

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.226>



桂中坳陷早石炭世泥页岩地球化学特征及近源气成藏模式

王保忠¹, 欧文佳², 王传尚¹, 彭中勤¹, 张国涛¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205

2. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 目前针对桂中坳陷早石炭世富有机质泥页岩的生烃潜力方面研究很少, 严重制约了该区以页岩气为主的非常规油气勘探。本研究对鹿寨县城西石炭系鹿寨组泥页岩系统取样分析, 从有机碳含量、岩石热解、有机碳同位素组成、抽提物正构烷烃组成特征及泥岩镜质体反射率多个方面讨论了该套泥页岩的生烃潜力; 结合区域构造演化史总结了与下石炭统岩关阶泥页岩密切相关的3种近源气藏赋存模式。研究结果表明: 泥页岩的TOC值分布于0.25%~15.67%, 其中强制海退前沉积的泥页岩富含有机质, TOC值均大于2%, TOC值与氯仿沥青“A”、生烃潜量及总烃呈弱正相关关系。泥页岩的有机质类型主体为Ⅱ型; 泥页岩的R_o值分布于1.72%~2.78%, 处于过成熟阶段。泥页岩上下岩性组合特征及桂中坳陷现今所处的构造位置表明, 坳陷中部对冲构造区为有利的近源气藏形成区, 背冲构造区为较差区; 坳陷边缘逆冲推覆构造区为存在岩性圈闭的近源气藏形成区。

关键词: 桂中坳陷; 早石炭世; 泥页岩; 成熟度; 烃源岩评价。

中图分类号: P595; P597

文章编号: 1000-2383(2018)07-2222-12

收稿日期: 2017-08-20

Geochemical Characteristics of the Early Carboniferous Shale in Guizhong Depression and Their Contribution to Adjacent Gas Reservoirs

Wang Baozhong¹, Ou Wenjia², Wang Chuanshang¹, Peng Zhongqin¹, Zhang Guotao¹

1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: To date there are only a few studies on genetic potential of the Early Carboniferous shale in Guizhong depression, which severely restricts the unconventional oil and gas exploration (mainly shale gas) in this area. In this study, typical profile measurements and sampling analysis of the shale from the Early Carboniferous slope facies in Guizhong depression were conducted, and then the hydrocarbon generating potential of the shale was discussed from multiple perspectives, including the TOC content, rock pyrolysis, organic carbon isotope composition, *n*-alkane composition and the vitrinite reflectance of the shale. Combined with regional tectonic evolution history, three models of near source gas reservoirs, which are closely related to the shale from the Lower Carboniferous Yanguanian Stage, are summarized. The results show that, TOC values are ranging from 0.25% to 15.67%. The shales deposited before forced regressive are rich in organic matter, with TOC values greater than 2%. There are weak positive correlations between TOC value and chloroform bitumen “A”, the hydrocarbon generating potential and the total hydrocarbon respectively. The type of the organic matter in the shales is mainly classified as kerogen type II. The values of R_o are ranging from 1.72% to 2.78%, in the overmature stage. According to the lithologic characteristics and the present tectonic position of Guizhong depression, we suggest that the ramp structure zone in the middle of the depression is favorable for the formation of near source gas reservoirs, while the back thrust zone is poor. The

基金项目: 中国地质调查局项目(No.DD20160179)。

作者简介: 王保忠(1980—), 男, 工程师, 博士, 从非常规油气综合研究及区域地质调查工作, 主要从事页岩在高演化阶段的生烃富集机理研究。

ORCID: 0000-0001-7261-9716. E-mail: shiyoudizhi@139.com

* 通讯作者: 欧文佳, E-mail: wenjiaou1985@163.com

引用格式: 王保忠, 欧文佳, 王传尚, 等, 2018. 桂中坳陷早石炭世泥页岩地球化学特征及近源气成藏模式. 地球科学, 43(7): 2222—2233.

thrust nappe structure zone in the edge of the depression is the near source gas accumulation zone with lithologic traps.

Key words: Guizhong depression; Early Carboniferous; shale; maturity; source rock evaluation.

0 引言

石炭纪是地质历史中烃源岩发育及古地理、古气候发生重要变化的时期。Klemme and Ulmishek (1991)的统计显示上泥盆统—杜内阶(C₁)、宾夕法尼亚系(C₂₋₃)—下二叠统烃源岩对全球油气资源有重要贡献。Pollastro (2007)和 Jarvie *et al.* (2007)对发育于沃思堡盆地早石炭世的巴内特页岩进行系统评价后认为,与该套页岩相关的天然气藏的可采资源量达26万亿立方英尺。Mii *et al.* (1999)和 Saltzman (2002, 2003)通过 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究认为其在杜内阶(C₁)发生明显正偏对应了全球洋流系统重大转变;同时,大气 P_{CO_2} 下降、有机碳大量埋藏、石炭纪冰期开始。

桂中地区早石炭世继承了华南西南部泥盆纪多岛洋沉积格局,发育优质海相富有机质泥页岩(彭军等,2000),具有不同于其北缘扬子及华北等陆块同一时期的沉积特征。冯庆来(1994)在国内较早开展了这一区域的早石炭世地层学研究,通过系统的露头层序地层学工作,对发育于台地张裂作用下的台槽盆地相和台槽斜坡相岩石特征进行了详细描述,并编绘了对应的海平面变化曲线。刘博等(2009)对河池—宜州断裂带的构造特征和演化规律进行了深入研究,明确了其东西段在现今的不同逆冲特征。但前人对这一层系的烃源岩评价工作还较少,严重制约针对该区域早石炭世非常规油气的勘探。结合桂中坳陷早石炭世沉积古地理研究及构造演化研究,对这一时期富有机质泥页岩进行烃源岩评价,不仅对这一区域的常规油气勘探具有重要意义,对该区正在开展的页岩气勘探也具有一定的参考价值。

1 地质概况及重点取样剖面沉积特征

1.1 桂中坳陷早石炭世沉积古地理特征

桂中坳陷是发育于加里东褶皱基底之上的晚古生代大陆边缘拉张型盆地,其北部与江南隆起相邻,西部与罗甸断坳、南盘江坳陷通过垭紫—都安断裂连接,东南部与桂林坳陷和大瑶山隆起相接。自早泥盆世开始,沿钦州—防城一线自南向北出现了广泛的板内张裂活动,使包括桂中坳陷在内的广西大部分地区下沉为盆地,尤其是早泥盆世晚期到早石炭

世的陆内扩张,形成了台地、台槽相间的被动大陆边缘盆地格局(冯庆来,1994;彭军等,2000)。桂中坳陷于晚石炭世一二叠纪进入弧后盆地阶段,三叠纪进入前陆盆地阶段;晚三叠世强烈的印支运动使上古生界—三叠系构造层褶皱、断裂变形,盆地全面上升为陆地,结束了盆地的海相沉积史,之后进入持续陆内改造阶段(刘东成,2009)。

桂中坳陷在早石炭世继承性发育台盆相间的沉积格局,在台缘斜坡区及台间盆地相区发育富有机质泥页岩、硅质泥岩、硅质岩、泥灰岩及砂岩等;具备良好的成烃条件及近缘保存环境。焦大庆等(2003)、梅冥相等(2004)对黔桂地区石炭系层序地层及古地理进行了深入研究,认为在南丹—河池一带发育台间盆地,而在盆地外围则为台缘斜坡;笔者近年的基础地质工作也显示桂中坳陷石炭系沉积相主要受北西及东西向大断裂控制,即沿南丹—河池方向、宜州—柳州方向发育盆地相泥页岩,向两侧过渡为斜坡相泥岩、粉砂质泥岩(图1)。

