

海底热液活动与富有机质烃源岩发育的关系

——以黔西北地区下寒武统牛蹄塘组为例

梁 钰^{1,2,3}, 侯读杰^{1,2}, 张金川^{1,2}, 杨光庆^{1,2,4}

(1.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083;

2.中国地质大学(北京)海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室,北京 100083;

3.中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200030; 4.中国石油长城钻探工程公司,北京 100101)

摘要:为明确海底热液活动对黔西北地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩有机质富集的影响,在综合中外热液成矿研究成果的基础上,结合沉积地球化学与有机地球化学的测试资料,重点研究了海底热液活动特征元素与烃源岩有机质丰度的相关关系;通过2组沉积环境相似但受热液活动影响明显不同的剖面样品对比,对当时的古生产力和氧化还原环境进行了恢复。距离热液喷口较近的温水村剖面受到热液活动的影响强烈,特征元素大量富集;而较远的毛牌村剖面由底部到顶部受到热液活动的影响明显减弱。在恢复古海洋生产力中发现非陆源Ba(热液成因与生物成因总和)含量与有机碳含量有很好的相关关系,证明热液活动确实参与了海洋中生物的生命活动,从而认为热液活动可以为海洋生物的发育提供物质基础并提高古生产力。随着底层还原—酸性的热液流体的注入,在大环境为还原环境的情况下更加深了牛蹄塘组底部的缺氧程度,改善了有机质保存条件。热液活动为黔西北地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩提供了必要的物质基础和保存条件,有利于形成富有机质的优质烃源岩。

关键词:热液活动 古生产力 缺氧环境 有机质丰度 牛蹄塘组 黔西北地区

中图分类号:TE111

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2014)04-0028-05

全球能源形势逐渐紧张,石油、天然气的价格都在持续上涨,在常规能源不能有大突破的情况下,非常规能源开始得到广泛关注。其中,页岩气由于在北美地区得到成功的勘探、开发,在中国大陆也开始逐渐被重视起来^[1]。扬子地区海相地层以高有机碳含量、高演化程度、高脆性矿物含量、裂缝发育等特点而成为中国页岩气勘探开发的主战场^[1]。近年来,很多学者对黔西北地区的构造活动、沉积环境、古生物群落等方面进行了大量研究,发现了大量镍、钼、锰等固体矿产,对于这些很难从正常海水环境中富集形成的大规模金属矿床,热液沉积理论可以较好地解释其形成原因^[2-3]。目前普遍认为黔西北地区受到华南洋流活动的影响,上升洋流的热液活动非常明显,导致了一些微量元素的大量富集^[4-5]。然而,对于该区页岩气气源岩的研究,这样的沉积环境是否会对有机质的富集提供有利条件,热液活动下是否会形成大量优质的烃源岩还不得而知。因此,笔者通过对黔西北地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩的元素化学特征与有机质丰度

进行研究,重点分析海底热液活动对黑色页岩中有机质富集作用的影响,阐释该区富有机质页岩形成的机理,为认识海相富有机质页岩的形成及页岩气的勘探开发提供信息。

1 地质背景

早寒武世,黔西北地区位于扬子陆棚海与江南边缘海过渡地带,经受一系列北东方向与北北东方向延伸的区域性断裂影响,随着冰川融化,海平面相对上升,扬子海侵逐渐扩大,形成广泛的南方扬子地区下寒武统牛蹄塘组黑色岩系^[6]。研究区由北西到南东方向依次分为浅水陆棚区、深水陆棚区、热水深水陆棚区3个明显的沉积相带(图1)。扬子地台南端处于强烈裂谷作用时期,上升洋流活动非常显著,形成了大面积的热液沉积。据张位华等研究发现,黔西北地区热水深水陆棚地区向南开口,与华南洋(上升洋流)相连^[4-7],研究区麻江洋跳地区底部硅质岩及顶部黑色页岩中发现丰富的热水生

收稿日期:2014-05-12。

作者简介:梁钰,男,硕士,从事油气藏形成机理、非常规油气成藏与分布规律研究。联系电话:13811891537,E-mail:ddnyly@163.com。

基金项目:贵州省国土资源厅项目“黔西北地区页岩气资源潜力调查”(2012GYYQ-01)。



图1 黔西北地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩沉积相及剖面位置

物群落,包括大型蠕虫、高肌虫和虫管生物群等,这些特征古生物群落通常出现在热液喷口附近,进而通过一系列热液活动特有的岩石(硅质岩、磷块岩)、矿物(重晶石、石膏、钡冰洲石)证据及元素(U/Th, δCe , δEu)、同位素($\delta^{30}\text{Si}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)地球化学证据,证明了麻江洋跳地区接近黔西北地区的热液喷口^[4,7-9]。

