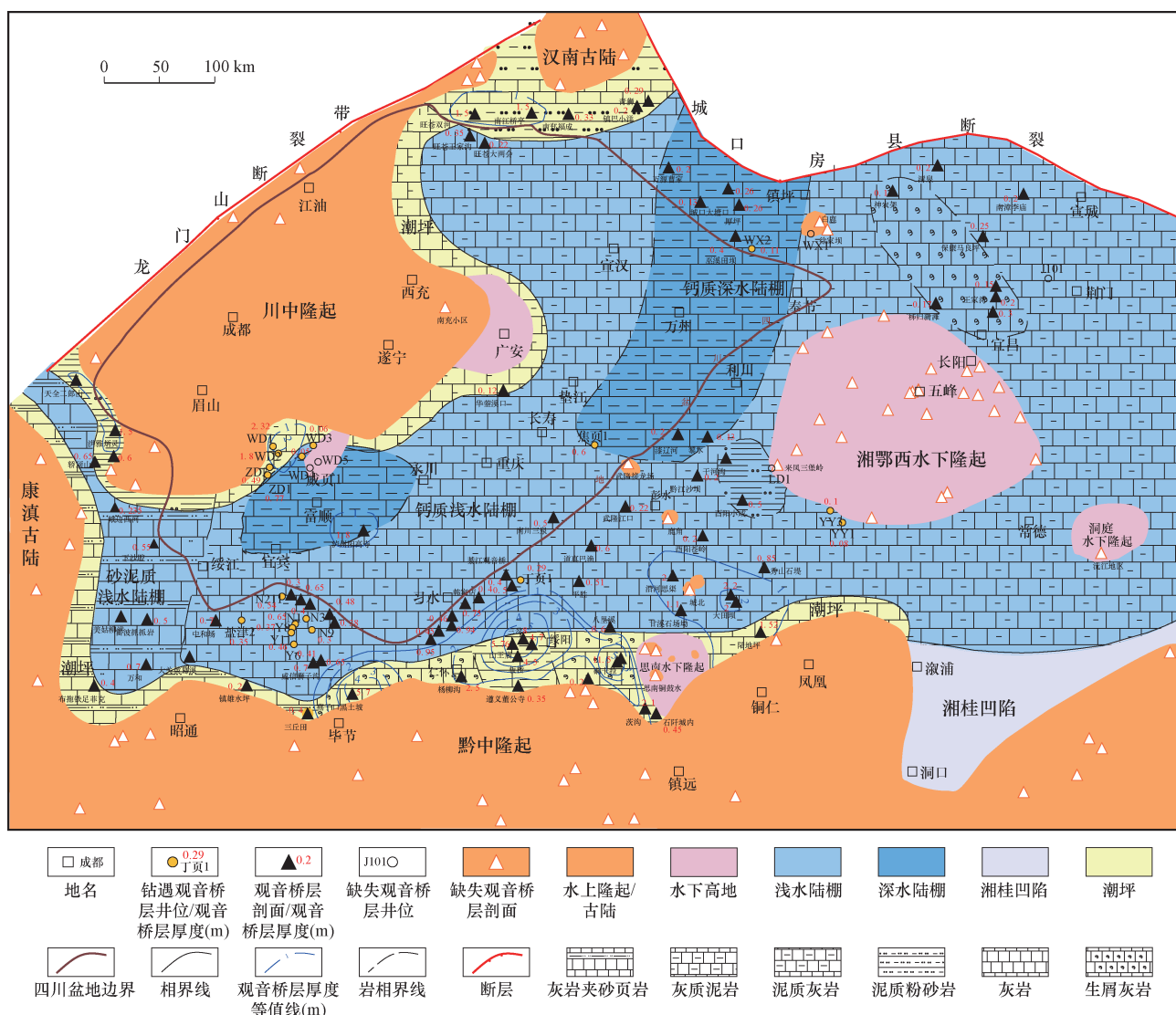


图7 中、上扬子地区晚奥陶世赫南特早期岩相古地理

Fig. 7 Lithofacies paleogeography of the Early Hirnantian of the Late Ordovician in Upper and Middle Yangtze regions (湘鄂西水下高地改自文献[8,21],洞庭水下隆起改自文献[8],黔中隆起北缘及部分零星古岛改自文献[41],自流井—华蓥山水下高地改自文献[18],部分剖面厚度数据及缺失剖面引自GBDB数据库和文献[8,59])。

潮坪相与古陆毗邻,发育3种岩石组合:①粉砂质泥岩夹灰岩,如南江桥亭剖面发育与观音桥层同期沉积的南郑组粉砂质泥岩夹灰岩,环绕汉南古陆,为碎屑岩潮坪;②含泥灰岩,分布于川中隆起周缘,为碳酸盐潮坪,WD1井距川中隆起最近,观音桥层灰岩厚度可达2.32 m,产赫南特贝,华蓥溪口剖面观音桥层为硅质灰岩;③灰岩夹砂、页岩,于康滇古陆东缘沉积,如汉源轿顶山剖面为泥晶灰岩夹砂、页岩^[58],毕节—仁怀—凤冈一带发育亮晶生屑灰岩^[59],富产暖水型动物群^[60]。

钙质浅水陆棚相沉积时水体相对潮坪相较深,分布于潮坪相外围地区,发育3种岩石组合:①泥灰岩+含粉砂泥岩,美姑柳洪、雷波抓抓岩剖面为粉砂质泥岩^[61],黔江干河沟处沉积粉砂质泥页岩^[8];②生屑灰岩,鄂西宜昌王家湾一带发育灰岩台地,产典型凉水型腕足类 *Hirnantia* 动物群^[60];③泥灰岩,沉积于大部分浅水地区。荆州一带如J101井未见观音桥层沉积,可能由于后期构造抬升剥蚀殆尽^[18]。

深水陆棚相发育富含赫南特贝的含炭粉砂质泥灰岩+钙质泥岩,延续凯迪五峰期地势低洼处宜宾—泸州、渝东等地区,由于水退影响慢,沉积水体较深,如川南N211井观音桥层发育泥灰岩+钙质泥岩^[62],长宁双河剖面观音桥层岩性为灰黑色钙质泥岩^[63],渝东WX2井观音桥层沉积灰质泥岩。值得一提的是,距离WX2井东向50km处的WX1井和白鹿、徐家坝剖面均未见观音桥层沉积,说明该处可能出现小范围隆起。

