

文章编号:0253-9985(2012)03-353-11

桂中坳陷泥盆系页岩气成藏条件与有利区带评价

王鹏万¹,陈子料¹,贺训云^{1,2,3},董立⁴,徐政语¹,马立桥¹,董庸¹,黄羚¹

(1. 中国石油 杭州地质研究院,浙江 杭州 310023; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所,北京 100029;

3. 中国科学院 研究生院,北京 100049; 4. 中国石化 石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:桂中坳陷泥盆系经历陆内裂陷演化阶段,沉积了一套台盆-深水陆棚相黑色泥页岩。通过野外典型露头、钻井及地球化学分析等资料,认为桂中坳陷中下泥盆统泥页岩具备形成页岩气的资源基础和优越的成藏条件,其泥页岩厚度大(最大累计厚度可达1 000 m)、有机质丰度高(有机碳含量为0.53%~9.46%)、热演化程度适中(镜质体反射率为1.33%~3.62%)、储层微孔隙-纳米孔及微裂缝发育、粘土矿物成分好、埋深适宜及保存条件相对较好,勘探潜力较大。借鉴北美页岩气勘探开发经验,结合中国南方海相页岩气勘探实际,优选现阶段有利区评价相关指标,认为南丹—忻城—马山一线以西地区为桂中坳陷泥盆系页岩气勘探的有利区带。

关键词:成藏条件;有利区带;泥盆系;页岩气;桂中坳陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Shale gas accumulation conditions and play evaluation of the Devonian in Guizhong Depression

Wang Pengwan¹, Chen Ziliao¹, He Xunyun^{1,2,3}, Dong Li⁴, Xu Zhengyu¹, Ma Liqiao¹, Dong Yong¹ and Huang Ling¹

(1. Hangzhou Institute of Petroleum Geology, PetroChina Exploration and Development Research Institute, Hangzhou,

Zhejiang 310023, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: A set of dark shales of intraplatform depression-deep shelf facies was deposited in Guizhong depression during the Devonian when the Guizhong depression experienced intracontinental rifting. Outcrop observation and integrated analysis of drilling and geochemical data indicate that the Middle-Lower Devonian shale in Guizhong depression feature in large thickness (the maximum cumulative thickness up to 1 000 m), high abundance of organic matter (TOC of 0.53%~9.46%), moderate thermal maturity (R_o of 1.33%~3.62%), well-developed micro-pores, nano-pores and micro-fractures, favorable clay mineral composition, moderate burial depth, and relatively good sealing conditions. All these characteristics reveal its high potential for shale gas exploration. Based on the shale gas exploration experiences of North American, in combination with the practice of marine shale gas exploration in south China, we put forward evaluation criteria for shale gas play. Paly evaluation results with these criteria show that the area to the west of Nandan-Xincheng-Mashan is a potential play for shale gas exploration in the Devonian in Guizhong depression.

Key words: hydrocarbon accumulation condition, play, shale gas, Devonian, Guizhong Depression

页岩气是指从富含有机质的黑色页岩中开采出的天然气,或在页岩纳米级孔隙中连续聚集的非

收稿日期:2011-07-30;修订日期:2012-04-20。

第一作者简介:王鹏万(1981—),男,工程师,石油地质综合研究。

基金项目:全国油气资源战略选区调查与评价项目(XQ-2007-01);中国石油科技部油气勘探新区、新领域综合性研究项目(2009A-0610)。

常规天然气^[1-2]。通过页岩气形成的地质条件^[3-5],成藏机理与富集规律^[6-10],页岩气资源评价方法^[11-12]等方面研究,结合北美页岩气勘探开发实践^[13-15]认为具开发价值的页岩气储层往往分布面积广、埋深适中、厚度大(≥ 15 m)、有机质丰度高(有机碳含量 $TOC \geq 2\%$)、热成熟度适中(镜质体反射率 R_o 介于 $1.1\% \sim 3.0\%$)、含气量较高($3 \sim 10$ m³/t)、产水量较少、粘土含量中等($< 40\%$)、脆性矿物含量较高($\geq 30\%$)、脆性较高(即低泊松比、高杨氏弹性模量)以及围岩条件有利于水力压裂等^[16]。中国页岩气可采资源量达 26×10^{12} m³^[7,16],勘探潜力巨大。目前中国南方页岩气研究主要集中在四川盆地^[17-21],而桂中坳陷页岩气评价工作相当薄弱。桂中坳陷泥盆系为台盆相间的古地理格局^[22],中、下泥盆统台盆相泥质烃源岩发育^[23-25],本文主要讨论桂中坳陷泥盆系页岩气成藏条件,优选有利的页岩气勘探区带。

1 地质背景

桂中坳陷华南加里东褶皱带在晚古生代经断陷、裂离逐渐演化形成扬子被动大陆南部边缘盆地——滇黔桂盆地的次级构造单元^[26]。早泥盆世早期(洛赫考夫期),桂中坳陷为前滨—近滨环境,发育陆源碎屑砂岩夹泥页岩;早泥盆世晚期(布拉格期—早埃姆斯期),强烈伸展与扩张活动后,发育了北西与北北东—北东向两组断裂,海侵范围不断由南向北扩展,台地—盆地沉积格局显露。自雪峰古陆边缘向南依次发育前滨—近滨—陆棚—台地、盆地相,坳陷西部发育台盆相,堆积一套塘丁组黑色泥页岩;早泥盆世晚期—中泥盆世早期(晚埃姆斯期—艾菲尔期),台地扩大而台盆萎缩,南丹罗富地区的纳标组下部沉积一套黑色炭质泥岩;中泥盆世中期—晚泥盆世早期(吉维特阶—弗拉斯期),台内裂陷加剧,海水处于相对较深时期,台盆范围再次扩大,桂中地区形成台盆与台地相间的古地理格局(图1,图2),发育一套半深水—深水台盆相罗富组黑色页岩和硅质泥岩、硅质岩沉积,而同期异相东岗岭组(台地—陆棚相)为深灰色中厚层、中薄层灰岩夹钙质页岩、硅质岩、泥岩(图2);晚泥盆世晚期(法门期),断裂活动处于相

