

黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩生气期和生气量

陈方文¹, 卢双舫¹, 丁 雪²

(1. 中国石油大学非常规油气与新能源研究院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学化学工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:通过对华北地台上元古界青白口系下马岭组页岩样品和塔里木盆地寒武系富有机质页岩生成的原油样品进行热解实验,结合沉积史、热史等,利用化学动力学方法对黔南坳陷下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩主要生气期和生气量进行研究。结果表明,黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩主要成油期约为 510~430 Ma,即早奥陶世早期至早奥陶世晚期,主要成气期约为 500~240 Ma,即早奥陶世至晚二叠世;黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩成气由干酪根成气和原油裂解成气两个阶段组成,分别约为 500~475 Ma 和 400~240 Ma,即早奥陶世至中奥陶世和泥盆纪至早二叠世;黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩的总生气量约为 $2735.7 \times 10^{11} \text{ m}^3$,主要生气时期为奥陶纪、泥盆纪和石炭纪,单位质量页岩生气量分别为 14.72、8.87 和 $6.54 \text{ m}^3/\text{t}$,依次占总生气量的 41.0%、24.7% 和 18.0%。

关键词:黔南坳陷;牛蹄塘组;富有机质页岩;生气期;生气量

中图分类号:TE 122

文献标志码:A

引用格式:陈方文,卢双舫,丁雪. 黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩生气期和生气量[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(3):55-62.

CHEN Fangwen, LU Shuangfang, DING Xue. Gas generation period and quantity of organic-rich Niutitang Shale in Qiannan Depression, China [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(3):55-62.

Gas generation period and quantity of organic-rich Niutitang Shale in Qiannan Depression, China

CHEN Fangwen¹, LU Shuangfang¹, DING Xue²

(1. Institute of Unconventional Hydrocarbon and New Energy Sources in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. College of Chemical Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: In order to evaluate the gas generation period and quantity of the organic-rich Niutitang Shale in Qiannan Depression, pyrolysis experiments were performed using the samples of Xiamaling Shale from the Upper Proterozoic Qingbaikou system in the North China Platform, and the crude oil generated from the Lower Cambrian source rocks in Tarim Basin. Combining the sedimentary and thermal history of the study area, the gas generation period and quantity were calculated using the chemical kinetic method. The results show that the oil generation period of Niutitang Shale is about 510–430 Ma in Qiannan Depression, i. e., from the early stage of Early Ordovician to the end of Early Ordovician. The gas generation period of Niutitang Shale is about 500–240 Ma, from the Early Ordovician to the Late Permian, including two stages that are gas generation from kerogen (500–475 Ma) and gas generation from oil cracking (400–240 Ma), from the Early Ordovician to the Middle Ordovician and from the Devonian to the Early Permian, respectively. The total gas generation quantity of the organic-rich shale from Niutitang Shale in Qiannan Depression is about $2735.7 \times 10^{11} \text{ m}^3$. The main gas generation periods are Ordovician, Devonian and Carboniferous. Accordingly, the gas generation quantity is $14.72 \text{ m}^3/\text{t}$, $8.87 \text{ m}^3/\text{t}$ and $6.54 \text{ m}^3/\text{t}$, respectively, which is 41.0%, 24.7% and 18.0% in the total gas generation quantity from unit weight shale, respectively.

Keywords: Qiannan Depression; Niutitang Shale; organic-rich shale; gas generation period; gas generation quantity

能源需求的日益攀升和常规油气资源的不断消耗使油气供需矛盾日益突出。近年来,包括煤层气、致密砂岩气、页岩油、页岩气等在内的非常规能源越来越受到人们的重视。美国的勘探开发实践揭示,非常规油气中近年来发展势头最快、潜力最大的当属页岩气。中国广泛发育海相、海陆过渡相和陆相页岩,其中扬子地区古生界海相富有机质页岩是目前最为现实的页岩气探区^[1-2]。四川盆地及其周缘地区古生界下寒武统和下志留统页岩是近年来页岩气勘探和研究的热点,并且已经获得一定的突破,如威远 201 井、焦页 1 井等。关于页岩气的研究国内外众多学者主要集中在对页岩的烃源岩条件(有机质类型、丰度、成熟度和厚度等)^[2-3]、储集条件(孔隙空间、矿物组成等)^[4-9]和页岩气赋存量^[10-11]等方面,而对富有机质页岩的生气期研究相对较少。由于中国南方地区古生界沉积时期早、热演化程度高,而且经历了多期构造活动^[12-13],对古生界富有机质

