DOI:10.19826/j. cnki. 1009-3850. 2022. 04003

熊国庆,周小琳,李小刚,2022.米仓山-大巴山地区赫兰特期岩相古地理及其页岩气地质意义.沉积与特提斯地质,42(3):368-384.DOI:10. 19826/j.cnki.1009-3850.2022.04003

XIONG G Q, ZHOU X L, LI X G, 2022. Hirantian lithofacies palaeogeography and its geological significance of shale gas of the Micangshan-Dabashan area. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(3):368-384. DOI:10.19826/j. cnki. 1009-3850. 2022. 04003

米仓山一大巴山地区赫兰特期岩相古地理 及其页岩气地质意义

熊国庆^{1,2,3},周小琳^{1,2,3},李小刚⁴

(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. 中国地质调查局沉积地质研究中心,四川 成都 610081;4. 重庆科 技学院复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室,重庆 401331)

摘要:上扬子地区赫兰特期发育一套含赫兰特贝和达尔曼虫化石的独特的沉积单元,其沉积环境长期以来存在争议,还缺乏 更为精细的沉积相时空变化研究。本文以米仓山一大巴山地区赫兰特期地层为研究目标,通过系统资料收集,野外详细观测 和室内镜下分析等手段,采用"点-线-面"的岩相古地理分析方法,重建了研究区赫兰特期岩相古地理。剖面沉积相分析表 明,观音桥段发育于不同沉积环境之中,因而具有不同的岩相特征,总体上为赫兰特期海平面下降的产物,但经历了不只一次 的海平面升降变化,海退过程的沉积记录相对明显,海侵记录仅在盆地边缘或水下高地边缘有所响应。复原的岩相古地理显 示,该时期呈现北西高、北东和南西低,中间多个水下高地的沉积古地理格局,这种格局有利于扬子克拉通盆地内形成优质的 富有机质页岩;研究区内观音桥段沉积相主要以浅海陆棚相(浅水陆棚亚相)为主,局部发育孤立台地和碳酸盐缓坡,滨海相 局限于盆地西北古陆边缘。页岩气勘探开发中,区内粉砂质泥岩、碳质泥岩发育的浅海陆棚相区为页岩气优质储集层和勘探 有利区,但应尽量远离物源区和水下隆起区;白云岩、泥质灰岩发育的孤立台地和碳酸盐缓坡区,压裂过程中,应选择合适层 位,尽可能压穿白云岩、泥质灰岩,连通五峰组一龙马溪组含气页岩段,提高页岩气产量。 关键 词:赫兰特期;米仓山一大巴山地区;沉积相;岩相古地理;页岩气勘探开发

中图分类号:P618.13;P531 文献标识码:A

Hirantian lithofacies palaeogeography and their geological significance for shale gas in Micangshan-Dabashan area

XIONG Guoqing^{1,2,3}, ZHOU Xiaolin^{1, 2,3}, LI Xiaogang⁴

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. Key Laboratory of Sedimentary Basin & Oil and Gas Resources of MNR, Chengdu 610081, China; 3. Sedimentary Geology Research Center of Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 4. Chongqing Key Laboratory of Complicated Oil and Gas Field Exploration and Development, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing, 401331, China)

收稿日期: 2022-01-06; 修回日期: 2022-04-11 责任编辑: 郭秀梅 科学编辑: 崔晓庄 英文审校: 王高明

作者简介: 熊国庆(1975—),男,博士,正高级工程师,矿物学、岩石学、矿床学专业,现从事岩相古地理、沉积地质与油气 地质等方面研究。E-mail: hsiungq@163.com

资助项目: 国家自然科学基金项目(42102142)、西南重要盆地多能源资源地质调查(DD20221661)及重庆市自然科学基金资助项目(cstc2013jcyjA90017、cstc2020jcyj - msxmX0487)的联合成果。

Abstract: A unique sedimentary unit with Hirantina-Dalmanitina fauna develops in the upper Yangtze block. Its sedimentary environment is controversial and the detailed study of its space-time changes of sedimentary facies is deficient. In this paper, by the ways of systematic data collection, detailed observation of outcrops, detailed microscopic studies and analyses of thin sections, and the "point-line-plane" analytical method of lithofacies palaeogeography, the Hirantian lithofacies and palaeogeography in Micangshan-Dabashan area have been rebuilt. Analyses of sedimentary facies show that the Guanyingiao Member in the study area developed in different sedimentary environments with different lithofacies. It was the product of Hirantian sealevel fall, and more than one sea level fluctuation happened during Hirantian period. The sedimentary records of the marine regression are relatively obvious, with the transgression records responding only at the edge or the underwater highlands of the Yangtze basin. The recovered paleoeography shows a sedimentary paleogeographical pattern high in the north, low in the north and the west, and a number of underwater highlands in the middle, which is conducive to the formation of high-quality organic-rich shales in the Yangtze craton basin. Sedimentary facies of Guanyinqiao Member in the study area are dominated by continental shelf facies, especially the shallow shelf sub-facies, with some local isolated platforms and carbonate ramps, and the littoral facies are only distributed in Yangtze craton basin along the northwestern margin of the old land in the region at that time. The continental shelf facies developing silty mudstones and carbonificious mudstones, which is far away from sedimentary provenances and submarine highs, are the high-quality reservoir rocks for shale gas. It is suggested that in order to promote the production of shale gas in the isolated platforms and carbonate ramps, dolostone and muddy limestone layers of the Wufeng-Longmaxi Formation should be fractured throughout.

Key words: Hirantian period; Micangshan-Dabashan area; sedimentary facies; lithofacies palaeogeography; exploration and development of shale gas

0 前言

晚奥陶世冰川作用是显生宙发育的三次最大 的大陆冰川作用之一(Le Heron and Craig, 2008; Loi et al., 2010),存在长冰期即晚奥陶世"卡拉道克" 中期(现凯迪期)—赫南特末期(10Ma)(Saltzman and Young, 2005) 和短冰期(仅限于赫南特期; 0.5~ 1Ma; Brenchley et al., 1994) 之争。晚奥陶世较寒冷 气候通常与整个南冈瓦纳南极大规模冰席启动有 关(Ghienne et al., 2007),这些冰席的增长和减退导 致了全球海平面升降,诱发了地质历史上第二大规 模的生物灭绝事件,伴随两幕次全球性的生物集群 灭绝和复苏(Sheehan, 2001; Rong et al., 2006)。华 南当时位于南半球环冈瓦纳大陆中低纬度区 (Scotese and McKerrow, 1991), 目前还未发现直接 的冰川沉积物,但却具有独特的岩相分异(戎嘉余 和陈旭,1987; Chen et al., 2004), 五峰组顶部普遍 发育一套厚度不大,全球广布的"赫南特贝动物群" (Hirnantia-kinnella fauna)(戎嘉余,1979;汪啸风等, 1983; Rong et al., 1988, 2002, 2006, 2020; 戎嘉余等, 2007; Huang et al., 2019a, b, c), 并共生达尔曼虫层 (Dalmanitina)(李耀西等,1975)的地层,被称为观 音桥层(卢衍豪,1959),也称观音桥段(汪啸风等, 1983:戎嘉余,1984)。该段通常被认为属于正常浅 海"介壳相沉积"(穆恩之,1954;戎嘉余,1984;陈旭 和邱金玉,1986;耿良玉,1986;戎嘉余和陈旭,1987; 汪啸风,1989;成汉钧和王玉忠,1991;方一亭等, 1993;冯洪真等,1993;周名魁等,1993,牟传龙等, 2010,2011,2014;刘伟等,2012;葛祥英等,2013,王 远翀等,2015),也有认为其形成于深海环境中,属 深海等深流异地沉积(肖传桃等,1996;徐论勋等, 2004;高振中等,2008;蔡俊等,2010;张柏桥等, 2018)。再者,观音桥段位于五峰组和龙马溪组两 套富有机质黑色页岩之间,作为扬子地区主要的页 岩气勘探目的层系,观音桥段特殊岩相及其空间展 布也影响和制约页岩气选区(王玉满等,2017)、页 岩气产量(李佳欣,2018)及页岩气勘探开发(张柏 桥等,2018)。基于野外剖面观测,结合前人研究成 果和剖面、钻井资料,对米仓山—大巴山地区观音 桥段(南郑组)开展沉积相分析及其对比研究,重建 了研究区观音桥段(南郑组)沉积古地理格局,恢复 了赫兰特期岩相古地理。上述研究不仅有助于弄 清观音桥段沉积环境的关键地质问题,还对扬子地 区五峰组--龙马溪组页岩气选区评价与勘探开发 具有重要指导意义。