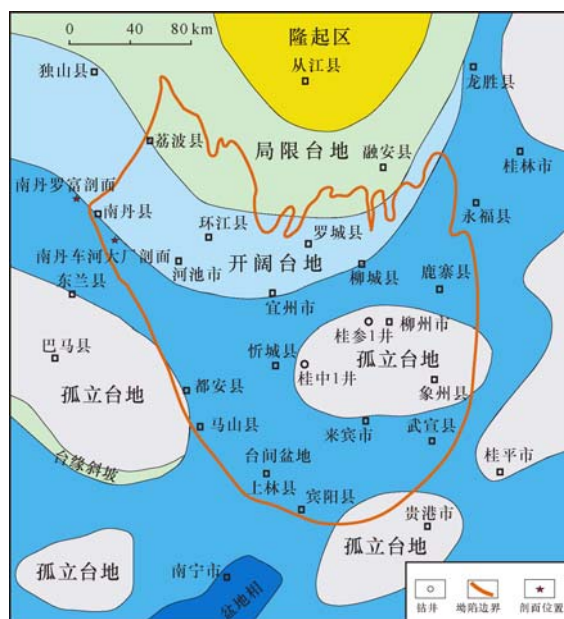


图1 桂中坳陷中泥盆世中期—晚泥盆世早期岩相古地理

Fig. 1 Lithofacies palaeogeography of the Middle-Late Devonian in Guizhong depression

对稳定的平静期,台盆收缩变浅而逐渐被充填,孤立台地增厚加大,坳陷主体处于台地发育期,且多以蒸发环境为主^[27-28]。

桂中坳陷中、下泥盆统台盆相、陆棚相优质烃源岩(下泥盆统塘丁组、中泥盆统罗富组/东岗岭组)分布明显受控于北西向南丹—都安断裂及近东西向的河池—宜州—柳城断裂,优质的黑色泥页岩紧邻深大断裂呈带状分布^[25,27]。

2 页岩气成藏条件

2.1 烃源岩条件

2.1.1 厚度及展布

下泥盆统优质烃源岩主要分布于下泥盆统上部台盆相塘丁组,岩性主要为黑色泥页岩、钙质泥岩,富含竹节石等化石,形成于深水—次深水盆地相(图2,图3),主要分布于南丹、河池—宜州等地区,一般为 $50 \sim 200$ m,南丹一带最大厚度大于 500 m(图3)。

中泥盆统优质烃源岩主要分布于中泥盆统上部台盆相罗富组,岩性主要为黑色泥页岩、钙质泥岩、硅质泥岩、泥灰岩,形成于深水—次深水盆地

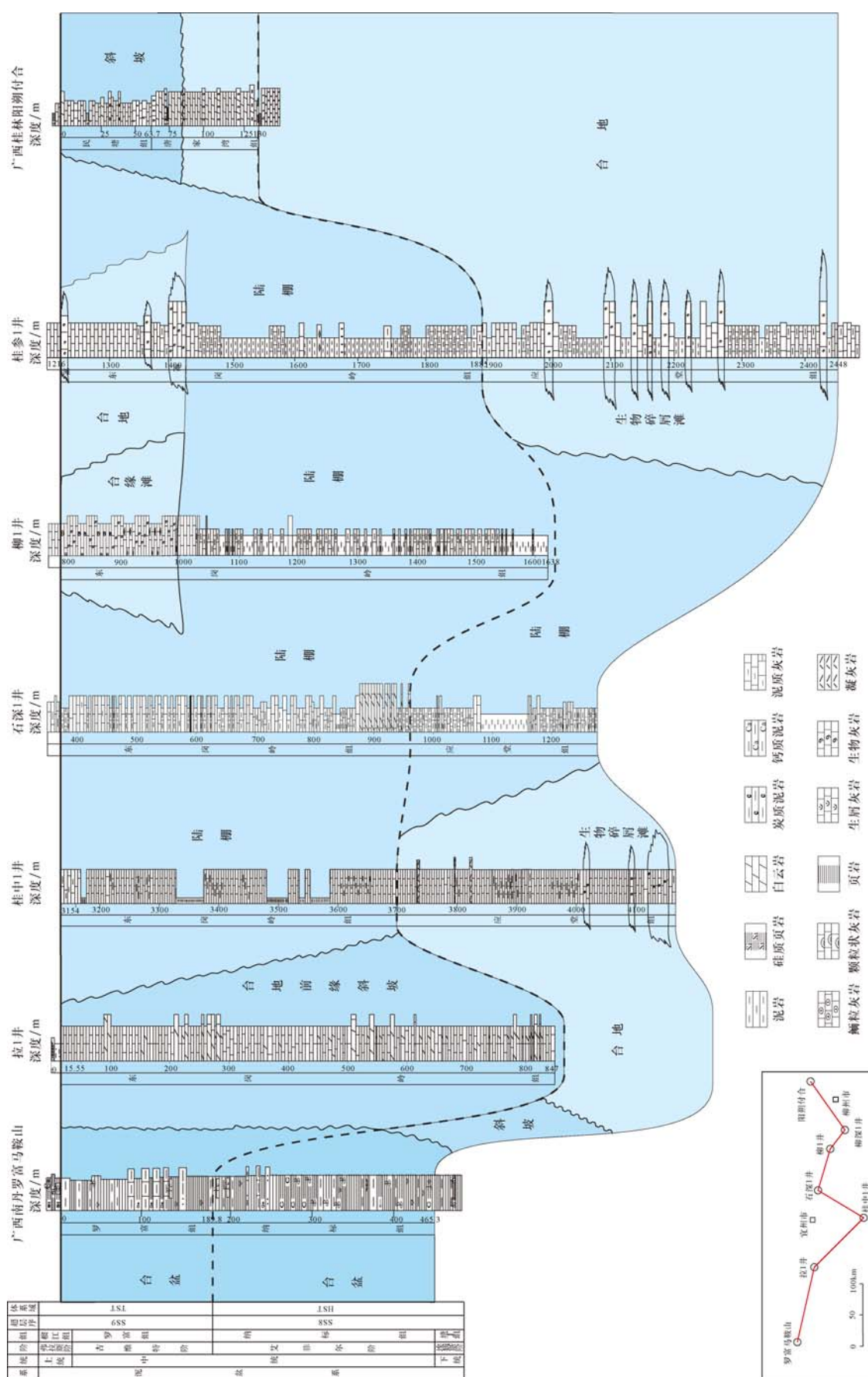


图2 桂中坳陷中泥盆统层序-沉积相对比
Fig 2. Correlation of the sequence stratigraphy-sedimentary facies of the Middle Devonian in Guizhong depression