黔西北地区牛蹄塘组页岩属于筇竹寺阶,位于沧浪铺阶明心寺组之下和梅树村阶戈仲伍组之上,为一套厚度约为150 m的黑色页岩,由底到顶依次为黑色硅质页岩夹黑色炭质页岩、黑色炭质页岩、灰黑—灰绿色炭质页岩和钙质页岩^[6]。明心寺组和戈仲伍组主要为碳酸盐岩和硅质岩沉积,这样的灰岩—页岩—灰岩顶底板组合恰好与美国Fort Worth盆地Barnett页岩的储盖组合类型一致^[10],而牛蹄塘组黑色页岩恰好为其中的目的页岩层段。

2 样品采集

此次研究选择了2条野外露头剖面(图1):①贵阳市清镇市百花湖乡温水村剖面,位于热液喷口麻江洋跳地区附近,热液活动作用明显;②黔西北毕

节地区织金县桂果镇毛埡村剖面,位于深水陆棚区与热水深水陆棚区交界附近,与温水村剖面相似,处于热水深水陆棚环境,但热液活动作用较弱。样品层位均来自于下寒武统牛蹄塘组。所有样品的常量及微量元素测定在中国石化勘探开发研究院非常规能源技术部 Thermo Fisfer Niton FXL-950 射线荧光光谱仪上完成,执行标准为GB/T 14506.28—2010^[11];有机质丰度测定在中国石油大学(北京)有机地球化学实验室CS-144碳硫测定仪上完成,执行标准为SY/T 5116—1997^[12]。

3 热液活动对烃源岩发育的影响

3.1 热液活动的特征元素标志

中外很多学者都曾对热液沉积的特征进行过详细的研究。根据 Marching 等对现代大洋热水沉积物微量元素特征的研究结果, Ba 及亲铜成矿元素 As, Sb, Hg, Bi 等富集是热水沉积物与正常沉积物区别的重要标志^[13]。孙省利等通过华北青白口系下马岭组黑色页岩及塔里木盆地下寒武统底部富有机质层段的研究,发现热液沉积形成的黑色页岩中,与海底热水流体活动有关的P、亲铜成矿元素 Cu 和 Zn 及铁族元素 Co, Ni, V 等明显富集^[14-16]。在前人研究的基础上^[4-9,13-22],笔者总结了热液活动的元素判别标志(表1),进而选择 Ba, As, U 作为研究区热液活动的特征元素。温水村剖面由底到顶, Ba, As, U 含量出现一定程度的波动,但总体含量均较高(图2),分别为上地壳中各元素含量^[23]的1.64~2.51, 9.09~40.91, 11.76~35.29倍,特征元素大量富集,显示温水村剖面黑色页岩的形成受热液活动影响明显。毛埡村剖面底部 Ba, As, U 元素含量与温水村剖面相比有所降低,但特征元素仍然比较富集,分别为上地壳中各元素含量的1.49~2.15, 9.09~31.82, 11.76~23.53倍,显示了热液活动程度较强;到毛埡村剖面顶部, Ba, As, U 含量明显降低,分别为上地壳中各元素含量的1.21~1.49, 2.27~9.09, 2.94~17.68倍,说明随着热液活动的逐渐减弱,距离热液喷口较远的毛埡村剖面黑色页岩受热液影响逐渐降低。

表1 热液活动的元素判别标志

沉积环境	特征元素 Ba, As, Sb, Bi 含量	Si/(Si+Al+Fe)	铁族元素含量	亲铜成矿元素含量	U/Th, %	ΣREE	LREE/HREE	δCe	δEu
热水	高	高	高	高	>1.00	低	低	负异常	正异常
正常海水	正常—低	正常—低	正常—低	正常—低	<1.00	高	高	正异常	负异常