1.2 重点研究剖面分层及层序划分

桂中坳陷石炭系研究程度较高,侯鸿飞和 Devuyst (2002)、侯鸿飞和周怀玲(2008)系统研究了广西柳州碰冲剖面,并获准全球维宪阶底界金钉子。广西鹿寨县寨沙剖面是下石炭统鹿寨组命名剖面;本次选取出露完整,现今采样方便的鹿寨县长胜凹剖面作为重点研究对象(图2)。样品岩性记录主要依据

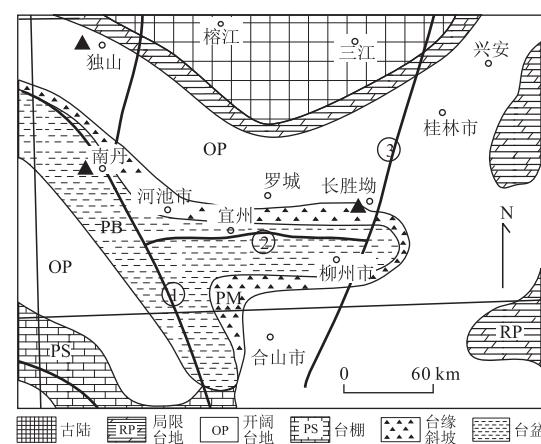


Fig.1 Sedimentary facies diagram of Guizhong depression Early Carboniferous
据焦大庆等(2003)、梅冥相等(2004)修改

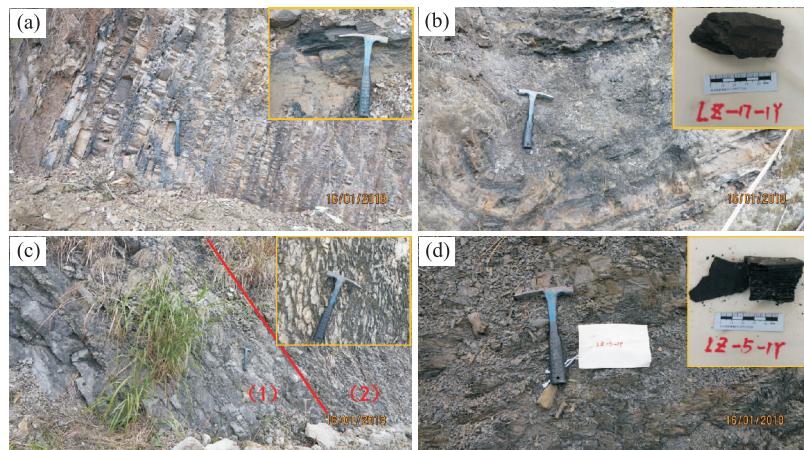


图 2 研究区早石炭世三级层序岩性特征

Fig.2 Lithologic characteristics of Early Carboniferous the 3rd grade sequence in the study area

a.SQ2 含硅质泥岩断口特征;b.SQ3 底部滑塌构造及新鲜泥岩样品特征;c.SQ01/2 层界线及 2 层瘤状灰岩特征;d.SQ1 碳质页岩风化特征及新鲜样品沿页理剥落

露头岩性特征及参考《广西壮族自治区岩石地层》中鹿寨组命名剖面的岩性描述。鹿寨组整合沉积于五指山组瘤状灰岩(扁豆状灰岩)之上,底部 4~6 层发育薄层硅质岩及富有机质泥页岩,总厚度约 10 m,页岩新鲜样品容易沿页理剥落(图 2d);7~12 层发育硅质泥岩及少量薄层硅质岩(图 2a),断口较整齐,泥岩污手,碳质含量较高;12 层之上发育泥岩、粉砂质泥岩及砂岩,15~20 层之间见有滑塌构造(图 2b),夹层泥岩多呈灰黑色块状。

据采样剖面的岩性特征,将鹿寨组划分为 SQ1-SQ3 三个三级层序(图 3),并在鹿寨组中划分 22 个小层;其中,SQ1 和 SQ2 以发育海侵体系域的盆地—深海水陆棚相泥页岩为主;SQ3 底部发育低位体系域的滑塌构造(图 2b),碎屑流沉积特征明显,经历短暂的海侵之后进入较长时间高位体系域,以发育泥质粉砂岩、泥岩、细砂岩为主。鹿寨组中上部泥岩与砂岩互层的岩性组合特征构成有利的岩性油气藏组合层系。

2 样品与测试

样品为剥去浮土和风化层的新鲜岩样(约在每层中部刨挖的点样),尽量避免污染,样品编号与层号对应;另在更靠近盆地相区的南丹地区取 3 个同时代泥页岩样品做对比研究。同一位置所取样品编号一致,根据测试需要将样品送至如下 3 家实验室进行测试:23 个泥页岩样品送中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心完成岩石热

解、有机碳同位素组成、索氏抽提、分离及饱和烃气相色谱分析;5 个泥岩样品送中国地质大学(北京)完成泥岩镜质体反射率分析,样品测点数均大于 10;5 个泥页岩样品送重庆地质矿产研究院做泥岩干酪根显微组份鉴定。热解分析样品经过前处理利用 Rock-Eval6 型热解仪器完成。全岩有机碳同位素组成由 MAT-251 完成,测试精度优于 0.2‰,执行 PDB 标准。岩样粉碎经索氏抽提后过氧化铝/硅胶色谱柱分离,获得饱和烃、芳烃、非烃和沥青质组分。饱和烃 GC-MS 采用安捷伦科技公司(Agilent)制造气相色谱—质谱联用仪,GC 型号为 Agilent 6890;色谱分析条件:DB-5 毛细管柱(50 m × 0.25 mm × 0.25 mm),柱始温 80 ℃,以 3 ℃/min 程序升温至 300 ℃,终温恒定 20 min,进样口温度 300 ℃,载气为氦气。质谱分析条件:电离方式 EI,电离能量 70 eV,离子源温度 230 ℃,GC-MS 接口温度 280 ℃。

3 桂中坳陷石炭系泥/页岩地球化学特征

3.1 泥页岩有机质丰度

桂中坳陷早石炭世泥页岩热演化程度总体较高,氯仿沥青“A”及生烃潜量等参数的指示意义相对于总有机碳含量(TOC)不同程度减弱,但仍具有一定的相关性。结合层序划分,发育于 13 层之下深水陆棚相泥页岩的 TOC 值分布于 2.01%~15.67%,氯仿沥青“A”主体大于 0.1%,生烃潜量($S_1 + S_2$)值分布于 $0.04 \times 10^{-3} \sim 1.25 \times 10^{-3}$,除第