1 地质背景

米仓山-大巴山地区位于扬子陆块北缘,构造 位置上地处扬子陆块区的上扬子古陆块和秦祁昆 造山系的秦岭弧盆系交接部位,属于米仓山-大巴 山基底逆推带一部分。以城巴断裂为界,北侧与秦 岭弧盆系毗邻,南与川中前陆盆地接壤(图1)(潘桂 棠等,2009)。晚奥陶世,研究区正处于上扬子局限 海盆向东北开口的开阔海域,与秦岭以北的广海 (古秦岭洋)相连(陈旭等,1987;戎嘉余和陈旭, 1987;许效松等,2001)。奥陶系--志留系之交,研 究区内曾发生了两次明显的临湘组—五峰组之间 的临湘海退事件和五峰组—观音桥段之间的赫兰 特海退事件(成汉钧等,1993;汪啸风等,1999;熊国 庆等,2019a;熊国庆,2020)。同时,该时期火山活动 较为强烈,五峰组--龙马溪组同沉积地层中发育多 层火山灰夹层(钾质斑脱岩),已陆续获得了钾质斑 脱岩一系列 440.4 ± 5.6 Ma~450.9 ± 1.6 Ma 的锆 石 U-Pb 同位素年龄(熊国庆等,2017b,2019b;Ge et al., 2019),限定了该时期钾质斑脱岩的火山喷发时 限,与全球火山事件同步。印支期,随着勉略洋的 关闭,华北地块和扬子地块最终拼合,此后秦岭开 始向南的强烈逆冲推覆。新生代以来,受中国东部 环太平洋俯冲,西南特提斯洋俯冲和西秦岭—昆仑 向南逆冲联合下向东南挤压及华北地块持续向南的 挤压等共同作用下,中、上扬子处于三面围限汇聚的 大地构造背景(董树文等,2007),米仓山—大巴山地 区最终形成了—个向南突出的弧状构造带(图1)。

2 地层划分与对比

晚奧陶世—早志留世,五峰组和龙马溪组以黑 色笔石页岩为代表,其间夹以含介壳和达尔曼虫生 物为主的赫兰特期地层。陈旭等(2015)按照地层 学的基本原理和方法,建立了一个扬子区五峰组— 龙马溪组笔石带序列,并附以代码和同位素年龄值 (Gradstein et al., 2012),有效地解决奥陶系、志留系 黑色页岩地层的划分与对比,成为奥陶系—志留系 黑色石化石及陈旭等(2015)建立的笔石带序列,结 合上、下地层之间的接触关系,对米仓山—大巴山 地区晚奥陶世—早志留世地层进行区域划分和对 比(表1)。



图 1 米仓山—大巴山地区构造位置图(据张国伟等,2001;潘桂棠等,2009 修改)

Fig. 1 Tectonic location of the Micangshan-Dabashan area (modified from Zhang et al., 2001; Pan et al., 2009)

	01							e		8					
		年代地层	广;	元剑阁-宁强坦	地区	广元南江-	旺苍地区	陕西南	郑-西乡-镇	自己地区	重庆	城口-巫溪:	地区	湖北神农	マ架地区
统	阶	生物带(陈旭等, 2015)	剑阁上寺	广元谭家沟宁	*强二郎坝	旺苍双汇 王家湾	南江桥亭	南郑福成	西乡三郎铺 高家湾	镇巴小洋 星子山	城口大塘口 蓼子口	巫溪2井	巫溪徐家坝	竹山老码头	神农架清泉 后湾
	特	Oktavites spiralis–Stomatograptus grandis Monoclimacis griestoniensis	罗惹坪组	罗惹坪组	宁强组	宁强组	宁强组	宁强组			罗惹坪组	罗惹坪组	罗惹坪组	罗惹坪组	罗惹坪组
	列奇阶	Streptograptus cf. Crispus N2 Spirograptus turriculatus 438 13Mi		新滩组	崔家沟组	南江组	南江组	南江组	南江组	南江组	新滩组	新滩组	新滩组	新滩组	新滩组
兰多。	埃隆阶	LM9/N1 Spirograptus guerichi 438.49 LM8 Stimulograptus sedgwickii 438.76 LM7 Lituigraputs convolutus 439.21		ţ	龙马溪组	龙马溪组	龙马溪组						龙马溪组	龙马溪组	
维列统	<u>●</u>	LM6 Demirastrites triangulatus 440.77 LM5 Coronograptus cyphus 441.57 LM4 Cystograptus vesiculosus 441.47	龙马溪组	龙马溪组				龙马溪组		龙马溪组	龙马溪组	龙马溪组			龙马溪组
	日丹阶	LM2 Akidograptus ascensus 443.83							龙马溪组						
	赫南特阶	(Glyptograptus persculptus) 444.43 Normalograptus persculptus WF4 N. Oisuensis Fauna Fauna				观音桥段	观音桥段	南郑组	南郑组	南郑组	观音桥段	观音桥段			观音桥段
上奥陶		WF1 Operations with the second		五峰组		五峰组	五峰组	五峰组	五峰组	五峰组	五峰组	五峰组	五峰组	五峰组	五峰组
统	阶	WF1 Dicellograptus complanatus Foliomena-Nankinolithus							临		湘	ž	8		
		a				-1			144			473			

表1 米仓山一大巴山地区晚奥陶一早志留世地层划分及对比

Table 1 Stratigraphic division and correlation of Late Ordovican and Early Silurian of the Micangshan-Dabashan area

广元剑阁--宁强地区普遍缺失临湘组--赫兰 特期观音桥段沉积,龙马溪组中、上部黄色砂泥岩 直接伏于宝塔组龟裂纹灰岩之上,广元谭家沟见厚 约10m 五峰组灰黑色薄层硅质岩与褐灰色页岩互 层,产叉笔石和尹氏笔石,龙马溪组与上覆新滩组、 罗惹坪组平行不整合接触(王汝植,1981:金淳泰, 1982),或与崔家沟组整合接触(李耀西等,1975)。 广元南江—旺苍地区宝塔组—龙马溪组较为完整, 主要缺失龙马溪组下部(王汝植,1981;金淳泰, 1982: 赵兵, 1999; 王远翀等, 2015), 而刘第墉等 (1964)和 Chen et al. (2004)认为龙马溪组全部缺 失,观音桥段与南江组平行不整合接触。陕西南 郑--西乡--镇巴地区宝塔组--龙马溪组发育较全, 观音桥段同期地层被称为南郑组(朱兆玲等, 1986),其上龙马溪组与南江组整合或平行不整合 接触(俞剑华等,1986;陈旭等,1990)。重庆城口--巫溪地区和湖北神农架地区地层发育情况大体一 致,宝塔组-龙马溪组沉积较为连续,局部缺失观 音桥段和龙马溪组下部,龙马溪组与上覆新滩组砂 岩整合接触(金淳泰,1982;陈旭等,1990;樊隽轩 等,2012;王红岩等,2017)。