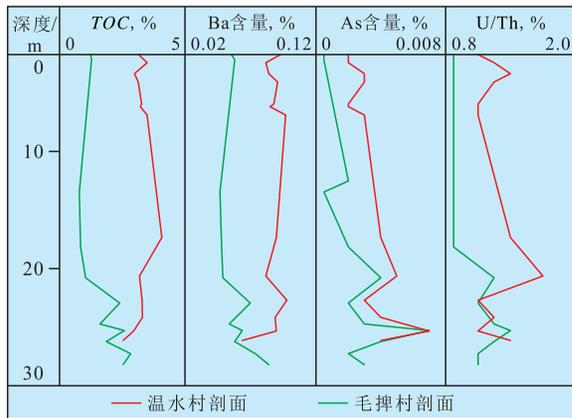


图2 温水村与毛埝村剖面牛蹄塘组黑色页岩热液活动特征元素含量及TOC变化剖面

3.2 热液活动对古生产力的影响

中外学者普遍认为,热液活动与古生产力有着密切的关系。Halbach等通过对Fiji盆地热液活动地区的研究发现,距离热液活动区越近,生物在水体中的数量和活动强度都会增加,相对于普通的海洋表层,热液活动区会高1~3个数量级^[24]。Korzinsky等认为地球深部的热液是表层物质输入的重要载体,热液可以携带许多地壳表层罕见的元素,而这些溶解状态的微量元素含有大量海洋生物必需的营养盐。生物死亡之后可呈“海雪”降落至海底,为烃源岩有机质富集提供物质来源^[25-26]。近些年来,Ba,P,Cd和生物成因硅以及生物成因碳酸盐岩等与生物成因相关的指标越来越多地被应用于古海洋生产力的重建研究。由于Ba在海洋中保存时间较长,生物成因Ba中很大一部分会在沉降过程保存于沉积物中,保存率约为30%,相比于其他方法有明显的优势^[27],因此选择Ba作为指标进行古生产力的恢复。海洋沉积物Ba按其来源主要分为陆源碎屑、生物成因和热液沉淀3种。陆源碎屑Ba显然与古海洋生产力无关,在计算过程中要剔除。由于Ti来源单一且仅为陆源输入,因此通常利用Ti含量去估算陆源碎屑Ba含量^[28],关系式为

$$\omega(\text{Ba}_{\text{非陆}}) = \omega(\text{Ba}_{\text{总}}) - \omega(\text{Ti}_{\text{总}}) \times \left(\omega(\text{Ba}_{\text{总}}) : \omega(\text{Ti}_{\text{总}}) \right)_{\text{PASS}} \quad (1)$$

式中: $\omega(\text{Ba}_{\text{非陆}})$ 为非陆源Ba含量; $\omega(\text{Ba}_{\text{总}})$ 为沉积物中钡的总含量; $\omega(\text{Ti}_{\text{总}})$ 为沉积物中钛的总含量; $\left(\omega(\text{Ba}_{\text{总}}) : \omega(\text{Ti}_{\text{总}}) \right)_{\text{PASS}}$ 为晚太古代标准页岩(PASS)中陆源钡与钛的比值,约为0.11, $\omega(\text{Ti}_{\text{总}}) \times \left(\omega(\text{Ba}_{\text{总}}) : \omega(\text{Ti}_{\text{总}}) \right)_{\text{PASS}}$ 代表了沉积物中陆源钡的含量。

通常认为与古海洋生产力有关的只有生物成因重晶石中所含有的Ba,但是通过对温水村和毛埝

村剖面黑色页岩中非陆源Ba含量的研究发现,其与总有机碳含量(TOC)有较好的线性关系(图3),说明热液成因Ba对有机质富集也有一定的贡献,热液活动带来的地壳深部Ba以一定比例的溶解态被生物吸收后转化为生物成因Ba。然而,毛埝村剖面底部、毛埝村剖面顶部及温水村剖面3套样品非陆源Ba含量与TOC的关系又不尽相同,拟合直线斜率依次降低(图3),反映了以生物成因Ba为主体的样品到以热液成因为主体的样品的过渡,说明热液活动带来的Ba确实参与了海洋生物的生命活动,但并非全部,而仅仅是其中的一部分。