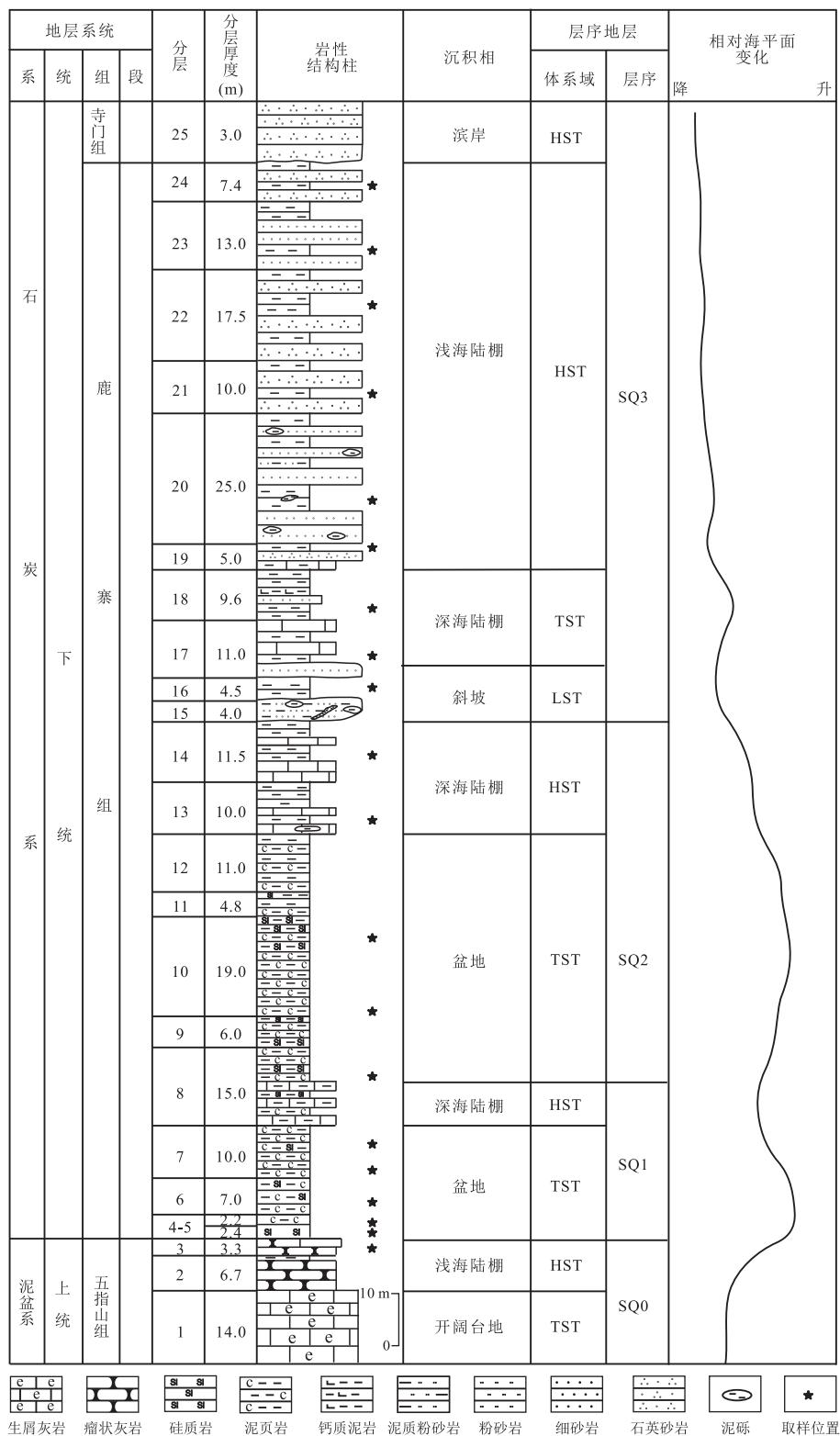


图3 鹿寨县下石炭统鹿寨组取样剖面分层及层序划分

Fig.3 Stratification and sequence division of sampling profile in the Lower Carboniferous Luzhai Formation, in Luzhai County

10层样品外均大于 0.1×10^{-3} ,按黄第藩关于陆相泥质烃源岩划分标准,属于好生油岩(表1).14层之上的泥岩大多与灰岩、砂岩等互层发育,主体属海退

过程中发育于台缘斜坡相泥岩,TOC值分布于0.47%~1.14%,且具有向上减小的趋势,氯仿沥青“A”及生烃潜量值均较13层之下样品有明显减小;

表 1 鹿寨长胜凹剖面泥页岩有机质丰度分布特征

Table 1 Organic matter abundance distribution of shale in Changshengwa profile in Luzhai County

样号编号	TOC(%)	HI(10^{-3})	“A”(%)	HC(10^{-6})	$S_1 + S_2$ (10^{-3})	HC/TOC
C _{11z} -24-1	0.47	6.4	0.024	11.09	0.03	23.6
C _{11z} -23-1	0.31	3.2	0.007	31.16	0.03	100.5
C _{11z} -22-1	0.57	7.0	0.006	26.38	0.06	46.3
C _{11z} -21-1	0.51	3.9	0.007	15.25	0.03	29.9
C _{11z} -20-1	0.94	6.4	0.003	17.71	0.08	18.8
C _{11z} -19-1	0.43	4.7	0.002	3.72	0.03	8.7
C _{11z} -18-2	0.25	4.0	0.002	6.32	0.01	25.3
C _{11z} -17-1	1.14	6.1	0.005	6.26	0.13	5.5
C _{11z} -16-1	0.79	7.6	0.003	6.77	0.09	8.6
C _{11z} -14-1	1.06	1.9	0.110	5.85	0.03	5.5
C _{11z} -13-1	2.52	3.2	0.004	10.21	0.16	4.1
C _{11z} -10-2	2.01	2.0	0.176	5.82	0.04	2.9
C _{11z} -10-1	3.80	1.3	0.002	14.97	0.06	3.9
C _{11z} -8-2	4.53	2.0	0.164	5.54	0.11	1.2
C _{11z} -7-3	4.50	3.1	0.015	22.02	0.31	4.9
C _{11z} -7-1	3.05	3.0	0.132	9.38	0.15	3.1
C _{11z} -6-3	4.57	2.0	0.153	8.82	0.13	1.9
C _{11z} -5-1	4.10	1.5	0.140	6.90	0.12	1.7
C _{11z} -4-1	15.67	6.8	0.016	21.06	1.25	1.3
C _{11z} -3-1	/	/	0.001	5.69	/	/

注: HI(氢指数)=热解烃/有机碳含量; HC(总烃)=饱和烃含量+芳烃含量。

14 层之上泥页岩主体为具有一定生烃潜力的较差生油岩。其中,底部 4、5、6 层深水陆棚相沉积时期的碳酸页岩、泥岩及含硅质泥岩具有普遍高的 TOC 值和氯仿沥青“A”值,对应的生烃潜量也较高,但因有机质热演化程度较高,生烃潜量及总烃参数的指示意义已经不大。

3.2 泥页岩有机质类型

不同类型干酪根的生烃效率和生排烃门限存在较大的差异,用残余有机碳来评价高成熟烃源岩时考虑有机质类型非常必要。庞雄奇等(2014)通过实验统计了不同类型高过成熟烃源岩的 TOC 恢复系数,认为当泥岩镜质体反射率超过 1.2% 时候,Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型泥岩类烃源岩的 TOC 恢复系数分别可达 3.0、2.0、1.4。本文通过对所取样品的索氏抽提、分离,选取饱和烃组分进行 GC-MS 分析,研究表明泥页岩样品具有较为丰富的低碳数正构烷烃,以 nC_{21} 以前低碳数正构烷烃相对丰度高为特征,呈单峰型分布,显示样品中的有机质来源具有较多藻类母质(图 4),同时,样品的成熟度较高导致高碳数烷烃裂解也是需要考虑的因素之一。