页岩的主要生气期及各时期生气量研究相对薄弱。页岩的主要生气期及各时期生气量直接影响页岩气富集程度,主要生气期越晚则越有利于页岩气富集。如果页岩的生气时期太早则不利于页岩气富集,即使烃源岩条件和储集条件再优越,也难以弥补漫长的地质时期渗漏和扩散的损失。笔者根据有机质生烃高温热模拟实验结果,结合研究区沉积史、热史等,利用化学动力学方法,对黔南坳陷下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩主要生烃期和生烃量进行研究。

1 地质概况

黔南坳陷位于贵州省南部,东临雪峰山隆起,北与黔中隆起相接,西、南部与华南加里东褶皱带的罗甸断陷相邻,面积为 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1),在大地构造上处于扬子陆块南缘与华南加里东褶皱带的结合部位^[14-15]。沉积了震旦系—中三叠统海相地层及零星分布的上三叠统一古近系的陆相沉积^[3]。

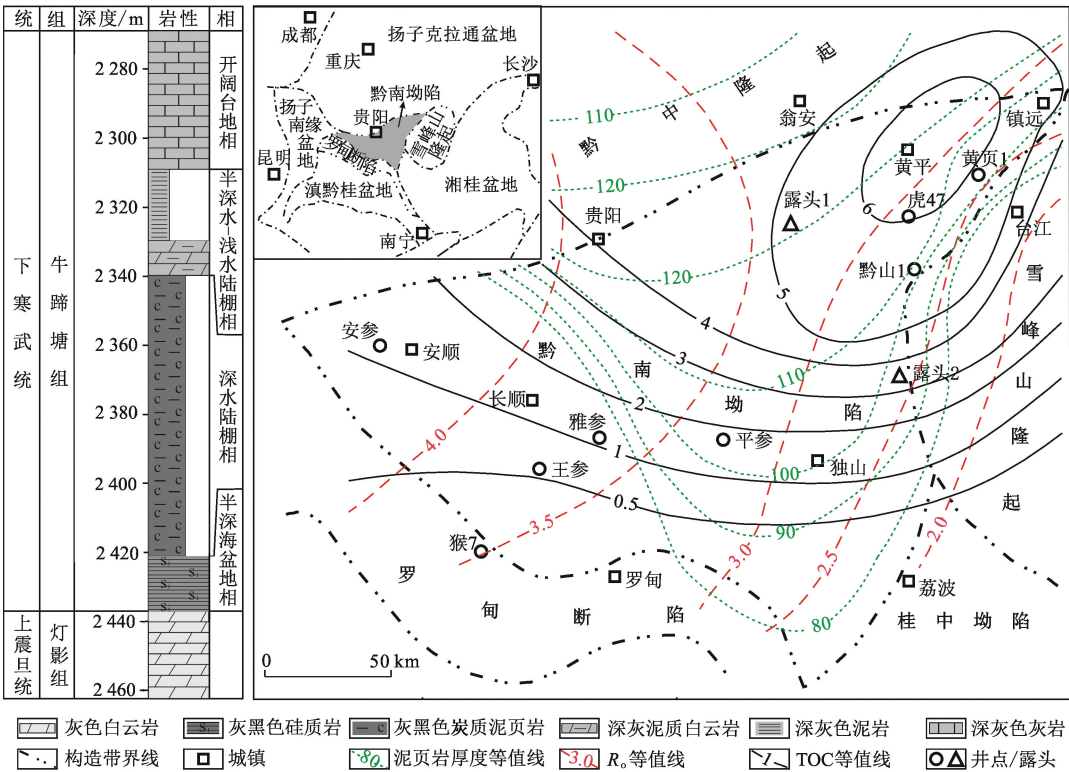


图 1 黔南坳陷牛蹄塘组柱状图及页岩地球化学特征

Fig.1 Stratigraphic column and geochemistry characteristics of Niutitang Shale in Qiannan Depression