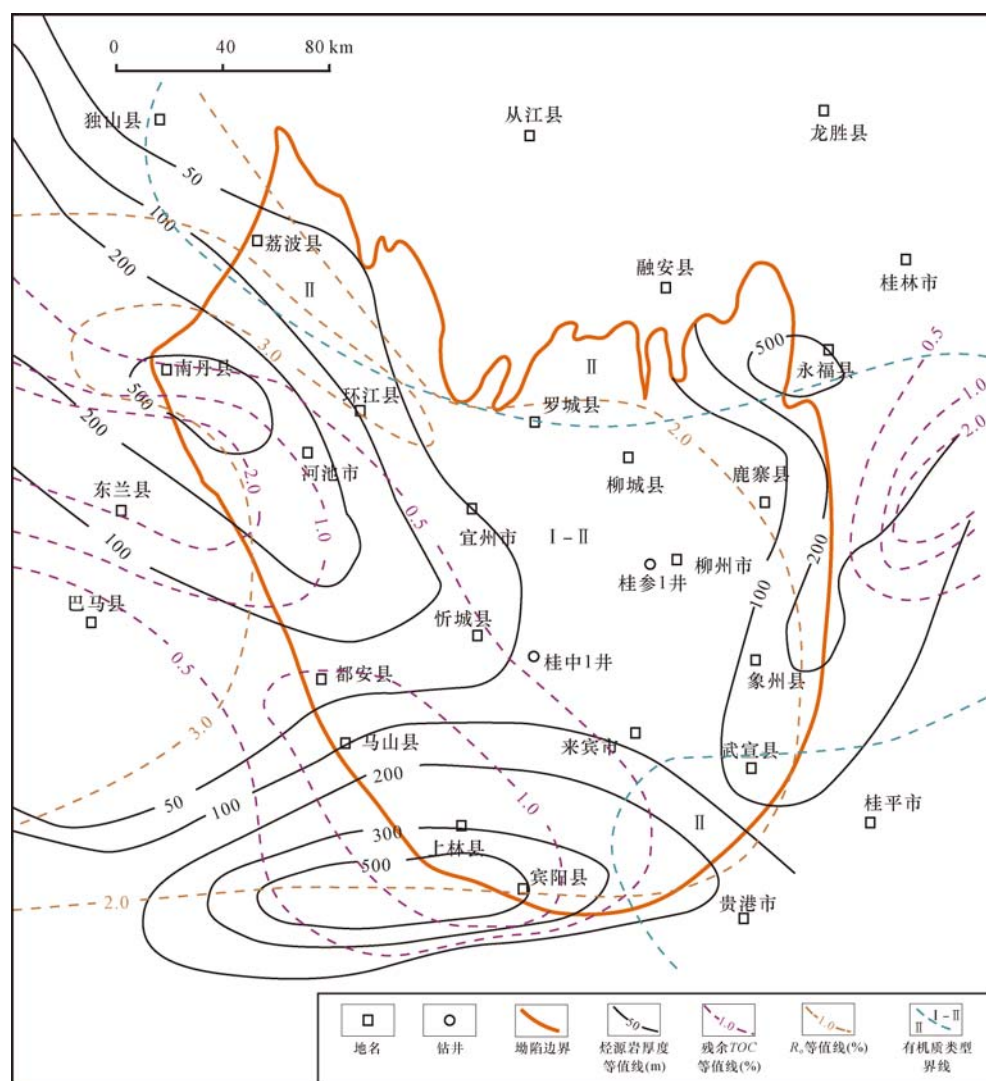


图3 桂中坳陷下泥盆统泥质烃源岩综合评价

Fig. 3 Comprehensive evaluation of source rocks in the Lower Devonian in Guizhong depression

相(图2),分布范围较早泥盆世更广,主要分布于南丹-河池-宜州-柳州-鹿寨-来宾等地,一般厚100~400 m,最厚可达600 m以上(图4)。

2.1.2 有机碳含量

有机质含量不仅控制页岩生烃量,同时也影响吸附气含量,有机碳含量和气体含量(包括总气体含量和吸附气含量)具有正相关性^[9]。美国页岩气盆地产气页岩的总有机碳含量的下限为0.5%^[21]。

南丹罗富剖面(剖面位置见图1)下泥盆统塘丁组样品的 TOC 值为 0.65%~4.70%,平均 1.85%,40%的样品 TOC 值大于 2%;据前人资料,下泥盆统烃源岩 TOC 值为 0.72%~

5.69%^[23],与本次研究结果相近;其原始生烃潜能可达 10 mg/g 以上,表明其主要为中等-很好的烃源岩。

南丹大厂剖面(剖面位置见图1)中泥盆统罗富组样品的 TOC 值为 0.53%~4.74%,平均 3.14%,其 TOC 值最大可达 9.46%^[23],其中 85.7%的样品原始生烃潜能大于 6 mg/g,最大可达 20 mg/g 以上,因此罗富组烃源岩品质较好。