笔者通过近年来在米仓山—大巴山地区的野 外地质调查,详细观测和系统收集区内剖面51条和 钻井10口(表2),以赫兰特期观音桥段和南郑组为 研究对象,采用地表露头和地腹钻井、野外宏观特 征和镜下微观特征相结合(图2,图3),分析其岩性 特征和沉积厚度,并将其标注在图中相应的剖面或 钻井位置(图4)。通过"点-线-面"的岩相古地 理分析方法,开展单剖面或钻井的沉积相解剖及沉积 相区域对比研究,恢复研究区赫兰特期岩相古地理。

3 沉积相及其区域对比

3.1 沉积相划分

根据米仓山—大巴山地区赫兰特期地层野外 宏观特征、岩石微观镜下特征、岩石组合及沉积构 造,本文将研究区赫兰特期沉积相划分为滨海相、 浅海陆棚相及碳酸盐台地相,滨海相主要为前滨— 近滨亚相,浅海陆棚相又可分为浅水陆棚亚相和深 水陆棚亚相,碳酸盐台地相进一步可细分为碳酸盐 缓坡亚相和孤立台地亚相(表3)。区内各个相的岩 相特征及其相带展布详见下文。

3.2 典型剖面解剖

鉴于研究区观音桥段地层岩性特征及其沉积 充填序列有所差异,本文选取区内旺苍双汇石岗、镇 巴小洋星子山和城口厚坪地区3条具有代表性的剖面 进行沉积相剖析,查明观音桥段垂向上沉积变化过程。



(a)宁强赵家坝观音桥段缺失,崔家沟组平行不整合于宝塔组之上;(b)旺苍万家乡观音桥段缺失,龙马溪组黄绿色页岩平行不整合于宝塔组 之上;(c)旺苍国华福庆观音桥段;(d)旺苍国华福庆观音桥段赫兰特贝化石;(e)旺苍双汇石岗观音桥段;(f)旺苍双汇石岗观音桥段赫兰特贝 化石;(g)旺苍双汇唐家湾观音桥段;(h)旺苍双汇唐家湾观音桥段螺类化石;(i)旺苍双汇文家坡观音桥段赫兰特贝化石;(j)镇巴小洋星子山 观音桥段;(k)万源皮窝乡观音桥段;(l)城口庙坝观音桥段;(m)城口厚坪(大槽)观音桥段;地质锤长度为27cm。

图 2 米仓山一大巴山地区赫兰特期地层露头宏观特征

Fig. 2 Outcrops of the Hirantian strata in the Micangshan-Dabashan area



(a)旺苍国华福庆,生物碎屑粉砂质泥岩;(b)旺苍双汇文家坡,生物碎屑粉砂质泥岩;(c)旺苍双汇斑竹(王家沟),含生物碎屑粉砂质泥岩; (d)旺苍双汇石岗(下部),含生物碎屑粉砂质泥岩;(e)旺苍双汇石岗(上部),泥晶生物碎屑灰岩;(f)镇巴小洋星子山,岩屑石英砂岩;(g)万 源皮窝乡,微晶白云岩;(h)城口庙坝,微晶白云岩;(i)城口渝参1井,含介屑微晶白云岩;(j)城口厚坪(下部),石英岩屑砂岩;(k)城口厚坪 (上部),砂质微晶白云岩;(l)城口燕麦,含介屑微晶白云岩;(m)城口明通,微晶白云岩;(n)城口白泉,微晶白云岩;(o)城口蓼子口,微晶白 云岩。

图 3 米仓山一大巴山地区赫兰特期岩石正交偏光镜下微观特征



图 4 米仓山—大巴山地区赫兰特期地层剖面(钻井)位置、岩相及其厚度

Fig. 4 The profile (well) location, lithofacies and thickness of Hirantian strata in Micangshan-Dabashan area

表 2 米仓山—大巴山地区赫兰特期地层岩相及其厚度

Cable 2 The lithofacies and thickness of Hirantian strata in Micangshan-Dabash	an area
---	---------

剖面位置	岩性	厚度(m)	古生物	顶底地层	资料来源
剑阁猫儿塘	缺失	0	/	上覆罗惹坪组 下伏宝塔组	肖斌等,2021
青川火石村	缺失	0	/	上覆罗惹坪组 下伏宝塔组	肖斌等,2021
剑阁上寺	缺失	0	/	上覆罗惹坪组	Chen et al., 2004
亡二二女何	kti /ł-	0	,	下伏玉塔组 上覆罗惹坪组	金浮泰,1982 Character al 2004
)兀二至坝		0	/	下伏宝塔组	Chen et al., 2004
广元谭家沟	缺失	0	/	上復龙马溪组 下伏五峰组	王汝植,1981
宁强茅坪	缺失	0	/	上覆崔家沟组 下伏宝塔组	陈旭等,1990
宁强侯家院	缺失	0	/	上覆崔家沟组 下伏宝塔组	陈旭等,1990
宁强赵家坝	缺失	0	/	上覆崔家沟组 下伏宝塔组	Chen et al., 2004 本次观测
宁强二郎坝	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏宝塔组	李耀西等,1975
旺苍万家乡	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏宝塔组	本次观测
비고 수 고기 안되	粉砂质泥岩	1.5			Chen et al., 2004
吐仓从冲 (五汇工室海)	粉砂质泥岩	0.35	II :	上覆龙马溪组	王远翀等,2015
(<u> </u>	黏土岩	0.05	Hirnantia	下伏五峰组	金淳泰,1982
(斑竹村四)	含生物碎屑粉砂质泥岩	0.15			本次观测
旺苍双汇石岗村	含生物碎屑粉砂质泥岩、 泥晶生物碎屑灰岩夹碳质泥岩	0.5	Hirnantia,藻类及海百合茎	上覆龙马溪组 下伏五峰组	本次观测
旺苍双汇唐家湾	含生物碎屑泥质粉砂岩	0.3	Hirnantina-Kinnella	上覆龙马溪组 下伏五峰组	本次观测
旺苍双汇文家坡	生物碎屑粉砂质泥岩	0.2~0.25	Hirnantina-Kinnella, 珊瑚及海百合茎	上覆龙马溪组 下伏五峰组	本次观测