早寒武世早期即牛蹄塘组沉积时期,南方大陆拉张活动达到高峰,海平面快速上升,发育第一巨旋回第 3 超层序海侵层序组的区域性富有机质页岩^[16-17]。牛蹄塘组底部为灰黑色硅质岩,直接覆盖在灯影组灰色白云岩之上,中下部为灰黑色炭质页岩,上部为深灰色泥质白云岩和泥岩,顶部为深灰色

灰岩(图 1)。依据研究区目的层段露头 and 岩心样品的化验分析结果,黔南坳陷牛蹄塘组所沉积的灰黑色炭质页岩厚度由南向北逐渐变大,其厚度约为 80 ~ 120 m;有机碳含量(TOC)由南向北逐渐升高,为 0.5% ~ 6% (图 1、表 1);有机质成熟度由东向西逐渐增大,镜质体反射率 R_m 约为 2.0% ~ 4.0% (图

1);有机质类型为Ⅱ₁-Ⅰ型^[18]。黔南坳陷牛蹄塘组炭质页岩为页岩气的形成提供了物质基础^[19]。目前,已经在黔南坳陷钻探了多口专门针对下寒武统牛蹄塘组页岩气勘探的探井,如黄页1、岑页1等。

表 1 黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩特征
Table 1 Characteristics of shale in Niutitang Shale of Qiannan Depression

井名/露头	页岩厚度/m	有机碳 (TOC)/%	镜质体 反射率 R_o /%
黄页 1	102.10	5.81	2.64
黔山 1	106.54	5.51	2.67
平参	103.72	1.72	3.26
雅参		1.24	3.63
王参		0.62	3.68
安参		1.17	4.16
露头 1	121.25	5.22	3.36
露头 2	96.53	3.48	2.58

2 页岩主要生气时期

2.1 高温热模拟实验

黔南坳陷下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩有机质属于高过成熟演化阶段,已经不再适合作为有机质生烃热解实验样品。为计算黔南坳陷下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩有机质的成烃转化率,分别选取华北地台燕山褶皱带(秦皇岛地区)上元古界青白口系下马岭组页岩样品(表2)和塔里木盆地塔中62井志留系储层原油样品(表3)进行热解实验,分析有机质生油、生气转化率随时间(或温度)的关系。选取华北地台上元古界青白口系下马岭组页岩

样品作为有机质生油、生气热模拟实验的原因是样品与研究区牛蹄塘组页岩均属于海相沉积,有机质类型相近、成熟度较低(镜质体反射率 R_o 为 0.5%)。目前在中国其他地区古生界海相页岩均属于高过成熟演化阶段,没有比本文中样品更加合适的代表性样品。塔中 62 井志留系储层原油来源于下部寒武系烃源岩^[20],烃源岩与黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩沉积时期、沉积环境相同,具有典型的代表性。模拟干酪根成油、成气的热解实验在 Rock-Eval-II 型热解仪及相应的 PY-GC 上进行,为无水开放体系。其中页岩样品热解实验从 200 ℃ 开始,分别以 30 和 40 ℃/h 的升温速率将样品加热至 600 ℃。模拟原油裂解成气的实验是利用金管实验和 GC 分析,为无水封闭体系。原油裂解成气热解实验从 350 ℃ 开始,若干个装有油样的金管置于同一温、压系统下,在 8 MPa 的压力下分别以 2 和 20 ℃/h 的升温速率将样品加热至 700 ℃,到达设置温度点取出相应的金管分析产气量和残油量。通过实时记录产油量、产气量与温度(时间)之间的关系,得到不同升温速率条件下各温度点干酪根成油转化率 F_{ko} 、成气转化率 F_{kg} 和油裂解成气转化率 F_{og} (图2)。干酪根成油、干酪根成气和油裂解成气是一系列非常复杂的动力学过程,该过程可以用平行一级反应进行描述。通过建立并标定干酪根成油、干酪根成气和油裂解成气的动力学模型定量表征有机质生烃过程,标定方法见文献[21-23]。