湘鄂西水下隆起区范围较凯迪晚期大幅扩大,黔中隆起北缘线变迁,思南地区北面零星古岛增多,汉南古陆、川中隆起均有所外扩(图7)。观音桥层整体厚度较小,为0.2~1 m,很少超过1 m;黔中隆起北缘东西向浅水区厚度较大,如贵州凤冈硐卡拉剖面为全区最厚,达11.5 m^[64],三岔剖面及山王庙剖面处的观音桥层厚度分别为8 m和5.76 m^[64],应为靠近隆起剥蚀区沉积物快速堆积导致厚度较大;而北向盆地方向,观音桥层厚度逐渐减小,一般都小于1 m。

3.3 早志留世鲁丹期

该期岩石地层上对应龙马溪组中、下段LM2—LM5笔石页岩段,岩性以灰黑色炭质页岩和灰绿色泥页岩为主。受全球变暖冰川消融影响,鲁丹早、中期于低洼处沉积LM2—LM4笔石页岩,之后海水大幅上升,水下隆起被海水淹没,LM5笔石页岩快速广泛沉积。该期富含单笔石动物群,形成于全球环境的上升

洋流中,水深不超过200 m,盐度正常,为表层富氧、底域严重缺氧、水体两分的滞留环境,具有全球广布特征^[29]。该期发育潮坪相、浅水陆棚相、局限浅海深水陆棚相以及三角洲相(图8)。

潮坪相毗邻各隆起区,川北隆起周缘为碎屑岩潮坪,砂泥岩互层;黔中隆起和川中隆起周缘为混积潮坪,发育炭质页岩+钙质泥岩+泥灰岩沉积,碳酸盐成分较高。陆棚相分布于广大研究区,根据水深和富有机质页岩发育情况,可分为浅水陆棚相与局限深水陆棚相。浅水陆棚相主要发育2种岩相组合:①含钙页岩+炭质钙质页岩,为钙质浅水陆棚相;②含炭页岩+炭质粉砂质页岩,为泥质浅水陆棚相。浅水陆棚相呈长条状分布,两种岩相组合分界线大致位于永川—务川一带。深水陆棚相区发育2种岩相组合:①炭质钙质页岩,分布于川南一带,含钙质成分较多,为钙质深水陆棚相;②炭质硅质页岩,分布于川东地区,硅质炭质成分偏多,为硅泥质深水陆棚相。潮控三角洲相区^[41]分布于雪峰隆起北侧,发育粉砂质泥岩+粉砂岩沉积组合。

鲁丹早、中期即LM2—LM4带沉积期,湘鄂西水下隆起面积大幅减小(限于篇幅,图面未表示)。隆起区内,龙马溪组与下伏五峰组或临湘组呈假整合接触,WF2—LM5笔石带有不同程度缺失。区内河页1井^[18]、JD1井缺失LM1—LM3笔石页岩,恩施太阳河发育暴露水面标志铁质古粘土层^[55]。自流井水下隆起区内威页1井^[18]、自深1井^[33]和WD5井^[45]缺失WF(2—3)—LM3笔石页岩。距隆起区较近的WD3井(笔石页岩厚度3.18 m)和WD4井(笔石页岩厚度3.18 m)比距隆起区较远的WD2井(笔石页岩厚度8.6 m)、ZD1井(笔石页岩厚度7.74 m)鲁丹阶页岩厚度急剧减薄(岩心有限,部分笔石带未能准确划定界线)(图4)。鲁丹晚期,快速海侵,LM5笔石带广泛沉积,前期古岛/隆起全部被海水淹没消失^[40],湘鄂西隆起范围局限在五峰小河和石门泥市一带。黔中隆起北缘线向南缩退。川北旺苍—南江一带,西乡上升使大巴山隆起抬升成陆^[65],LM2—LM5笔石页岩全部缺失。

已有很多学者针对龙马溪组页岩厚度^[66]、黑色页岩厚度^[67]、炭质页岩厚度^[19]、有效页岩厚度^[68]、TOC>0.5%烃源岩厚度^[69]、TOC>1%黑色页岩厚度^[31]、TOC>2%富有机质页岩厚度^[41,70]、鲁丹早期页岩厚度^[8]、LM1—LM4笔石页岩段厚度^[18]进行过研究,成果众多。图8可见鲁丹阶(LM2—LM5)页岩厚度为5~50 m;靠近隆起带附近鲁丹阶页岩厚度较薄,为10~20 m;页岩厚度较大区域分布于盐津—泸