(续表2)					
旺苍国华福庆	生物碎屑粉砂质泥岩	0.5	Hirnantia	上覆龙马溪组 下伏五峰组	本次观测
旺苍大两会	含生物碎屑粉砂质泥岩	0.22	Dalmanitina? sp, Hirnantina-Kinnella	上覆龙马溪组 下伏五峰组	王远翀等,2015
天星1	硅质泥岩	?	?	上覆龙马溪组 下伏五峰组	肖斌等,2021
南江桥亭	粉砂质泥岩	1.5 0.8	Dalmanitina? sp , Hirnantina-Kinnella	上覆龙马溪组 下伏五峰组	王汝植,1981 Chen et al., 2004 封도 1999
南郑福成	细砂岩 碳质粉砂质页岩	0.03 0.37	Dalmanitina? sp, Hirnantina-Kinnella	上覆龙马溪组 下伏五峰组	陈旭等,1990 陈淑娥,1997
南郑挂宝岩北坡	含砾砂岩	0.1	Dalmanitinasp. ,Hirnantia	上覆龙马溪组 下伏五峰组	李耀西等,1975
南郑元坝槐树院	含砂砾泥质砂岩	?	Dalmanitinasp	上覆龙马溪组 下伏五峰组	李耀西等,1975
南郑西河	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏五峰组	陈旭等,1990
南郑上梁山朱家坡	泥质灰岩	0.3	Dalmanitinasp	上覆龙马溪组 下伏五峰组	朱兆玲等,1986
南郑中梁寺南山坡	派 质 灰 岩 含 砾 石 英 砂 岩	0.66	Dalmanıtınasp, Hirnantina	上復兀马溪组 下伏临湘组	朱兆玲等,1986
南郑下梁山后沟	钙质泥石 泥质灰岩 含砾石英砂岩	0.17~0.22 1.2 0.83	Dalmanitina nanchengensis Lu	上覆龙马溪组 下伏临湘组	学瘫凶寺,1975 李文厚,1997 朱兆玲等,1986
西乡三郎铺高家湾	含铁质泥岩 含砾石英砂岩 石英粉砂岩	0.04 0.14 0.04	Dalmanitina? sp, Hirnantina-Kinnella	上覆龙马溪组 下伏五峰组	俞剑华等,1985 陈旭等,1990
西乡三郎铺穆家沟	含细砾砂岩、 粗砂岩及粉砂岩	0.25	Dalmanitinasp	上覆龙马溪组 下伏五峰组	杨静华和秦克令, 1988
镇巴青狮	钙质砂岩夹细砾岩	0.29	Hirnantina	上覆龙马溪组 下伏五峰组	陈旭等,1990 王远翀等,2015
镇巴小洋星子山	泥质砂岩 粉砂岩-石英砂岩	0.2 0.15	Dalmanitinasp, Hirnantina-Kinnella	上覆龙马溪组 下伏五峰组	陈旭等,1990 本次观测
紫阳芭蕉口	板岩	3.5	Graptolitic	上覆斑鸠关组 下伏芭蕉口组	Chen et al., 2004
紫阳麻柳	砂岩夹泥岩	0.8	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	熊国庆等,2017b
万源皮窝	粉晶白云岩夹泥岩	1.0	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	熊国庆等,2017b
万源曹家	泥质白云岩	0.2	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	Chen et al., 2004
城口杨家坝—田坝	泥质白云岩	0.26	Hirnantina	上覆龙马溪组 下伏五峰组	Chen et al., 2004
城口庙坝	微晶白云岩	0.2	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	本次观测
城口周溪	微晶白云岩	0.2	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	本次观测
渝参1	粉晶灰质白云岩	0.3	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	本次观测
城口蓼子口	砂质泥岩 微晶白云岩	0.13 0.24	Dalmanitinasp, $Hirnantina$	上覆龙马溪组 下伏五峰组	陈旭等,1990 熊国庆等,2019a
城口明通	泥微晶白云岩	0.32	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	本次观测
城口白泉	泥微晶白云岩 (透镜状)	(3~5) ×0.5	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	本次观测
城口厚坪(大槽)	砂质微晶白云岩	0.26~0.3	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	葛梅钰等,1990
城口燕麦	粉晶白云岩 (透镜状)	1.1×0.35	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	熊小辉等,2018

(续表2)					
巫溪田坝	泥质粉砂岩 (透镜状)	0~0.37	Hirnantina	上覆龙马溪组 下伏五峰组	熊小辉等,2015
巫溪咸瑞(咸池)	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏五峰组	金淳泰,1982
巫溪2	灰岩	0.2	Hirnantina	上覆龙马溪组 下伏五峰组	王红岩等,2017
溪 202	灰岩	0.1	Hirnantina	上覆龙马溪组 下伏五峰组	吴伟等,2017
巫溪1	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏五峰组	王红岩等,2017
猫1	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏五峰组	内部资料
巫浅1	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏五峰组	内部资料
巫浅2	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏五峰组	内部资料
巫溪徐家坝	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏五峰组	陈旭等,1990 金淳泰,1982
渝参3	碳质泥岩夹钙质粉砂岩	5.85	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	本次观测
竹溪栗子坪	钙质砂岩与碳质泥岩	3.44	未见	上覆龙马溪组 下伏五峰组	熊国庆等,2019b
竹山老码头	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏五峰组	樊隽轩等,2012
神农架清泉	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏五峰组	樊隽轩等,2012
神农架清泉后湾	硅质泥灰岩	0.1	Hirnantina	上覆龙马溪组 下伏五峰组	Chen et al., 2004
巴东两河口	泥质灰岩	0.31	Hirnantina	上覆龙马溪组 下伏五峰组	周业鑫等,2017
巴东思阳桥	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏五峰组	Chen et al., 2004
巴东长梁茶园	缺失	0	/	上覆龙马溪组 下伏五峰组	Chen et al., 2004
秭归新滩	硅质灰岩	0.17	Hirnantina	上覆龙马溪组 下伏五峰组	Chen et al., 2004
MS1	碳质泥岩	?	?	上覆龙马溪组 下伏五峰组	肖斌等,2021
五科1	碳质泥岩	?	?	上覆龙马溪组 下伏五峰组	内部资料

表 3 米仓山—大巴山地区赫兰特期沉积相划分

Table 3	The division of Hirantian	n sedimentary facies	s in Micangshan-Dabashan area
---------	---------------------------	----------------------	-------------------------------

相	亚相	岩石组合	沉积构造	典型剖面(钻井)
它沾	带添 无态	金瓜石茎砂串 孙忠 教孙忠	平行层理、丘状交错	三郎铺高家湾、穆家沟、小洋星
供母	间供——近供	古砾石夹砂石、砂石、切砂石	层理、虫管构造	子山
光海吐棚	浅水陆棚	生物碎屑粉砂质泥岩、粉砂岩、泥质粉砂岩	平行层理	国华福庆、南江桥亭、巫溪田坝
浅 伊	深水陆棚	硅质、碳质泥岩	不太发育	MS1、五科 1
型歌扑台地	碳酸盐缓坡	泥晶生物碎屑灰岩、泥灰岩	不太发育	双汇石岗、巫溪2
恢酸盐百地	孤立台地	微晶白云岩、含生物碎屑微晶白云岩夹砂岩	偶见平行层理	万源皮窝、城口厚坪、蓼子口

旺苍双汇石岗观音桥段整合于五峰组黑色硅质岩、 硅质泥岩之上,含赫兰特贝化石,化石个体保存完 整,沉积厚度50cm(图2e,2f)。自下而上分为3个 岩性段,下段为含生物碎屑粉砂质泥岩,生物碎屑 主要为藻类、海百合、双壳类,含量约20%,为浅水 陆棚相沉积,厚度20cm(图3d,图5);中段为碳质泥 岩,厚度不大,3~5cm,为深水陆棚环境产物;上段 为泥晶生物碎屑灰岩,生物碎屑含量90%以上,主要



图 5 广元旺苍双汇石岗地区观音桥段岩性特征及其沉积相(图例参见图 8)

Fig. 5 The litho-characterization and sedimentary facies of the Guanyinqiao Member of Shigang profile, Shuanghui town, Wangcang County, Guangyuan (Legends seen in Fig. 8)



图 6 镇巴小洋星子山地区观音桥段岩性特征及其沉积相(图例参见图 8)

Fig. 6 The litho-characterization and sedimentary facies of the Guanyinqiao Member of Xingzishan profile, Xiaoyang, Zhenba County (Legends see Fig. 8)

有海百合茎、双壳碎片和藻类等,泥晶方解石充填, 为碳酸盐缓坡沉积,厚度25~30cm(图3e,图5),与 上覆龙马溪组黑色硅质碳质泥岩整合接触。垂向 上,从五峰组到观音桥段,沉积环境经历了深水陆 棚—浅水陆棚—深水陆棚—碳酸盐缓坡两次逐渐 变浅的海退过程,反映了海平面发生了两次由深到 浅的升降变化,表明五峰组到观音桥段之间为沉积 渐变过渡,而非突变。随着赫兰特期冰川消融,海 平面快速上升,龙马溪组深水陆棚相的黑色硅质碳 质泥岩迅速超覆于观音桥段碳酸盐岩之上,这次海 侵过程并未在地层沉积上有所反映,表现为二者之 间突变(图5)。