表 2 华北地台下马岭页岩与黔南坳陷牛蹄塘组页岩地化特征
Table 2 Geochemical characteristics of Xiamaling Shale in Huabei Platform

样品	有机质类型	R_o /%	TOC/%	T_{max} /℃	S_1 /(mg·g ⁻¹)	S_2 /(mg·g ⁻¹)	I_H /(mg·g ⁻¹)
下马岭页岩	Ⅱ ₁	0.5	5.98	439	0.45	19.13	320.00
牛蹄塘组	Ⅱ ₁ -Ⅰ	2.5	6.31	446	0.04	0.15	4.48

表 3 塔里木盆地塔中 62 井原油样品特征
Table 3 Characteristics of crude oil sample from well Tz62 in Tarim Basin

烃源岩	储层	深度 H /m	密度 ρ / (g·cm ⁻³)	原油族组成/%			元素组成/%			
				饱和烃	芳香烃	非烃和沥青质	C	H	N	O
寒武系	志留系	4 052.88~4 073.58	0.931	53.256	33.285	13.459	71.75	13.00	0.33	0.28

2.2 研究区沉积史和热史

黔南坳陷沉积地层经历了多期构造运动,从寒武系地层沉积以来依次经历了都匀运动、广西运动、印支运动和燕山运动等多次构造运动。研究区古生界地温梯度约为(3.0~3.5)℃/100 m^[24-25],结合黄页1井下寒武统牛蹄塘组沥青反射率换算为镜质体反射率 R_o 约为 2.51%。在前人研究^[26-27]基础上,

依据黄页1井各沉积地层厚度,确定黔南坳陷黄页1井牛蹄塘组主要经历了568~527 Ma和514~260 Ma的两次缓慢沉降过程;527~514 Ma和260~230 Ma的两次快速沉降过程;以及230 Ma至现今的续缓慢抬升过程^[26-27]。黔南坳陷牛蹄塘组页岩所经历的最大古埋深为5 400 m,最高古地温为190℃(图3,据文献[26-27],有修改)。

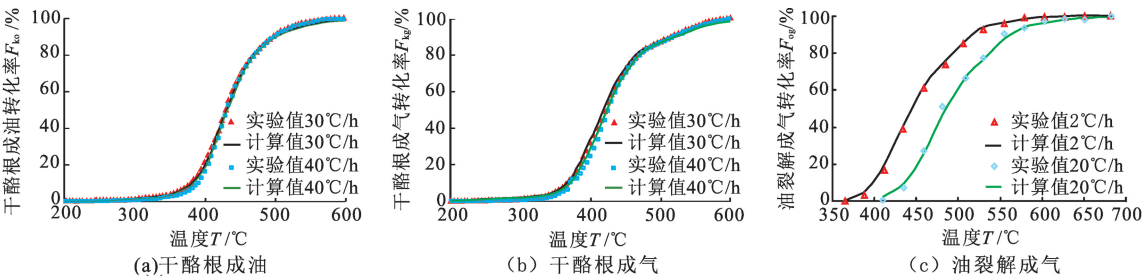


图2 下马岭页岩成油、成气及塔中 62 井原油成气与温度及升温速率的关系
Fig.2 Transformation ratio of oil and gas generated from Xiamaling Shale and oil cracking to gas from well Tz62 at different temperature and heating rate

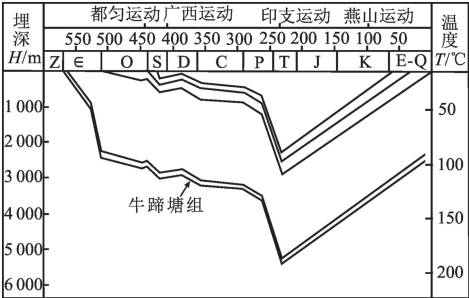


图3 黔南坳陷黄页 1 井牛蹄塘组地层沉积埋藏史和热史
Fig.3 Burial history and thermal history of Niutitang Shale from well Hy1 in Qiannan Depression