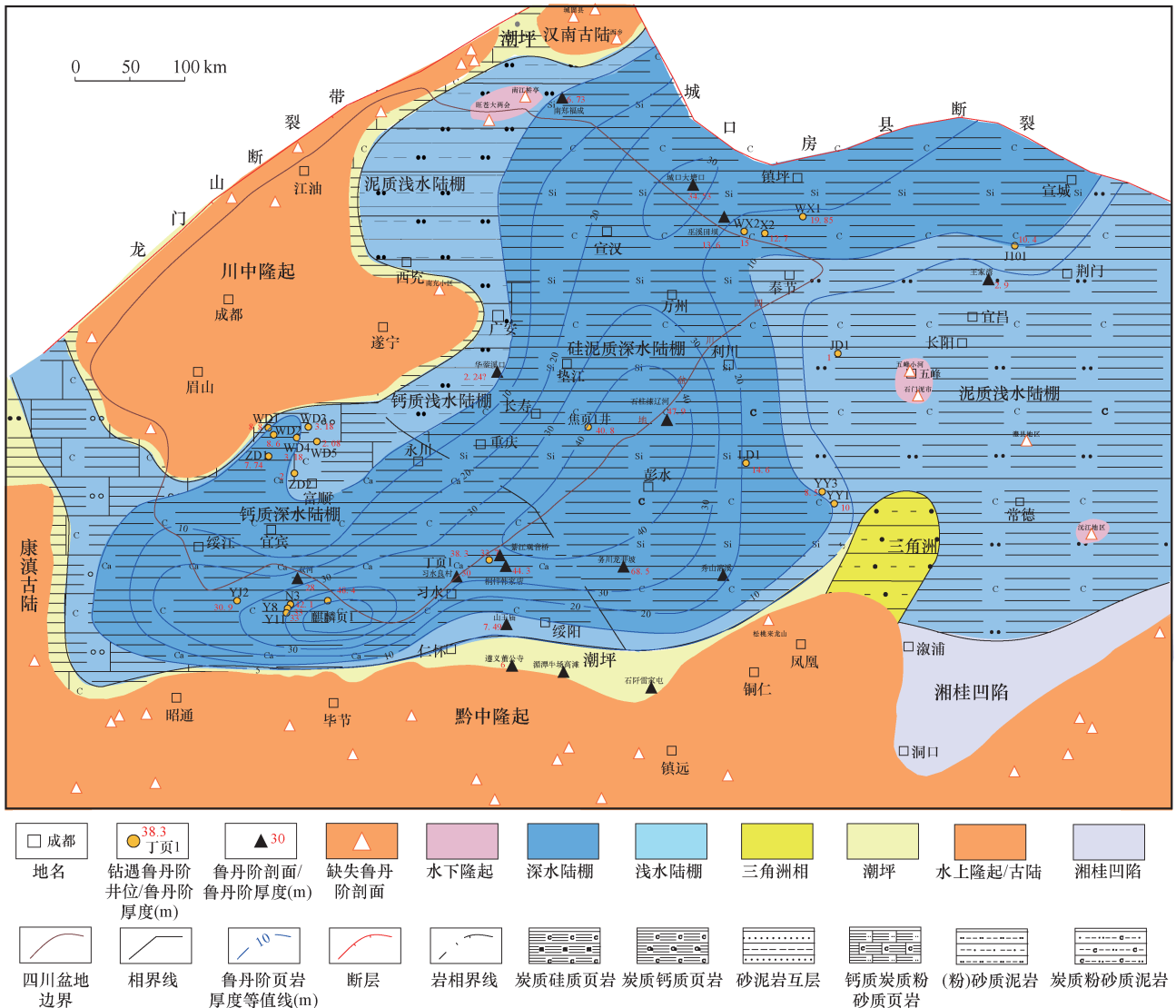


图8 中、上扬子地区早志留世鲁丹期岩相古地理

Fig. 8 Lithofacies paleogeography of the Rhuddanian of the Early Silurian in Upper and Middle Yangtze regions

(主要剖面厚度及缺失剖面引自 GBDB 数据库,三角洲相取自文献[13].)

州、武隆—彭水和石柱—巫溪3个富烃凹陷中心内,厚度为30~40 m。凹陷中心连成一片组成东北向“富烃坳陷带”^[41],走向受黔中隆起与川中隆起影响与沉积相带展布方向一致,东缘受雪峰隆起和湘鄂西水下隆起所围限,形成下沉大、半封闭的滞留沉积中心,与目前威远—长宁、涪陵焦石坝等页岩气田走向基本一致。

3.4 早志留世埃隆期

该期对应的岩石地层组合多样。南川—长宁对应龙马溪组中、上段;黔北—川西南对应龙马溪组中、上段+石牛栏组^[71];川东南为龙马溪组上段+小河坝组;黔东北铜仁—石阡—务川地区对应香树园组+雷家屯组^[72];鄂西地区为龙马溪组中、上段+罗惹坪组。龙马溪组中、上段岩性以灰绿色粉砂质泥岩、钙质泥岩、泥质

灰岩为主,表现为向上变浅序列,发育浅水陆棚相、潮坪相和潮控三角洲相,岩性组合为石英细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩,可见大量浅水波痕层理等。石牛栏组和香树园组岩性均以灰岩为主;小河坝组为粉砂岩与页岩夹少量灰岩。该期在盆地整体抬升和相对海平面下降后,呈现碳酸盐岩台地、浅水陆棚和深水陆棚共存的古地理格局^[30]。深水陆棚亚相范围较鲁丹期锐减,深水域缩减至川南和川北等局部地区(图9),发育2种岩石组合:①泥质灰岩+灰岩+钙质页岩+粉砂质页岩等,钙质成分较多,为钙质深水陆棚相;②粉砂质页岩+泥质粉砂岩+炭质硅质页岩,为硅质深水陆棚沉积。浅水陆棚亚相按岩相可分为钙质浅水陆棚和泥质浅水陆棚,前者碳酸盐成分多,后者沉积(粉)砂质页岩。环绕黔中隆起周缘的混积潮坪相,岩性为粉砂质页岩