镇巴小洋星子山观音桥段整合于五峰组黑色 泥岩之上,产达尔曼虫(Dalmanitina)、腕足类化石, 沉积厚度20cm(陈旭等,1990)。本次笔者观测的观 音桥段厚度15cm(图2j),未见化石,自下而上可分 为两个岩性段,下段为石英粉砂岩,石英含量10%, 厚度1.5cm,为浅水陆棚相沉积(图6);上段为石英 岩屑砂岩和岩屑石英砂岩,二者为渐变过渡,向上 岩屑含量减少、石英含量增多、粒度增大,泥质胶 结,沉积结构、构造不发育,为浅水陆棚—滨海沉 积,厚度13.5cm(图3f,图6),与上覆龙马溪组黑色 碳质泥岩、硅质岩整合接触。垂向上,从五峰组到 观音桥段,沉积环境经历了深水陆棚—浅水陆棚— 滨海的逐渐变浅的海退过程,反映了海平面发生了 一次由深到浅的升降变化,表明五峰组到观音桥段 之间为沉积渐变过渡,而非突变。随着赫兰特期冰 川消融,海平面快速上升,龙马溪组深水陆棚相的 黑色碳质泥岩、硅质岩迅速超覆于观音桥段岩屑石 英砂岩之上,这次海侵过程并未在地层沉积上有所 反映,表现为二者之间突变(图6)。

城口厚坪(大槽)观音桥段整合于五峰组黑色 硅质岩夹硅质泥岩之上,岩性为泥质白云岩,沉积 厚度26cm(葛钰梅等,1990)。本次笔者观测的观音



图 7 城口厚坪地区观音桥段岩性特征及其沉积相(图例参见图 8)

Fig. 7 The litho-characterization and sedimentary facies of the Guanyinqiao Member of the Houping profile, Chengkou County (Legends see Fig. 8)

桥段厚度30cm(图2m),未见化石,自下而上可分为 四个岩性段:第一段为粉砂岩,厚度1.5cm,为浅水 陆棚相沉积(图7);第二段为粉砂质白云岩,厚度 7cm,为碳酸盐台地沉积(图7);第三段为石英岩屑 砂岩,厚度3cm,为浅水陆棚相沉积(图3j,图7);第 四段为砂质白云岩、白云岩,向上砂质逐渐减少,厚 度18.5cm(图3k,图7),为碳酸盐台地沉积,与上覆 龙马溪组黑色碳质泥岩整合接触。垂向上,从五峰 组到观音桥段,沉积环境经历了深水陆棚--浅水陆 棚--碳酸盐台地--浅水陆棚--碳酸盐台地两次逐 渐变浅的海退过程,反映了海平面发生了两次由深 到浅的升降变化,表明五峰组到观音桥段之间为沉 积渐变过渡,而非突变。随着赫兰特期冰川消融, 海平面快速上升,龙马溪组深水陆棚相的黑色碳质 泥岩迅速超覆于观音桥段白云岩之上,这次海侵过 程并未在地层沉积上有所反映,表现为二者之间突 变(图7)。

已有研究表明,扬子地区奥陶—志留纪之交普 遍发生了临湘期和赫兰特期两次明显的海退事件 (汪啸风等,1999;熊国庆等,2019a)。米仓山—大 巴山地区不同沉积环境下观音桥段剖面的沉积相 显示,无论是处于深水区(双汇石岗)或浅水区(小 洋星子山),赫兰特期海退事件是明显存在的,而且 海退过程还不只发生一次,表明该时期经历了两次 海平面升降变化,这与 Li et al. (2021)华南赫兰特 期两次海平面升降变化的认识是一致的。详细的 岩相学也显示,观音桥段与五峰组岩性渐变过渡, 具有向上逐渐变浅、变粗的特征,二者之间应为连 续沉积。

3.3 沉积相区域对比

单个剖面岩性特征显示,研究区观音桥段垂向 上沉积相变化较大,不同剖面沉积相也差异明显, 为搞清区内观音桥段沉积相横向上展布情况,笔者 自西向东选取不同剖面(图4中A-B-C)开展研究区 沉积相区域对比,剖面位置参见图4,剖面沉积相区 域对比如图8a。

西部旺苍万家龙马溪组黄色泥岩直接盖在宝 塔组龟裂纹灰岩之上,观音桥段缺失,剖面西侧也 显示相似的情况,表明该剖面以西为古陆,以东应 发育滨海相沉积。旺苍国华福庆—双汇石岗—南 江桥亭地区,主要为一套浅水陆棚相的含赫兰特贝 粉砂质泥岩,石岗上部发育碳酸盐缓坡的泥晶生物 碎屑灰岩。镇巴小洋星子山观音桥段以粉砂岩、岩 屑砂岩、石英砂岩为主,为一套浅水陆棚—滨海相 沉积。至万源皮窝—城口厚坪一带,相变为一套白 云岩夹砂泥岩为主的孤立台地沉积,期间经历海平 面振荡变化。巫溪田坝观音桥段为一套海侵沉积, 表现为古风化面之上的一套粉砂岩、碳质泥岩及含 赫兰特贝泥质粉砂岩的浅水陆棚相沉积,向东至巫 溪2井,相变为一套碳酸盐缓坡的含赫兰特贝灰岩。



图8 米仓山—大巴山地区赫兰特期地层沉积相区域对比及沉积古地理格局(剖面位置参见图4)

Fig. 8 Regional correlation of lithofacies and sedimentary palaeogeographic pattern of Hirantian strata of the Micangshan-Dabashan area (locations of profiles and wells see Fig. 4)

东部竹溪栗子坪则发育砂岩、碳质泥岩夹砂岩透镜 体的浅水陆棚相沉积,至神农架巴东两河口、秭归 新滩一带,沉积相则为一套碳酸盐缓坡的含赫兰特 贝泥质硅质灰岩沉积。

研究区沉积相区域对比表明,赫兰特期,米仓 山一大巴山地区沉积基底地形起伏不平,区内沉积 相主体以浅水陆棚相为主,局部发育碳酸盐缓坡和 孤立台地,滨海相分布于研究区西北部古陆边缘。

4 赫兰特期岩相古地理

米仓山—大巴山地区经历了中寒武—早奥陶 世南郑上升(陈旭等,1990),奥陶纪总体处于海侵 过程,短暂海退期(叶俭等,1992),奥陶纪末期开始 发生两次明显的海退过程(汪啸风等,1999;熊国庆 等,2019a),前陆隆起向陆内迁移(熊国庆等, 2017a)等,上述事件奠定了赫兰特期西北高、北东 和南西低、中部多个水下高地发育的沉积古地理格 局(图8b),而该时期岩相古地理在此基础上得以继 承和发展。

4.1 古陆

研究区赫兰特期古陆主要分布于广元—宁强 以西,称为摩天岭古陆(王远翀等,2015)。区内观 音桥段缺失,志留系龙马溪组、新滩组、崔家沟组平 行不整合于宝塔组之上(图2a,2b);汉南古陆在南 郑上升时期露出水面,隆升成陆,短暂经历了宝塔 期—五峰期海侵后再次露出水面,为继承性古陆 (陈旭等,1990)。摩天岭和汉南古陆向盆地提供物 源(图9)。