2.3 页岩主要成气时期

在高温热模拟实验基础上,利用化学动力学方法^[21],结合黔南坳陷牛蹄塘组页岩沉积史和热史(图3),计算黔南坳陷牛蹄塘组页岩干酪根成油、成气和原油裂解成气转化率与时间的关系,即有机质成烃史(图4)。黔南坳陷牛蹄塘组页岩成烃史显示有机质主要成油期为 510 ~ 430 Ma,即早奥陶世早期至早奥陶世晚期;主要成气期为 500 ~ 240 Ma,即早奥陶世至晚二叠世。其中,有机质成气可以进一步划分为两个主要的天然气生成阶段,大约为 500 ~ 475 Ma 和 400 ~ 240 Ma,即早奥陶世至中奥陶世和泥盆纪至早二叠世,分别对应于干酪根成气和原油裂解成气阶段。干酪根成气的主要时期明显早于原油裂解成气的主要时期,而且前者所延续的时间显著比后者短。推测原油裂解所生成天然气对页岩气的富集贡献更大。

3 页岩生气量

3.1 原始有机碳和原始氢指数恢复

黔南坳陷下寒武统牛蹄塘组页岩有机质镜质体反射率 R_o 一般大于 2%,属于高过成熟演化阶段,计算其生烃(气)量时有必要对页岩原始有机碳和原始氢指数进行恢复。以黄页 1 井牛蹄塘组 2 370

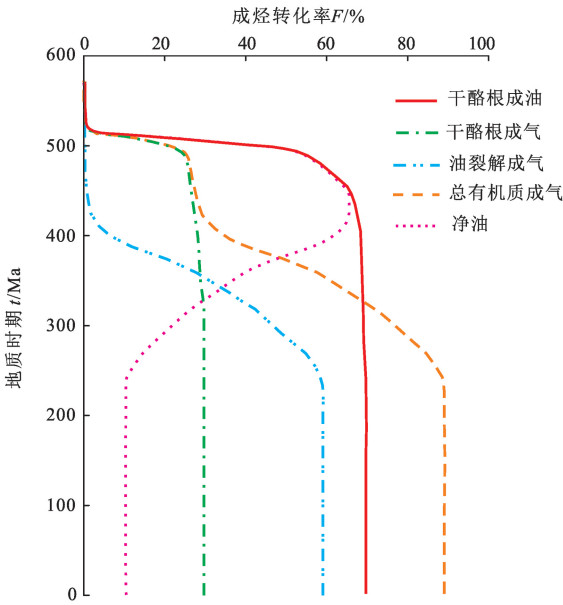


图4 黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩成烃史
Fig.4 Hydrocarbon generation history of Niutitang Shale in Qiannan Depression

~2 444 m 深度段的岩心地球化学分析结果为基础,依据化学动力学原理计算成烃转化率并恢复有机质原始有机碳和原始氢指数方法^[21-22],利用上述成烃转化率,根据恢复原始有机碳和原始氢指数的公式^[21]计算黔南坳陷牛蹄塘组页岩的原始有机碳和原始氢指数(图5)。

$$w(\text{TOC}_0) = w(\text{TOC}) (1 + (I_{H0} - I_H) K / 1\,000), \tag{1}$$

$$I_{H0} = I_H + (I_{H0} F_{ko} + B_0 - B) + I_{H0} (F_{kg} + F_{og}). \tag{2}$$

式中, $w(\text{TOC}_0)$ 为页岩原始有机碳质量分数; $w(\text{TOC})$ 为页岩残余有机碳质量分数; I_{H0} 为页岩原始氢指数, mg/g; I_H 为页岩残余氢指数, mg/g; K 为有机质转化为有机碳的系数; B_0 为页岩原生沥青量, mg/g; B 为页岩残油量, mg/g; F_{ko} 为干酪根成油转化率; F_{og} 为油裂解成气转化率; F_{kg} 为干酪根成气转化率。