桂中坳陷早石炭世泥页岩样品的链烷烃具有明显的前峰特征, C_{21} 之前烷烃占有明显优势,因演化程度较高,这一特征更加明显(表 2)。样品的 Pr/Ph 值分布于 0.67~1.40 之间,总体反应弱还原的海

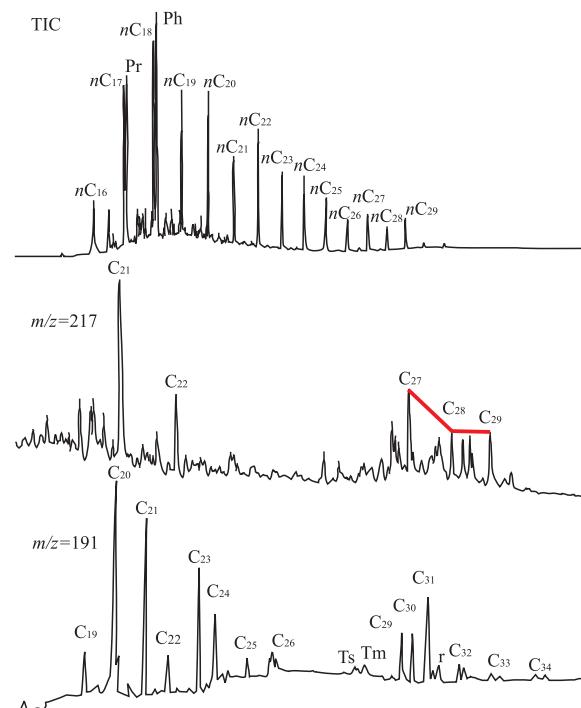


图 4 样品 C_{11z} -5-1 饱和烃 TIC、 $m/z=217$ 及 $m/z=191$ 质量色谱图

Fig.4 TIC, $m/z=217$ and $m/z=191$ mass chromatograms of saturated hydrocarbon from sample C_{11z} -5-1

相环境;4、5 层硅质岩及碳酸页岩样品的 Pr/Ph 值均为 0.67,对还原环境具有较好的指示意义,中上部

表2 早石炭世泥页岩链烷烃系列及部分甾烷特征
Table 2 The parameters of chain alkane and steranes in the Early Carboniferous shale

样号编号	C ₂₁₋ /C ₂₂₊	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	C ₂₇ R/C ₂₉ R	C ₂₈ R/C ₂₉ R
C _{11z} -24-1	11.22	0.71	0.47	0.85	1.33	0.92
C _{11z} -23-1	26.61	0.97	1.19	1.91	1.51	0.66
C _{11z} -22-1	29.99	0.78	0.69	1.33	1.11	0.70
C _{11z} -21-1	21.45	0.84	0.51	1.44	1.30	0.65
C _{11z} -20-1	0.96	0.30	1.15	1.40	1.27	0.74
C _{11z} -19-1	1.90	1.28	151.90	3.04	1.71	0.58
C _{11z} -18-2	3.77	1.01	1.37	1.03	1.52	0.62
C _{11z} -17-1	1.71	0.94	250.85	239.32	1.13	0.51
C _{11z} -16-1	3.86	1.03	143.81	2.04	1.31	0.60
C _{11z} -14-1	3.57	1.40	1.07	1.09	1.14	0.23
C _{11z} -13-1	5.01	0.87	0.86	1.13	1.38	0.62
C _{11z} -10-2	1.69	0.83	0.87	1.59	1.67	0.86
C _{11z} -10-1	2.43	0.75	1.00	1.24	1.38	0.82
C _{11z} -8-2	1.34	0.92	1.19	1.07	1.19	0.84
C _{11z} -7-3	/	1.14	2.49	2.39	/	/
C _{11z} -7-1	1.78	1.60	3.68	1.63	0.88	0.19
C _{11z} -6-3	6.72	0.83	0.96	2.18	1.25	0.81
C _{11z} -5-1	1.17	0.67	1.33	1.81	1.36	0.80
C _{11z} -4-1	2.93	0.67	0.54	1.21	1.80	0.72
C _{11z} -3-1	1.29	0.91	2.14	1.19	1.92	0.65
C _{11z} -ND-3	1.80	1.20	2.45	1.16	1.46	0.69
C _{11z} -ND-2	2.48	1.11	0.80	0.90	1.88	0.94
C _{11z} -ND-1	3.54	1.22	0.96	1.06	/	/

样品的 Pr/Ph 值接近 1, 反映了水体较浅的沉积环境。桂中坳陷早石炭世碳质泥页岩样品具有微弱的 C₂₇甾烷优势, 样品的 C₂₇R/C₂₉R 比值略大于 1, 表明其母质来源主要为低等的水生生物和藻类; 14 层强制海退期之后的泥岩岩样品较 3~13 层深海陆棚—盆地相样品的甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20R$ 构型 C₂₉ 略有增加, 显示了高等植物混入的增加, 但其总体判识程度较低。

图 5 则显示所采样品有机质类型主体处于 I~II 型附近, 与该区的沉积相研究吻合(焦大庆等, 2003; 梅冥相等 2004), 南丹地区所采的 3 个早石炭世盆地相样品为 I 型~II 型; 强制海退期后的一个样品落在海陆过渡相区的远端, 可能为露头样品受降解有关; 两个样品落在陆相区, 指示了较为丰富的陆源物质输入, 与 15 层之后的碎屑流搬运沉积及上覆寺门组滨岸相石英砂岩沉积较为吻合。

泥岩干酪根显微组成是划分其有机质类型广为接受的方法(表 3)。鹿寨组底部至顶部 5 个样品的分析结果显示, 第 5 层盆地相泥页岩的有机质类型为 I 型, 7 层和 10 层泥岩样品的有机质类型为 II₁, 第 17 层和 24 层泥岩样品的有机质类型为 III 型。上部泥岩有机质类型显示了较多的陆源输入, 与 17 层之上广泛发育的碎屑流沉积构造较为吻合, 指示了其非

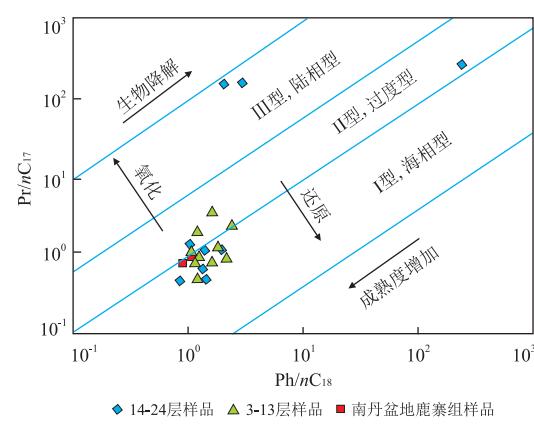


图 5 鹿寨组不同层段泥页岩 Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 关系
Fig.5 Relationship between Pr/nC₁₇ and Ph/nC₁₈ of carbonaceous shale in different strata in Luzhai Formation
据 Yandoka et al. (2015)

原地的搬运沉积特征, 与上覆地层滨岸相石英砂岩的发育也较为吻合。

稳定碳同位素技术具有分析精度较高且同位素组成在烃源岩演化过程中所受影响较小的特点, 也被用在有机质类型划分等相关研究中。胡见义和黄第藩(1991)根据我国陆相生油岩干酪根碳同位素的大量资料, 提出用 $\delta^{13}\text{C} = -26\text{\%}$ 和 $\delta^{13}\text{C} = -27.5\text{\%}$ 来区分 III、II、I 型干酪根类型。梁狄刚等(2008)将