2.1.3 干酪根类型

I型与II型干酪根为页岩气生成的主要有机质类型^[29],也具有较强的吸附力^[1]。南丹罗富剖面下泥盆统塘丁组烃源岩干酪根碳同位素值为

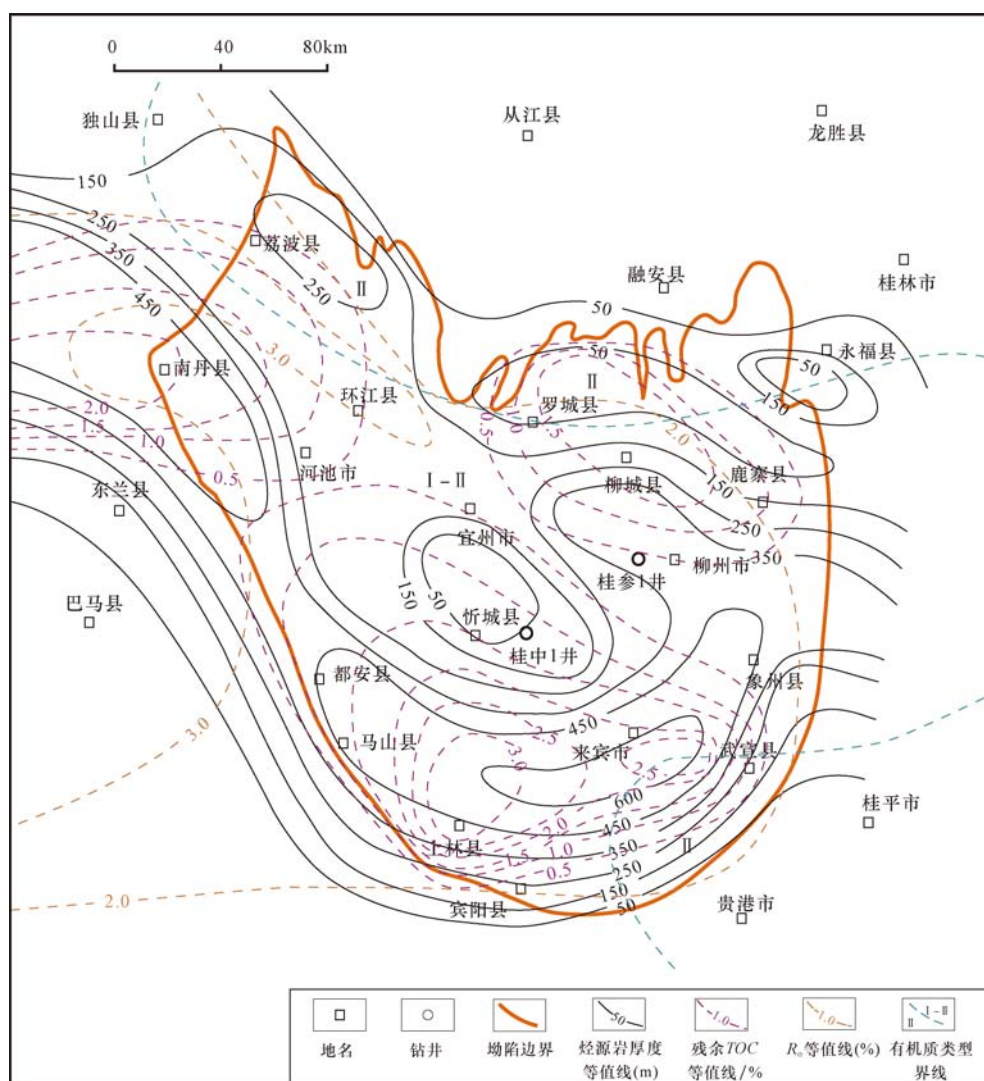


图4 桂中坳陷中泥盆统泥质烃源岩综合评价

Fig. 4 Comprehensive evaluation of source rocks in the Middle Devonian in Guizhong depression

-27.80‰ ~ -26.84‰, 有机质类型总体为Ⅱ型; 干酪根显微组分主要为腐泥组, 相对含量为38.7% ~ 89.7%, 其次为镜质组, 总体为Ⅱ型有机质(图3)。

南丹大厂剖面中泥盆统罗富组烃源岩干酪根显微组分主要为腐泥组, 相对含量为40.3% ~ 87.7%, 其次为镜质组, 有机质类型主要为Ⅱ型; 烃源岩干酪根碳同位素值为-27.44‰ ~ -24.84‰, 总体为Ⅱ型有机质(图4), 与干酪根镜鉴结果一致, 故中、下泥盆统泥页岩干酪根均为生成页岩有利气的有机质类型。

2.1.4 热演化程度

有机质热演化程度决定页岩气成因类型、组

分构成及气体流动速度等^[5-9], 北美勘探实践证实页岩气成藏要求热成熟度适中(R_o 介于1.1% ~ 3.0%)^[13-15]。实测南丹罗富剖面下泥盆统塘丁组烃源岩 R_o 值为1.33% ~ 1.76% (图3), 总体处于高成熟阶段; 实测南丹大厂剖面罗富组烃源岩 R_o 值为1.53% ~ 2.03%, 桂中1井井下中下泥盆统储层沥青反射率换算为镜质体反射率为2.24% ~ 3.62%^[25], 结合前人研究成果^[23-25, 30], 中、下泥盆统泥页岩总体处于高过成熟阶段(图3, 图4), 有利于产生页岩气。

2.1.5 生烃强度

页岩气生成之后在源岩层内就近聚集、原地成藏, 从某种意义上来说, 页岩气藏的形成是天然气

在源岩中大规模滞留的结果^[6-7],残留下来的烃类便形成了页岩气自生自储含油气系统^[8],因此生烃中心或紧邻生烃中心为页岩气富集区域。

桂中坳陷中泥盆统烃源岩具南丹、马山-来宾两个主要生烃中心,最大生烃强度达 $100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 以上(图5),预测页岩气资源量巨大。综上桂中坳陷中、下泥盆统泥页岩可提供丰富的成烃物质,其中以中泥盆统烃源岩品质最好,其也为页岩气的发育提供雄厚的资源基础。