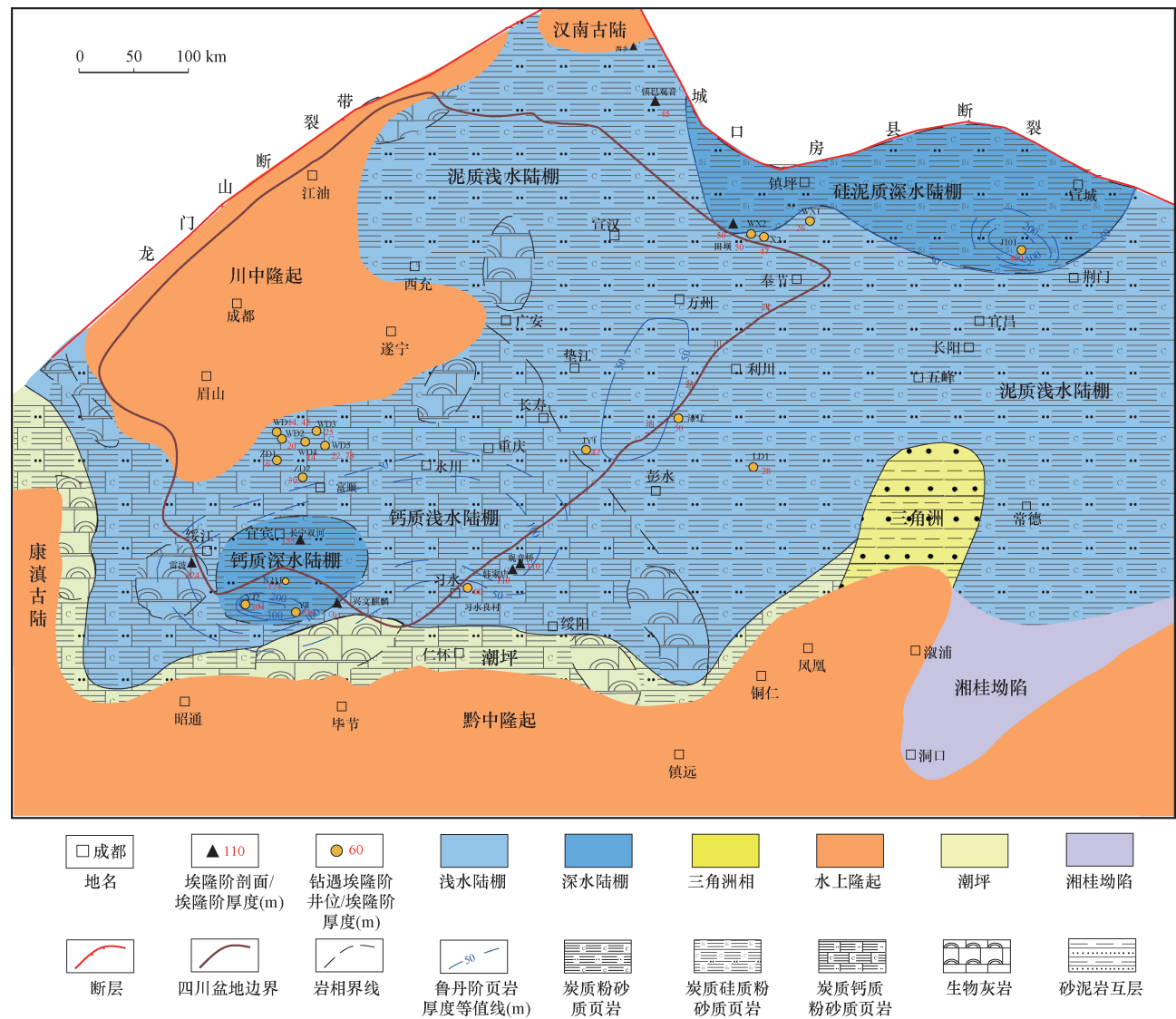


图 9 中、上扬子地区早志留世埃隆期岩相古地理
Fig. 9 Lithofacies paleogeography of the Aeronian of the Early Silurian in Upper and Middle Yangtze regions
(三角洲相取自文献[13].)

夹灰质泥岩,发育大量交错层理、浅水波痕层理等。埃隆阶龙马溪组页岩厚度高值区集中在雷波—盐津—长宁一带(页岩厚度 50 ~ 304 m)以及荆门—远安一带(页岩厚度 100 ~ 400 m),川东北巫溪地区和川东焦石坝地区龙马溪组页岩厚度为 40 ~ 50 m,厚度相差极大,反映雷波—盐津一带以及荆门一带为深水凹陷区。

4 五峰组—龙马溪组页岩沉积模式

中、上扬子地区五峰组—龙马溪组经历了凯迪阶、赫南特阶、鲁丹阶、凯迪阶和特列奇阶(少数地区)5 个地质时期。凯迪晚期—埃隆早期是深水相富有机质笔石页岩的主要形成期。凯迪五峰期,海平面上升,研究区属陆表浅海较深水区域。一方面,由于上扬子区被

东、西、南三面古陆包围,形成半封闭的海湾,加剧了滞留海盆的形成。另一方面,由于气候温暖、潮湿、雨水多,导致表层水体淡化、底层水体密度差异,造成水体循环不畅。表层水体营养物质丰富,藻类、放射虫、笔石等浮游生物生产力高,而海底出现大面积缺氧还原环境,无底栖生物的栖息场所,有利于笔石等浮游生物的保存。生物碎屑、有机质与粘土矿物呈复合体缓慢沉降海底,形成富有机质炭质硅质页岩、炭质钙质页岩以及炭质粉砂质页岩(图 10a)。赫南特早期,全球冰盖形成事件导致海平面大幅下降 50 ~ 100 m,研究区海域缺氧,以浮游生物为食物的笔石大量死亡,凉水浅水型赫南特贝动物群发育;但由于环境及温压剧烈变化,赫南特贝动物群在短时间内也很快消亡,形成近岸介壳灰岩、泥质灰岩及远岸灰质泥岩(图 10b)。