表 3 早石炭世泥页岩显微组成鉴定结果

Table 3 Microscopic identification of the shales in the Early Carboniferous

样号编号	腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组	TI	有机质类型
C _{11z} -5-1	90	0	8	2	82.00	I
C _{11z} -7-1	80	0	15	2	69.75	II ₁
C _{11z} -10-2	70	0	24	6	46.00	II ₁
C _{11z} -17-1	0	1	88	11	-76.50	III
C _{11z} -24-1	3	0	85	12	-72.75	III

表 4 桂中坳陷上古生界泥页岩样品镜质体反射率

Table 4 Vitrinite reflectance of shale in the Upper Paleozoic in Guizhong Depression

采样地点	岩性	样品数(块)	层位	R _v (%)
长胜凹剖面	泥岩、页岩	5	C ₁	1.7~2.8
*上林	泥岩	9	C ₁	1.9~2.5
*鹿寨	泥岩、页岩	12	C ₁	1.6~1.9
*桂林	泥岩、页岩	4	C ₁	2.0~3.0
*象州	页岩	10	D ₂	1.0~3.0
*南丹、河池	泥岩	3	C ₁	2.0~3.0

注:标“*”号样品据黄羚等(2012)。

海相 II 型与 I 型干酪根的界限值调整为 $\delta^{13}\text{C} = -29\text{\%}$ 。对本文剖面样品酸处理后分析全岩有机碳同位素组成,发现 3~13 层深海陆棚—盆地相样品有机碳同位素组成明显较 14~24 层斜坡—浅海陆棚相样品偏轻,3~13 层样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布于 -25.97\% ~ -28.93\% ,结合胡见义和黄第藩(1991)与梁狄刚等(2008)的划分方案,该部分样品的有机质类型主体属于海相 II 型;14~24 层样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布于 -23.98\% ~ -26.31\% ,如果考虑样品在高成熟过程中约有 1\% 的同位素分馏效应,该段样品母质类型属于 II~III 型,与泥岩干酪根显微组成测试结果一致;同时,由于快速海退过程中氧化—还原界面下降导致有机质分解,14~24 层样品的有机碳含量明显降低, $\delta^{13}\text{C}$ 负偏与 TOC 含量存在一定的正相关性(图 6)。

3.3 泥页岩有机质成熟度

本文研究剖面样品的热演化程度整体较高,达高熟—过成熟阶段,岩石热解 T_{\max} 值均大于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$,饱和烃中用于指示热演化程度的甾、萜类生物标志化合物参数已经失去指示意义。对 5、7、13、19、24 层 5 个样品进行泥岩镜质体反射率测定(表 4), R_v 值为 1.72\% ~ 2.78\% ,其中第 5 层样品 R_v 值为 2.29\% ,第 7 层样品 R_v 值为 2.13\% ,第 13 层样品 R_v 值为 2.78\% ,第 19 层样品 R_v 值为 2.38\% ,第 24 层样品 R_v 值为 1.72\% ,除顶部的 24 层样品 R_v 值为 1.72\% 外,其余各层样品 R_v 值均大于 2.0\% 。潘仁芳等(2014)对桂中上林、鹿寨及桂林等地早石炭世泥页

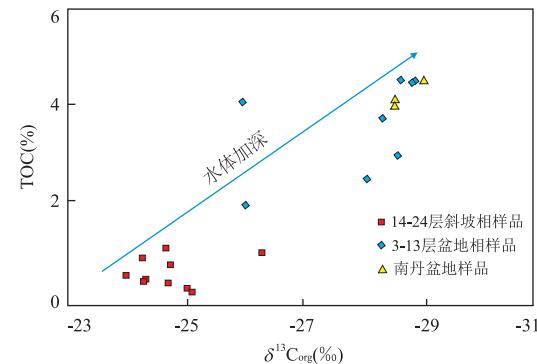


图 6 桂中坳陷早石炭世泥页岩有机碳同位素组成与有机碳含量关系

Fig.6 Relationship between organic carbon isotopic composition and organic carbon content of shale in Early Carboniferous in Guizhong depression

岩样品的成熟度分析统计显示其 R_v 值分布于 1.6\% ~ 3.0\% 之间;象州及南丹一带泥盆系泥页岩样品的 R_v 值分布于 1.0\% ~ 3.0\% 之间。整体来看,桂中坳陷上古生界泥页岩的热演化程度较高,大部分泥页岩已处于干气生成阶段。

3.4 泥页岩矿物组成特征

泥页岩矿物组成特征在非常规油气研究中具有重要意义,解习农等(2017)通过对涪陵页岩气田的系统研究发现富泥硅质页岩和富泥/硅混合质页岩是五峰组—龙马溪组的优质岩相。研究剖面 4~10 层的岩性特征与五峰组—龙马溪组泥页岩发育特征较为接近,具有形成页岩气藏的有利条件。通过对潘仁芳等(2014)和黄羚等(2012)研究数据统计发现,

表5 桂中坳陷泥盆系一下石炭统泥页岩粘土矿物含量及组成特征

Table 5 Clay content and composition of shale in the Devonian-Lower Carboniferous in Guizhong Depression

采样地点	岩性	样品数 (块)	层位	粘土矿物含量 (%)	主要粘土矿物相对含量		
					I	I/S	S
¹ 石门、环江	泥岩、页岩	3	C ₁	/	60~64	13~31	5~27
² 上林	泥岩	9	C ₁	1~3	74~89	10~20	5
² 鹿寨	泥岩、页岩	12	C ₁	40~70	10~30	40~60	10~15
² 桂林	泥岩、页岩	4	C ₁	31~39	23~34	60~74	15
² 南丹、河池	泥岩	3	D ₁	25~40	>75	/	/

注:¹据潘仁芳等(2014);²据黄羚等(2012).

桂中坳陷下石炭统泥页岩粘土矿物含量较下泥盆统泥岩略高(石门、环江样品仅做粘土矿物相对含量),粘土矿物组成中伊利石相对含量较下泥盆统明显偏低(表5);这可能对应了桂中坳陷早石炭世泥页岩样品较泥盆纪样品成熟度略低,蒙脱石还未充分转变为伊利石。鹿寨地区泥页岩中伊利石含量较低,伊蒙混层和蒙脱石的含量均较高,对页岩气的吸附具有积极意义。

4 桂中坳陷早石炭世近源气藏形成模式与讨论

桂中坳陷及其周缘的勘探工作已经断续经过半个多世纪,以泥盆系为主力烃源岩的勘探思路一直未获得较好的突破,但针对桂中坳陷早石炭世钻探的岩2井、柳热1井及近期勘探的东塘1井等均发生过气喷现象;且沉积于同一时期的北美非常规油气藏已经获得重大商业开采(Pollaстро 2007; Jarvie *et al.*, 2007),这些新发现值得我国勘探者重新审视南方石炭系泥页岩的生烃潜力及成藏模式。

4.1 桂中坳陷早石炭世具有有利的岩性气藏形成条件

对鹿寨长胜凹剖面的系统测量和取样工作,以及对周边南丹地区早石炭世泥页岩发育特征的对比研究表明,桂中坳陷早石炭世鹿寨组发育富有机质泥页岩、硅质岩、灰岩及砂岩;且在海退时期泥岩与砂岩常互层发育,并发育有滑塌构造、砂岩透镜体等有利的储集体。桂中坳陷鹿寨—柳州一带鹿寨组的岩性特征与桂西北南丹地区有一定差异,其上部砂岩更为发育,指示了靠近物源的特征,而南丹地区的丹页2井及周边露头显示鹿寨组砂岩向桂西北一带明显减少,灰岩增加(罗胜元等,2016)。横穿桂中坳陷的宜州—河池断裂为挤压性逆冲断层系统,具有一定的油气封堵作用,因而在早期勘探的岩2井、柳热1井中发生较好的气喷现象,近期在柳城地区泥