2.2 储集条件

页岩气主要由吸附气和游离气两部分组成,影响游离气量大小的主要因素是页岩基质孔隙大

小和天然裂缝的发育程度^[8],而脆性矿物含量是影响页岩基质孔隙和微裂缝发育程度、含气性及压裂改造方式等的重要因素^[1,3-9]。

2.2.1 孔渗特征

页岩储集层为特低孔渗储集层,以发育多类型微米甚至纳米级孔隙为特征,包括颗粒间微孔、粘土片间微孔、颗粒溶孔、溶蚀杂基内孔、粒内溶蚀孔及有机质孔等^[1,31-32],桂中坳陷泥盆系泥页岩多发育微米甚至纳米级孔隙(图6)。美国主要产气页岩储层岩心分析总孔隙度分布在 $2.0\% \sim 14.0\%$,渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均喉道半径不到 $0.005 \mu\text{m}$ ^[31]。南丹罗富剖面 and 南丹

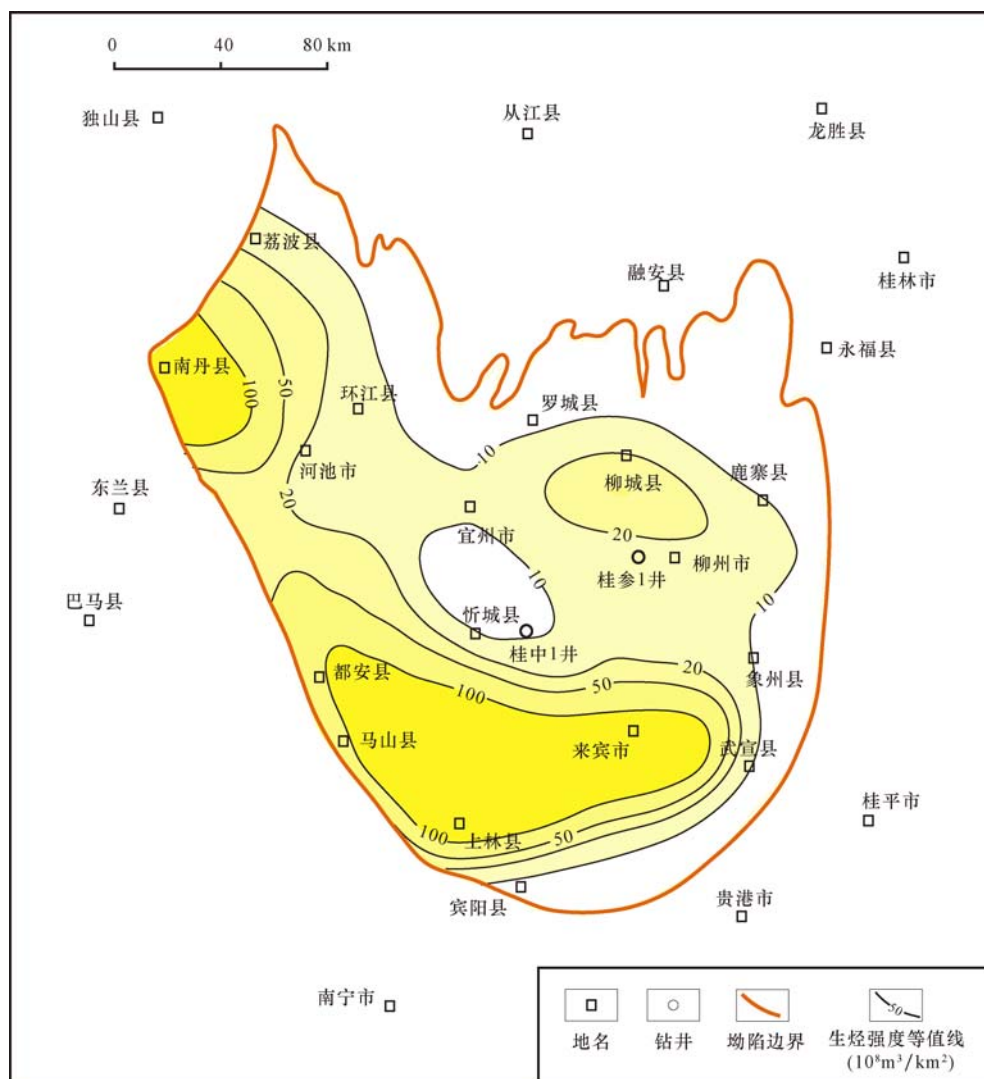


图5 桂中坳陷中泥盆统烃源岩生烃强度

Fig. 5 Hydrocarbon-generation intensity of the Middle Devonian in Guizhong depression

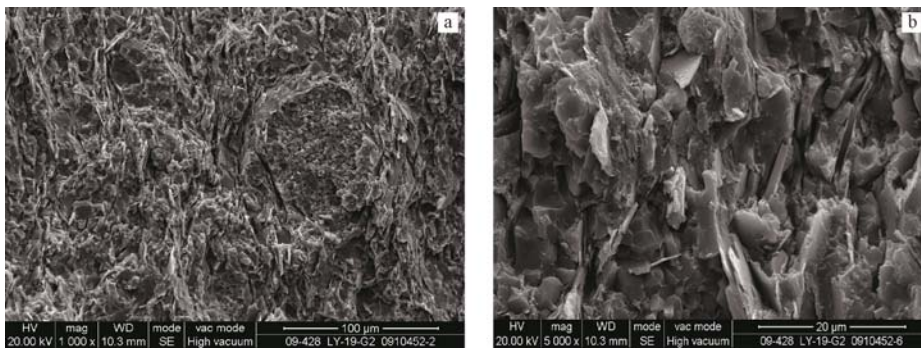


图6 桂中坳陷中泥盆统东岗岭组泥岩样品微观结构特征

Fig.6 Microstructure characteristics of the mudstone samples from the Middle Devonian Donggangling Formation in Guizhong depression

a. 以片状粘土矿物伊/蒙混层和方解石为主,见微孔隙顺层定向排列;b. 粘土片间残余微孔隙,并见球状黄铁矿分布

拉雅剖面所取8个泥页岩样品,其孔隙度为0.9%~4.62%,平均孔隙度为2.49%,平均渗透率 $16.4 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$,表现特低孔、低渗特征,因此微米-纳米级孔喉则成为页岩气赋存的主要空间之一。