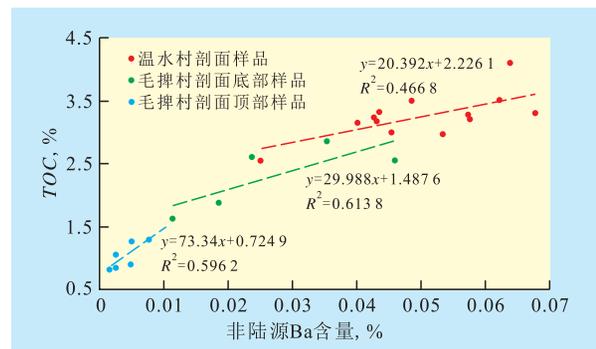


图3 黔西北地区牛蹄塘组黑色页岩非陆源Ba含量与TOC的关系

3.3 热液活动对氧化还原环境的影响

缺氧环境为古地质环境的一种重要形式,一般是指水体中溶解氧含量小于1.0 mL/L,可细分为贫氧环境(0.1~1.0 mL/L)及厌氧环境(<0.1 mL/L)^[29]。孙省利等研究发现,还原酸性的热液流体(多富含硫化氢)进入海底后可以使其形成缺氧环境,利于有机质的保存,可以导致沉积物TOC及缺氧型元素双高的特性^[14-16]。另外,高海洋生产力形成的有机物呼吸以及分解对水中游离氧的消耗也可以起到一定的作用。何金先等通过对黔北地区牛蹄塘组热液活动形成的黑色页岩研究发现,其伽马蜡烷含量很高,而伽马蜡烷既是水体盐度的指标,亦是水体分层的标志,在水体分层的状态下,表层生长大量浮游生物,底层水缺氧,非常有利于有机质的保存^[30]。通过对文献[31-34]总结,得出缺氧环境的元素判别标志(表2),可以发现其中很多元素判别标志与热液活动的(表1)非常相似,说明热液活动确实对氧化还原环境造成一定影响。

选择S和Mo含量以及 δU 这3个参数判断研究区的缺氧环境。温水村剖面S和Mo含量均非常高(图4),在纵向上存在一定范围的波动,反映热水活动的间歇性,2种元素含量分别为地壳中元素含量

表2 缺氧环境的元素判别标志

沉积环境	元素特征	V/(V+Ni)	V/Cr	Cu/Zn	Ni/Co	Fe ²⁺ /Fe ³⁺	U/Th	δU	ΣREE	δCe	δEu	Ce/La
缺氧	厌氧	>0.50	>4.25	>1.00	>7.00	>1.00	>1.25	>1.00	低	负异常	正异常	>2.00
	过渡金属、Mo和有机硫含量高	0.45~0.60	2.00~4.25	0.20~1.00	5.00~7.00	0.75~1.25	1.50~1.80					
富氧	过渡元素和Mo含量低	<0.45	<2.00	<0.20	<5.00	<1.00	<0.75	<1.00	高	正异常	负异常	<1.50

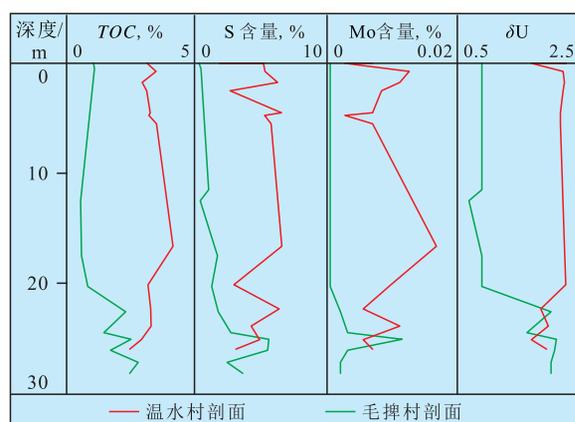


图4 温水村与毛撵村剖面牛蹄塘组黑色页岩TOC及特征参数变化

的22.4~235.7和8.70~30.43倍,显示为较强的缺氧还原环境。通常认为缺氧环境下 δU 大于1,而氧化环境下 δU 小于1,温水村剖面样品 δU 主要为1.33~1.82,同样为缺氧环境的表现。毛撵村剖面底部样品与温水村剖面样品非常接近,S和Mo含量及 δU 值均较高,而顶部样品由于受到热液活动影响减弱,各参数值明显降低,S和Mo含量仅为地壳中元素含量的9.35~34.88和3.87倍, δU 值约为0.88,综合考虑仍为还原环境,但缺氧程度比底部已大大降低。因此可以判断温水村与毛撵村剖面下寒武统牛蹄塘组黑色页岩沉积时期主要为还原环境,而由于热液活动的加入,加深了深水陆棚环境的缺氧程度,更有利于有机质的保存,毛撵村剖面底部样品TOC与元素双高的特点即为佐证(图4)。