4.2 滨海相

滨海相古陆边缘发育,岩性主要为含砾不等粒 长石石英砂岩、含细砾砂岩、粗砂岩、粉细砂岩及粉 砂岩等。石英砂岩中石英占70%~75%,其次是长 石、电气石及云母等,磨圆不好,颗粒多呈棱角状, 分选较差,粒径大小不一,大者达砾级,砾径2mm 以 上,多为2~3mm,个别可达7mm。胶结物为黏土矿 物,其量高达20%左右,黏土矿物含量变化很大,含 量少时为石英砂岩,含量多时则成泥质砂岩(朱兆 玲等,1986;杨静华和秦克令,1988;陈旭等,1990)。 沉积构造不发育,仅在镇巴小洋五星村观音桥组砂 岩底部见平行层理(王远翀等,2015),南郑福成硅 质粉砂质泥岩富含"虫管"构造(陈旭等,1990),南 郑梁山粉细砂岩具丘状交错层理,说明该时期曾发 生过短暂风暴作用(李文厚,1997)。

4.3 浅海陆棚相

浅水陆棚亚相是区内观音桥段的主要岩相,沉 积环境也最为广布,自西南江向东至巫溪、奉节一 带发育。岩性主要为粉砂质泥岩夹砂岩(图 2c,2e, 2g),含赫兰特贝(图 2d,2f)、螺类化石(图 2h),个 体保存完整,显微镜下生物碎屑还有角石(图 3a)、 珊瑚、海绵骨针(图 3b)、海百合茎(图 3c,3e)及藻 类(图 3d)等,生物碎屑含量约 10% ~20%。岩石 粒度较细,沉积水动力条件不强,沉积结构、构造不 太发育,偶见砂岩夹层平行层理发育。

深水陆棚亚相主要展布于研究区北东和南西 两侧,相带内资料有限,与浅水陆棚亚相相带之间 为推测界线。北东侧紫阳芭蕉口为黑色含笔石化 石板岩(Chen et al., 2004),沉积水体较深,向北与 古秦岭洋广海连通,属于扬子北缘被动大陆边缘的 一部分。南西侧天星1井、MS1井和五科1井观音 桥段为黑色硅质、碳质泥岩(王玉满等,2016;肖斌 等,2021),可能含有赫兰特贝化石,自然伽马显示 出尖峰响应特征,为上扬子克拉通拗陷盆地内的深 水沉积(王玉满等,2016)。

4.4 碳酸盐台地相

碳酸盐缓坡亚相主要发育陆棚边缘,为海平面 下降过程产物,处于碳酸盐台地建设初期。区内仅 分布于巫溪田坝以东和湖北神农架一带,岩性为一 套灰岩、硅泥质灰岩,赫兰特贝发育。巫溪田坝以 东的碳酸盐缓坡规模很小,主要局限于巫溪2井、溪 202井;神农架碳酸盐缓坡可能往湖南一重庆一贵 州一带延伸,与扬子克拉通海南缘发育的碳酸盐缓 坡连在一起。

孤立台地亚相区内分布范围有限,主要分布于 万源皮窝、城口庙坝—厚坪—燕麦一带。赫兰特海 退时期,继承于宝塔期后巴山隆起或巴山古陆(叶 俭等,1992),向陆迁移至城口双河—庙坝—蓼子 口—厚坪一带的前陆隆起之上(熊国庆等,2019a), 沉积水体相较碳酸盐缓坡要浅,台地主要发育一套 浅灰色中层状白云岩夹少量砂、泥岩(图 2k,2l, 2m),白云岩显微镜下具泥、微晶结构(图 3g,3h, 3m,3n,3o),含少量生物碎屑(图 3i,3l)和砂质(图 3k)。

4.5 水下隆起

赫兰特期,研究区水下隆起主要分布于神农架 清泉一巫溪徐家一田坝一带,总体上近东西向展 布。隆起区内观音桥段缺失,表现为五峰组硅质岩 直接盖在宝塔组龟裂纹灰岩之上,如巫溪渔沙核桃 坝、竹溪瓦桑^①;或龙马溪组与下伏五峰组呈假整合 接触,如巫溪田坝盐厂公路^①、田坝咸瑞(咸池)、徐 家坝(金淳泰,1982)及竹山老码头、神农架清泉(樊 隽轩等,2012),假整合面普遍见2~16cm厚的黄褐 色含铁质粉砂黏土,局部夹褐铁矿铁壳及高岭土透 镜体^{①②}(金淳泰,1982),这些含有高岭石的黏土通 常是陆地风化的产物,指示了古风化壳的存在(王 怿等,2011,戎嘉余等,2012)。另一处水下隆起为 湘鄂西隆起的一部分(Chen et al., 2004),前人已做 过大量工作(王怿等,2011,2013;樊隽轩等,2012), 本文不再赘述。需要说明的是,这些水下隆起可能 曾经露出海面,遭受了风化剥蚀,四周未见边缘相 带,不同于古陆。

5 页岩气地质意义

研究表明,研究区观音桥段岩相差异较大,局 部缺失(图9)。随着涪陵页岩气田实现大规模商业 开采,上扬子地区五峰组一龙马溪组已成为中国页 岩气勘探开发的主要勘探目标层。观音桥段作为 赫兰特期海平面下降的产物,夹于五峰组—龙马溪 组两套富有机质页岩中,尽管沉积厚度不大,但对 页岩气区块优选、页岩气产量及勘探开发具有重要 的地质意义。

观音桥段岩相是判断五峰组—龙马溪组页岩 气储集层质量优劣的重要标志(王玉满等,2016)。 观音桥段距离物源供给区的远近及微古地貌的差 异对于五峰组-龙马溪组含气页岩段厚度及有机 碳含量(TOC)存在较为重要的影响(张柏桥等, 2018)。沉积坳陷区观音桥段粉砂质、硅质碳质泥 岩相为厚度大、有机质丰度高、脆性矿物含量高的 优质储集层发育区和页岩气勘探开发的有利区;观 音桥段缺失区为有效厚度薄、有机质丰度低的低效 储集层区和页岩气勘探风险区;观音桥段泥灰岩相 区的储集层质量和勘探前景介于二者之间(王玉满 等,2016),但可能因硬度较大,可压性差,无法充分 压裂、改造有利页岩段,页岩气产量明显低于观音 桥段缺失的地区(李佳欣,2018)。此外,观音桥段 是否发育,对开发井水平段穿行层位优选也至关重 要(张柏桥等,2018)。

因此,研究区滨海相区靠近古陆,五峰组一龙 马溪组含气页岩段厚度较薄,有机碳含量(TOC)偏低,为页岩气的低效储集层区和勘探风险区;浅海 陆棚相区为页岩气勘探开发有利区,但应远离物源 供给区及水下隆起区;孤立台地和碳酸盐缓坡相区 因观音桥段白云岩、泥灰岩硬度较大,可压性差,水 平层段压裂时,应选择合适层位,最大限度地连通 五峰组—龙马溪组含气页岩,提高页岩气产量。

6 结论

(1)观音桥段沉积时,赫兰特期海退过程在剖面中表现较为明显,而且经历不只一次的海平面升降变化,随后海平面上升的海侵沉积记录在盆地浅水区(包括盆地边缘和水下隆起边缘)有所响应,盆内不同位置表现各异。

(2)研究区总体上呈北西高、北东和南西低,中间多个水下隆起发育的沉积古地理格局,沉积相以 浅水陆棚相为主,向北东和南西两侧逐渐变为深水 陆棚相,局部发育孤立台地和碳酸盐缓坡。

(3)研究区赫兰特期沉积古地理格局有利于在 盆内形成优质的富有机质页岩。页岩气勘探开发 时,应尽量避开滨海相区和水下隆起区,优选考虑 区内观音桥段浅海陆棚相区,如遇白云岩、灰岩等 硬度较大的岩相,压裂中选取合适层位,压通五峰 组一龙马溪组含气页岩段,提高页岩气产量。

致谢:感谢中心江新胜、汪正江研究员,门玉 澎、熊小辉、周业鑫、闫剑飞和伍皓高级工程师野外 工作期间给予的大力帮助,程锦翔和邓敏高级工程 师提供了个别剖面位置,在此一并致谢!两位审稿 专家的意见和建议使得文章质量得以提升,深表 谢忱!