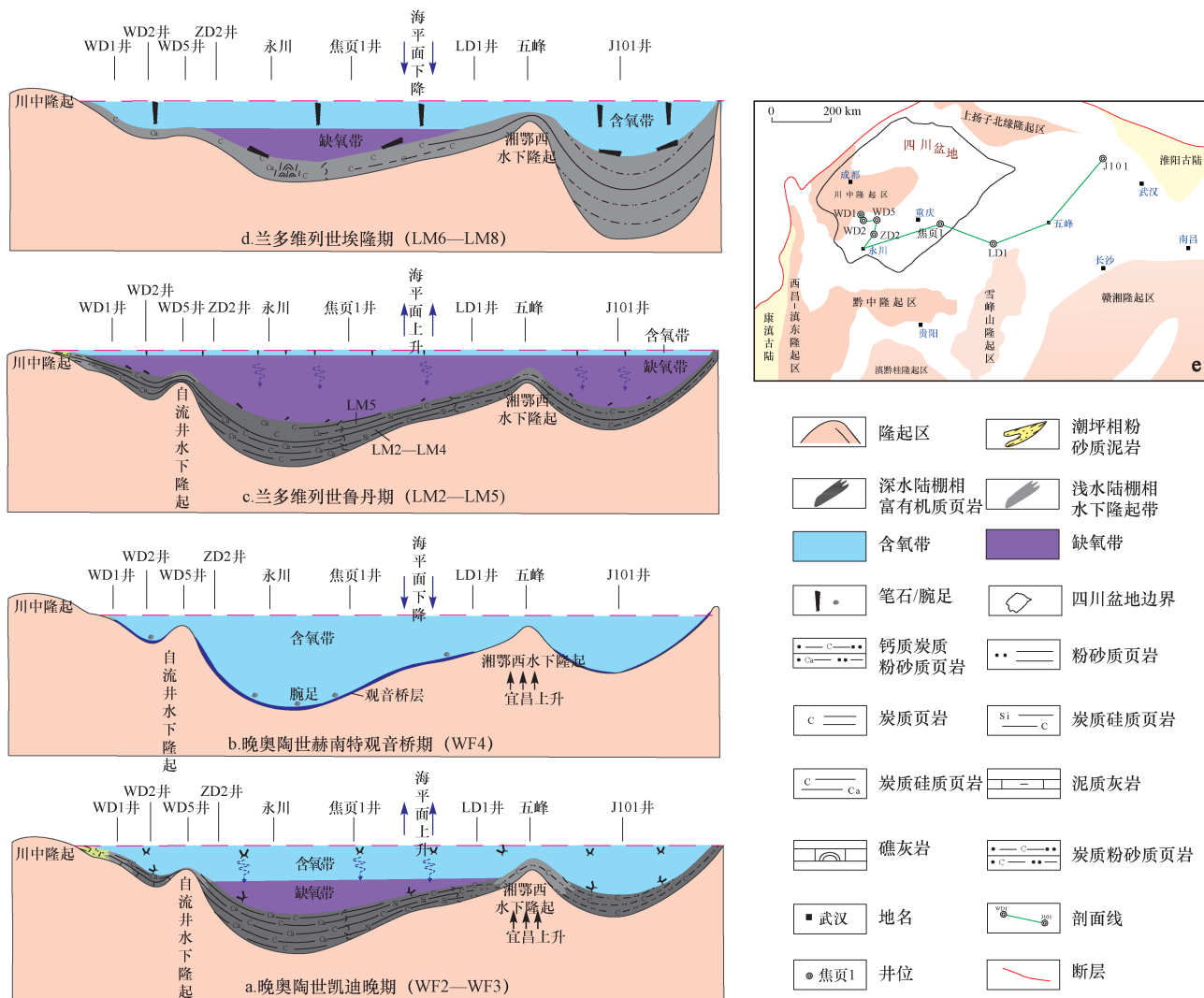


图 10 中、上扬子地区五峰组—龙马溪组笔石页岩形成环境及“两隆一凹”沉积模式示意图

Fig. 10 Schematic diagram showing the formative environment of graptolite-bearing shales in the Wufeng-Longmaxi Formations and the depositional model of “two uplifts-one depression” for the Wufeng-Longmaxi shales in

Upper and Middle Yangtze regions

a—d. 各时期沉积模式; e. 剖面位置

赫南特晚期—鲁丹早期, 冰盖消融, 全球海平面快速回升, 除华夏古陆继续抬升外, 其他古陆范围明显收缩, 如在晚奥陶世晚期露出水面的湘鄂西隆起此期被海水淹没。该时期气候迅速回暖, 水体表层富氧带形成, 笔石等浮游生物达高生产力顶峰, 底层为富有机质埋藏的缺氧带, 出现大面积缺氧深水陆棚环境, 并形成富有机质硅质页岩、炭质硅质页岩及炭质钙质页岩等^[73] (图 10c)。至鲁丹期末时, 海平面上升达顶峰。至埃隆期, 海平面下降, 陆源供应增多, 笔石及藻类等浮游生物生产力下降, 且水底大面积缺氧环境受到破坏, 形成贫有机质炭质粉砂质页岩和炭质钙质混合页岩 (图 10d)。

五峰组下部黑色页岩和龙马溪组底部黑色页岩发

育沉积主要受控于全球海平面上升、区域构造运动和古地理格局 3 种因素。全球海平面上升带来页岩先天物质基础, 区域构造运动助推页岩沉积、沉降, 隆—坳相间的古地理格局阻隔水体形成大面积饥饿型闭塞滞留的陆棚环境。

1) 全球海平面上升与气候影响

赫南特冰期前, 五峰组下部页岩沉积受海平面影响较小, 受温暖湿润气候影响较大, 整体为封闭滞留的海盆环境。赫南特期后、冰川消融事件之后, 古气候迅速转暖, 冰盖消融, 全球海水大幅上升, 发生大规模海侵。成烃生物主要为褐藻、红藻、疑源类及线叶植物和浮游动物等。冰期后, 生态环境改变使低等生物大规模繁殖, 为优质页岩形成提供良好物质基础; 且

古拗陷未与广海连通,为有机质的保存提供了底部深水区长期的稳定缺氧环境。海侵渐进阶段^[74],从盆地南缘至中心地区广泛沉积 LM1—LM4 深水陆棚笔石页岩,为页岩气最具潜力的富有机质页岩段。LM1—LM4 黑色页岩笔石形态多为双列攀合,代表静水沉积环境。随着海侵范围扩大达到顶峰,海水漫过障壁,海盆与外海连通,在盆地广大地区沉积 LM5 笔石页岩;LM5 笔石页岩段之后,笔石形态呈单列型,现弯曲状,反映水体动荡环境。随后,海平面缓慢下降,海侵速率降低,陆源碎屑供给加大,底部缺氧环境破坏,不利于有机质保存,因此有机质丰度向上整体逐渐降低。

2) 区域构造运动

华夏板块与扬子板块碰撞在东南部掀斜抬升成陆,形成前陆盆地。在前陆盆地发育初期阶段,腹地沉降速率大,有利于半局限深水沉积形成欠补偿状态;同时,区域构造控制页岩沉积中心呈东西向和东北向双向展布。

3) 古地理格局

差异抬升造成的隆—坳相间格局,对页岩沉降、沉积有利有弊。利处指多古陆刚性基底及诸多水下隆起稳定围限,阻隔外海水体交换传导;且总体平缓的古地形陆源碎屑供给较少,有利于形成横贯东西的大面积较为封闭的低能滞留欠补偿环境^[26],为页岩沉积创造良好条件。图 10 中东西向页岩沉积模式图中可见,焦石坝页岩沉积区(焦页 1 井区)主要被川中隆起和湘鄂西水下隆起这两个大型隆起所夹持;威远页岩沉积区(WD 井区)被川中隆起和小型自流井水下隆起围限沉积于凹陷之中;长宁页岩沉积区(永川附近)位于川中隆起和黔中隆起之间的腹地。四川盆地目前已开发的页岩气区均位于两个隆起夹持的凹陷之内,整体沉积模式为“两隆夹一凹”型。隆—坳相间地形格局的弊端指水下隆起区的存在使得部分地区富有机质页岩发育先天不足。前文在利用生物地层资料进行钻井岩心精细划带后发现,在隆起区范围内一般 WF2—LM4 笔石页岩段较薄,甚至缺失部分笔石带^[18];且与笔石带齐全的页岩气井相比,隆起区及其附近区域钻井气显示效果不佳。因此,页岩气的作业开发应避免、远离笔石页岩发育先天不足的隆起区。

5 结论

1) 中、上扬子地区晚奥陶世凯迪期—早志留世埃

隆期地层主要发育陆棚、潮坪及三角洲 3 种沉积相、8 种沉积亚相以及相应的多种微相。该区总体处于隆起围限的局限低能陆表浅海环境。其中,浅水陆棚相和局限浅海深水陆棚相是主体,页岩储层沉积有利相带为深水陆棚亚相。