4 结束语

通过对黔西北地区下寒武统牛蹄塘组距离热液喷口(麻江洋跳)不同距离的2个典型剖面温水村剖面 and 毛撵村剖面黑色页岩的元素化学和有机化学特征的分析,发现距离热液喷口较近的温水村剖面受到热液活动的影响强烈,特征元素大量富集,而较远的毛撵村剖面由底部到顶部受到热液活动的影响明显减弱,顶部接近于正常海水的状态。在恢复古海洋生产力中发现非陆源Ba(热液成因与生

物成因总和)含量与总有机碳含量有很好的相关关系,证明热液活动确实参与了海洋中生物的生命活动,为古海洋生物勃发提供了物质基础。在还原的深水陆棚环境中,还原—酸性热液流体的注入加深了缺氧环境的程度,使得底层的水体更加利于有机质的保存。总体来讲,热液活动为黔西北地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩提供了必要的物质基础和保存条件,为形成富有机质的优质烃源岩带来了良好条件。

参考文献:

- [1] 范柏江,师良,庞雄奇.页岩气成藏特点及勘探选区条件[J].油气地质与采收率,2011,18(6):9-13.
- [2] 孟达峰,侯贵廷.页岩气成藏地质条件及中国上扬子区页岩气潜力[J].油气地质与采收率,2012,19(1):11-14.
- [3] 施春华,胡瑞忠,王国芝.贵州织金磷矿岩元素地球化学特征[J].矿物学报,2006,26(2):169-174.
- [4] 张位华,姜立君,高慧,等.贵州寒武系底部黑色硅质岩成因及沉积环境探讨[J].矿物岩石地球化学通报,2003,22(2):174-178.
- [5] 彭军,田景春,伊海生.扬子板块东南大陆边缘晚前寒武纪热水沉积作用[J].沉积学报,2000,18(1):107-113.
- [6] 贵州省地质矿产局.贵州省区域地质志[M].北京:地质出版社,1987.
- [7] 梁狄刚,郭彤楼,边立曾,等.南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J].海相油气地质,2009,14(2):1-19.
- [8] 杨瑞东,朱立军,高慧,等.贵州遵义松林寒武系底部热液喷口及与喷口相关生物群特征[J].地质论评,2005,51(5):481-492.
- [9] 肖加飞,胡瑞忠,宋谢炎.贵州早寒武世的缺氧事件沉积[J].矿产与地质,2006,20(4/5):366-373.
- [10] 马宁,侯读杰,包书景,等.页岩气资源潜力评价方法[J].油气地质与采收率,2012,19(6):25-29.
- [11] 王苏明,颜茂弘.GB/T 14506.28—2010硅酸盐岩石化学分析方法:X射线荧光光谱法测定主、次元素量[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [12] 徐冠军,胡文.SY/T 5116—1997沉积岩中总有机碳的测定[S].北京:石油工业出版社,1998.
- [13] Marching V, Gundlach H, Möller P, et al. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments[J].Marine Geology, 1982, 50(3):241-256.