质粉砂岩石水井施工中发现的可燃气体属鹿寨组中上部岩性圈闭层中的残余气体。另外,鹿寨组泥页岩有机质成熟度分析显示其具备一定的干气生成能力,与泥岩互层发育的砂岩是晚期干气的有利储集场所,因此需要加强这方面研究。

4.2 桂中坳陷早石炭世具有优越的页岩气形成条件

页岩气研究中将泥页岩的总有机质碳含量作为评价其有机孔隙系统发育程度和吸附气含量的重要指标。Ross and Bustin(2009)在研究加拿大西部泥盆系—密西西比系和侏罗系两套页岩时发现高成熟的泥盆系—密西西比系页岩比表面积与 TOC 含量有较好的正相关性;Loucks *et al.*(2009, 2012)则基于精密的氩离子抛光制样和系统扫描电镜观察展示了有机孔在页岩储集系统中的重要性。张金川等(2004)和聂海宽等(2009)则在跟踪国外研究成果和总结国内地质特征的基础上指出形成工业价值页岩气藏的 TOC 下限值为 1%。长胜凹剖面 4~13 层中所取泥页岩样品 TOC 值均大于 2%,总厚度达 124 m;13 层之上部分泥岩样品 TOC 值大于 1%,具备优越的页岩气形成条件。

在页岩有机质成熟度对其孔隙发育的定量研究方面,Mastalerz *et al.*(2013)对新奥尔巴尼地区页岩研究显示在有机质进入高一过成熟阶段,随着原油的二次裂解,有机孔发育增强,但其未对过成熟阶段孔隙发育上限进行研究。近期国内下古生界页岩气勘探显示 R 值在 2.5% 左右是页岩有机孔最为发育的阶段,R 值大于 3.5% 以后失去勘探意义。Dong *et al.*(2017)对加拿大泥盆系 Horn River 页岩的研究成果也显示页岩孔隙在高一过成熟阶段存在这种先增大后减小的趋势,与国内的勘探认识基本一致。长胜凹鹿寨组页岩 R 值处于 1.72%~2.78% 之间,属于最有利的有机孔发育阶段,对形成页岩气藏非常有利。

另外,泥页岩的矿物组成不仅决定其韧、脆性,

是页岩气后期压裂开采重要参数,也是控制其纳米级孔隙特征和吸附性的重要因素。Aringhieri(2004)研究发现粘土矿物的含量与无机纳米孔呈正相关性,进一步分析无机矿物的颗粒形态和大小,证明其也是影响纳米级微孔的重要因素。吉利明等(2012)利用扫描电镜、低温液氮比表面积等温吸附等方法对不同粘土矿物纳米孔隙结构和甲烷吸附能力进行了系统评价;研究结果显示不同类型粘土矿物中,蒙脱石以小孔为主,但其比表面积大,甲烷吸附能力强;伊蒙混层则兼具各种孔,甲烷吸附能力中等;伊利石虽然发育中一大孔,但其甲烷吸附能力最低。通过对前人桂中坳陷下石炭统和下泥盆统泥页岩粘土矿物含量统计分析,鹿寨组泥页岩中粘土矿物组成中伊利石相对含量明显偏低,伊蒙混层和蒙脱石的含量均较高,相比该区域泥盆系泥页岩具有更优越的甲烷吸附条件。

基于前人在桂中坳陷的沉积学研究(冯庆来,1994;焦大庆等,2003;梅冥相等,2004)以及近期的钻探成果(罗胜元等,2016),对比长胜凹剖面的岩性特征,桂中坳陷早石炭世发育有短暂的盆地相硅质岩、页岩沉积,主体以陆棚相泥岩、粉砂质泥岩及砂岩为主,在陆棚不同位置因斜坡存在陡坡和缓坡的差异,发育有规模不等的碎屑流沉积。深水陆棚—盆地相发育的泥页岩与浅水陆棚相发育的泥质粉砂岩、浊积砂岩形成良好的生储配置关系,在桂中坳陷可以形成3种近源气藏:(1)鹿寨组的下段作为盖层,在其底部五指山组生屑灰岩中形成常规气藏(在该剖面五指山组生屑灰岩中常见有沥青充填,本文未做深入讨论);(2)鹿寨组中下部的泥页岩沉积于还原环境,其自身有机质含量高、类型好,可以形成自生自储的页岩气藏,近年的勘探实践已经证明深水陆棚相泥页岩是形成页岩气藏的有利条件(翟刚毅等,2017);(3)海退时期的泥岩夹层有机碳含量较低,可以与其互层发育的灰岩、粉砂岩组合形成岩性油气藏。

综合陈子焯等(2010)对桂中坳陷早石炭世泥页岩的地球化学分析及构造演化史分析,笔者可以推断早石炭世泥页岩在印支期进入生油门限,燕山期进入生气门限,现在已处于干气生成阶段;早期形成的油气藏经过多期改造后,仅在有利的富集部位可以成藏,斜坡相沉积区因同时存在岩性存储和封堵组合,因而成为有利气显部位。前人通过对桂中坳陷水文地质条件的研究,认为桂中地区地下水活跃,在鹿寨组、罗富组等隔水层之上大多处于自由交替带

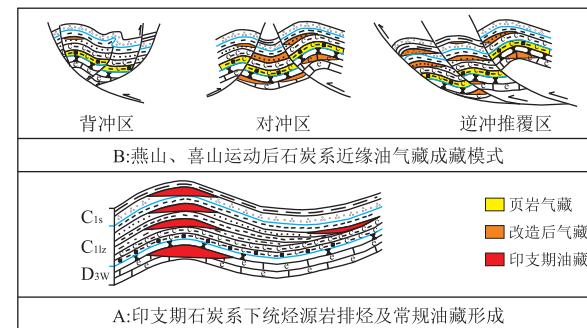


图 7 桂中坳陷早石炭世泥页岩在不同时期不同构造区域的油气藏形成模式

Fig.7 Formation model of oil and gas reservoir of Early Carboniferous carbonaceous shales in Guizhong depression at different periods and tectonic regions

(楼章华等,2011);桂中坳陷的油气勘探应该更加关注深部和泥页岩层系之下的有利部位。李细光等(2007)和吴国干等(2009)分别通过对大地电磁和地震资料的系统解释,认为桂中坳陷的西缘、北缘及东缘的主压应力方向不同,腹部为应力相对较小的过渡带;西北缘主压应力方向为 NW 向,东缘为 EW 向;因此,受挤压断层的改造和封堵作用,桂中坳陷的 3 种近缘气藏在横向上不连续分布,主要在 3 种挤压区可见气体显示:(1)背冲区、(2)对冲区、(3)逆冲推覆区(图 7)。

对 3 种挤压演化模式进一步分析可知:背冲区主要为压力释放调整区间,仅可在局部构造高点残留形成气体显示,在富有机质泥页岩层可以形成页岩气藏;对冲区因两侧封闭性较好,除鹿寨组底部的连续型气藏和页岩气藏外,其中上部的致密砂岩气也可形成一定规模,柳城县近年的浅钻气喷属于该类型;逆冲推覆区的气体则主要富集于岩层尖灭高部位,构造高点及富有机质页岩层中。