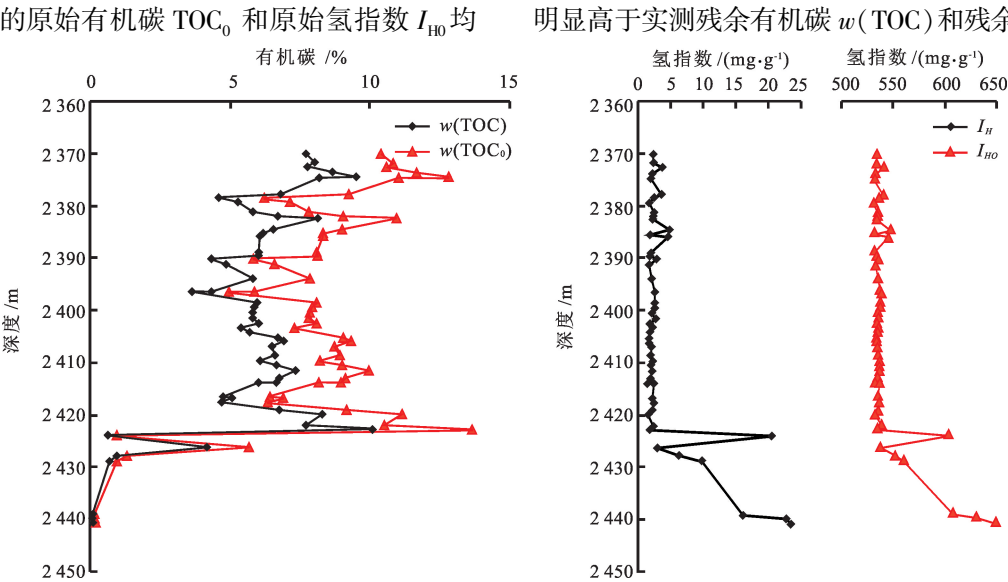


图 5 黔南坳陷黄页 1 井牛蹄塘组富有机质页岩原始有机碳和原始氢指数

Fig. 5 Original total organic carbon and hydrogen index of Niutitang Shale from well Hy1 in Qiannan Depression

3.2 各时期生气量

为了更加详细地研究黔南坳陷下寒武统牛蹄塘组页岩生气史,需要分析各主要沉积时期的生气量。计算单位质量页岩的生气量:

$$Q=22.4w(\text{TOC}_0)I_{\text{H}0}((1-E_o)F_{\text{k}o}F_{\text{o}g}+F_{\text{k}g})/M.$$

(3)

式中, Q 为单位质量页岩生成的天然气量, m^3/t ; E_o 为页岩排油效率,参考同为海相烃源的 Barnett 页岩排油效率,约为 40%^[28]; M 为页岩所生成天然气的平均分子量,约为 16。

单位质量页岩的生气量是单位质量页岩中有机质生气所消耗的含量通过密度转化为体积。有机质含量包括热解生气的干酪根和残留在烃源岩中裂解成气的原油。

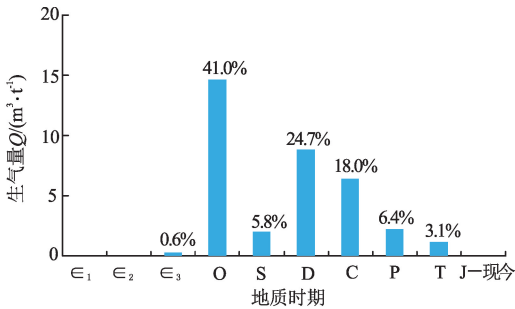


图 6 黔南坳陷牛蹄塘组单位质量页岩在各主要地质时期生气量

Fig. 6 Gas generation amount from Niutitang Shale of each geological period in Qiannan Depression