注释:

- ①四川省地质局第二区域地质测量队,1974.1:200000万城口-巫 溪幅区域地质测量报告.
- ②重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队,2006. 1:250000 开 县幅区域地质调查报告.

参考文献(References):

- Brenchley P J, Marshall J D, Carden G A F, et al., 1994. Bathymetric and isotopic evidence for a short-lived Late Ordovician glaciations in a greenhouse period[J]. Geology, 22(4): 295 – 298.
- Chen X, Rong J Y, Li Y, et al., 2004. Facies patterns and geography of the Yangtze region, South China, through the Ordovician and Silurian transition [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 204(3-4): 353-372.
- Ge X Y, Mou C L, Wang C S, et al., 2019. Mineralogical and geochemical characteristics of K-bentonites from the Late Ordovician to the Early Silurian in South China and their geological significance [J]. Geological Journal, 54(1):514-528.

- Ghienne J F, Le Heron D, Moreau J, et al., 2007. The Late Ordovician glacial sedimentary system of the North Gondwana platform. Glacial sedimentary processes and products [M]. Special Publication, edited by: Hambrey M, Christoffersen P, Glasser N. et al. International Association of Sedimentologists, Blackwells, Oxford, 39: 295 – 319.
- Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M, et al., 2012. The geological time scale 2012[M]. Amsterdam: Elsevier.
- Huang B, Harper D A T, Zhou H H, et al., 2020c. From shallow to deep-water: an ecological study of the Hirnantia brachiopod Fauna (Late Ordovician) and its global implications [J]. Lethaia, doi. org/10.1111/LET.12360.
- Huang B, Rong J Y, Harper D A T, et al., 2020b. A nearshore Hirnantian brachiopod fauna from South China and its ecological significance[J]. Journal of Paleontology, 94(2): 239 – 254.
- Huang B, Zhou H H, Harper D A T, et al., 2020a. A latest Ordovician Hirnantia brachiopod fauna from western Yunnan, Southwest China and its paleobiogeographic significance [J]. Palaeoworld, 29: 31 -46.
- Jin J S, Zhan R B, Wu R C. 2018. Equatorial cold-water tongue in the Late Ordovician[J]. Geology, 46(9): 759 – 762.
- Le Heron D P, Craig J. 2008. First-order reconstructions of a Late Ordovician Saharan ice sheet[J]. Journal of the Geological Society, 165(1): 19-29.
- Li C, Zhang J P, Li W J, et al., 2021. Multiple glacio-eustatic cycles and associated environmental changes through the Hirnantian (Late Ordovician) in South China[J]. Global and Planetary Change, 207 – 103668. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103668.
- Ling M X, Zhan R B, Wang G X, et al., 2019. An extremely brief end Ordovician mass extinction linked to abrupt onset of glaciations[J]. Solid Earth Sciences, 4(4): 190 – 198.
- Loi A, Ghienne J F, Dabard M P. et al., 2010. The Late Ordovician glacio-eustatic record from a high latitude storm-dominated shelf succession: the Bou Ingarf section (Anti-Atlas, Southern Morocco) [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 296(3 – 4): 332 – 358.
- Rong J Y, Boucot A J, Harper D A T, et al., 2006. Global analyses of brachiopod faunas through the Ordovician and Silurian transition: reducing the role of the Lazarus effect [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 43: 23 - 39.
- Rong J Y, Happer D A T, 1988. The Ordovician-Silurian Boundary and the Hirnantia fauna[J]. Lethaia, 21(2): 168.
- Rong J Y, Harper D A T, Huang B, et al., 2020. The latest Ordovician Hirnantian brachiopod faunas: New global insights [J]. Earth-Science Reviews, 208 – 103280. https://doi.org/10.1016/j. earscirev. 2020.103280.
- Rong J Y, Xu C, Harper D A T, 2002. The latest Ordovician Hirnantia Fauna (Brachiopoda) in time and space[J]. Lethaia, 35(3): 231 -249.
- Saltzman M R, Young S A, 2005. Long-lived glaciation in the Late Ordovician? Isotopic and sequence stratigraphic evidence from

western Laurentia [J]. Geology, 33(2): 109 – 112.

- Scotese C R, McKerrow W S, 1990. Revised world maps and introduction[M], in McKerrow W S, Scotese C R. eds. Paleozoic paleogeography and biogeography: Geological Society [London] Memoir 12, 1 - 21.
- Scotese C R, McKerrow W S, 1991. Ordovician plate tectonic reconstructions [M]. In: Barnes C R, Williams S H (Eds.), Advances in Ordovician geology. Geological Survey of Canada, 90 (9): 271-282.
- Sheehan P M, 2001. The Late Ordovician mass extinction [J]. Annual Review Earth and Planetary Sciences, 29(29): 331-364.
- Wang G X, Zhan R B, Percival I G, 2019. The end-Ordovician mass extinction: A single-pulse event? [J]. Earth Science Reviews, 192: 15-33.
- 蔡俊,何幼斌,张来,等,2010.中上扬子地区五峰组沉积环境分析 [J].海洋地质动态,26(6):24-30.
- 陈淑娥, 1997. 陕西南郑福成奥陶系 志留系界线的笔石[J]. 西安 地质学院学报, 19(3): 1-8.
- 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, 丘金玉, 1986. 宜昌奥陶纪古环境的演变[J]. 地层学杂志, 10(1): 1-14.
- 陈旭,徐均涛,成汉钧,等,1990. 论汉南古陆及大巴山隆起[J]. 地层学杂志,14(2):81-116.
- 成汉钧, 王玉忠, 1991. 五峰期上扬子淡化海成因之探讨[J]. 地层 学杂志, 15(2): 109-114.
- 成汉钧, 叶俭, 汪明渊, 1993. 大巴山早古生代地层[M]. 西安: 西 北工业大学出版社:1-215.
- 董树文,张岳桥,龙长兴,等,2007.中国侏罗纪构造变革与燕山运 动新诠释[J].地质学报,81(1):1449-1461.
- 樊隽轩, Michael J M, 陈旭, 等, 2012. 华南奧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, 42 (1):130-139.
- 方一亭,边立曾,俞剑华,1993.晚奥陶世五峰期上扬子板块沉积 模式[J].沉积学报,11(3):7-12.
- 冯洪真,俞剑华,方一亭,1993. 五峰期上扬子海古盐度分析[J]. 地层学杂志,17(3):179-185.
- 高振中,何幼斌,李罗照,等,2008.中国南方上奥陶统五峰组观音 桥段成因讨论:是"浅水介壳相",还是深水异地沉积? [J].古 地理学报,10(5):487-494.
- 葛梅钰,1990.四川城口志留纪笔石[M].中国古生物志.北京:科 学出版社:1-157.
- 葛祥英,牟传龙,周恳恳,等,2013. 湖南晚奧陶世桑比期-凯迪期 早期沉积特征及沉积模式[J]. 古地理学报,15(1):59-68.
- 耿良玉,1986.论扬子区五峰页岩的陆表海成因[C].见:中国古生物学会第十三、十四届学术年会论文选集,合肥:安徽科技出版社:103-114.
- 金淳泰,1982. 西南地区地层总结(志留系)[M]. 地矿部成都地质 矿产研究所,56-61.
- 李佳欣, 2018. 观音桥段地质特征及其对页岩气产量的影响——以

南川地区为例[J]. 油气藏评价与开发,8(4):68-72.