- [14] 孙省利,陈践发,刘文汇,等.海底热水活动与海相富有机质层形成的关系[J].地质论评,2003,49(6):588-595.
- [15] 张文正,杨华,解丽琴,等.湖底热水活动及其对优质烃源岩发育的影响[J].石油勘探与开发,2010,37(4):424-429.
- [16] 孙省利,陈践发,郑建京,等.塔里木下寒武统富有机质沉积层段地球化学特征及意义[J].沉积学报,2004,22(3):548-552.
- [17] Herzig P M, Becker K P, Stoffers P, et al. Hydrothermal silica chimney fields in the Galapagos Spreading Center at 86° W [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 89(3):261-272.
- [18] Adachi M, Yamamoto K, Suigisk R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the Northern Pacific: Their geological significance as indication of ocean ridge activity [J]. Sedimentary Geology, 1986, 47(1/2):125-148.
- [19] Edmond J M, Damm K V. Hot spring at the seafloor [J]. Science, 1983, (8):37-50.
- [20] Taylor S R. Geochemical analysis by spark source mass spectrography [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1965, 29(12):1 243-1 261.
- [21] Rona P A. Criteria for recognition of hydrothermal mineral deposits in oceanic crust [J]. Economic Geology, 1978, 73(2):135-160.
- [22] Rona P A, Bostrom K, Laubier L, et al. Hydrothermal processes at seafloor spreading centers [R]. National Oceanic and Atmospheric Administration, 1983.
- [23] 黎彤. 化学元素的地球丰度 [J]. 地球化学, 1976, (3):167-174.
- [24] Halbach M, Koschinsky A, Halbach P. Report on the discovery of gallionella ferruginea from an active hydrothermal field in the deep sea [J]. International Ridge-Crest Research, 2001, 10(1):18-20.
- [25] Korzhinsky M A, Tkachenko S I, Shmlovich K I, et al. Discovery of a pure rhenium mineral at Kudriavy volcano [J]. Nature, 1994, (369):51-52.
- [26] McKibben M A, Williams A E, Hall G E M. Solubility and transport of platinum-group elements and Au in saline hydrothermal fluids; constraints from geothermal brine data [J]. Economic Geology, 1990, 85(8):1 926-1 934.
- [27] 倪建宇,姚旭莹.古海洋生产力的研究方法[J].海洋地质动态,2004,20(3):30-39.
- [28] 严德天,汪建国,王卓卓.扬子地区上奥陶—下志留统生物钼特征及其古生产力意义[J].西安石油大学学报:自然科学版,2009,24(4):16-19.
- [29] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis [J]. Organic Geochemistry, 1980, 2(1):9-31.
- [30] 何金先,段毅,张晓丽,等.渝南-黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏的生烃条件[J].海洋地质前沿,2011,27(7):34-40.
- [31] 邓宏文,钱凯.沉积地球化学与环境分析[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1993.
- [32] 腾格尔,刘文汇,徐永昌,等.缺氧环境及地球化学判识标志的探讨——以鄂尔多斯盆地为例[J].沉积学报,2004,22(2):365-372.
- [33] 腾格尔,刘文汇,徐永昌,等.无机地球化学参数与有效烃源岩发育环境的相关研究[J].地球科学进展,2005,20(2):193-200.
- [34] Wignall P B. Black shales [M]. Oxford: Clarendon Press, 1994.

编辑 经雅丽

(上接第27页)

- [10] 刘成林,葛岩,范柏江,等.页岩气成藏模式研究[J].油气地质与采收率,2010,17(5):1-5.
- [11] 杨振恒,腾格尔,李志明.页岩气勘探选区模型——以中上扬子下寒武统海相地层页岩气勘探评价为例[J].天然气地球科学,2011,22(1):8-14.
- [12] 张丽雅,李艳霞,李净红,等.页岩气成藏条件及中上扬子区志留系页岩气勘探前景分析[J].地质科技情报,2011,30(6):90-93.
- [13] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等.中国页岩气研究现状与发展趋势[J].石油学报,2010,31(4):689-694.
- [14] 刘成林,范柏江,葛岩,等.中国非常规天然气资源前景[J].油气地质与采收率,2009,16(5):26-29.
- [15] 张大伟.加速我国页岩气资源调查和勘探开发战略构想[J].石油与天然气地质,2010,31(2):135-139.
- [16] 李世臻,乔德武,冯志刚,等.世界页岩气勘探开发现状及对中国的启示[J].地质通报,2010,29(6):918-924.
- [17] 刘洪林,王红岩.中国南方海相页岩吸附特征及其影响因素[J].天然气工业,2012,32(9):5-9.
- [18] 刘洪林,王红岩,刘人和,等.中国页岩气资源及其勘探潜力分析[J].地质学报,2010,84(9):1 374-1 378.
- [19] 葛忠伟,樊莉.页岩气研究中应注意的问题[J].油气地质与采收率,2013,20(6):19-22.
- [20] 范柏江,师良,庞雄奇.页岩气成藏特点及勘探选区条件[J].油气地质与采收率,2011,18(6):9-13.
- [21] 梁兴,叶煦,张介辉,等.滇黔北下古生界海相页岩气藏赋存条件评价[J].海相油气地质,2011,16(4):11-21.
- [22] 马宁,侯读杰,包书景,等.页岩气资源潜力评价方法[J].油气地质与采收率,2012,19(6):25-29.
- [23] 牟书令.中国海相油气勘探理论技术与实践[M].北京:地质出版社,2009.
- [24] 马力,陈焕疆,甘克文,等.中国南方大地构造和海相油气地质[M].北京:地质出版社,2004.
- [25] Jarvie D M, Lundell L L. Hydrocarbon generation modeling of naturally and artificially matured Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas [C]. Southwest Regional Geochemistry Meeting, September 8-9, 1991, The Woodlands, Texas.
- [26] 陈安定.排烃机理及厚度探讨[J].复杂油气藏,2010,3(3):1-5.

编辑 常迎梅