2) 凯迪期晚期,受构造挤压形成的古隆起及水下高地围限,中、上扬子地区被包围为半局限滞留海盆,封闭环境下沉积五峰组页岩。随后,赫南特早期受冰川作用导致海平面下降影响,沉积浅水型观音桥层泥质灰岩。赫南特晚期—鲁丹早期,受冰川消融导致的海平面上升和构造挤压抬升影响,沉积形成页岩气发育最有利、分布最稳定、厚度最大的层段——龙马溪组底部和下段黑色页岩。鲁丹期晚期—埃隆期,受海平面下降影响,沉积水退型粉砂质泥页岩。

3) 黑色页岩发育受控于全球海平面上升、区域构造运动和古地理格局 3 种因素。全球海平面上升带来页岩先天物质基础,区域构造运动助推页岩沉积、沉降,隆—坳相间的古地理格局阻隔水体形成大面积饥饿型闭塞滞留的陆棚环境。黑色页岩厚度明显受控于隆—坳相间格局,沉积模式为“两隆夹一凹”型:页岩沉积区被“两隆”所夹持,位于“一凹”之中;靠近隆起区,笔石带发生不同程度缺失,不利于页岩气的开发,页岩气作业开发选区上应避免、远离笔石页岩发育先天不足的隆起区。

致谢:本文引用了中国石油西南油气田公司、中国石油浙江油田公司、中国华电集团公司井位基础资料以及大量学者的研究成果。感谢中科院南京地质古生物研究所陈旭院士以及中国石油勘探开发研究院王红岩、梁峰、郭伟、赵群等同志在笔石鉴定及页岩划带上的指导和帮助。感谢中科院南京地质古生物研究所张琳娜博士在 GBDB 数据库使用上的指导和帮助。感谢审稿专家提出的宝贵修改建议。在此一并深表谢意!

参 考 文 献

- [1] 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): 182 - 196.
- [2] 刘鸿允. 中国古地理图 [M]. 北京: 科学出版社, 1955.
Liu Hongyun. Atlas of palaeogeography of China [M]. Beijing: Science Press, 1955.
- [3] 穆恩之, 李积金, 葛梅钰, 等. 华中区晚奥陶世古地理图及其说明书 [J]. 地层学杂志, 1981, 5 (3): 165 - 170.
Mu Enzhi, Li Jijin, Ge Meiyu, et al. The Late Ordovician palaeogeog-