2.2.2 裂缝发育程度

裂缝为游离气提供聚集空间,也为页岩气的生产提供运移通道^[5-9]。桂中坳陷中、下泥盆统泥页岩样品 R_0 处于高过成熟阶段,伊利石结晶度 $0.26^\circ \sim 0.35^\circ \Delta 2\theta$,均表明其已达晚成岩阶段,脆性较大,受构造挤压易产生节理或微裂缝。坳陷泥盆系经历印支、燕山及喜马拉雅运动持续叠加改造,多发育以泥页岩为滑脱层的拆离、断弯与断展褶皱变形^[27],在坳陷边缘、台盆回返区的野外露头常见泥页岩揉皱及节理,产生的微裂缝为游离气提供良好的储集空间。

同时页岩在生烃过程中,随着烃类生成量的增加而内压增大,当达到突破压力后,会形成大量的微裂隙,为烃类排出提供通道,同时也形成新的储集空间^[32]。

2.2.3 矿物特征

脆性矿物(如石英、长石、碳酸盐矿物等)富集的泥页岩比主要由粘土矿物等构成的岩石更易产生裂缝^[3-5],故有利于压裂的页岩脆性矿物含量较高($\geq 30\%$)、粘土含量中等($< 40\%$)^[13-15]。中泥盆统罗富组岩性主要为一套台盆相深色页岩和硅质泥岩、硅质岩沉积,硅质含量较高。据统计不论是海相页岩、海陆过渡相炭质页岩,还是陆相页岩,其脆性矿物含量总体比较高,均达到40%以

上^[1],适合后期开发压裂改造。

影响吸附气多寡因素除了有机碳含量高低、干酪根类型,还包括粘土矿物组成^[8,29]。前人研究表明 Barnett 页岩层中粘土矿物主要为微含蒙皂石的伊利石为主^[31],而桂中坳陷泥盆系页岩储层粘土矿物分析结果表明其成主要是伊利石,其次为绿泥石,不含蒙皂石,有少量伊/蒙混层(图7),为吸附气富集提供了必要的条件。粘土矿物组分也降低了在钻井及压裂过程中水敏、酸敏等风险。

2.3 埋深条件

美国发现的页岩气藏通常分布在762~3 658 m深度范围^[9],北美页岩气50 000余口开发井井深大部分在2 500~4 500 m^[1],而且在1 150 m以深,页岩气存在状态具有以游离气为主的趋势^[32]。埋深不是页岩气藏发育的决定因素,关键问题是在该埋深下页岩气藏是否具有商业开发价值^[9]。桂中坳陷南丹-都安-上林以西地区中泥盆统罗富组顶界埋深在1 000~3 000 m;环江-柳城一线

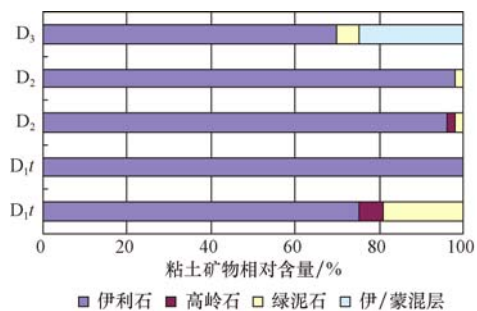


图7 南丹罗富剖面泥盆系泥页岩粘土矿物相对含量变化

Fig.7 Clay mineral contents of the Devonian shale in Luofu outcrop in Nandan County

动造成桂中坳陷及周缘全面抬升剥蚀,持续时间长,波及范围广,上泥盆统及其以上地层遭受了不同程度的剥蚀,剥蚀厚度在 2 500 m 以上(图 9)。桂中坳陷东北部、东部中泥盆统普遍出露地表,坳陷中部部分背斜轴部也有出露,中泥盆统泥岩盖层的整体封盖性和油气保存条件遭受了较为严重的破坏。而桂中坳陷西部剥蚀厚度相对较小,为 2 500 ~ 3 500 m(图 9),地表主要出露石炭系,泥盆系基本完整,可能存在相对较好的封闭保存环境。

3 页岩气有利区带

页岩气成藏控制因素可以分为内部因素(主要包括有机质类型及含量、成熟度、裂缝、孔隙度和渗透率、矿物组成、厚度、湿度等)和外部影响因素(主要包括深度、温度与压力等)^[5-10],且各种控制因素间具有良好匹配关系^[9,16]。中国页岩气勘

探处在初期阶段,目前选区评价主要包括:有机地球化学参数、储层厚度及埋深、储集空间及物性、岩石矿物成分及力学性质、吸附特征和聚气机理、储层流体温压特征及现今区域应力场等^[9,32]。结合桂中坳陷泥盆系页岩气勘探实际,应用页岩沉积环境(图 1,图 2),泥页岩厚度、有机碳含量、有机质类型、热演化程度、生烃强度(图 3—图 5),孔渗特征(图 6),矿物成分(图 7)及埋深(图 8)等评价指标,预测桂中坳陷泥盆系页岩气勘探的有利区带。

桂中坳陷南丹—忻城—马山一线以西地区,中、下泥盆统泥质烃源岩累计厚约 150 ~ 600 m,南丹地区东南方向累计最厚达 1 000 m; R_o 大部分为 1.3% ~ 3%; TOC 一般 0.53% ~ 4.74%,最高可达 9.46%;有机质主体为Ⅱ型;处于或紧邻生烃中心(最大生烃强度达 $100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 以上),资源潜力大;埋深适中(1 000 ~ 4 000 m),是泥盆系页岩气有利分布区,其中以南丹—河池一线以西地区最为有利。