5 结论

(1)桂中坳陷早石炭世斜坡相泥页岩有机碳含量主要受海平面变化控制,海侵时期沉积泥页岩的有机碳含量明显高于海退时期泥页岩有机碳含量;同时,海侵期沉积泥页岩有机碳同位素组成明显偏轻于强制海退期泥页岩段有机碳同位素组成;总体表现为斜坡相沉积区下段泥页岩有机质类型较好,有机碳含量高的特征。

(2)桂中坳陷早石炭世泥页岩的有机质成熟度较大,处高熟—过成熟阶段,但较该区泥盆系泥岩有

机质成熟度略低,具备生成干气的潜力,且处于有利的纳米孔隙发育阶段;泥页岩矿物组成特征也反映了较强的成岩作用,与泥页岩有机质热演化特征吻合,显示了石炭系鹿寨组富有机质泥页岩当前处于有利的页岩气成藏期。

(3)综合桂中坳陷泥页岩地球化学特征及其构造演化史,笔者推测发育于挤压环境中的对冲构造区和逆冲推覆构造区有利形成近源气藏;尤其,在斜坡相沉积区可以形成页岩气藏和砂岩岩性气藏。

致谢:三位审稿人及编辑部的宝贵建议及详细审阅让作者对研究区的地质认识及勘探实践有了更为深入的理解,特此感谢。感谢中科院地质与地球物理研究所兰州油气中心李靖博士在样品全岩有机碳同位素组成及饱和烃 GC-MS 分析测试中的帮助;中国地质大学(北京)汤达帧教授、李海硕士在泥岩镜质体反射率分析测试中的帮助!

References

- Aringhieri, R., 2004. Nanoporosity Characteristics of Some Natural Clay Minerals and Soils. *Clays and Clay Minerals*, 52(6): 700—704. <https://doi.org/10.1346/ccmn.2004.0520604>
- Chen, Z.L., Yao, G.S., Guo, Q.X., et al., 2010. Hydrocarbon Accumulation and Thermal Reconstruction of Neopalaeozoic Marine Strata in Guizhong Depression. *Marine Origin Petroleum Geology*, 15(3): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Dong, T., Harris, N.B., Ayrancı, K., et al., 2017. The Impact of Composition on Pore Throat Size and Permeability in High Maturity Shales: Middle and Upper Devonian Horn River Group, Northeastern British Columbia, Canada. *Marine and Petroleum Geology*, 81: 220—236. <https://doi.org/10.13039/501100000038>
- Feng, Q.L., 1994. On Outcrop Sequence Stratigraphy of Intraplatform Trough and Sea Level Change during Early Carboniferous in Northwestern Guangxi. *Earth Science*, 19(5): 609—619 (in Chinese with English abstract).
- Hou, H.F., Devuyst, F.X., 2002. Introduction to the Definition of Tournaisian-Visean Boundary. *Journal of Stratigraphy*, 26(4): 293—296, 319 (in Chinese with English abstract).
- Hou, H.F., Zhou, H.L., 2008. Supplementary Notes on the Global Stratotype Section and Point for the Base of the Visean Stage, Carboniferous. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(3): 318—327 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J.Y., Huang, D.F., 1991. The Bases of Nonmarine Petroleum Geology in China. Petroleum Industry Press, Bei-jing, 189 (in Chinese).
- Huang, L., Xu, Z.Y., Wang, P.W., et al., 2012. An Analysis of Resource Potential of Upper Paleozoic Shale Gas in Guizhong Depression. *Geology in China*, 39(2): 497—506 (in Chinese with English abstract).
- Jarvie, D.M., Hill, R.J., Ruble, T.E., et al., 2007. Unconventional Shale-Gas Systems: The Mississippian Barnett Shale of North-Central Texas as one Model for Thermogenic Shale-Gas Assessment. *AAPG Bulletin*, 91(4): 475—499. <https://doi.org/10.1306/12190606068>
- Ji, L.M., Qiu, J.L., Zhang, T.W., et al., 2012. Experiments on Methane Adsorption of Common Clay Minerals in Shale. *Earth Science*, 37(5): 1043—1050 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.111>
- Jiang, Z.X., Tang, X.L., Li, Z., et al., 2015. The Main Control Factors for Shale Gas Accumulation and Exploration Problems in Shale Gas of South China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89 (Suppl. 1): 250—250. https://doi.org/10.1111/1755-6724.12304_12
- Jiao, D.Q., Ma, Y.S., Deng, J., et al., 2003. The Sequence-Stratigraphic Framework and the Evolution of Palaeogeography for Carboniferous of the Guizhou and Guangxi Areas. *Geoscience*, 17(3): 294—302 (in Chinese with English abstract).
- Klemme, H.D., Ulmishek, G.F., 1991. Petroleum Source Rocks of the World: Stratigraphic Distribution and Controlling Depositional Factors. *AAPG Bulletin*, 75(12): 1809—1851. <https://doi.org/10.1306/BDFF8A88-1718-11D7-8645000102C1865D>
- Li, X.G., Shi, S.P., Huang, Y., et al., 2007. Current Tectonic Stress Field in Guangxi and Vicinity. *Journal of Seismological Research*, 30(3): 235—240 (in Chinese with English abstract).
- Liang, D.G., Guo, T.L., Chen, J.P., et al., 2008. 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. *Marine Origin Petroleum Geology*, 13(2): 1—16 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Li, S.Z., Zhou, Y.G., et al., 2009. Structural Features and Evolution of the Hechi-Yizhou Fault Zone, Northern Guangxi—Insights from Shallow to Deep Structures of Its Liucheng Segment. *Geotectonica et Metallogenesis*, 33(4): 488—496 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D.C., 2009. The Analysis of Tectonic Evolution and Preservation Condition of Oil and Gas in Guizhong Depression (Dissertation). China University of Petroleum (East China) (in Chinese with English abstract).