- graphical map in Central China and its synopsis[J]. *Journal of Stratigraphy*, 1981, 5(3): 165–170.
- [4] 关士聪. 中国海陆变迁海域沉积相与油气[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- Guan Shicong. Change of Chinese land and sea; Marine sedimentary facies and petroleum[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [5] 王鸿祯. 中国古地理图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1985.
- Wang Hongzhen. Atlas of the paleogeography of China[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1985.
- [6] 刘宝珺, 许晓松. 中国南方岩相古地理图集[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- Liu Baojun, Xu Xiaosong. Paleogeographic atlas of Lithofacies in South China[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [7] 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等. 中国南方中及晚奥陶世岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2001, 3(4): 10–24.
- Feng Zengzhao, Peng Yongmin, Jin Zhenkui, et al. Lithofacies palaeogeography of the Middle and Late Ordovician in South China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(4): 10–24.
- [8] Chen Xu, Rong Jiayu, Li Yue, et al. Facies patterns and geography of the Yangtze region, South China, through the Ordovician and Silurian transition[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 204(3): 353–372.
- [9] 马永生, 陈洪德, 王国力. 中国南方层序地层与古地理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Ma Yongsheng, Chen Hongde, Wang Guoli. Paleogeography and sequence stratigraphy of South China[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [10] 牟传龙, 葛祥英, 许效松, 等. 中上扬子地区晚奥陶世岩相古地理及其油气地质意义[J]. *古地理学报*, 2014, 16(4): 427–440.
- Mou Chuanlong, Ge Xiangying, Xu Xiaosong, et al. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician and its petroleum geological significance in Middle-Upper Yangtze region[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(4): 427–440.
- [11] 葛祥英, 牟传龙, 周恩恩, 等. 湖南晚奥陶世凯迪晚期—赫南特期沉积相及岩相古地理[J]. *沉积学报*, 2014, 32(1): 8–18.
- Ge Xiangying, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, et al. Sedimentary facies and lithofacies paleogeography in the Late Katian-Hirnantian of Late Ordovician in Hunan Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 8–18.
- [12] 牟传龙, 周恩恩, 梁薇, 等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. *地质学报*, 2011, 85(4): 526–532.
- Mou Chuanlong, Zhou Kenken, Liang Weiwei, et al. Early Paleozoic sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the Middle-Upper Yangtze region and petroleum and gas exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(4): 526–532.
- [13] 周恩恩, 牟传龙, 葛祥英, 等. 新一轮岩相古地理编图对华南重大地质问题的反映——早古生代晚期“华南统一板块”演化[J]. *沉积学报*, 2016, 35(3): 449–459.
- Zhou Kenken, Mou Chuanlong, Ge Xiangying, et al. Lithofacies paleogeography of the South China in Early Paleozoic and its reflection on key geological problems[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 35(3): 449–459.
- [14] 牟传龙, 王启宇, 王秀平, 等. 岩相古地理研究可作为页岩气地质调查之指南[J]. *地质通报*, 2016, 35(1): 10–19.
- Mou Chuanlong, Wang Qiyu, Wang Xiuping, et al. A study of lithofacies-palaeogeography as a guide to geological survey of shale gas[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(1): 10–19.
- [15] 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): 457–4472.
- 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.
- [16] 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.
- [17] 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): 753–767.
- [18] 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 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.
- [19] 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.
- [20] 樊隽轩, 陈清, 孙冬胜, 等. 利用 GBDB 数据库与 GIS 技术绘制高精度古地图[J]. *古地理学报*, 2016, 18(1): 115–125.
- Fan Junxuan, Chen Qing, Sun Dongsheng, et al. Making high-resolution palaeogeographic maps based on GBDB database and GIS technique[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(1): 115–125.
- [21] 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 Guanyinqiao Bed in South China[J]. *China Science Bulletin*, 2016, 61(18): 2053–2063.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 马力. 中国南方大地构造和海相油气地质(上册)[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- Ma Li. Tectonic and marine petroleum geology of South China: Volume 1[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [25] 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等. 中国晚奥陶世岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2004, 6(2): 127–139.
- Feng Zengzhao, Peng Yongmin, Jin Zhenkui, et al. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician in China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(2): 127–139.
- [26] 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.
- [27] 苏文博. 从层序地层学观点论奥陶—志留系界线划分[J]. *华南地质与矿产*, 1999, 15(1): 1–12.
- Su Wenbo. On the Ordovician-Silurian boundary at the viewpoint of sequence stratigraphy[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1999, 15(1): 1–12.
- [28] 郭岭. 渝东南地区志留系龙马溪组黑色页岩沉积特征及其页岩气意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- Guo Ling. Sedimentary characteristics of Silurian Longmaxi black shale and its significance for shale gas in southeast of Chongqing[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [29] 陈旭, 戎嘉余, 樊隽轩, 等. 扬子区奥陶纪末赫南特亚阶的生物地层学研究[J]. *地层学杂志*, 2000, 24(3): 173–175.
- Chen Xu, Rong Jiayu, Fan Junxuan, et al. Biostratigraphy of the Hirnantian substage in the Yangtze region[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2000, 24(3): 173–175.
- [30] 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 paleogeography of the Early Silurian in Sichuan area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(1): 20–29.
- [31] 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.
- [32] 李志明, 全秋琦. 中国南部奥陶—志留纪笔石页岩相类型及其构造古地理[J]. *地球科学*, 1992, 17(3): 261–269.
- Li Zhiming, Quan Qiuqi. Lithofacies types and tectonic palaeogeography of Ordovician and Silurian graptolite-bearing strata in South China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1992, 17(3): 261–269.
- [33] 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 Longmaxi black shales in the subsurface areas of the Yangtze platform[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2015, 39(4): 351–358.
- [34] 邓庆杰. 上扬子地区下寒武统岩相古地理及页岩气资源潜力评价[D]. 武汉: 长江大学, 2013.
- Deng Qingjie. The research of lithofacies palaeogeographic characteristics and shale gas resource potential of the Lower Cambrian series in the Upper Yangtze region[D]. Wuhan: Yangtze University, 2013.
- [35] 严德天, 陈代钊, 王清晨, 等. 扬子地区奥陶系—志留系界线附近地球化学研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2009, 39(3): 285–299.
- Yan Detian, Chen Daizhao, Wang Qingchen, et al. Geochemical research across the Ordovician-Silurian boundary on the Yangtze platform, South China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2009, 39(3): 285–299.
- [36] 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.
- [37] 陈旭, M. Bergström Stig. 奥陶系研究百余年: 从英国标准到国际标准[J]. *地层学杂志*, 2008, 32(1): 1–14.
- Chen Xu, Stig M B. Ordovician study in hundred years: From British series to international standard[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2008, 32(1): 1–14.
- [38] 戎嘉余. 再论志留纪年代地层的统、阶层型研究[J]. *地层学杂志*, 2005, 29(2): 160–164.
- Rong Jiayu. Areappraisal of the Silurian GSSPs[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2005, 29(2): 160–164.
- [39] 苏文博, 李志明, R. Ettensohn Frank, 等. 华南五峰组—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, Fank R E, 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.
- [40] 戎嘉余, 陈旭, 王怿, 等. 奥陶—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 (in Chinese) [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2011, 41(10): 1407–1415.
- [41] 周恩恩, 牟传龙, 许效松, 等. 华南中上扬子早志留世古地理与生储盖层分布[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(5): 623–632.
- Zhou Kenken, Mou Chuanlong, Xu Xiaosong, et al. Early Silurian paleogeography and source-reservoir-cap rocks of the Middle-Upper Yangtze region in South China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(5): 623–632.
- [42] 王超, 张柏桥, 舒志国, 等. 四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(3): 485–497.
- Wang Chao, Zhang Baiqiao, Shu Zhiguo, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3): 485–497.
- [43] 周恩恩, 牟传龙, 梁薇, 等. 湘西北龙山、永顺地区龙马溪组潮控三角洲沉积的发现——志留纪“雪峰隆起”形成的新证据[J]. *沉积学报*, 2014, 32(3): 468–477.
- Zhou Kenken, Mou Chuanlong, Liang Wei, et al. Tide-dominated deltaic deposits in Longmaxi Formation, Longshan-Yongshun regions, Northwestern Hunan: The initial sedimentary responses to onset of “Xuefeng Uplift” [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(3): 468–477.
- [44] 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): 289–4293.
- 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.
- [45] 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 Feng, Wang Hongyan, Bai Wenhua, et al. Graptolite correlation and sedimentary characteristics of Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(7): 20–26.
- [46] 穆恩之. 论五峰页岩[J]. *古生物学报*, 1954, 2(2): 153–170.
- Mu Enzhi. On the Wufeng shale [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1954, 2(2): 153–170.
- [47] 成汉钧, 王玉忠. 五峰期上扬子淡化海成因之探讨[J]. *地层学杂志*, 1991, 15(2): 109–114.
- Cheng Hanjun, Wang Yuzhong. A discussion on the genesis of the Wufengian desalinated sea in the Upper Yangtze Sea [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1991, 15(2): 109–114.
- [48] 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.
- [49] 周明魁, 王汝植, 李志明. 中国南方奥陶—志留纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- Zhou Mingkui, Wang Ruzhi, Li Zhiming. Lithofacies paleogeography and mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [50] 黄福喜, 陈洪德, 侯明才, 等. 中上扬子克拉通加里东期(寒武—志留纪)沉积层序充填过程与演化模式[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2299–2317.
- Huang Fuxi, Chen Hongde, Hou Mingcai, et al. Filling process and evolution model of sedimentary sequence of Middle-Upper Yangtze craton in Caledonian (Cambrian-Silurian) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2299–2317.
- [51] 牟传龙, 葛祥英, 周恩恩, 等. 川西南晚奥陶世五峰期岩相古地理[J]. *中国地质*, 2015, 42(1): 192–198.
- Mou Chuanlong, Ge Xiangying, Zhou Kenken, et al. Lithofacies paleogeography in Late Ordovician Wufeng Age in southeastern Sichuan [J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 192–198.
- [52] 陈超, 牟传龙, 梁薇, 等. 川南—黔北地区晚奥陶世凯迪期早期与凯迪期晚期岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2014, 16(5): 641–4654.
- Chen Chao, Mou Chuanlong, Liang Wei, et al. Lithofacies paleogeography of the Early Katian and Late Katian of Late Ordovician in southern Sichuan-northern Guizhou Provinces [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(5): 641–654.
- [53] 唐鹏, 黄冰, 吴荣昌, 等. 论上扬子区上奥陶统大渡河组[J]. *地层学杂志*, 2017, 41(2): 119–133.
- Tang Peng, Huang Bing, Wu Rongchang, et al. On the Upper Ordovician Daduhe Formation of the Upper Yangtze region [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2017, 41(2): 119–133.
- [54] 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 Xu, Rong Jiayu, Zhou Zhiyi, et al. The central Guizhou and Yichang uplifts, Upper Yangtze region, between Ordovician and Silurian [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(12): 1052–1056.
- [55] 王怿, 樊隽轩, 张元动, 等. 湖北恩施太阳河奥陶纪—志留纪之交沉积间断的研究[J]. *地层学杂志*, 2011, 35(4): 361–367.
- Wang Yi, Fan Juanxuan, Zhang Yuandong, et al. On the Ordovician-Silurian depositional hiatus at Taiyanghe, Enshi, Hubei Province [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2011, 35(4): 361–367.
- [56] 戎嘉余, 詹仁斌. 华南奥陶、志留纪腕足动物群的更替——兼论奥陶纪末冈瓦纳冰川活动的影响[J]. *现代地质*, 1999, 13(2): 390–393.
- Rong Jiayu, Zhan Renbin. Ordovician-Silurian Brachiopod fauna turnover in South China [J]. *Geoscience*, 1999, 13(2): 390–393.
- [57] 戎嘉余, 黄冰. 生物大灭绝研究三十年[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(3): 377–4404.
- Rong Jiayu, Huang Bing. Study of mass extinction over the past thirty years: A synopsis [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2014, 44(3): 377–4404.
- [58] 刘伟, 许效松, 余谦, 等. 中上扬子晚奥陶世赫南特期岩相古地理[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(1): 32–439.