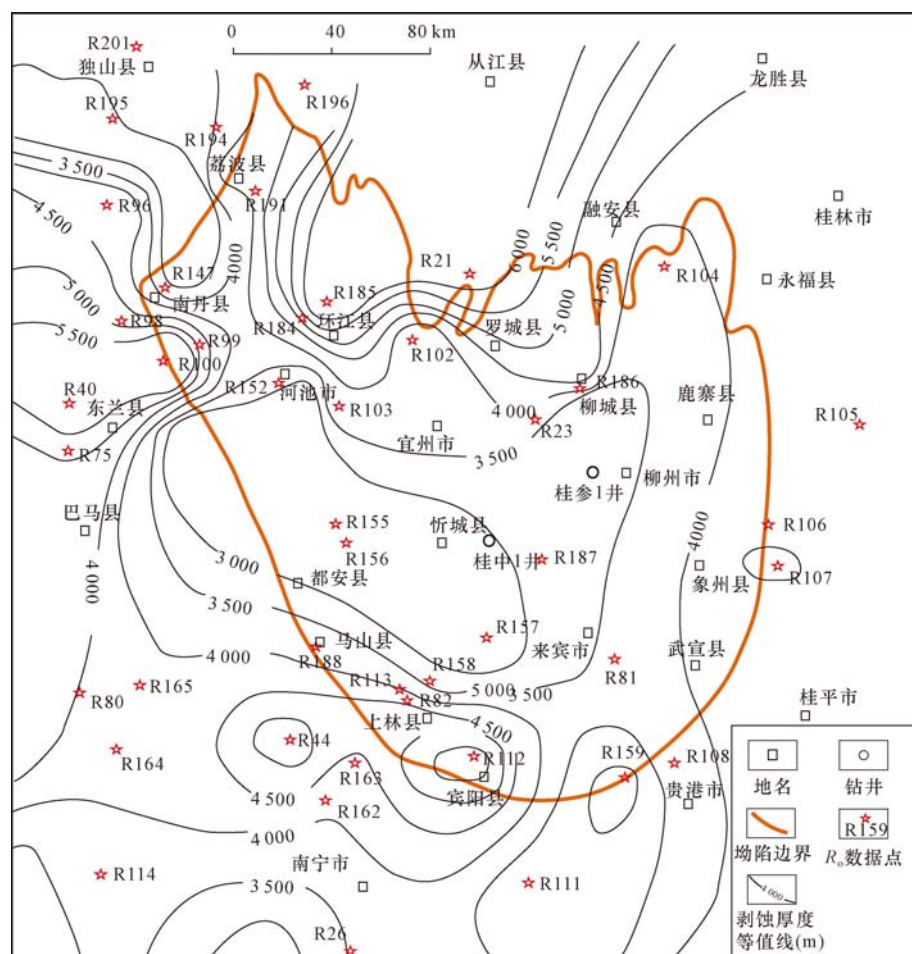


图 9 桂中坳陷燕山—喜马拉雅期剥蚀量等厚图

Fig. 9 Contour map showing denudation during the Yanshan-Himalayan in Guizhong depression

4 结论

1) 桂中坳陷中、晚泥盆世沉积一套台盆相—深水陆棚相的黑色泥页岩、硅质泥页岩,厚度大,分布较广,为优质的海相烃源岩。

2) 桂中坳陷泥盆系泥页岩有机质丰度高,有机质类型好,热演化程度适中,处于或紧邻生烃中心,具备形成页岩气藏的资源基础;页岩储层微孔—纳米孔隙和微裂缝发育,为游离气和吸附气提供了储集空间;脆性矿物含量高,适宜后期压裂改造;埋深适中(1 000~4 000 m),存在良好的保存条件。

3) 桂中坳陷泥盆系页岩气处于勘探初期,结合页岩气成藏主控因素,认为南丹—忻城—马山一线以西地区为页岩气勘探的有利地区。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [2] 张抗,谭云冬. 世界页岩气资源潜力和开采现状及中国页岩气发展前景[J]. 当代石油石化,2009,17(3):9-18.
Zhang Kang, Tan Yundong. The status of world shale gas resources potential and production status as well as development prospect of China's shale gas[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2009, 17(3): 9-18.
- [3] 李新景,吕宗刚,董大忠,等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业,2009,29(5):27-32.
Li Xinjing, Lu Zonggang, Dong Dazhong, et al. Geologic controls on accumulation of shale gas in North America[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 27-32.
- [4] 李登华,李建忠,王社教,等. 页岩气藏形成条件分析[J]. 天然气工业,2009,29(5):22-26.
Li Denghua, Li Jianzhong, Wang Shejiao, et al. Analysis of controls on gas shale reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 22-26.
- [5] 王祥,刘玉华,张敏,等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学,2010,21(2):350-356.
Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, et al. Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 350-356.
- [6] 张金川,金之钧,袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业,2004,24(7):15-18.
Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [7] 张金川,姜生玲,唐玄,等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业,2009,29(12):109-114.
Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, Tang Xuan, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 109-114.
- [8] 陈更生,董大忠,王世谦,等. 页岩气藏形成机理与富集规律初探[J]. 天然气工业,2009,29(5):17-21.
Chen Gengsheng, Dong Dazhong, Wang Shiqian, et al. A preliminary study on accumulation mechanism and enrichment pattern of shale gas[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 17-21.
- [9] 聂海宽,唐玄,边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报,2009,30(4):484-491.
Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484-491.
- [10] 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.
- [11] 董大忠,程克明,王世谦,等. 页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用[J]. 天然气工业,2009,29(5):33-39.
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Shiqian, et al. An evaluation method of shale gas resource and its application in the Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 33-39.
- [12] 朱华,姜文利,边瑞康,等. 页岩气资源评价方法体系及其应用——以川西坳陷为例[J]. 天然气工业,2009,29(12):130-134.
Zhu Hua, Jiang Wenli, Bian Ruikang, et al. Shale gas assessment methodology and its application: A case study of the western Sichuan depression[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 130-134.
- [13] Jarvie D M, Ronald Jhill, Tim E Ruble, et al. Unconventional shale gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG, 2007, 91(4): 475-499.
- [14] Montgomery S L, Jarvie D M, Bower K A, et al. Mississippian Barnett shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG, 2005, 89(2): 155-175.
- [15] Loucks R G. Mississippian Barnett shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG, 2007, 91(4): 579-601.
- [16] 王鹏万,陈子焯,贺训云,等. 黔南坳陷下寒武统页岩气成藏条件与有利区带评价[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 518-524.
Wang Pengwan, Chen Ziliao, He Xunyun, et al. Shale gas accu-