- 李文厚,1997. 南郑梁山奥陶系与志留系界线附近的沉积特征及沉积环境[J]. 地层学杂志,21(2):146-151.
- 李耀西,宋礼生,周志强,1975.大巴山西段早古生代地层志[M]. 北京:地质出版社:20-80.
- 梁峰,拜文华,邹才能,等,2015. 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.
- 刘秉理,李建明,1993. 中扬子地区上奥陶统五峰组的缺失及其意义[J]. 江汉石油学院学报,15(4):15-18.
- 刘第墉,陈旭,张太荣,等,1964.四川北部南江早古生代地层[J]. 中国科学院地质古生物研究所集刊,地层文集1号:161-170.
- 刘伟,许效松,余谦,等,2012. 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),39(1):32-39.
- 卢衍豪,1959. 中国南部奥陶纪地层分类和对比[M]. 北京:地质 出版社:1-113.
- 牟传龙,葛祥英,许效松,等,2014.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,16(4):427-440.
- 牟传龙,许效松,2010. 华南地区早古生代沉积演化与油气地质条件[J]. 沉积与特提斯地质,30(3):24-29.
- 牟传龙,周恳恳,梁薇,等,2011.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,85(4):1-7.
- 穆恩之, 1954. 论笔石页岩[J]. 古生物学报, 2(2): 153-170.
- 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等,2009.中国大地构造单元划分[J]. 中国地质,36(1):1-28.
- 戎嘉余,陈旭,1987.华南晚奥陶世的动物群分异及生物相、岩相分 布模式[J].古生物学报,26(3):507-535.
- 戎嘉余, 王怿, 詹仁斌, 等, 2012. 论桐梓上升一志留纪埃隆晚期黔 中古陆北扩的证据[J]. 地层学杂志, 36(3): 679-692.
- 戎嘉余, 詹仁斌, 黄冰, 等, 2007. 一个罕见的奥陶纪末期深水腕足 动物群在浙江杭州余杭的发现[J]. 科学通报, 52: 2632 -2637.
- 戎嘉余,1979.中国的赫南特贝动物群(Hirnantia fauna)并论奥陶系 与志留系的分界[J].地层学杂志,3(1):2-28.
- 戎嘉余,1984. 上扬子区晚奥陶世海退的生态地层证据与冰川活动 影响[J]. 地层学杂志,8(1):19-29.
- 汪啸风,曾庆銮,周天梅等,1983. 长江三峡东部地区奥陶纪晚期 与志留纪初期的化石群并兼论奥陶系与志留系界线问题[J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所文集,6:95-182.
- 汪啸风,陈孝红, Erdtmann B D, 1999. "赫南特阶"和奥陶系一志留 系界线的厘定[J]. 华南地质与矿产, 15(3): 12-18.
- 汪啸风, 1989. 中国奧陶纪古地理重建及其沉积环境与生物相特征[J]. 古生物学报, 28(2): 234 248.
- 王红岩,郭伟,梁峰,等,2017. 宣汉一巫溪地区五峰组一龙马溪组 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.
- 王汝植,1981.西南地区地层总结(奥陶系)[M].成都地质矿产研究所,28-33.
- 王怿,樊隽轩,张元动,等,2011. 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,35(4):361-367.
- 王怿,戎嘉余,詹仁斌,等,2013. 鄂西南奧陶系 志留系交界地层 研究兼论宜昌上升[J]. 地层学杂志,37(3):264-274.

- 王玉满,董大忠,黄金亮,等,2016.四川盆地及周边上奥陶统五峰 组观音桥段岩相特征及对页岩气选区意义[J].石油勘探与开 发,43(1):42-50.
- 王远翀,牟传龙,梁薇,等,2015. 扬子地块北缘晚奥陶世赫南特期
 岩相古地理[J]. 沉积与特提斯地质,35(3):19-26.
- 吴伟,谢军,石学文,等,2017. 川东北巫溪地区五峰组 龙马溪组 页岩气成藏条件与勘探前景[J]. 天然气地球科学,28(5): 734-743.
- 武瑾,梁峰, 吝文, 等, 2017. 渝东北地区巫溪2 井五峰组 龙马溪 组页岩气储层及含气性特征 [J]. 石油学报, 38(5): 512 - 524.
- 肖斌, 刘树根, 冉波, 等, 2021. 四川盆地北缘五峰组和龙马溪组沉 积构造格局研究[J]. 地球科学, 46(7): 2449-2465.
- 肖传桃,姜衍文,朱忠德,等,1996. 湖北宜昌地区奥陶纪层序地层 及扬子地区五峰组沉积环境的讨论[J]. 高校地质学报,2(3): 339-346.
- 熊国庆,王剑,李园园,等,2017a.大巴山地区早古生代黑色岩系 岩相古地理及页岩气地质意义[J].古地理学报,19(6):965 -986.
- 熊国庆,王剑,李园园,等,2017b.大巴山西段上奥陶统一下志留 统五峰组-龙马溪组斑脱岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质,37(2):46-58.
- 熊国庆,王剑,李园园,等,2019a.大巴山地区晚奥陶世一早志留 世"宜昌上升"的沉积响应[J].地质论评,65(3):533-550.
- 熊国庆,王剑,李园园,等,2019b.南大巴山东段上奥陶统五峰组 -下志留统龙马溪组钾质斑脱岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J].地质学报,93(4):843-864.
- 熊国庆,2020. 大巴山地区奥陶-志留纪之交构造转换过程的沉积 响应研究[D]. 成都:成都理工大学:148-183.
- 熊小辉,王剑,熊国庆,等,2018. 渝东北奥陶-志留纪之交沉积地 球化学及其环境演化—以城口地区燕麦剖面临湘组-龙马溪 组为例[J]. 沉积学报,36(2):257-266.

- 熊小辉,王剑,余谦,等,2015. 富有机质黑色页岩形成环境及背景 的元素地球化学反演—以渝东北地区田坝剖面五峰组-龙马 溪组页岩为例[J]. 天然气工业,35(4):25-32.
- 徐论勋,肖传桃,龚文平,等,2004. 论扬子地区上奥陶统五峰组观 音桥段的深海成因[J]. 地质学报,78(6):726-732.
- 许效松, 万方, 尹福光, 等, 2001. 奥陶系宝塔组灰岩的环境相, 生态相与成岩相[J]. 矿物岩石, 21(3): 64-68.
- 杨静华,秦克令,1988. 陕西西乡志留纪下界年龄研究[J]. 中国地 质科学院西安地质矿产研究所所刊,21:39-45.
- 叶俭,杨友运,苏春乾,等,1992.大巴山南坡奥陶系的沉积环境分析[J].西安地质学院学报,14(2):7-16.
- 俞剑华,方一亭,张大良,1986. 陕西西乡三郎铺奥陶系与志留系 界线剖面[J]. 南京大学学报,22(3):475-488.
- 詹仁斌,刘建波,Ian G P,等,2010. 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,40(9):1154 -1163.
- 张柏桥,孟志勇,刘莉,等,2018.四川盆地涪陵地区五峰组观音桥 段成因分析及其对页岩气开发的意义[J].石油实验地质,40 (1):30-43.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,等,2001.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学出版社:1-855.
- 张琳娜, 樊隽轩, 陈清, 2016. 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, 61(18): 2053 - 2063.
- 赵兵,1999. 米仓山南缘奥陶纪地层新见[J]. 成都理工学院学报 (自然科学版),26(1):86-91.
- 周名魁,王汝植,李志明,1993.中国南方奥陶纪-志留纪岩相古 地理与成矿作用[M].北京:地质出版社:7-93.
- 周业鑫,丁俊,余谦,等,2017. 渝东北地区观音桥段沉积与有机碳 同位素特征及其区域对比[J]. 地质学报,91(5):1097-1107.
- 朱兆玲,林尧坤,陈挺恩,等,1986."南郑页岩"时代的再认识 [J]. 地层学杂志,10(2):98-107.