- Liu Wei, Xu Xiaosong, Yu Qian, et al. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician Hirnantian in the Middle-Upper Yangtze region of China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 39(1): 32–39.
- [59] 王远翀. 上扬子地区晚奥陶世赫南特期岩相古地理[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- Wang Yuanchong. Lithofacies paleogeography in Hirnantian Stage of Late Ordovician in Upper Yangtze region [D]. Chengdu: Chengdu Science and Tectonology University, 2016.
- [60] 李越, 王建坡, 张园园, 等. 华南奥陶–志留纪之交的碳酸盐岩对古气候的诠释[J]. 自然科学进展, 2008, 18(11): 1264–1270.
- Li Yue, Wang Jianpo, Zhang Yuanyuan, et al. Perspective of carbonates during the Ordovician-Silurian transition in South China: Implications of their palaeoclimate response [J]. Progression on Natural Sciences, 2008, 18(11): 1264–1270.
- [61] 刘伟, 许效松, 冯心涛, 等. 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, 2010, 30(3): 65–70.
- Liu Wei, Xu Xiaosong, Feng Xintao, et al. Radiolarian siliceous rocks and palaeoenvironmental reconstruction for the Upper Ordovician Wufeng Formation in the Middle-Upper Yangtze area[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30(3): 65–470.
- [62] 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 Chao, Wang Lansheng, Shi Xuewen, 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.
- [63] 詹仁斌, 刘建波, G. Percival Ian, 等. 华南上扬子区晚奥陶世赫南特贝动物群的时空演变[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(9): 1154–1163.
- Zhan Renbin, Liu Jianbo, Ian G P, et al. Biodiversification of Late Ordovician Hirnantia Fauna on the Upper Yangtze Platform, South China[J]. Science China: Earth Science, 2010, 40(9): 1154–1163.
- [64] 戎嘉余, 陈旭, 詹仁斌, 等. 贵州桐梓县境南部奥陶系–志留系界线地层新认识[J]. 地层学杂志, 2010, 34(4): 337–348.
- Rong Jiayu, Chen Xu, Zhan Renbin, et al. New observation on Ordovician-Silurian boundary strata of southern Tongzi County, northern Guizhou, Southwest China [J]. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(4): 337–348.
- [65] 陈旭, 徐均涛, 成汉钧, 等. 论汉南古陆及大巴山隆起[J]. 地层学杂志, 1990, 14(2): 81–116.
- Chen Xu, Xu Juntao, Cheng Hanjun, et al. Discussion on Hannan old land and Daba Mountain uplift [J]. Journal of Stratigraphy, 1990, 14(2): 81–116.
- [66] 文玲, 胡书毅, 田海芹. 扬子地区志留纪岩相古地理与石油地质条件研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(6): 11–14.
- Wen Ling, Hu Shuyi, Tian Haiqin. Lithofacies paleogeography and petroleum geology of the Silurian in Yangtze area[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(6): 11–14.
- [67] 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 Haiquan, Xu Xiaosong, Liu Wei, 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.
- [68] 王玉满, 黄金亮, 王淑芳, 等. 四川盆地长宁、焦石坝志留系龙马溪组页岩气刻度区精细解剖[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(3): 423–432.
- Wang Yuman, Huang Jinliang, Wang Shufang, et al. Dissection of two calibrated areas of the Silurian Longmaxi Formation, Changning and Jiaoshiba, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2016, 27(3): 423–432.
- [69] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): 1–16.
- Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (Part 1): Distribution of four suits of regional marine source rocks [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(2): 1–16.
- [70] 董大忠, 程克明, 王玉满, 等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 288–299, 308.
- Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region, China [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 288–299, 308.
- [71] 戎嘉余, 马科斯·约翰逊, 杨学长. 上扬子区早志留世(兰多维列世)的海平面变化[J]. 古生物学报, 1984, 23(6): 672–694.
- Rong Jiayu, Johnson M E, Yang Xuechang. Early Silurian (Llandovery) sea-level changes in the Upper Yangtze region of central and southwestern China [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1984, 23(6): 672–694.
- [72] 倪超, 李越, 邓小杰. 黔东北石阡香树园剖面“龙马溪组”灰岩中的生物多样性[J]. 微体古生物学报, 2015, 32(1): 105–4113.
- Ni Chao, Li Yue, Deng Xiajie. Biodiversity of the “Lungmachi Formation” limestones at the Xiangshuyuan section, Shiqian, NE Guizhou Province, SW China [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2015, 32(1): 105–113.
- [73] Boucot A J, Chen Xu, Scotese C R. Correlation between geologically marked climatic changes and extinction [J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4(3–4): 123–128.
- [74] 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, 47(6): 1133–1146.