利用上述研究获得的黔南坳陷下寒武统牛蹄塘组页岩的原始有机碳、原始氢指数(图 5)、各主要地

明显高于实测残余有机碳 $w(\text{TOC})$ 和残余氢指数 $I_{\text{H}0}$ 。

质时期所对应的干酪根成油、干酪根成气和油裂解成气转化率(图 4),以及排油效率^[28],按照公式(3)计算各主要地质时期内单位质量页岩的生气量(图 6)。排油效率引用 Jarvie 等^[28]对于 Barnett 页岩的研究结论的原因是:研究区牛蹄塘组页岩与 Barnett 页岩均为海相烃源岩,而且沉积时期相对接近。另外,排油效率是石油地质界的复杂问题之一,中国学者主要对陆相湖盆烃源岩排油效率做了大量工作,而对海相古老烃源岩排油效率研究较少。

黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩的主要生气时期为奥陶系、泥盆系和石炭系,生气量分别为 14.72、8.87 和 6.54 m^3/t ,依次占总生气量的 41.0%、24.7%和 18.0%。在志留系沉积时期,牛蹄塘组页岩生气量明显偏低。分析其原因为:①沉积地层在奥陶系至石炭系时期整体呈现缓慢沉降过程,仅在志留系沉积初期受都匀运动影响,地层遭受抬升剥蚀,烃源岩停止生烃;②志留纪经历的地质时期约为 27 Ma,明显比奥陶纪、泥盆纪和石炭纪所经历时期短(图 3)。

3.3 总生气量

以黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩原始有机碳等值线图、原始氢指数等值线图、富有机质页岩顶底埋深等值线图以及成烃转化率、富有机质页岩密度随深度的变化规律等数据为基础,对黔南坳陷牛蹄塘组富有机质页岩的天然气生成量进行定量评价。首先,将研究区按照 200 m×200 m×1 m 进行三维网格化;然后给每个网格单元赋予相应的富有机质页岩的厚度、原始有机碳、原始氢指数和成烃转化率;

- and its scientific value [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [8] 蒲泊伶,董大忠,吴松涛,等. 川南地区下古生界海相页岩微观储集空间类型[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 39(4): 19-25.
- PU Boling, DONG Dazhong, WU Songtao, et al. Microscopic space types of Lower Paleozoic marine shale in southern Sichuan Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 39(4): 19-25.
- [9] 付小东,秦建中,滕格尔,等. 烃源岩矿物组成特征及油气地质意义:以中上扬子古生界海相优质烃源岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(6): 671-684.
- FU Xiaodong, QIN Jianzhong, TENGGER, et al. Mineral components of source rocks and their petroleum significance: a case from Paleozoic marine source rocks in the Middle-Upper Yangtze region[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6): 671-684.
- [10] 刘圣鑫,钟建华,马寅生,等. 柴东石炭系页岩微观孔隙结构与页岩气等温吸附研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(1): 22-42.
- LIU Shengxin, ZHONG Jianhua, MA Yinsheng, et al. Study of microscopic pore structure and adsorption isothermal of carboniferous shale, Eastern Qaidam Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(1): 22-42.
- [11] SHTEPANI E, NOLL L A, ELROD L W, et al. A new regression-based method for accurate measurement of coal and shale gas content[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2010, 13(2): 359-364.
- [12] 聂海宽,何发岐,包书景. 中国页岩气地质特殊性及其勘探对策[J]. *天然气工业*, 2011, 31(11): 111-116.
- NIE Haikuan, HE Faqi, BAO Shujing. Peculiar geological characteristics of shale gas in China and its exploration countermeasures[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(11): 111-116.
- [13] 徐政语,姚根顺,郭庆新,等. 黔南坳陷构造变形特征及其成因解析[J]. *大地构造与成矿学*, 2010, 34(1): 20-31.
- XU Zhengyu, YAO Genshun, GUO Qingxin, et al. Genetic interpretation about geotectonics and structural transfiguration of the southern guizhou depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34(1): 20-31.
- [14] 封永泰,赵泽恒,赵培荣,等. 黔中隆起及周缘基底结构、断裂特征[J]. *石油天然气学报*, 2007, 29(3): 35-38.
- FENG Yongtai, ZHAO Zeheng, ZHAO Peirong, et al. Basement structures and fault characteristics in Qianzhong Uplift and its circumferential areas[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(3): 35-38.
- [15] 宁飞,汤良杰,王鹏昊,等. 黔南坳陷节理发育特征及其对构造应力场转换的指示[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(6): 22-26.
- NING Fei, TANG Liangjie, WANG Penghao, et al. Growing characteristics of joints in Qiannan depression (Southern Guizhou) and its implication to tectonic stress field switch[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009, 33(6): 22-26.
- [16] 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.
- [17] 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. Accumulation of Lower Cambrian Niutitang Shale gas and prediction of potential area in Qiannan Sag [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 518-524.
- [18] 滕格尔,秦建中,郑伦举. 黔南坳陷海相优质烃源岩的生烃潜力及时空分布[J]. *地质学报*, 2008, 82(3): 366-372.
- TENGGER, QIN Jianzhong, ZHENG Lunju. Hydrocarbon potential on excellent hydrocarbon source rock in Southern Guizhou depression and its spacial-temporal distribution [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(3): 366-372.
- [19] 韩双彪,张金川,李玉喜,等. 黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩气地质调查井位优选[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(1): 182-187.
- HAN Shuangbiao, ZHANG Jinchuan, LI Yuxi, et al. The optimum selecting of shale gas well location for geological investigation in Niutitang formation in Lower Cambrian, Northern Guizhou area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(1): 182-187.
- [20] 肖中尧,卢玉红,桑红,等. 一个典型的寒武系油藏:塔里木盆地塔中62井油藏成因分析[J]. *地球化学*, 2005, 34(2): 155-160.
- XIAO Zhongyao, LU Yuhong, SANG Hong, et al. A typical Cambrian oil reservoir: origin of oil reservoir in well TZ62, Tarim Basin [J]. *Geochemica*, 2005, 34(2): 155-160.