- Lou, Z. H., Shang, C. J., Yao, G. S., et al., 2011. Hydrocarbon Preservation Conditions in Marine Strata of the Guizhong Depression and Its Margin. *Acta Petrolei Sinica*, 32(3): 432—441 (in Chinese with English abstract).
- Loucks, R. G., Reed, R. M., Ruppel, S. C., et al., 2009. Morphology, Genesis, and Distribution of Nanometer-Scale Pores in Siliceous Mudstones of the Mississippian Barnett Shale. *Journal of Sedimentary Research*, 79(12): 848—861. <https://doi.org/10.2110/jsr.2009.092>
- Loucks, R. G., Reed, R. M., Ruppel, S. C., et al., 2012. Spectrum of Pore Types and Networks in Mudrocks and a Descriptive Classification for Matrix-Related Mudrock Pores. *AAPG Bulletin*, 96(6): 1071—1098. <https://doi.org/10.1306/08171111061>
- Luo, S. Y., Wang, C. S., Peng, Z. Q., 2016. Shale Gas Research of Luzhai Formation, Low Carboniferous in Guizhong Depression. *Geology and Mineral Resources of South China*, 32(2): 180—190 (in Chinese with English abstract).
- Mastalerz, M., Schimmelmann, A., Drobniak, A., et al., 2013. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany Shale across a Maturation Gradient: Insights from Organic Petrology, Gas Adsorption, and Mercury Intrusion. *AAPG Bulletin*, 97(10): 1621—1643. <https://doi.org/10.1306/04011312194>
- Mei, M. X., Meng, Q. F., Yi, D. H., et al., 2004. Carboniferous Sequence Framework in Guizhou and Guangxi, Southern China. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(1): 39—46 (in Chinese with English abstract).
- Mii, H. S., Grossman, E. L., Yancey, T. E., 1999. Carboniferous Isotope Stratigraphies of North America: Implications for Carboniferous Paleoceanography and Mississippian Glaciation. *Geological Society of America Bulletin*, 111(7): 960—973. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111<0960:cisona>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111<0960:cisona>2.3.co;2)
- Nie, H. K., Tang, X., Bian, R. K., 2009. Controlling Factors for Shale Gas Accumulation and Prediction of Potential Development Area in Shale Gas Reservoir of South China. *Acta Petrolei Sinica*, 30(4): 484—491 (in Chinese with English abstract).
- Pan, R. F., Tang, X. L., Meng, J. H., et al., 2014. Shale Gas Preservation Conditions for the Upper Paleozoic in Guizhong Depression. *Oil and Gas Geology*, 35(4): 534—541 (in Chinese with English abstract).
- Pang, X. Q., Li, Q. W., Chen, J. F., Recovery Method of Original TOC and Its Application in Source Rocks at High Mature over Mature Stage in Deep Petroleum Basins. *Journal of Palaeogeography*, 16(6): 769—789 (in Chinese with English abstract).
- Peng, J., Chen, H. D., Tian, J. C., et al., 2000. Sequence Stratigraphy Study on the Carboniferous Strata in Sichuan, Yunnan, Guizhou and Guangxi. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(2): 190—197 (in Chinese with English abstract).
- Pollastro, R. M., 2007. Total Petroleum System Assessment of Undiscovered Resources in the Giant Barnett Shale Continuous (Unconventional) Gas Accumulation, Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 91(4): 551—578. <https://doi.org/10.1306/06200606007>
- Ross, D. J. K., Bustin, R. M., 2009. The Importance of Shale Composition and Pore Structure Upon Gas Storage Potential of Shale Gas Reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 26(6): 916—927. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.06.004>
- Saltzman, M. R., 2002. Carbon and Oxygen Isotope Stratigraphy of the Lower Mississippian (Kinderhookian-Lower Osagean), Western United States: Implications for Seawater Chemistry and Glaciation. *Geological Society of America Bulletin*, 114(1): 96—108. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2002\)114<0096:caiso>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114<0096:caiso>2.0.co;2)
- Saltzman, M. R., 2003. Late Paleozoic Ice Age: Oceanic Gateway or P_{CO_2} . *Geology*, 31(2): 151. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0151:lpiaog>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0151:lpiaog>2.0.co;2)
- Yandoka, B. M. S., Abdullah, W. H., Abubakar, M. B., et al., 2015. Geochemical Characterisation of Early Cretaceous Lacustrine Sediments of Bima Formation, Yola Sub-Basin, Northern Benue trough, NE Nigeria: Organic Matter Input, Preservation, Paleoenvironment and Palaeoclimatic Conditions. *Marine and Petroleum Geology*, 61: 82—94. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.12.010>
- Wang, X. D., Qi, Y. P., Lambert, L., et al., 2011. A Potential Global Standard Stratotype-Section and Point of the Moscovian Stage (Carboniferous). *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 85(2): 366—372. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2011.00405.x>
- Wu, G. G., Yao, G. S., Xu, Z. Y., et al., 2009. Structural Patterns and Origin of Tectonic Reformation in Guizhong Depression. *Marine Origin Petroleum Geology*, 14(1): 33—40 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Hao, F., Lu, Y. C., et al., 2017. Differential Enrichment Mechanism and Key Technology of Shale Gas in Complex Areas of South China. *Earth Science*, 42(7): 1045—1056 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, G. Y., Wang, Y. F., Bao, S. J., et al., 2017. Major Factors Controlling the Accumulation and High Productivity of Marine Shale Gas and Prospect Forecast in Southern China. *Earth Science*, 42(7): 1057—1068 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.085>

Zhang, J.C., Jin, Z.J., Yuan, M.S., 2004. Reservoir Mechanism of Shale Gas and Its Distribution. *Natural Gas Industry*, 24(7): 15—18 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈子焯,姚根顺,郭庆新,等,2010.桂中坳陷海相地层油气成藏与热作用改造.海相油气地质,15(3): 1—10.

冯庆来,1994.桂西北早石炭世台槽地区露头层序地层及海平面变化研究.地球科学,19(5): 609—619.

侯鸿飞,Devuyst, F.X., 2002.石炭纪杜内阶—维宪阶界线定义介绍.地层学杂志,26(4): 293—296, 319.

侯鸿飞,周怀玲,2008.石炭纪维宪阶全球界线层型剖面和点位补遗.地球学报,29(3): 318—327.

胡见义,黄第藩,1991.中国陆相石油地质理论基础.北京:石油工业出版社,189.

黄羚,徐政语,王鹏万,等,2012.桂中坳陷上古生界页岩气资源潜力分析.中国地质,39(2): 497—506.

吉利明,邱军利,张同伟,等,2012.泥页岩主要黏土矿物组分甲烷吸附实验.地球科学,37(5): 1043—1050.

焦大庆,马永生,邓军,等,2003.黔桂地区石炭纪层序地层框架及古地理演化.现代地质,17(3): 294—302.

李细光,史水平,黄洋,等,2007.广西及其邻区现今构造应力场研究.地震研究,30(3): 235—240.

梁狄刚,郭彤楼,陈建平,等,2008.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.海相油气地质,13(2): 1—16.

刘博,李三忠,周永刚,等,2009.桂北河池—宜州断裂带构造特征及其演化:柳城段浅部到深部结构的启示.大地构

造与成矿学,33(4): 488—496.

刘东成,2009.桂中坳陷构造演化及油气保存条件分析.中国石油大学(华东).

楼章华,尚长健,姚根顺,等,2011.桂中坳陷及周缘海相地层油气保存条件.石油学报,32(3): 432—441.

罗胜元,王传尚,彭中勤,2016.桂中坳陷下石炭统鹿寨组页岩气研究.华南地质与矿产,32(2): 180—190.

梅冥相,孟庆芬,易定红,等,2004.黔桂地区石炭系层序地层格架及海平面变化.地球学报,25(1): 39—46.

聂海宽,唐玄,边瑞康,2009.页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测.石油学报,30(4): 484—491.

潘仁芳,唐小玲,孟江辉,等,2014.桂中坳陷上古生界页岩气保存条件.石油与天然气地质,35(4): 534—541.

庞雄奇,李倩文,陈践发,等,2014.含油气盆地深部高成熟烃源岩古 TOC 恢复方法及其应用.古地理学报,16(6): 769—789.

彭军,陈洪德,田景春,等,2000.川滇黔桂地区石炭系层序地层研究.沉积学报,18(2): 190—197.

吴国干,姚根顺,徐政语,等,2009.桂中坳陷改造期构造样式及其成因.海相油气地质,14(1): 33—40.

解习农,郝芳,陆永潮,等,2017.南方复杂地区页岩气差异富集机理及其关键技术.地球科学,42(7): 1045—1056.

瞿刚毅,王玉芳,包书景,等,2017.我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测.地球科学,42(7): 1057—1068.

张金川,金之钧,袁明生,2004.页岩气成藏机理和分布.天然气工业,24(7): 15—18.