- mulation and prediction of potential development area of Lower Cambrian Niutitang Group in Qiannan Depression[J]. *Nature Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 518–524.
- [17] 李智峰, 李治平, 王杨, 等. 页岩气储层渗透性测试方法对比分析[J]. *断块油气田*, 2011, 18(6): 761–764.
- Li Zhifeng, Li Zhiping, Wang Yang, et al. Comparison and analysis of permeability testing methods on shale gas reservoir[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2011, 18(6): 761–764.
- [18] 何发岐, 朱彤. 陆相页岩气突破和建产的有利目标——以四川盆地休罗统为例[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(3): 246–251.
- He Faqi, Zhu Tong. Favorable targets of breakthrough and built-up of shale gas in Continental facies in Lower Jurassic, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(3): 246–251.
- [19] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(3): 219–225.
- Nie Haikuang, Zhang Jinchuan. Types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(3): 219–225.
- [20] 程克明, 王世谦, 董大忠, 等. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J]. *天然气工业*, 2009, 29(5): 40–44.
- Cheng Keming, Wang Shiqian, Dong Dazhong, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, the Upper Yangtze region[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(5): 40–44.
- [21] 蒲泊伶, 蒋有录, 王毅, 等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析[J]. *石油学报*, 2010, 31(2): 225–230.
- Pu Boling, Jiang Youlu, Wang Yi, et al. Reservoir-forming conditions and favorable exploration zones of shale gas in Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(2): 225–230.
- [22] 陈洪德, 侯明才, 许效松, 等. 加里东期华南的盆地演化与层序格架[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(1): 1–8.
- Chen Hongde, Hou Mingcai, Xu Xiaosong, et al. Tectonic evolution and sequence stratigraphic framework in South China during Caledonian[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006, 33(1): 1–8.
- [23] 韦宝东. 桂中坳陷泥盆系烃源岩特征[J]. *南方油气*, 2004, 17(2): 19–21.
- Wei Baodong. Features of hydrocarbon source rocks of Devonian in Guizhong Depression[J]. *Southern China Oil & Gas*, 2004, 17(2): 19–21.
- [24] 林良彪, 陈洪德, 陈子焯, 等. 桂中坳陷中泥盆统烃源岩特征[J]. *天然气工业*, 2009, 29(3): 45–47.
- Lin Liangbiao, Chen Hongde, Chen Ziliao, et al. Characteristics of Middle Devonian hydrocarbon source rocks in the Guizhong (Middle Guangxi) depression[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(3): 45–47.
- [25] 贺训云, 姚根顺, 贺晓苏, 等. 桂中坳陷泥盆系烃源岩发育环境及潜力评价[J]. *石油学报*, 2011, 32(3): 273–279.
- He Xunyun, Yao Genshun, He Xiaosu, et al. An evaluation of depositional environment and potential of Devonian source rocks in Guizhong Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(3): 273–279.
- [26] 陈洪德, 侯明才, 刘文均, 等. 海西—印支期中国南方的盆地演化与层序格架[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(6): 629–635.
- Chen Hongde, Hou Mingcai, Liu Wenjun, et al. Basin evolution and sequence stratigraphic framework of south of China during Hercynian cycle to Indo-Chinese epoch[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2004, 31(6): 629–635.
- [27] 吴国干, 姚根顺, 徐政语, 等. 桂中坳陷改造期构造样式及其成因[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(1): 33–40.
- Wu Guogan, Yao Genshun, Xu Zhengyu, et al. Structural patterns and origin of tectonic reformation in Guizhong Depression[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(1): 33–40.
- [28] 陈丛林, 史晓颖. 右江盆地晚古生代深水相地层沉积构造演化[J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 436–443.
- Chen Conglin, Shi Xiaoying. Sedimentary and tectonic evolution of Late Paleozoic deep-water strata in the Youjiang basin[J]. *Geology in China*, 2006, 33(2): 436–443.
- [29] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. *AAPG*, 2002, 86(11): 1921–1938.
- [30] 毛治超, 杜远生, 张敏, 等. 广西桂中地区泥盆系沉积环境及沉积有机质特征[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2008, 38(增刊II): 80–86.
- Mao Zhichao, Du Yunsheng, Zhang Min, et al. Organic geochemical characterization and depositional paleoenvironments of the Devonian strata in Guizhong region, Guangxi, China[J]. *Science in China Series (D: Earth Sciences)* 2008, 38(Suppl. II): 80–86.
- [31] 范昌育, 王震亮. 页岩气富集与高产的地质因素和过程[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(5): 465–469.
- Fan Changyu, Wang Zhenliang. Geological factors and process in enrichment and high production of shale gas[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(5): 465–469.
- [32] 李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J]. *地质通报*, 2011, 30(2/3): 308–317.
- Li Yuxi, Qiao Dewu, Jiang Wenli, et al. Gas content of gas-bearing shale and its geological evaluation summary[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2/3): 308–317.
- [33] 陈子焯, 姚根顺, 郭庆新, 等. 桂中坳陷海相地层油气成藏与热作用改造[J]. *海相油气地质*, 2010, 15(3): 1–10.
- Chen Ziliao, Yao Genshun, Guo Qingxin, et al. Hydrocarbon accumulation and thermal reconstruction of Neopaleozoic marine strata in Guizhong depression[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2010, 15(3): 1–10.

(编辑 董立)