- [21] 卢双舫. 有机质成烃动力学理论及其应用[M]. 北京:石油工业出版社,1996:62-74.
- [22] 卢双舫,刘晓艳,付晓泰,等. 未熟—低熟油生成机理的化学动力学研究及其初步应用[J]. 沉积学报, 2001,19(1):130-135.
LU Shuangfang, LIU Xiaoyan, FU Xiaotai, et al. Chemical kinetics study on the generation mechanism of immature to low-mature oil and its initial application [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001,19(1):130-135.
- [23] 卢双舫,王琼,李吉君,等. 低熟气评价方法及其在松辽盆地北部的应用[J]. 天然气地球科学,2008,19(1):8-12.
LU Shuangfang, WANG Qiong, LI Jijun, et al. Evaluation method of low-mature gaseous and its application in north Songliao Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008,19(1):8-12.
- [24] 韩世庆,王守德. 黔南东部下古生界石油生成及演变阶段的探讨[J]. 石油实验地质,1983,5(1):1-8.
HAN Shiqing, WANG Shoude. An approach on stages of oil generation and evolution of lower Paleozoic in the eastern part of south guizhou [J]. Petroleum Geology and Experiment, 1983,5(1):1-8.
- [25] 赵宗举,朱琰,邓红婴,等. 中国南方古隆起对中、古生界原生气藏的控制作用[J]. 石油实验地质, 2003,25(1):10-18.
ZHAO Zongju, ZHU Yan, DENG Hongying, et al. Control of paleouplifts to the meso-paleozoic primary oil and gas pools in the south of china[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2003,25(1):10-18.
- [26] 韩世庆,王守德,胡惟元. 黔东麻江古油藏的发现及其地质意义[J]. 石油与天然气地质,1982,3(4):316-326.
HAN Shiqing, WANG Shoude, HU Weiyuan. The discovery of a paleopool in Majiang and its geological significance[J]. Oil and Gas Geology, 1982,3(4):316-326.
- [27] 金宠,陈安清,楼章华,等. 黔南坳陷构造运动与流体响应及油气保存[J]. 浙江大学学报(工学版),2012,46(10):1910-1922.
JIN Chong, CHEN Anqing, LOU Zhanghua, et al. Tectonic movement, fluid response and hydrocarbon preservation of Southern Guizhou depression [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012,46(10):1910-1922.
- [28] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007,91(4):475-499.

(编辑 徐会永)